

令和 3 年度博士論文

土壌熱交換システムの長期性能予測手法の開発及び 同手法を用いたシステム性能の最適化

北九州市立大学大学院 国際環境工学研究科
環境工学専攻 建築デザインコース 白石研究室

2020DBB011

塘田 研仁

目次

| | |
|---------------------------------|--------------|
| 第 1 章 序論 | ・・・1 |
| 1.1 研究背景 | |
| 1.2 研究目的 | |
| 1.3 研究の学術的な必要性 | |
| 1.4 研究の社会的な必要性 | |
| 1.5 研究の新規性 | |
| 第 2 章 既往研究 | ・・・10 |
| 2.1 日本国内 | |
| 2.2 日本国外 | |
| 2.3 既往の研究成果 | |
| 2.4 既往研究のまとめ | |
| 第 3 章 基礎理論 | ・・・43 |
| 3.1 CFD | |
| 3.2 最適化 | |
| 3.3 強化学習 | |
| 第 4 章 長期性能予測手法の開発 | ・・・89 |
| 4.1 背景及び目的 | |
| 4.2 予冷・予熱効果の性能予測手法の開発及びその有効性の検証 | |
| 4.3 結露性状の評価手法等の開発及びその有効性の検証 | |
| 4.4 まとめ | |

第 5 章 逐次近似最適化によるシステム設計の最適化・・・144

- 5.1 背景及び目的
- 5.2 メタモデリングの概要
- 5.3 CFD 概要
- 5.4 メタモデリングの過程
- 5.5 メタモデリングの結果及び最適解の探索
- 5.6 解の候補を利用した設計手法の提案
- 5.7 まとめ

第 6 章 強化学習による運用制御手法の開発・・・164

- 6.1 背景及び目的
- 6.2 土壌熱交換システムの運用制御への強化学習の適用
- 6.3 FCRE による報酬設計手法の提案
- 6.4 解析条件
- 6.5 解析結果
- 6.6 まとめ

第 7 章 総括・・・196

- 7.1 総括
- 7.2 課題

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 社会情勢

日本では、多くのエネルギー源を海外からの輸入に頼っており、東日本大震災前ではエネルギー自給率が 20%程度であったのに対して、震災以降は更に自給率が低下し、2014 年は 6.0%^{1.1)}と過去最低となった。石油などのエネルギー源の輸入が長期に渡り滞るなど、有事の際の根本的な脆弱性を有した社会であると言える。一方で、人口減少や技術革新などにより、エネルギー需要は低減する方向に働くとの見方は強いが、世界の温室効果ガス排出量の増大に目を向けると、世界的に見てもエネルギー需要の高い日本の省エネルギー化への要求は高い。このように、有事の際の冗長性を高め、従来からのエネルギーをめぐる国内状況の構造に関して、エネルギーの安定的な確保、有効利用への転換が求められている。この冗長性を高める上で、各部門での技術開発、技術革命に加え、部門を超えて協力するなど、業界・国を超えて、包括的な解決策を考えていく必要があると考えられる。

政府は、2050 年までに CO₂ を含む温室効果ガスの実質的な排出をゼロにする、カーボンニュートラル社会の実現を目指すことを決定した^{1.2)}。近年は業務その他部門及び家庭部門の CO₂ 排出量は低減傾向^{1.3)}であるものの、より一層の取り組みが求められている。数あるエネルギー消費者の中でも業務及び家庭部門では、最終エネルギー消費で全体の 32%（日本、2014 年度^{1.1)}）を占めているため、省エネルギー社会の実現に向けて、業務及び家庭部門の省エネルギーの強化もその一つの柱として位置づけられている。業務及び家庭部門では建築物、住宅の省エネルギー化が要求されており、建物の高断熱・高気密化や高効率空調機、全熱交換器、LED 照明等の省エネルギー技術の導入、再生可能エネルギー・未利用エネルギーの活用が有効である。建設業、とりわけ CO₂ 排出量の多い建物の運用段階での施策としては、これらの技術を進化・統合させることで、建築物については、2020 年までに新築公共建築物等で、2030 年までに新築建築物の平均で *Zero Energy Building* (ZEB)を実現することを目指す。また、住宅については、2020 年までに標準的な新築住宅で、2030 年までに新築住宅の平均で *Zero Energy House* (ZEH)の実現を目指している^{1.4)}。

1.1.2 土壌熱交換システム

ZEB、ZEH を達成するための手法の一つとして外気負荷削減を目的とした土壌熱交換システムがある。これは、外気導入の際、地中に埋設したチューブや地下ピット等に外気を通し、予冷・予熱を行った上で空調機・外調機もしくは室内へ直接導入するシステムである。日本ではクールチューブ、ヒートチューブ、アースチューブ、クールピット、ヒートピットなど様々な呼称があるが、本論文ではそれらを総称し、「土壌熱交換システム」と定義する。海

外では *Earth-to-Air Heat Exchanger* (EAHE)、*Thermal labyrinths*、*Ground-coupled heat exchanger*、*Earth tube* などと呼ばれている。同システムは地域や気候にもよるが、およそ 3 割の外気負荷の削減が可能であり、少ないイニシャルコストで長期的かつ多大なランニングコストを抑えることが可能である。

土壌熱交換システムは大きく二種に分類される。Figure 1.1 にシステムの方式を示す。

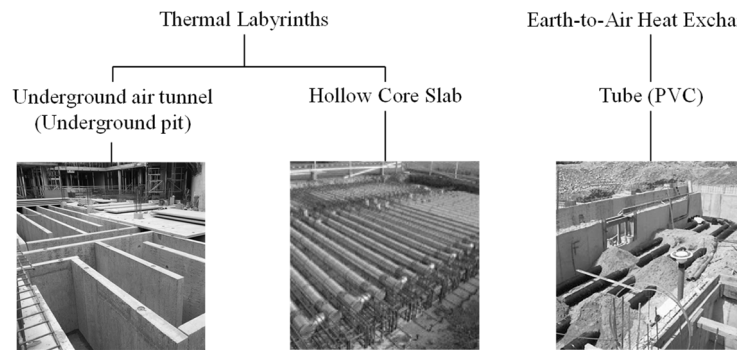


Figure 1.1 Type of Thermal Labyrinths and EAHE system ^{1.5), 1.6), 1.7)}

まず、*Thermal Labyrinths* のうち、地下ピット方式（左）は構造上必要な地下ピットや地中に埋設したコンクリートの空間に壁を適切に設け外気導入の経路を作り、外気の予冷・予熱を行う。ボイドスラブ方式はスラブへの蓄熱分による予冷・予熱を期待するため、土壌熱のやり取りを行うのはスラブの下側のみと、省エネ効果に対する土壌熱の寄与率は低い。一方で、地中に埋設した PVC のチューブに外気を通して外気負荷の削減を図る、チューブ方式ではチューブを埋設するための追加工事が必要なため、イニシャルコストが高くなるデメリットはあるものの、地下ピットを必要とせず、細い関係で外気導入が完結する住宅など（基礎コンクリート下に埋設するのが一般的）の小規模建築で採用事例が多い。また、一般的な土壌熱交換システムは、システムを通して外気を外調機もしくは室内に直接導入して外気供給を行うが、発展形として、システムの末端に追加の熱源（外部に突出した太陽光の集熱ダクトで再加熱等）を加えるような応用を加えたハイブリッドシステム ^{1.8), 1.9)}、ガスタービンの吸気に外気の代替として、システムを通した冷却された空気としてタービンの発電効率を向上させるシステム ^{1.10)}、室内空気をシステム内で循環させて室内の熱負荷を処理するクローズドループシステムなど、応用先は多岐にわたる。尚、本来の *Thermal Labyrinths* では、コンクリート自体への蓄熱により導入外気の外気温度を平準化させることを目的としている。また、*Thermal Labyrinths* は外気負荷をより削減するために、土壌熱+蓄熱（コンクリート）と外気の熱交換を行うこととなる。従って、本論文では *Thermal Labyrinths* EAHE と位置づけている。

1.2 研究目的

本論文では、その土壤熱交換システムを対象に次の 1)～3)を目的とし、システムの各種性能の評価手法を構築した上で、最適な形状や運用条件を明らかにし、システムの設計から運用までの全体での最適化を目指す。

- 1) 省エネ効果及びシステム内での結露性状の高精度・高速予測手法の開発
- 2) 上記手法を用いた設計変数の最適化
- 3) 強化学習を用いた土壤熱交換システムの最適制御則の構築及び運用条件の検討

土壤熱交換システムのうち、地下ピット方式は形状が建物毎に異なる上、その形状が複雑であるなどの理由から三次元かつ非定常の CFD による熱伝達性状等の詳細な再現が望ましい。しかし、CFD の計算負荷等の兼ね合いもあり予測精度と計算コストを両立させた設計手法の確立が十分になされていないのが現状ⁱである。更に、運用上の問題点の一つに、竣工後、微生物の増殖などに伴う空気質汚染といった問題が生じ、その対策が後手に回ってしまう場合がある。地下ピット方式のシステムの設計時には同システムを設計・運用する上での諸性能として省エネルギー効果、導入外気の空気質の確保、外気導入量、導入・運用コストを総合的に判断した上でシステムを設計する必要がある。その性能を左右する設計変数のうち、設備設計者の裁量による変数に流路長さや直上階の床からの伝熱性能、システム経由での外気導入量・時間帯及びその条件が例に挙げられる。しかし、性能に対する各設計変数の寄与の程度が明らかにされておらず、設計・運用時の指針などは確立されていない。本論文で前述の指針を提示しそれを適宜参照する、もしくは本論文で提案する CFD ベースの解析手法を評価関数として最適化問題を解くことで設計の最適化の課題を解決できると考えている。一方でシステム自体の熱容量が膨大であるため、制御結果の応答スケールが極めて長大であり、将来的な影響を加味した上でのリアルタイムの最適制御が困難である。省エネ効果を最大化しつつ、導入外気の空気質を担保した上での運用が求められる一方、日本のような高温高湿の気象条件にて最適な運用制御を目指す、多くの場合で目的関数となる省エネ効果や導入外気の空気質がトレードオフの関係性を示すため、その最適化は困難を極める。従って、システム運用段階では、要求風量に応じたスケジュール制御や逐次の外気及びシステム内の状況に基づいた制御により運用されているのが実情^{1,11)}である。本論文では下記及び Figure 1.2 に示す開発・検証を踏まえ、これらの課題を解決していく。

ⁱ 既往研究のレビュー及び性能予測の課題を含む現状の土壤熱交換システムの課題の詳細な整理は第二章で行う。

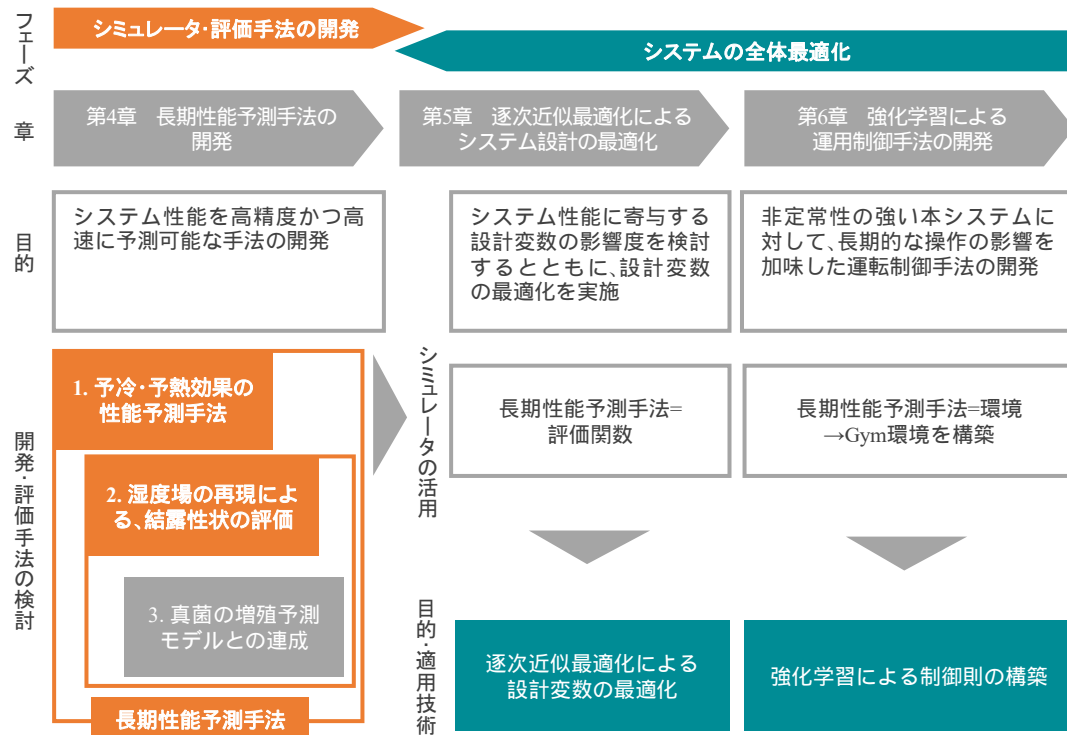


Figure 1.2 Framework of this paper

1) 長期性能予測手法の開発・検証（第 4 章）

流れ場の計算負荷を低減した土壤熱交換システムの予冷・予熱効果の年間性能予測手法の提案を行い、実在オフィスの地下ピットを対象に年間性能予測を実施すると共に、従来の CFD での解析時間及び精度との比較により提案手法の有効性を検証する。更に、結露評価手法の提案を行った上で、同解析手法を応用し真菌の増殖予測モデルと連成させることで、空気質汚染リスクと予冷・予熱効果の両面から外気導入手法の検討を実施する。この手法を用いて、空気質汚染の抑制策として考えられる外気導入経路や外気導入条件等に関するケーススタディを実施し、結露等の発生状況に関する詳細な分析を行い、予冷・予熱効果も合わせて評価した上で、それぞれの空気質汚染の抑制策の有効性を総合的に検証する。

2) 逐次近似最適化による設計変数の最適化（第 5 章）

土壤熱交換システムの設計段階で、設計者側の要求性能に応じて設計変数を検討できる応答曲面や解の候補の提示による設計資料等の整備を行う。具体的には、サンプリング手法に 1) で開発した長期性能予測手法を採用した逐次近似最適化を実施し、応答曲面や解の候補の提示、並びに各種性能に対する設計変数の影響度を分析する。

3) 強化学習を用いた土壤熱交換システムの最適制御則の構築（第 6 章）

土壤熱交換システムの運用最適化問題を解く上で、制御出力への判断基準等が複雑であり、将来への影響を加味した動的な制御が必要であることから、Data Driven な手法の一つである強化学習による運用制御を行い、その適用可能性の検討を主目的とする。強化学習は制

御対象から得られる状態とユーザーが目的に応じて定義する報酬から、行動を決定するプロセスを通して、報酬の総和を最大化するような行動を学習する。一方で、強化学習がブラックボックスモデルであり、制御の判断基準の説明が困難であることから、強化学習がどのような入力パラメータを重視しているかを可視化する。これにより、実運用を視野に入れた最適な運用制御を構築する上で参考となりうる制御ロジックの考え方を示す。

1.3 研究の学術的な必要性

建築物全体での省エネルギーを実現していく上で外気負荷の低減は必須である。本システムはその外気負荷を低減する手法の一つであり、実際の建築物への適用事例も多い。しかし、第 2 章の既往研究レビューに示す通り、シミュレータや実測に基づく性能検証やシミュレータを用いた設計パラメータスタディを研究テーマにした事例が多く、システムの運用手法を始めとして定性的にも定量的にも明らかになっていない特性が多い。例えば、システムの省エネ効果や結露性状の事前の評価は極めて困難であり、これまでの運用条件や制御手法が妥当かどうか判断する手段が無い。それらの妥当性は、実運用のフェーズでの検証ではじめて明らかになる。本論文で提案する高速化手法を用いた長期的なシミュレーションにより、システムの特性を明らかにし、それらの知見の学術的な蓄積が期待される。

強化学習による制御は建築空間等の状態数が膨大で複雑な課題に対しても応用が可能であり、本対象システムのみならず、建築設備全体の運用最適化のような問題にも対応できる手法である。強化学習は従来の動的な制御手法による最適制御が困難であった土壤熱交換システムにおいて、最適な制御則を構築できる可能性があるが、同システムの制御に強化学習を適用した研究事例は無い。従って本論文にて土壤熱交換システムを対象に強化学習制御を適用し、その有効性の検証により、強化学習の建築設備への適用事例の一つとして参照される研究であると考えている。

1.4 研究の社会的な必要性

近年、国内では地域を問わず土壤熱交換システムの導入事例が増加傾向にあるため、省エネ効果や結露性状の評価手法の開発及び結露に伴った空気質汚染を防除しつつ、外気導入に伴う空調の省エネを実現する実用的な最適運用、制御手法のニーズは高く、本論文の波及効果は大きい。省エネルギー性や快適性を両立させた建築設備システムの提供が重要視されつつある中で、設備機器単体の効率化や各種システムを連携させ効率的なシステムを構築するなどのハード面からこれらの課題を改善していく動きがある。しかし、建築設備の制御手法は単純なシーケンス制御や PID などの古典的な制御手法が主流である。また、逐次の制御や運転計画の最適化により、省エネ効果と室内環境の両立を目指した研究や検証の流れもある。ZEB・ZEH などを目指す上ではハード面、ソフト面から包括的に技術向上を

進めていく必要があるが、本論文では特にソフト面を意識して運用時の最適化にフォーカスしている。

制御インターバル毎に操作による将来的な影響を予測しながら制御する Model Predictive Control 等による逐次最適化問題を解きつつ制御を行うアプローチもさることながら、Data Driven なアプローチにて最適な制御則を構築する手法がある。Data Driven なアプローチでは、シミュレータを用いたデータの生成、もしくはビッグデータの活用により、室内外の環境と機器類の操作値と室内空気質環境などの目標（例えば PMV）の関係性から、その目標を最適化するにはどのような操作が適しているかを学習する。同手法はそれらの関係性を数式や物理モデルでの記述が困難もしくは操作が複雑な制御対象で有効性が高い。

土壌熱交換システムでは非定常的な遷移（土壌等への蓄熱）を考慮する物理モデルに基づいたリアルタイムでの制御が極めて困難であるため、本論文では Data Driven なアプローチの代表格である強化学習による制御則の構築を目指している。同手法の具体的な実装例として、例えば筆者は業務にてショールームの建築空間を対象に Data Driven なアプローチの一つである強化学習を用いた運用制御アルゴリズムを開発している^{1,12)}。操作対象が多くそれらが相互に影響を及ぼすようなシステム（例えば空調と照明の発熱の関係）の最適化問題を考える場合、従来のシーケンス制御や PID では制御性能の限界により困難である上、MPC の場合は、物件ごとに予測モデルを構築する必要があり、建物の大規模化つまりセンシング数の増加に伴い、計算コストが増大し、リアルタイムな制御が困難を極める。一方で、Data Driven なアプローチでは、事前に構築したシミュレータや実際の運用データを用いて学習を行えばよい。このため、系が複雑な対象では有効性が高いと考えられ、なおかつ、別の建物の設備に制御則を移植したい場合は、Few shot learning などの技術により、元の学習時のデータより少ないオーダーのデータ量で移植先のシステムに適応可能であるなど、制御則の横の展開が期待されている。今後は、Data Driven なアプローチに基づき、ビッグデータを用いた建築設備技術への適用が普及すると考えている。

しかし、同手法は近年研究・開発が進んでいる技術であるため、技術的な適用可能性を示した事例が少ない。特に、操作による影響が数日～数ヶ月先まで続く本システムのような問題に対しては、報酬の遅れを伴い、学習が困難であるなどの理由により適用事例は無い。そこで、本論文にて、特に制御が困難であると推察される本システムの制御問題を対象とし、強化学習による制御の有効性を示し、制御が困難な他の建築設備の制御問題に対する一つの有用な事例となるものと考えている。

1.5 研究の新規性

本論文の新規性の高い点は、最終目標として強化学習を土壌熱交換システムの運用・制御に応用する試みであるが、設計・運用段階を問わず通常、強化学習による制御則の構築は困難である。実運用を見据えると、シミュレータ上で事前学習した制御モデルの実建物へ

の転用が必須であるが、学習に使用した仮想環境のシミュレータと実建物での乖離がある場合、適切に制御ができない恐れがある。通常の質点系の物理量を解く物理シミュレータは計算速度の観点から、大量の試行が必要な強化学習にとっては都合が良いが、空間分解能に限界があり、現実環境との乖離が生じやすい。特に、3 次元的に生じる結露性状の詳細な把握は不可能である。3 次元的な結露現象を再現しつつ、予冷・予熱量を実用上十分な予測精度で評価できるシミュレータとして CFD によるアプローチが考えるが、長期での解析に加え一回の学習で数十～数百の試行を繰り返すには現実時間で数ヶ月～数年のオーダーでの時間を要し、CFD を強化学習の環境とするには計算コスト面でのハードルが高い。そのため本論文では、前述の非定常 3 次元の CFD をベースとした性能予測手法を用いて、土壤熱交換シミュレータを開発すると共に、同シミュレータを強化学習の環境として予冷・予熱効果や結露性状を逐次評価しつつ、外気条件や CFD 側の特定位置での物理量を状態値とすることで学習環境を構築する。これらの観点から、本論文は高精度な仮想環境上でのシミュレータを開発する点やそのシミュレータを強化学習の環境として長期に渡る学習を実施する点で独創的である。

また、強化学習では、学習時にどのような報酬を設計するか人間が定義する必要があるが、報酬の設計に際しては、Factual and Counterfactual Reward Estimation (FCRE) を考案し、実装した上で学習を行う点も特筆して独創的であると言える。FCRE による報酬の定義の特徴的な点は、実行した行動に加えて、反事実の結果を予測し、報酬計算に組み込む点である。一般的な強化学習の報酬の計算手法と比較して、選択した行動が適切か、反事実の行動が適切かを比較するような報酬を定義する。これに対して通常の強化学習では行動 a を実施し、その行動のみの結果に対する即時報酬を得ることが前提であり、選択しなかった行動（反事実）は評価されない。同様の行動を評価する機会は、類似した状況下となる遠い将来のステップ・エピソードである。従って、多様な経験を獲得するために多くの試行回数を繰り返す必要があるため、学習の収束に時間を要する。FCRE では選択した行動に対するフィードバックが即座に行えるため、学習の安定性、最適な方策獲得の可能性及び学習収束速度の向上が期待できる。その結果、学習に要する時間を大幅に削減できるため、実装を視野に入れた場合、様々なパラメータスタディや検討を実施できるようになり、それらを通じて高い制御モデルの構築に寄与すると考えている。

本論文はこれまでの土壤熱交換システムの設計・運用時の課題を一通り解決するような研究課題と言え、独創性及び新規性の高い研究であると考えられる。

参考文献

- 1.1) 経済産業省: エネルギー白書 平成 27 年度エネルギーに関する年次報告,
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016html/2-1-1.html> (accessed 2021.5.29)

- 1.2) 首相官邸: 第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説, https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html (accessed 2021.5.29)
- 1.3) 首相官邸: 2019 年度における地球温暖化対策計画の進捗状況, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai44/siryou1.pdf> (accessed 2021.5.29)
- 1.4) 経済産業省: エネルギー基本計画について, http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/ (accessed 2021.5.29)
- 1.5) Spectral: Blade II at University of Oxford's first BREEAM Outstanding building, <http://spectral-lighting.co.uk/community/?p=535> (accessed 2021.5.29)
- 1.6) 一木翔, 尹奎英, 田中英紀: ボイドスラブ基礎によるクール/ヒートチューブ換気システムの性能に関する研究 (第 3 報) システム熱交換特性の分析と設計手法の確立, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 181-184, 2013.9
- 1.7) J. Pfafferoth: Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency, Energy and Buildings, Vol. 35, No. 10, pp. 971-983, 2003.11
- 1.8) S. Jakhar, R. Misra, M.S. Soni and N. Gakkhar: Parametric simulation and experimental analysis of earth air heat exchanger with solar air heating duct, Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 19, No. 2, pp. 1059-1066, 2016.6
- 1.9) V. Bansal, R. Mishra, G.D. Agarwal and J. Mathur: Performance analysis of integrated earth-air-tunnel-evaporative cooling system in hot and dry climate, Energy and Buildings, Vol. 47, pp. 525-532, 2012.4
- 1.10) S. Barakat, Ahmed Ramzy, A.M. Hamed and S.H. El Emam: Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system, Energy Conversion and Management, Vol. 111, pp. 137-146, 2016.3
- 1.11) 吉岡沙野, 田中宏明, 奥宮正哉, 尹奎英: CO₂ 濃度制御・クールヒートトレンチ・全熱交換器を組み合わせた外気負荷削減システムの効果検証 第 2 報 クール/ヒートトレンチと全熱交換器の導入効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 1275-1276, 2011.7
- 1.12) 竹中工務店: 竹中工務店とHEROZ、AI を搭載した空間制御システム『Archiphilia™ Engine』を共同開発「EQ House」にて、学習によって成長する建築を実証, <https://www.takenaka.co.jp/news/2019/06/01/index.html> (accessed 2021.5.19)

第2章 既往研究

本章では、2.1 及び 2.2 にて土壌熱交換システムを題材とした日本国内外の既往研究のレビューを行う。2.3 では、本論文の先行研究の解説を行う。最後に 2.4 では、レビュー結果を元に、同システムの研究テーマの類型化や課題とされる項目などについてまとめる。

2.1 日本国内

| | |
|---|---|
| 木村建一 他 | クールチューブの涼房効果に関する研究 その5 湿分移動に関する実験解析 ^{2.1)} |
| チューブの材料を塩ビ管から透水管とすることによる、除去熱量の変化について検討した論文である。結果として、透水管では管内で水分蒸発が起こり、導入外気が加湿されるため、顕熱+潜熱の処理熱量は塩ビ管よりも低いということを明らかにした。 | |
| 木村建一 他 | クールチューブの涼房効果に関する研究 その6 期間除去熱量の年間シミュレーションと経済性評価 ^{2.2)} |
| 一次元の簡易な計算モデルにより、チューブ方式が室温に与える影響を考察しており、また、チューブ方式の経済性についても検討を行っている。まず、チューブ方式が室温に与える影響ではオープンループとクロズドループの比較を行い、オープンループでは経路長さにはさほど依存せず、室内を冷却することができている。一方で、クロズドループでは、経路長さに大きく影響を受けており、経路長さが長いほど、室内が冷却されている。 | |
| 石原修 他 | クールチューブの冷却効果に関する実大住宅実験及びシミュレーション解析 クールチューブによる室内熱環境の改善に関する研究 第1報 ^{2.3)} |
| チューブを埋設した実大試験住宅を対象に冷却効果を実験により明らかにし、土壌と地表面の熱収支や床下空間の熱移動、チューブ内の水分凝縮を考慮した三次元の差分解析により、経路長さ、外気導入量、埋設深さについて、冷却能力に対する感度解析を実施している。まず、実験結果として、熊本の夏季において、システムの導入により室温を日中で1℃以上、低下することを確認している。また、感度解析の結果として、経路長さが40mとなると、8月の出口温度が最大でも24.7℃となり、外気導入量が大きくなると、冷却量は増加するが、出口温度が高くなり、埋設深さが深くなるほど、出口温度は低下することが示唆された。 | |

| | |
|--|---|
| 張晴原 他 | クールチューブの設計出口温度と冷却エネルギー量の検討 クールチューブによる室内熱環境の改善に関する研究 第2報 ^{2.4)} |
| 既報の解析プログラム ^{2.3)} を用いて、日本の10都市を選定し、7月・8月のチューブ出口温度と入口温度の相関により、一次回帰式を提示している。また、連続運転、間欠運転時の出口温度の推定式及び冷却エネルギーを求めており、オープンループとクローズドループの換気量についてのケーススタディにより、条件の変化による冷却量の特性を確認している。 | |
| 石川善美 他 | クールチューブの地中熱回収性能に関する数値シミュレーション ^{2.5)} |
| 土壌及びチューブを考慮した三次元の解析を行うことで、チューブ方式の熱的性能について検討した論文。解析では、チューブ内の熱伝達、土壌の熱伝導を含めた三次元モデルを用い、経路長さ、埋設深さ、管径、外気導入量に関するケーススタディを実施している。また、間欠運転など、システムの運用スケジュールに関してのケーススタディも実施していることから、チューブ方式の設計資料の拡充の観点から比較的有效な論文である。 | |
| 井上宇市 他 | 実験計画法によるクールチューブの土壌蓄採熱効果に関する研究 ^{2.6)} |
| 経路長さ、埋設深さなどの各因子がシステムの長期的な熱的特性に及ぼす影響を実験計画法に基づく数値解析により明らかにし、設計時の基礎資料となる情報の提示を行っている。 | |
| 上田真也 他 | クールチューブの冷却効果に関する研究 管内表面が湿っている場合 ^{2.7)} |
| 既往研究で使用した簡易モデルに対して、解析手法の見直しを図り、また、顕熱に加えてチューブ内が常に濡れている状態を仮定して、蒸発潜熱がシステムの性能に与える影響について評価している。チューブ内の飽和条件の有無で出口空気のエンタルピーに変化は見られなかったが、顕熱交換のみを考えた場合は表面を飽和状態とすることによる有効性は見出している。 | |

| | |
|---|---|
| 上田真也 他 | クールチューブの冷却効果に関する研究 地盤内の熱水分同時移動を考慮した場合 ^{2.8)} |
| <p>既報までは二次元モデルを対象としていたが、これを三次元及び三次元近似とすることで、二次元近似による結果との比較することで近似に伴う精度低下の影響を考察し、精度改善が可能な三次元の近似モデルを提案している。また、土壌の熱水分同時移動減少も考慮し、水分移動がチューブ表面の状態に及ぼす影響について評価している。近似結果として、チューブ内の伝熱面積を考慮した二次元モデルでは三次元モデルと同等の精度が出ることを確認している。土壌の水分移動も考慮した解析では、日本の典型的な気象条件下では管表面が全面的に濡れているため、表面飽和のモデルで近似が可能であることが判明しており、降雨が少ない地域や管が透水管などの場合には表面が乾燥するため、熱水分同時移動を考慮する必要がある。</p> | |
| 田中英紀 他 | 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その1 夏期におけるアースチューブの初期運転実績 ^{2.9)} |
| <p>1996年の7月末に開館した建物に導入された地下ピット方式のシステムを対象とした一連の研究の第1報である。本論文では、運用初年度の夏季の実測を行い、その結果を考察している。出入り口温度差の平均は約3℃であった。同システムの給気用送風ファンは外気温度が低いと停止する設定となっていたが、この境界値を25℃とすることで、概ね妥当な制御ができていたと述べている。</p> | |
| 渡辺孝佳 他 | 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その2 アースチューブの初年度運転実績 ^{2.10)} |
| <p>冬季を含む運用初年度のシステムを対象として実績の報告を行っている。出入り口温度差が小さくなる9月でも給気ファンの動力が冷却量を上回ることは無かった。冬季では、平均で5℃の予熱効果が得られたことを確認しており、夏季、冬季ともにシステムの有効性が示されている。</p> | |
| 渡辺孝佳 他 | 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その4 実測と解析結果の比較 ^{2.11)} |
| <p>地下ピット方式のシステムを対象に実測と簡易なモデルによるシステム性能の予測結果との比較を行っており、地中温度や出口温度については概ね一致していた。予冷・予熱効果は、予熱量に実測との誤差が確認できた。システムの利用に伴うシステム上の居室への熱的影響は無視し得ないものであることを示唆している。</p> | |
| 孫元得 他 | 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その5 アースチューブの第2年度実測結果 ^{2.12)} |
| <p>既報^{2.9)}の運用2年目の実測結果について報告した論文。前年度の出口温度及び土壌温度がほぼ一致していることから、年周期で安定して運用できていることが確認できた。</p> | |

| | |
|--|---|
| 渡辺孝佳 他 | 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その6 数値解析による検討 ^{2.13)} |
| 複雑な形状のシステムの簡易モデルによる予測を行い、実測結果との対応を確認した後、長期シミュレーションにより運転開始3年目から年周期的定常状態に達してシステムの運用が安定的となることを確認している。 | |
| 孫元得 他 | 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その7 冬期湿度実測と夏期の結露可能性検討 ^{2.14)} |
| 本論文ではピット内の湿度環境を対象に実測結果を報告し、結露発生状況などの報告を行っている。外気導入口付近では雨水が侵入し、それが蒸発して導入外気が加湿されている可能性が示唆された。また、目視やデータ不足の問題から断定できないが、外気の湿度が高い、もしくは降雨時において表面で結露が発生していた可能性が高いとしている。 | |
| 孫元得 他 | 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その9 システムの設計条件の影響に関する検討 ^{2.15)} |
| 仮定の建物を対象に、システム性能に対する地下ピット内の面風速や地域の依存性、直上居室への影響などを解析により検討している。結果として、面風速や直上居室の用途が性能に大きく影響を及ぼすことが示唆された。また、今回の計算条件での経路長さの最大での取得熱量と比較して、これから90%の予冷・予熱効果が得られる経路長さは基準の1/3であり、際限なく経路長さを伸ばしてもイニシャルコストが跳ね上がるだけで、効果もそれほど期待できないことが判明した。 | |
| 孫元得 他 | 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その10 二重スラブの吸・放湿性に関する検討 ^{2.16)} |
| 躯体との熱交換に伴う導入外気の湿度変動についての検討をシミュレーションにより実施している。本論文での熱水分同時移動は蒸気拡散支配を仮定しているが、このモデルで湿度も概ね予測が可能であると述べている。また、地下湧水などでピットの床面が濡れていることを想定した解析も実施しており、蒸発潜熱で約1の外気温低下が見られたが、その分、絶対湿度が上昇する上に、外気の潜熱が比較的大きくなり、外調機での除湿の負荷が大きくなる結果となった。これより、地下湧水等の対策が必要であることが示唆された。 | |
| 孫元得 他 | 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その11 中規模オフィスに適用した場合の省エネルギー性に関する検討 ^{2.17)} |
| 本論文では対象を事務所ビルに導入された地下ピット方式のシステムを対象に、土壤熱交換システムもしくは顕熱交換器を導入した場合の省エネ効果の比較を行っている。結果として、外気負荷の削減率は顕熱交換器のほうが高いことが確認できた。ただし、顕熱交換器は消費エネルギーが大きいため、結果的に空調のエネルギー消費量削減率で考えると土壤熱交換システムの方が効率的であった。 | |

| | |
|--------|---|
| 孫元得 他 | 土壌熱容量を用いた空調外気負荷低減システムに関する研究 ^{2.18)} |
| | <p>システム性能を予測する既往の地下ピット方式のモデル（二次元熱伝導+流体の移流）を用い、性能に影響を及ぼす要因の分析及びシステムの導入効果について検討している。結果については、既往の土壌熱交換システムに関する研究成果と同様に、システム内の風速が大きくなるにつれ、システムの出口温度は土壌温度に近づく。また、システムの有効伝熱面積が大きくなると、風速による出口温度の差は無くなっていく。また、システムの導入効果については比較対象として全熱交換器を導入した場合との比較を行っており、風速と有効伝熱面積の条件によっては土壌熱交換システムが有利で、別の条件下では全熱交換器のほうが省エネ性に優れているなど、設計時は設計条件に応じて外気負荷削減のシステムを選択する必要性が示唆された。</p> |
| 孫元得 他 | 高知県四万十いやしの里におけるアースチューブの導入効果に関する研究 その1 冬期におけるアースチューブの温・湿度実測結果 ^{2.19)} |
| | <p>高知県の温泉・宿泊施設に導入されたシステム（地下ピット方式）を対象に、運用初年度の冬季の温湿度の実測結果を報告した論文である。対象システムでは冬季の出口温度は 20℃ でほぼ一定に保たれており、経路長さとしては十分に長く、有効伝熱面積も不足なく取れていたものと考えられる。また、流入出口の絶対湿度より、システム内で加湿されていることが確認できた。これは、運用初年度ということもあり、コンクリート打設後の放湿によるものが強いためであると考えられる。</p> |
| 尹奎英 他 | 近接埋設されたクール/ヒートチューブの熱交換特性 近接埋設される複数管型クール/ヒートチューブに関する研究 - その1 - ^{2.20)} |
| | <p>近接埋設されたチューブを対象として実測、及び同システムの数値解析モデルを作成し、精度検証を行い、同モデルにより近接埋設が熱的性能に及ぼす影響について検討を行っている。結果として、近接埋設の程度によっては性能低下が起こるため、地域性や熱交換量などを勘案してチューブの本数や管内風速などを決定すべきと述べている。</p> |
| 大和田淳 他 | 年間測定結果とシミュレーションによるクール/ヒートピットの熱特性評価 ^{2.21)} |
| | <p>福岡県に立地する中・高等学校に導入された地下ピット方式のシステムを対象に、2年間の実測とシミュレーションによるケーススタディを実施している。実測結果として、まず、1年目の予熱量は 6.2GJ、予冷量は 4.8GJ となった。2年目はそれぞれ 7.2GJ、5.7GJ であった。予測モデルは簡易なものであったが、実測結果と概ね一致しているとしている。また、結露は年間数時間発生していたと述べている。</p> |

| | |
|--|--|
| 趙亮 他 | 日射負荷の大きな建築空間に採用された自然換気システムの有効性 その2 地中熱利用装置の導入による省エネルギー効果 ^{2.22)} |
| 福岡県北九州市の若松区の研究・事務所複合施設（本論文と同じ対象建物）に導入された地下ピット方式のシステムを対象とした論文で、実測結果をもとにシステムによる省エネ効果について議論している。実測結果として、8月上旬の外気温度が30℃を上回る時間帯でもシステム出口温度が25～27℃で安定していた。また、冬季でも同様の効果を確認でき、システム導入の有効性が示された。外調機の消費電力の削減率は直接外気を外調機に導入した場合と比較して夏季で20%、冬季で41%削減された。 | |
| 松井朝美 他 | ヒート&クールチューブシステム建築における地中採熱温度の解析 石川県七尾市の小規模診療所について ^{2.23)} |
| 実在の住宅に導入されたチューブ（埋設深さ1.5m）を対象にチューブ出口温度と室内温度の測定を行い、その結果を報告した論文である。出口温度については、外気温度と比較して年間で安定的であり、1月で15℃前後、8月の日中で24℃前後となっており、外気負荷は大きく削減されたことが伺える。チューブ内の結露判定として、出口の相対湿度をもとに検討しており、8月に95%を超える頻度が高くなり、この時期は結露していた可能性が高いとしている。 | |
| 守屋寛之 他 | 環境調和型図書館の熱環境性能評価に関する研究 その2 クールヒートチューブの性能評価と閲覧室温熱環境の評価 ^{2.24)} |
| 地下ピット方式を対象に夏季・冬季及び秋季の短期実測による性能検証を実施した論文である。まず、夏季は加湿されることなく、顕熱のみ処理されており、冬季は3℃程度の予熱効果が確認できた。空調負荷に換算してシステム導入により14%程度負荷の削減に寄与した。 | |
| 松鶴悟実 他 | 地中熱利用ピットと自然換気装置を採用した施設における微生物による室内空気汚染に関する調査研究 ^{2.25)} |
| 土壌熱交換システムを導入した建物で浮遊真菌濃度などの実測を行い、室内微生物汚染の対策を講じる上での基礎資料の提示を目的としている。結果として、システムを導入した建物では、浮遊真菌濃度が日本建築学会の提唱する維持管理基準 ^{2.26)} を満足することができていなかった。また、システム運用時には室内及び外気の浮遊微生物濃度に相関性が見られ、室内微生物濃度は外気からシステムを経由して影響を受けることが示唆された。 | |

| | |
|--------|--|
| 松鶴悟実 他 | 外気導入方法と地中熱利用ピットに着目した検討 地中熱利用ピットと自然換気装置を採用した施設における微生物による室内空気汚染に関する調査研究 (その2) ^{2.27)} |
| | <p>土壌熱交換システム及び自然換気装置の併用システムを有する2つの建物を対象に、地下ピット内の温湿度環境や浮遊細菌・真菌濃度などを測定している。まず、2つの建物では異なる外気導入方法であるが、浮遊細菌濃度については双方とも維持管理基準濃度^{2.26)}を満足していた。浮遊真菌濃度について、冬季以外は維持管理基準濃度を超えることが多く、最大で基準の32倍であった。浮遊真菌のI/O比は概ね1.0以下であり、窓の開閉が行われていた室やピット経由の外気が利用されている室などで高くなる傾向にあった。また、夏季の地下ピット内の相対湿度は平均で80%、相対湿度が70%を超える時間の累積が85%と微生物の増殖には十分な環境にあったと推察される。</p> |
| 松鶴悟実 他 | 地中熱利用ピットに敷設された調湿・脱臭材の微生物汚染に関する研究 ^{2.28)} |
| | <p>地下ピット内に敷設される調湿材は夏季の潜熱負荷の除去やシステム内を高湿度環境に維持させないこと(=微生物の増殖を防ぐ)を目的としている。しかし、その調湿材がシステム内での微生物汚染となる可能性があることから、調査を実施している。結果として、調湿材の経年劣化により、表面に付着物が堆積し、ここで細菌・真菌が増殖している可能性が高いと述べており、調湿材がピット内の空気質汚染の要因となりうるとの見解を示している。</p> |
| 石松維世 他 | 地中熱利用ピットを有する建物における浮遊微生物の濃度変動と温湿度環境 ^{2.29)} |
| | <p>地下ピット方式の土壌熱交換システムを導入した建物において、浮遊微生物の濃度測定及び温湿度測定に基づいて、既往の研究より、さらに詳細な浮遊微生物に関して調査を行っている。I/O比の高い中間期ではピットと外気濃度比のP/O比が極めて高いことから、室内の濃度は地下ピットの微生物の濃度に依存することが示唆された。</p> |
| 垂水弘夫 他 | ヒート&クールチューブ住宅の地中熱利用効果に関する調査研究 北陸に立地する戸建モデル住宅を対象として ^{2.30)} |
| | <p>北陸の住宅に導入されたチューブ方式のシステムを対象にした年単位の長期的な実測を基に、システム性能の検討や北陸地域の住宅での適用可能性について考察した論文である。導入したシステムでは、チューブの出口温度が外気温度比で冬季は5~7高く(月平均)、夏季は4~5低く保てていることが確認できた。チューブに近い深さの地中温度は年平均が15℃、振幅が4℃程度と比較的安定した温度であった。夏季の全熱処理については、7月の顕熱が1,033MJ、潜熱が2,390MJであり、結露水を組み上げる装置を導入した同システムでは潜熱の処理が顕熱の2倍程度となっていた。本実測は2年間に渡り行われているが、1年目と2年目の取得熱量は同等であり、システム効率の劣化は見受けられなかった。</p> |

| | |
|--|--|
| 中川浩 他 | 戸建住宅における地中熱を活かした換気熱損失低減に関する研究 その2 複数住戸の連結したヒート&クールチューブの実測結果 ^{2.31)} |
| 住宅に導入されたチューブ方式のシステムを対象に夏季及び冬季の実測結果を報告している。夏季の日中で約 5 の予冷、冬季の夜間で約 10 の予熱効果があることが確認できた。 | |

| | |
|---|---|
| 林宏幸 他 | トピシマ式省エネ床下ピットの改良 - ピット内臭気の低減 - ^{2.32)} |
| 地下ピット方式のシステムは躯体をそのまま利用するため、表面仕上げについては考慮されることが少なく、表面仕上げの仕様によりシステム内の臭気の抑制が可能かどうかを検討した論文。結果として、多少のイニシャルコストの増加を許容できるのであれば、パネコート型枠で仕上げることで臭気の抑制が可能であると結論づけている。 | |

| | |
|--|---|
| 吉岡沙野 他 | CO ₂ 濃度制御・クールヒートトレンチ・全熱交換器を組み合わせた外気負荷削減システムの効果検証 第2報 クール/ヒートトレンチと全熱交換器の導入効果 ^{2.33)} |
| 土壌熱交換システムと全熱交換器を併用した外気導入システムを対象に、システムの導入効果について報告している。同システムでは全熱交換器が外調機側に設置されており、土壌熱交換システムで外気を予冷・予熱した後、全熱交換器を介して外調機、室内へ導入される。結果は、A) 外気負荷削減システムなし、B) CO ₂ デマンド制御、C) CO ₂ デマンド制御+土壌熱交換システム、D) CO ₂ デマンド制御+土壌熱交換システム+全熱交換器で運用した場合比較を行っている。計測期間(8月~9月)の2ヶ月の外気負荷処理の一次エネルギー消費量はAが約250GJ、Bが約90GJ、Cが約70GJ、Dが約50GJと三種の外気負荷削減システムを導入することで、約80%の省エネ効果があることが示された。 | |

| | |
|---|--|
| 工藤裕太 他 | 地中熱利用ピットにおける調湿材での微生物汚染の実態調査 ^{2.34)} |
| 地下ピット内に敷設された調湿材が空気質汚染の温床になりうるとの報告 ^{2.25)} を受け、実際に利用されている調湿材に付着した微生物及び浮遊微生物の測定などを行っている。結果として、調湿材表面では <i>Acremonium</i> sp.のみが検出された一方で、ピット内の壁面で検出された真菌のうち、優占種が <i>Acremonium</i> sp.ではないことから、調湿材表面が真菌の生育にとって好環境であることを導き出している。また、室内側の同種が高濃度で検出されたことから、ピット内で増殖した真菌が外調機を経由し、室内へ侵入していることを明らかにしている。 | |

| | |
|--|---|
| 高田暁 他 | 実住宅に導入されたクールチューブの熱湿気性状の解析 複雑な形状を有する管の簡易モデルに基づく解析と管内空気質評価 ^{2.35)} |
| チューブ方式のシステムを対象に、複雑な形状を有する実在住宅のチューブを簡易化したモデルを作成し、実測結果との再現性の比較を行い、更に、チューブ内の湿気、結露性状を解析し、カビ指数による空気質環境の評価を実施している。実測との再現性については改善の余地がある。カビ指数の結果から、チューブの奥に向かうに従い、真菌の増殖の可能性が高まると結論づけている。 | |
| 重久大樹 他 | 大空間における地下ピットを利用した外気負荷低減システムの効果に関する研究 ^{2.36)} |
| 2008年の10月に鹿児島市で開館した展示施設に導入された地下ピット方式のシステムを対象に、室内の快適な温熱環境と空気質の確保の観点から CFD の基づく最適な運用形態の提案を行ったものである。土壌熱交換システムの流出口温度を室内設定温度に近づけたい場合は外気導入量の低減、もしくは間欠運転が望ましいと結論づけている。 | |
| 尹奎英 他 | 環境共生型公共施設における省エネルギー手法の導入について その1 実測調査による省エネルギー手法の導入効果検証 ^{2.37)} |
| 環境共生型公共施設を対象に、導入された土壌熱交換システムやエアフローウィンドウ等の省エネ手法の効果を検証している。夏季における実測結果として土壌熱交換システムの流出口では 25 ± 1 で安定していた。流出入口の絶対湿度は流出口側が高くなる傾向が見られ、これは結露水の蒸発やコンクリートの吸放湿が原因と見ている。 | |
| 青木貴均 他 | 環境共生型公共施設における省エネルギー手法の導入について その2 CFD によるアースチューブ導入効果の検証 ^{2.38)} |
| CFDにより、実測結果との比較や、結露発生を検討などを行っている。結露の発生の可能性としては、入り口から奥に向かうに従い高くなると述べている。 | |
| 徳村朋子 他 | ヒート&クールピットを利用した空調設備の省エネルギー性能に関する研究 学生寮における年間測定結果による検証 ^{2.39)} |
| 東京都内の学生寮に導入された地下ピット方式のシステムを対象に、1年間の予冷・予熱効果の評価を行った結果を報告している。システムを利用することで外気の顕熱負荷は暖房期間で18%、冷房期間で80%の削減となった。区間別の予冷・予熱効果としては、前半部で多くの熱交換を行っており、後半部では経路長さあたりの熱交換量としては前半部よりも劣るが、一定量の熱交換が行われていたと報告している。 | |

| | |
|--|---|
| 徳村朋子 他 | ヒート&クールピットを利用した空調設備の省エネルギー性能に関する研究 シミュレーションによる年間の熱特性評価 ^{2.40)} |
| 非定常熱収支式を解くことで、対象建物の計画段階の熱的性能の評価を実施した結果を報告している。解析は外気が経由するピットの区画をそれぞれ 9、15、25 とした場合の検討や外気導入量を変更した場合の検討、システムの利用期間についての検討などを行っている。結果を基に、ピットの利用区画や外気導入量、利用期間を決定している。 | |
| 一木翔 他 | 住宅基礎を用いたクール/ヒートチューブ換気システムの性能に関する研究 その1 秋期の運用方法に関する実性能の比較評価 ^{2.41)} |
| ボイドスラブを活用したシステムを対象に実測結果や性能の評価を行っている。システムの利用形態として、冬期は連続運転が有効である。夏期の蓄熱分を冬期に利用することを目的として、秋期のシステム運転を停止した結果、土壌温度が運転開始 1 年目より高く推移したが、チューブ出口温度には明確な違いは確認できなかったことなどを報告している。 | |
| 一木翔 他 | ボイドスラブ基礎によるクール/ヒートチューブ換気システムの性能に関する研究 (第3報) システム熱交換特性の分析と設計手法の確立 ^{2.42)} |
| 上田ら ^{2.8)} が提案した近似的三次元モデルを応用し、円管ダクトに対応するモデルの構築を行った後に同モデルを用いてダクト管径や管内風速、チューブ長さなどに関するケーススタディを実施している。また、同結果を踏まえ簡易的にシステムの性能予測が可能となる近似式を作成し、システムの設計手法の提案を行っている。 | |
| 三田村輝章 他 | 地中熱を利用した RC 外断熱住宅に関する研究 (第4報) 年間エネルギー消費量とピット温度の推移、浮遊真菌濃度の測定結果 ^{2.43)} |
| 2010 年 12 月に竣工した住宅に導入された床下ピットを利用したシステムを対象に 2011 年 1 月～2013 年 3 月までの床下ピットの温度の実測や浮遊真菌濃度の測定結果を報告した論文である。床下ピット内の冬季の温度は運転開始 1 年目よりも 2 年目、3 年目のほうが高いことが確認された。また、真菌濃度の I/O 比は時期によって大きく異なるが、冬季の床下ピットは I/O 比が 6.5 と真菌の増殖の可能性が示唆された。 | |
| 三田村輝章 他 | 地中熱を利用した RC 外断熱住宅に関する研究 (第6報) TRNSYS TESS ライブラリモデルを用いた地下ピットの年間シミュレーション ^{2.44)} |
| 既往の文献 ^{2.43)} などで対象とした住宅の床下ピットの温度変動やシステムの導入効果を明らかにするために、TRANSYS TESS ライブラリモデルを用いた年間でのシミュレーションを実施した論文。まず、実測結果との比較を行ったが、一部温度分布の性状に実測と解析の誤差が見られた。システムの利用効果として、暖房負荷の削減率が 25%程度、冷房負荷が 8%程度であった。 | |

| | |
|--|--|
| 柳宇 他 | アースチューブにおける微生物汚染の実態とその対策方法 ^{2.45)} |
| <p>複数の建物に導入された土壌熱交換システム内の温湿度の特性の把握に加え、空気質汚染の実態を明らかにし、空気質の汚染リスクの低減策について検討している。結果としてある建物での7月下旬の出口の相対湿度はほぼ100%に近い状態となっていた。また、ドレン水の微生物についても測定を行っているが、建物によっては細菌量が非常に多い事例があった。浮遊真菌濃度に関しては入口よりも高い値を示す施設はなかった。ただし、入口ではそれほど高くない種が、出口では高くなる場合もあり、システム内で菌が増殖している可能性はある。対策としては出口側にフィルタの設置、システム内の洗浄（水もしくは薬剤）が挙げられ、これらの効果を検証した結果、プレフィルタで40%程度、中性能フィルタは浮遊真菌濃度が87%の低減効果が得られ、水による洗浄は限定的な効果、薬剤による洗浄は浮遊真菌濃度の低減が確認された。</p> | |
| 鈴木啓泰 他 | 学校建築のクールヒートトレンチの効果検証 その2 実測概要と冬期の取得熱量 ^{2.46)} |
| <p>学校建築に導入されたシステムを対象に冬季の実測結果を報告した論文である。1週間の実測結果として、取得熱量は外気導入量の変化によるものよりも外気温度の変動による影響が大きいことや、竣工前の状態で給気ファンが6台運転時(18,900 m³/h)で40kWの予熱効果があることを確認している。</p> | |
| 鈴木啓泰 他 | 学校建築のクールヒートトレンチの効果検証 その4 実測データの分析 ^{2.47)} |
| <p>学校建築に導入されたシステムを対象に外気負荷削減効果について分析した論文である。顕熱の処理熱量の最大月積算値は7月で22GJであった。</p> | |
| 足立勇樹 他 | 学校建築のクールヒートトレンチの効果検証 その5 性能向上のための数値解析 ^{2.48)} |
| <p>CFDにより地下ピットの断面形状と予冷・予熱効果の関係を明らかにすることを目的とした論文である。形状の検討ケースは通常の梁の状態、人通口程度の狭い通気口がある場合、逆梁である。最も効果的なのは逆梁の形状であった。ただし、同解析は短期的な非定常解析であり、長期的に見ると結果が変化する可能性がある。</p> | |
| 長尾拓 他 | 自然エネルギーを利用した全館換気空調システムに関する研究（その1）実建物におけるシステムの外気負荷削減に関する実測 ^{2.49)} |
| <p>地中熱や太陽熱、躯体蓄熱など複数の自然エネルギーを利用した全館換気空調システムを対象にこれらの自然エネルギーによる外気負荷削減効果について評価を行ったものである。土壌熱交換システムの寄与は夏季で32%、冬季で28%であった。</p> | |

| | |
|--|--|
| 姜允敬 他 | 札幌市内住宅における省エネルギー換気装置の微生物汚染調査 ^{2.50)} |
| <p>チューブ方式の土壌熱交換システムと全熱交換器が導入された住宅（北海道札幌市）を対象に、微生物増殖に伴う空気質の汚染について評価を行っている。尚、チューブの出口にプレフィルタ、全熱交換器に中性能フィルタが設置されている。12月の浮遊真菌濃度は外気が$20\text{CFU}/\text{m}^3$前後であったのに対して、フィルタを介した給気口が$33\text{CFU}/\text{m}^3$前後、チューブ内においては$2,307\text{CFU}/\text{m}^3$と、真菌の増殖の温床となっている可能性がある。また、時期によってはチューブ内で細菌・真菌が増殖していると考えにくい場合もあり、時期（チューブ内の温湿度環境）に応じて空気質の汚染リスクも変動する可能性が示されている。</p> | |
| 塚本隆史 他 | 地熱利用計画支援のための地中温度データベースの構築（その6） 免震ピットを利用したクールピットの省エネ効果算定手法の検討 ^{2.51)} |
| <p>免震ピットを利用したシステムを対象に三次元の非定常CFD（1日）による省エネ効果算定手法について検討した論文である。CFDの解析結果としてシステム内の流れ場及び温度場のコンター図・ベクトル図を示し、また、出口温度に対する各部位の寄与率も示している。冬季の寄与率は、一日を通して天井面の寄与率が高く、日中に床面の寄与率が上昇することを明らかにしている。日中の床面の寄与率が上昇する理由は流れ場に対する浮力の影響度の変化によるものが強いと推察される。</p> | |
| 張晴原 | 中国におけるアースチューブの冷却効果 その1 地中自然温度、吹出し温度と冷却エネルギー ^{2.52)} |
| <p>既往研究で提案したプログラムを利用し、中国各都市で土壌熱交換システム（チューブ方式）を導入した場合の予冷効果及び適用可能性について検討した論文である。緯度の高い北京とハルビンでは、地中温度が低いため、夏季のような高湿な外気導入時はチューブ内で結露が発生することが示唆された。結果として、予冷のポテンシャルはハルビンが最も高いと述べている。</p> | |
| 木下雅広 | クール/ヒートピットの形状と性能に関する研究 ^{2.53)} |
| <p>本論文では学校建築4施設に導入された形状の異なる地下ピット方式のシステムを対象に、長期実測による熱的性能の把握やシステム内での空気質汚染に関する評価、距離、形状に関するケーススタディをCFDにより実施したものである。まず、熱的性能については、地下ピットの距離に応じて予冷・予熱効果が得られたが、経路長さが100mを超えると導入外気温度の変化が見られなくなった。また、あるシステムでは夏季の14時の外気負荷削減率が82%、冬季の8時で36%であることが明らかとなった。空気質に関して、経路長さが短いシステムの場合は、躯体表面の結露発生の可能性が低かったが、一部の施設では地下ピット内で真菌の増殖リスクの高い期間があったと報告している。CFDによる形状の検討については、顕熱交換量が無梁<順梁 逆梁<人通口となり、人通口の縮流効果により地下ピット内の流速が高まり、対流熱伝達が促進され、このような結果になったものと推察される。</p> | |

| | |
|---------|---|
| 橋本翔 他 | スマートビル構築のための要素技術検証とその最適化に関する研究 (第4報)地中熱利用(クール/ウォームピット)の性能評価 ^{2.54)} |
| | <p>埼玉県に立地する研究・事務施設に導入された地下ピット方式のシステムを対象として、運用初年度のシステム性能の実測結果を報告し、さらに、システム内での空気質汚染についての状況も報告した論文である。システムの外気導入量は他の建物に導入されたシステムと比較すると、少量である。ピット上部は事務室や機械室、エントランスロビーなどであるが、エントランスロビーでは床冷暖房の配管が通っているため、エントランスロビーの床を断熱材で断熱としてある。夏季は流出口温度が 25℃ 前後の予冷効果が得られ、冬季は 15℃ 前後の予熱効果が得られていた。湿度関連については代表日のみの記載であるが、代表日での結露の発生は低い。</p> |
| 林徹夫 他 | 研修施設における環境配慮技術の計画と実証評価 (第4報)クールヒートトレンチと全熱交換器による外気負荷の削減効果 ^{2.55)} |
| | <p>研修施設に導入された地下ピット方式の土壤熱交換システム+全熱交換器の外気負荷削減システムを対象に、同システムの省エネ効果を報告している。7月下旬から8月上旬までの外気負荷削減率は両システム併用で約 34%、その内訳は土壤熱交換システムが 65%、全熱交換器が 35%であった。尚、ファンの動力など、システムの消費電力については考慮してない。また、結露に関して、7月・8月のシステム内の相対湿度は 100%となっていたものの、結露を目視で確認できなかったとしている。</p> |
| 山口福太郎 他 | 地下ピットの蓄熱利用による空調熱源機の効率向上に関する研究 その1 隙間からの漏気を考慮した CFD モデルの検討 ^{2.56)} |
| | <p>個別分散型空調方式の効率を向上させる手法として、室外機の吸い込み空気を土壤熱交換システムで予冷・予熱したものとする手法を提案し、同提案手法をさらに効率的(予冷・予熱効果を向上させる)に運用するために、CFD を用いた改善策の検討を行った論文である。改善策として、ピットに隙間を作り、そこを通して伝熱効果を促進させることを提案しているが、これを CFD で隙間を簡易にモデル化し、解析により検討を行っている。</p> |
| 松鶴さとみ 他 | クール/ヒートピット設備における真菌叢に関する研究 第1報 実建物における真菌汚染実態と同定手法 ^{2.57)} |
| | <p>鹿児島市の建物に導入されたシステムを対象に、真菌汚染の状況などを報告している。一年間の湿度の実測結果として、期間全体の 71%が相対湿度 70%を上回る結果となっている。地下ピットの浮遊真菌濃度は外気やピット経由の外気を利用する室よりも高い傾向にあり、また、ピット経由の外気を利用する室か否かで比較すると、7月、8月において、ピット経由の外気を利用した室の方が、濃度は 10 倍ほど高い。これらを踏まえ、システム内での真菌の増殖の可能性が高いことが示されている。</p> |

| | |
|---|---|
| 湊智大 他 | 免震ピット利用空調の建物規模、吸気条件別評価 ^{2.58)} |
| 免震ピットを利用した土壌熱交換システムを対象に、外気導入量を増大させた場合と流入口の位置を変更させた場合の検討を CFD により行っている。解析結果をまとめると、流出入口の温度差は外気温度と躯体温度、経路長さ、外気導入量の条件が影響してくるが、システムの形状が概ね決定している場合は、外気導入量の調整により、狙った温度差を引き出すことも可能であると述べている。 | |
| 松田優 他 | 石垣市におけるクールチューブの効果に関する実測調査 ^{2.59)} |
| 沖縄県石垣市の空港内の格納庫に導入されたチューブ方式+ピット方式の併用システムを対象に、夏季の実測調査の結果を報告した論文。7 月末のシステムの流出口温度は 27 程度であった。夜間には流出口よりも流入口のほうが空気温度は低いという逆転現象が発生していた。ただし、本システムは亜熱帯気候地域への導入であるため、夏季のチューブ出入り口の湿度の状況について考察する必要がある。 | |
| 神保歩未 他 | 地域防災環境科学研究所における環境建築研究 その 25 ヒート&クールトレンチの熱的效果に関する調査研究 ^{2.60)} |
| 北陸に立地する学校建築（小学校と大学校）の地下ピット方式のシステムを対象に実測結果を報告した論文である。システム内の換気回数は小学校で 2.7 回、大学校で 21.8 回と大きく差があるが、システム表面積あたりの予冷・予熱効果（顕熱）として 7 月は小学校で 13 kJ/(m ² ・day)、大学校で 716 kJ/(m ² ・day)、12 月は小学校が 968 kJ/(m ² ・day)、大学校が 1,589 kJ/(m ² ・day)となった。尚、小学校では、夏休み休業中に地下ピット内でカビの発生を確認し、運用を停止している。 | |
| 稲垣友規 他 | クール/ヒートチューブの性能予測と設計手法提案に関する研究 その 3. 冷房期間における設計出口温度と交換熱量の予測 ^{2.61)} |
| 既往研究で用いられたモデル ^{2.20)} を用いたパラメータスタディを実施し、設計段階で要求される流出口温度と予冷・予熱効果の推定手法の検討を行い、同手法を用いたシステムの設計手法の提案を行った論文である。同推定手法では、ある時刻の流出口温度を外気温度やチューブ伝熱面積、面風速の関数として求め、積算の熱交換量は外気導入量や時間、前述の流出口温度の関数とするなど、陽的に性能の予測が可能な計算手法を提案している。 | |
| 茂呂将崇 他 | 地中熱を利用した全館空調住宅に関する研究 2 年間にわたる実測結果と数値シミュレーションによる分析 ^{2.62)} |
| 住宅に導入されたチューブ方式のシステムを対象に 2 年間の実測結果を報告し、さらに数値解析により性能評価を実施した論文である。外気が 1.0 ～ 32.8 の間で変動するのに対して、流出口温度は 8.8 ～ 27.5 の範囲に収まっている。解析により、チューブの有り無しによる年間冷暖房負荷の削減率を求めているが、暖房負荷が 10.6%、冷房負荷が 16.8%の削減率となっていた。 | |

| | |
|---|--|
| 武廣絵里子 他 | 教育施設におけるクールアンドヒートチューブの空気質評価（その1）施設内の細菌，カビの挙動 ^{2.63)} |
| 福岡県に立地する教育施設 2 ヶ所を対象に土壌熱交換システム内での微生物の調査結果を報告している。一方の対象建物のチューブ内では夏季に浮遊細菌・真菌濃度が高まる傾向が確認された。ただし、日本建築学会が提示している浮遊細菌・真菌濃度の基準値を下回っていたため、室内空気質への影響の可能性は低いと結論付けている。 | |
| 要佑樹 他 | 在宅介護モデル住宅におけるエコリフォーム前後の温熱環境比較評価 その2 導入したパッシブシステムの効果検証 ^{2.64)} |
| リフォームを行った在宅介護モデル住宅に導入されたチューブ方式のシステムを対象に、夏季の短期的な実測結果を報告している。外気温度はシステムを利用することで3.0～5.5 程度予冷されていた。また、流出入口の水蒸気圧の変化から、チューブ内での結露の発生が示唆された。 | |
| 松鶴さとみ 他 | クール/ヒートピットにおける微生物汚染による室内空気汚染に関する研究 その2 ピット内建材の付着真菌に関する検討 ^{2.65)} |
| ピット内及び室内の浮遊真菌（ピット内や外気、居室、階段室を対象）、建材等への付着真菌（階段室や各種設備、壁等が対象）に関する実態調査を行った論文。浮遊真菌濃度はすべての測定点において日本建築学会の基準値 50cfu/m ³ を上回っていた。 | |
| 茂木拓也 他 | 地中熱を利用した全館空調住宅に関する研究 前橋市内のモデル住宅を対象とした年間を通じた性能評価とチューブ内結露に関する考察 ^{2.66)} |
| モデル住宅に設置されたチューブ方式のシステムを対象に処理熱量及び結露の発生に関する報告。取得熱量は最大 31.9MJ/day、除去熱量は最大 22.9MJ/day。測定期間（2015/5/15～2016/12/11）における積算結露時間の割合は約 5%であった。また、月積算結露時間の最大は 2016/9 の 219.8 h で月の約 31%の頻度で結露が発生したことを示唆していると報告している。 | |
| 松鶴さとみ 他 | クール/ヒートピットにおける微生物汚染による室内空気汚染に関する研究 その3 遺伝子解析による真菌種の検討 ^{2.67)} |
| システム内で空気質汚染が問題となっている実建物において、浮遊真菌種の把握を行った論文である。真菌の把握にはスライドカルチャー及び PCR 法による遺伝子解析による同定を行っており、遺伝子解析ではスライドカルチャーでは同定できなかった菌種の特定している。菌種は Penicillium spp. Cladsporium spp. Aspergillus spp.などが主であった。 | |

| | |
|--------|---|
| 鈴木宏和 他 | 都市型エコキャンパスのエネルギー性能と環境性能の検証 第3報 クール&ヒートピットの熱利用の検証 ^{2.68)} |
| | <p>ピット方式のシステムを導入した大学を対象に外気負荷削減に関わるシステムの概説及びその導入効果についての報告を行った論文。同システムの制御は外気エンタルピーh_oとピット出口付近のエンタルピーh_pを比較し、冷房時において$h_o > h_p$のとき、暖房時は$h_o < h_p$のとき、システム経由で外気導入を行う。更に、システム経由で外気導入を行うタイミングでピット出口相対湿度が95%以上の場合、強制的にバイパス経路からの外気取り入れを行う。同制御により、暖房時のピット経由の外気を利用した割合は80~90%であったのに対して、冷房時は60~80%であり、上述の相対湿度による制御で20%ほど導入が制限されていた。年間での外気負荷削減率は棟、年にもよるが、10~30%であった。</p> |
| 赤井仁志 他 | 省エネルギー配慮型庁舎の空調設備計画とエネルギーマネジメントの取り組み 第2報 空調設備計画における省エネルギー手法の概要 ^{2.69)} |
| | <p>土壌熱交換システムを導入した市庁舎の概要を示している。同市庁舎では、免震ピット内に外気を導入し、DSを経由し各階のAHUへ接続している。年間での外気負荷削減量は約21%と見込んでいる。続報で実測結果を示す。</p> |
| 岸本卓也 他 | 省エネルギー配慮型庁舎の空調設備計画とエネルギーマネジメントの取り組み 第5報 間接式アースチューブの運転性能評価結果 ^{2.70)} |
| | <p>既報にて概説した新築市庁舎の土壌熱交換システムの詳説及び性能検証に関する報告。同システムはピット経由で外気を取り込んでいるものの、ピット内に土壌熱交換システム用のOAダクトを設置し、土壌ではなく、ピット内の空気と熱交換を行うのが特徴的である。著者らは、ピット内の結露発生や真菌の増殖等のリスクを懸念し、このような間接方式を採用したと述べている。ダクトサイズは1,800mm×1,300mmに対し、風量は59,000 m³/hとなっており、AHUは室内のVAVユニットの稼働に応じてOAダンパの絞り込み+ファンのINV制御を行っている。風量に対して、ダクトサイズが小さいため、最大面風速は7.00m/sであることに起因し、システムによる昇温・降温効果は小さかった。夏季は外気と比較して1.1~1.6 低下、冬季は5~10 程度上昇していることを報告している。</p> |

| | |
|--|---|
| 柳宇 他 | 空調システムにおけるマイクロバイオームの実態解明とその対策に関する研究 第1報 クールピットにおける細菌叢の実態に関する調査研究 ^{2.71)} |
| <p>夏季のピット方式のシステムを対象に、細菌叢の実態調査の結果を報告した論文。前提条件として、室内側は2F、3Fの室内温度は26～27（湿度は不明）であり、ビル管法の基準を満足していることを確認していた。浮遊細菌濃度はピットの入口濃度が極めて高い数値を示していることや、奥に進むに従い、濃度が低下している傾向を確認している。更に、室内側の浮遊細菌濃度は日本建築学会の基準値 500cfu/m³を満たしていた。また、今回のサンプリング方式（空気：バイオサンプラー、表面付着菌：SecurSwabTM DNA Collectors、何れもSCD寒天培地にて培養）では、空気中と比較して表面のほうが検出された細菌の種類が多い結果となった。空気中では、ヒト、棒物由来の細菌が最も多く、約半数を占めている。一方、ピット表面は塩類土壌由来の細菌が半数を占めていた。これは、ピット表面のコンクリートであり、Nesterenkonia spp. のような菌にとって育成しやすい環境にあったためと推定される。</p> | |
| 杉原義文 他 | ホテルオリオンモトブにおけるエネルギー管理(第4報)エネルギー性能の分析 ^{2.72)} |
| <p>沖縄県に建設されたホテルを対象に土壌熱交換システムの導入効果等に関する報告。外気はデシカント空調機で処理しており、土壌熱交換システムで予冷・予熱を行っている。夏季シーズンの外調機負荷削減量は22MJ、冬季は77MJであった。</p> | |
| 松鶴さとみ 他 | クール/ヒートピット設備における真菌叢に関する研究 第4報 遺伝子解析による菌種の推定 ^{2.73)} |
| <p>既報と同じ建物において、浮遊真菌及びピット内の建材へ付着した真菌の遺伝子を解析し、菌種の推定を行っている。一部のサンプルからマイコトキシンを生成する菌の存在が明らかになった。</p> | |
| 茂木拓也 他 | 地中熱を利用した全館空調住宅における3年間を通じた性能評価 ^{2.74)} |
| <p>群馬県前橋市内の住宅に導入されたチューブ方式のシステムを対象に3年間の実測調査と分析を行った研究である。同システムは24時間換気にチューブを経由した外気を定常的に室内へ導入するものであり、チューブからの外気は防虫フィルタ・中性能フィルタを経由して空冷パッケージエアコンの室内機へ導入され、温調した後に室内へ給気する。実測結果において、チューブ内での結露に関する分析も行っており、チューブ内では連続して最長66時間結露が発生していたことを示唆している。更に、年積算での結露時間数は概ね5%、月別での最大が実測開始最終年度の8月であり、月全体の58%で結露が発生していたことを確認している。また、シーズンごとの積算処理熱量の観点から、ほぼ年周期的な定常状態となっており、年度ごとに大きな差はなかったことを報告している。</p> | |

| | |
|--|---|
| 松鶴さとみ 他 | クール/ヒートピット設備における真菌叢に関する研究 第5報 2018年度実測調査と遺伝子解析 ^{2.75)} |
| 既報と同じ建物において、システム内、外気、室内などの浮遊真菌の遺伝子を夏季、冬季のシーズン別に解析した結果の報告を行っている。夏季は <i>Aspergillus spp.</i> 、冬季は <i>Cladosporium spp.</i> が最も多く検出された。 | |
| 新村美月 他 | 空調システムにおけるマイクロバイオームの実態解明とその対策に関する研究 第2報 クールピットにおける細菌叢の経年変化 ^{2.76)} |
| 既報の続報で、次年度に再度同様の調査を行い、前年度との比較を行った論文である。属類の構成比は前年と比較すると大きく変化していた。ピット出口付近で50%以上占めていた <i>Nesterenkonia spp.</i> は4.6%まで低下しており、これは竣工年数の経過に伴うコンクリート表面の中性化等による影響と考えている。 | |
| 諏訪菜々瀬 他 | 地域の基幹病院における省エネルギーシステム導入事例（第5報）中間期における空調運用とクールピット導入効果 ^{2.77)} |
| 茨城県の大規模病院に導入された省エネルギーシステムの導入事例に関する一連の論文で、夏季における土壌熱交換システム等の導入結果を報告した論文。同システムはピット方式ではあるが、外気取入れガラリ、免震ピット、中庭（外部に開放）、外気取入れガラリ、外調機の順で経由するため、システムを経由した外気を一度大気開放させるシステムであり、極めて稀な事例である。論文で、外調機に対してピット経由の外気が導入されるかどうかを確認していたが、外調機風量とピット経由の外気風量は合致しておらず、ピット内への逆流、ピット経由での外気と中庭の頂部からの外気を混合したものが外調機に入っているタイミングも合った。一度大気開放させる理由はDSの確保が難しかったことも一因としてあるようだが、中庭の熱的快適性の確保が目的の一つであった模様である。システムの導入効果は、中庭3つのうち、2つは午前中に2程度の降温、残りの1つは4程度の降温が確認できた。一方で、午後になると先述の2つの中庭はピット直前の取入れ外気と同等となった。また、ピット内のサーモカメラを撮影し、露点温度(20.3)と比較すると表面温度が22.4以上であり、結露の可能性は低いと結論づけている。 | |

2.2 日本国外

日本国外でも土壌熱交換システムの実建物への適用やシステムに関する研究は行われているが、その多くはチューブ方式を対象としたものである^{2.78)}。海外では地下ピット方式に近い Thermal labyrinth が存在しているが、導入事例、研究事例としてはチューブ方式よりも劣る。以下では、日本国外の土壌熱交換システムに関する論文を紹介する。

| | |
|---|--|
| G. Mihalakakou | On the heating potential of a single buried pipe using deterministic and intelligent techniques ^{2.79)} |
| ギリシャのアテネの気象データなどを用いて TRNSYS の動的なモデルで解析を行っている。さらに、ニューラルネットワーク (NN) を使用して、アテネでのシステムの熱的性能を評価した。埋設チューブの出口温度の推定のためにニューラルネットワークを採用し、学習データとして外気温度、相対湿度、地中温度などを与え、バックプロパゲーションにより学習させている。結果として TRNSYS のモデルと NN モデルの結果を比較し、NN モデルを利用することで瞬時に TRNSYS と同等の結果が得ることが可能となった。さらに、NN モデルを用いて、チューブの出口温度に対する入力気象パラメータの影響度を分析し、最も重要なパラメータは地中温度であることが判明した。 | |
| R. Kumar et al. | Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network ^{2.80)} |
| 既報 ^{2.79)} と同様に一般的な解法である動的な解析手法（温度輸送の偏微分方程式）と NN モデルによる出口温度の推定の精度検証を行っている。結果として、NN モデルの入力側のパラメータを長さ、湿度、外気温度、地表面温度、埋設深さでの地中温度、外気導入量の6種とすることで精度が98%以上となった。 | |
| R. Kumar et al. | A design optimization tool of earth-to-air heat exchanger using a genetic algorithm ^{2.81)} |
| 本論文では、EAHE の熱的な性能に関して、様々な側面からの評価及び最適化の設計ツールとして遺伝的アルゴリズムを採用した場合の検討を行っている。最適化対象はチューブの半径、チューブの熱伝導率、長さ、外気導入量であり、それぞれの設計変数の最適な値や最適な設計変数の組み合わせを示している。 | |
| V. Bansal et al. | Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating ^{2.82)} |
| インド西部の EAHE を対象に三次元モデルを用いて解析を実施し、冬季の実測値との比較やシステム性能のパラメータスタディを行っている。尚、解析には FLUENT を採用し、その際の Δt は 100 s としている。結果として、実測との比較においては、妥当な予測精度を有していることを確認した。また、昇温効果は、管内流速の増加に伴い減少することが示唆された。 | |
| V. Bansal et al. | Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling ^{2.83)} |
| 既報 ^{2.82)} の論文の EAHE を対象として夏季の結果を示した論文。結果として、実測との比較においては、解析と概ね一致していた。管材の検討を実施したが、スチール、塩ビ管どちらの場合でも結果に差異は見受けられなかった。既報と同様に管内流速が EAHE の性能に大きく影響することが確認された。 | |

| | |
|---|---|
| A. Trzaski et al. | The influence of environmental and geometrical factors on air-ground tube heat exchanger energy efficiency ^{2.84)} |
| EAHE の性能評価手法並びにその検証とシミュレーションによる研究結果について提案している。開発した EAHE モデルにより EAHE の複雑性や運用条件、環境要因を含むパラメータの幅広い範囲で性能依存性の分析が可能としている。具体的には並列した管の数やパイプの直径、土壌の物性値、地表面の条件などが考慮できるこのモデルを元に各パラメータを変更することでシステムの性能にどの程度の影響を与えるのかを示している。 | |
| J. Vaz et al. | Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger ^{2.85)} |
| EAHE の実験+数値解析。実験（一年間、ダクト内の空気温度の変化を測定）はブラジル南部で行われた。この実験をもとに数値解析モデルの検証を行う。FLUENT を使って三次元の CFD+熱伝導解析を実施した。モデルはほとんど簡易化せず、複雑な地形、ダクトのクランクなどを再現している。実測結果と比較すると解析誤差は最大でも 15% 以下であった。この検証結果よりモデルの妥当性を示した。 | |
| V. Bansal et al. | Performance analysis of integrated earth-air-tunnel-evaporative cooling system in hot and dry climate ^{2.86)} |
| EAHE に加えて EAHE の出口に蒸発冷却器を備えたハイブリッドシステムを対象とした研究である。蒸発冷却器は屋外に設置し、屋外側に水を散布し、蒸発（ダクトを冷却）させ、導入外気と熱交換を行うことで予冷効果を向上させるための装置である。CFD によりハイブリッドシステムの冷却効果の検証を行っており、蒸発冷却器の有効性を示している。EAHE 単体での予冷効果が 4.5GJ、予熱効果が 4.9GJ であったのに対して、ハイブリッドシステムは通年で 12.5GJ と単体での予冷・予熱効果 9.4GJ を上回っていた。 | |
| R.S. Brum et al. | A new computational modeling to predict the behavior of Earth-Air Heat Exchangers ^{2.87)} |
| EAHE の熱的な性能を予測するために新たな解析モデルを提示することを目的としている。提案する解析モデルは、既往研究 ^{2.85), 2.88)} から更に単純化した上で、CFD の空間分解能を高めたモデルで計算の収束性の向上により、予測精度を保ったまま、既往のモデルと比較して 45% の計算時間を削減できた。また、同提案モデルを利用してパラメータスタディを実施している。 | |

| | |
|--|---|
| R. Mishra et al. | Transient analysis based determination of derating factor for earth air tunnel heat exchanger in summer ^{2.89)} |
| <p>システムの性能を評価する際は土壌の熱容量を考慮する必要があるが、長時間運用することで性能は低下することが知られている。そこで同論文では、Derating Factor (DF) と呼ばれる任意の位置、運用時間での性能低下指標を提示している。DF は $1 - (\text{非定常時, 入口から } L [\text{m}], \text{ 運用開始 } T [\text{h}] \text{ 後の流出入口温度差}) / (\text{定常時, 入口から } L [\text{m}] \text{ の流出入口温度差})$ で定義している。結果として、連続運用時間が長くなるに連れて第二項の分子が小さくなり DF は大きくなり、L が無限遠の場合（つまり無限に熱交換が可能）、DF は 0 に収束することを示している。また、パラメータスタディとして、土壌の熱伝導性能を変化させることで DF の応答を示した。</p> | |
| A. Sehli et al. | The potential of earth-air heat exchangers for low energy cooling of buildings in South Algeria ^{2.90)} |
| <p>アルジェリアでの EAHE の適用可能性を検討した研究である。一次元の熱流体解析により、2 つの変数（フォームファクタ（経路長さと管径の比）、管内レイノルズ数）の感度解析を行い、熱的性能への影響を検討している。</p> | |
| L. Ramírez-Dávila et al. | Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates ^{2.91)} |
| <p>数値解析により気候条件の異なるメキシコ 3 都市の EAHE の熱的性能を予測した。数値解析では二次元の CFD コードを用いてモデル化を行っている。管内のレイノルズ数に関するケーススタディを各都市で行った。結論として、EAHE の使用は土壌の熱容量が高い地域に立地する場合に適していることを示している。</p> | |
| T. S. Bisoniya et al. | Study on Calculation Models of Earth-Air Heat Exchanger Systems ^{2.78)} |
| <p>これまでに、EAHE の計算モデル化によりシステムの性能の予測を行うなどの研究が多く行われてきている。同論文では、EAHE の計算モデルを利用した全世界の研究論文（2014 年 3 月末時点）を対象に、レビューを行っている。シミュレーションのトレンドとしては、最初に一次元モデルの開発から始まり、1990 年代に二次元モデルが実用化されてきた。そして、徐々に三次元モデルによるシミュレーションへと遷移していった。尚、日本人の研究論文はレビュー内には入っておらず、地下ピット方式を採用した事例は確認できなかった。</p> | |
| M.K. Rodrigues et al. | Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method ^{2.92)} |
| <p>既往の研究 ^{2.87)} の続報である。既往の研究のモデルでは単管タイプのシミュレーションであったが、複数埋設管のタイプを検討した論文。単管の場合の流量と複数管の場合の合計流量が同じ場合、予冷は 73%、予熱は 115% も熱的性能が向上することを示している。</p> | |

| | |
|---|--|
| S. Barakat, et al. | Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system ^{2.93)} |
| <p>ガスタービンでの発電効率向上についての論文である。ガスタービンは吸気温度が低いほど、発電効率が向上することが判明しており、吸気に外気を利用する場合、夏季の外気温度では冬季よりも発電効率が低下することとなる。同論文では、夏季のガスタービンの吸気に EAHE システムで予冷した空気を利用することによるガスタービン発電効率の向上を検討した。結果として、EAHE システムとの併用により、ガスタービンの出力が 9%、効率が 4.8% 向上した。また、これにより年間で 166 万ドルのランニングコスト削減が可能であることを示している。</p> | |
| S. Jakhar et al. | Parametric simulation and experimental analysis of earth air heat exchanger with solar air heating duct ^{2.94)} |
| <p>対象地域の気象条件に依存するが、一般的に、冬季の EAHE による予熱は不十分であり、外調機で室温近くまで加熱する必要がある。このような背景のもと、本論文では、EAHE システムと太陽熱加熱ダクトを併用したシステムの実験及びシミュレーションモデルを提示している。結果として、冬季の EAHE による熱取得と太陽熱加熱ダクトによる熱取得は同程度であり、併用システムの有効性が示された。</p> | |

2.3 既往の研究成果

本論文の前身である研究成果は下記の通りである。

| | |
|--|--|
| 芦谷友美 他 | CFD 解析による夏季及び冬季の地下ピット内伝熱性状の動的評価 - 土壌熱交換システムの冷却・加熱効果の予測手法に関する研究, その1 - (2.95) |
| <p>本論文で対象とするオフィスビルに導入された地下ピット方式における導入外気の冷却・加熱効果や結露判定などを短期的及び長期的に評価するための解析手法の提案及びその有効性を示している。同論文ではまず短期的な評価手法として、地中の鉛直方向一次元熱伝導解析の結果を初期条件とした日周期レベルの非定常 CFD を実施し、夏季冷房時及び冬季暖房時における動的な冷却加熱効果やピット内伝熱性上の詳細評価や結露判定について、地下ピット方式を有する実在オフィスを対象に試みた。また、実測値と解析値との比較を踏まえ、同解析手法の予測精度の検証を行った。得られた結果は次の通りである。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 地中の鉛直方向の一次元熱伝導解析結果は地盤深さ約 8m 以降の温度が 17.6 に収束し、対象建物周辺の地中温度と概ね一致した。 2) 非定常 CFD では、初期条件として用いた地下ピット躯体及び地中温度分布に関して改善の余地は残るものの、実測結果と解析結果の比較より夏季及び冬季ともに地下ピット出口温度及び顕熱冷却・加熱量を概ね再現出来た。 3) ピット流出口の空気温度変化に対する各部位の寄与率を算出したところ夏季及び冬季ともに1日を通して床面の寄与率が最も大きい。ただし、夏季は導入外気の温度によって各部位の寄与率が大きく変化し、特に日中は導入外気の温度が高く、空気がピット上部に沿って流れるためピット内床面の寄与率が低下した。一方、冬季は各部位の導入外気の温度上昇への寄与率は1日を通してほとんど変化しない。 4) ピット内表面の各部位の平均ヌセルト数（以下、Nu 数）や床面の局所 Nu 数を算出したところ、床面の平均 Nu 数が最も大きく、また床面では特に流れの衝突・加速領域で局所 Nu 数が大きくなる傾向にあった。 5) 夏季冷房時のピット内の相対湿度は、深夜から朝方にかけては全体的に高く、流出入口での湿度差は 7.5%～8.0%となった。今回の解析条件では結露は発生しなかった。 | |

2.4 既往研究のまとめ

2.1 及び 2.2 で示した既往研究を大別すると、1) シミュレーション、2) 実測、3) シミュレーション×実測に大別される。尚、土壌熱交換システムの稼働条件を揃えた上でのケーススタディの実施は困難であるため、実験的なアプローチの研究は少ない。

1) シミュレーションに基づく研究

シミュレーションに基づく研究では、土壌熱交換システムの性能予測に関する計算手法の提案やケーススタディが主流であった。シミュレーションでは、2000 年代は質点系のシミュレーションモデルを採用し、長期的な熱的性能予測を実施する事例が多かった。質

点系によるアプローチの計算手法では、繰り返しの計算が容易であるため、グリッドサーチなどに基づく最適化計算を実施した事例も存在した。2010年代よりPCの性能向上や商用CFDコードの普及によりCFDによるシミュレーションの研究事例が増加している。一方で、CFDなどの計算精度を優先するようなアプローチでは、計算時間の制約から定常計算や日単位の短期的な計算に留まることが多い。CFDベースの計算高速化手法の提案は存在するものの、計算モデルのデフォルトⁱを行っており、システム内での詳細な湿度性状を計算できず、実運用で課題となる空気質汚染までの評価につなげることが困難であるのが実情である。このような背景もあり、システムの諸性能（例えば省エネ性や後述する空気質の確保）を適切に予測しつつ、多目的な最適化を実施した事例は存在せず、研究のニーズとして存在するものと想定される。

2) 実測に基づく研究

実建物に導入された土壌熱交換システムの性能確認を行う性能検証、運用段階での課題を見極めるための実態調査に関する研究が主であった。性能検証では、実建物に計測機器の設置や中央監視装置のログデータを元にデータ分析を行い、季節、年単位での性能の検証を行う事例が多く、特に熱交換量などの省エネ性にフォーカスすることが主であった。一方で、実態調査では、導入外気の空気質汚染を取り扱うことが多い。これらの結果として、室内の浮遊真菌はシステム内で増殖した真菌である可能性が高いという報告もあり、システム内での真菌増殖を抑制する必要性が示唆された。調査結果から運用段階における維持管理方法の検討まで踏み込んだ事例も存在した。

また、システムの運用制御を取り扱った研究では、制御ロジックのしきい値や逐次制御の手法の変更による性能への影響度合いを検討したものは存在するものの、現時点のみならず将来に渡り、（システムの諸性能の観点から）最適な制御を行うことを目指した研究は皆無であった。これは、同システムの非定常性が強いことに起因しているものと推察され、シミュレーションやビッグデータに基づくデータの分析により、最適な制御則の構築が求められているものと考えている。

3) シミュレーション×実測に基づく研究

主にはシミュレーションモデルの計算精度の妥当性確認のための精度検証を目的としてシミュレーションモデルの構築及びシミュレーションによる予測結果と実測結果の比較を行う事例も多く存在した。

以上をまとめると、いずれの研究でも「高精度かつ高速にシステムの諸性能を長期的に評価できる計算手法の提案」及び「システムの設計・運用を見据えた全体最適化」を目的とした研究事例は存在しなかった。特に、将来的な状態遷移を考慮した制御手法まで踏み

ⁱ 熱的性能予測では一定の予測精度は担保されているとの報告はある

込んだ研究事例は皆無であり、本論文の主目的の一つである、最適運用手法の構築に関しては先駆性の高い研究テーマである。

参考文献

- 2.1) 木村建一, 小野島一, 川原井大: クールチューブの涼房効果に関する研究 その5 湿分移動に関する実験解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, pp. 919-920, 1985.10
- 2.2) 木村建一, 小野島一, 川原井大: クールチューブの涼房効果に関する研究 その6 期間除去熱量の年間シミュレーションと経済性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, pp. 921-922, 1985.10
- 2.3) 石原修, 張晴原: クールチューブの冷却効果に関する実大住宅実験及びシミュレーション解析 クールチューブによる室内熱環境の改善に関する研究 第1報, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 429, pp. 7-16, 1991.11
- 2.4) 張晴原, 石原修: クールチューブの設計出口温度と冷却エネルギー量の検討 クールチューブによる室内熱環境の改善に関する研究 第2報, 日本建築学会計画系論文集, No. 477, pp. 11-18, 1995.11
- 2.5) 石川善美, 長友宗重, 吉野博, 木村茂夫: クールチューブの地中熱回収性能に関する数値シミュレーション, 日本建築学会東北支部研究報告集, pp. 151-158, 1991.6
- 2.6) 井上宇市, 石野久彌, 谷本潤, 水出喜太郎: 実験計画法によるクールチューブの土壤蓄採熱効果に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 41-44, 1992.10
- 2.7) 上田真也, 銚井修一, 吉田亨: クールチューブの冷却効果に関する研究 管内表面が湿っている場合, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 計画系, pp. 165-168, 1996.7
- 2.8) 上田真也, 銚井修一: クールチューブの冷却効果に関する研究 地盤内の熱水分同時移動を考慮した場合, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 環境系, pp. 213-216, 1997.5
- 2.9) 田中英紀, 奥宮正哉, 中原信生: 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その1 夏期におけるアースチューブの初期運転実績, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp. 469-472, 1997.2
- 2.10) 渡辺孝佳, 田中英紀, 永井久也, 奥宮正哉, 中原信生: 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その2 アースチューブの初年度運転実績, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 489-490, 1997.9
- 2.11) 渡辺孝佳, 田中英紀, 永井久也, 奥宮正哉, 中原信生: 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その4 実測と解析結果の比較, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp. 429-432, 1998.2
- 2.12) 孫元得, 渡辺孝佳, 田中英紀, 永井久也, 奥宮正哉, 中原信生: 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その5 アースチューブの第2年度実測結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 461-462, 1998.9

- 2.13) 渡辺孝佳, 永井久也, 孫元得, 奥宮正哉, 田中英紀, 中原信生: 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その6 数値解析による検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 463-464, 1998.9
- 2.14) 孫元得, 田中英紀, 永井久也, 奥宮正哉, 中原信生: 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その7 冬期湿度実測と夏期の結露可能性検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 437-438, 1999.9
- 2.15) 孫元得, 田中英紀, 永井久也, 奥宮正哉: 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その9 システムの設計条件の影響に関する検討, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp. 465-468, 2001.2
- 2.16) 孫元得, 永井久也, 奥宮正哉: 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その10 二重スラブの吸・放湿性に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 503-504, 2001.9
- 2.17) 孫元得, 田中英紀, 奥宮正哉: 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その11 中規模オフィスに適用した場合の省エネルギー性に関する検討, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp. 513-516, 2002.2
- 2.18) 孫元得, 田中英紀, 永井久也, 奥宮正哉, 中原信生: 土壌熱容量を用いた空調外気負荷低減システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 87, pp. 69-77, 2002.10
- 2.19) 孫元得, 奥宮正哉: 高知県四万十いやしの里におけるアースチューブの導入効果に関する研究 その1 冬期におけるアースチューブの温・湿度実測結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 641-642, 2003.7
- 2.20) 尹奎英, 田中英紀, 奥宮正哉: 近接埋設されたクール/ヒートチューブの熱交換特性 近接埋設される複数管型クール/ヒートチューブに関する研究 - その1 -, 日本建築学会環境系論文集, No.579, pp. 45-52, 2004.5
- 2.21) 大和田淳, 大橋清文: 年間測定結果とシミュレーションによるクール/ヒートピットの熱特性評価, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 613-616, 2005.8
- 2.22) 趙亮, 龍有二, 小島昌一: 日射負荷の大きな建築空間に採用された自然換気システムの有効性 その2 地中熱利用装置の導入による省エネルギー効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 1219-1220, 2007.8
- 2.23) 松井朝美, 垂水弘夫, 鈴木啓泰, 高屋利行: ヒート&クールチューブシステム建築における地中採熱温度の解析 石川県七尾市の小規模診療所について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 591-592, 2007.8
- 2.24) 守屋寛之, 水出喜太郎, 副島正成, 鹿子島修: 環境調和型図書館の熱環境性能評価に関する研究 その2 クールヒートチューブの性能評価と閲覧室温熱環境の評価, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 1411-1414, 2010.9

- 2.25) 松鶴悟実, 石松維世, 龍有二: 地中熱利用ピットと自然換気装置を採用した施設における微生物による室内空気汚染に関する調査研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 73, No. 632, pp. 1189-1196, 2008.10
- 2.26) 日本建築学会: 微生物による室内空気汚染に関する設計・維持管理基準・同解説, 丸善, 2005
- 2.27) 松鶴悟実, 石松維世, 龍有二: 外気導入方法と地中熱利用ピットに着目した検討 地中熱利用ピットと自然換気装置を採用した施設における微生物による室内空気汚染に関する調査研究 (その2), 日本建築学会環境系論文集, Vol. 75, No. 657, pp. 977-986, 2010.11
- 2.28) 松鶴悟実, 石松維世, 龍有二: 地中熱利用ピットに敷設された調湿・脱臭材の微生物汚染に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 環境系, No. 50, pp. 467-472, 2011.3
- 2.29) 石松維世, 松鶴悟実, 龍有二: 地中熱利用ピットを有する建物における浮遊微生物の濃度変動と温湿度環境, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 77, No. 676, pp. 491-498, 2012.6
- 2.30) 垂水弘夫, 簀原由紀: ヒート&クールチューブ住宅の地中熱利用効果に関する調査研究 北陸に立地する戸建モデル住宅を対象として, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 75, No. 651, pp. 423-429, 2010.5
- 2.31) 中川浩, 高田暁, 佐藤寛, 竹内ゆう: 戸建住宅における地中熱を活かした換気熱損失低減に関する研究 その2 複数住戸の連結したヒート&クールチューブの実測結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 93-94, 2010.9
- 2.32) 林宏幸, 千葉伸二, 加藤淳司: トビシマ式省エネ床下ピットの改良 - ピット内臭気の低減 -, とびしま技報, No. 59, 2010
- 2.33) 吉岡沙野, 田中宏明, 奥宮正哉, 尹奎英: CO₂濃度制御・クールヒートトレンチ・全熱交換器を組み合わせた外気負荷削減システムの効果検証 第2報 クール/ヒートトレンチと全熱交換器の導入効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 1275-1276, 2011.8
- 2.34) 工藤裕太, 柳宇, 鍵直樹, 大澤元毅, 長谷川麻子, 松鶴悟実, 石松維世, 龍有二: 地中熱利用ピットにおける調湿材での微生物汚染の実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 665-666, 2011.8
- 2.35) 高田暁, 中川浩, 松下敬幸: 実住宅に導入されたクールチューブの熱湿気性状の解析 複雑な形状を有する管の簡易モデルに基づく解析と管内空気質評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 665-666, 2011.8
- 2.36) 重久大樹, 二宮秀與, 長澤康弘: 大空間における地下ピットを利用した外気負荷低減システムの効果に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 環境系, pp. 337-340, 2011.3

- 2.37) 尹奎英, 吉岡沙野, 青木貴均, 旗手康信, 若目田郁夫, 奥宮正哉: 環境共生型公共施設における省エネルギー手法の導入について その1 実測調査による省エネルギー手法の導入効果検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1053-1054, 2011.8
- 2.38) 青木貴均, 尹奎英, 吉岡沙野, 旗手康信, 若目田郁夫, 奥宮正哉: 環境共生型公共施設における省エネルギー手法の導入について その2 CFDによるアースチューブ導入効果の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 1055-1056, 2011.8
- 2.39) 徳村朋子, 大岡龍三, 高橋幹雄, 袴田喜夫, 松本敏勝, 小島直, 三谷剛, 斉藤道夫: ヒート&クールピットを利用した空調設備の省エネルギー性能に関する研究 学生寮における年間測定結果による検証, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 149-152, 2011.9
- 2.40) 徳村朋子, 大岡龍三, 高橋幹雄, 袴田喜夫, 松本敏勝, 三谷剛: ヒート&クールピットを利用した空調設備の省エネルギー性能に関する研究 シミュレーションによる年間の熱特性評価, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 733-736, 2012.9
- 2.41) 一木翔, 田中英紀: 住宅基礎を用いたクール/ヒートチューブ換気システムの性能に関する研究 その1 秋期の運用方法に関する実性能の比較評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 589-590, 2012.9
- 2.42) 一木翔, 尹奎英, 田中英紀: ボイドスラブ基礎によるクール/ヒートチューブ換気システムの性能に関する研究 (第3報) システム熱交換特性の分析と設計手法の確立, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 181-184, 2013.9
- 2.43) 三田村輝章, 菊田道宣: 地中熱を利用した RC 外断熱住宅に関する研究 (第4報) 年間エネルギー消費量とピット温度の推移、浮遊真菌濃度の測定結果, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 177-180, 2013.9
- 2.44) 三田村輝章, 菊田道宣: 地中熱を利用した RC 外断熱住宅に関する研究 (第6報) TRNSYS TESS ライブラリモデルを用いた地下ピットの年間シミュレーション, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 113-116, 2014.9
- 2.45) 柳宇, 吾孫子正和, 菅野昇平, 松本英志, 岡部優志: アースチューブにおける微生物汚染の実態とその対策方法, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 29-32, 2013.9
- 2.46) 鈴木啓泰, 永野紳一郎: 学校建築のクールヒートトレンチの効果検証 その2 実測概要と冬期の取得熱量, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 461-462, 2013.8
- 2.47) 鈴木啓泰, 足立勇樹, 永野紳一郎: 学校建築のクールヒートトレンチの効果検証 その4 実測データの分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 627-628, 2014.9
- 2.48) 足立勇樹, 永野紳一郎, 鈴木啓泰: 学校建築のクールヒートトレンチの効果検証 その5 性能向上のための数値解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 629-630, 2014.9

- 2.49) 長尾拓, 西川豊宏, 小林史生: 自然エネルギーを利用した全館換気空調システムに関する研究 (その1) 実建物におけるシステムの外気負荷削減に関する実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 633-634, 2014.9
- 2.50) 姜允敬, 長野克則, 中村真人: 札幌市内住宅における省エネルギー換気装置の微生物汚染調査, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 109-112, 2014.9
- 2.51) 塚本隆史, 小座野貴弘, 宮崎ひろ志, 田中健人: 地熱利用計画支援のための地中温度データベースの構築 (その6) 免震ピットを利用したクールピットの省エネ効果算定手法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 619-620, 2014.9
- 2.52) 張晴原: 中国におけるアースチューブの冷却効果 その1 地中自然温度、吹出し温度と冷却エネルギー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 631-632, 2014.9
- 2.53) 木下雅広: クール/ヒートピットの形状と性能に関する研究, 平成25年度首都大学東京修士論文, 2014
- 2.54) 橋本翔, 中野一樹, 長谷川雅一, 鳥越順之, 野部達夫: スマートビル構築のための要素技術検証とその最適化に関する研究 (第4報) 地中熱利用(クール/ウォームピット)の性能評価, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.157-160, 2014.9
- 2.55) 林徹夫, 椎木英理子, 野村幸司, 藤重俊徳, 長孝良, 福島逸成, 佐藤孝輔, 館景士朗: 研修施設における環境配慮技術の計画と実証評価 (第4報) クールヒートトレンチと全熱交換器による外気負荷の削減効果, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 377-380, 2014.9
- 2.56) 山口福太郎, 佐竹晃: 地下ピットの蓄熱利用による空調熱源機の効率向上に関する研究 その1 隙間からの漏気を考慮したCFDモデルの検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 569-570, 2016.8
- 2.57) 松鷗さとみ, 上田華子, 二宮秀與: クール/ヒートピット設備における真菌叢に関する研究 第1報 実建物における真菌汚染実態と同定手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 729-730, 2016.8
- 2.58) 湊智大, 宮崎ひろ志, 塚本隆史: 免震ピット利用空調の建物規模、吸気条件別評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp. 813-814, 2016.8
- 2.59) 松田優, 堤純一郎, 仲松亮, 屋比久祐盛, Asaduzzaman Mohammad, 又吉伸豪: 石垣市におけるクールチューブの効果に関する実測調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 565-566, 2016.8
- 2.60) 神保歩未, 垂水弘夫, 塩谷正樹, 岩瀬和夫: 地域防災環境科学研究所における環境建築研究 その25 ヒート&クールトレンチの熱的效果に関する調査研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, pp. 829-830, 2016.8

- 2.61) 稲垣友規, 尹奎英, 丹羽英治: クール/ヒートチューブの性能予測と設計手法提案に関する研究 その3. 冷房期間における設計出口温度と交換熱量の予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 1053-1054, 2016.8
- 2.62) 茂呂将崇, 三田村輝章, 原澤浩毅: 地中熱を利用した全館空調住宅に関する研究 2年間にわたる実測結果と数値シミュレーションによる分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 559-560, 2016.8
- 2.63) 武廣絵里子, 澤田瑞恵, 権藤尚, 三原邦彰, 富田洸教: 教育施設におけるクールアンドヒートチューブの空気質評価 (その1) 施設内の細菌, カビの挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 727-728, 2016.8
- 2.64) 要佑樹, 龍有二: 在宅介護モデル住宅におけるエコリフォーム前後の温熱環境比較評価 その2 導入したパッシブシステムの効果検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 563-564, 2016.8
- 2.65) 松鷲さとみ, 上田華子, 二宮秀與: クール/ヒートピットにおける微生物汚染による室内空気汚染に関する研究 その2 ピット内建材の付着真菌に関する検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 環境系, pp.101-104, 2017.3
- 2.66) 茂木拓也, 三田村輝章, 原澤浩毅: 地中熱を利用した全館空調住宅に関する研究 前橋市内のモデル住宅を対象とした年間を通じた性能評価とチューブ内結露に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.167-168, 2017.8
- 2.67) 松鷲さとみ, 二宮秀與: クール/ヒートピットにおける微生物汚染による室内空気汚染に関する研究 その3 遺伝子解析による真菌種の検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 環境系, pp.349-352, 2018.3
- 2.68) 鈴木宏和, 飯塚悟, 齋藤輝幸, 奥宮正哉: 都市型エコキャンパスのエネルギー性能と環境性能の検証 第3報 クール&ヒートピットの熱利用の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.365-366, 2018.9
- 2.69) 赤井仁志, 土岐達美, 岸本卓也, 片山真理子, 山口麻有: 省エネルギー配慮型庁舎の空調設備計画とエネルギーマネジメントの取り組み 第2報 空調設備計画における省エネルギー手法の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.261-262, 2018.9
- 2.70) 岸本卓也, 片山真理子, 土岐達美, 赤井仁志, 山口麻有: 省エネルギー配慮型庁舎の空調設備計画とエネルギーマネジメントの取り組み 第5報 間接式アースチューブの運転性能評価結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.267-268, 2018.9
- 2.71) 柳宇, 橋本翔: 空調システムにおけるマイクロバイオームの実態解明とその対策に関する研究 第1報 クールピットにおける細菌叢の実態に関する調査研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.33-36, 2018.9

- 2.72) 杉原義文, 安達聡子, 村松宏: ホテルオリオンモトブにおけるエネルギー管理 (第4報) エネルギー性能の分析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.73-76, 2018.9
- 2.73) 松嶋さとみ, 二宮秀與: クール/ヒートピット設備における真菌叢に関する研究 第4報 遺伝子解析による菌種の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.891-892, 2018.9
- 2.74) 茂木拓也, 三田村輝章, 原澤浩毅: 地中熱を利用した全館空調住宅 における3年間を通じた性能評価, 日本建築学会技術報告集, Vol. 25, No. 59, pp.229-234, 2019.2
- 2.75) 松嶋さとみ, 佐藤龍義, 二宮秀與: クール/ヒートピット設備における真菌叢に関する研究 第5報 2018年度実測調査と遺伝子解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.711-712, 2019.9
- 2.76) 新村美月, 柳宇, 鍵直樹, 金勲: 空調システムにおけるマイクロバイオームの実態解明とその対策に関する研究 第2報 クールピットにおける細菌叢の経年変化, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.73-76, 2019.9
- 2.77) 諏訪菜々瀬, 熊谷雅彦, 土屋裕子, 市丸隼人, 金政秀: 地域の基幹病院における省エネルギーシステム導入事例 (第5報) 中間期における空調運用とクールピット導入効果, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.77-80, 2019.9
- 2.78) T. S. Bisioniya, A. Kumar and P. Baredar: Study on Calculation Models of Earth-Air Heat Exchanger Systems, Journal of Energy, pp.1-15, 2014
- 2.79) G. Mihalakakou: On the heating potential of a single buried pipe using deterministic and intelligent techniques, Renewable Energy, Vol. 28, No. 6, pp. 917-927, 2003.5
- 2.80) R. Kumar, S.C. Kaushik and S.N. Garg: Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network, Renewable Energy, Vol. 31, No. 8, pp.1139-1155, 2006.7
- 2.81) R. Kumar, A.R. Sinha, B.K. Singh and U. Modhukalya: A design optimization tool of earth-to-air heat exchanger using a genetic algorithm, Renewable Energy, Vol. 33, No. 10, pp. 2282-2288, 2008.10
- 2.82) V. Bansal, R. Misra, G.D. Agrawal and J. Mathur: Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating, Energy and Buildings, Vol. 41, No. 11, pp. 1151-1154, 2009.12
- 2.83) V. Bansal, R. Misra, G.D. Agrawal and J. Mathur: Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling, Energy and Buildings, Vol. 42, No. 5, pp. 645-648, 2010.5
- 2.84) A. Trzaski and B. Zawada: The influence of environmental and geometrical factors on air-ground tube heat exchanger energy efficiency, Building and Environment, Vol. 46, No. 7, pp. 1436-1444, 2011.7

- 2.85) J. Vaz, M.A. Sattler, E.D. Santos and L.A. Isoldia: Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger, *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 9, pp. 2476-2482, 2011.9
- 2.86) V. Bansal, R. Mishra, G.D. Agarwal and J. Mathur: Performance analysis of integrated earth-air-tunnel-evaporative cooling system in hot and dry climate, *Energy and Buildings*, Vol. 47, pp. 525-532, 2012.4
- 2.87) R.S. Brum, J. Vaz, L.A.O. Rocha and E.D. Santos: A new computational modeling to predict the behavior of Earth-Air Heat Exchangers, *Energy and Buildings*, Vol. 64, pp. 395-402, 2013.9
- 2.88) R.S. Brum, L.A.O. Rocha, J. Vaz and E.D. Santos • L.A. Isoldi: Development of Simplified Numerical Model for Evaluation of the Influence of Soil-Air Heat Exchanger Installation Depth over Its Thermal Potential, *International Journal of Advanced Renewable Energy Research*, Vol. 1, No. 9, pp. 505-514, 2012
- 2.89) R. Misra, V. Bansal, G.D. Agrawal, J. Mathur and T. Aseric: Transient analysis based determination of derating factor for earth air tunnel heat exchanger in summer, *Energy and Buildings*, Vol. 58, pp. 103-110, 2013.3
- 2.90) A. Sehli, A. Hasni and M. Tamali: The potential of earth-air heat exchangers for low energy cooling of buildings in South Algeria, *Energy Procedia (Terragreen 2012: Clean Energy Solutions for Sustainable Environment)*, Vol. 18, pp. 496-506, 2012
- 2.91) L. Ramírez-Dávila, J. Xamán, J. Arce, G. Álvarez and I. Hernández-Pérez: Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates, *Energy and Buildings*, Vol. 76, pp. 238-248, 2014.6
- 2.92) M. K. Rodrigues, R.S. Brumb, J. Vaz, L.A.O. Rocha, E.D. Santos and L.A. Isoldia: Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method, *Renewable Energy*, Vol. 80, pp. 538-551, 2015.8
- 2.93) S. Barakat, Ahmed Ramzy, A.M. Hamed and S.H. El Emam: Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 111, pp. 137-146, 2016.3
- 2.94) S. Jakhar, R. Misra, M.S. Soni and N. Gakkhar: Parametric simulation and experimental analysis of earth air heat exchanger with solar air heating duct, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 19, No. 2, pp. 1059-1066, 2016.6
- 2.95) 芦谷友美, 白石靖幸, 安永龍一, 龍有二: CFD 解析による夏季及び冬季の地下ピット内伝熱性状の動的評価 - 土壌熱交換システムの冷却・加熱効果の予測手法に関する研究 その 1 -, *日本建築学会環境系論文集*, 第 77 巻, 第 677 号, pp.575-582, 2012.7

第3章 基礎理論

3.1 CFD

3.1.1 CFD の概要及び支配方程式

Computational Fluid Dynamics (CFD) とはコンピュータの進化に伴い誕生した比較的新しい分野であり、流体に関する各種物理量の保存式を満足させていくことで熱流体のシミュレーションを行う解析手法のことである。風洞実験に代表される実験的な研究と比較した場合、CFD によるシミュレーションでは低コストかつ理想的な流体の状態を再現でき、各種物理量の分布が明瞭化されるなどの特徴を持っている。しかし解析対象に合わせた適切な条件や解析手法を選択しないと正しい解が得られないという点から基礎理論に通じておく必要があると言われている。特に計算負荷が必要となる巨大な行列計算を行う場合、以前はスーパーコンピュータなどを用いることで時間的・空間的に限定して解析が行われていたが、CPU の進歩や商用ツールの開発が進むことで特定の設備を持たずとも個人の PC レベルでの解析が可能となってきた。

今日では CFD は航空や自動車、電子機器など多くの工業製品の設計に寄与しているが建築分野においても同様に利用が進みつつある。建築分野ではエネルギーシミュレーション手法として CFD の他に動的熱負荷計算などがある。動的熱負荷計算の場合、年間のシミュレーションは可能であるが解析精度の問題や各種物理量の分布性状などの把握が困難である。しかし CFD では居住域の流れや温度また湿度などの時間的・空間的な構造を把握できるという利点から環境工学分野における各物理量に関する問題の解析や事前解析による設計などに利用されることも少なくない。

以下より CFD の基礎理論の解説を行うが、まず CFD の基本となる各種物理量の支配方程式（非等温）を示し、解説を行う。

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad 3.1$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - g_i \beta \Delta \theta \delta_{i3} \quad 3.2$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + U_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) \quad 3.3$$

それぞれ圧力 P [Pa]、動粘性係数 ν [m^2/s]、重力加速度 g [m/s^2]、体積膨張率 β [$1/\text{K}$]、温度伝導率 α [m^2/s]を表す。Eq. 3.1 は連続の式と呼ばれ、流体における微小体積内を考えた場合その中に流入する流体の質量と流出する質量が等しいという質量保存則より導かれる。一般に建築分野では非圧縮性流体を解析対象とするため密度 ρ の時空間的变化が無いと仮定できる。このため Eq. 3.2 や Eq. 3.3 と異なり、非定常項（時間微分項）である第一項を省略

できる。Eq. 3.2 は運動量輸送方程式と呼ばれ、第一項から、非定常項・移流項・圧力項・拡散項（粘性項）・浮力項である。この式は連続の式と同様に微小体積内に流入・流出する運動量が上記の計 5 つの項により保存されるというベクトル方程式である。また、Eq. 3.3 は運動量輸送方程式同様に微小体積内に流入・流出するエネルギー（スカラー量）が保存される温度輸送方程式であり、右辺の拡散項は熱伝導によるエネルギー拡散現象を表している。尚、建築分野における流れ場の温度差は比較的小さいことから、これに伴う密度変化の影響はブシネスク近似により Eq. 3.2 の浮力項に表している。

尚、本論文の中では添字 i ($i=1, 2, 3$) は (x, y, z) 座標に対応しており、 (x_1, x_2, x_3) は三次元デカルト座標による表示である (x, y, z) を、 (U_1, U_2, U_3) は速度の (U, V, W) を示す。また、添字が 1 つの項で重なっている場合はその添字の和をとるものとする。

3.1.2 支配方程式の計算手法

1) 離散化手法

前項にて示した支配方程式は偏微分方程式であり、数値流体解析ではコンピュータの演算により数値解を求めるが、コンピュータは微分を解析的に解くことは出来ない。このため解析対象とする空間や時間を分割し、有限の格子点上において各支配方程式の未知数（運動量やエネルギーなど）に関する代数方程式や関係式を組み合わせることで空間的進行、さらには時間的進行を行っていくことで数値解を得る必要がある。このように方程式を時空間的に分割することを離散化と呼ぶ。離散化された各支配方程式より、行列計算・四則演算を繰り返し、従属変数である各微小体積内における流速 3 成分、温度などを求めていくこととなる。

代表的な離散化手法として 有限差分法・有限体積法・有限要素法などが一般的で、有限差分法は支配方程式の微分項をテイラー級数展開し、対象とする格子点及びその周辺の格子点のテイラー級数展開による関係式を組み合わせることで支配方程式を近似的に表すため、容易に離散化が可能な手法である。有限体積法は解析領域を有限個の領域（コントロール・ボリューム、セル、メッシュまたは（計算）格子と呼ばれる）に分割し、それぞれのメッシュについて支配方程式の積分を行う。積分を行った後に差分形式に近似し離散化することで、常に各メッシュの各種物理量の流入出を考えることができるため、各支配方程式に示される保存式を確実に満たす離散式を得ることが可能である。有限要素法は未知数を任意の精度の近似関数で表し、その係数の大きさを重み付き残差法などによりメッシュごとに決定するものである。この離散化手法では多くの場合、三角形のメッシュを組み合わせることで解析領域を構成するため、複雑な形状にも容易に対応が可能である。

一般に環境工学分野の CFD における離散化手法は 有限体積法であり、本論文においても保存式を満足して非定常的に解析が行うことができ、また後述する SIMPLE 系解法の導入も容易であるため、有限体積法による離散化手法を採用する。

2) CFDにおけるメッシュ

CFDにおいては、離散化された支配方程式を解くためにメッシュの定義手法を決定しなければならない。分類としてメッシュが序列をもっているか否かにより構造格子・非構造格子に分別される。一般に構造格子は有限差分法、有限体積法に利用され、メッシュが直交座標系により配列が決定され、三次元においては (i, j, k) の3つの指標でメッシュのアドレスが決定される。構造格子では支配方程式を変形させることなく、簡易な形で解析を行えることが利点として挙げられる。一方、非構造格子は有限要素法、序列を考慮しない形で定式化された有限体積法に利用され、直交座標系に基づかない非規則的な配列をした格子であり、四面体、六面体などを用いることが可能となり、構造格子の欠点である曲面の再現性が高いという利点がある。本論文では構造格子による解析を対象としており、以下では構造格子の解説のみを行う。

CFDでは圧力場を連続の式より間接的に規定するが、正確な圧力場を運動量輸送方程式に与えると、結果として得られる速度場は連続の式を満足することとなる。一次元の x 方向運動量輸送方程式の離散化式を立てる場合を考える。まず圧力項 $-dp/dx$ を有限体積法により積分し、圧力差 $p_w - p_e$ を得る。ここでメッシュの境界面 w, e が各メッシュ間の中央にあると仮定すると以下のEq. 3.4が得られる。尚、 w, e は境界面、 W, E はメッシュ定義点（格子点）を意味し、 w, W は現在考えているメッシュ定義点 P より左側、 e, E は右側とする。

$$p_w - p_e = \frac{p_W + p_P}{2} - \frac{p_P + p_E}{2} = \frac{p_W - p_E}{2} \quad 3.4$$

つまり、運動量輸送方程式が隣り合った格子点間ではなく、一つおきの格子点間の圧力差を含んでいることにより、圧力項に関しては用意されたメッシュよりも実質的に粗い格子を採用したこととなる。これによりどの格子点 P においても一つおきの圧力が等しいため対応する圧力差 $p_w - p_e$ はゼロとなる。従って波状の圧力場を運動量輸送方程式では一様であると判断してしまい、圧力場の影響を考慮できないため非現実的な速度場が得られる。対策としてベクトル量の定義点を境界面にずらすことで圧力場の極度な不均一分布性が無くなる。この定義点をずらした構造格子をスタッガード格子（Staggered Grid：食い違い格子）といい、スタッガード格子は圧力・温度などのスカラー量をメッシュ中心にて定義し、速度などのベクトル量に関しては各メッシュの境界面にて定義する手法であり、今日において一般的に用いられている。

3) 計算アルゴリズム

支配方程式の離散化式を空間的に解いていく手法は上述したスタッガード格子を用いるものであったが、Eq. 3.2 や Eq. 3.3 の左辺に含まれる時間微分項（非定常項）は非定常解析において最も重要な項となる。この非定常解析時において離散化式を時間方向に解き進めるためのアルゴリズムには主に陽解法・陰解法がある。

陽解法・陰解法のアルゴリズムを解説するにあたり、非定常一次元熱伝導の支配方程式の離散化を考える。まず Eq. 3.3 は一次元かつ移流項が除去できるため、Eq. 3.5 の通りとなる。尚、後の式を簡略して扱うために熱伝導率 $\lambda[\text{W/m} \cdot \text{K}]$ 、密度 $\rho[\text{kg/m}^3]$ 、定圧比熱 $C_p[\text{J/kg} \cdot \text{K}]$ より温度伝導率 $\alpha=\lambda/\rho C_p[\text{m}^2/\text{s}]$ に代入し、式の変形を行っている。

$$\rho C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad 3.5$$

更に ρC_p を一定と仮定し、計算時間間隔 Δt 及びメッシュ幅 Δx にわたって Eq. 3.5 の積分を行い Δt で除すると以下の Eq. 3.6 が得られ、非定常項、拡散項は Eq. 3.7、Eq. 3.8 に示すように離散化を行う。下添字の $e \cdot w \cdot E \cdot W \cdot P$ に関しては前述通りで、イメージとして Figure 3.1 に示すような位置関係となっている。また上添字の $n+1 \cdot n$ はそれぞれ時刻 $t+\Delta t \cdot t$ における値を意味する。

$$\frac{\rho C_p}{\Delta t} \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial \theta}{\partial t} dt dx = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) dx dt \quad 3.6$$

$$\frac{\rho C_p}{\Delta t} \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial \theta}{\partial t} dt dx = \frac{\rho C_p}{\Delta t} \Delta V (T_P^{n+1} - T_P^n) \quad 3.7$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) dx dt &= \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \left\{ \frac{\lambda_e (\theta_E - \theta_P)}{(\delta x)_e} - \frac{\lambda_w (\theta_P - \theta_W)}{(\delta x)_w} \right\} dt \\ &= f_t \left\{ \frac{\lambda_e (\theta_E - \theta_P)}{(\delta x)_e} - \frac{\lambda_w (\theta_P - \theta_W)}{(\delta x)_w} \right\}^{n+1} - (1-f_t) \left\{ \frac{\lambda_e (\theta_E - \theta_P)}{(\delta x)_e} - \frac{\lambda_w (\theta_P - \theta_W)}{(\delta x)_w} \right\}^n \end{aligned} \quad 3.8$$

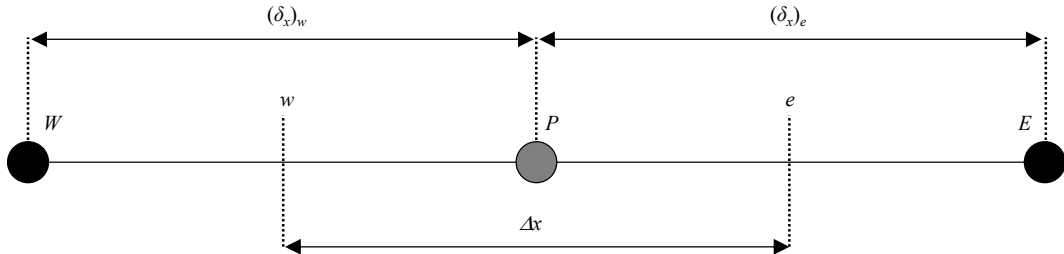


Figure 3.1 Grid points and surface of the control volume (Staggered grid)

$f_t=0$ は陽解法、 $f_t=1/2$ はクランク-ニコルソン法 (C-N 法)、 $f_t=1$ は陰解法と呼ばれる。これらの関係性を図示すると Figure 3.2 のようになる。

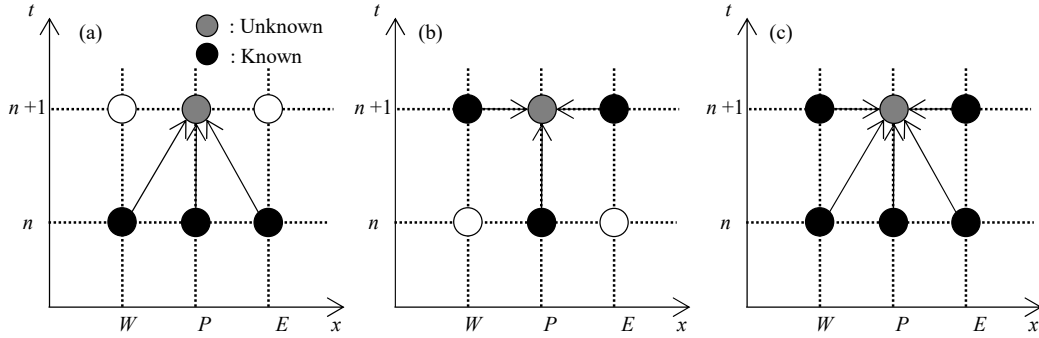


Figure 3.2 Reference image of algorithm for time progressive analysis: (a) Explicit method ; (b) Implicit method ; (c) Crank–Nicolson method

つまり、 T_P^{n+1} を求めるために陽解法では $T_P^n \cdot T_W^n \cdot T_E^n$ を利用し、陰解法では $T_P^n \cdot T_W^{n+1} \cdot T_E^{n+1}$ を利用する。陽解法では離散化式に1つの未知数つまり T_P^{n+1} を求めるのみで、反復計算を必要としないのが大きな特徴で1タイムステップあたりの計算時間が少ないという利点がある。一方、陰解法では $T_P^{n+1} \cdot T_W^{n+1} \cdot T_E^{n+1}$ が未知数であるため反復計算を行い、その時点のタイムステップにおいて収束するまで解析が必要となる。またC-N法は $f_t = 1/2$ であることから、各隣接格子点の $n+1$ 及び n ステップの影響を $1/2$ で平均化することで時間進行的に解析を行っていく点が大きな特徴である。

この時間・空間進行を考慮した離散化式の連立方程式を立て、四則演算・反復計算により解析を行っていく。尚、解析を行う際の行列計算手法にもいくつかの種類が存在するが、本論文中での解説は割愛する。

3.1.3 乱流モデル

1) 乱流モデルの概要

流体の状態を考えるにあたり最も重要となる指標としてレイノルズ数と呼ばれる無次元数が存在する。レイノルズ数は粘性力 $F_v (= \rho \nu l u)$ [N]、慣性力 $F_i (= \rho l^2 u^2)$ [N]の比として以下の Eq. 3.9 にて定義される。尚、 ρ は流体の密度[kg/m³]、 l は代表長さ[m]、 u は代表速度[m/s]である。

$$\text{Re} = \frac{F_v}{F_i} = \frac{\rho l^2 u^2}{\rho \nu l u} = \frac{lu}{\nu} \quad 3.9$$

流れの状態はこのレイノルズ数の大小によりおおまかに層流と乱流に分類される。層流は近接する流体が混ざることなく、層状に流れていく状態のことで、粘性力が慣性力よりも支配的であることから比較的小さいレイノルズ数流れにおいては安定的な流れ場を形成する。一方、自然界で見られる流れのほとんどが乱流状態にあり、建築分野においてもこの状態を物理法則に従いCFDを行う必要がある。しかし後述する計算負荷の問題からすべての流れの状態を物理法則に従った解析は不可能であることや、一般に乱流状態の特徴

として流れの状態が不規則であるため決定論的な扱いができず、乱流を統計的に扱う（後述する乱流モデルなどのモデル化）ことがほとんどである。

乱流を解く際にはすべての乱流渦を解析し、そのすべて渦の運動エネルギーが熱エネルギーへ変換されるまで細分化して解析を行う直接数値シミュレーション(DNS: Direct Numerical Simulation)が最も理想的な乱流の解析手法と言われている。しかし、座標軸に固定されたメッシュにて物理量を見ることから、すべての渦が熱エネルギーへと散逸するほどの細かい空間分解能が必要となる。最小の渦（この最小の渦をコルモゴロフのマイクロスケールという）を解析するにはその渦と同等の大きさのメッシュ幅が必要となり、コルモゴロフのマイクロスケールは Re 数に応じて指数関数的減衰の式¹で表されるため、慣性力または浮力の強い流れ場ではメッシュ幅を小さくしなければならず、極めて多くのメッシュが要求される。

DNSは建築分野においては要求される精度と計算負荷のバランスの問題からほとんど用いられておらず、多くが k - ε モデルに代表されるレイノルズ平均モデル(RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations)やラージエディシミュレーション(LES: Large-Eddy Simulation)による渦のモデル化を行い、乱流状態の解析を行っている。本論では RANS に属する低レイノルズ数型 k - ε モデルにより解析を行うため乱流モデルに関しては主に RANS の解説を行い、LES については後述するような簡単な解説のみにとどめておく。

RANSの導出に際して支配方程式に平均化操作（レイノルズ平均化）を行うと以下の Eq. 3.10、Eq. 3.11、Eq. 3.12 が得られる。Eq. 3.11 においては式の簡略化のために等温場と仮定しているため、浮力項を無視している。尚、導出方法などの解説は省略するが、詳しくは文献^{3,1)}を参照されたい。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad 3.10$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) \quad 3.11$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} - \overline{u_i' \theta'} \right) \quad 3.12$$

レイノルズ平均化を行うにあたって、Eq. 3.11 の拡散項に含まれる $\overline{u_i' u_j'}$ （レイノルズ応力）Eq. 3.12 の $\overline{u_i' \theta'}$ （乱流熱フラックス）が移流項から派生して新たな非線形項となる。三次元流れにおけるレイノルズ応力は次の Eq. 3.13 に示す通り、流れが対称性ならば未知

¹ コルモゴロフのマイクロスケール η は乱流の最小の大きさであり、このスケールでは乱れが流体の粘性効果により熱エネルギーへと散逸するためそれ以下の乱れは生じない。 η は流体の動粘性係数 $\nu(=\mu/\rho)$ [m²/s]と後述する乱流エネルギー散逸率 ε [m²/s³]により Eq. (i)で表される。さらに ε の次元解析により ε を代表速度 U_0 [m/s]、代表長さ L_0 [m]で表すとEq. (ii)となる。 Re 数は $U_0 \cdot L_0 / \nu$ で定義できることから η は Re 数の関数で表すことができ、Eq. (iii)の通りとなる。

$$\eta = (\nu^3 / \varepsilon)^{1/4} \quad (i) \quad \varepsilon = U_0^3 / L_0 \quad (ii) \quad \eta / L_0 = Re^{-3/4} \quad (iii)$$

数が6個存在する。さらに乱流熱フラックスは $\overline{u_1'\theta'}$ 、 $\overline{u_2'\theta'}$ 、 $\overline{u_3'\theta'}$ の3つが新たな未知数となる。

$$-\overline{u_i'u_j'} = - \begin{bmatrix} \overline{u_1'u_1'} & \overline{u_1'u_2'} & \overline{u_1'u_3'} \\ \overline{u_2'u_1'} & \overline{u_2'u_2'} & \overline{u_2'u_3'} \\ \overline{u_3'u_1'} & \overline{u_3'u_2'} & \overline{u_3'u_3'} \end{bmatrix} \quad 3.13$$

2) 乱流モデルの種類

レイノルズ応力・乱流熱フラックスの評価手法としての乱流モデルは RANS と LES に大別される。本論文では RANS に属する乱流モデルを用いるため、LES に関しては簡略的な解説のみとする。LES は DNS と RANS の間にある解析手法であり、一般的に DNS より粗く、RANS より細かいメッシュを配置することで、メッシュのスケールより乱流の長さスケールが大きい場合（グリッドスケール）には直接数値シミュレーション、それより小さい場合（サブグリッドスケール）には乱流モデルを使用して解析を行うというフィルタリングを行う手法である。このため LES では解析領域内においてのメッシュの細かさが解析精度に直結する。解析精度に関しては DNS・LES・RANS の順に高く、それに伴い計算負荷も精度に準ずるように増大する。以下に RANS に関する概説を行う。

三次元の場合、上述のレイノルズ平均化によりレイノルズ応力は等方性ならば6成分、乱流熱フラックスは3成分と新たに未知数が増大する。これにより Eq. 3.1 ~ Eq. 3.3 ではそのまま解けていたものが Eq. 3.10 ~ Eq. 3.12 では解くことができず、方程式をクローズすることが不可能となる。この問題はクロージャープロblemと呼ばれ、この解決策としてレイノルズ応力・乱流熱フラックスの新たな方程式を立てることなく、後述する勾配拡散近似により乱流場の影響をモデル化する手法が RANS である。

RANS においては分子粘性によって生じるせん断応力と速度勾配の関係(Eq. 3.14)と同様に乱流により生じるせん断応力（レイノルズ応力）と（平均）速度勾配の関係から渦粘性係数 $\nu_t[m^2/s]$ を導入することによりレイノルズ応力や乱流熱フラックスを対応付ける。

$$\frac{\tau_{ij}}{\rho} = \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad 3.14$$

$$-\overline{u_i'u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad 3.15$$

尚、Eq. 3.14 の ν は動粘性係数($=\mu/\rho$)[m^2/s]となっている。 ν は流体の物性値であるのに対して Eq. 3.15 の ν_t は流れの性状により変化する。Eq. 3.15 の右辺第一項は Eq. 3.14 になら、渦粘性と速度勾配の関係を示し、第二項は乱流エネルギーを矛盾なく表現するためクロネッカーデルタ δ_{ij} が加わっており、乱流エネルギーは $k=\overline{u_i'u_i'}/2$ と表される。以下では Figure 3.3 のように分類される RANS の内、一般的に利用されている k - ϵ モデルに関する概要を示す。

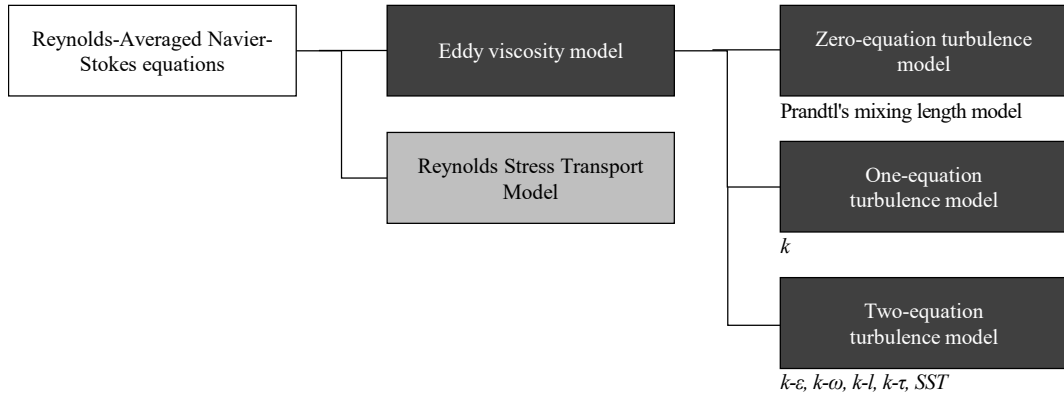


Figure 3.3 Classification of RANS models

標準 k - ε モデル (2 方程式モデル)

k - ε モデルは運動量輸送方程式を操作することで得られる乱流エネルギーおよび乱流エネルギー散逸率の輸送方程式を立てて求めた乱流エネルギー・散逸率を渦粘性係数に関連付けるという手法を用いている。これにより乱流エネルギー・散逸率より ν_t を求めることが可能となり、次の Eq. 3.16 より ν_t が求まる。また乱流エネルギー・散逸率の輸送方程式は Eq. 3.17、Eq. 3.18 である。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 3.16$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad 3.17$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad 3.18$$

尚、 C_μ ・ k ・ ε ・ C_1 ・ C_2 はモデル定数であり、一般的には順に $0.09 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 1.44 \cdot 1.92$ の値を採用することが多い

低レイノルズ数型 k - ε モデル (2 方程式モデル)

標準 k - ε モデルでは壁近傍での減衰効果や粘性効果のある流れ場、または強い安定性層が生じることで乱れが減衰し、擬似的な層流状態となる流れ場などの解析に対しては一般に高精度の解を与えることが出来ないという問題がある。この問題に対して低レイノルズ数型 k - ε モデルでは改善策として次の3点が施されている。： ν_t 算出の際の壁座標の算出および乱流レイノルズ数 Re_t をパラメータとする減衰関数 f_μ の導入、： ε の輸送方程式の生成項・散逸項に対してモデル関数 f_1 ・ f_2 の導入、：壁近傍の領域に十分細かいメッシュを配置することで壁近傍の乱流挙動・低レイノルズ数効果を正しく評価。以上の3点の改善策を施し、等温流れ場を仮定した支配方程式は次の通りとなる。

$$\nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 3.19$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - (\tilde{\varepsilon} + D) \quad 3.20$$

$$\frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_j} \right) + \frac{\tilde{\varepsilon}}{k} (C_{\varepsilon 1} f_1 P_k - C_{\varepsilon 2} f_2 \tilde{\varepsilon}) + E \quad 3.21$$

支配方程式中の記号を Table 3.1 に示す。

Table 3.1 Numerical formulas of the Low-Re k - ε model

| | | | | | |
|--|------|--|------|---|------|
| $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_n} \right)^2$ | 3.22 | $D = 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_n} \right)^2$ | 3.23 | $E = 2\nu \nu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x_n^2} \right)^2$ | 3.24 |
| $f_\mu = \{1 - \exp(-x_n^*/14)\}^2 \times [1 + (5/R_t^{3/4}) \exp\{(R_t/200)^2\}]$ | | | | | 3.25 |
| $f_2 = \{1 - \exp(-x_n^*/3.1)\}^2 \times [1 - 0.3 \exp\{-(R_t/6.5)^2\}]$ | | | | | 3.26 |
| $f_1 = 1.0$ | 3.27 | $R_t = \frac{k^2}{\nu \varepsilon}$ | 3.28 | $x_n^* = \frac{x_n}{(\nu^3/\varepsilon)^{1/4}}$ | 3.29 |

本論文では先に述べた標準 k - ε モデルと比較して壁面近傍領域の強い粘性応力作用と乱れの減衰作用を考慮するという点からピット内の熱伝達性状を詳細に正しく評価するため、この低レイノルズ数型 k - ε モデルを乱流モデルとして採用している。 $C_\mu \cdot k \cdot \varepsilon \cdot C_1 \cdot C_2$ はモデル定数であり、本論文においては順に $0.09 \cdot 1.4 \cdot 1.4 \cdot 1.5 \cdot 1.9$ の値を採用する。

Table 3.1 の x_n は鉛直方向座標[m]、 u は壁面接線方向の速度成分[m/s]を表す。

尚、レイノルズ応力に関しては以上であるが、非等温流れ場においては乱流熱フラックスの評価も必要となる。本論文では平均の温度勾配と新たに導入する乱流温度拡散率 α_t に関連付けて乱流熱フラックスを次の式にて定義する。

$$-\overline{u_i' \theta} = \alpha_t \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} \quad 3.30$$

ここで、レイノルズ応力を算出する際に必要となる渦動粘性係数 ν_t と同様に α_t を何らかの形でモデル化する必要がある。 ν_t では k - ε などの乱流モデルの0方程式モデル・1方程式モデル・2方程式モデルといった手法が取られており、 α_t でも0方程式モデルや2方程式モデルなどが提案されている。本論文ではその内、0方程式モデルに相当する速度場と温度場の相似性を仮定した手法を用いる。相似性に関しては α_t を渦動粘性係数と乱流プラントル数 Pr_t に関連付けて以下の式で表される。尚、本論文での Pr_t は一般的に採用されている定数(=0.9)を採用する。

$$\alpha_t = \frac{\nu_t}{Pr_t} \quad 3.31$$

3.1.4 境界条件

1) 境界条件の概要

CFD においては支配方程式を解くことで隣り合ったメッシュに流入・流出する物理量を保存させることにより全体および個々のメッシュの物理量の保存則を満足させる。流体部のメッシュが連続的に存在する領域に関しては、支配方程式の解を隣り合ったメッシュに対して影響を及ぼす。解析領域外に接する面や流体部と固体部の境界面などに対しては条件を付与することで、隣り合う面からの影響を考慮し解析を行うことが可能となる。言い換えれば、境界条件を設定しないと離散化された支配方程式の解析が行うことが出来ないということになる。ここでは CFD の境界条件において最も重要な運動量輸送方程式・温度輸送方程式に関する境界条件について述べる。

まず運動量輸送方程式の境界条件では流入・流出境界条件や壁面境界条件が存在する。本論文では壁面境界条件を対象に解説を行う。運動量輸送方程式の支配方程式は Eq. 3.2、レイノルズ平均化された支配方程式は Eq. 3.11 に示した通りである。壁面境界条件は壁面近傍の第一メッシュ（以下、 P_1 ）におけるそれぞれの式の拡散項の壁面せん断応力 τ_{wall} を、もしくは τ_{wall} を与えるための速度勾配を推定するための条件である。また温度輸送方程式の支配方程式は Eq. 3.3、レイノルズ平均化された支配方程式は Eq. 3.12 であるが、温度輸送方程式の場合、拡散項中の壁面熱フラックス h_{wall} もしくは h_{wall} を与える温度勾配を推定するための条件が壁面境界条件となる。

流体の粘性を考える場合、ニュートン流体・非ニュートン流体に大別される。ニュートン流体は流れの接線方向のせん断応力と流れの速度勾配（せん断速度）が比例するという仮定で空気や水などではこの比例関係が正しく成り立つ。反対に非ニュートン流体はニュートン流体に属さず、せん断応力と流れの速度勾配は非線形的な関係を示す。ニュートン流体の仮定を式で示すと次の Eq. 3.32 の通りである。また壁面においてもこの関係が成り立ち、Eq. 3.33 に示す関係となる。尚、Eq. 3.33 は Eq. 3.14 と同様の考え方となっている。

$$\frac{\tau}{\rho} = \nu \frac{\partial u}{\partial y} \quad 3.32$$

$$\frac{\tau_{wall}}{\rho} = \nu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad 3.33$$

さらに壁面近傍の速度分布と壁面せん断応力には Figure 3.4 の関係(Eq. 3.34、Eq. 3.35)がよく成立することが知られている。

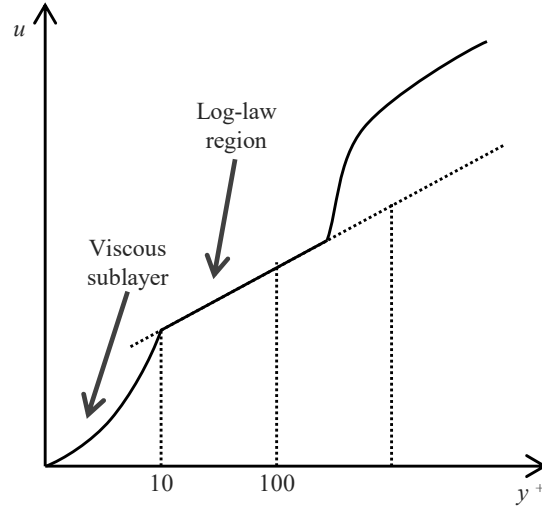


Figure 3.4 Relationships between velocity in the wall-tangential direction and dimensionless wall distance (y^+)

$$y^+ = \frac{y \cdot u_\tau}{\nu} \quad 3.34$$

$$u_\tau = \left(\frac{\tau_{wall}}{\rho} \right)^{1/2} \quad 3.35$$

y^+ は壁座標と呼ばれる無次元数であり、 u_τ は摩擦速度と呼ばれる。特に y^+ は後述する壁関数におけるパラメータとして採用されることが多い。

2) 境界条件の種類

NO-Slip 条件

No-Slip 条件は現実の物理現象に対応する条件であり、壁面において壁面に沿う風速を 0 とし、壁近傍において与えられる直線速度分布を考慮し壁面せん断応力 τ_{wall} を推定する。

$$\frac{\tau_{wall}}{\rho} = \nu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = \nu \frac{u_p - 0}{(1/2)h_p} \quad 3.36$$

$$h_{wall} = -\lambda \left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_{y=0} = -\lambda \frac{\theta_p - \theta_{wall}}{(1/2)h_p} \quad 3.37$$

No-Slip 条件の特徴として τ_{wall} はメッシュ幅が一定値であるため u_p のみで決定される。このため u_p を正しく算出しなければならないが、一般に壁面近傍の壁面に沿う流速分布のイメージは Figure 3.5 に示す通り、壁面近傍のメッシュを細かく取り、P₁ に関してはメッシュ幅を小さくすることで正しい τ_{wall} を求めることが必要となる。

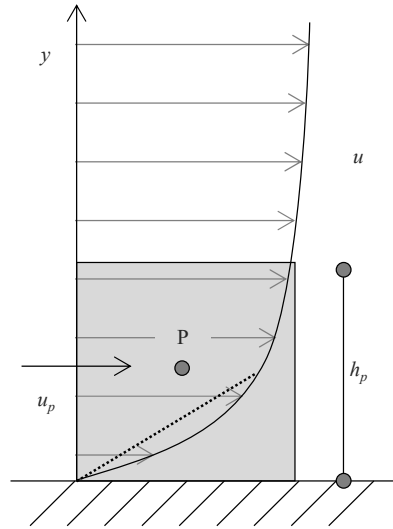


Figure 3.5 velocity gradient near the wall

従って実現象と同等の τ_{wall} を求めるならば粘性底層（壁座標 y^+ が 5 ~ 10 以下の領域）に対して十分なメッシュを配置、さらに壁面に置いてコルモゴロフのマイクロスケールまで分解し No-Slip 条件を与える事となる。一般に、No-Slip 条件は低レイノルズ数型 k - ϵ モデルと組み合わせて利用される。

Free-Slip 条件

壁面近傍の接線方向の速度成分 u や壁面近傍の温度 θ が無限遠方まで変化しないという条件であり、境界面において壁面せん断応力および壁面熱フラックスの影響がないことを意味する。次の式で表現され、特に Eq. 3.39 を断熱条件と呼ぶ。

$$\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad 3.38$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad 3.39$$

壁関数

実現象に近い解析を行う場合の壁面境界条件は No-Slip 条件であることと No-slip 条件では計算負荷が増大するということは前述の通りである。解析コスト及び精度を実用的に考えた場合はメッシュを細くすることが不利となる場合が多い。この問題を回避するための手法が壁関数であり、壁面近傍の接線方向の速度勾配をモデル化することで壁面近傍のメッシュが多少粗くても解析精度がある程度保つ境界条件である。また壁関数では一般的に P_1 の接線方向速度の定義点 ($=0.5h_p$) は対数領域に位置することを前提としている。Table 3.2 の Eq. 3.40 ~ Eq. 3.45 のような、べき乗則、対数則、一般化対数則が存在する。特に温度に

関する壁関数として建築分野で慣用的に用いられている対流熱伝達率がある。対流熱伝達率による h_{wall} の算出は温度差に比例する 1 次関数となる。

Table 3.2 Examples of the wall-function

| | | |
|--|---|------|
| Power-law (Momentum transport equation) | $\frac{\tau_{wall}}{\rho} \approx \frac{\tau_{(1/2)h_p}}{\rho} = (\nu + \nu_t) \cdot \frac{1}{m} \frac{u_p}{(1/2)h_p}$ | 3.40 |
| Logarithmic-law (Momentum transport equation) | $\frac{u_p}{(\tau_{wall}/\rho)^{1/2}} = \frac{1}{\kappa} \log \frac{y \cdot (\tau_{wall}/\rho)^{1/2}}{\nu} + C$ | 3.41 |
| Logarithmic-law (Temp. transport equation) | $\frac{\theta_{wall} - \theta_p}{h_{wall}/\rho C_p} u_\tau = \frac{\text{Pr}_t}{\kappa} \log \bar{E} y^+ + A(\text{Pr}, \text{Pr}_t)$ | 3.42 |
| Generalized logarithmic-law (Momentum transport equation) | $\frac{u_p}{\tau_{wall}/\rho} (C_\mu^{1/2} \cdot k_p)^{1/2} = \frac{1}{\kappa} \log \frac{E \cdot (1/2)h_p (C_\mu^{1/2} \cdot k_p)^{1/2}}{\nu}$ | 3.43 |
| Generalized logarithmic-law (Temp. transport equation) | $\frac{\theta_{wall} - \theta_p}{h_w/\rho C_p} \cdot (C_\mu^{1/2} \cdot k_p)^{1/2} = \frac{\text{Pr}_t}{\kappa} \log \left[\bar{E} \cdot (1/2)h_p \cdot (C_\mu^{1/2} \cdot k_p)^{1/2} \right]$ | 3.44 |
| Convective heat transfer coefficient (Temp. transport equation) | $h_w = \alpha_c (\theta_{wall} - \theta_{rep})$ | 3.45 |

κ : Kármán's constant (-), C : Constant of integration (-), E : Experience constant (-), \bar{E} : Experience constant (-),
 k_p : Turbulence kinetic energy at the near wall grid (m^2/s^2), θ_{rep} : Representative temperature (K), $1/m$: Exponent (-)

解析的壁関数

従来の壁関数では y^+ を使用することが多いが、流れの剥離・再付着付近では壁からの距離に関係なく y^+ が常にゼロになるなどの問題が生ずる。これは y^+ 中の壁面摩擦速度 u_τ がゼロに近い値を示すため、 u_τ のみをパラメータとする y^+ もそれに伴いゼロに近い値を示すことに起因する。この問題に対して Craft ら^{3,2)} は u_τ から y^+ や壁面せん断応力・壁面熱フラックスを求めていくのではなく、 P_1 における乱流エネルギーで定義した新たな壁座標 $y^* (= y\sqrt{k_{P_1}}/\nu)$ を用いることで流れの剥離・再付着にも対応できるように解析的壁関数の提案を行っている。

この壁関数では壁面近傍のメッシュで運動量・温度輸送方程式を解析的に積分することでモデル化を行い、壁面せん断応力・壁面熱フラックスを求めていく。解析的壁関数は壁面近傍のメッシュ解像度による解析結果への影響が小さいとされており、低レイノルズ数効果を把握するため低レイノルズ数型 k - ε モデルを採用した場合でも壁面近傍のメッシュを非常に細かくすることなく解析を行うことができる点が特徴的である。

粘性底層においては y^* が 0 となることを想定しており、 P_1 が粘性底層内に位置する場合と対数領域に位置する場合など、状況に応じて使用する壁関数を切り替えて解析を行っていくものである。解析的壁関数はこのようなハイブリッド境界条件を採用しており、壁関数の導出や式の記述は極めて煩雑となるため詳しくは文献 3.3 もしくは 3.4 を参照されたい。一例として P_1 における y_n^* が k_{P_1} により無次元化された粘性底層境界の壁座標 y_v^* 内に位置する場合の壁関数は Eq. 3.46 ~ Eq. 3.50 の通りである。尚、 θ_{P_1} は壁面近傍第一メッシュ P_1 における温度であり、ここから h_{wall} を求めていくことで通常の境界条件と同様に壁面熱フラックスを算出することが可能である。

$$\theta_{p1} = \frac{\text{Pr}}{\mu_v} \left[\frac{C_{th} y^{*2}}{2} + A_{th} y^* \right] + \frac{\text{Pr} b_\mu}{\mu_v} \left[\frac{C_{th} y^{*3}}{3} - \frac{C_{th} y_v^* - A_{th}}{2} y^{*2} - C_{th} y_v^* y^* \right] + \theta_{wall} \quad 3.46$$

$$\mu_v = \mu [1 + b_\mu (y^* - y_v^*)] \quad 3.47$$

$$b_\mu = \frac{\mu_{wall} - \mu_v}{\mu_{wall} y_v^*} \quad 3.48$$

$$C_{th} = \frac{\mu_v^2}{\rho_v^2 k_{p1}} \left(\rho U \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad 3.49$$

$$A_{th} = -\frac{h_{wall}}{C_P} \frac{\mu_v}{\rho_v \sqrt{k_{p1}}} \quad 3.50$$

3.1.5 放射熱伝達

1) 形態係数

放射による熱伝達は屋内空間・屋外空間の温熱環境の形成に寄与することから、詳細な温度場の解析においては無視できないものである。CFDは標準で放射熱伝達が考慮されているのではなく、対流・熱伝導の解析のみ行うことができる。日射に代表される短波長放射、赤外線に代表される長波長放射は厳密に追求していこうとすると反射など影響から非常に煩雑となり、一つ一つの波を追っていくと計算負荷・精度の両面を考えた場合、CFDではあまり適切な方法とは言えない。CFDでは一般的にモンテカルロ法による形態係数の算出を行い、これに相互反射の影響を加味した Gebhart の吸収係数を導入し熱収支式を各メッシュにおいて満足させることで放射解析を行っている。まず以下より形態係数の算出手法の概説を行う。尚、ここで放射は長波長を意味し、放射解析時の仮定として流体部は放射に寄与しない、すべての固体表面上において熱放射・熱反射の指向性は考慮しない、つまり均等拡散面とする仮定を行っている。

まず、 i 面、 j 面間の2面の放射による熱伝達量 E_{ij}^d を考えた場合、次の式の通りとなる。ここで E_{ij} は i 面から j 面に直接入射・吸収される熱量、 F_{ij} は形態係数と呼ばれ、 i 面から放射された熱エネルギーの内、 j 面に到達する割合を表す。また σ はステファンボルツマン定数 [$\text{W/m}^2\text{K}^4$]、 T_i などは表面温度 [K] を表している。

$$E_{ij}^d = E_{ij} - E_{ji} = \varepsilon_j F_{ij} (\varepsilon_i \sigma T_i^4) - \varepsilon_i F_{ji} (\varepsilon_j \sigma T_j^4) \quad 3.51$$

E_{ij}^d を求めるにあたり、各面の形態係数の算出が必要となる。モンテカルロ法による算出では放射束の放出方向などを乱数の発生により決定し、これらの放射束を追跡することにより対象とする面に届く割合、つまり形態係数を求めていくものである。これは次の Eq. 3.52 に表される通りで、全放出数を N 、 i 面から j 面に到達した放射束の数を N_{ij} とすれば F_{ij} が求まるということを表す。

$$F_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad 3.52$$

また形態係数はエネルギーの平衡の面から見て、次に示す Eq. 3.53、Eq. 3.54 の相反則、総和則を満たす必要がある。尚、式中の A は各面の面積を表す。

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad 3.53$$

$$\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1 \quad 3.54$$

Eq. 3.54 の表すものとしては閉空間において j 面のみならず k, l, m, \dots と多くの面があることが想定され、それらの $N_{ij} \cdot N_{ik} \cdot N_{il} \cdot N_{im}$ を加算し、 N_i で除すると 1 になる。つまり放射束の散逸はなく空間内で保存されるというものである。しかし相反則の Eq. 3.53 を満たすとは限らない。このためモンテカルロ法により求めた F_{ij} 、 F_{ji} を A_i 、 A_j を用いて修正する。結果的に相反則を満たすように形態係数を算出しても今度は総和則が満足されないため、同じように修正を行い反復的試行により形態係数を求めていく。

2) Gebhart の吸収係数

閉空間においては入射する放射エネルギーの一部は反射され、他の固体表面に入射する。このため相互反射を考慮した熱輸送係数を定義する必要があり、本論文においては Gebhart の吸収係数がこれに当たる。形態係数は相互反射を考慮していないのに対して Gebhart の吸収係数は形態係数の算出時の考え方を応用し、相互反射を係数に反映させることを可能にしている。吸収係数の導出法としては以下に記す。

i 面、 j 面間の Gebhart の吸収係数 B_{ij} を用いて、各壁面での反射を考慮した i 面から j 面への放射による実質的な熱伝達量 Q'_{ij} [W] は以下の式で定義される。

$$Q'_{ij} = B_{ij} R_i \quad 3.55$$

ここで R_i は i 面から放射される熱エネルギー [W] である。この R_i は i 面から直接 j 面へ到達する場合、 i 面から他の面を経由して j 面へ到達する場合の 2 通りが考えられる。まず、直接的に到達する熱伝達量 Q^d_{ij} は i 面から放射される全エネルギー (R_i) は次の Eq. 3.56 である。

$$R_i = \sigma \epsilon_i A_i T_i^4 \quad 3.56$$

このうち直接 j 面に到達、吸収される熱エネルギーは式の通りとなる。

$$Q^d_{ij} = \epsilon_j F_{ij} R_i = F_{ij} \sigma \epsilon_i \epsilon_j A_i T_i^4 \quad 3.57$$

また i 面から j 面へ間接的に伝達される熱伝達量 Q'^r_{ij} [W] を考えるにあたり、 i 面から放射され i 、 j 面以外の面 k に入射する熱エネルギーは Eq. 3.58 で表される。

$$F_{ik} R_i = F_{ik} \sigma \varepsilon_i A_i T_i^4 \quad 3.58$$

さらに k 面で反射される熱エネルギーは Eq. 3.59 の通りとなる。

$$(1 - \varepsilon_k) F_{ik} R_i = (1 - \varepsilon_k) F_{ik} \sigma \varepsilon_i A_i T_i^4 \quad 3.59$$

k 面で反射され、実質的に j 面に到達、吸収される熱エネルギーは k, j 面間の Gebhart の吸収係数を用いると Eq. 3.60 で表される。

$$B_{kj} (1 - \varepsilon_k) F_{ik} R_i = B_{kj} (1 - \varepsilon_k) F_{ik} \sigma \varepsilon_i A_i T_i^4 \quad 3.60$$

i 面から放射され、 k 面を経て j 面に到達する全熱エネルギー Q_{ij}^r [W] は Eq. 3.60 を $k=1$ から固体表面分割数 n までの総和したものであるため以下の Eq. 3.61 のように表される。

$$Q_{ij}^r = \sum_{k=1}^n B_{kj} (1 - \varepsilon_k) F_{ik} R_i \quad 3.61$$

従って各壁面での反射を考慮した i 面から j 面への放射による実質的な熱伝達量 Q_{ij}^t は B_{ij} を用いることで Eq. 3.62 の通りとなり、これは Eq. 3.57、Eq. 3.61 の和である。

$$Q_{ij}^t = B_{ij} R_i = \varepsilon_j F_{ij} R_i + \sum_{k=1}^n B_{kj} (1 - \varepsilon_k) F_{ik} R_i \quad 3.62$$

Eq. 3.62 を整理すると B_{ij} を未知数とする n の 2 乗の連立一次元方程式であり、形態係数 F_{ij} 、放射率 ε_i が与えられると、Gebhart の吸収係数が求まる。

これにより算出される Gebhart の吸収係数より i 面における入射と放射を考慮した i 面から実質的に放射される熱エネルギー Q_{ri} [W] が次式のように与えられる。

$$Q_{ri} = \sum_{j=1}^n B_{ji} R_j - R_i = \sum_{j=1}^n B_{ji} \sigma \varepsilon_j A_j T_j^4 - \sigma \varepsilon_i A_i T_i^4 \quad 3.63$$

尚、Gebhart の吸収係数の吸収係数に対しても形態係数と同様に相反則及び総和則が成立する。

3.1.6 固体内の熱移動

固体内の熱伝導を解く際は Eq. 3.5 に示した支配方程式を解くこととなるが、流体・固体間の壁面の熱収支をとるために熱伝導量 Q_{cd} を算出する必要がある。定常状態において、固体内の熱伝導量は対象とする領域の温度勾配と面積に比例する。これはフーリエの法則と呼ばれるものであり、壁面 i での熱伝導量 Q_{cdi} [W] は次のように表される。

$$Q_{cdi} = A_i K_{ij} (T_i - T_j) \quad 3.64$$

ここで、 A_i は $i \cdot j$ 面の面積[m²]、 K_{ij} は総合熱伝達率[W/m²・K]、 T_i は要素 i の固体内部の温度[]を、 T_j は室内側流体部第一メッシュにおける温度[]を表す。また、 K_{ij} は x_l を要

素 i から壁面（境界面）までの距離[m]、 x_2 を要素 j から壁面までの距離[m]、 λ_l を固体の熱伝導率[W/m・K]、 λ_2 を流体の熱伝導率[W/m・K]とした場合、以下のとおりである。

$$K_{ij} = \left(\frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{x_2}{\lambda_2} \right)^{-1} \quad 3.65$$

ここに熱伝達係数を利用する場合は熱伝達係数 α_c に流体側の熱伝導率を考慮に入れて次の式で表される。

$$K_{ij} = \left(\frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_c} \right)^{-1} \quad 3.66$$

また、壁面表面温度 T_{wi} []は T_i 、 T_j をそれぞれの熱抵抗値の逆数 $h_i (= \lambda_l / x_l)$ 、 $h_j (= \lambda_2 / x_2)$ の加重平均を行うことで表面温度を求めていく。尚、流体側の熱抵抗値の逆数に関しては条件に応じて温度の対数則や壁関数などから算出する。

$$T_{wi} = \frac{h_i T_i + h_j T_j}{h_i + h_j} \quad 3.67$$

3.1.7 CFD と放射の連成解析

通常固体表面においては、Figure 3.6 に示すように周囲空気との熱交換（対流熱伝達）、周辺の固体表面との熱交換（放射熱伝達）、固体内部との熱交換（熱伝導）によって熱伝達を行う。

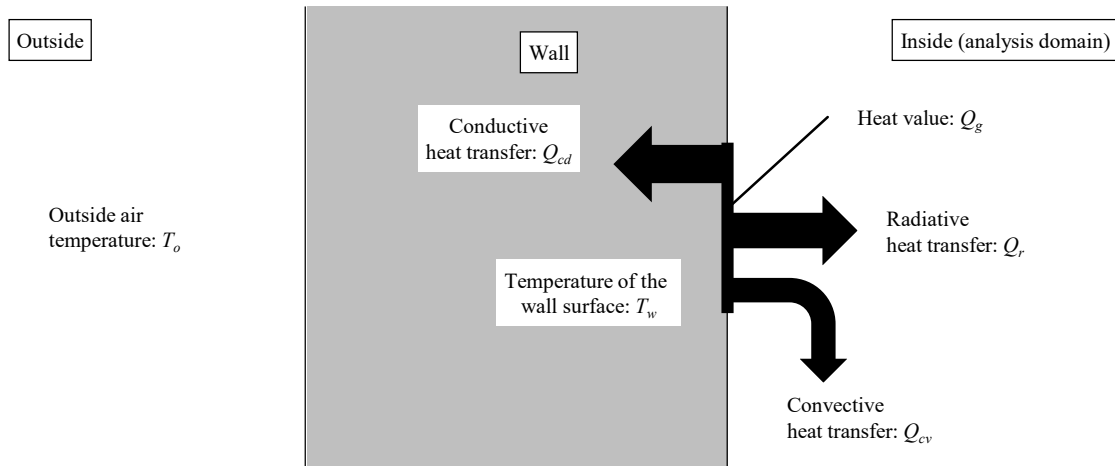


Figure 3.6 Respective heat transfer on the wall surface

これらの熱移動プロセスを連成させて解析を行う際には、常に Eq. 3.68 に示す熱収支式を満足しなければならない。すなわち、この熱収支式を満たすように各熱移動プロセスが連成され解析が進められる。尚、式中の記号 Q_{cv} 、 Q_r 、 Q_{cd} 、 Q_g はそれぞれ対流による熱移動、放射による熱移動、伝導による熱移動、発生項あるいは消失項を意味する。

$$Q_{cv} + Q_r + Q_{cd} + Q_g = 0 \quad 3.68$$

対流・放射・熱伝導の連成解析を行うには、固体表面において Eq. 3.68 の熱収支式を満足するという拘束条件がある。伝導、対流および放射による熱移動現象はそれぞれ個別に解析されるため、それぞれの解析において固体表面での境界条件が必要となる。これらの境界条件を導出する役割を果たすのが Eq. 3.68 に示す熱収支式である。従って、以下では Eq. 3.68 を境界条件とする放射・対流・熱伝導の連成解析手法について、1) 対流熱伝達量を境界条件として与えた場合、あるいは、2) 表面温度を境界条件として与えた場合について説明する。

1) 連成解析において対流熱伝達量を境界条件とする場合

解析フローを Figure 3.7 に示す。連成解析の境界条件となる対流伝達量 Q_{cvi} は、熱伝導量 Q_{cdi} 及び実質的な放射熱伝達量 Q_{ri} を熱収支式 Eq. 3.68 に代入することで算出される。ここで i は微小面要素を表す。この Q_{cvi} を用いて連成解析により室内空気の温度分布を算出することで、空気温度より T_{wi} が新たに算出される。ここまでは、Eq. 3.68 を満たしていたが、新たに T_{wi} が算出されたため、この T_{wi} を用いて Q_{cdi} 、 Q_{ri} を修正する必要がある。その結果、Eq. 3.68 を満足することが出来なくなり、修正された Q_{cdi} 、 Q_{ri} を用い Q_{cvi} を再度算出する。この手順を収束するまで繰り返す。

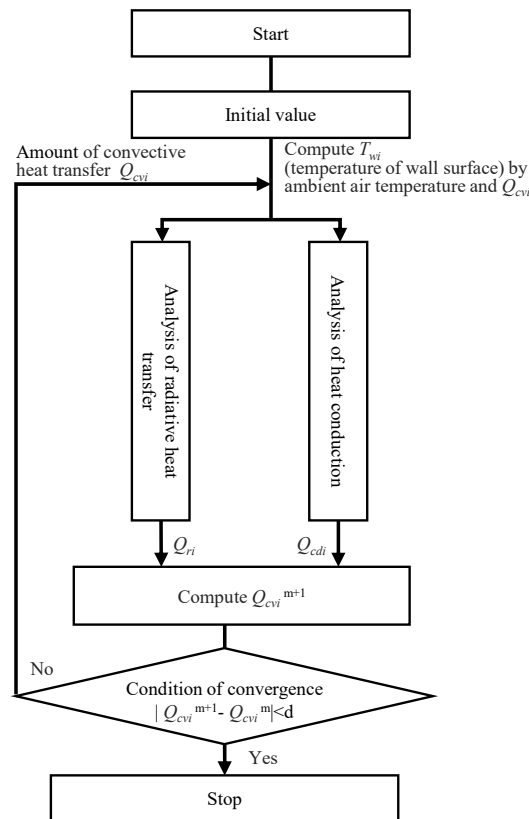


Figure 3.7 Flow chart of the coupled analysis (convective, radiative, and conductive heat transfer)
In case of the boundary condition is defined by the amount of convective heat transfer

2) 連成解析において固体表面温度を境界条件とする場合
解析フローを Figure 3.8 に示す。

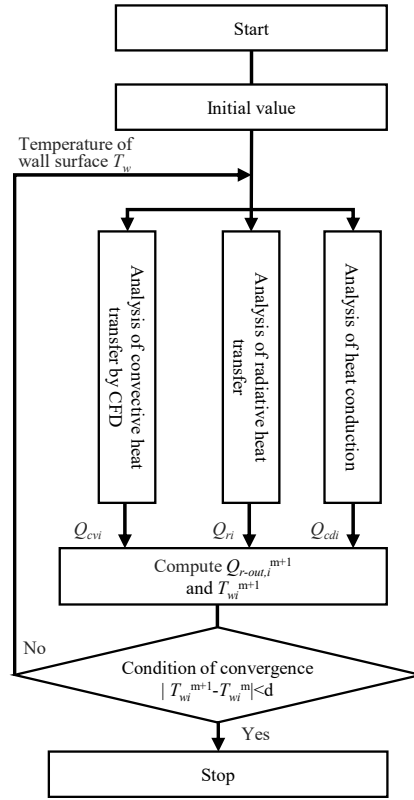


Figure 3.8 Flow chart of the coupled analysis (convective, radiative and conductive heat transfer)
In case of the boundary condition is defined by temperature of the wall surface

固体表面温度 T_{wi} を用いて連成解析を行うことにより空気温度分布および固体表面の対流熱伝達量 Q_{cvi} が算出される。その際に、一般的には熱伝達率などの壁関数が用いられる。同時にこの時点の T_{wi} を用いて熱伝導計算、放射計算を行う。放射計算においては Eq. 3.69 ~ Eq. 3.71 に示すように、固体表面の実質的な放射伝達量 Q_{ri} を他の面へ放出する放射熱量 $Q_{r-out,i}$ と、他の面から入射する放射熱量 $Q_{r-in,i}$ に分ける。

$$Q_{ri} = Q_{r-in,i} - Q_{r-out,i} = \sum_{j=1}^n B_{ji} \sigma \epsilon_j A_j T_j^4 - \sigma \epsilon_i A_i T_i^4 \quad 3.69$$

$$Q_{r-in,i} = \sum_{j=1}^n B_{ji} \sigma \epsilon_j A_j T_j^4 \quad 3.70$$

$$Q_{r-out,i} = \sigma \epsilon_i A_i T_i^4 \quad 3.71$$

この時点での他の面 j の温度 T_{wj} を用いて、 i 面の $Q_{r-in,i}$ のみを算出する。次に熱収支式 Eq. 3.68 を満たすように、Eq. 3.71 により i 面からの放射熱量 $Q_{r-out,i}$ を求める。この $Q_{r-out,i}$ を用いて新たな固体表面温度 T_{wi} を算出する。この修正された T_{wi} を用い、連成解析から空気温度分布及び固体表面の対流熱伝達量を算出する。この手順を収束するまで繰り返す。

3.2 最適化問題

3.2.1 最適化問題

最適化問題（数理計画問題）とは意思決定者の価値基準に照らして最も適した解を見出す問題、手法である。工学設計などの意思決定問題を解くための最適化問題（単目的）は次のように定義される。

目的: $f(x) \rightarrow \text{Min}$

制約: $x \in X$

$f(x)$ は目的関数、 x は設計変数と呼ばれ、 n 次元の実数のベクトルである。これが複数の目的に関する最適化である多目的最適化では次のように定式化される。

目的: $f(x) := (f_1(x), \dots, f_m(x)) \rightarrow \text{Min}$

制約: $x \in X$

多目的最適化問題において、すべての目的を最小化（もしくは最大化）させる解は存在せず、トレードオフの関係にあることがほとんどである。このため、いずれか（もしくは全て）の目的関数の最小化（もしくは最大化）という目的を妥協して、目的の達成に対して全体的なバランスのとれた解を探索していくこととなる。

ここで、最適化問題で頻出する用語を図説する（Figure 3.9に示す。 $f(x) \rightarrow \text{Min}$ を考える）。

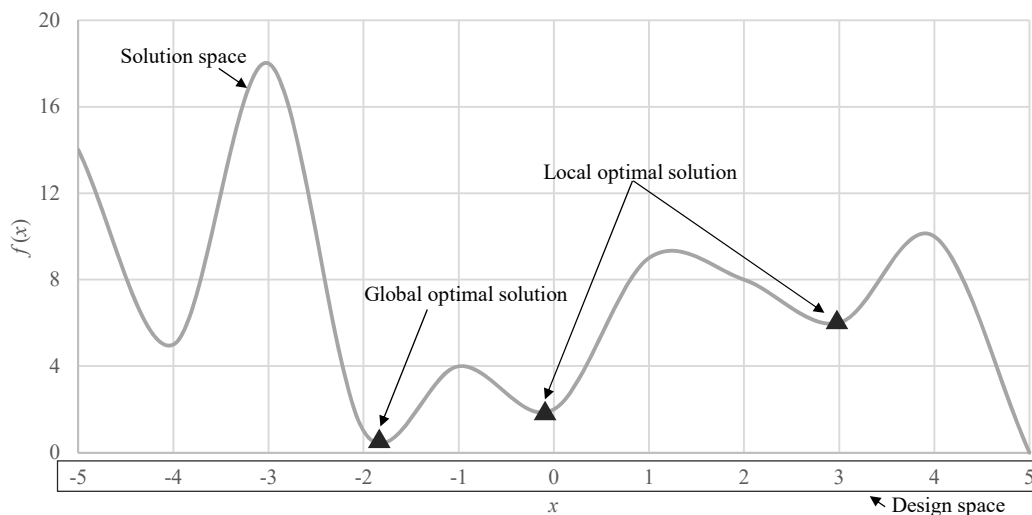


Figure 3.9 Meaning of each part for the metamodel

図中の Design space (設計空間) は設計変数の組み合わせによる集合であり、設計変数の種類に応じて空間の次元が増えていく。Solution space (解空間) は設計空間上の目的関数を意味する。Local optimal solution (局所解) は最適ではないが、解空間上での良好な解の集合である。Global optimal solution (大域解もしくは大域的最適解) は解空間上での最も良好な解を意味する。

最適化を実施するにあたり、設計変数の定義 (値が連続値か離散値か、離散値であればその値に大小関係が存在するか否か) や目的関数の形状、最適化の初期段階でその関数が既知か否かで最適化手法は異なる。尚、本論文では未知の目的関数のモデル化による最適化を対象としているため、目的関数が未知の場合での最適化手法について解説する。まず、以下に設計変数の定義及び目的関数の形状に応じた最適化問題の概要を示す。

1) 線形計画問題

目的関数や制約条件が設計変数に対して線形の関係を持つものであり、その最適化は容易である。

2) 非線形計画問題

目的関数や制約条件が設計変数に対して非線形の関係を持つこととなる。特に目的関数が二次関数となるものを二次計画問題、目的関数が凸関数となるものを凸計画問題と呼ばれる。この二次計画、凸計画問題 (単峰性) は極値となる点の探索となり、比較的簡単な最適化問題に位置付けられている。一方でこれらに属さないような多峰性の非線形計画問題では大域解 (最良解) に加えて局所解 (優良解) も存在する。最適化時には局所解に陥らない (トラップされない) ような処理が必要であるため、線形計画問題と比較すると大域解の探索が難しく、最適化までに要する処理も必然的に長くなる。

3) 整数計画問題

設計変数が離散値であり、設計変数に大小関係が存在するような最適化問題である。例えば、設計変数がファンの羽の数、ネジの本数などの場合がこの整数計画問題に相当する。尚、連続値、離散値が混在する最適化問題は混合整数計画問題とも呼ばれる。

4) 組合せ最適化問題

設計変数が離散値であり、例えば、設計変数が {On Off} の 2 択かつ、この情報を {1 0} に変換する必要がある場合など、その変換した情報に大小関係が存在しない問題がこれに当たる。計算量の観点から言えば、目的関数が既知である場合など、すべての組み合わせを試行できる場合は、総当りの組み合わせを評価し、最適解を得ることは容易である。しかし、目的関数が既知ではなく、目的関数 (メタモデル) を得るために別途計算をしないとけない、という場合には計算負荷を削減するために、組み合わせの数を限定してメタモデリングを実施し、最適化を行うといった対策が講じられる。

5) 多目的最適化問題

目的関数が複数ある場合には多目的最適化問題と呼ばれる。目的関数同士は一方を良くしようとする、もう一方が悪くなるといったトレードオフの関係にあることがほとんどであり、全目的関数が大域的最適解をとるような解は存在することはまず無い。従って、全目的関数のバランスの良い解を求めていく必要がある。多目的最適化で得られるパレート解の集合をパレートフロントと呼び、このフロントにあるパレート解の一つを多目的の場合における最適解とする。この際、どの解を選択するかは最適化を行うものに委ねられる。例えば、目的関数 $f_1(x)$ よりも目的関数 $f_2(x)$ を優先したいのであればパレートフロントの内、 $f_2(x)$ の評価値が高い方を選択するなど、目的とする対象によって設計値とする解は異なる。本論文では、多目的な最適化を実施するため、多目的最適化問題の探索手法について解説する。

多目的最適化問題を考える場合、各目的を評価する関数=目的関数（または評価関数）が既知か否かで最適化のフローは異なる。目的関数が未知の場合、つまり設計変数が目的関数に及ぼす影響が未知の場合一般的に、実験、実測、シミュレーション等に基づいた事前の目的関数のモデル化が必要となる。この手法は何らかの現象（対象モデル）のモデル化であり上位のモデルを作成する行為、つまりメタモデリングと呼ばれ、そのモデルはメタモデルもしくは近似関数とも称される。目的関数 2 種、設計変数 2 種の場合、次式のように目的関数が記述できる。ここで、 f_1, f_2 が目的関数、 x_1, x_2 が設計変数である。尚、 $x=[x_1 \ x_2]$ のベクトルとして目的関数の引数として表すこともある。CFD を用いた最適化の場合、設計変数の目的関数への応答を求めて目的関数を近似していく手法（逐次近似最適化）が一般的である。

$$f_1 = f_1(x_1, x_2), \quad f_2 = f_2(x_1, x_2)$$

3.2.2 メタモデル

メタモデリング手法として最も単純な手法は、設計変数同士の組み合わせで考えられるだけの試行（以下、サンプリング）を繰り返して目的関数を近似する手法である。ただし、この手法は膨大なサンプリング回数をこなさなければならないため、一回の試行に多くの時間を要するサンプリング手法（実験、CFD 等）の場合は現実的ではなく、サンプリング回数を限定し、少ないサンプリング回数で目的関数の近似を行うのが常である。以下では、まず、メタモデリング手法を幾つか解説するが、本論文では Kriging による応答曲面でメタモデリング及びこのメタモデルを利用した多目的最適化を実施するため、特に Kriging について詳説する。

1) 線形近似・指数近似・対数近似・多項式近似

事前にメタモデルの大まかな近似の形を決めた上で式の各項の係数を最小二乗法により求めるメタモデリング手法である。求めた係数をもとに目的関数を表現する。実際のモデル

の形がメタモデルで表現可能な範囲では有効な手法であり、特に実際のモデルの形が事前にある程度わかっている場合に利用されることが多い。

2) Kriging

未知空間に対するサンプル点とその重みに基づき、バリオグラムと呼ばれる変数を推定し、この変数により未知空間を補間する。以下では Kriging によるメタモデリング手法について解説する。 M 個のサンプル $f(x^{(1)}), f(x^{(2)}), \dots, f(x^{(M)})$ が与えられたとき $f(x)$ を次式により近似する。

$$\hat{f}(x) = \mu + \varepsilon(x) \quad 3.72$$

Eq. 3.72 の μ はグローバルモデル、 $\varepsilon(x)$ はローカルモデルである。グローバルモデルは与えられたすべてのサンプル点の平均である。ローカルモデルは点 x での μ からの偏差を表し、正規分布に従う確率変数 $N(0, \sigma^2)$ として定義される。任意の2点間 $(x^{(i)}, x^{(j)})$ の偏差に関する相関は次式の相関関数で定義される。

$$\begin{aligned} \text{Corr}[\varepsilon(x^{(i)}), \varepsilon(x^{(j)})] &= R(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)}) \\ &= \prod_{k=1}^n R_k(x_k^{(i)}, x_k^{(j)}) \end{aligned} \quad 3.73$$

式中の $R_k(x_k^{(i)}, x_k^{(j)})$ は k 番目の設計変数 $x_k (k=1, 2, \dots, n)$ に沿った相関関数である。相関関数は多種存在する。ここでは Eq. 3.74 の相関関数を考える。式中の θ_k は x_k 毎の距離に対する重みである。

$$R_k(x_k^{(i)}, x_k^{(j)}) = \exp\left[-\theta_k |x_k^{(i)} - x_k^{(j)}|^2\right] \quad (\theta_k \geq 0) \quad 3.74$$

Kriging は μ, σ^2, θ の値で一意に定まる。ここでは μ, σ^2, θ に関する尤度関数 $\text{Ln}(\mu, \sigma^2, \theta)$ が最大となるときの値を考える。まず、 $\text{Ln}(\mu, \sigma^2, \theta)$ が最大となるときの μ と σ^2 は次式で陽的に求めることができる。

$$\mu = \frac{\mathbf{I}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{f}}{\mathbf{I}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{I}} \quad 3.75$$

$$\sigma^2 = \frac{(\mathbf{f} - \mathbf{I}\mu)^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{f} - \mathbf{I}\mu)}{M} \quad 3.76$$

\mathbf{R} は (i, j) 要素が $\text{Corr}[\varepsilon(x^{(i)}), \varepsilon(x^{(j)})]$ となる M 次の正方行列、 \mathbf{f} は $[f(x^{(1)}), f(x^{(2)}), \dots, f(x^{(M)})]^T$ 、 \mathbf{I} は M 次元の単位ベクトルを意味する。 θ は次式で表される $\text{Ln}(\mu, \sigma^2, \theta)$ が最大時の値を探索する。

$$\text{Ln}(\mu, \sigma^2, \theta) = -\frac{M}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{1}{2} \ln(|\mathbf{R}|) \quad 3.77$$

以上より、Eq. 3.72 は以下の Eq. 3.78 の通りに記述できる。

$$\hat{f}(x) = \mu + \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{f} - \mathbf{1}\mu) \quad 3.78$$

\mathbf{r} は i 番目の要素が $\text{Corr}[\varepsilon(x), \varepsilon(x^{(i)})]$ となる M 次元のベクトルである。また、Kriging による応答曲面(Eq. 3.72)の平均二乗誤差は次式で表すことができる。

$$\hat{s}^2(x) = \sigma^2 \left[1 - \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} + \frac{(\mathbf{1} - \mathbf{1}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r})}{\mathbf{1}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{1}} \right] \quad 3.79$$

この式の \mathbf{r} 及び \mathbf{R} の定義より、点 x が既知サンプル点 $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(M)}$ から遠いほど平均二乗誤差が大きくなり、同時に点 x で推定される近似関数の値に含まれる不確かさが高いことを意味することがわかる。また、既知サンプル点の誤差は 0 として扱われる。これを図示すると、Figure 3.10 のようなイメージである。

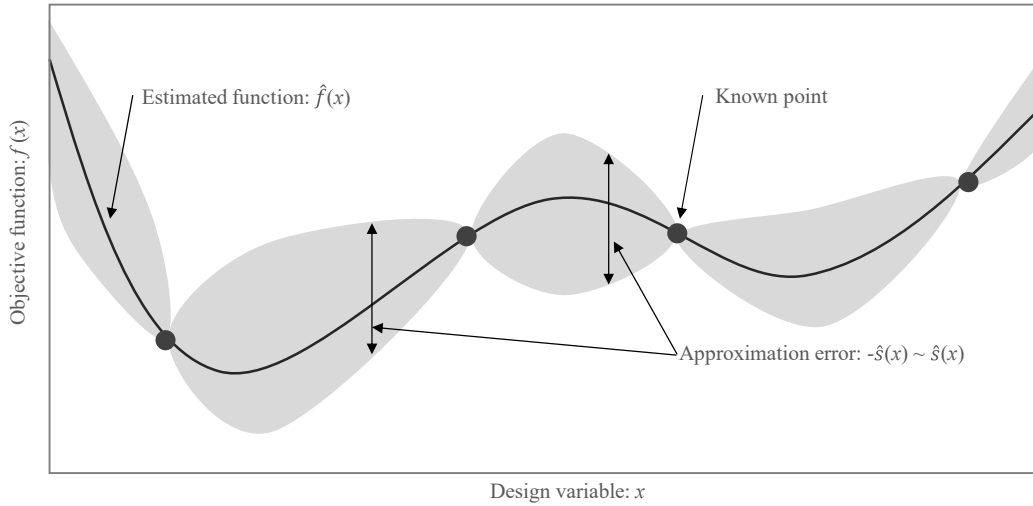


Figure 3.10 Modeling the objective function using Kriging method

3) RBF ネットワーク

入力層・隠れ層・出力層の 3 層のニューラルネットワークによる任意の非線形関数の近似手法である。RBF ネットワークでは基底関数を出力層で重ね合わせることで未知の区間の補間を行う。関数形状を複数重ね合わせることで近似することから非線形性の強い目的関数を表現できる。ただし、過剰に複雑な関数が生成される可能性もある。

3.2.3 初期サンプリング (実験計画法)

メタモデリングが必要な場合はサンプリングを行い、設計変数と目的関数に関するデータを収集しモデリングを進める。サンプリングが容易な場合は初期サンプリング数を膨大にとり、解空間を網羅するようにサンプリングを実施すると追加サンプリングは不要である。実際には、非効率であるため初期サンプリング→追加サンプリングというプロセスを踏

むことが多い。ここでは、実験計画法の内、ラテン超方格法とランダムサンプリングについて解説を行う。

1) ラテン超方格法

複数の設計変数がある場合に、任意のサンプリング数にて対して、それぞれの設計変数がある範囲内で一様に現れ、なおかつそれぞれの設計変数の組み合わせが重複しないようにそれぞれのサンプルでの設計変数を決定する。設計変数の決定にあたっては、累積確率密度をサンプリング数で除し、その密度に応じてランダムに設計変数を選ぶという特徴を持つ。設計変数が dv_1 と dv_2 の2種の場合、ラテン方格法に対応する。例えば、ある設計変数 dv_1 の離散幅 Δx_1 があるとする。この dv_1 は、 $0 \leq dv_1 \leq 10$ の間で変化させることができ、また、 Δx_1 は1とした場合、設計変数の組み合わせの数 (= 初期サンプリング数) は最大10となる。これはラテン超方格法が一度評価 (サンプリング) した設計変数を重複して評価しない前提となっているためである。また、他の設計変数がどの組み合わせになろうとも dv_1 の組み合わせには依存しない。設計変数が dv_1, dv_2, dv_3 の3種の場合も同様で、設計変数の組み合わせには制限がかかる。このとき、それぞれの設計変数の最小・最大値を $dv_{1, \min}, dv_{1, \max}, dv_{2, \min}, \dots, dv_{3, \max}$ とし、離散幅を $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ とすると、最大のサンプリング数は $\min\{|dv_{1, \max} - dv_{1, \min}|/\Delta x_1, |dv_{2, \max} - dv_{2, \min}|/\Delta x_2, |dv_{3, \max} - dv_{3, \min}|/\Delta x_3\}$ となる。

2) ランダムサンプリング

同じ設計変数の組み合わせとならないように無作為に選ばれた値をサンプル値とする。それぞれの設計変数内で重複した設計変数での評価を行うこともある。上述のように設計変数が3種のとき、ランダムサンプリングの最大サンプリング数は $(|dv_{1, \max} - dv_{1, \min}|/\Delta x_1) \times (|dv_{2, \max} - dv_{2, \min}|/\Delta x_2) \times (|dv_{3, \max} - dv_{3, \min}|/\Delta x_3)$ である。ラテン超方格法では設計変数が On/Off (0, 1) などの整数値となる場合に、同じ設計変数内でサンプリング値が重複しない前提条件を満たすことができないため、代わりにランダムサンプリングを用いることが多い。

3.2.4 追加サンプリング(EGO)

初期サンプリングにて最低限のサンプリングを実施し解空間の大まかな把握が終了した段階で追加サンプリングを実施する。追加サンプル点の選定には様々な手法が考えられる。例えば応答曲面を作成してメタモデルの可視化を行い、解空間において大域解となりそうな局所解付近に追加サンプル点を置く (人為的な選定)、サンプル点同士の距離が大きいところに内挿する形でサンプル点を置くなど、単純なものも考えられる。追加サンプル点の選定手法の中でも合理的手法の一つに Kriging の近似関数と平均二乗誤差の関数を利用した Efficient Global Optimization (EGO) がある。以下ではその EGO による追加サンプリング点の選定手法に関して解説する。

上述の通り、EGO では Kriging の近似関数と平均二乗誤差の関数を利用する。ここでは目的関数 $f(x)$ を最小化する場合を考える。EGO は現時点で得ているメタモデル、つまり

Kriging の近似関数において、最小化し得る点（その時点で精度が未改善で局所解となり得る領域）を探索するものである。それには最小化の可能性のある領域を明らかにする必要があるので、現時点で得たサンプル点の内、最小の目的関数値 f_{ref} と Kriging で補間した区間の誤差の情報（ F : 正規分布に従う確率変数 $N(\hat{f}(x), \hat{s}^2(x))$ ）を利用し、追加サンプリングを行った場合に目的関数を最小化させる改善量 $I[f(x)]$ を次式のように定義する。

$$I[f(x)] = \begin{cases} f_{\text{ref}} - F & \text{if } F < f_{\text{ref}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad 3.80$$

さらに次式のように $I[f(x)]$ と F の確率密度関数 $\phi(F)$ により f_{ref} を下回る領域で積分を行うと、点 x における目的関数を最小化する改善量の”期待値”を求めることができる。

$$\begin{aligned} EI[f(x)] &= \int_{-\infty}^{\infty} I[f(x)] \phi(F) dF \\ &= \int_{-\infty}^{f_{\text{ref}}} (f_{\text{ref}} - F) \phi(F) dF \end{aligned} \quad 3.81$$

EI は Expected Improvement の略であり、 I 及び EI のイメージとしては Figure 3.11 の通りである。追加サンプル点はこの $EI[f(x)]$ の最大値をとる設計変数の点とすれば良い。尚、Kriging の応答曲面が存在するということは $\hat{s}^2(x)$ に関する応答曲面が存在し、なおかつ $EI[f(x)]$ に関する応答曲面も有することとなる。つまり、 EI を最大化する点（大域解）の探索であり、 EI の応答曲面は Figure 3.11 に示した図から推察するに多峰性の曲面となることから、発見的な最適解の探索アルゴリズムを採用する必要性（もちろん EI の応答曲面を見て最大となる点を選定しても良い）が出てくる。

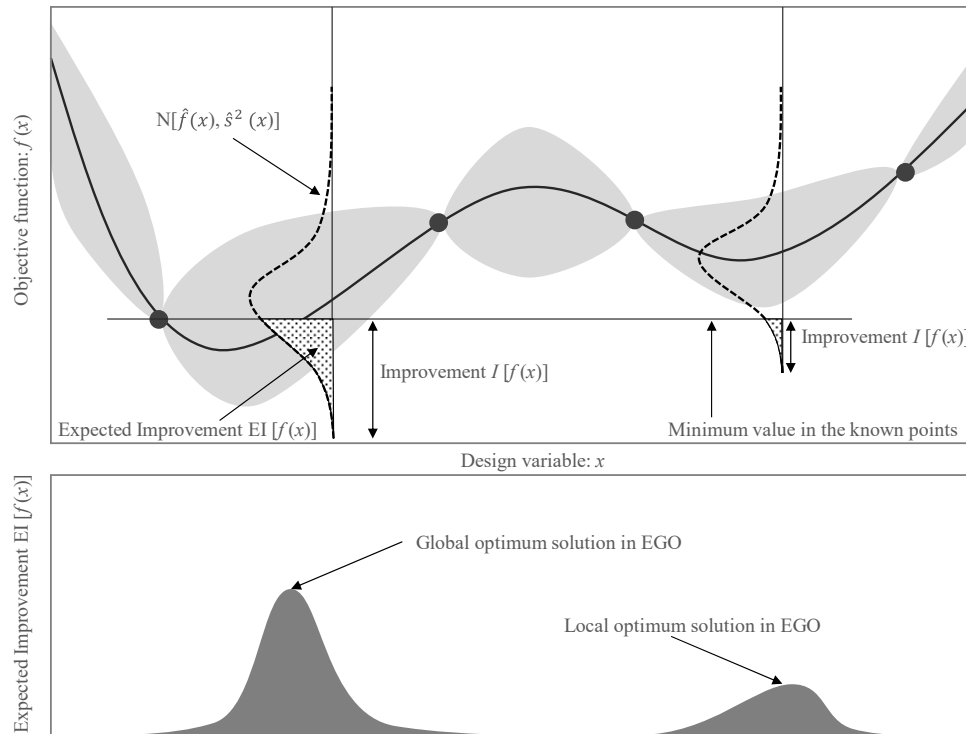


Figure 3.11 Expected Improvement

3.2.5 最適化アルゴリズム（遺伝的アルゴリズム）

メタモデルが用意できた後は最適解の探索に遷移する。最も単純な最適化アルゴリズムは山登り法である。これは初期の探索点から目的関数値の小さい（大きい）方へ探索点を移動していくことで最適解を求めていくため、実装が容易な手法である。しかし、メタモデルが多峰性に富む場合、初期の探索点が大域解周辺にないと局所解にトラップされるという問題がある。多種提案されている最適化のアルゴリズムにおいて、広範囲の最適化問題に対して適用可能なアルゴリズムはメタヒューリスティクスと呼ばれる。メタヒューリスティクスは、Particle Swarm Optimization (PSO)や以下で詳説する進化的アルゴリズムに属する遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)が存在する。GA の計算アルゴリズムを Figure 3.12 に示す。尚、GA を多目的に拡張した手法は多目的遺伝的アルゴリズム(MOGA: Multi Objective Genetic Algorithm)と呼ばれ、本論文ではこの MOGA を最適化アルゴリズムとして採用している。

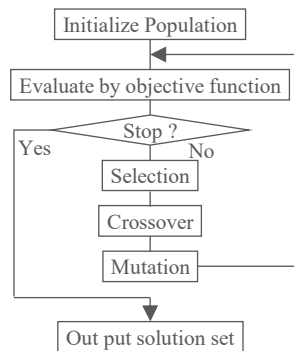


Figure 3.12 Flow diagram of the Genetic Algorithm

GA の流れとしては、ランダムに設計変数の組み合わせの候補 (= 個体) の集団を生成 (Initialize Population) し、設計変数の実数や整数値を生物学における染色体に相当するデータ (2進数) にエンコードし、個体を評価関数 (適合度関数とも呼ばれる) により評価する (Evaluate)。評価結果より交叉相手の選択 (Selection)、交叉 (Crossover) や突然変異 (Mutation) を繰り返し、評価の高い個体を残す。GA 実行時の参考例としては Figure 3.12 に示す通り、評価の高い個体同士を交叉させ、より環境に適合した (評価の高い) 新しく子個体を作成する (通常は親 2 個体の交叉で子 2 個体が生成される)。

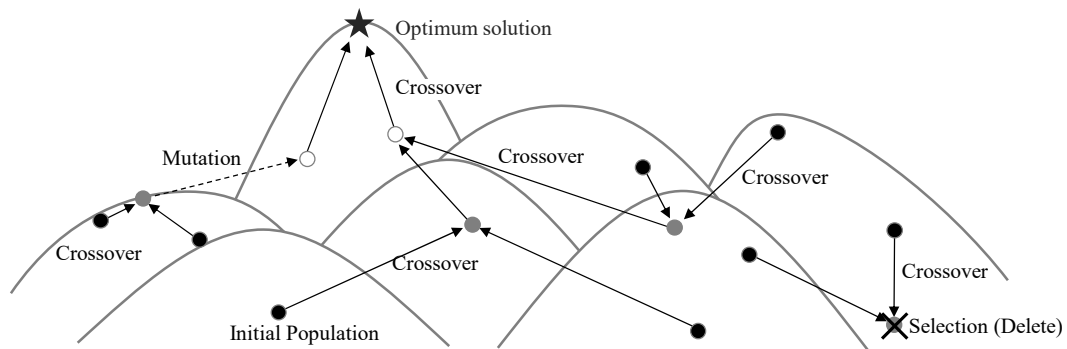


Figure 3.13 Example of evolution in GA

さらに子個体の突然変異も行い、局所解にトラップされないように個体の位置を確率的に変化させ、そこで局所解もしくは大域解の探索を行うような処理も入っている。選択の過程では、交叉が上手く行かず次のステップ (次世代) に残さない、つまり淘汰されるような子個体も生まれてくる。これは環境に適合した個体が残って進化していくと、劣った個体は淘汰されるという生物学の自然選択説を模して、コンピュータ上で汎用的に再現するアルゴリズムである。尚、基本的に Initialize Population や交叉・突然変異では実数値から変換した情報 (染色体、通常は 0, 1 の組み合わせのデータ) を扱うがこの変換作業はエンコードと呼ばれる。一方で、評価ではエンコードされた情報を実数値などに変換する必要があり、この作業をデコードと呼ぶ。本論文ではこれらの解説は割愛する。以下では選択・交叉・突然変異について解説する。

1) 選択手法 - ランキング法

選択は、個体群内で相対的に評価の高い個体を次世代へと選択して残す操作である。選択の手法としてはトーナメント法、ルーレット法、トーナメント法などが提案されている。ランキング法は個体の適合度を用いつつ、適合度の高い順に並べてランキングを行い、選択する手法である。個体 i の個体群内での順番を r_i とすると、割当関数（減少関数）： $a(x)$ に基づいて次世代の個体数 n_i が求められる。この際、 $n_i = a(r_i)$ として n_i を求める。尚、 $a(x)$ は次式を満たす必要がある。式中の n は全個体数である。

$$\sum_{i=1}^n a(i) = n \quad 3.82$$

ランキング法でのアプローチ手法としては大きくパレートランキング評価アプローチ、多目的関数重み付加の評価アプローチに分けることができる。本論文では MOGA アプローチの中でも前者のパレートランキング評価アプローチについての概要を示すこととする。

(a) Goldberg's Pareto Ranking^{3.12)}

Goldberg らにより提案されたパレートランキング法である。同手法のアルゴリズムを Figure 3.14 に示す。この手法により、得られたそれぞれの解のランキングに基づいて選択を行うことで解の優劣を意識した選択を行うことができる。

```

0. def goldbergs_pareto_ranking (pareto, x_min, x_max):
1.     pareto_executable = []
2.     for x, y in pareto.items():
3.         condition = ((x_min <= x) & (x <= x_max)).all()
4.         if condition:
5.             pareto_executable.append(y)
6.     i = 1
7.     ranked_solution = dict()
8.     while True:
9.         y = min(pareto_executable)
10.        ranked_solution[y] = i
11.        pareto_executable.remove(y)
12.        i += 1
13.        if len(pareto_executable) == 0:
14.            break
15.    return ranked_solution

```

Figure 3.14 Pareto Ranking Genetic Algorithm (Goldberg's Pareto Ranking)
by Python

(b) Fonseca's Pareto Ranking^{3.13)}

上述の Goldberg's Pareto Ranking を拡張したパレートランキング法である。Multi-Objective Genetic Algorithm と呼ばれ、すべての非劣解を持つ染色体に Rank 1 を割り当て、他の染色体に非劣解を支配する（つまり自分より優れた個体）数+1 を Rank として割り当てる。アルゴリズムは Figure 3.15 に示した通りである。

```

0. def fonsecas_pareto_ranking (pareto, x_min, x_max):
1.     pareto_executable = []
2.     for x, y in pareto.items():
3.         condition = ((x_min<=x) & (x<=x_max)).all()
4.         if condition:
5.             pareto_executable.append(y)
6.     y = min(np.sum(pareto_executable, axis=1))
7.     ranked_solution= {y : 1}
8.     pareto_executable.remove(y)
9.     i = 1
10.    while True:
11.        y_index = np.argmin(pareto_executable, axis=0)
12.        for index in y_index:
13.            ranked_solution = {pareto_executable[index]: i+1}
14.            pareto_executable.remove(pareto_executable[index])
15.        i += 1
16.        if len(pareto_executable)==0:
17.            break
18.    return ranked_solution

```

Figure 3.15 Multi-Objective Genetic Algorithm (Fonseca's Pareto Ranking) by Python

2) 選択手法 - ルーレット法

ルーレット法では、後述する個体の適合度に応じた確率で次世代の個体を選択する。集団 P に存在する個体 i の適合度を f_i とすると、個体 i が次世代で選択される確率 p_i は次式で表される。

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j \in P} f_j} \quad 3.83$$

上式 Eq. 3.83 は p_i が個体 i の適合度 f_i を全個体の適合度の総和で除した割合として考える事ができる。他の選択手法と比較すると、簡易な手法という位置付けではあるものの、それ故の問題も存在する。まず、 p_i を用いて確率的に次世代への個体が生成されるため、その確率の揺らぎによって個体群内での優秀な個体が淘汰される可能性がある。これに対しては、個体群内での優秀な個体を強制的に次世代にそのまま伝えるエリート戦略と呼ばれる手法が提案されている。その他の問題点として、個体群の進化が収束に近づいた際に、個体同士の適合度の差が少なくなるため、 f_i が一様になる点や、適合度が負の場合に直接用いることができないという問題点がある。これらの問題点に対しては、スケーリング法と呼ばれる、適合度の相対値に基づく変換手法が提案されている。スケーリング法の内、線形スケーリング法は次式の関数に従い、適合度を変換する。

$$f' = af + b \quad 3.84$$

ここで f' 及び f が変換後、変換前の適合度、 a 及び b が変換定数である。 a, b は次式のように求めることができる。式中の f_{max} や f_{min} は個体群内での適合度の最大値、最小値である。

$$a = \frac{f'_{max} - f'_{min}}{f_{max} - f_{min}} \quad 3.85$$

$$b = f'_{min} - af_{min} \quad 3.86$$

ただし、実用上はルーレット法が採用される例はそれほど多くなく、一般的にはランキング法やトーナメント法が採用される。

3) 選択手法 - トーナメント法

トーナメント法では s 個の個体を組みにしてそれらの間で適合度の高い個体（もしくは適合度に応じた確率重みで一つを選択する）をコピーして s 個として次世代の個体群を生成する。サイズ s が 2 の場合のトーナメント法のイメージを Figure 3.16 に示す。

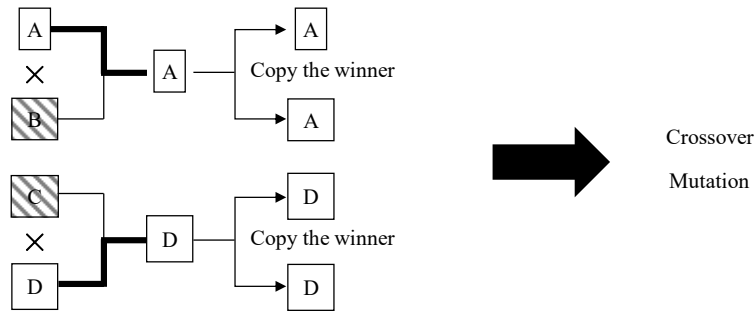


Figure 3.16 Tournament selection

この場合、個体群が n/s のペアに分割され、それぞれのペアごとにトーナメントが実施され、適合度の高い（もしくは適合度に応じた確率重みで選択された）個体が数を 2 倍にすることで次世代の個体群が生成される。尚、 n/s に余りが出た場合は、既に割り当てられた個体と余りを組みとするなどの対策が取られる。

(a) Fitness based on rank (1/Rank)

個体 i の Rank (γ_i) の逆数を取り、最大が 1 となる適合度で評価を行う。Fitness based on rank (1/Rank) は次の Eq. 3.87 で定義される。式中の F_i は個体 i の適合度、 γ_i は個体 i の Rank を表し、適合度は評価関数にて陽的に別途求める。

$$F_i = 1/\gamma_i \quad 3.87$$

(b) Fitness based on rank

定数 α を用いた Rank (γ_i) に関する指数関数により個体の適合度を評価する。尚 α は $0 < \alpha < 1$ である。 α が 1 に近い場合は指数関数的減衰を示し、 γ_i が 1 に近いほど適合度が高く、1 を離れると極端に適合度が低下する。 α が 0.1 程度を下回るとほぼ線形的な減衰を示す。Eq. 3.88 の μ は Rank に属する個体数である。Fitness based on rank (1/Rank) 及び Fitness based on rank のランキングの例としては Figure 3.17 の通りである。

$$F_i = \alpha(1-\alpha)^{\gamma_i-1} \quad 3.88$$

(c) Average Fitness

適合度を Eq. 3.89 により求める。同ランクの個体の適合度の平均値（平均適合度）を求める。 N は全個体数である。

$$F_i = N - \sum_{k=1}^{r_i-1} \mu(k) - 0.5(\mu(\gamma_i) - 1) \quad 3.89$$

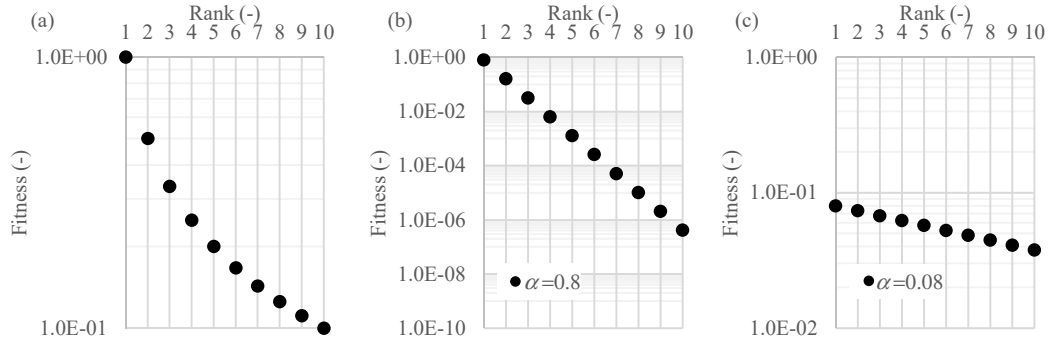


Figure 3.17 Comparison with Fitness based on rank (1/Rank) and Fitness based on rank: (a) Fitness based on rank (1/Rank); (b) Fitness based on rank $\alpha = 0.8$; (c) Fitness based on rank $\alpha = 0.08$

4) 交叉

交叉は個体群から選択された 2 つの個体の間で染色体の部分列を交換する操作である。各個体に対して確率 p_c もしくは個体群の内、 p_c の確率で交叉が適用される。交叉手法は様々な手法が提案されている。ここでは、一点交叉、二点交叉、一様交叉などの概要を示す。

(a) 1-point Crossover

一点交叉は個体を構成する文字列のある一点を境界に文字列を交換する手法である。次の個体文字列 s_1, s_2 の場合を考える。

$s_1 = 0110*1011011$

$s_2 = 0010*0101011$

交叉を行う点として " * " が選ばれたとする。交叉後の個体は

$s_1 = 0110*0101011$

$s_2 = 0010*1011011$

となり、左から 5 つ目以降の文字列が交換される。この例では交差点を " * " としているが、実際の一点交叉は、長さ w の文字列のうち、その $w-1$ 箇所の文字間から一箇所をランダムに選んでそれ以降の文字列を交換する処理を行う。

(b) 二点交叉

二点交叉は交叉点を二箇所選びその間の文字列を交換する手法である。一点交叉と同じく、次に示す文字列 s_1, s_2 の場合を考える。

$s_1 = 01*1010*11011$

$s_2 = 00*1001*01011$

二点交叉では s_1 と s_2 の交叉点 “ * ” の間を交換する。交叉後の個体は次の通りとなる。

$$s_1 = 01*1001*11011$$

$$s_2 = 00*1010*01011$$

さらに、二点交叉を一般化させると n 点交叉を定義することも可能である。

(c) 一様交叉

交叉点を使用する代わりに 0, 1 のテンプレートをランダムに生成し、それに基づいて互いの文字を交換するかどうかを決定する。長さ w の個体に対してテンプレート $t_i \in \{0, 1\} (i = 1, 2, \dots, w)$ をランダムに生成し、 $t_i = 1$ であれば 2 つの個体間で i 番目の文字を交換し、 $t_i = 0$ であれば i 番目の文字を交換しないという処理を行う。この処理を次の 2 つの個体 s_1, s_2 を例に挙げて具体的に解説する。

$$s_1 = 01101011011$$

$$s_2 = 00100101011$$

テンプレート $t = 11011011100$ が生成された場合、

$$t = \underline{11} \quad 0 \quad \underline{11} \quad 0 \quad \underline{111} \quad 00$$

$$s_1 = \underline{00} \quad 1 \quad \underline{00} \quad 0 \quad \underline{010} \quad 11$$

$$s_2 = \underline{01} \quad 1 \quad \underline{01} \quad 1 \quad \underline{110} \quad 11$$

このように変換される。テンプレートが 1 となっている位置で、 s_1 と s_2 の文字列が交換される。

(d) Arithmetic Crossover

選択により、選択された親個体の線形結合により、以下のように交差される。式中の o_i は子の設計変数値、 p_i は親の設計変数値、 α は交叉変数、 γ は 0 ~ 1 をとる乱数である。

$$o_1 = \beta p_1 + (1 - \beta) p_2 \quad 3.90$$

$$o_2 = \beta p_2 + (1 - \beta) p_1 \quad 3.91$$

$$\beta = (2\alpha + 1)\gamma - \alpha \quad 3.92$$

(e) Blend Crossover

2 つの親子体を頂点とする範囲を次式のように若干外側に広げて、その中で個々体を一様分布によって求める手法である。

$$X_1 = \min\{p_1, p_2\} - \alpha d \quad 3.93$$

$$X_2 = \min\{p_1, p_2\} + \alpha d \quad 3.94$$

$$d = |p_1 - p_2| \quad 3.95$$

(f) Simulated Binary Crossover (Fixed)

乱数 γ と交叉変数 α の値を一定にした場合でも、親個体が互いに接近していれば、親個体に近い個体が生成され、また、親個体同士が離れている場合には親個体から離れた子個体が生成される特徴がある。最適解探索の初期の段階では設計空間に分散的に個体が生成される。しかし、探索が進み、個体群の成長が収束していくと、近傍の子個体が生成される特徴を持つ。Simulated Binary Crossover では交叉時に全設計変数に対して交叉を行う。交叉の定義式は次式で表される。

$$\beta = \begin{cases} (2\gamma)^{\frac{1}{1+\alpha}} & \text{if } \gamma \leq 0.5 \\ \frac{1}{2(1-\gamma)^{\frac{1}{1+\alpha}}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad 3.96$$

$$o_1 = 0.5[(1 + \beta)p_1 + (1 - \beta)p_2] \quad 3.97$$

$$o_2 = 0.5[(1 - \beta)p_1 + (1 + \beta)p_2] \quad 3.98$$

(g) Simulated Binary Crossover

交叉手法は Simulated Binary Crossover (Fixed)と同じである。しかし、交叉確率を各設計変数に対して適用する点が Simulated Binary Crossover (Fixed)と異なる。

(h) New Simulated Binary Crossover

Simulated Binary Crossover の β の算出時に用いる γ を一様乱数ではなく、親の設計変数値に応じて値を変更するように修正した交叉手法である。

5) 突然変異(a) Simple mutation

Simple mutation では個体を構成するそれぞれの文字について、確率 p_m に基づき、別の文字へと変換する。例えば、次に示す個体 s に Simple mutation を適用する場合を考える。

$$s = 0110 \ 1 \ 011011$$

それぞれの文字について確率 p_m で文字が変化する。5文字目で確率的な変化が起こったとすると、1 0となり、突然変異による s は次の通りとなる。

$$s' = 0110 \ \underline{0} \ 011011$$

(b) Uniform mutation

子個体の染色体（設計変数の値）に次式によって求められた値 μ を追加する。式中の γ は0から1をとる乱数、 α は突然変異変数である。

$$\mu = (\gamma - 0.5)\alpha \quad 3.99$$

(c) Polynomial mutation

追加値 μ を次式で求める。

$$\mu = \begin{cases} (2\gamma)^{1/\alpha+1} & \text{if } F < f_{\text{ref}} \\ \left(\frac{1}{2(1-\gamma)}\right)^{1/\alpha+1} & \text{otherwise} \end{cases} \quad 3.100$$

(d) New Polynomial mutation

Polynomial mutation では γ を一様に与えていたが、New Polynomial mutation では親の染色体情報に応じて独立して値を変更する手法である。

3.3 強化学習

近年、ディープラーニングの登場を契機として、機械学習に注目が集まっている。本レポートでは、機械学習の中でも特に強化学習に着目し、基礎的な理論から一般に用いられているアルゴリズムの解説を行う。

3.3.1 機械学習

機械学習は諸説あるものの、教師あり学習、教師なし学習、強化学習に大別される。

1) 教師あり学習 (Supervised learning)

教師あり学習の目的は入力となる情報をもとに、未知の結果を予測することである。予測にあたっては、事前に「特徴量」と「教師データ」のデータセットを用意した上で予測モデルの学習を行い、推論時は特徴量を入力することで教師データに対応した予測値 y を出力する。教師となる既知の結果が学習に必要なため、「教師あり学習」と呼ばれる。例としては、スパムメールの分別に代表される「分類」、最小二乗法に代表される回帰がある。同分野は機械学習のカテゴリの中でも最も革新的に技術が進歩している分野である。

2) 教師なし学習 (Unsupervised learning)

特徴量のみデータを与え、データ同士の関係性を表現することができるように学習するもの。教師あり学習とは異なり、結果となる教師データがないことから教師なし学習と呼ばれる。例えば、クラスター分析 (Cluster analysis)、主成分分析 (Principal component analysis) などが代表される。

3) 強化学習 (Reinforcement learning)

強化学習とは、ある環境の中で、どのような行動を起こせば目的となる報酬 (スコア) を最大化するのかを学習するものである。ゲームを例に挙げると、ゲームの画面やキャラクター・オブジェクトの位置などが環境に相当し、行動がキャラクターの動きやコマンドなどに相当し、報酬がゲームに勝利する、高いポイントを得ることに相当する。強化学習では上述

の通り、ゲームの状態からゲームに勝利するにはどのような行動が最適となるか学習し、推論では、学習したモデル（エージェント）に対して状態等を入力することで、逐次最適な行動を出力する。

3.3.2 強化学習の概要

強化学習は行動に対して報酬、つまり正解があることから、教師あり学習に類似している点もあるが、入力 x からの予測値の出力 y （行動）には、環境の試行全体（エピソード）に渡って報酬総和を最大化する目的を有している点で大きく異なる。教師あり学習ではその時点での報酬が最大となる行動を出力することはできても、そのとった行動が報酬総和を最大となる行動に必ずしも結びつくわけではないため、報酬総和を最大化するような連続的に状態が遷移するようなゲームや制御問題などに対する適用が困難である。一方で強化学習の目的はこの報酬総和を最大化するというものであるため、その場しのぎで即時報酬が最大となる行動を選択せず、将来得られる報酬を視野に入れながら行動を選択していく。人間がある目的を持った上で考えてその目的を達成すればどうすればよいかを考える過程と同様のプロセスを踏むことから、人工知能技術の中でも比較的人間に近いアルゴリズムとして着目されている。一方で適用にあたっては強化学習のエージェントがどのような学習を行うかがブラックボックスになりがちで、意図しない行動を出力することもある。それらを許容もしくは行動に制約を設けるなどの対応が必要になることもあるため、完全にエージェントに制御を一任することは現実的でない場合もある点に注意が必要である。

1) 強化学習の問題設定及び定式化

強化学習の問題設定を行う上での出発点としてマルコフ決定過程(Markov Decision Process 以下、MDP)がある。これは次のようなルールに従う環境を指す。この MDP に従うものとして強化学習の基礎方程式となる Bellman Equation の定式化が可能となる。

1 遷移先の状態 s_{t+1} は直前の状態 s_t 及びその時の行動 a_t に依存する

2 即時報酬 r は直前の状態と遷移先に依存する

ここで、強化学習で頻出する用語をまとめた表を下記の Table 3.3 に示す。

Table 3.3 Definition of the term

| Symbol | Name | Description |
|--------|---------------------|--|
| s | State | A set of environment states. |
| a | Action | A set of actions. (Determined by the agent) |
| T | Transition function | A function to return s_{t+1} and transition probability. (Argument is s_t and a_t) |
| R | Reward function | A function to output the reward for s_t and the s_{t+1} as arguments. Sometimes it takes an action as an argument. |

エージェントは状態を受け取り、行動を返す。この入出力関係を示す関数を方策(Policy, π)という。方策を出力するのが強化学習のエージェントの機能となる。そして、状態 s や行動 a に応じて報酬が最大となるように方策（行動）の出力を行う関数等のパラメータを調整するのが強化学習における学習の部分である。

前述の通り、即時報酬 r は s_t, s_{t+1} に依存ⁱする。報酬総和 R は即時報酬 r の総和である。エピソード終端を T として、時刻 t から起算して将来獲得できる報酬総和は次式で定義できる。

$$R_t = r_{t+1} + r_{t+2} + r_{t+3} + \dots + r_T \quad 3.101$$

上式を成り立たせるためには r_{t+1} 以降の即時報酬が必要であるが、エピソード終端まで計算しないと r_T まで得られないため、 R_t は不明なままである。つまり、報酬総和を最大化するような行動を選ぼうにも将来の情報が不確かなため、選べないという状況となる。このため、不確かな情報に対しては得られる可能性が薄いという意味合いや報酬は早く、多く貰えたほうがいいという考えのもと、時間割引率(Discount factor) γ を導入する。その際の報酬総和は次のように表すことができる。

$$R_t = r_{t+1} + \gamma^1 r_{t+2} + \gamma^2 r_{t+3} + \dots + \gamma^{T-t-1} r_T = \sum_{k=0}^{T-t} \gamma^k r_{t+k+1} \quad 3.102$$

時間割引率 γ は 0.0~1.0 の値をとり、値が 1.0 に近づくほど、Eq. 3.101 に示した報酬総和に近づき、0.0 に近づくほど、近い将来の即時報酬のみで報酬総和が決定される。Eq. 3.102 は正確には報酬総和ではないことから、割引現在価値と呼ぶこともある。また、Eq. 3.102 を変形すると下記のように表すことができる。Eq. 3.102 や Eq. 3.103 のように獲得できる報酬を割り引いて見積もった値を期待報酬もしくは価値と呼ぶ。

$$R_t = r_{t+1} + \gamma^1 R_{t+1} \quad 3.103$$

2) モデルフリーとモデルベース

遷移関数 T と報酬関数 R が既知の場合は、遷移先の情報が行動を起こす前に得られるため、モデル（環境）からの情報がなくとも一方的に行動を環境へ送ることで強化学習を実施できる。このような場合は、モデルベースでの手法が取られる。モデルベースの対になる考え方として、モデルフリーがある。多くの場合、環境を動かしたらどのような報酬が得られるか、どのように遷移するかがわかっていない。このような場合はモデルフリーによる手法で学習を実施することが多い。

ⁱ s_{t+1} は s_t, a_t に依存するため、 r_{t+1} は s_t, a_t に依存すると言い換えることもできる

3) 価値の定義

価値は Eq. 3.103 のように定義したが、問題として、 R_{t+1} がわかっていない、確率的に R_{t+1} が変化する可能性もあることから、一意に R_{t+1} を決めることが困難であった。まず前者については、 R_{t+1} には適当な値を入れておいて学習を進めていって得られる報酬の見積り精度を上げていくことで問題を解消できる。後者については、それぞれの時刻の即時報酬に確率をかけて期待値として計算することで確率的に変化する報酬に対して統計的に価値を見積もることができる。期待値の計算では、行動確率（方策 π ）を定義し、即時報酬に方策を乗じる。方策 π は行動 a をとる確率が $\pi(a|s)$ と表され、 $\pi(a|s)$ の $\arg\max$ や \max を取り、最大となる確率の行動を実行し、環境から s_{t+1} を得る。尚、モデルベースの場合は a_t を $T(s_{t+1}|s_t, a_t)$ の引数とすることで遷移先の s_{t+1} を得る。つまり、方策に基づいて行動するということは s_t において、方策 π が確率的な行動を出力し、その確率が最も高い行動を選択し、環境がそれを実行し、 s_{t+1} を得る一連のシーケンスを実施することである。ここで、方策に基づいて行動して得られる価値を状態価値関数 $V_\pi(s)$ と呼ぶ。状態価値関数 V は下式で定義される。

$$V_\pi(s_t) = E_\pi[r_{t+1} + \gamma V_\pi(s_{t+1})] \quad 3.104$$

尚、モデルベースの場合は下記のようにも記述できる。この手法は方策を基準に行動を決定していくことから Policy Base と呼ばれ、この式は Bellman Equation と呼ばれる。

$$V_\pi(s_t) = \sum_a \pi(a|s) \sum_{s_{t+1}} T(s_{t+1}|s_t, a) (R(s_t, s_{t+1}) + \gamma V_\pi(s_{t+1})) \quad 3.105$$

また、価値を最大とするように行動を決めるように考えると、下式のように表され、Value Base と呼ばれる。尚、同式も Bellman Equation の一つである。

$$V_\pi(s_t) = \max_a \sum_{s_{t+1}} T(s_{t+1}|s_t, a) (R(s_t, s_{t+1}) + \gamma V_\pi(s_{t+1})) \quad 3.106$$

Policy base は行動選択が方策により行われ、その方策の評価・更新に行動評価が用いられる。一方 Value base は行動の評価方法のみを学習してその評価値の最大を行動とする。状態価値関数 V 以外の価値の定義として、行動価値関数 Q が存在する。行動価値関数 Q は状態価値関数 V の Eq. 3.104 と同様に定式化できる。また、学習が収束した段階では見積もり値は一意に決まるものであり、Eq. 3.107 から期待値をとった Eq. 3.108 式が成立すると考えられる。

$$Q_\pi(s_t, a_t) = E_\pi[r_{t+1} + \gamma Q_\pi(s_{t+1}, a_{t+1})] \quad 3.107$$

$$Q_\pi(s_t, a_t) = r_{t+1} + \gamma Q_\pi(s_{t+1}, a_{t+1}) \quad 3.108$$

行動価値関数 Q は状態価値関数 V との相互的な記述が可能である。 $V_\pi(s_t)$ と $V_\pi(s_{t+1})$ の間に $Q_\pi(s_t)$ が存在しており、Eq. 3.109 のように、状態価値関数 V は行動価値関数 Q を用いて表現することができる。

$$V_\pi(s_t) = \sum_{a \in A} \pi(s_t, a_t) Q_\pi(s_t, a_t) \quad 3.109$$

4) モデルフリーの学習

モデルフリーの手法では遷移関数 T と報酬関数 R が未知であり、それを補うようにエージェントが経験を蓄積しつつ、その経験を活用して学習を行っていく。行動して得られた経験の取り扱い方に対していくつかの注意点がある。まず 1 つに経験を活用する上で、経験を蓄積するか活用するかのトレードオフの問題、2 つ目に行動価値関数 Q や状態価値関数 V などの更新を実績から行うがある。

(a) Epsilon Greedy 法

一点目の課題に対して多く用いられる考え方が、Epsilon Greedy 法である。遷移関数 T や報酬関数 R が未知の場合、行動を起こして状態の遷移の情報や報酬に関する情報を獲得していく。最初は情報がないことから、ランダムに探索を進めていく必要がある。一方、強化学習の目的は報酬を最大化するものであるため、探索のみならず、得られた情報から活用を行っていく必要がある。Epsilon Greedy 法では下記のサンプルコードのように、 ε の確率でランダムな探索を行い、それ以外では得られた経験を活用（Agent から行動を得る）していく。尚、 ε はすべての Episode を通して一定とする方法や Episode が進むにつれて遞減させる方法もある。

```
0. def epsilon_greedy (action_space, q_func, state):
1.     epsilon = 0.3
2.     if np.random.rand() < epsilon:
3.         action = np.random.choice (action_space.shape, )
4.     else:
5.         action = np.argmax(q_func(state))
6.     return action
```

Figure 3.18 Sample code of ε -greedy method by Python

(b) Temporal Difference

Episode が有限な環境における Episodic Task において、Episode あたりの Step が長大となる場合、エピソードが終了してから更新を行うと、そのエピソードでは更新前の行動価値関数 Q などを利用する必要がある。一方で、エピソードの途中で更新をかけることも可能であるが、エピソードの終端で報酬総和が決まるので、この更新で利用するのはあくまで報酬総和の予測値であり、正確性に欠ける。このように更新のタイミングについて一長一短がある。ここではエピソードの途中で更新を行う手法である、Temporal Difference 法（以下、TD(0)法）及び TD(λ)法を解説する。

TD(0)法の更新手順は s_t から s_{t+1} へ遷移し、即時報酬 r_{t+1} が得られたものとして、エージェントは時刻 t において、状態 s_t における価値を $V(s)$ と見積もっており、実際に行動した結果、即時報酬 r_{t+1} と s_{t+1} が得られたこととなる。したがって、 $V(s)$ と見積もっていたものが次のステップでは $r_{t+1} + \gamma V(s_{t+1})$ であることが得られたこととなるため、更新にはその差を利用する。更新式は下式のように表すことができる。尚 η は学習率である。

$$V(s_t) \leftarrow V(s_t) + \eta(r_{t+1} + \gamma V(s_{t+1}) - V(s_t)) \quad 3.110$$

TD(0)法と対になる手法として Monte Carlo 法が存在する。Monte Carlo 法では上述の更新式を t と $t+1$ の差異のみではなく、 $t+2, t+3, \dots, T$ まで拡張させて更新を行うものである。つまり、 $V(s_{t+1})$ ではなく r_{t+2} から r_T までの即時報酬を用いる。

$$V(s_t) \leftarrow V(s_t) + \eta(r_{t+1} + \gamma V(s_{t+1}) + \gamma^2 V(s_{t+2}) + \dots + \gamma^n V(s_{t+n}) - V(s_t)) \quad 3.111$$

また、TD(0)と Monte Carlo の中間を取るような手法が Multi-Step Learning であり、 $t+2$ や $t+3$ までは実際に得られた報酬を用いてそれ以降のステップは状態価値関数 V にて代替するという手法である。

$$V(s_t) \leftarrow V(s_t) + \eta(r_{t+1} + \gamma r_{t+1} + \gamma^2 r_{t+2} + \dots + \gamma^{n-1} r_{t+n} + \gamma^n V(s_{t+n}) - V(s_t)) \quad 3.112$$

その他、各ステップにおける実際に得られた価値を合成して誤差を計算する TD(λ)と呼ばれる手法も存在する。下式の $R_t^{(n)}$ は n ステップで今後得られる報酬総和（価値）であり、 λ^{n-1} で各ステップの価値に対して重み付け平均化を行っている。尚、 $\lambda=0$ とすると、 $R_t^\lambda = R_t^{(1)}$ となるため、TD(0)法と同義である。

$$R_t^\lambda = (1 - \lambda) \sum_{n=1}^T \lambda^{n-1} R_t^{(n)} \quad 3.113$$

$$V(s_t) \leftarrow V(s_t) + \eta(R_t^\lambda - V(s_t)) \quad 3.114$$

3.3.3 強化学習の代表的なアルゴリズム

1) Q-learning

古典強化学習の代表的な学習アルゴリズムとして、Q-learning がある。これは行動価値関数（以下、Q 関数）を用いた学習で、一般的には Q 関数の更新には TD(0)が採用される。Q 関数の更新式を下式に示す。

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \eta \left(r_{t+1} + \gamma \max_{a_{t+1} \in A} Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t) \right) \quad 3.115$$

Q 学習のような学習では同一ステップにおいて行動選択の結果と Q 関数の更新に用いられる行動が必ず一致するものではないことから、方策オフ型と呼ばれる学習手法である。つまり、方策オフ型のアルゴリズムでは Eq. 3.115 の max 関数内の greedy な行動選択と実際に次ステップの行動を選択したときの a_{t+1} が別々になることもあるということである。Q 値を状態 s と行動 a の二次元の表ⁱを用いて管理することからブラックボックスと言われる強化学習の中でも行動の選択の基準の可視化が容易である。このため、現在でも利用されることもあるアルゴリズムであり、Q 関数の更新方法など、後発のアルゴリズムに対して多大な影響を与えている。

2) SARSA

Q-learning に類似したアルゴリズムとして SARSA がある。更新式は Eq. 3.116 の通りで、Eq. 3.115 との違いは max 関数の有無である。

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \eta(r_{t+1} + \gamma Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t)) \quad 3.116$$

SARSA は方策オン型に分類され、Q 関数の更新を行う前に ε -greedy 法により次ステップの行動を得た上で Q 関数の更新を行う。更新式に用いる a_{t+1} と実際の行動が同一となる点が Q-learning との決定的な違いである。尚、名前の由来は $s_t, a_t, r_{t+1}, s_{t+1}, a_{t+1}$ を用いるため、それらの名前をつなげて SARSA と呼ばれる。

3) Deep Q-Network (DQN) ^{3.17), 3.18)}

Q-learning を始めとする古典的な強化学習と対比して、Q 関数の表現力・汎用性などを飛躍的に向上させたアルゴリズムである。DQN の前身である Q-learning では下記の課題が存在した。

- (a) Q 値を表で管理することから、状態・行動空間は連続値で扱えず、離散的なものとなるため、それらを細かく離散してしまうと、Q-Table の配列数が爆発的に増えてしまい学習が進まない。
- (b) 状態・行動空間の離散が疎であれば、状態や行動の細かな変化に影響を受ける環境においての強化学習の性能が向上しにくい。

上記の課題に対してニューラルネットワークを用いて Q-Table の代替し、Q 関数を表現することで、入力を連続値として扱うことができ、Q 関数の表現力が向上した。この点が DQN の大きな特徴である。更に学習に際していくつかの工夫を施している。尚、Q-learning 同様に方策オフ型で TD(0)法を採用し、Q 値の更新式も Eq. 3.115 と同様であるなど、Q-learning に類似する点が多い。

ⁱ 状態値を細かく表現する場合は高次元の行列で取り扱うことも可能である。ただし、表の状態・行動空間が爆発的に増大することから、学習の収束が困難になる可能性もある点に注意が必要である。

(a) Experience Replay

Q 関数の更新をステップごとに行うのではなく、メモリにステップの s, a, r を格納しておき、ニューラルネットワークの更新時にはそのメモリからランダムにサンプリングしたミニバッチなどを取り出すことを行う。これにより、従来では連続的な状態・行動のデータで更新を行っていたものを、時系列の相関性を破棄することで、過学習の回避やニューラルネットワークの重みの収束性を高める工夫を行っている。

(b) Fixed Target Q-Network

行動を決定するもの (Main Network)、行動価値を求めるもの (Target Network) の二種類のニューラルネットワークを用意する。Eq. 3.117 を元に解説すると、Q 関数を更新には現時点の $Q(s_t, a_t)$ 及び次時点の $Q(s_{t+1}, a_{t+1})$ を求める必要があることがわかる。ここで、全く同じニューラルネットワークから算出した場合、学習が不安定になることが多いことから、次時点の Q 値を求めるに際しては、数ステップ前に Main Network Q_M からコピーしたニューラルネットワーク (Fixed Target Q-Network: Q_T) を利用して計算する。

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q_M(s_t, a_t) + \eta \left(r_{t+1} + \gamma \max_{a_{t+1} \in A} Q_T(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q_M(s_t, a_t) \right) \quad 3.117$$

(c) Reward Clipping

付与する即時報酬を -1, 0, 1 のいずれかに固定することで、タスクが少し変わっても、元のハイパーパラメータで実行を可能にする。

(d) Huber Function

誤差関数に Huber Function を採用することで、ニューラルネットワークの誤差関数として一般に用いられる最小二乗誤差関数と比較して、誤差が大きい場合の更新に制約がかかるため学習の安定化が可能となる。

$$L(a) = \begin{cases} \frac{1}{2}(x_i - y_i)^2, & \text{if } |x_i - y_i| < \delta \\ \delta|x_i - y_i| - \frac{1}{2}(x_i - y_i)^2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad 3.118$$

尚、本来の DQN^{3.18)} ではゲームの画像を入力として、行動を出力するタスクとなっている。入力を直接、値で受け渡すことでニューラルネットワークの表現力の高さを享受できるため、実装が容易な点も加わり、典型的な強化学習アルゴリズムとして広まっている。

4) DQN から派生したアルゴリズムなど(a) Double DQN^{3.20)}

DQN^{3.18)} では、Eq. 3.117 を下式のように記述する。

$$Q_M(s_t, a_t) \leftarrow Q_M(s_t, a_t) + \eta \left\{ r_{t+1} + \gamma \max_{a_{t+1}} Q_T(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q_M(s_t, a_t) \right\} \quad 3.119$$

ここで、 Q_M は Main Q -Network であり、 Q_T は Target Q -Network を示す。Eq. 3.117 との違いは、行動を決定する Q_M とは別の Q_T を用意し、 Q_T を定期的に Q_M と同期させつつ、更新時には Q_T を用いて Q 値を最大とする行動を評価する点である。 Q_M を更新しても、評価基準である Q_T が変化しないため、安定的な学習が期待できる。

Double DQN では、Eq. 3.120 の通り、遷移先で Q 値が最大となる行動（ Q_M が出力）を利用し、 Q_T が算出した Q 値を評価する。

$$TD_e = r_{t+1} + \gamma Q_T \left\{ s_{t+1}, \operatorname{argmax}_{a_{t+1}} Q_M(s_{t+1}, a_{t+1}) \right\} - Q_M(s_t, a_t) \quad 3.120$$

学習初期では、 Q 関数に推定誤差が存在するため、Eq. 3.119 のように、誤差がある状況で Q_T の最大値を取る操作をすると、 Q 値が偶然にも最大値になっていた際、過大に評価する可能性がある。Double DQN では、行動を選択する Q_M とその行動を評価する Q_T に分離することで、 Q 関数の誤差の増大を防ぐ狙いがある。

(b) Dueling DQN (DDQN) ^{3.21)}

NN の中間層と Q 値の出力層の間に状態価値関数 V の層と *Advantage* 関数 (Adv) の層を設け、分離させた後に和をとった上で Q 値を算出する。 Adv は次のように定義される。

$$Adv(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) - V(s_t) \quad 3.121$$

つまり、 Q 関数は、 V と Adv の和となる。現実問題として、 Q 値は状態 s_t のみで決まる場合（例えば、ゴールや失敗する直前等）や、行動 a_t のみで決まる場合、あるいはそれらが複合的に作用する場合が考えられる。従来の DQN では、 V 及び Adv の評価が NN の重みなどに内包されている前提で、直接 Q 値を求めていた。DDQN では、 V 及び Adv を分離して学習し、出力層で和を取ることで Q 値を求める。このように分離することで、行動に左右されず V を学習することが可能となる。

(c) Prioritized Experience Replay(PER) ^{3.22)}

DQN で提案された Experience Replay (ER) は各ステップのデータで Q 関数の更新を行うのではなく、Replay Memory に経験データとして各ステップの $\{s_t, a_t, r_{t+1}, s_{t+1}\}$ を格納しておき、Replay Memory からランダムにサンプリングしたデータをバッチとして取り出して毎ステップ更新する。しかし、ER では取り出すデータの重要性を意識せず、ランダムにサンプリングするため、学習効率が悪い。PER は TD 誤差の値に応じた経験データ毎の優先度を設定し、優先度に応じて確率的にサンプリングを行うことで、経験の重要性の高いデータを優先的に用いて学習を行う。このため、学習の収束性や学習結果の向上が期待できる。

参考文献

- 3.1) David C. Wilcox: Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries Inc., 1993
- 3.2) T.J. Craft, A.V. Gerasimov, H. Iacovides and B.E. Launder: Progress in the generalization of wall-function treatments, International Journal of Heat and Fluid Flow, Volme23, pp.148-160, 2002.4
- 3.3) 須賀一彦, Timothy J. Craft, Hector Iacovide: 汎用的な解析的壁関数モデル 第1報 滑面～粗面乱流に対応した流れ場のモデル, 日本機械学会論文集 (B編), 71巻, 711号, pp.113-121, 2005.11
- 3.4) 須賀一彦, Timothy J. Craft, Hector Iacovides: 汎用的な解析的壁関数モデル 第2報 滑面～粗面乱流に対応した強制対流温度場のモデル, 日本機械学会論文集 (B編), 71巻, 711号, pp.122-128, 2005.11
- 3.5) 荒川忠一: 数値流体力学, 東京大学出版, 1994.1
- 3.6) 香月正司, 中山顕: 熱流動のシミュレーション-基礎からプログラムまで-, 森北出版株式会社, 1990.2
- 3.7) 藤井孝: 流体力学の数値計算方法, 東京大学出版, 1994.3
- 3.8) 村上周三: CFDによる建築・都市の環境設計工学, 東京大学出版会, 2000.9
- 3.9) 中山弘隆, 岡部達哉, 荒川雅生, 尹禮分: 多目的最適化と工学設計 しなやかシステム工学アプローチ, 現代図書, 2007.12
- 3.10) 下山幸治, 鄭信圭, 大林茂: 多目的最適化における Kriging 応答曲面法のためのサンプル追加指標の比較, 進化計算学会論文誌, Vol. 3, No. 3, pp. 173-184, 2012.12
- 3.11) 棟朝雅晴: 遺伝的アルゴリズム その理論と先端的手法, 森北出版, 2008.7
- 3.12) D. Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989
- 3.13) C.M. Fonseca and P. J. Fleming: Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization, Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms, pp. 416-423, 1993
- 3.14) 玄光男, 林林: ネットワークモデルと多目的 GA, 共立出版, 2008.2
- 3.15) ソフトウェアクレイドル: STREAM Version 12 ユーザーズガイド 最適化編 (オプション), 2015.6
- 3.16) 久保隆宏: Pythonで学ぶ強化学習 入門から実践まで. (講談社, 2019)
- 3.17) Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Graves, A., Antonoglou, I., Wierstra, D. and Riedmiller, M.: Playing Atari with Deep Reinforcement Learning, arXiv: 1312.5602, 2013.12.
- 3.18) Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., Graves, A., Riedmiller, M., Fidjeland, A. K., Ostrovski, G., Petersen, S., Beattie, C., Sadik, A.,

- Antonoglou, I., King, H., Kumaran, D., Wierstra, D., Legg, S. and Hassabis, D.: Human-level control through deep reinforcement learning, *Nature*, Vol. 518, pp. 529–533, 2015.2
- 3.19) Pytorch, SMOOTHL1LOSS : <https://pytorch.org/docs/master/generated/torch.nn.SmoothL1Loss.html#torch.nn.SmoothL1Loss>
- 3.20) van Hasselt, H., Guez, A. and Silver, D.: Deep Reinforcement Learning with Double Q-learning, arXiv: 1509.06461, 2015.9.
- 3.21) Wang, Z., Schaul, T., Hessel, M., van Hasselt, H., Lanctot, M. and de Freitas, N.: Dueling Network Architectures for Deep Reinforcement Learning, arXiv: 1511.06581, 2015.11
- 3.22) Schaul, T., Quan, J., Antonoglou, I. and Silver, D.: Prioritized Experience Replay, International Conference on Learning Representations 2016 (ICLR 2016), 2016.

第4章 長期性能予測手法の開発

4.1 背景及び目的

4.1.1 予冷・予熱効果の予測

1) 性能予測の課題

土壌熱交換システムは塩化ビニル管等のチューブを地中に埋設し、チューブを熱交換媒体とする「チューブ方式」と、空間利用の合理性から地下ピットに外気を導入し、コンクリート躯体を媒体とする「地下ピット方式」に大別される。前者のチューブ方式を対象とした研究に関して、垂水ら^{4.1)}は北陸に立地する戸建住宅を対象とした長期的実測による性能検証を行っている。また、一木ら^{4.2)}はボイドスラブ内に外気を導入するシステム（名古屋市近郊）を対象として上田ら^{4.3)}が提案した近似的三次元モデルを応用し、円管ダクトに対応するモデルの構築を行った後に同モデルを用いてダクト管径や管内風速、チューブ長さなどに関するケーススタディを実施している。また、同結果を踏まえ簡易的にシステムの性能予測が可能となる近似式を作成し、システムの設計手法の提案を行っている。更に、海外でもチューブ方式に関する研究は多数行われており、中国やインド、ポーランド、ギリシャ、メキシコ、ブラジルなど多様な気候条件下での性能検証や性能予測が実施されている^{4.4), 4.5), 4.6), 4.7), 4.8), 4.9)}。このようにチューブ方式に関しては実測ベースの研究から長期的な性能予測モデルの提案により十分な設計資料等が整備されている。しかし、地下ピット方式については地下ピット形状が建物毎に異なる上、その形状が複雑であることなどから三次元かつ非定常の CFD による熱伝達性状等の詳細な再現が望ましいが、CFD の計算負荷等の兼ね合いから、予測精度と計算コストを両立させた設計手法の確立が十分になされていないのが現状である。

先行研究^{4.10)}では実在オフィスに導入された地下ピットを対象として導入外気の予冷・予熱効果や結露判定等を短期的に評価するために、地中の鉛直方向一次元熱伝導解析の結果を初期条件とした日周期レベルでの非定常解析手法の提案を行うと共に、同手法の有効性の検証を行った。しかし、土壌熱交換システムは土壌の熱容量の影響が大きく、日周期レベルの検討では初期値の影響を強く受けてしまうため、長期的な検討が不可欠となる。一方、既報の日周期レベルの解析に要した時間は 36 時間/日であり、単純計算で年周期レベルの解析では 13,140 時間/年（548 日/年）と試算され、CFD による性能予測・検証は非現実的といえる。また、PC の性能が向上した近年においても、地下ピット方式を対象とした CFD ベースでの研究では定常解析や日周期レベルに限定されることが多い^{4.11)4.12), 4.13), 4.14), 4.15)}。その背景には、CFD において連続条件（質量保存則）を満足させつつ、流れ場を推定しなければならないという解法上の問題がある。計算時間を低減するために、計算負荷を他のコアや PC、ユニットに分担させるマルチコアでの処理やクラスター化、

General-Purpose computing on Graphics Processing Unit (GPGPU)による演算等の並列計算手法は存在している。しかし、並列計算に対応したソルバーの導入コストや並列計算に特化した計算機の導入、運用コスト等が必要となるため、設計段階におけるシステムの性能予測時には設計コストの増大に繋がる。

前述の流れ場の推定に関する計算負荷の低減手法として、例えば、蔡ら^{4.16)}は室内空間を対象として2時間の非定常CFD+建材内の熱・水分同時移動解析を行っている。しかし、各タイムステップで流れ場を解く場合、膨大な計算時間を要することから、30分毎の定常解析により流れ場を取得し、30分間は流れ場を固定しつつ温度場及び湿度場の解析を1秒間隔で行う手法を採用している。更に、城戸ら^{4.17)}は流れ場と温度場の連成解析を定期的に行う手法に加えて、非定常解析時の代表時刻における流れ場を取得し、この流れ場を利用することで、解析期間中で流れ場の解析を行わない非連成解析手法の提案を行っている。一方、地下ピット方式の年間性能予測を対象とした研究では、CFDのようなミクロな解析モデルではなく、計算負荷低減の観点からモデルを簡易化し、壁面の境界条件に一定の対流熱伝達率を与えた非定常のエネルギー収支式を解くようなマクロ解析モデルが用いられることが多い^{4.18), 4.19)}。土壌熱交換システムの場合、本来は土壌の熱容量の影響により流れ場の変化が緩慢となるため、流れ場を各タイムステップで詳細に解析する意義は小さく、流れ場の固定化による計算負荷の低減手法は極めて有効であるものと推察されるが、このような手法に着目した研究はなされていない。

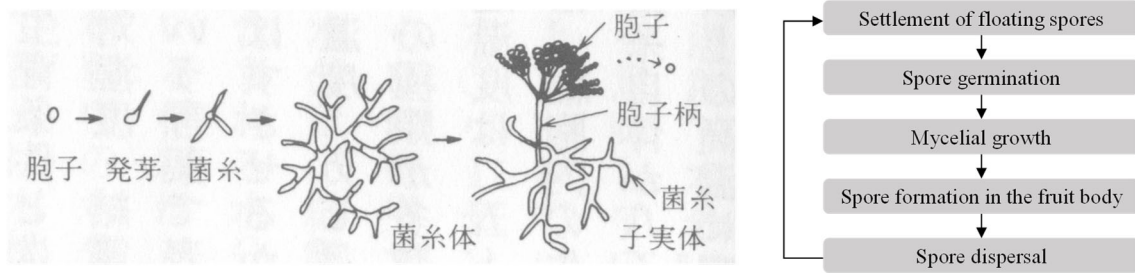
2) 目的

4.2では既報^{4.10)}の日周期レベルでの精度検証を踏まえ、流れ場の計算負荷を低減した土壌熱交換システムの予冷・予熱効果の年間性能予測手法の提案を行い、実在オフィスの地下ピットを対象に年間性能予測を実施すると共に、従来の手法との比較により提案手法の有効性を検証する。尚、本章は従来の非定常CFDの結果を基準として、提案手法を用いた解析結果との比較によりその妥当性を議論しているが、長期的な実測結果との比較による検証に関しては既往研究^{4.20)}にて検討している。

4.1.2 結露性状及び真菌の増殖

1) システム内での真菌増殖の問題

一般に土壌熱交換システムにおいて、土壌と空気の熱交換の媒体となる建材はコンクリートやPVCである。実運用時の課題としてこれらの建材に真菌等の微生物が付着・発芽・生長することに伴う導入外気の空気質汚染が懸念されている。システム内で増殖する微生物の中でも特に真菌はカビ臭いというクレームや各種感染症、室内の建材における黒カビの原因になるなどの課題^{4.21)}があるため、システム内での空気質汚染の抑制に際してはこの真菌の増殖を抑えるのが第一の目標となる。システム内での真菌の増殖メカニズムはFigure 4.1のように整理される。

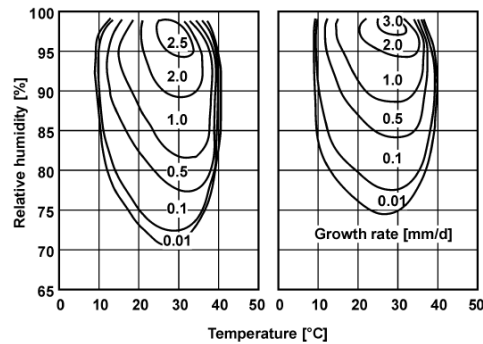
Figure 4.1 Fungal growth mechanisms^{4.22)}

また、増殖の要因一覧を Table 4.1 に示す。尚、同表では、真菌の発芽(Spore germination)・生長(Mycelial growth)の段階では要因に応じて生育の度合いが変化するため、それぞれ分けて記載している。

Table 4.1 Factors of fungal growth

| Fungal Growth Factors | Spore germination / Mycelial growth |
|--------------------------------------|--|
| Relative humidity | Strong dependency |
| Temperature | Dependent |
| Time | Dependent |
| Nutrient's content | Low dependency / Dependent on medium and surface contamination |
| Salt content | Low dependency |
| pH values | Low dependency / Dependent |
| Light (UV) | Dependent |
| Oxygen content | Everywhere |
| Floating of fungal spores in the air | Everywhere |

Table 4.1 の増殖要因の中で、栄養素、塩類、pH はほぼ固定的なパラメータ（システム運用上でのコントロールは困難）である。埃などの有機物も栄養素となることから、建築空間においては栄養素の供給を断つことはできず、また、pH は中性が最も繁殖しやすい条件であるが、例えばシステムの建材がコンクリートの場合は、竣工後、経年により表面の pH がアルカリ性から中性へ遷移していくため、真菌が増殖しやすい環境になっていく。このため、これらの要因による増殖抑制策を運用で導入するのは難しい。一方で、一般的な真菌が最も活性化する温度域は概ね 30 と報告^{4.23)}されているが、同システム内での建材の表面温度は概ね 15～22 程度で推移するため、活性化に際して温度が大きく影響はしない。一方で、特に影響が大きいのは相対湿度と考えられている。これは真菌の孢子の発芽・菌糸の生長の際に特に水分が必要とされるため、湿度のパラメータが重要であると言われている。Figure 4.2 に示した温湿度生長曲線からも覗い知れるとおり、湿度が高いほど、高湿度環境への暴露時間が長いほど、菌糸の生長が早まることから、システム内の運用において、高い湿度での長時間の暴露を防ぐのが、真菌の増殖における第一の抑制策となる。

Figure 4.2 Isopleth systems for mycelium growth^{4,23)}

2) システム内の真菌増殖に関する研究

システム内の真菌の増殖による空気質汚染に関する研究はそのほとんどが日本で行われている。その理由としては次の2点が挙げられる。

(a) 日本の気候条件として真菌が増殖しやすい温湿度条件である

温湿度生長曲線から推察される通り、温度が 30 に近いほど、湿度が高い環境ほど真菌の活性化が高まるため、日本のような高温多湿の環境下では夏季において真菌が増殖しやすい環境になりやすいことが起因して実運用時の課題となり、一つの研究テーマになっている。

(b) 地下ピット方式の導入事例が多い

日本国内外で広く用いられるチューブ方式であれば、筆者が設計した事例(Figure 4.3)のようにチューブに勾配を設けて結露水を水抜き穴（メカニカルトラップ）まで誘導し排水するようなシステムを構築すれば、チューブ内の湿度の高い領域が生じないことから、真菌の増殖、つまり空気質汚染のリスクの低減が可能である。一方で地下ピット方式は、導入外気の空気の流動性が緩慢なことから一度コンクリート表面で結露が起これば、その結露水が蒸発するまでに長い時間を要するため、その間に胞子の発芽や菌糸の生長が生じやすいという特徴を有している。地下ピットを利用して外気を導入するシステムが日本固有のものであり、海外の事例としてほとんど存在していないため、日本での研究がほとんどである。

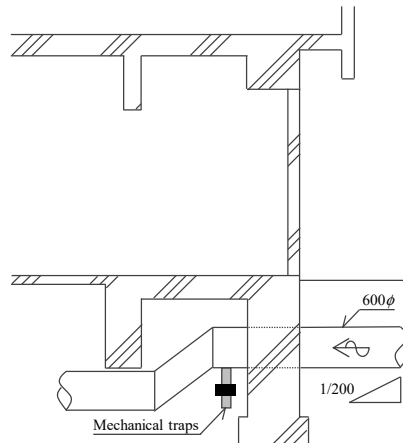


Figure 4.3 Design examples for EAHE

この課題に対する研究として、例えば、工藤ら^{4.24)}は地下ピット内に敷設された調湿材が空気質汚染の温床になり得るとの報告を受け、実際に利用されている調湿材に付着した微生物及び浮遊微生物の測定などを行っている。結果として、調湿材表面では *Acremonium* sp.のみが検出された一方で、ピット内の壁面で検出された真菌のうち、優占種が *Acremonium* sp.ではないことから、調湿材表面が真菌の生育にとって好環境であることを導き出している。また、室内側でも同種の真菌が高濃度で検出されたことから、ピット内で増殖した真菌が外調機を経由し、室内へ侵入していることを明らかにしている。三田村ら^{4.25)}は、2010年12月に竣工した住宅の床下ピットを利用したシステムを対象に2011年1月～2013年3月までの床下ピットの温度の実測や浮遊真菌濃度の測定結果を報告している。床下ピット内の冬季の温度は運転開始1年目よりも2年目、3年目のほうが高いことが確認された。また、真菌濃度のI/O比は時期によって大きく異なるが、冬季の床下ピットはI/O比が6.5と真菌の増殖の可能性を示唆している。このように、熱的性能に関する研究のみならず、空気質環境についても幅広く議論されており、システム導入にあたっての大きな課題となっている。

3) システム内の建材への付着とその防止

真菌の増殖を抑制する手法としてのアプローチはいくつか考えられている。例えば、適切に運用を行い、真菌の増殖しやすい環境を提供しないような運用面での対応のほか、定期的なシステム内の清掃、コンクリート表面に対する抗菌剤の塗布などがある。このようなシステム内の建材への真菌の付着を取り扱った研究事例として、林らの研究^{4.26)}や柳らの研究^{4.27)}がある。文献4.26では、浮遊・付着真菌に対するアプローチではなく、システム内（ピット方式）での臭気（主に真菌に起因する臭気を想定）であるものの、多少のインシタルコストの増加を許容できるのであれば、建設時の型枠にパネコート型枠を用いることで臭気の抑制が可能であると結論づけている。これは、壁面が平滑になるほど、真菌の孢子や埃などの有機物の付着が少なくなることにより、増殖が抑えられていたものと想定される。また、文献4.27は、夏季のシステム内での結露発生に伴う微生物汚染の実態の把握

とその対策について議論した研究である。システム内での細菌・真菌の増殖による空気質の汚染の状態は従来の空調機内での汚染の状態と同程度であることを確認している。空気質汚染の対策として、プレフィルタ・中性能フィルタ・管内洗浄（水、薬剤）を実施した。結果として、プレフィルタの場合、浮遊細菌、浮遊真菌の低減率はそれぞれ約 40%、50%であった。中性能フィルタの場合は、どちらも 90%以上の効果があった。水による高圧洗浄は管内の付着細菌・真菌の低減に効果がある（おおよそ 90%）ことを確認でき、薬剤洗浄の場合は高圧洗浄以上に効果があること（細菌は 99%、真菌は 100%）を確認している。ただし、洗浄の場合は定期的実施するため、それらのコストとのバランスを勘案する必要がある。

このようにシステムの運用による抑制ではなく、定期的なメンテナンスを実施するなどしてシステム経由後の外気の浮遊真菌濃度の低減が可能である。一方でピット方式であれば、メンテナンスを行いやすいように導入経路のルート上に人通口を設けるなどの設計段階からの配慮も必要となる。このため、同システムを採用するにあたっては、設計から運用まで一貫して考慮することが望ましいと考える。

4) 結露の発生状況に関する既往研究

上述の通り、土壤熱交換システムはシステム内での結露の発生や高湿度環境が維持されることに由来する導入外気の空気質汚染が懸念されており^{4.28), 4.24)}、特に影響要因の一つである結露に関しては、実測結果に基づいた報告が幾つかない。例えば、尹ら^{4.29)}は名古屋市に所在する行政支援・福祉施設に導入された土壤熱交換システム（地下ピット方式）において、経路途中の表面温度と外気の露点温度との比較に加えて、目視でも結露の発生が確認できなかったと報告している。林ら^{4.30)}は研修施設に導入された土壤熱交換システムの性能評価の一環として、結露の判定を実施している。これによると、計測期間において経路途中の相対湿度が 100%で推移していたものの、目視では結露を確認できなかったと結論付けている。その他の論文でも、結露が確認できなかったとの報告がなされている^{4.13)}。ただし、これらの論文では目視やシステム内の相対湿度、外気露点温度と一部の表面温度との比較により結露発生の有無を判断しているため、局所的に結露が発生していた可能性も否めない。結露の発生を示唆した例として、松井ら^{4.31)}はチューブ方式のシステムにおいて、チューブの出口相対湿度から結露発生の可能性を示唆している。大和田ら^{4.32)}は福岡県内の教育施設の地下ピットを対象として実測を行っており、対象地下ピット内での結露の発生はほとんど確認できなかったものの、一部の時間で結露が生じていたと結論付けている。更に、木下^{4.33)}は地下ピット形状や運用条件の異なる 4 つの学校建築を対象に、土壤熱交換システムの予冷・予熱効果や結露発生の有無の検証を行っている。同論文では、建物によっては著しく結露する対象もあったと報告している。

一方、数値解析等により土壤熱交換システム内での結露発生の予測を実施した研究も既に報告されており^{4.14), 4.12), 4.34), 4.35), 4.36, 4.37)}、これらの内、三次元 CFD により結露発生の予測や結露しやすいと思われる部位の検討等を行った例もある^{4.14), 4.12)}。しかし、限定的

な解析期間（定常解析等）や代表点での検討に留まり、長期的かつ詳細な結露予測による抑制策の有効性の検証等を行った研究は存在しない。

5) 目的

実務レベルでは、結露の発生や結露抑制策の具体的な効果等が定量的に把握できていない状態で設計・運用を行っているのが現状である。このため、竣工後に結露の発生や微生物の増殖による空気質汚染といった問題が生じ、対策が後手に回ってしまう可能性も否めない。従って、事前の予測により結露発生の有無の判断や結露しやすい部位の特定、結露抑制策の効果等を把握した上で外気の予冷・予熱の定量的な効果を踏まえ、設計を行うべきである。

以上のことから、4.3 では設計段階を想定した上で、結露発生の抑制と導入外気の予冷・予熱効果を両立させた設計・運用手法の確立を目的として、実在オフィスの地下ピットを対象に、年間シミュレーションによる結露評価手法の提案を行った上で、結露発生の抑制と予冷・予熱効果の両面から外気導入手法の検討を実施する。即ち、4.2 にて提案する、流れ場の計算負荷を低減した非定常 CFD に湿度輸送方程式を連成させて結露予測を実施する。この手法を用いて、結露抑制策として考えられる外気導入経路や外気導入条件等に関するケーススタディを実施し、結露の発生状況に関する詳細な分析を行う。加えて微生物の増殖に起因する空気質汚染リスク評価の一環として、同解析に試行的に真菌ⁱの増殖予測モデルを one-way 連成させた解析を行い、地下ピット内での真菌の増殖に関する基本的な特性を把握する。更に、予冷・予熱効果も合わせて評価した上で、それぞれの結露抑制策の有効性を総合的に検証する。

4.2 予冷・予熱効果の性能予測手法の開発及びその有効性の検証

4.2.1 予冷・予熱効果の性能予測手法

本論文で提案する計算負荷低減手法では、季節別の代表的な流れ場を事前に複数解析し、この事前解析から得た流れ場を Figure 4.4 (a)に示す解析フローに基づき、外調機の稼働時間毎に切り替え、読み込むことで温度輸送方程式の線形化を行い、計算負荷の低減を図るものである。

ⁱ 微生物の内、真菌は温湿度の条件から他の微生物と比較して早い段階でコロニーを形成する。さらに真菌の菌糸は他の微生物の栄養源となる。従って本論文では第一に考慮すべき真菌を対象としている。

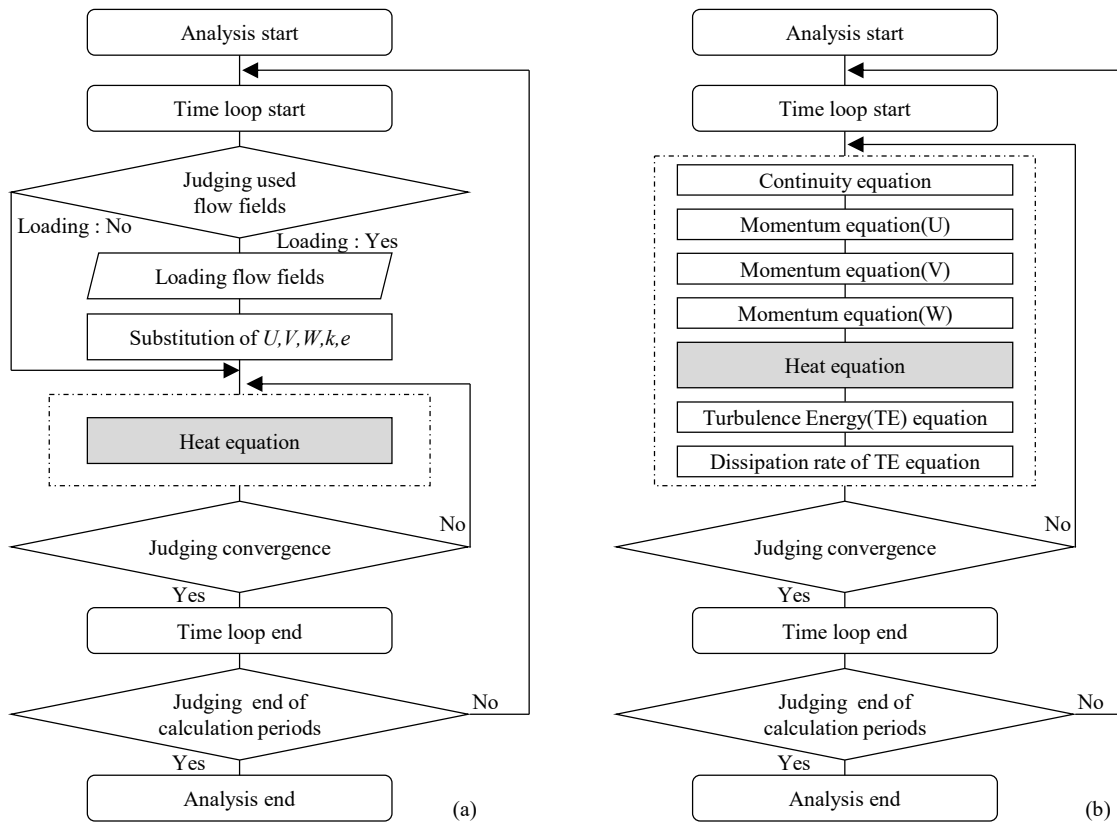


Figure 4.4 CFD analysis flow charts of the proposed method and conventional method: (a) Uncoupled simulation; (b) Full coupled simulation (conventional method)

事前解析等から得た流れ場を使用することで、次に示す i) 及び ii) の効果が期待できる。尚、本論文では Figure 4.4 (a) に示した解析手法において、流れ場と温度場の解析が非連成となることから同手法を「非連成解析」と定義し、Figure 4.4 (b) の従来の解析手法は流れ場と温度場を連成させた解析であることから「完全連成解析」と定義する。また、本論文で提案する非連成解析では質量保存式と運動量輸送方程式の連成解析手法として SIMPLE 法(Figure 4.5)を、乱流モデルとして $k-\varepsilon$ モデルを採用した解析を対象としている。

1. Estimate pressure fields p^*
2. Obtain correction of the velocity; u^* , v^* and w^* by momentum equations that was discretized
3. Solve the pressure correction equation concerning the correction of the pressure p'
4. Calculate p^{n+1} by $p' + p^*$
5. Obtain u^{n+1} , v^{n+1} and w^{n+1} by substituting the correction of pressure and velocity for velocity correction equation
6. If u^{n+1} , v^{n+1} , w^{n+1} and p^{n+1} are not convergence, then return to 1)

n means iteration numbers in this time step

Figure 4.5 Algorithm of SIMPLE method (4.38)

i) 流れ場の事前解析による計算負荷の低減

Figure 4.4 (b)に示すように完全連成解析は各タイムステップで圧力補正式・速度補正式・運動量、温度、 k 、 ε の輸送方程式を解いているが、非連成解析中は事前解析から得た流れ場を用いることで解くべき方程式が温度のみとなる。

ii) 計算時間間隔 Δt の拡大

Eq. 4.1 にアンサンブル平均を施した温度輸送方程式を示す^{4.39)}。ここで、 θ は温度[K]、 t は時間[s]、 u_i は速度[m/s]、 x_i は空間座標[m]、 α は温度拡散率[m²/s]、 $\overline{u_i'\theta'}$ は乱流熱フラックス[(m・K)/s]を表す。尚、オーバーバーはアンサンブル平均値を表す。

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \overline{u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i}} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} - \overline{u_i' \theta'} \right) \quad 4.1$$

渦粘性モデルでは、 $\overline{u_i' \theta'}$ を勾配拡散近似により $\bar{\theta}$ の勾配と乱流温度拡散率 α_t [m²/s]を用いて Eq. 4.2 のように表す。

$$-\overline{u_i' \theta'} = \alpha_t \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} \quad 4.2$$

$$\alpha_t = \frac{\nu_t}{Pr_t} \quad 4.3$$

ここで新たに α_t が未知数となる。本論文で採用する k - ε モデルでは α_t に対して流れ場と温度場の相似を仮定し、Eq. 4.3 のように α_t を渦動粘性係数 ν_t [m²/s]及び乱流プラントル数 Pr_t (=0.9) [-]により表す。本論文で対象とする k - ε モデルでは ν_t が k 及び ε の関数であるため、 k 、 ε に加えて $\overline{u_i}$ を求めることで温度輸送方程式はクローズする。非連成解析では事前解析により求めた $\overline{u_i}$ 、 k 及び ε を用いることで、流れ場と温度場を直接的に連成させず、定数として扱う事が可能となる。これにより温度輸送方程式が線形化され、完全陰解法を採用した場合、完全連成解析と比較して計算時間間隔 Δt の拡大が可能ⁱ⁾となる。更に、線形化に伴い、温度輸送方程式の収束性の向上も期待できる。

4.2.2 解析概要

ここでは Case1 シリーズ及び Case2 シリーズにおいて完全連成解析及び非連成解析を実施し、土壌熱交換システムの長期的な熱的特性を把握すると共に、完全連成解析の結果との比較を通じて提案手法の有効性の検証を行う。

1) 鉛直方向一次元熱伝導解析の概要及び解析結果

非連成解析では既報同様に CFD の初期条件として、地中の鉛直方向の一次元熱伝導解析の結果である上下温度分布を地上に突出した流入口を除き、解析領域全体に与える。一次元熱伝導解析の条件及び物性値は Table 4.2、Table 4.3 に示す通りであり、本論文では地中温度の出力の簡易化、空間分解能を高める目的から既報にて用いた熱回路網解析ではなく、CFD と同様の汎用 CFD ツールⁱⁱ⁾を用いて有限体積法に基づく熱伝導解析を行った。

ⁱ⁾ Δt の拡大に伴い、時間項の数値粘性が増大し、解析結果に影響を及ぼす可能性がある。

ⁱⁱ⁾ 一次元熱伝導解析及び Case1-1, Case2-1 は株式会社ソフトウェアクレイドルの熱流体解析ソフト「STREAM V11」を

Table 4.2 Analysis conditions for vertical one-dimensional thermal conductivity analysis
in the ground

| | |
|---|---|
| Calculation period | January 1~December 31 (A preliminary analysis was performed for the 20 years prior to the analysis year.) |
| Time interval | 1 hour |
| Domain | 1.0m(X)×1.0m(Y)×20.0m(Z) |
| Mesh | 200 |
| Ground surface boundary condition | Temp.: Sol air temperature, Convective heat transfer coefficient: 17.9W/m ² K |
| Calculation conditions for the sol air temperature ^{4.40)} | Meteorological data: The Expanded AMeDAS Weather Data for typical meteorological year (Yahata, Kitakyushu, Japan) ^{4.40)} Convective heat transfer coefficient: 17.9 W/(m ² · K), Solar radiation absorptance: 0.7 (-), Emissivity: 0.9 (-), Evaporation ratio: 0.1 (-) |
| Bottom boundary condition of under-ground | Adiabatic (20 m depth) |

Table 4.3 Physical Properties at the one-dimensional thermal conductivity analysis and CFD analysis

| | Specific heat [J/(kg· K)] | Density [kg/m ³] | Thermal conductivity [W/(m· K)] |
|-----------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Soil ^{4.41)} | 2,512 | 1,830 | 0.61 |
| Concrete | 800 | 2,400 | 1.64 |

本解析では助走期間を 20 年とし、更に 1 年間の解析期間を設け、解析終了時の 12/31 の 24:00 に加えて、事前解析時の初期条件となる夏季代表日時(8/6 15:00)及び冬季代表日時(2/9 11:00)の温度分布を出力した。代表日時に関しては、年間の外気導入を行う時間帯での外気温度とその時刻の地中深さ 1.78m (地下ピット床面を想定)における地中温度との差を取り、その差が比較的大きい(=14.9)日時を夏季代表日、差が比較的小さい(=12.6)日時を冬季代表日と設定した。これは事前解析の流れ場取得時において、地下ピット内の流れ場が強い浮力を受ける時間帯であると想定されることから、これらの日時を選定した。

2) 事前解析による流れ場の取得手法及び解析条件

本章では外気導入量別に外気導入量が大きく、外調機 5 台の定格風量に対応する Case1 シリーズ(10,350m³/h)、外調機 1 台分で外気導入量の小さい Case2 シリーズ(2,070m³/h)という流れ場の性状が大きく異なる場合を対象として提案手法の適用可能性を探る。尚、10,350m³/h は面風速 (梁下の代表断面積=2.02m²) にすると、1.42 m/s、2,070m³/h は 0.28m/s に対応する。外気導入スケジュールに関しては、想定される冷房期間 (6/1 ~ 9/30) 及び暖房期間 (11/1 ~ 3/31) の内、10:00 ~ 18:00 まで地下ピット経由にて外気導入を行い、その他の期間 (4 月、5 月、10 月の中間期) 及び時間帯 (0:00 ~ 10:00、18:00 ~

用い、非連成解析の Case1-2 ~ Case1-4, Case2-2 ~ Case2-4 に関しては解析の都合上、同社の「STREAM V12」を用いた。

24:00) に関しては地下ピットを経由せず外気導入を行うものとした。日単位を対象として非連成解析を実施した既往研究^{4.42), 4.43)}では、流れ場を複数用意せざるも外気導入量を合わせることで、完全連成解析と非連成解析の取得熱量がほぼ一致することを確認している。そこで、非連成解析による年間性能予測のケーススタディを実施する上で、事前解析では外気導入量別に加えてシーズン別に代表的な流れ場を取得するため、外気導入時は計 4 種（外気導入量大：夏季・冬季、外気導入量小：夏季・冬季）の流れ場を用意し、外気導入を行わない時間帯の流れ場として比較的静穏な流れ場を別途取得する。Table 4.4 に流れ場取得時の解析条件を示す。

Table 4.4 Analysis conditions for CFD analysis

| | | |
|---|---|---|
| Calculation period | Pre-Analysis – Case1 series: 450 s Pre-Analysis – Case2 series: 2,250 s Annual Analysis: January 1~December 31 (A preliminary analysis was performed for the 1 year prior to the analysis year.) | |
| Time interval | Pre-Analysis – all cases: 10 s Annual Analysis: See Table 4.5 | |
| Domain | 44.8 m (X) × 34.9 m (Y) × 8.4 m (Z) | |
| Mesh | 127 (X) × 109 (Y) × 36 (Z) = 498,348 | |
| Turbulence model | Low Re-type k-ε model (Abe-Nagano-Kondo model) ^{4.44)} | |
| Scheme for advection term | 1 st -order upwind scheme | |
| Initial temperature of underground and air tunnel system elements | Results of the one-dimensional heat conduction analysis | |
| Boundary conditions | Inlet of air tunnel | T_m : Outside air temperature [°C], $U_{in}=1.55$ or 0, $k_{in}=3/2(U_{in} \times 0.05)^2$, $\varepsilon_{in}=C_\mu^{3/4} k_{in}^{3/2}/l_{in}$ |
| | Outlet of air tunnel | Free slip |
| | Wall in air tunnel | Velocity and Temp.: analytical wall function (AWF) |
| | Ground surface | Temp.: Sol air temperature (AIJ, 2000), Convective heat transfer coefficient: 17.9W/m ² K |
| | Upper side of air tunnel | Adiabatic (The thickness of top slab element is 200mm.) |
| | Lateral and bottom | Adiabatic |
| Convergence condition | Temperature transport equation and Pressure correction equation: 1×10^{-4} Momentum, k and ε transport equation: 1×10^{-6} | |

U_{in} : Inlet wind speed (m/s), l_{in} : Length scale (=1.2) [m], k_{in} : Inlet turbulence energy (m²/s²), ε_{in} : Dissipation rate of k_{in} (m²/s³),
 C_μ : Model constant (=0.09) [-]

固体の物性値は一次元熱伝導解析と同様とした。事前解析の初期条件としては、一次元熱伝導解析より取得した夏季及び冬季代表日時の上下温度分布を与えた。尚、取得する流れ場は非定常解となるため、適切な解析期間を設定する必要がある。同モデルを使用した非定常 CFD によると、名目換気時間 τ (Case1 シリーズ: 90s、Case2 シリーズ: 450s) の概ね 5 倍で温度場が安定していたため、解析期間を 5τ として流れ場の取得を行った。

壁面近傍の第一メッシュサイズは 0.03m 程度であり、空間平均の y^+ は Case1 シリーズの外気導入量では 35.8、Case2 シリーズでは 27.0 であった。尚、熱伝達上、重要な部位（床や天井等）に関しては、 $y^+ = 10$ 程度（Case2 シリーズ）の細かいメッシュを挿入しているが、年単位の完全連成解析を実施するために、解析時のメッシュ数を制限している。このため、予備的な検証として、粘性底層に十分なメッシュを挿入した状態（空間平均で $y^+ = 10$ 以下）にて実時間で 2 時間の完全連成解析と非連成解析を実施した。結果として取得熱量の誤差は 1% 以下であった。尚、非連成解析の場合、現状のメッシュよりも、更に細かいメッシュの挿入が可能となり、予測精度の向上が期待できる。

また、本来であれば数値粘性の影響を考慮して QUICK 等の高次のスキームを適用すべきである。しかし、本提案手法は設計段階での活用も視野に入れているため、より安定な一次精度風上スキームを移流項のスキームとして採用した。尚、移流項のスキーム別に完全連成解析と非連成解析の解析結果の比較も同時に行っており、採用するスキームの違いによる完全連成・非連成解析の解析精度の対応関係は変化しないことを確認している。

解析的壁関数は、粘性底層内におけるメッシュの有無別に壁関数を用意している。このため、解析的壁関数の特徴として壁面近傍のメッシュサイズへの依存性が小さい点や、通常の壁関数と比較すると y^* （壁面近傍の乱流エネルギーを用いた無次元距離）を利用することにより、剥離・再付着流れにおいて摩擦速度が 0 となる場合にも適用可能な点などが挙げられる^{4.45), 4.46), 4.47)}。

Figure 4.6 に本章で使用した CFD のモデルを示す。

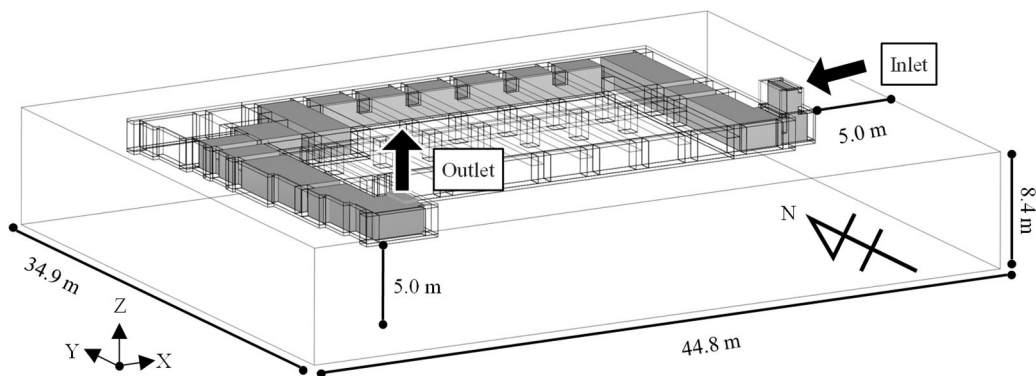


Figure 4.6 Analysis model of the system

CFD モデルに関してはコンクリート躯体と土壌を再現した一次元熱伝導解析を別途実施し、この結果を参考にしてコンクリート表面の熱流に影響しない範囲で周辺土壌領域の最適な解析領域とメッシュ幅の検討を行った。本章ではこの結果を CFD モデルに反映しており、既報の従来モデルによる解とほぼ一致していることを確認している。更に、既報同様に解析では Gebhart の吸収係数を用いることで固体表面間の放射熱流束を解析しており、既報では放射解析のメッシュ数は 929 であったが、ここでは 2,494 とすることで、より詳細な放射メッシュの分割を行った。

3) 解析概要

年間性能予測では前述の外気導入スケジュールに従い、流入口の境界条件を時刻ごとに変化もしくは流れ場を切り替えることで解析を行った。流入温度とする外気温度は拡張アメダス気象データの標準年・福岡県八幡のデータを用いた^{4.40)}。地表面の境界条件となる相当外気温度には一次元熱伝導解析より得た相当外気温度に一定の対流熱伝達率を与えて解析を行った。初期値に関しては一次元熱伝導解析より得た 12/31 の 24:00 の地中温度を

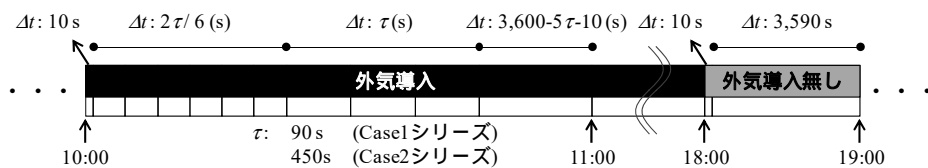
与え、その他の解析条件は事前解析と同じとした（Table 4.4）。解析ケースを Table 4.5 に示す。

Table 4.5 CFD analysis cases

| Case | Air Volume [m ³ /h] | Time interval [s] | Used flow fields | Notes |
|---------|--------------------------------|-------------------|-----------------------------------|---|
| Case1-1 | 10,350 | 10 | - | Full coupled simulation (Standard Case) |
| Case1-2 | | 3,600 | Obtained in the summer | Uncoupled simulation, Δt : 1h |
| Case1-3 | | | Obtained in the winter | |
| Case1-4 | | | Obtained in the summer and winter | |
| Case2-1 | 2,070 | 10 | - | Full coupled simulation (Standard Case) |
| Case2-2 | | 3,600 | Obtained in the summer | Uncoupled simulation, Δt : 1h |
| Case2-3 | | | Obtained in the winter | |
| Case2-4 | | | Obtained in the summer and winter | |

上述の通り、Case1 シリーズは外気導入量を 10,350 m³/h、Case2 シリーズでは 2,070 m³/h とした。Case1-1 及び Case2-1 は従来の解析手法である完全連成解析を採用し、 Δt をそれぞれ 10 s、30 s と設定したⁱ。Case1-2 ~ Case1-4、Case2-2 ~ Case2-4 は事前解析から取得した流れ場を用いる非連成解析であり、 Δt を 3,600s としたⁱⁱ。Case1-2 及び Case2-2 の外気導入時間帯は夏季代表日の事前解析にて取得した流れ場を使用し、Case1-3 及び Case2-3 は冬

- ⁱ Case1 及び Case2 の空間平均のクーラン数はそれぞれ 16.5、12.1 である。一方、Case1 及び Case2 の場合、クーラン条件を満足した解析を行うには Δt をそれぞれ 0.02 s、0.09 s 程度まで細かくする必要がある。このため、クーラン条件を満足した年単位の非定常解析では、数十年の計算時間を要する。また、予備的な検証として Case1 の外気導入量において、クーラン条件を満足した Δt (0.02 s)及び $\Delta t=10$ s とした完全連成解析を実時間で 30 min に限定して行ったところ、双方のケースでの取得熱量の相対誤差は 1% であった。これらの結果より、クーラン条件の不満足が本章の結果に対して大きな影響を及ぼした可能性は低いと考えられる。加えて、後述の脚注にて示す通り、非連成解析時の時間項由来の数値粘性は十分小さいことを鑑みると、完全連成解析時の Δt では、数値粘性も更に小さくなると考えられる。このため、完全連成解析時の Δt の拡大に伴う時間項由来の数値粘性の影響は十分小さいと推察される。
- ⁱⁱ 非連成解析時の Δt に関しては 10 s・3,600 s と Δt を設定した場合で日単位の精度検証を実施しており、両ケースでの解析結果はほぼ一致することを確認している。尚、本章で数値粘性の影響を検証するにあたり、Case2-3 の条件下（非連成解析、 $\Delta t=3,600$ ）において物質毎に温度輸送方程式中の時間項由来の数値粘性項と拡散項+移流項（空気のみ）の比を算出した。拡散項+移流項を 1 とした場合、数値粘性項の最大値は 10^{-2} 程度のオーダー（コンクリート）であり、解析結果への影響は小さいものと推察される。また、非連成解析における Δt の設定が解析結果に与える影響は、数値粘性だけでなく境界条件となる流入温度等の時間的な解像度にも大きく依存するものと推察される。このため、データの解像度（通常、1 hour 程度）に応じて適切な Δt を設定すべきである。また、非連成解析においては外気導入の切り替え時間である 10:00 及び 18:00 前後の Δt を細かくしており、次の補図の通りとして設定した。尚、10:00 前後の Δt に関しては名目換気時間を基準に事前検証を行い、図に示した Δt で十分な時間分解能となることを確認している。



Appendix figure

季代表日の流れ場を、Case1-4 及び Case2-4 では前述の冷暖房期間別に夏季代表日、冬季代表日の流れ場をそれぞれ切り替えた。更に、非連成解析時の外気導入を行わない時間帯に関しては静穏な流れ場を使用した。

4.2.3 完全連成解析の結果

1) 地下ピットの流出温度

Figure 4.7 に月別の外気導入時間帯における外気温度及び地下ピットの流出温度（完全連成解析）を示す。

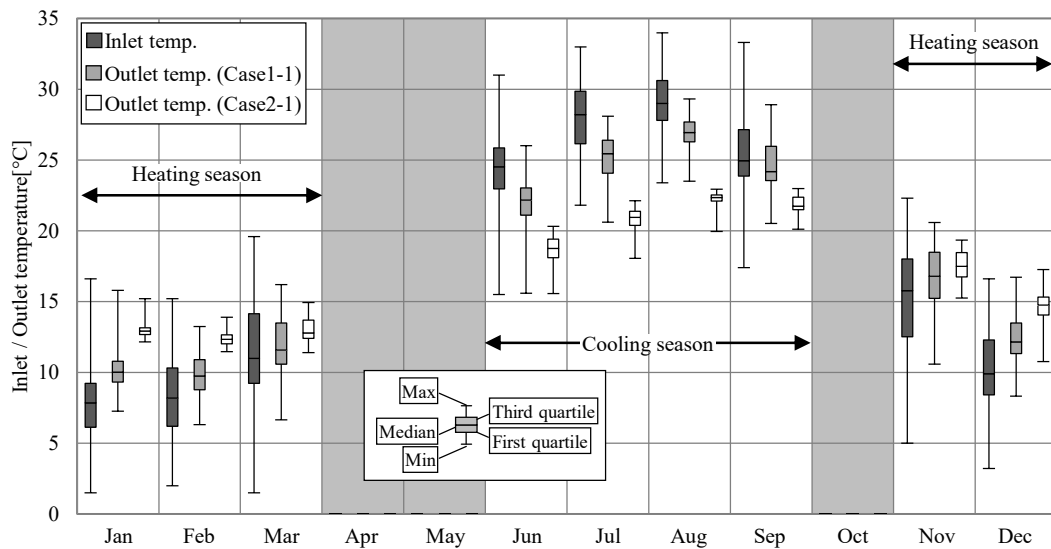


Figure 4.7 Inlet and outlet temperature of underground air tunnel during outside air introducing period

Case1-1 及び Case2-1 の冷房・暖房期間共に外気温度と比較して流出温度は第一四分位、第三四分位間の幅が狭まり、冷房期間は冷却側に、暖房期間は加熱側に推移していることから、土壌の恒温性を利用した土壌熱交換システムの特徴が確認できる。外気導入量を小さくした Case2-1 では Case1-1 と比較して各月の流出温度のばらつきがより小さくなり、中央値に近い値を取り、極めて安定的である。これは Case1-1 の場合、地下ピット内の対流熱伝達率が平均的に高いものの、外気導入量に対して流路が短く、熱交換が不十分であるのに対して、Case2-1 の場合は、外気導入量が小さいため外気が地下ピット内に滞在する時間が長くなり、結果として十分な熱交換が行われたことによるものと推察される。

2) 土壌熱交換システムの導入効果

外調機の吹出設定温度を冷房期間 26℃、暖房期間 22℃として、算出した Case1-1 及び Case2-1 の外調機の月別処理熱量（顕熱）を Figure 4.8 及び Figure 4.9 に示す。

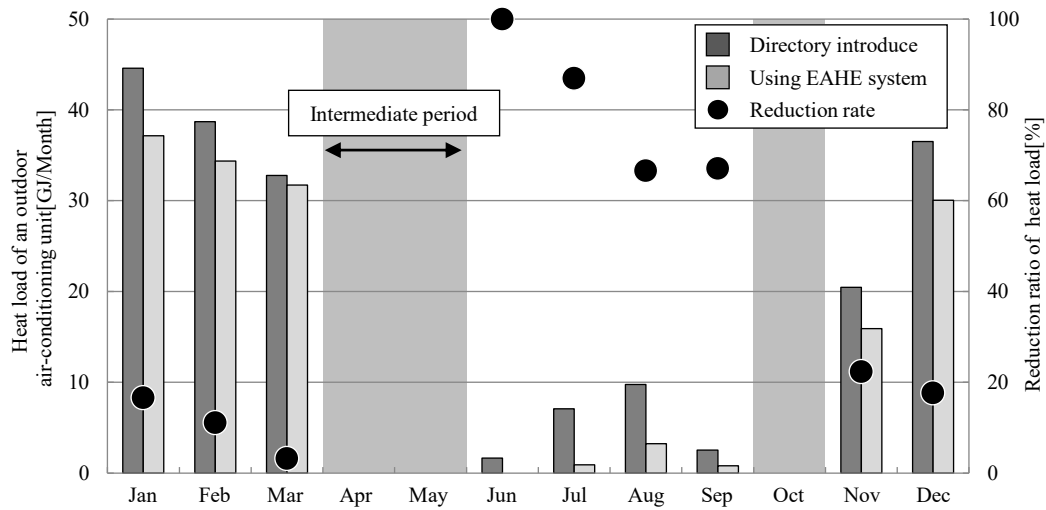


Figure 4.8 Annual cooling/heating effects (Case1-1)

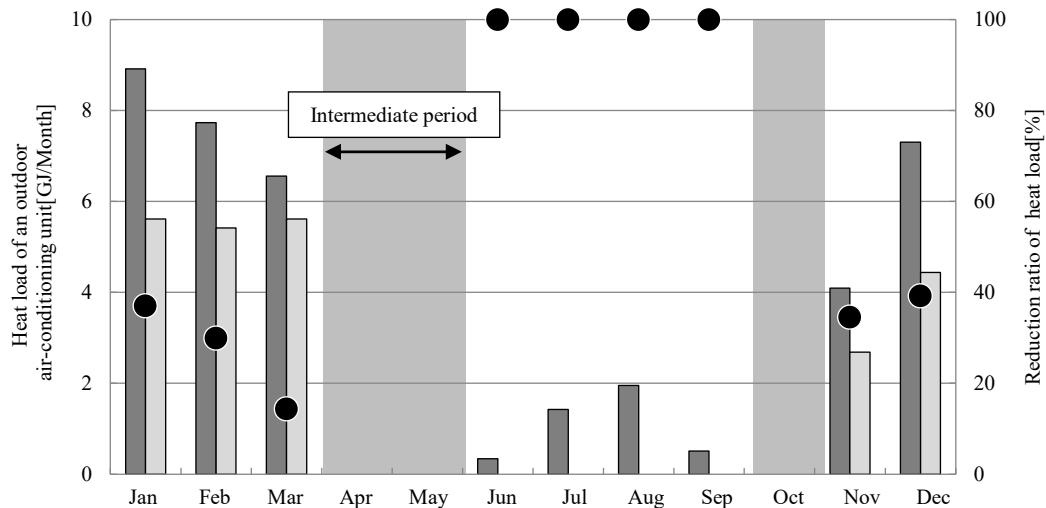


Figure 4.9 Annual cooling/heating effects (Case2-1)

尚、結果は土壌熱交換システムの導入効果を検証するために地下ピットへの外気導入の有無で区別している。Case1-1 に関しては予冷・予熱量の積算値は夏季で-27.5GJ、冬季では 26.6GJ となり、土壌熱交換システムを導入することで外調機の顕熱処理熱量は夏季で 76.2%、冬季で 13.8%、年間では 20.6%の削減が可能であることが示唆された。これは既往研究^{4,48)}にて示されている削減率と同程度のものである。既往研究での名目換気時間及び対象地域と北九州市の年平均外気温度が同等であることなどからも、本結果はある程度の予測精度を有しているものと推察される。Case2-1 ではCase1-1と比較して地下ピット内で十分な予冷・予熱が行われていたため、外調機の処理熱量の削減率が高いことが確認で

きる。Case2-1 の予冷・予熱量は夏季が-14.7GJ、冬季では 11.3GJ であり、外調機の顕熱処理熱量は夏季が 100.0%、冬季で 31.3%、年間で 38.8%の削減が期待でき、特に夏季に関しては十分な熱交換を行うことで外調機の顕熱処理が不要になるほどのポテンシャルを有していることを確認した。

以上よりシステム性能の改善策として、大きな外気導入量を必要とする場合は流出温度をより外調機の吹出設定温度に近づけるために地下ピットの流路の拡張や地下ピット形状の複雑化、地下ピットが土壌と接する面積を増加させるなどの検討が考えられる。また、外気導入量が小さい場合は夏季の外調機の顕熱処理が不要であり、十分な冷熱を蓄えていることから夏季の夜間に温熱を蓄える、夏季のみ外気導入量を増加させるなど、夏季の間に冬季に利用する温熱を蓄えることにより冬季のシステム性能の向上が期待できる。尚、本節の解析は顕熱のみを対象としているが、夏季においては外気の冷却に伴いコンクリート表面での結露が懸念されることから、温度輸送に加えて湿度輸送を考慮に入れる必要がある。従って、湿度輸送方程式を連成させた湿度場の性状の把握は 4.3 で検討する。

4.2.4 提案手法（非連成解析）の結果

1) 水平面及び東西方向の鉛直面の温度場の性状

Figure 4.10 及び Figure 4.11 に各ケースの冬季の代表日時における水平面（地下ピット床上 0.5m）及び流入口を含む東西方向の鉛直面の温度分布を示す。

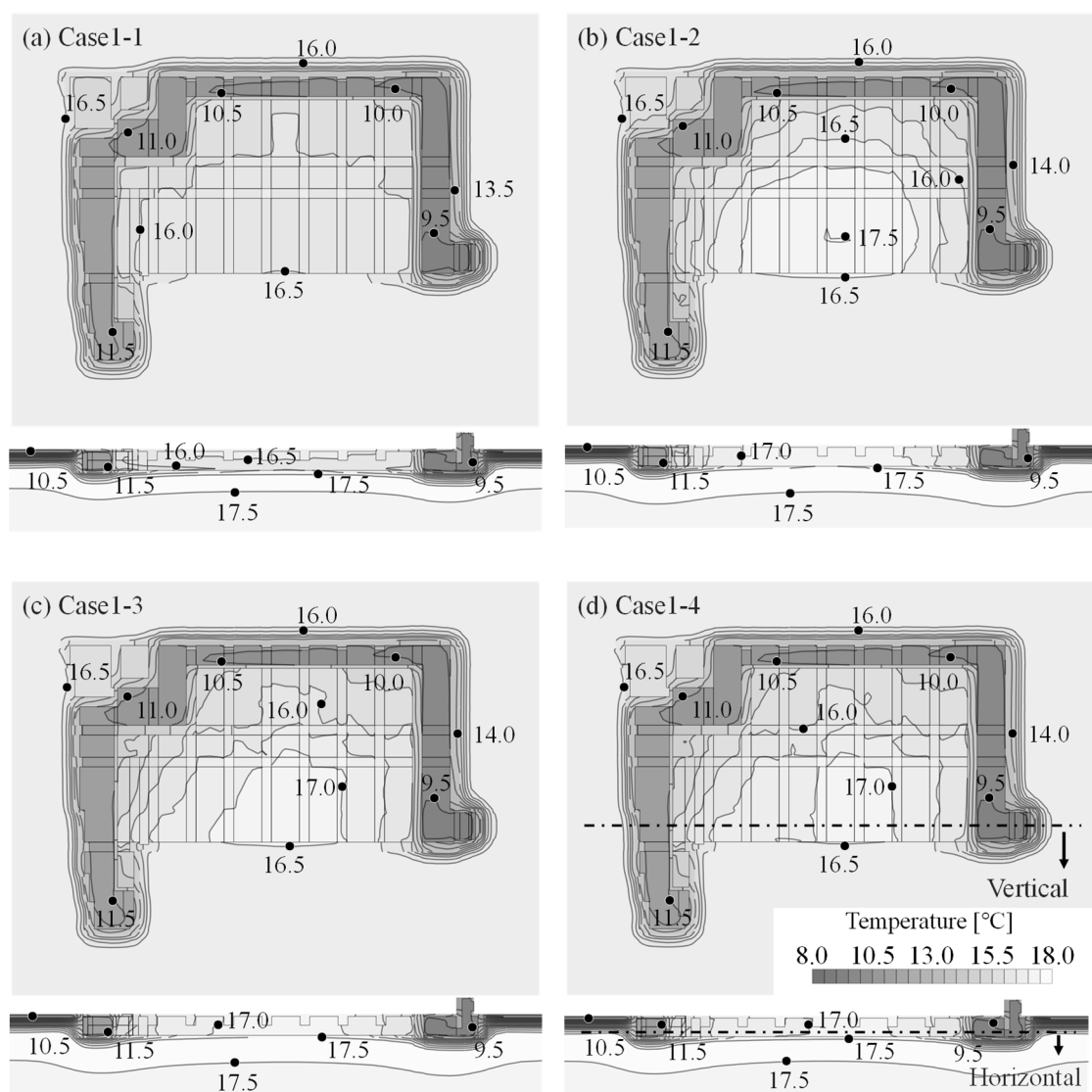


Figure 4.10 Temperature fields of Case 1 series

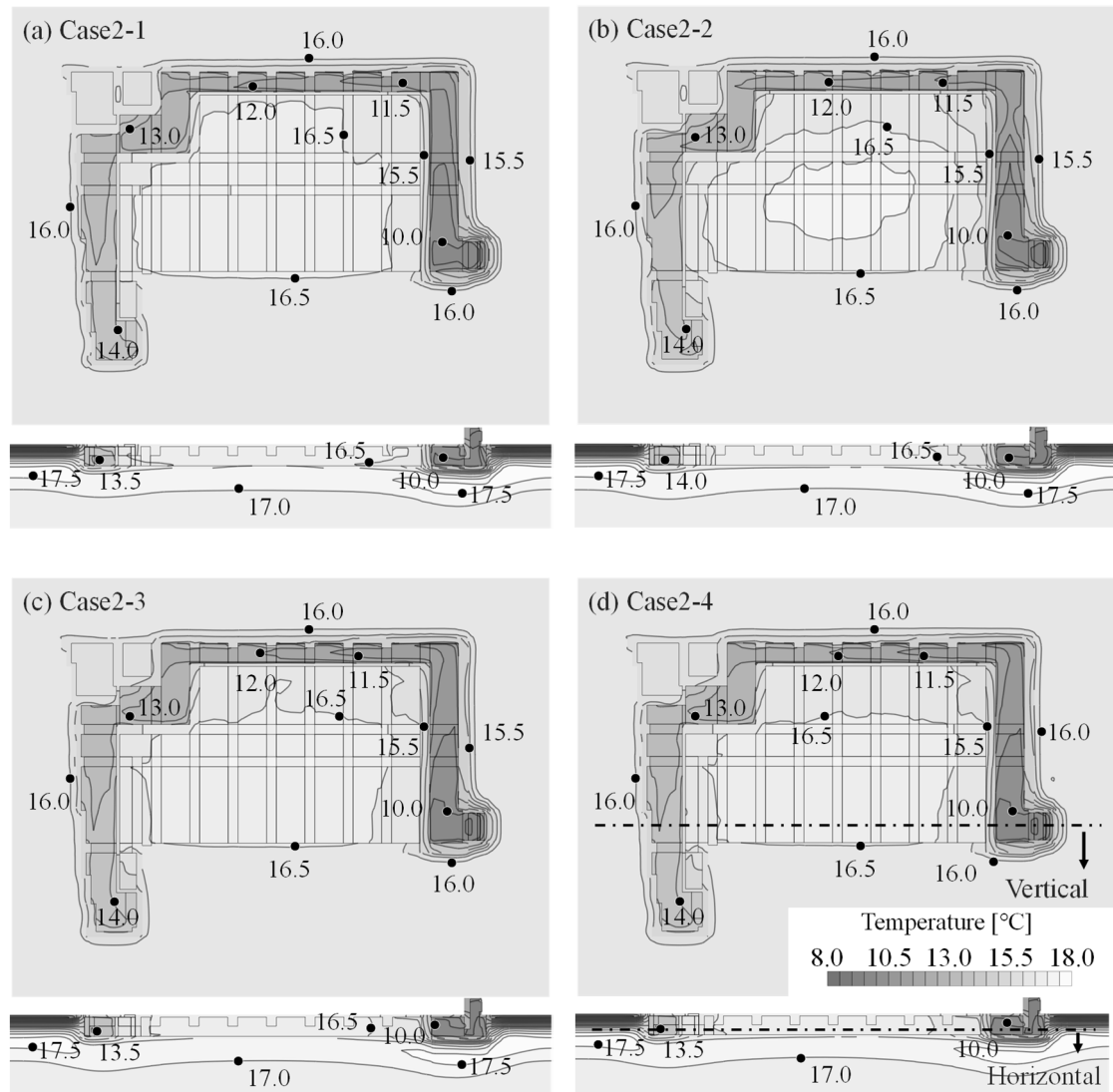


Figure 4.11 Temperature fields of Case 2 series

各シリーズの非連成解析間での温度場の差異は水平面の Case2-2 と他のケースとの比較を除き、水平面・鉛直面共にほとんど確認できない。Case2 シリーズの風量の場合、浮力が流れ場に及ぼす影響が比較的強く、導入外気温度とコンクリートの温度の関係から夏季は導入外気が天井を沿う流れ場であるのに対して、冬季は床面に沿うような流れ場である。従って Case2-2 ではその夏季の流れ場を使用していたため、Case2-3 や Case2-4 との差が生じていたものと推察される。

また、完全連成解析（Case1-1 及び Case2-1）と非連成解析（Case1-2～Case1-4、Case2-2～Case2-4）の水平面の温度分布を比較すると、外気導入部や周囲の土壤温度はほぼ一致しているものの、外気の導入がない中央の配管ピット内に大きな差異が見受けられる。これは配管ピット内が自然対流場であり、完全連成解析時の流れ場における浮力の影響度と事前解析にて流れ場を取得した際の浮力の影響度が異なっていることによる流れ場の不-

致に起因している。しかし、非連成解析により発生する配管ピット内での温度場の差異が性能予測に与える影響は小さいものと推察され、後述するように、月単位・年単位の取得熱量は完全連成解析とほぼ一致している。また、地中の鉛直方向の温度場に関して、完全連成解析と非連成解析の差は Case1 シリーズの 17.5 の等温線の位置が僅かに異なるのみで、長期的に非連成解析を実施した場合でも温度場の性状は完全連成解析とほぼ一致する。

地中不易層の温度はその地域の年平均外気温度と同等となることが知られているが、各ケースの鉛直断面の 17.0 もしくは 17.5 の等温線及び北九州市での年平均外気温度が 17.6 であることから地中深さ 5m を超えた領域では両温度が概ね一致しており、比較的浅い深さに不易層が存在する。外気導入部の直下の領域は熱交換による影響を受けているものの、不易層の深さは既報の一次元熱伝導解析結果と同程度の深さである。従って、熱交換を行った場合でもその影響は比較的浅く、水平方向に対しても狭い領域（外側の躯体より深さ方向、水平方向共に 3m 程度）で蓄熱・熱伝導現象が完結しているものと推察され、隣接する建物同士が土壤熱交換システムを利用した場合の性能低下への影響は小さいものと思われる。

2) 非連成解析の予冷・予熱効果の予測精度

Figure 4.12 及び Figure 4.13 に各ケースの月別積算予冷・予熱量を示す。

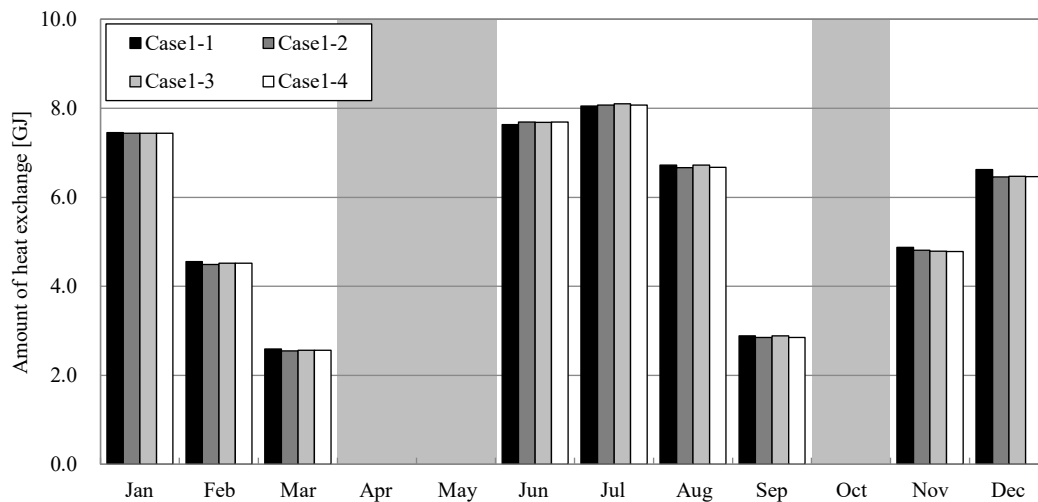


Figure 4.12 Annual amount of heat exchange: (Case 1 series)

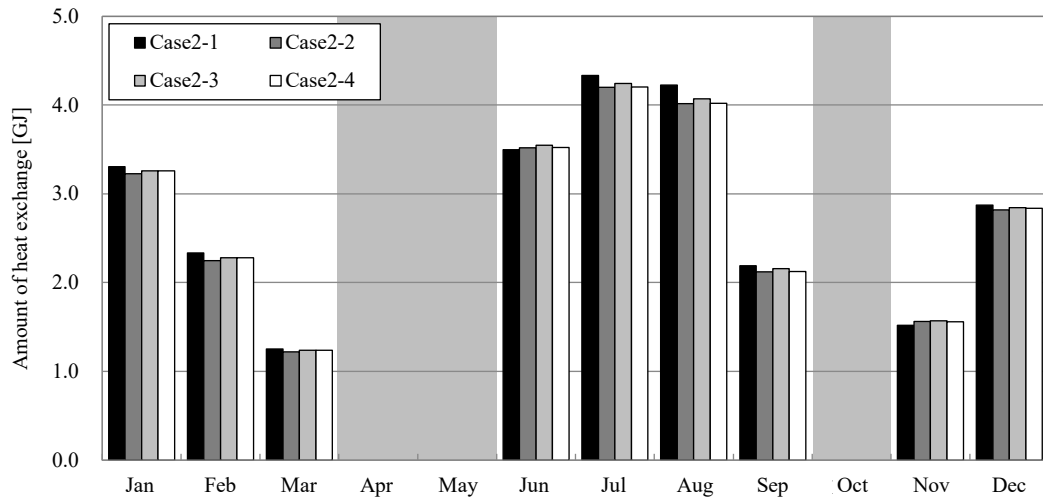


Figure 4.13 Annual amount of heat exchange: (Case 2 series)

中間期に近い3月や9月、11月では両シリーズとも、流入（外気）温度と躯体温度が近いことや、前月に冷温熱を蓄えることなどから他の月と比較すると取得熱量は少なくなっている。また、各シリーズのケース別で見ると、Case1シリーズの取得熱量はCase1-1と他のケース間での差は小さく、使用する流れ場の依存性もほとんど確認できず、3月や8月のCase1-2及びCase1-3の間で若干の差異が発生する程度である。更に、Case2シリーズはCase1シリーズと比較して完全連成解析と非連成解析の差が確認できる程度の誤差が発生しており、8月ではCase2-1とCase2-2の差が0.2GJ程度発生しているものの、その誤差は相対的には小さい。Case1-2～Case1-4の1月、2月、7月の月別取得熱量には各ケース間の差異が確認できなかったが、Case2-2～Case2-4では、使用した流れ場の依存性が僅かながら確認できる。これはCase1シリーズの外気導入量の場合、慣性力が支配的であったため（アルキメデス数（Ar数）ⁱの最大：0.19）年間を通して流れ場が大きく変化しておらず、一方、Case2シリーズの外気導入量の場合はCase1シリーズと比較して浮力が支配的となり（Ar数の最大：5.02）温度場（浮力）の性状に対応した流れ場の切り替えが行われていないためと推察される。Case2シリーズでは流れ場が温度場の影響を受け、浮力の影響により短期間で変化することから、慣性力と浮力の比であるAr数に応じて流れ場を

ⁱ Ar数は浮力と慣性力の比であり、非等温場の流れにおける流体運動の状態を表す無次元数として次式で表される。勝田らの既往研究^{4,49)}のように、室内が十分に発達した乱流場の場合において、吹出し・吸い込みを伴う室内気流に対してAr数及び表面温度の分布性状の一致を流れ場の相似条件とし、温度場及び流れ場の分布性状がAr数により関係付けられるとしている。Ar数は下式にて定義される。ここで、 g は重力加速度[m/s²]、 β は体積膨張係数[1/K]、 θ_{in} は流入温度[°C]、 θ_{out} は流出温度[°C]、 l は代表長さ[m]、 u は流入速度[m/s]である。

$$Ar = \frac{g\beta(\theta_{in} - \theta_{out})l}{u^2}$$

切り替える手法も考えられる。しかし、既往の研究成果^{4.42), 4.43)}より、Ar 数に応じた流れ場の切り替えを行った場合でも、ある一定の精度向上は期待できるものの、その改善効果は限定的であることを確認している。これは流れ場の一致に対して、Ar 数の一致だけでなく壁・天井・床の表面温度の分布性状の一致（相似）も要求されるためである。

従って、複数の流れ場を用意するには事前解析の段階において、更なる計算時間を要することや、流れ場を1種類で固定した Case2-2 や Case2-3 においても誤差自体は相対的に小さいことに鑑みると、Case1 シリーズ、Case2 シリーズ、どちらの場合でも本提案手法は十分に有用であると考えられる。ただし、上述の通り、僅かではあるものの、各月で完全連成解析と非連成解析の取得熱量の間に差異が発生している。助走期間を数年・数十年単位とした場合、各月の誤差の蓄積により、取得熱量を過大もしくは過小に評価してしまう可能性を有する。この点に関しては別途、8年間の実測データ及び同手法を用いた解析による精度検証を行っており^{4.50)}、誤差の蓄積の影響は限定的であったことを確認している。

4.2.5 計算負荷の低減効果

完全連成解析を基準とした計算時間の削減割合ⁱ及び年積算取得熱量の相対誤差を Figure 4.14 に示す。

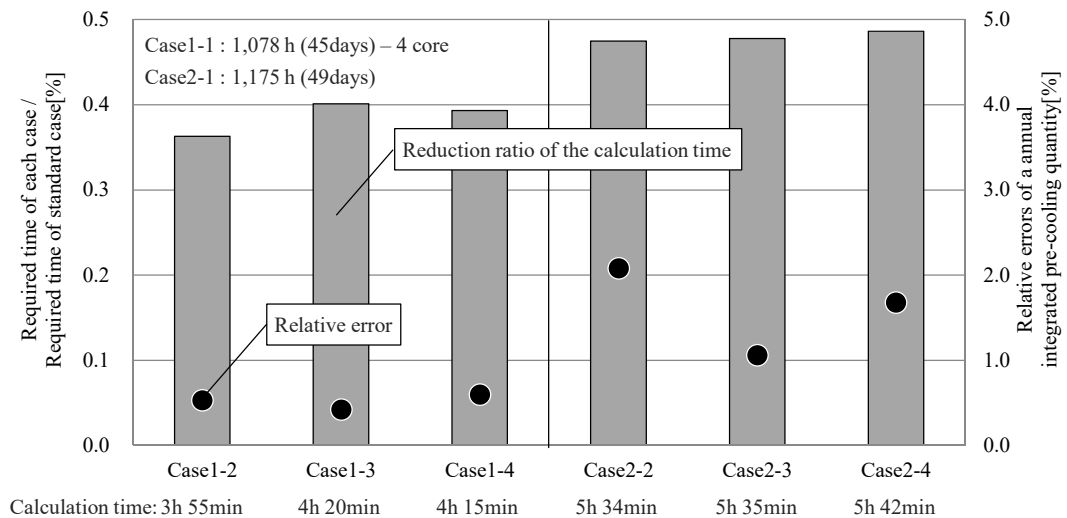


Figure 4.14 Comparison of the calculation time and relative errors

完全連成解析では年間性能予測に要する計算時間として数十日単位であったが、非連成解析を用いることでいずれのケースでも6時間以内での解析が可能となった。計算時間は従来比で0.5%程度であり、その解析の相対誤差はCase1シリーズで1%、Case2シリーズ

ⁱ 年間解析での計算時間は助走期間（1日）を除いた1年間の解析に要した実時間である。また、Case1-1のみ並列計算（4並列）であり、その他のケースは逐次計算（シングルコア）である。尚、上下温度分布や流れ場を取得する事前解析に要した時間は含めていない。本章での解析はすべて単精度とした。解析に使用したPCのスペックは次の通りである。CPU: Intel® Core™ i7-4790K, Frequency: 4.0 GHz (up to 4.4 GHz) RAM: 8.00 GB (DDR3-1600)

では僅かに精度が低下するものの、3%以下である。従って、計算コストと解析精度の双方より本提案手法は土壌熱交換システムの設計段階における予冷・予熱効果の年間予測手法として十分実用的であると言える。

4.3 結露性状の評価手法等の開発及びその有効性の検証

4.3.1 結露性状の評価手法の開発及び真菌の増殖予測モデル

1) 結露性状の評価手法の開発

本章の解析では、4.2 で提案した非連成解析に対して、湿度輸送方程式を連成させている。同解析時の計算フローは Figure 4.15 に示す通りである。

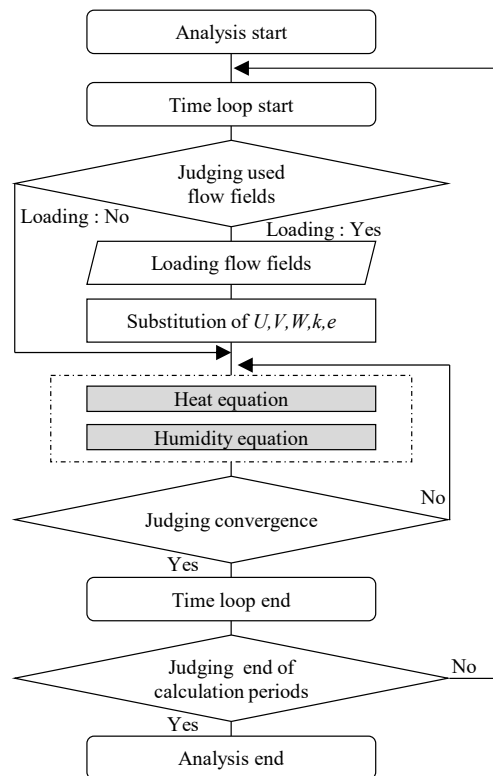


Figure 4.15 CFD analysis flow charts of the Uncoupled simulation coupled with heat and humidity equations

非連成解析時は各時刻の設定外気導入量に応じて事前に取得した流れ場（今回は等温場の定常解ⁱ）を読み込み、温度場及び湿度場のみを解くことで計算負荷の低減を図っている。

ⁱ 4.2 で乱流モデルとして $k-\varepsilon$ 系のモデルを採用し、かつ浮力の影響度が小さい場合は、温度場の性状に応じて複数の流れ場を用意せずとも使用する流れ場を外気導入量に合わせることで完全連成解析と非連成解析の取得熱量がほぼ一致することを確認している。このように、アルキメデス数（慣性力・粘性力と浮力の比）が十分に小さい流れ場において、流れ場の形成に対して浮力の影響度が小さいことが示唆された。従って、本章では外気導入量毎の等温の定常解析にて取得した流れ場を非連成解析で使用した。

る。この流れ場の事前解析により、温度及び湿度輸送方程式の線形化が可能となる。結果として従来の解析手法と比較して計算時間間隔 Δt の拡大や各輸送方程式の収束性の向上により計算負荷の低減が期待できる。

2) 湿度輸送方程式の連成による結露解析の概要

結露の判定方法は空気側の壁面近傍第一要素の絶対湿度 $x_{a,i}$ [kg/kg(DA)]とコンクリートの表面温度に対する飽和絶対湿度 $x_{s,i}$ [kg/kg(DA)]を比較し、 $x_{a,i} > x_{s,i}$ の場合には結露が発生するものとした。 x_a と x_s の定義を Figure 4.16 に示す。

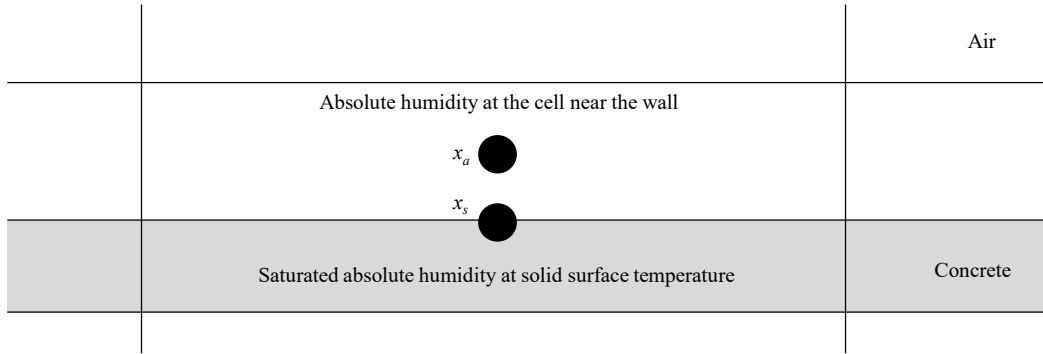


Figure 4.16 Definition of x_a and x_s

また、タイムステップ毎に各面要素の結露速度を算出し、 $x_{a,i} > x_{s,i}$ の状態が継続する場合は、結露速度を時間積分することで結露量を定義した。結露解析のイメージを Figure 4.17 に示す。

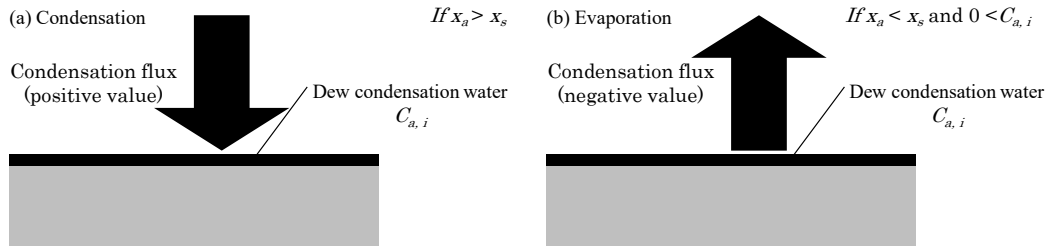


Figure 4.17 Judgements of dew condensation and evaporation occur on the solid surface: (a) Dew condensation; (b) Evaporation occurred on the solid surface

結露速度 $C_{s,i}^n$ [kg/(m²·s)]、結露量 $C_{a,i}$ [kg/m²]の定義は次の通りである。尚、下添字 n はタイムステップ、 i は面要素番号を表す。

$$C_{s,i}^n = \rho \cdot \alpha'_i \cdot (x_{a,i} - x_{s,i}) \quad 4.4$$

$$C_{a,i} = \sum C_{s,i}^n \cdot \Delta t \quad 4.5$$

ここで ρ は空気の密度[kg/m³] (=1.21)、 α'_i は局所湿気伝達率[m/s]、 Δt は計算時間間隔[s]を表す。 α'_i に関してはルイスの相似則（ルイス数の指数 $m : 0.67$ ）を適用し、面要素毎の対流熱伝達率 α_i [W/(m²・K)]を用いて α'_i を算出している。解析における対流熱伝達率は空気の壁面近傍第一要素とコンクリート表面の間で定義している。また、流れの性状に関係なく、全面要素に対してルイスの相似則を適用している。 α'_i の導出式は次の通りである。

$$\alpha'_i = \frac{\alpha_i}{C_p \rho L e^n} \quad 4.6$$

$$Le = \frac{\lambda / C_p \rho}{\chi} \quad 4.7$$

Eq. 4.6 の C_p 及び Le はそれぞれ空気の定圧比熱 [J/ (kg・K)] (=1,007)、ルイス数 [-] (=0.82)を表す。Eq. 4.7 の λ は空気の熱伝導率 [W/ (m・K)] (=2.56×10⁻²)、 λ' は水蒸気拡散係数 [m²/s] (=2.56×10⁻⁵)である。

一方、 $0 < C_{s,i}^n$ かつ $x_{a,i} < x_{s,i}$ の場合には、結露水が蒸発するものとして負の結露速度（蒸発速度）に応じて結露量が減少する。尚、結露水は空気 - コンクリート間に設けた仮想のレイヤに存在するものとする。このレイヤの結露水の拡散（コンクリートへの吸放湿ⁱ、液垂れなど）や消失（結露水の除去）は考慮に入れていない。

3) 真菌の増殖予測モデル

真菌の増殖予測モデルの概要

真菌の増殖予測には K. Sedlbauer らが提案する温湿度曲線モデルを用いた真菌の増殖予測手法^{4.23)}(WUFI-Bio)を採用する。真菌の一般的な増殖過程としては胞子の付着、胞子内への水分の吸収、発芽、菌糸の成長、子実体にて胞子の形成、胞子を飛散するというサイクルである。この過程において、WUFI-Bio は胞子の発芽から菌糸の成長までをモデル化しており、発芽と菌糸の成長の段階別ⁱⁱに温湿度曲線(Isopleth System)を用意している。WUFI-Bio では直接的に考慮できる増殖要因として湿度、温度、時間があり、計算条件と

ⁱ 一般的に、コンクリート打設後、初期水分の放湿過程が終了するのは数ヶ月～1年程度と言われており、土壤熱交換システムの運用初年度を対象とした実測結果を報告した論文^{4.29)}によると、流出入口の絶対湿度に差が見られた理由としてコンクリート打設後の放湿を挙げている。しかし、運用開始後2年目の実測を行った研究^{4.53)}によると、地下ピットの流出入口の絶対湿度差は十分小さいという報告がある。この理由として土壤熱交換システムでは、外気を地下ピット内に取り込むことにより放湿が比較的早く進み、1年以内には初期水分の放湿過程が終了し、この段階では単位時間あたりの導入外気の保有する水分量に対して吸放湿量が相対的に小さいためであると推察される。このことから、ある程度打設から時間が経過した後はコンクリートの吸放湿性がシステムの湿度環境に大きく影響を与える可能性は低い。本論文のように吸放湿性のあるコンクリート表面の結露等の予測を場合、本来はコンクリート内の熱水分同時移動現象を再現する必要があると考えられるが、今回はコンクリートの初期水分の放湿が十分に進んだ状態（運用開始1年後以降）を想定し、コンクリートの吸放湿を再現していない。今後、コンクリートに加えてシステム内に敷設されることの多い調湿材も含めた吸放湿現象のモデル化も視野に入れており、システム内での吸放湿現象の考慮による結露性状等への影響に関する検討は、今後の課題として位置付けている。

ⁱⁱ 段階別に用意している理由としては、菌糸の成長段階と比較して発芽段階では水分（湿度）依存性が強いためである。

なる Substrate Class (Class)にて表面の栄養素や pH 値を間接的に考慮できる。この Class とは計算対象の表面の分類のことであり、Table 4.6ⁱ⁾の通り、真菌が利用できる栄養素の状態等に応じて4種に分類されている。

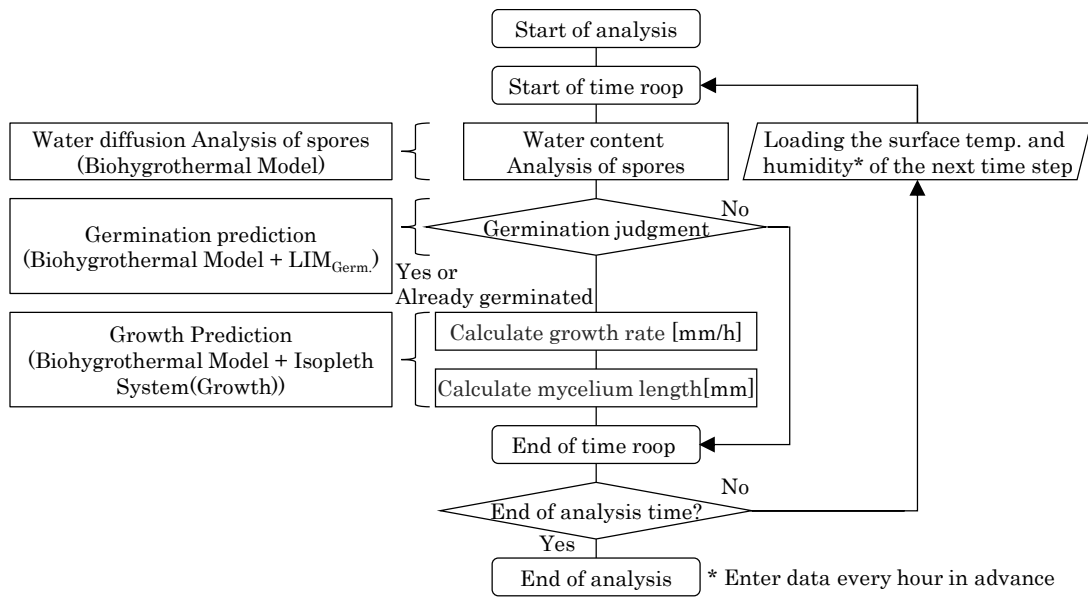
Table 4.6 Substrate category^{4,55)}

| | |
|--------------------|--|
| Substrate class 0 | Optimal culture medium (e.g. full medium). This isopleth system represents the maximum growth possible for any mould found in buildings. |
| Substrate class I | Bio-utilizable substrates, such as wall paper, plaster board, building products made of biologically degradable materials, materials for permanently elastic joints, strongly contaminated surfaces. |
| Substrate class II | Less bio-utilizable substrates with porous structure, such as plasters, mineral building materials, certain woods, insulating materials not belonging to group I |

尚、Class I で表面に埃などの汚染物が多く存在する場合には Class 0 にするものとしている。同様に Class II の建材表面が汚染されている場合は Class I で評価する。その他のモデルの特徴として、Isopleth System は Class 0 を基準としており、この Class 0 は数十種の真菌の温湿度依存性に関する既往の実験結果より構築されている。この曲線を作成する際に、高温低湿で成長する種、低温高湿で成長する種等、菌種毎の温湿度曲線を包括して一本の曲線としている。このため、WUFI-Bio での温湿度曲線に従って発芽及び成長する真菌は実際には存在しておらず、結果として対象面での真菌の増殖を安全側に評価するものである。

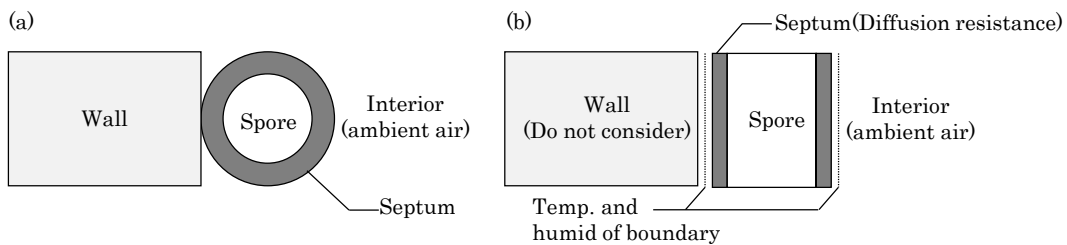
WUFI-Bio の計算フローを Figure 4.18 に示す。主な計算ステップとしては、1) 胞子の水分拡散解析、2) 同結果及び温湿度曲線を用いた発芽予測、3) 発芽判定後の菌糸の成長予測の3つが挙げられる。

ⁱ⁾ Class I (例：木材) で表面に埃などの汚染物が多く存在する場合には Class 0 にするものとしている。同様に Class II (例：コンクリート) の建材表面が汚染されている場合は Class I で評価する。


 Figure 4.18 Analysis flow of WUFI-Bio^{4.23)}

胞子の水分拡散解析

実際には Figure 4.19 (a)に示すように、球体に近い胞子が壁体に付着し、発芽、二次元的に菌糸を伸ばしていく。しかし、WUFI-Bio では予測の簡易化のため、Figure 4.19 (b)のように表面から独立した胞子を隔壁、胞子内、隔壁の 3 層のレイヤで構成した一次元のモデルとなっている。


 Figure 4.19 Modeling of growth progression^{4.55)}: (a) Actual spore; (b) In WUFI-Bio

このモデルを基に、以下に示す Eq. 4.9 の拡散方程式等 (Biohygrothermal Model)により胞子の含水率を算出することで発芽や菌糸の成長を評価する。Eq. 4.9 は離散化の手法として有限体積法が採用されており、境界条件は外側の隔壁面に対して実測や解析から得た表面温湿度を規定する。また、胞子の温度は一様であるとの仮定を行っている。

$$\rho_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial^2 \varphi P_{sat}}{\partial x^2} \quad 4.8$$

ここで、 ρ_w は水の密度[kg/m³]、 w は含水率[m³/m³]、 φ は相対湿度[-]、 δ は空気中での水蒸気拡散係数 [kg/(m・s・Pa)]、 μ は隔壁の拡散抵抗率[-]、 P_{sat} は温度 T [K]での飽和水蒸気圧 [Pa]を表す。含水率 w 及び拡散抵抗率 μ は、相対湿度の関数として Figure 4.20 のように与えられる。

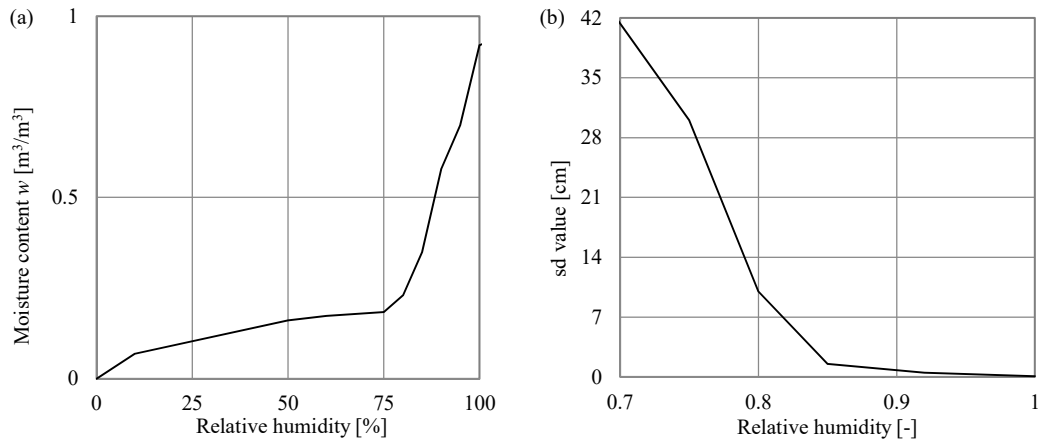


Figure 4.20 Humidity curve^{4.55}): (a) Moisture strage function;
(b) Diffusion equivalent air layer thickness function

また、水蒸気拡散係数 δ は次式で定義する。尚、式中の P は気圧 [Pa]を表す。

$$\delta = \frac{2.0 \times 10^{-7} \times T^{0.81}}{P} \quad 4.9$$

発芽予測

Figure 4.21 の発芽用の Isopleth System ($LIM_{Germ.}^i$)により、温度と $LIM_{Germ.}$ の交点から相対湿度を算出する。

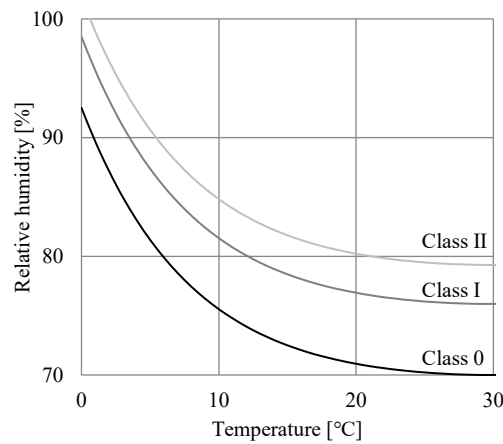


Figure 4.21 LIM.Germ curve^{4.55})

そして、含水率 - 相対湿度曲線(Figure 4.20 (a))を用いて発芽の有無を判断する含水率 (Critical Water Content)を導出し、胞子の含水率との比較を行う。ここで、胞子の含水率が Critical Water Content を超えた時点で発芽と判定する。

ⁱ LIM とは Lowest Isopleth for Mould の略であり、胞子の発芽及び菌系の成長段階において、LIM を境界として真菌の活性の有無を判断する。また、LIM は Class 別、発芽及び菌系の成長段階別に用意されている。

菌系の成長予測

発芽判定後は Figure 4.22 に示すような Class 別の Isopleth System (Growth)により菌系の成長を評価する。

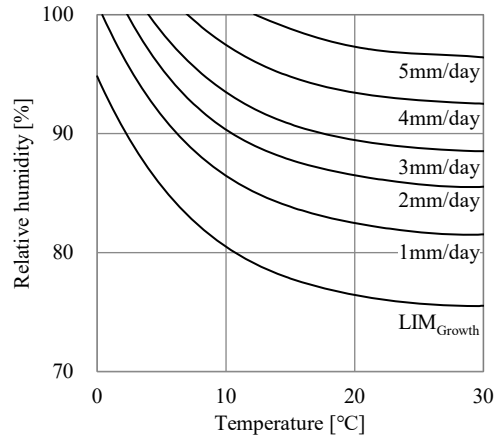


Figure 4.22 Isopleth system for Class I (Growth)

Isopleth System (Growth)では 1 時間毎の孢子（菌系の成長によるモデルの変更はない）の温湿度に基づき、単位時間あたりの菌系の成長長さ G_h [mm/hour]を求める。更に、全タイムステップで G_h の総和を取ることで菌系長さ[mm]を算出する。

WUFI-Bio の計算条件

計算条件として、対象の地下ピットの外気導入口にフィルタが設置されていないことや、対象面がコンクリートであることから、対象面を Class I、孢子の初期含水率 w は 0.5 とした。境界条件となる表面温湿度は、CFD にて 1 時間毎に各代表点で出力したデータを用いた。尚、表面の相対湿度に関しては、壁面近傍の空気側の第一メッシュにおける絶対湿度 x_a と壁面温度に対する飽和絶対湿度 x_s より算出している。また、結露が起こる場合($x_a > x_s$)は相対湿度を 100%として扱い、WUFI-Bio での増殖予測では結露による影響を考慮していない。

4.3.2 解析の概要

1) 対象建物及び解析モデル

北九州市に立地する地上 5 階建ての中規模オフィスビル（2005 年 4 月竣工）を対象とする。同建物では外気負荷の削減を目的として、地下ピット方式の土壌熱交換システムが採用されている。屋外に突出した流入口より地下ピット内に導入された外気は、地下ピットの流出口までの約 70m の間、土壌（コンクリート）との熱交換を行う。流出口通過後は、縦シャフト内の各階に設置された外調機を経て室内の共用エリアへ供給される。地下ピットを経由しない場合は、縦シャフト上部の屋上付近の外気を直接、外調機へ導入することが可能である。また、中間期には共用エリアに設置された自然換気装置により、地下ピット

や外調機を経由せず外気の導入を行う。Figure 4.23 に本章の解析で使用した CFD のモデルⁱを示す。

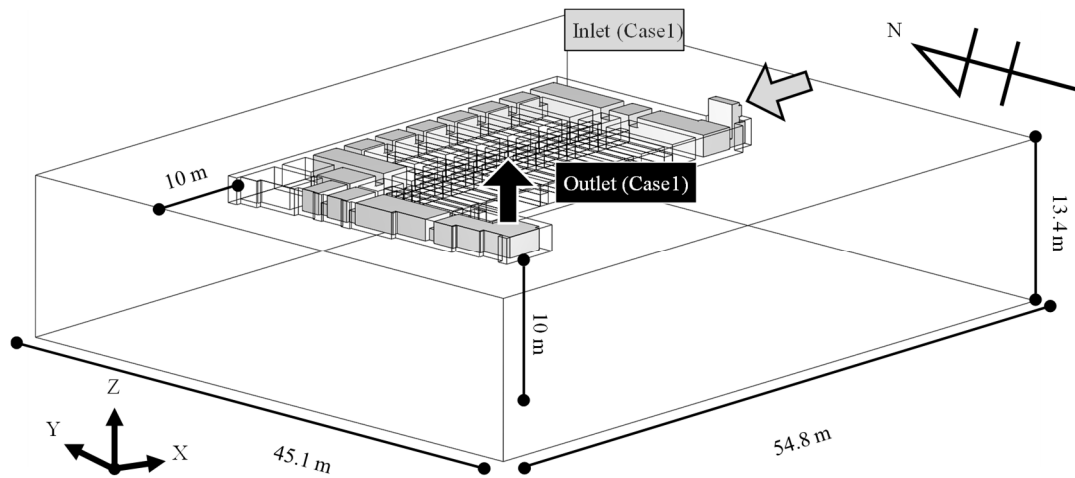


Figure 4.23 Analysis model of the system

図中の灰色の部位が外気導入経路の流体部（空気）であり、その周囲にコンクリートの躯体、更にその周りの 10m まで土壌が存在する。各物性値は第 4 章と同様である。解析は空気の温度・湿度輸送、地下ピット表面の対流・放射熱伝達と地下ピット表面の仮想レイヤでの結露水の凝縮・蒸発及びコンクリート・土壌の熱伝導を連成させた三次元非定常解析である。

2) 非連成解析の条件

本章では前述の通り、土壌熱交換システムにおける結露抑制策の内、外気導入経路、外気導入条件、外気露点温度に応じた外気導入手法ⁱⁱの有効性の検証を目的としたケーススタディを実施する。解析ケースは Table 4.7 に示す通りである。

ⁱ 本節のモデルでは、地下ピットと土壌が接するコンクリート外側の面から水平方向、鉛直方向にそれぞれ 10m の土壌領域を設けた。

ⁱⁱ 本章で対象とする結露抑制策の他に調湿材を敷設が挙げられる。しかし、工藤ら^{4.24)}や松鶴ら^{4.51)}の研究成果では、調湿材による除湿効果は期待できるものの、調湿材自体が微生物の増殖の温床となる可能性を報告している。このように、結露発生の抑制や外気の除湿を目的とした調湿材が逆効果となる可能性もあるため、本章では調湿材の導入効果の検討を除外している。

Table 4.7 CFD analysis cases

| | Route | Dew point temperature control for judging the outside air introducing | Schedule of introducing the outside air | | |
|---------|-----------------------------|---|---|---------------|---------|
| | | | November – March, July – September | April and May | October |
| Case1-0 | One way (70.3 m) | - | 10:00 ~ 18:00 | - | - |
| Case1-1 | One way (70.3 m) | - | 10:00 ~ 18:00 | - | - |
| Case1-2 | One way (70.3 m) | Yes | 10:00 ~ 18:00 | - | - |
| Case1-3 | One way (70.3 m) | Yes | 10:00 ~ 18:00 | 10:00 ~ 18:00 | - |
| Case2-1 | Two way (48.4 m and 21.9 m) | - | 10:00 ~ 18:00 | - | - |
| Case2-2 | Two way (48.4 m and 21.9 m) | Yes | 10:00 ~ 18:00 | - | - |
| Case2-3 | Two way (48.4 m and 21.9 m) | Yes | 10:00 ~ 18:00 | 10:00 ~ 18:00 | - |

各ケースの外気導入のスケジュールに関しては、Figure 4.24 の通りであり、このスケジュールに応じての流れ場を切り替えた。

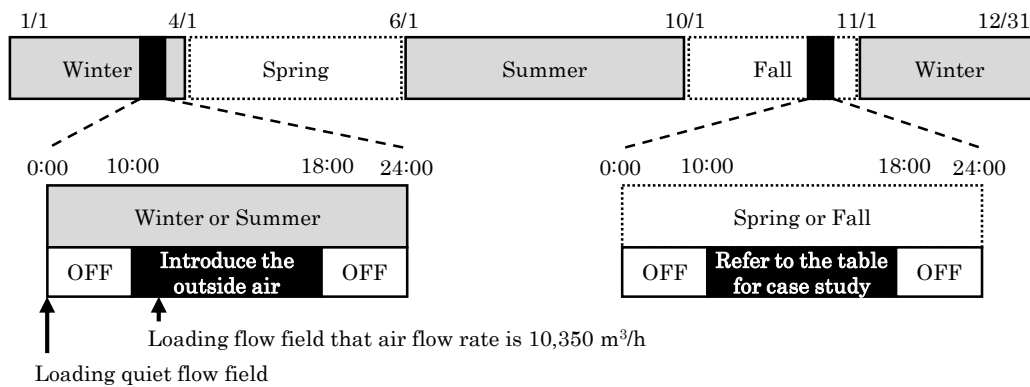


Figure 4.24 Schedule of introducing the outside air

Case1-0 及び Case1-1 は 4.2 と同様の外気導入条件である。まず、結露予測時の凝縮・蒸発潜熱を考慮する Case1-0 と考慮しない Case1-1 にて予冷・予熱効果や結露性状等を比較し、解析中の結露発生時の凝縮・蒸発潜熱を考慮する必要性について検討するⁱ。また、既往研究^{4.52)}より、今回の解析条件と異なるものの、Case1-1 の外気導入条件では夏季に著しく結露が発生することや、地下ピット後半部で結露発生の可能性が高いことが示唆された。しかし、高湿な外気導入の制限や春季に外気導入を実施し、地下ピット内の表面温度を上昇させるなどの対策により、夏季の結露を抑制できる可能性を示している。そこで、まず Case1-2 では結露の発生を抑制するために、Case1-1 に対して後述する露点温度制御を組み込んでいる。更に、春季に外気導入を行い、結露の要因となる冷熱を除去する目的から、露点温度制御に加えて 4 月・5 月に外気導入を行う Case1-3 を設けた。外気導入制御以外の結露抑制手法としては、外気導入経路の長さを短縮させ、経路後半部の躯体表面温度の低くなる部位と外気の接触を防ぐことが考えられる。Case2 シリーズは、ピット形状を変更さ

ⁱ 凝縮・蒸発潜熱を考慮した場合、温度及び湿度輸送方程式が非線形となり Δt の拡大に制限がかかるため、大幅な計算時間の増加に繋がる。これらのケースにて凝縮・蒸発潜熱の考慮の有無による結露性状や予冷・予熱効果への影響を検証する。

せることなく経路を短縮可能な手法を検討する。具体的には Figure 4.25 に示したように Case1 シリーズでは流入出口であった 2 面から外気を取り入れ、経路中央の流出口にて合流する経路とした。外気導入条件は Case1 シリーズと対応させ、Case2-1 ~ Case2-3 としている。

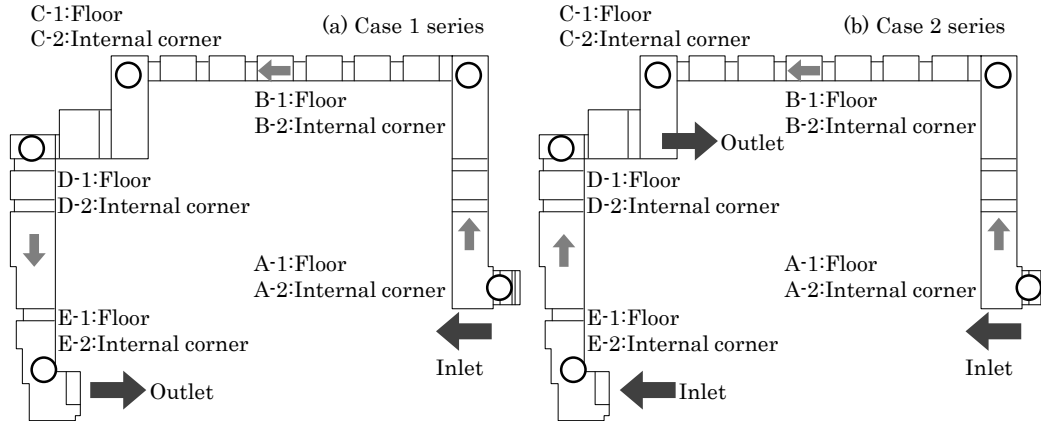


Figure 4.25 Place of inlet, outlet, and respective point each series:

(a) Case 1 series; (b) Case 2 series

Table 4.8 に同ケーススタディでの解析条件を示す。

Table 4.8 Analysis conditions for uncoupled simulation

| | | |
|---|--------------------------|--|
| Calculation period | | January 1~December 31 (A preliminary analysis was performed for the 1 year prior to the analysis year.) |
| Time interval | | 3,600 s (When switching flow field: 10 s ~, When condensation occurs on Case1-0: 60 s) |
| Domain | | 54.8 m (X) × 45.1 m (Y) × 13.4 m (Z) |
| Mesh | | 222 (X) × 180 (Y) × 61 (Z) = 2,437,560 |
| Turbulence model | | Low Re-type k-ε model (Abe-Nagano-Kondo model) |
| Scheme for advection term | | Temperature: QUICK, Humidity: 1 st -order upwind scheme |
| Initial temperature of underground and air tunnel system elements | | Results of the one-dimensional heat conduction analysis |
| Boundary conditions | Inlet of air tunnel | T_{in} : Outside air temperature [°C] ^{4.40)} , x_{in} : Outside air absolute humidity [kg/kg(DA)] ^{4.40)} |
| | Outlet of air tunnel | Free slip |
| | Wall in air tunnel | Temperature: Analytical wall function (AWF) ^{4.45), 4.46)} , Humidity: Lewis analogy |
| | Ground surface | Temperature: Sol air temperature, Convective heat transfer coefficient: 17.9W/(m ² ·K) |
| | Upper side of air tunnel | Adiabatic |
| | Lateral and bottom | |
| Convergence condition | | Temperature transport equation and Pressure correction equation: 1×10 ⁻⁴ Momentum, k and ε transport equation: 1×10 ⁻⁶ Humidity transport equation: 1×10 ⁻⁷ |

初期温度は、まず、地中の鉛直方向の一次元熱伝導解析を実施し、周期的定常状態となった時点（解析開始から 21 年目 12 月 31 日 24 時）での鉛直方向の土壌温度プロファイルを取得した。同解析の条件については Table 4.2 を参照されたい。尚、結果については既報^{4.10)}に示した分布性状とほぼ同様である。その後、取得したそれぞれの深さでの温度を CFD モデルの深さに対応させ、一次元的な初期温度としてコンクリート及び土壌に与えた。この初期温度分布を用いて、Case1 シリーズでは Case1-1 の条件にて、Case2 シリーズは Case2-1 の条件で 1 年間の助走期間を設けた非連成解析により温度場（三次元）を作成し

た上で、更に1年間の解析を各ケースで実施したⁱ。熱的な境界条件に関しては、まず地表面に相当外気温度^{4.40)}及び対流熱伝達率を与えた。更に、より実運用時に近い状態で解析を行うために、地下ピット天井面を断熱とし、孫ら^{4.18)}の論文を参考に室温を建物1階床面に与えた。地下ピット内の表面間の放射については、Gebhartの吸収係数を用いることで表面間の放射熱流束を評価している。この際、放射率を0.9、放射解析のメッシュ数を3,941とした。流入口の境界条件となる外気の温湿度は拡張アメダス気象データ^{4.40)}(標準年・福岡県八幡)を使用した。尚、土壌内の地下水流による温度場への影響は考慮していないⁱⁱ。非連成解析時に使用する流れ場は地下ピット経由での外気導入無し(外気導入量 = 0m³/h)と外気導入有り(10,350m³/h)の2種とした。以下では事前解析による流れ場取得の概要を示す。

3) 流れ場取得のための事前解析の概要

Case1シリーズとCase2シリーズは流入出口の位置が異なり、同一の外気導入量でも流れの性状が異なるため、外気導入量2種×2シリーズ(Case1+Case2)の計4種の流れ場を取得した。解析条件をTable 4.9に示す。

Table 4.9 Analysis conditions for pre-analysis (obtain flow fields)

| | |
|---------------------------|---|
| Calculation period | Steady simulation (Isothermal) |
| Domain | 54.8 m (X) × 45.1 m (Y) × 13.4 m (Z) |
| Mesh | 222 (X) × 180 (Y) × 61 (Z) = 2,437,560 |
| Turbulence model | Low Re-type k-ε model (Abe-Nagano-Kondo model) |
| Scheme for advection term | QUICK |
| Boundary conditions | Inlet of air tunnel $U_{in}=1.55$ or 0 (Case 1), 0.54, 0.95 or 0 (Case 2), $k_{in}=3/2(U_{in} \times 0.05)^2$, $\varepsilon_{in}=C_{\mu}^{3/4} \cdot k_{in}^{3/2}/l_{in}$ |
| | Outlet of air tunnel Free slip |
| | Wall in air tunnel Velocity: Analytical wall function (AWF) ^{4.45), 4.46)} |

U_{in} : Inlet wind speed (m/s), l_{in} : Length scale (=1.2) [m], k_{in} : Inlet turbulence energy (m²/s²), ε_{in} : Dissipation rate of k_{in} (m²/s³), C_{μ} : Model constant (=0.09) [-]

Case2シリーズではFigure 4.25に示した通り、2つの流入口に対して1つの流出口となる。尚、Case2シリーズの外気導入有りの場合における各流入口の流入量は、両流入口から自然流入、流出口から一定流量だけ流出する条件での定常解析を実施した。解析結果として各流入口の通過流量は東側流入口、西側流入口でそれぞれ3,635m³/h、6,715m³/hであり、これをもとに流れ場を取得した。

ⁱ 周期的定常状態に達した年の結果と今回の結果を比較すると、結露性状などの結果が変わる可能性がある。これは、システムの予冷・予熱量の収支が取れるまでに数年～数十年を要するためであるが、予冷・予熱効果を含め、結露性状についてもこのバランスが取れた状態を対象とした検討も考えられる。しかし現実問題として、この状態を作り出すには計算時間が膨大となる。そこで本章の解析では、土壌鉛直方向の一次元熱伝導解析結果(周期的定常状態)を三次元のCFDモデルに反映させ、助走を1年間(外気導入有りの条件)設け、三次元の初期温度分布を作成した上で1年間の本解析を行うという段階を踏んでいる。

ⁱⁱ 対象建物近くでの地盤調査より、地下水流がほとんど無いことが確認されているため、本章の解析では土壌内の水分移動を考慮していない。ただし、対象によっては、地下水流の影響も無視できない場合も想定されるため、土壌内の熱移動に加えて地下水流の数値モデルとの連成解析も選択肢の一つとして考えられる。

4) 露点温度制御及び結露評価の概要

Case1-2、Case1-3、Case2-2、Case2-3 で実施する露点温度制御は次の通りとした。

- 1) 露点温度制御の判断は4時間毎とする。ⁱ
- 2) 解析時は判断時刻(10:00, 14:00)にて、Figure 4.25 (もしくは Figure 4.35, Figure 4.39) に示す計 10 点の代表点における地下ピット内の表面温度を取得する。ⁱⁱ
- 3) 外気の絶対湿度よりその時刻の外気露点温度を取得する。
- 4) 全代表点の表面温度が露点温度を上回った場合、外気導入を行う。

土壌熱交換システム内の長期的な結露状況を評価する指標として、寺西らの論文^{4.54)}を参考に時刻ごとの結露面積割合 A_r [%]、コンクリート表面の面要素ごとの結露時間割合 t_r [%] を定義した。 $A_{r,n}$ 及び $t_{r,i}$ は次式の通りである。

$$A_{r,n} = \frac{A_{c,n}}{A_a} \times 100 \quad 4.10$$

$$t_{r,i} = \frac{t_{c,i}}{t_a} \times 100 \quad 4.11$$

A_a は地下ピット内で外気と接するコンクリートの全表面積[m²]、 $A_{c,n}$ は A_a の内、各時刻で結露水が存在するコンクリートの表面積[m²]、 t_a は解析期間の時間数 (今回は 8,760) [h]、 $t_{c,i}$ は各面要素で結露水が存在していた時間数[h]を表す。つまり、結露面積割合 A_r は時間的な結露評価手法であり、結露時間割合 t_r は空間的な結露評価手法である。

4.3.3 外気の前冷・予熱効果

Figure 4.26 に月別の予冷・予熱量を、Figure 4.27 に各ケースの4月～9月の外気導入時間数を示す。

ⁱ 流れ場が切り替わる際は、通常時の Δt (3,600s) を数十秒程度まで細かくする必要がある。本来、外気導入の判断は境界条件と同等の時間分解能 (本論文では 1 時間毎) が望ましく、流れ場を切り替える場合はその 1 時間のみ Δt を細かくすれば良い。しかし、ソルバーの都合上、解析途中に Δt の設定を変更できない。従って、事前に毎時刻の Δt を細かくする設定が必要となり、計算サイクル数 (計算負荷) の増加に繋がるため、外気導入判断の間隔を 4 時間毎とした。

ⁱⁱ 代表点は計 5 つのクランクごとに設け、それぞれのクランクで床面及び結露が発生しやすいと考えられる入隅部に 2 点設定した。尚、天井面については断熱条件としており、結露が発生しないため、対象から除外した。

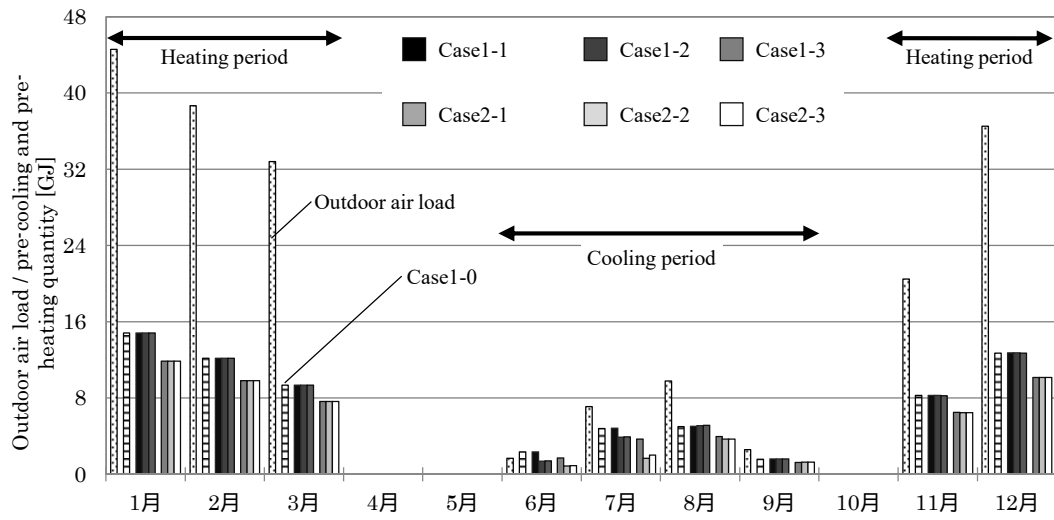


Figure 4.26 Outdoor air load / pre-cooling and pre-heating quantity

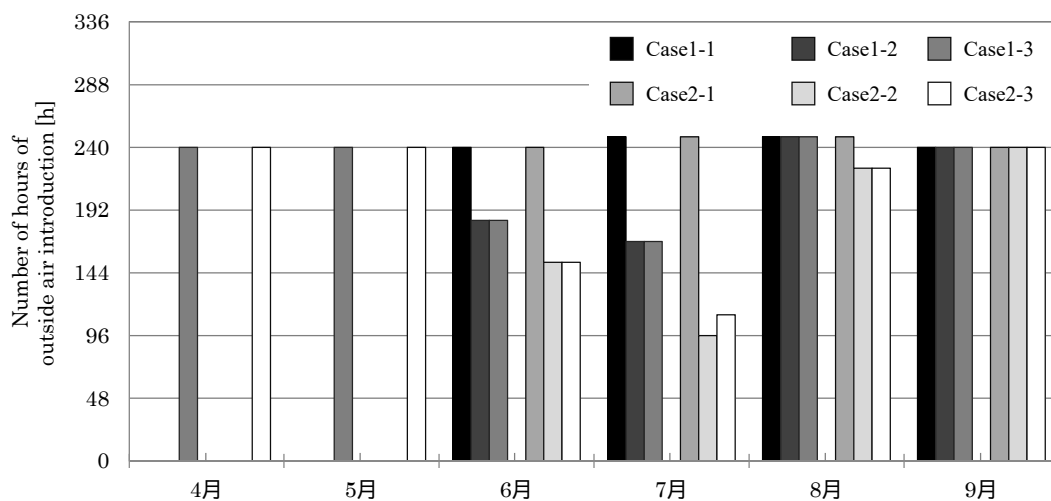


Figure 4.27 Number of hours of outside air introduction

Case1-0 と Case1-1 を比較すると、凝縮・蒸発潜熱の考慮の有無にかかわらず、予冷・予熱量は同等である。また、冬季は露点温度制御がほとんど機能していないため、Case1-1 と Case2-1 の両基準ケースとその他のケースの予冷・予熱効果に差は無い。6月～9月を比較すると僅かではあるが予冷効果の差を確認でき、7月にその差が最も顕著となる。これは、Figure 4.26 の7月の各ケースの外気導入時間数から見て取れる通り、露点温度制御が機能し地下ピット経由での外気導入が抑制されたためである。露点温度制御が作動した際の代表点の表面温度と外気露点温度との関係は Figure 4.28 に示す通りである。

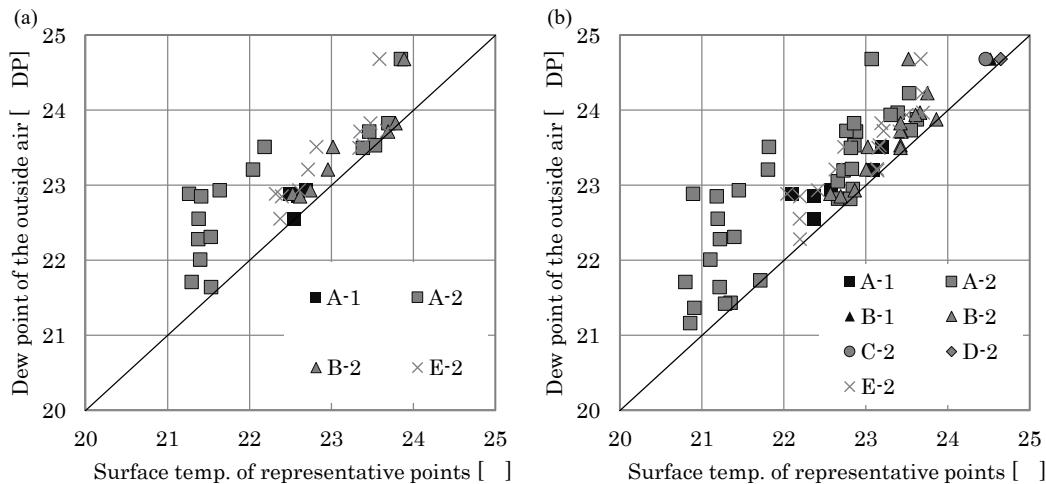


Figure 4.28 Relationship between surface temperature and dew point at each representative point when dew point temperature control operation: (a) Case 1-2; (b) Case 2-2

尚、Case1-2 と Case1-3 及び Case2-2 と Case2-3 はほぼ同様の結果であったため、Figure 4.29 ~ Figure 4.39 では Case1-3 と Case2-3 の図は省略している。図より 10 点の代表点の内、露点温度制御が作動したのは入隅部の代表点（特に A-2）が多かった。A-2 の表面温度が低いことにより、外気導入が抑制された理由は、A-2 は室内からの熱的影響を受けにくい位置にあり、土壌からの冷熱に強く影響を受けたためと推察される。

中間期を除く外調機の年間の処理熱量削減率は Case1 シリーズで Case1-1 から順に 36.6% (65.1%)、35.7% (56.4%)、35.7% (57.0%) となった。尚、括弧内は夏季の削減率を表す。また、Case2 シリーズでは 29.1% (50.0%)、27.5% (35.3%)、27.7% (37.1%) であった。露点温度制御の導入による夏季の予冷効果は、Case1-1 と Case1-2 では 13.3% (Case1-1 基準) の減少であり、Case2-1 と Case2-2 で 29.4% (Case2-1 基準) の減少となった。また、Case1-1 と Case2-1 より、二方向から合流とすることで予冷効果が 23.2%、予熱効果が 19.9% の減少 (Case1-1 基準) となった。

以上の結果から、露点温度制御の導入により夏季の予冷効果が 1 ~ 3 割低下し、中間期の外気導入は露点温度制御や予冷・予熱効果には影響を与えず、また外気取り入れ口を 1 方向から 2 方向とすると予冷・予熱効果が低下する可能性が示唆された。

4.3.4 結露の抑制効果

1) 結露面積割合

Figure 4.29 ~ Figure 4.33 に Case1-3 と Case2-3 を除いた各ケースの結露面積割合を示す。

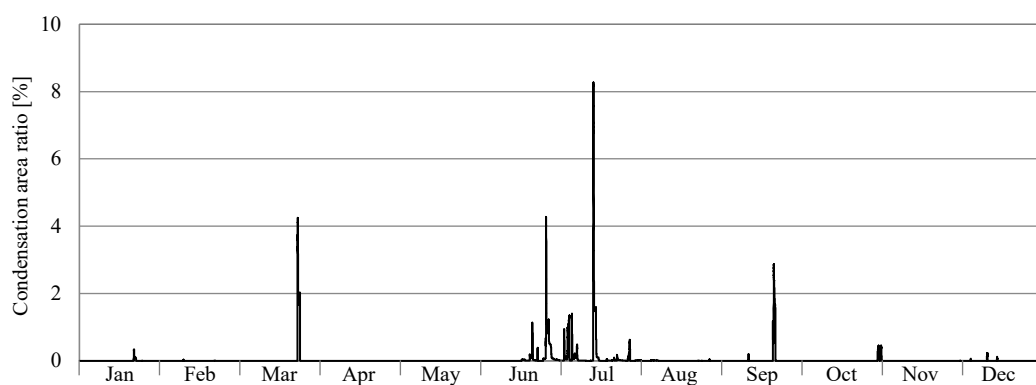


Figure 4.29 Condensation area ratio: Case 1-0

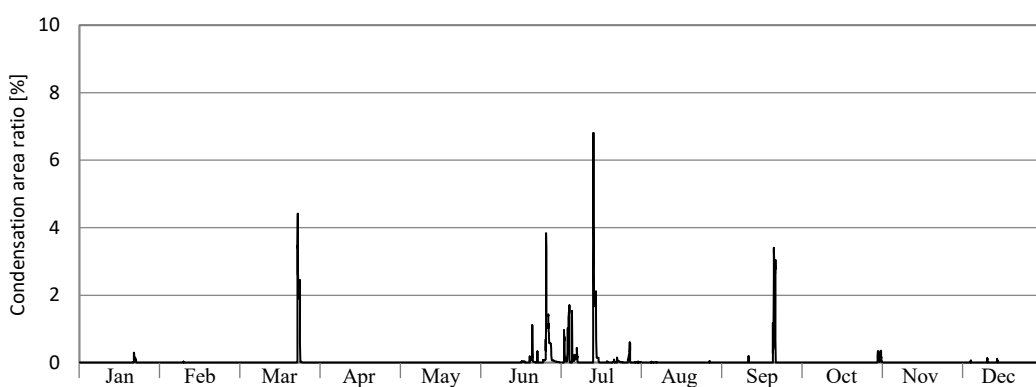


Figure 4.30 Condensation area ratio: Case 1-1

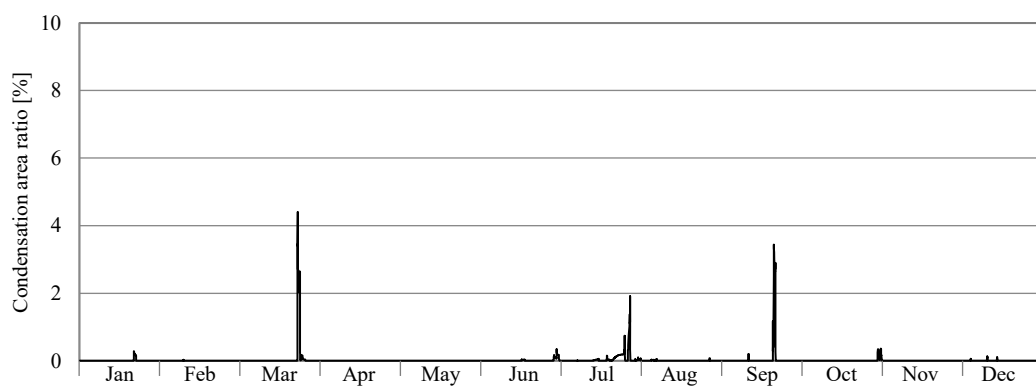


Figure 4.31 Condensation area ratio: Case 1-2

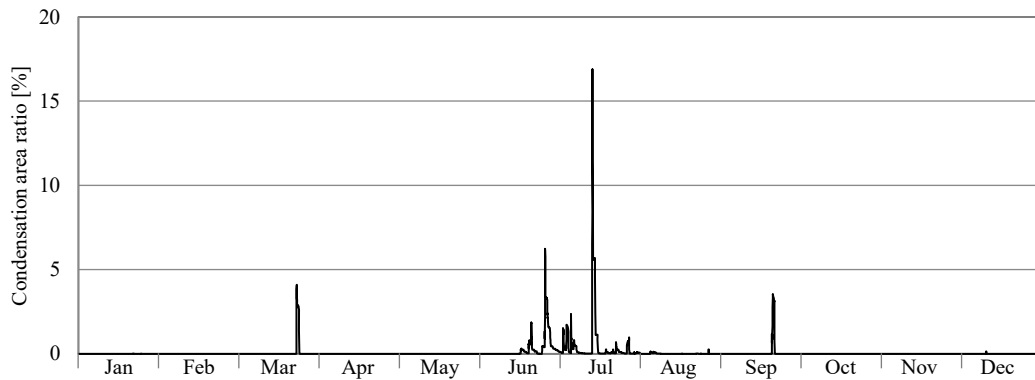


Figure 4.32 Condensation area ratio: Case 2-1

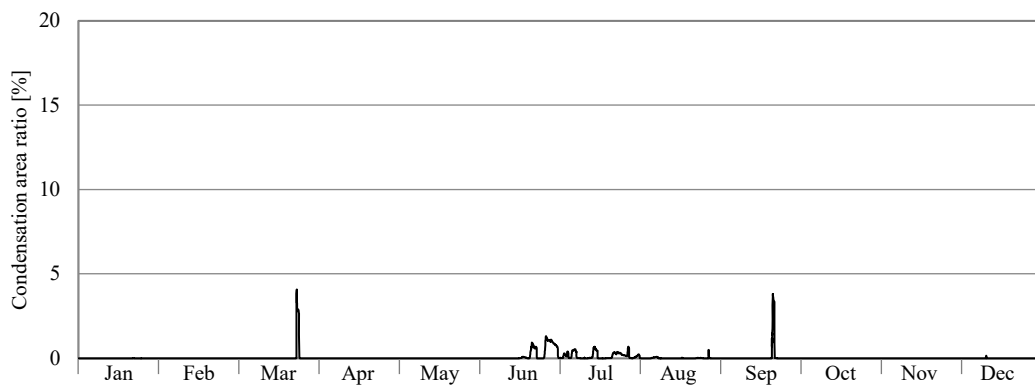


Figure 4.33 Condensation area ratio: Case 2-2

Case1-0 及び Case1-1 より、予冷・予熱量と同様に双方のケースで結露面積割合の時間的な傾向には大きな差異は見受けられない。基本的に6月、7月は冬季の冷熱を蓄えており、躯体周囲の温度が低い。このため、Case1-1 及び Case2-1 では、一時的に高湿な外気の導入に伴い面積割合が上昇し、乾燥するというサイクルを数時間から数日の単位で繰り返していることが確認できた。両ケース共通の特徴として、8月、9月では躯体表面温度の上昇により結露面積割合が低い。Case1-1 や Case2-1 は夏季の結露が顕著であった一方で、Case1-2 や Case2-2 では露点温度制御の導入により、大幅な結露発生抑制が可能となった。Case1-1、Case2-1 の6月、7月で結露面積割合が1%以上となっていた時間がそれぞれ107h、165h であったのに対して、露点温度制御を導入したケースでは半分以下となっていた。

また、全ケースで1月、3月、9月、11月の一部で結露面積割合が高くなっているが、この時間帯は雨天日であり、条件によっては夏季以外でも結露が発生する可能性が示唆され、雨天時には土壤熱交換システムの利用を制限するなどの対策が有効であるものと推察される。また、今回の解析条件では、中間期の外気導入は結露抑制策としての効果が確認できなかった。この理由は4月、5月の熱交換量の収支が0に近かったためと考えられる。外気温度が比較的高い場合のみ外気導入を行うなどの対策により、中間期の外気導入による

結露抑制策に有効性を見出すことは可能である。ただし、中間期に冷熱を取り除く場合、予冷効果が損なわれる点に注意が必要である。尚、露点温度制御を導入したのにもかかわらず、Case1-2 や Case2-2 に結露面積割合が上昇した理由は、外気導入の判断を4時間毎に行っているためである。これはソルバー及び解析時間の都合によるものであり、この点は今後の検討課題である。

2) 結露時間割合

Figure 4.54 ~ Figure 4.39 に各ケースの結露時間割合を示す。

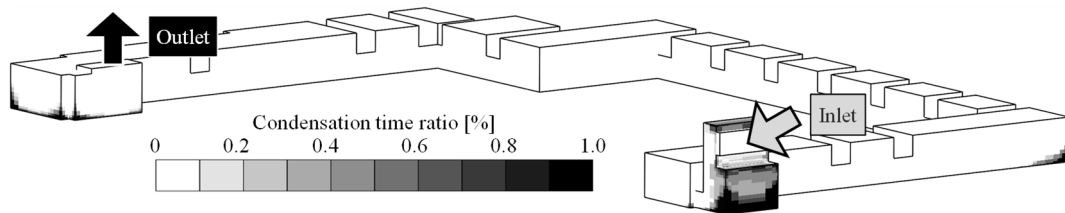


Figure 4.34 Condensation time: Case 1-1 ceiling side

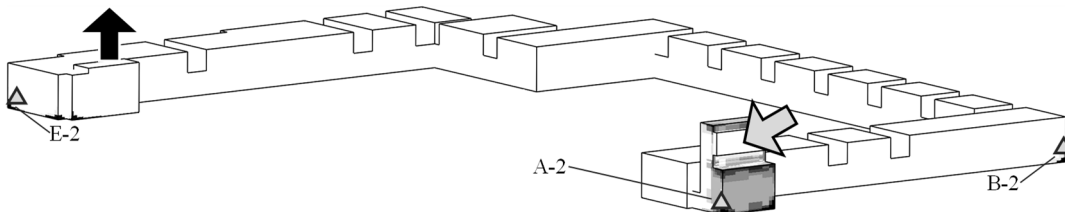


Figure 4.35 Condensation time ratio: Case 1-2 ceiling side ratio

in (b) and (f) represent representative points for the dew point temperature control and prediction of fungal growth

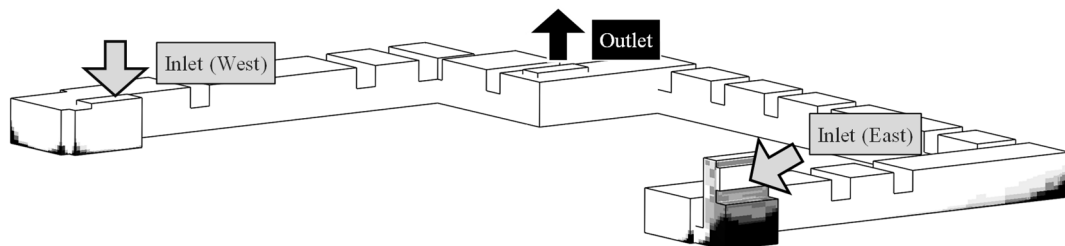


Figure 4.36 Condensation time ratio: Case 2-1 ceiling side

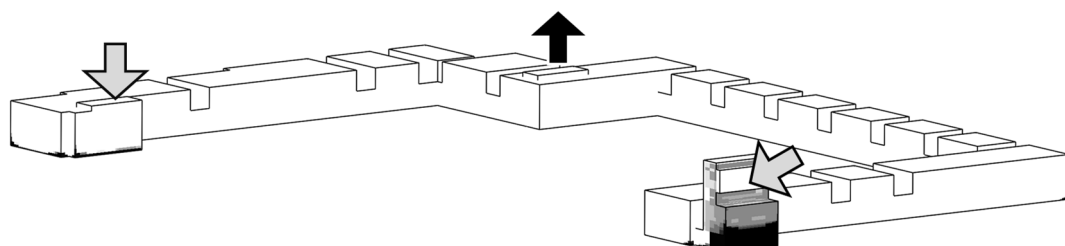


Figure 4.37 Condensation time ratio: Case 2-2 ceiling side

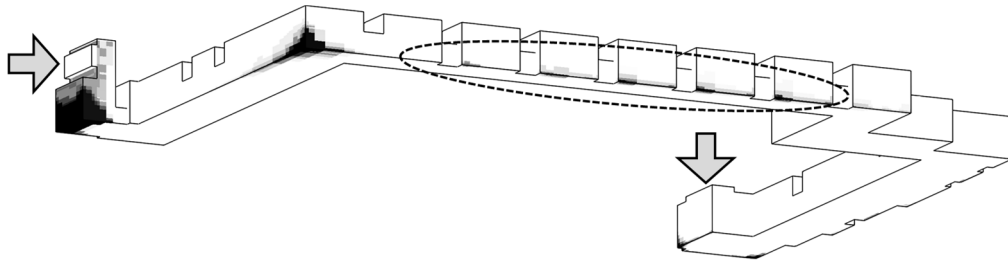


Figure 4.38 Condensation time ratio: Case 2-1 floor side

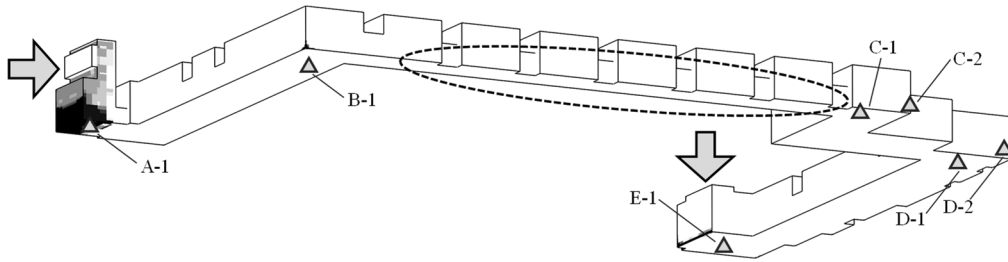


Figure 4.39 Condensation time ratio: Case 2-2 floor side

Case1-0 の結果は省略しているが、Case1-1 と比較した全面要素の結露時間割合の RMSE 値は 0.05%であり、差異はほとんどない。また、Case1-0 と Case1-1 の結露時間割合の分布性状も同様であり、結露しやすい部位の特定を行う場合は、Case1-1 でも十分対応できることを示す結果となった。このように、結露性状と予冷・予熱量の双方の結果から、土壌熱交換システム内で結露が生じた場合における凝縮・蒸発潜熱は考慮せずとも、予冷・予熱量や結露の発生の分布等にはあまり影響を与えないことが示唆された。ただし、各部位での結露発生の時間を正確に予測する場合には凝縮・蒸発潜熱を考慮する必要がある。

Figure 4.34、Figure 4.35 より、Case1 シリーズ共通の傾向として、流出入口付近の入隅に結露時間割合が 1%（実時間で 86.7h）を超える部位が集中している。流入口で結露が発生する理由は、夏季においてこれらの部位の表面温度が低くなっていたことや、露点温度制御で制御できなかった時間帯（11～13 時、15 時～17 時）に結露が発生したためと推察される。また、流出口付近の結露に関しては、夏季において経路前半部である程度予冷され後半部での予冷の余地が小さくなり、結果として躯体表面温度が低くなるため、結露時間割合が高くなったものと考えられる。また、Case1-1 と Case1-2 を比較すると、Case1-1 では図右側の入隅部に結露時間割合が高い部位が存在しているが、Case1-2 ではほとんど結露していない。更に、流出口付近で結露発生状況が緩和されていることも確認できる。Case2-1 は Case1-1 と同様に流出入口等、また中間部の空気が滞留しやすい位置 (Figure 4.38) で一部、結露時間割合が高い。Case2-1 と Case2-2 を比較すると、東側流入口での分布性状はほぼ同様であるが、Figure 4.36、Figure 4.37 の右側の入隅部や Figure 4.38、Figure 4.39 の図中の点線で囲った部位のような中間部の空気が滞留しやすい位置で結露が緩和されている。

以上より、露点温度制御によりある程度の結露発生の抑制が期待でき、外気の導入経路を一方向の場合のみならず、二方向から合流させた場合でも、結露発生の抑制が可能であることが示唆された。また、既往の研究成果も踏まえた地下ピット内での結露発生の対策としては、建物一階の床面の断熱性能を過度に高くしないこと、露点温度制御を導入した際の表面温度計測点の検討、結露しやすい部位には断熱材を設けるなどが挙げられる。ただし、運用初年度に関してはコンクリート打設後の初期水分の放湿があり、結露リスクが高くなるものと推察されるため、外気導入量を増加させることにより初期水分の放湿を促進させるような対策も有効であると推察される。上記のような検討により結露発生は大幅に抑制されるものと考えられる。また結露予測や結露発生の抑制を考える場合、今回の解析のように導入外気中に含まれる水分のみを対象として結露現象を予測するのではなく、その他の水分ソースやシンクを考慮に入れた解析による対応も考えられるが、この点は今後の検討課題と位置づけている。

4.3.5 真菌の増殖予測結果

1) 代表点の温湿度

各ケースの代表点 A-2 及び E-2 の表面温湿度（WUFI-Bio への入力データ）のプロットを Figure 4.21 の曲線とともに Figure 4.40 ~ Figure 4.45 に示す。

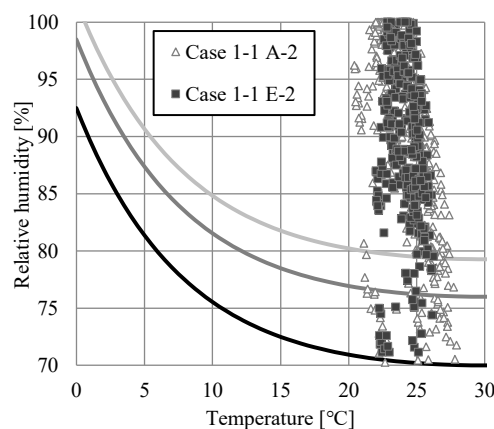


Figure 4.40 Mycelium length: Case 1-1

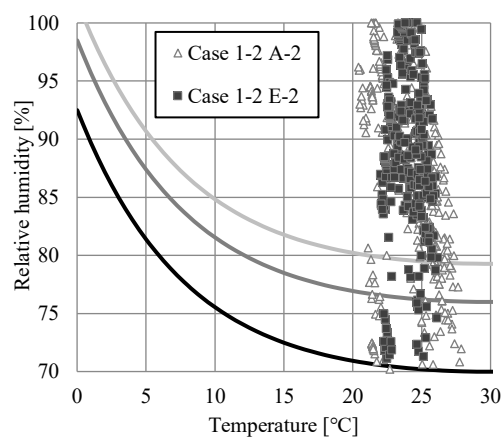


Figure 4.41 Mycelium length: Case 1-2

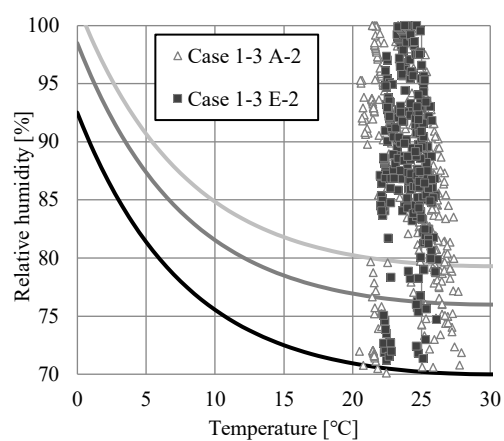


Figure 4.42 Mycelium length: Case 1-3

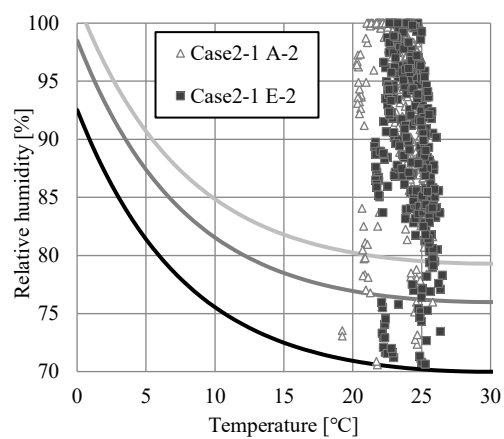


Figure 4.43 Mycelium length: Case 2-1

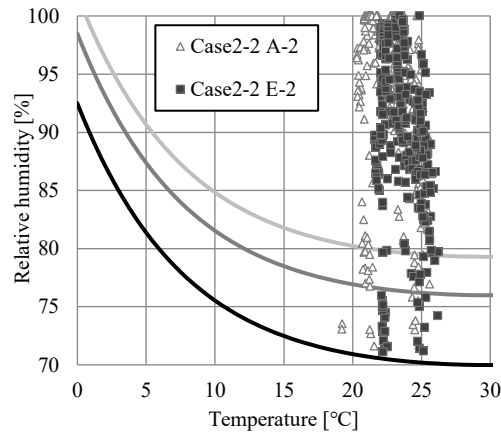


Figure 4.44 Mycelium length: Case 2-2

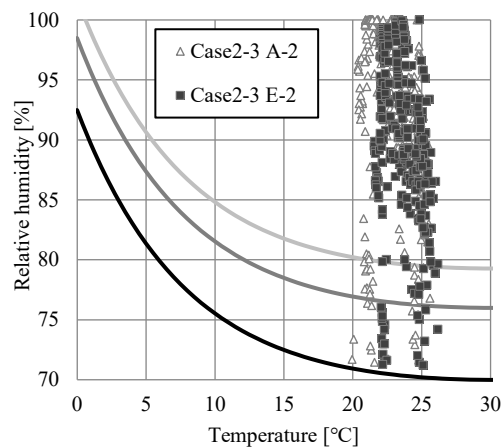


Figure 4.45 Mycelium length: Case 2-3

尚、Figure 4.40 ~ Figure 4.45 のプロットは 6/1~8/31 の 6h 毎のデータであり、一部のデータを間引いている。また、ここでも Case 1-0 の結果は省略する。Figure 4.40 ~ Figure 4.42 より Case1 シリーズでは Case1-1 の E-2 とその他のケースの E-2 に差異が見られる程度でほぼ同様の温湿度であることが伺える。また、Case2 シリーズは Case1 シリーズと同様に Case2-1 の E-2 と他のケースに差異が見られるがその他はほぼ同様の温湿度を示している。これらの入力データより、 $LIM_{Germ.}$ の Class I を超えるプロットが多くを占めているため、WUFI-Bio にて真菌胞子の発芽が予想される。更に、A-2 よりも E-2 のほうが温湿度は高い傾向にあることから、E-2 の菌糸長さが長い結果になるものと推察される。

2) 成長曲線

WUFI-Bio による真菌の増殖予測結果として、Case1-1 ~ Case2-3 の A-2、E-2 における胞子の含水率及び菌糸の成長過程を Figure 4.46 ~ Figure 4.51 に示す。

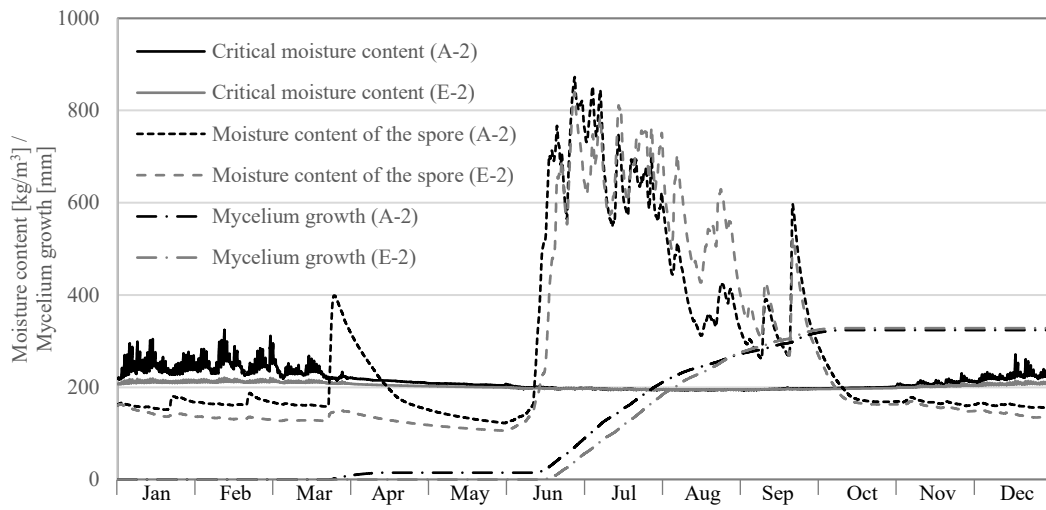


Figure 4.46 Moisture content of the spore and mycelium length: Case 1-1

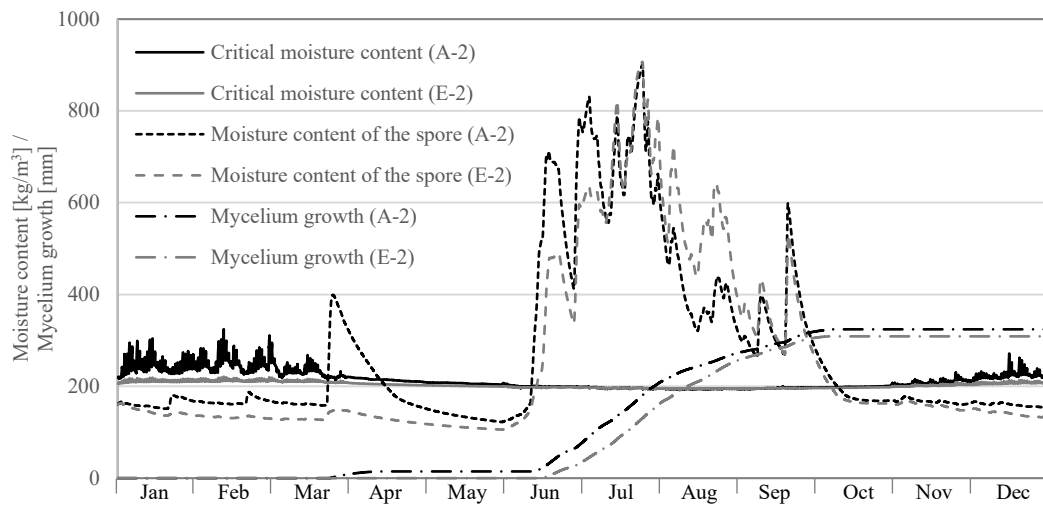


Figure 4.47 Moisture content of the spore and mycelium length: Case 1-2

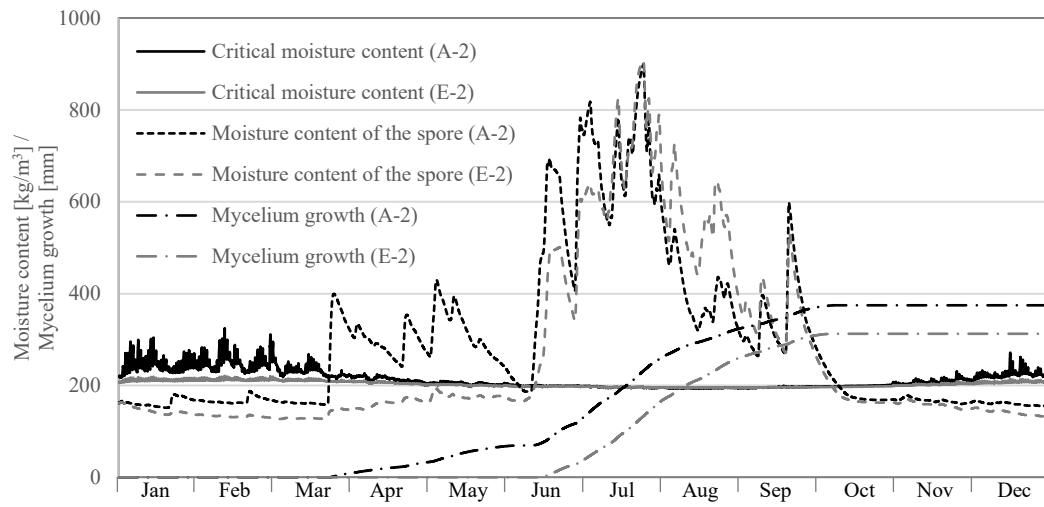


Figure 4.48 Moisture content of the spore and mycelium length: Case 1-3

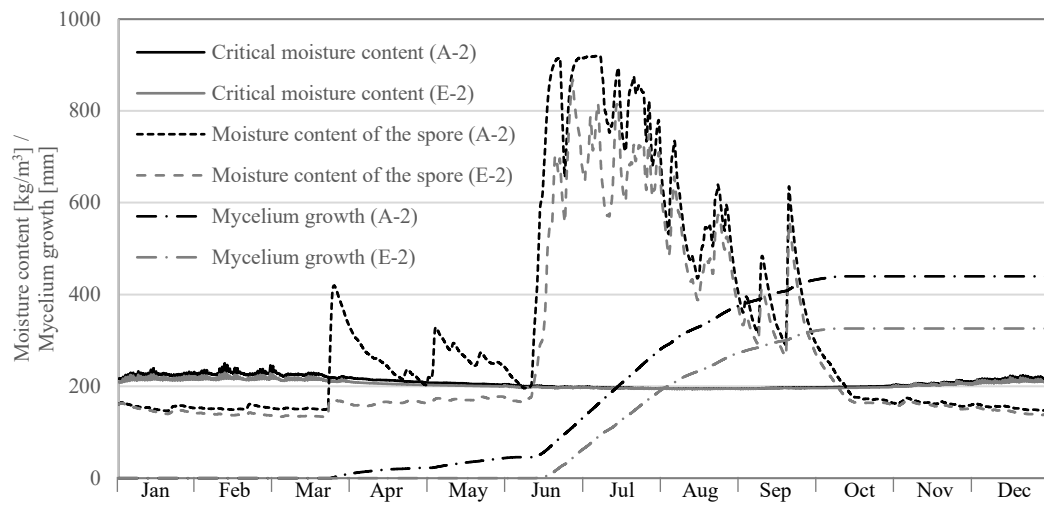


Figure 4.49 Moisture content of the spore and mycelium length: Case 2-1

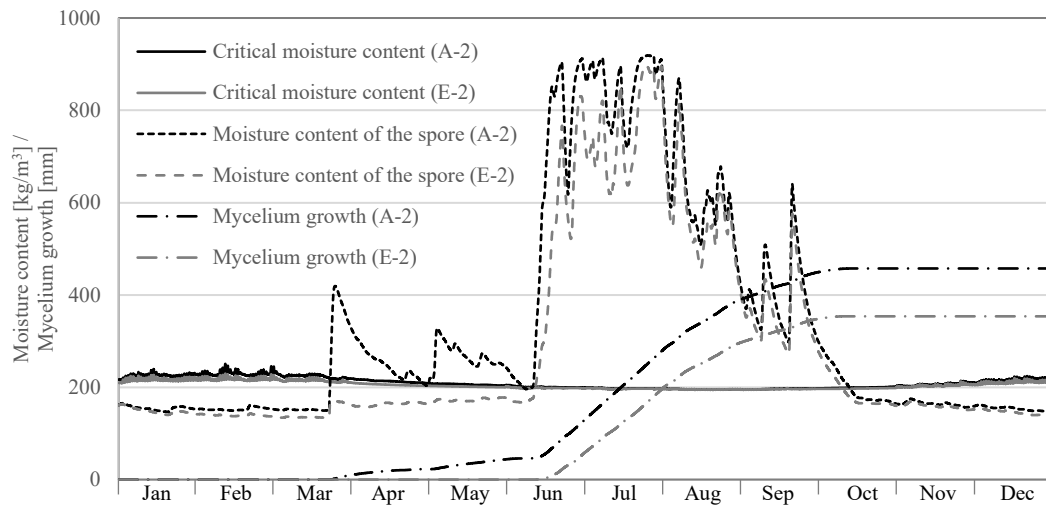


Figure 4.50 Moisture content of the spore and mycelium length: Case 2-2

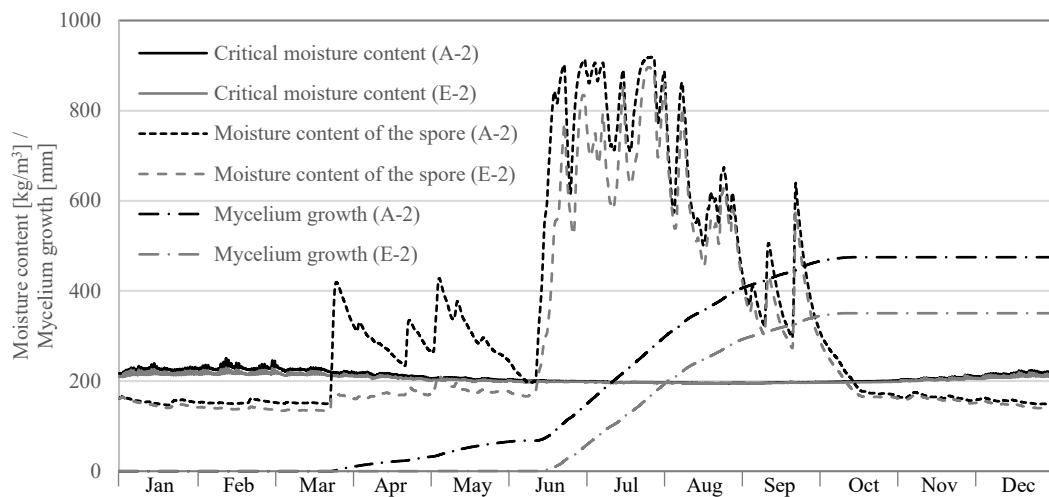


Figure 4.51 Moisture content of the spore and mycelium length: Case 2-3

上述の通り、WUFI-Bio での発芽判定は孢子の含水率が Critical Water Content を超えた時点であり、これらの図より、一部のケースの E-2 を除き、1 月もしくは 3 月の雨天日にて結露した直後に発芽と判定している。このような判定を受けた代表点では、その後、4 月中旬まで菌糸が成長し、4 月下旬以降は孢子の含水率が成長段階での Critical Water Content を下回ったため、成長が停滞している。しかし 6 月中旬より高湿な外気の導入に伴い、孢子の含水率が再び上昇し、夏季の菌糸の成長が顕著となった。また、Case 1 シリーズでは A-2 と E-2 の発芽が同時期に判定されたケースにおいて、最終的な菌糸の長さが同程度となることを確認できる。一方で、Case 2 シリーズでは、A-2 の発芽が 3 月、E-2 の発芽が 6 月と時期は異なるものの、E-2 の菌糸の成長が A-2 に追いつくように急速な成長を遂げ、最終的には A-2

と E-2 の菌糸長さは同程度となっている。その他に確認できる点としては、冬季は孢子の含水率が Critical Water Content を超えないため、菌糸は成長しない。

3) 部位別の真菌の増殖リスク

Figure 4.52 及び Figure 4.53 に各ケース、各代表点の 12 月 31 日 24 時時点での菌糸長さを示す。

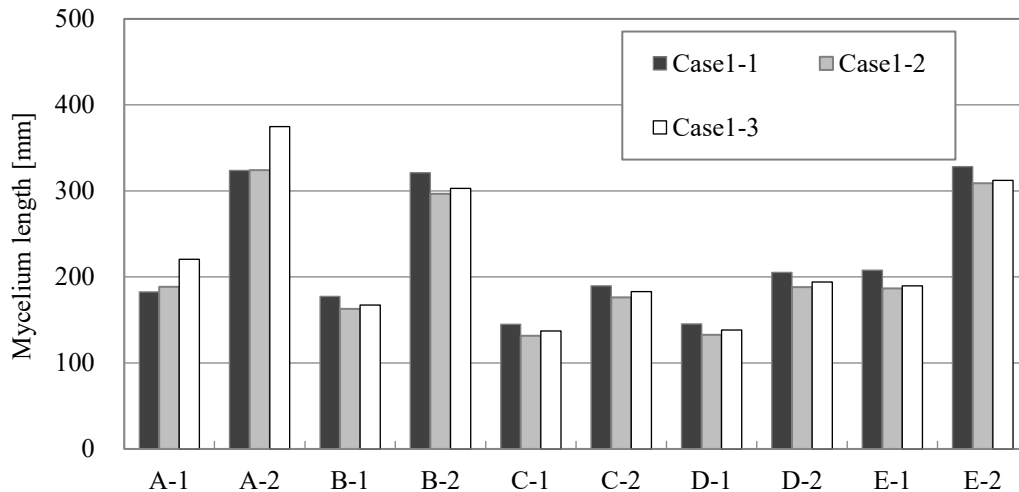


Figure 4.52 Mycelium growth: Case 1

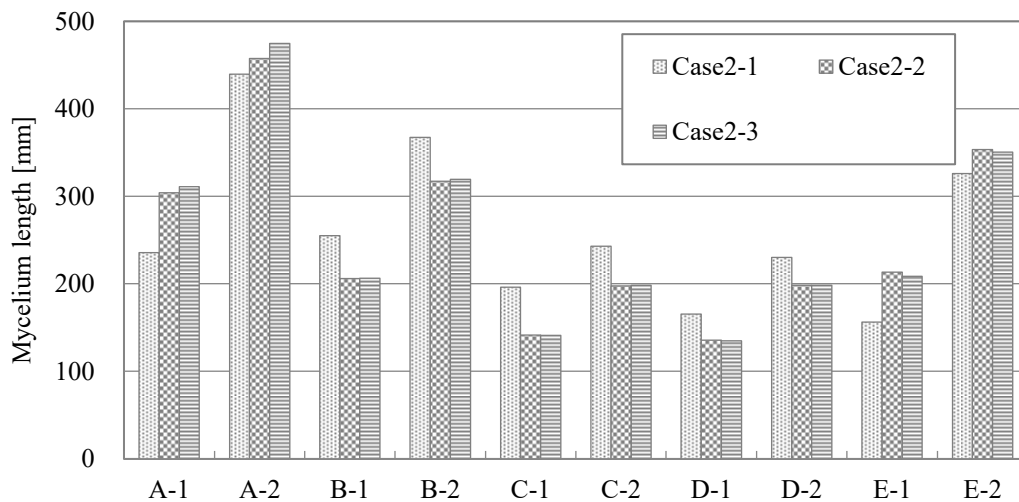


Figure 4.53 Mycelium growth: Case 2

まず、床面と入隅部で比較すると、多くの場合、入隅部（○-2）の菌糸長さが長いことが確認できる。これは、入隅部は夏季に土壌からの冷熱の供給により床の表面温度が低くなることや、一度結露や表面近傍の相対湿度が上昇し、その後、乾燥した外気が導入される時間帯でも、表面近傍の流れが極めて静穏のため、高湿度な環境が維持されやすいためと推

察される。しかし、C 及び D の代表点では、床面と入隅部での菌糸長さの差異がほとんど無い。これは、上述の理由とは反対に、C 及び D はクランク部に位置しており、床面近傍と同様に入隅部近傍での気流が発生していたことに起因すると考えられる。このため、システム設計時の結露防除の観点からは、気流が静穏となる入隅部のような箇所をセメントなどで詰めてシームレスな角のないように施工すれば良いと考えられる。

Figure 4.54 に各代表点の結露時間割合と真菌の増殖予測結果である菌糸長さのプロットを示す。

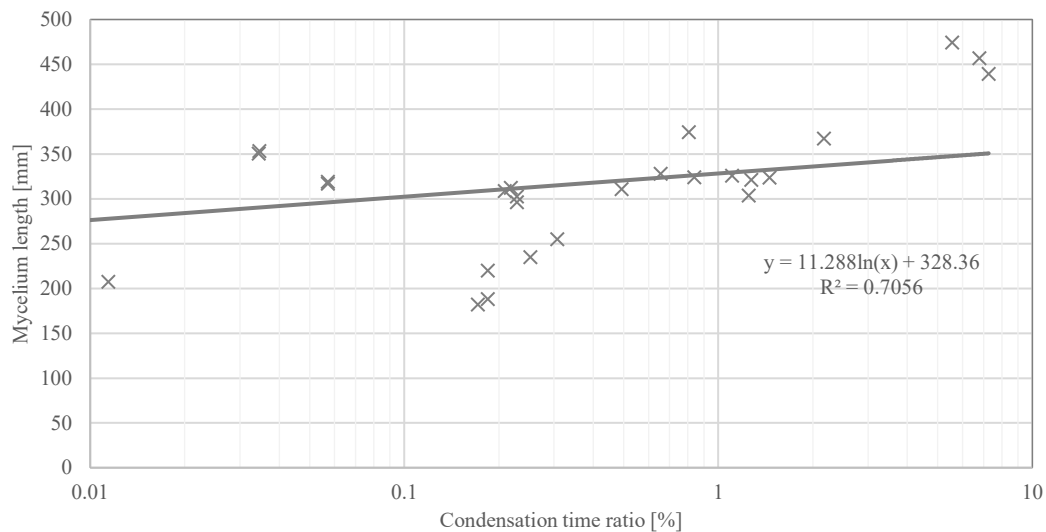


Figure 4.54 Relationship condensation time ratio and mycelium length

同図より、結露時間割合と菌糸長さは対数の関係にあると言える。これは、WUFI-Bio の概要で説明したとおり、胞子の発芽、菌糸の成長共に湿度依存性が強く、結露状態（相対湿度 100%）が数時間継続しただけで、胞子内の含水率が上昇し発芽と判定したり、成長速度が 5mm/h になったりと、結露の発生が菌糸長さに多大な影響を与えたためであると推察される。

本章ではシミュレーション（結露予測+真菌の増殖予測）によるリスク評価となるが、空気質汚染リスクを軽減させる防除策としては、第一に結露させないことが極めて重要であることが示唆された。ただし、真菌は結露状態でなくとも相対湿度 70%以上で継続的に曝露されることで発芽成長することが指摘^{4.56)}されてはいるが、実運用時（特に夏季）にシステム内の結露を防除することだけでなく、相対湿度を 70%以下に保つのはパッシブシステムである以上、ほぼ不可能である。厳密に真菌の増殖による導入外気の空気質汚染を防ぐのであれば、デシカントなどを通した乾燥空気をピットで冷却する、サーバーームのように新鮮な外気を必要しない室にクローズドループ方式で空気を循環させるなど、従来とは異なるシステムのハイブリッド化、利用先の転換などでシステムの有効性を見出すことは可能であるものと考えられる。また、真菌胞子自体は外調機のフィルタで概ねカットできるため^{4.57)}、システムの利用が室内浮遊真菌濃度を著しく上昇させるファクターとなるとは考えにくい。実運用で問題となるのは、導入した外気の臭いであり、これは結露に伴うも

のであると考えられ、実際に設計者側へのクレームとなっている。臭気についても、コンクリート表面の塗装でコントロールは可能であるとの報告^{4.26)}もある。ただし、地下ピットの表面積を考えると、施工費用がかさむため、イニシャルコストの増大につながってしまう。この対策ではローコストで導入可能な土壌熱交換システムのメリットを弱めてしまうため、第5章及び第6章では、システムの運用・設計条件により結露を防ぐための条件の検討を考え、結露リスクのみを空気質汚染リスクの要因として考慮することとする。

4.4 まとめ

4.4.1 予冷予熱効果の性能予測手法

4.2 では、流れ場の計算負荷を低減した土壌熱交換システムの年間性能予測手法の提案や事前解析の概要を示した上で、提案手法による年間性能予測に関するケーススタディを実施した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 外調機の顕熱処理熱量は外気導入量が $10,350\text{m}^3/\text{h}$ の場合、夏季で 76.2%、冬季で 13.8%、年間では 20.6%の削減が可能であり、外気導入量を $1/5$ とした場合、夏季で 100.0%、冬季で 31.3%、年間で 38.8%の削減が可能であることが示唆された。特に夏季に関しては外気導入量を小さくすることで外調機の顕熱処理が不要となるほどのポテンシャルを有していることが示唆された。
- 2) 鉛直方向の温度場の分布性状より、熱交換を行った場合でもその影響は比較的浅く、水平方向に対しても狭い領域で蓄熱・熱伝導現象が完結しており、隣接する建物同士が土壌熱交換システムを利用した場合でも性能低下への影響は小さいものと推察された。
- 3) Ar 数が小さく慣性力が支配的な流れ場においては浮力の影響が小さいことから長期的に見ても流れ場はほとんど変化しない。このため、非連成解析で使用する流れ場による精度の依存性は確認できず、従来の完全連成解析と比較して年間取得熱量の誤差は 1%以下であった。更に、 Ar 数が大きく、流れ場が浮力の影響を受ける場合の非連成解析に関しても、僅かに精度が低下するものの、完全連成解析との誤差は 3%以下であった。
- 4) 完全連成解析による年間性能予測の計算時間として数十日を要した。非連成解析を用いることにより 6 時間以内での解析が可能となり、本提案手法は計算コストと解析精度の双方を両立させた設計段階における年間性能予測手法として十分有用であることを確認した。

4.4.2 結露性状の評価手法の開発及び真菌の増殖予測モデルとの連成解析

4.3 では、CFD をベースとした解析により、土壌熱交換システムの年間での結露発生の予測及び真菌の増殖予測と予冷・予熱効果の評価を実施し、省エネルギー効果及び導入外

気の空気質の確保の観点からの外気導入手法の有効性の検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 非連成解析に対して湿度輸送方程式を連成させた場合でも、4.2 と同様に大幅な解析時間の低減が可能でありⁱ、年単位での結露性状と予冷・予熱効果の把握が可能となった。
- 2) 同一の外気導入部・外気導入量でも、外気の取り入れ口を1つから2つにすると予冷・予熱効果が数十%のオーダーで低下する。
- 3) 3月や9月、また冬季の雨天日等でも結露が発生する可能性が示唆され、雨天時には土壌熱交換システムの利用を制限するなどの対策が有効であると推察される。
- 4) 外気の導入経路が複雑であった場合でも、結露が発生する可能性の高い点に表面温度の計測点を置き、露点温度制御を導入することで結露の発生を抑制できる可能性を有する。また、露点温度制御の導入により夏季の予冷効果が1～3割程度低下するが、冬季の予熱効果にはあまり寄与しないことが示唆された。以上よりシステム利用時における結露発生と省エネルギーのトレードオフの関係性が示唆された。
- 5) 結露時間割合と菌糸長さは対数の関係にあった。これは、WUFI-Bio で扱われる孢子の発芽、菌糸の成長は共に湿度依存性が強く、結露状態（相対湿度 100%）が数時間継続しただけで、孢子内の含水率が上昇し発芽と判定したり、成長速度が 5mm/h になったりと、結露の発生が菌糸長さに多大な影響を与えたためであると推察される。

参考文献

- 4.1) 垂水弘夫, 簗原由紀: ヒート&クールチューブ住宅の地中熱利用効果に関する調査研究 北陸に立地する戸建モデル住宅を対象として, 日本建築学会環境系論文集, 第75巻, 第651号, pp.423-429, 2010.5
- 4.2) 一木翔, 尹奎英, 田中英紀: ボイドスラブ基礎によるクール/ヒートチューブ換気システムの性能に関する研究 (第3報) システム熱交換特性の分析と設計手法の確立, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.181-184, 2013.9
- 4.3) 上田真也, 銚井修一: クールチューブの冷却効果に関する研究 - 地盤内の熱水分同時移動を考慮した場合 -, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 環境系, 第37号, pp.213-216, 1997.5

ⁱ 本章で行った解析は株式会社ソフトウェアクレイドルの熱流体解析ソフト「STREAM V12」を使用し、Core i7-4970K、DDR3-1600 4GB×2 を搭載した PC で実施した。解析時間は助走期間、事前解析を除いて 40～50 時間程度であった。 Δt を 0.01s とした従来の完全連成解析に要する時間（概算で 180 年）と比較すると 0.003% 程度の解析時間である。本章での解析は空間分解能を高めているため、4.2 よりも大幅に計算時間が増大している。実用的に非連成解析を利用する段階においてはさらに計算時間を削減する必要があると考える。従って、GPGPU 等の並列計算を実施する、もしくは空間分解能と予測精度の検討を行い、より短期間で解析が可能かつ精度の低下が抑えられる空間分解能についても吟味していく必要があると考えている。

- 4.4) 張晴原: 中国におけるアースチューブの冷却効果 その1 地中自然温度、吹出し温度と冷却エネルギー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, pp.631-632, 2014.9
- 4.5) Rohit Misra, Vikas Bansal, Ghanshyam Das Agrawal, Jyotirmay Mathur and Tarun Aseri: Transient analysis based determination of derating factor for earth air tunnel heat exchanger in summer, Energy and Buildings, Vol. 58, pp.103-110, 2013.3
- 4.6) Adrian Trzaski and Bernard Zawada: The influence of environmental and geometrical factors on air-ground tube heat exchanger energy efficiency, Building and Environment, Vol. 46, Issue 7, pp.1436-1444, 2011.7
- 4.7) G. Mihalakakou: On the heating potential of a single buried pipe using deterministic and intelligent techniques, Renewable Energy, Vol. 28, Issue 6, pp.917-927, 2003.5
- 4.8) L. Ramírez-Dávila, J. Xamán, J. Arce, G. Álvarez and I. Hernández-Pérez: Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates, Energy and Buildings, Vol. 76, pp.238-248, 2014.6
- 4.9) Joaquim Vaz, Miguel A. Sattler, Elizaldo D. dos Santos and Liércio A. Isoldi: Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger, Energy and Buildings, Vol. 43, Issue 9, pp.2476-2482, 2011.9
- 4.10) 芦谷友美, 白石靖幸, 安永龍一, 龍有二: CFD 解析による夏季及び冬季の地下ピット内伝熱性状の動的評価 - 土壌熱交換システムの冷却・加熱効果の予測手法に関する研究, その1 -, 日本建築学会環境系論文集, 第77巻, 第677号, pp.575-582, 2012.7
- 4.11) 木下雅広, 須永修通: 学校建築におけるクール/ヒートピットに関する実測研究 その5. ピット距離, 地中梁形状の影響に関する CFD 解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, pp.625-626, 2014.9
- 4.12) 足立勇樹, 永野紳一郎, 鈴木啓泰: 学校建築のクールヒートトレンチの効果検証 その5 性能向上のための数値解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, pp.629-630, 2014.9
- 4.13) 橋本翔, 中野一樹, 長谷川雅一, 鳥越順之, 野部達夫: スマートビル構築のための要素技術検証とその最適化に関する研究 (第4報) 地中熱利用(クール/ウォームピット)の性能評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.157-160, 2014.9
- 4.14) 青木貴均, 尹奎英, 旗手康信, 吉岡沙野, 若目田郁夫, 奥宮正哉: 環境共生型公共施設における省エネルギー手法の導入について その2 CFDによるアースチューブ導入効果の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 環境工学, pp.1055-1056, 2011.8
- 4.15) 塚本隆史, 小座野貴弘, 宮崎ひろ志, 田中健人: 地熱利用計画支援のための地中温度データベースの構築 その6, 免震ピットを利用したクールピットの省エネ効果算定手法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, pp.619-620, 2014.9

- 4.16) 蔡耀賢, 加藤信介, 大岡龍三, 小金井真: CFD を用いた対流と建材内熱・水蒸気同時移動の連成解析による室内熱・湿気解析モデルの検討, 生産研究, 58 巻, 1 号, pp.55-58, 2006.11
- 4.17) 城戸英彰, 白石靖幸: 流れ場の計算負荷を低減した非定常 CFD 解析に関する研究 (第1報) 計算負荷低減手法の概要及び定風量空調制御を対象とした予測精度の検証, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 207, pp.9-17, 2014.6
- 4.18) 孫元得, 田中英紀, 永井久也, 奥宮正哉, 中原信生: 土壌熱容量を用いた空調外気負荷低減システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.87, pp.69-77, 2002.10
- 4.19) 徳村朋子, 大岡龍三, 高橋幹雄, 袴田喜夫, 松本敏勝, 三谷剛: ヒート&クールピットを利用した空調設備の省エネルギー性能に関する研究 シミュレーションによる年間の熱特性評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.733-736, 2012.9
- 4.20) 牟田彬俊, 塘田研仁, 白石靖幸, 片岡えり, 塚見史郎: 実在医療施設に導入されたクール/ヒートトレンチの年間性能予測に関する研究 第1報 長期実測と計算負荷を低減した非定常 CFD 解析による検証, 空気調和・衛生工学会論文集, Vol. 42, No. 238, pp. 1-7, 2017.1
- 4.21) 松鷯さとみ, 上田華子, 二宮秀與: クール/ヒートピットにおける微生物汚染による室内空気汚染に関する研究 その2 ピット内建材の付着真菌に関する検討, 日本建築学会九州支部研究報, 2017.3
- 4.22) 神山幸弘, 山野勝次: 害虫とカビから住まいを守る, 彰国社, 1991
- 4.23) K. Sedlbauer: Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components, Dissertation University Stuttgart, 2001
- 4.24) 工藤裕太, 柳宇, 鍵直樹, 大澤元毅, 長谷川麻子, 松鷯悟実, 石松維世, 龍有二: 地中熱利用ピットにおける調湿材での微生物汚染の実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.665-666, 2011.8
- 4.25) 三田村輝章, 菊田道宣: 地中熱を利用した RC 外断熱住宅に関する研究 (第4報) 年間エネルギー消費量とピット温度の推移、浮遊真菌濃度の測定結果, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 177-180, 2013.9
- 4.26) 林宏幸, 千葉伸二, 加藤淳司: トビシマ式省エネ床下ピットの改良 - ピット内臭気の低減 -, とびしま技報, No.59, pp.69-72, 2010
- 4.27) 柳宇, 岡部優志, 吾孫子正和: クールチューブにおける微生物汚染の実態とその対策, 空気調和・衛生工学会論文集, 2019
- 4.28) 石松維世, 松鷯悟実, 龍有二: 地中熱利用ピットを有する建物における浮遊微生物の濃度変動と温湿度環境, 日本建築学会環境系論文集, Vol.77, No.676, pp.491-498, 2012.6

- 4.29) 尹奎英, 吉岡沙野, 青木貴均, 旗手康信, 若目田郁夫, 奥宮正哉: 環境共生型公共施設における省エネルギー手法の導入について その1 実測調査による省エネルギー手法の導入効果検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.1053-1054, 2011.8
- 4.30) 林徹夫, 椎木英理子, 野村幸司, 藤重俊徳, 長孝良, 福島逸成, 佐藤孝輔, 舘景士朗: 研修施設における環境配慮技術の計画と実証評価 (第4報) クールヒートトレンチと全熱交換器による外気負荷の削減効果, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.377-380, 2014.9
- 4.31) 松井朝美, 垂水弘夫, 鈴木啓泰, 高屋利行: ヒート&クールチューブシステム建築における地中採熱温度の解析 石川県七尾市の小規模診療所について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.591-592, 2007.8
- 4.32) 大和田淳, 大橋清文: 年間測定結果とシミュレーションによるクール/ヒートピットの熱特性評価, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.613-616, 2005.8
- 4.33) 木下雅広: クール/ヒートピットの形状と性能に関する研究, 平成 25 年度首都大学東京修士論文, 2014
- 4.34) 張晴原, 石原修: クールチューブの設計出口温度と冷却エネルギー量の検討 クールチューブによる室内熱環境の改善に関する研究 第2報, 日本建築学会計画系論文集, No.477, pp.11-18, 1995.11
- 4.35) 上田真也, 銚井修一: クールチューブの冷却効果に関する研究 管内表面が湿っている場合, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 計画系, pp.165-168, 1996.7
- 4.36) 孫元得, 田中英紀, 永井久也, 奥宮正哉, 中原信生: 愛知県児童総合センターにおけるアースチューブの冷却・採熱効果に関する研究 その7 冬季湿度実測と夏季の結露可能性検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.437-438, 1999.9
- 4.37) 高田暁, 中川浩, 松下敬幸: 実住宅に導入されたクールチューブの熱湿気性状の解析 複雑な形状を有する管の簡易モデルに基づく解析と管内空気質評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.147-148, 2011.8
- 4.38) スハス V. パタンカー: コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版, 1985
- 4.39) 村上周三: CFD による建築・都市の環境設計工学, 東京大学出版会, 2000
- 4.40) 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ, 日本建築学会, 2000
- 4.41) 花岡竜也: 九州地区における地中熱ヒートポンプシステム導入の可能性についての検討, 北九州市立大学国際環境工学部建築デザイン学科卒業論文, 2010.11
- 4.42) 白石靖幸, 塘田研仁: 流れ場の計算負荷を低減した CFD 解析による土壌熱交換システムの年間性能予測に関する研究 その1 提案手法の概要と事前解析による流れ場及び Ar 数の取得, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 , pp.1175-1176, 2015.9
- 4.43) 塘田研仁, 白石靖幸: 流れ場の計算負荷を低減した CFD 解析による土壌熱交換システムの年間性能予測に関する研究 その2 地下ピットを有する実在オフィスビルを

- 対象としたケーススタディ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 , pp.1177-1178, 2015.9
- 4.44) 安倍賢一, 長野靖尚, 近藤継男: はく離・再付着を伴う乱流場への適用を考慮した $k-\varepsilon$ モデル, 日本機械学会論文集 (B 編) , 58 巻, 554 号, pp.3003-3010, 1992.10
- 4.45) T. J. Craft, A. V. Gerasimov, H. Iacovides and B. E. Launder: Progress in the generalization of wall-function treatments, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 23, Issue 2, pp.148-160, 2002.4
- 4.46) 須賀一彦, Timothy J. Craft, Hector Iacovides: 汎用的な解析的壁関数モデル 第 1 報 滑面～粗面乱流に対応した流れ場のモデル, 日本機械学会論文集 (B 編) , 71 巻, 711 号, pp.2725-2733, 2005.11
- 4.47) 須賀一彦, Timothy J. Craft, Hector Iacovides: 汎用的な解析的壁関数モデル 第 2 報 滑面～粗面乱流に対応した強制対流温度場のモデル, 日本機械学会論文集 (B 編) , 71 巻, 711 号, pp.2734-2740, 2005.11
- 4.48) 徳村朋子, 大岡龍三, 高橋幹雄, 袴田喜夫, 松本敏勝, 小島直, 三谷剛, 斉藤道夫: ヒート&クールピットを利用した空調設備の省エネルギー性能に関する研究 学生寮における年間測定結果による検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.149-152, 2011.9
- 4.49) 勝田高司, 土屋喬雄: 室内空気分布の模型実験法に関する研究 第 1 報 - 室内空気分布の実用的相似則, 空気調和・衛生工学会論文集, No.17, pp.1-10, 1981.10
- 4.50) 牟田彬俊, 塘田研仁, 白石靖幸: 実測調査と流れ場の計算負荷を低減した非定常 CFD 解析による 8 年間の性能検証 土壌熱交換システムの長期運用に伴う予冷・予熱特性 (その 1) , 日本建築学会環境系論文集, Vol. 83, No. 750, pp. 711-718, 2018.8
- 4.51) 松嶋悟実, 石松維世, 龍有二: 地中熱利用ピットに敷設された調湿・脱臭材の微生物汚染に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 環境系, pp.469-472, 2011.3
- 4.52) 宮崎莞汰, 塘田研仁, 白石靖幸: 流れ場の計算負荷を低減した CFD 解析による土壌熱交換システムの年間性能予測に関する研究 その 3 年周期レベルの結露予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 , pp.571-572, 2016.8
- 4.53) 守屋寛之, 水出喜太郎, 副島正成, 鹿子島修: 環境調和型図書館の熱環境性能評価に関する研究 その 2 クールヒートチューブの性能評価と閲覧室温熱環境の評価, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.1411-1414, 2010.9
- 4.54) 寺西翔平, 趙旺熙, 岩本静男, 牧野由佳, 河野仁志, 加藤信介: 業務用ビルを対象とした結露リスク評価に関する研究 気密性能および断熱性能の違いによる結露リスク評価, 日本建築学会環境系論文集, Vol.80, No.718, pp.1133-1142, 2015.12
- 4.55) WUFI®-Bio 3.31, Online Help, Substrate Classes, Fraunhofer Institute for Building Physics

- 4.56) 柳宇, 池田耕一: 空調システムにおける微生物汚染の実態と対策に関する研究 第1報 微生物の生育環境と汚染実態, 日本建築学会環境系論文集, No.593, pp.49-56, 2005.7
- 4.57) 柳宇, 吾孫子正和, 菅野昇平, 松本英志, 岡部優志: アースチューブにおける微生物汚染の実態とその対策方法, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.29-32, 2013.9

第5章 逐次近似最適化によるシステム設計の最適化

5.1 背景及び目的

土壌熱交換システムを設計・運用する上での諸性能として省エネルギー効果、導入外気の空気質の確保、外気導入量、導入・運用コストが挙げられる。このうち、どの性能を重視するかは設計者の裁量に委ねられ、要求する性能に応じて設計・運用を行う必要がある。しかし、その性能は主に Table 5.1 に示す条件（設計変数）に支配されることになる。

Table 5.1 Influence factors to the system performance

| Shape | Operation |
|---|--|
| Depth of burial | Operating years |
| Thickness of wall and floor slab | Room temperature on the first floor |
| Path length | Outside air condition (Region) |
| Sectional area of the path | Conditions of outside air introduction |
| Route type | Time of outside air introduction |
| Heat transfer area of the system | Flow rate of the outside air |
| Thermal insulation performance on the first floor | Moisture absorbent |

この点に関して、設計変数の影響度などがシミュレーションベースではあるが検討された研究例は存在する。例えば、石川ら^{5.1)}はチューブ内の熱伝達、土壌の熱伝導を含めた三次元モデルを用い、経路長さ、埋設深さ、管径、外気導入量等、様々な設計変数を考慮したケーススタディを実施し、システム性能に対する影響について考察している。また、井上ら^{5.2)}は経路長さ、埋設深さなどの各因子がシステムの長期的な熱的特性に及ぼす影響を実験計画法に基づく数値解析により明らかにし、設計時の基礎資料となる情報の提示を行っている。更に、Kumar ら^{5.3)}はチューブ方式を対象に管の内径、管の熱伝導率、経路長さ、外気導入量、管の外径の 5 つを設計変数として、遺伝的アルゴリズムを用いた予冷効果を最大化する解の探索や設計変数の影響度について検討している。しかし、対象の地下ピット方式では、上述のチューブ方式のようにシステム性能に対する各設計変数の寄与の程度が明らかにされておらず、設計・運用時の指針なども提示されていないのが現状である。

本章では、逐次近似最適化による土壌熱交換システムの性能予測のメタモデルの構築や最適解の候補の提示による設計資料等の整備を目的としている。具体的には実在オフィスの地下ピットを対象に、サンプリング手法として第 4 章で提案した長期性能予測手法を用いた逐次近似最適化によりメタモデル（応答曲面）を構築する。更に、同モデルを評価関数とした最適化アルゴリズムによる最適解の探索、並びに各種性能に対する設計変数の影響度を分析する。

5.2 メタモデリングの概要

5.2.1 問題設定

Table 5.2 に本論文での最適化問題の対象となる目的関数、設計変数、制約条件を示す。

Table 5.2 Formulation of multiobjective optimization problem

| | | |
|--------------------|--|---|
| Objective function | $f_1(x)$ Max, $f_2(x)$ Min, $f_3(x)$ Max | $f_1(x)$: Reduction rate of sensible heat load for outdoor air-conditioning system [%], $f_2(x)$: Risk of dew condensation [%], $f_3(x)$: Flow rate of outside air [m ³ /h] |
| Design variable | $x = [x_1, x_2]$ | x_1 : Average wind speed in the system [m/s], x_2 : Thermal insulation thickness on the first floor [m] |
| Limiting condition | $0 < x_1 \leq 1.5, 0 \leq x_2 \leq 0.1 \Delta x_1 = \Delta x_2 = 0.01$ | |

本章における目的関数は、 $f_1(x)$ ：システムの導入による外調機の顕熱処理熱量の削減率 [%]、 $f_2(x)$ ：結露リスクⁱ [%]、 $f_3(x)$ ：外気導入量 [m³/h]の三種である。設計変数は、メタモデリングの初期段階であることを鑑み、 x_1 ：経路の代表表面での面風速[m/s]、 x_2 ：1F 床の断熱材厚さ[m]の 2 種と限定した上で最適化問題を定義した。解析結果をもとに $f_1(x)$ と $f_2(x)$ は次の Eq. 5.1 及び Eq. 5.2 により算出しメタモデリングを実施する。 $f_3(x)$ は Eq. 5.3 の様に x_1 の関数として定義するため、メタモデリングの対象から除外している。

$$f_1(x) = \frac{Q_d - Q_p}{Q_d} \times 100 \quad 5.1$$

$$f_2(x) = \frac{\sum t_{r,i} A_i}{\sum A_i} \quad 5.2$$

$$f_3(x) = 3,600 \cdot A \cdot x_2 \quad 5.3$$

$$t_{r,i} = \frac{t_{c,i}}{t_a} \times 100 \quad 5.4$$

Eq. 5.1 の Q_d は地下ピット経由なしの場合の年間外調機処理熱量[GJ]、 Q_p は地下ピットを経由した場合の年間外調機処理熱量[GJ]である。Eq. 5.2 の A_i はコンクリート表面の面要素 i の面積[m²]、 $t_{r,i}$ は面要素 i における結露時間割合[%]であり、Eq. 5.4 により算出する。Eq. 5.3 の $t_{c,i}$ は面要素 i で結露していた時間数[h]、 t_a は解析期間の時間数(=8,760) [h]を表す。Eq. 5.3 の A は外気導入経路の代表表面の面積(=3.81) [m²]である。

5.2.2 メタモデリングの流れ

本論文で実施するメタモデリング及び最適化の流れを Figure 5.1 に示す。

ⁱ 導入外気の空気質の確保にはシステム内での微生物の増殖リスクを低減すべきであるが、微生物の増殖には結露発生の有無や結露の時間が強く影響を受けるものと推察されるため、結露リスクを目的関数として扱っている。

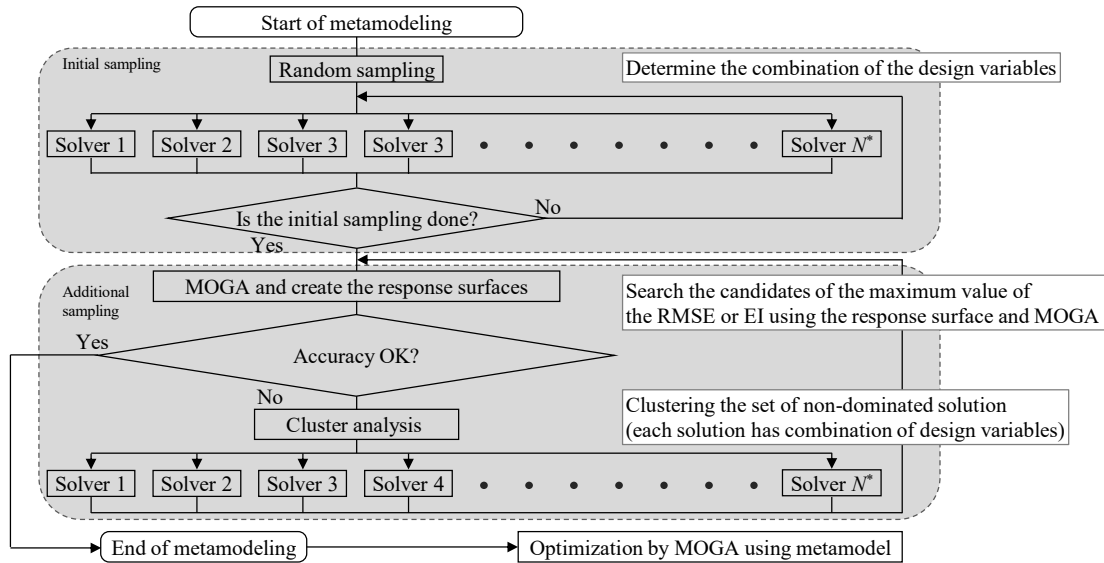


Figure 5.1 Flow chart of metamodeling and optimization *N is the maximum number of solvers

流れとしてはメタモデルを作成し、このモデルを利用して最適化を行う（逐次近似最適化）。メタモデリングでは目的関数の大まかな近似を行う初期サンプリング、初期サンプリングの近似結果から徐々に近似精度を向上させていく追加サンプリングの段階に分けられ、その後、最適化アルゴリズムの一つである Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA)を用いて、メタモデルを評価関数とした最適解の候補を探索する。

1) 初期サンプリング

まず、初期サンプリング時の設計変数の組み合わせは Random sampling により決定する。初期サンプリング数は 20 とし、サンプリング時間を短縮するために複数のソルバーを使用し、最大で並列数 $2 \times$ ソルバー数 10 の並列・分散解析を行う。一台の PC でソルバー 1 つもしくは 2 つを使用し、最大 5 台の PC で CFD を実施した。尚、後述する追加サンプリングでも並列・分散解析を行っているが、使用できる PC、ライセンスなどの状況が変化するため、分散解析の数が 4～10 と幅がある。

2) 逐次近似最適化（追加サンプリング）

初期・追加サンプリング結果から作成するメタモデル（目的関数の近似モデル）は Kriging による応答曲面で表現するⁱ。メタモデルの精度向上を目的とした追加サンプリング点の探索は、最適解の探索時と同様に MOGA によるメタモデルの RMSEⁱⁱの最小化と Efficient Global Optimization (EGO)の併用手法とする。

ⁱ 作成する応答曲面は、i) 目的関数について、ii) 目的関数の近似誤差(RMSE)について、iii) 大域解、局所解付近での追加サンプリング実施時の期待値(EI)についての 3 種であり、目的関数ごとに応答曲面を作成する。本論文では、設計変数 2 種 \times 目的関数 3 種であるため、 $f_3(x)$ を除き、計 6 つの応答曲面を作成した。

ⁱⁱ 二乗平均平方根誤差(RMSE)は応答曲面の近似誤差を意味する。EI とは異なり、応答曲面全体の局所的な精度について評価できる。

近似の流れとしては、先に目的関数の RMSE の応答曲面と MOGA により、大域解、局所解のみならず、メタモデル全体で精度の低い点を探索し、サンプリングを実施して精度向上を図る。その後、目的関数の EI の応答曲面と MOGA を用いて、 EI を最大化する設計変数を探索し、大域解、局所解付近の近似精度の向上を図る。この追加サンプリングでも初期サンプリング同様に分散処理を実施する。MOGA から出力される個体（評価値（RMSE・ EI ）及びこれに対応する各設計変数の組み合わせ: Figure 5.2）は MOGA の個体数分（今回は 512）だけ存在する。

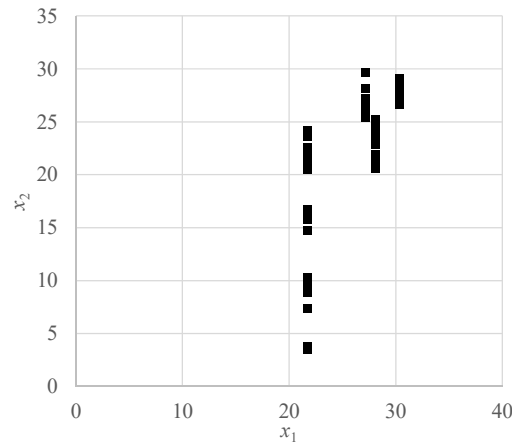


Figure 5.2 Candidate solutions calculated by MOGA and response surface

ここでは、出力された設計変数の組み合わせをクラスター分析 (Figure 5.5)にかけ、各クラス内で RMSE や EI を最大化する設計変数の組み合わせを各ソルバーに割り当て、追加サンプリングを実施した。

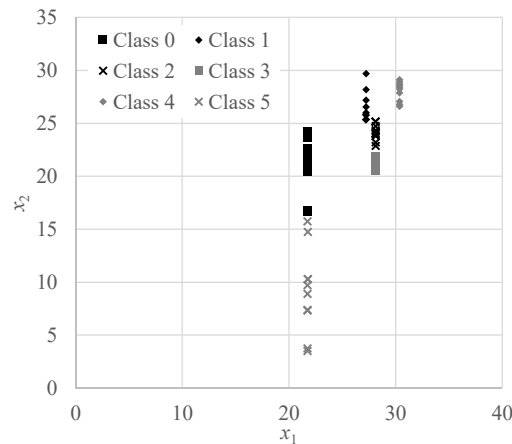


Figure 5.3 Candidate solutions divided into six classes by k-means clustering

クラスター分析には k-means clustering (k-means)を用いた。非階層型のクラスター分析手法である k-means は、クラスタリング用のデータが円状にあることが前提である。しかし、MOGA で出力される解の候補のデータは、この前提から外れてしまうことが多く、本来、MOGA と k-means の相性は良好ではなく、階層型のクラスター分析が望ましいが、k-means

を利用することによる最適化結果への影響は無い。これは、k-means により解の候補を分類し、そこから各ソルバーに割り当てる設計変数の組み合わせを決定し、逐次近似最適化を行い、再び MOGA により解の候補を探索し、k-means によりクラスタリングを行う・・・と回数をこなせば分類手法による応答局面の精度などの差は無くなっていくためであり、MOGA の解のクラスタリングに k-means を利用することは実用上問題ない。尚、k-means は Python の機械学習ライブラリである scikit-learn^{5,5)} の sklearn.cluster.KMeans クラスを利用した。

3) 最適解の探索

最後にメタモデルの精度向上が期待できなくなった時点で、メタモデルについての MOGA を実施し、最適解の探索等を行う。

5.3 CFD 概要

5.3.1 対象建物及び解析モデル

北九州市に立地する地上 5 階建ての中規模オフィスビルの土壌熱交換システム（地下ピット方式）を対象とする。屋外に突出した流入口より地下ピット内に導入された外気は、地下ピットの流出口までの約 70m の間、土壌（コンクリート）との熱交換を行う。Figure 5.4 に本論文で使用した CFD のモデルを示す。

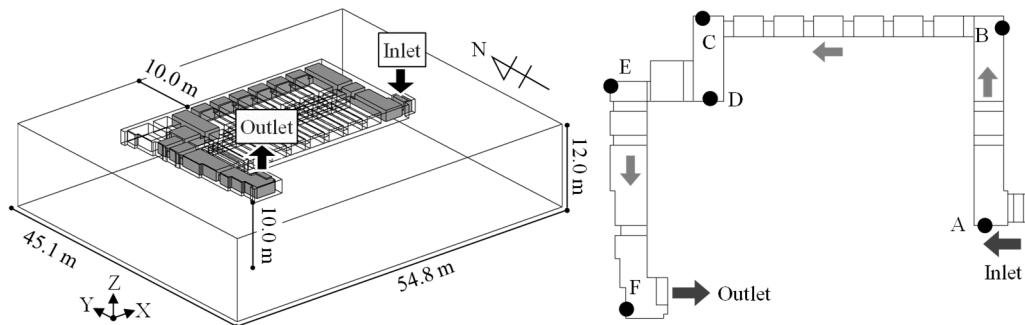


Figure 5.4 Analysis model of the system and place of respective point

図中の灰色の部位が外気導入経路の流体部（空気）であり、その周囲にコンクリートの躯体、更にその周りの 10m まで土壌が存在する。解析は空気の温度・湿度輸送、地下ピット表面の対流・放射熱伝達、地下ピット表面の仮想レイヤでの結露水の凝縮・蒸発及びコンクリート・土壌の熱伝導を連成させた三次元非定常解析である。

5.3.2 非連成解析の概要

前述の通り、サンプリングには第 4 章で開発した長期性能予測手法を用いており、従来の CFD と比較して、大幅にサンプリング時間を短縮している。非連成解析により年単位での性

能予測（サンプリング）が可能となり、システム性能の最適化が現実的なものとなる。
Table 5.3ⁱに非連成解析（年間性能予測）の CFD の解析条件を示す。

Table 5.3 Analysis conditions for uncoupled simulation

| | | |
|--|--------------------------|---|
| Calculation period | | January 1~December 31 (A preliminary analysis was performed for the 1 year prior to the analysis year.) |
| Time interval | | 3,600 s (when switching flow field: 1 s ~) |
| Domain | | 54.8 m (X) × 45.1 m (Y) × 12.0 m (Z) |
| Mesh | | 213 (X) × 166 (Y) × 44 (Z) = 1,555,752 |
| Turbulence model | | Low Re-type k - ε model (Abe-Nagano-Kondo model) |
| Scheme for advection term | | Momentum and Temperature: QUICK, Humidity: 1 st order upwind scheme |
| Initial temperature of under-ground and air tunnel system elements | | Results of the one-dimensional heat conduction analysis |
| Boundary conditions | Inlet of air tunnel | T_{in} : Outside air temperature ^{5,4)} [°C], x_{in} : Outside air absolute humidity ^{5,4)} [kg/kg(DA)] U_{in} : Inlet velocity [m/s] (depend on design variables), $k_{in} = 3/2(U_{in} \times 0.05)^2$, $\varepsilon_{in} = C_{\mu}^{3/4} \cdot k_{in}^{3/2}/l_{in}$ |
| | Outlet of air tunnel | Free slip |
| | Wall in air tunnel | Temperature: Analytical wall function (AWF), Humidity: Lewis analogy |
| | Floor of the first floor | From November to March: 22 °C, From June to September: 26 °C, Intermediate period: Linear interpolation from winter and summer temperatures, Overall heat transfer coefficient: 9.0 W/(m ² ·K) |
| | Ground surface | Temperature: Sol air temperature ^{5,4)} , Convective heat transfer coefficient: 17.9 W/(m ² ·K) |
| | Upper side of air tunnel | Adiabatic |
| Lateral and bottom | | |
| Convergence condition | | Temperature transport equation and Pressure correction equation: 1×10 ⁻⁴ Momentum, k and ε transport equation: 1×10 ⁻⁶ Humidity transport equation: 1×10 ⁻⁷ |

U_{in} : Inlet wind speed [m/s], l_{in} : Length scale (=1.2) [m], k_{in} : Inlet turbulence energy [m²/s²], ε_{in} : Dissipation rate of k_{in} [m²/s³],
 C_{μ} : Model constant (=0.09) [-]

非連成解析では事前に流れ場のみの解析（等温・定常）を行い、流れ場を取得する。そして、取得した流れ場を解析中に適宜読み込むことで計算負荷の低減を図る。流れ場は、Table 5.3 の流れに関する境界条件を設定した上で、初期・追加サンプリングで設定された設計変数 x_1 に応じて流入面での流速を設定した定常解析により取得した。非連成解析で使用する流れ場は地下ピット経由の外気導入あり（ x_1 の外気導入量）と外気導入無しの2種とした。外気導入のスケジュールは、冬季（11/1～3/31）と夏季（6/1～9/30）は9:00～18:00の時間帯を地下ピット経由の外気導入ありとし、この時間帯は設計変数 x_1 の定常解の流れ場を使用した。また、それ以外の時間帯、期間は地下ピット経由の外気導入無しとして別途取得した静穏な流れ場を使用した。外気導入の時間帯には露点温度制御を導入し、結露発生を抑制を図っている。第 4 章の露点温度制御では外気導入の判断を 4h 毎としていたが、本解析では 1h 毎に行っている。非連成解析でのモデルでは、 x_2 の値に応じて断熱材厚さが変化するため、適宜モデルを修正し、解析を行った。尚、コンクリートの表面要素での結露判定方法及び面要素毎の仮想のレイヤに蓄積する結露水の取扱については第 4 章と同様としており、コンクリート内部の水分移動は考慮していない。

ⁱ 助走計算では設計変数 $x_1=0.75$ 、 $x_2=0.05$ の条件で 1 年間解析を行った。

5.4 メタモデリングの過程

5.4.1 初期サンプリング結果

ランダムサンプリングによる設計変数の組み合わせを初期サンプリング結果と共に Table 5.4 に示す。また、初期サンプリング終了段階でのメタモデルを Figure 5.5 に示す。

Table 5.4 Combinations of design variables and results of initial sampling

| No. | x_1 | x_2 | $f_1(x)$ | $f_2(x)$ | $f_3(x)$ |
|-----|-------|-------|----------|----------|----------|
| 1 | 1.41 | 0.05 | 10.8 | 0.57 | 19,329 |
| 2 | 0.18 | 0.08 | 34.1 | 0.84 | 2,468 |
| 3 | 0.48 | 0.00 | 31.7 | 0.06 | 6,580 |
| 4 | 1.04 | 0.03 | 14.3 | 0.92 | 14,257 |
| 5 | 1.27 | 0.04 | 11.9 | 0.39 | 17,410 |
| 6 | 1.10 | 0.07 | 12.6 | 1.02 | 15,080 |
| 7 | 1.07 | 0.01 | 16.9 | 0.03 | 14,668 |
| 8 | 1.44 | 0.02 | 12.7 | 0.06 | 19,741 |
| 9 | 0.53 | 0.05 | 21.0 | 0.97 | 7,266 |
| 10 | 0.37 | 0.02 | 28.1 | 0.34 | 5,072 |

| No. | x_1 | x_2 | $f_1(x)$ | $f_2(x)$ | $f_3(x)$ |
|-----|-------|-------|----------|----------|----------|
| 11 | 0.73 | 0.00 | 25.1 | 0.08 | 10,007 |
| 12 | 0.45 | 0.06 | 22.6 | 0.63 | 6,169 |
| 13 | 0.92 | 0.08 | 14.2 | 1.15 | 12,612 |
| 14 | 0.13 | 0.08 | 38.4 | 1.11 | 1,782 |
| 15 | 0.23 | 0.08 | 30.8 | 0.66 | 3,153 |
| 16 | 0.83 | 0.00 | 23.1 | 0.07 | 11,378 |
| 17 | 0.14 | 0.01 | 45.1 | 0.12 | 1,919 |
| 18 | 0.96 | 0.02 | 15.7 | 0.53 | 13,160 |
| 19 | 0.59 | 0.10 | 18.3 | 0.16 | 8,088 |
| 20 | 0.23 | 0.04 | 32.8 | 0.37 | 3,153 |

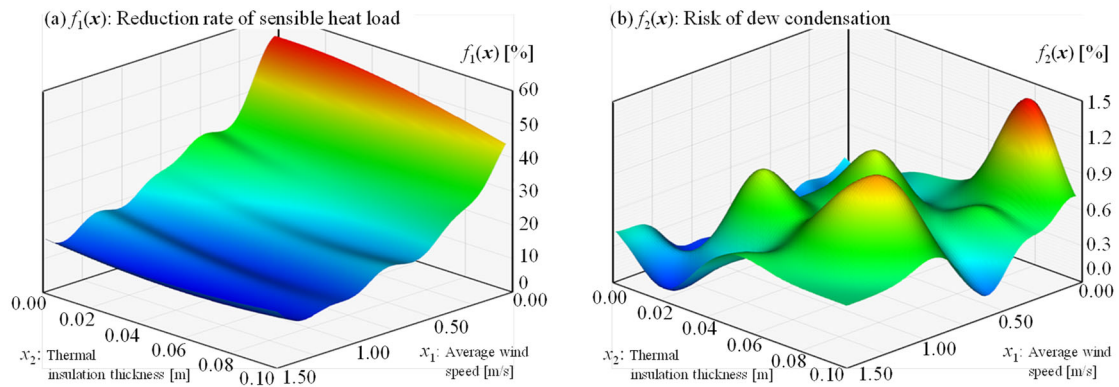


Figure 5.5 Metamodel at the end the of initial sampling: (a) $f_1(x)$; (b) $f_2(x)$

現段階では $f_2(x)$ が多峰性に富み、非線形性が強いことから、メタモデルの精度改善のための追加サンプリング回数が増える可能性が示唆される。これらの結果より、追加サンプリングを実施する。

5.4.2 RMSE の改善 (追加サンプリング)

初期サンプリング後の応答曲面の近似精度として Figure 5.6 (a) に $f_2(x)$ の RMSE に関する応答局面を示す。

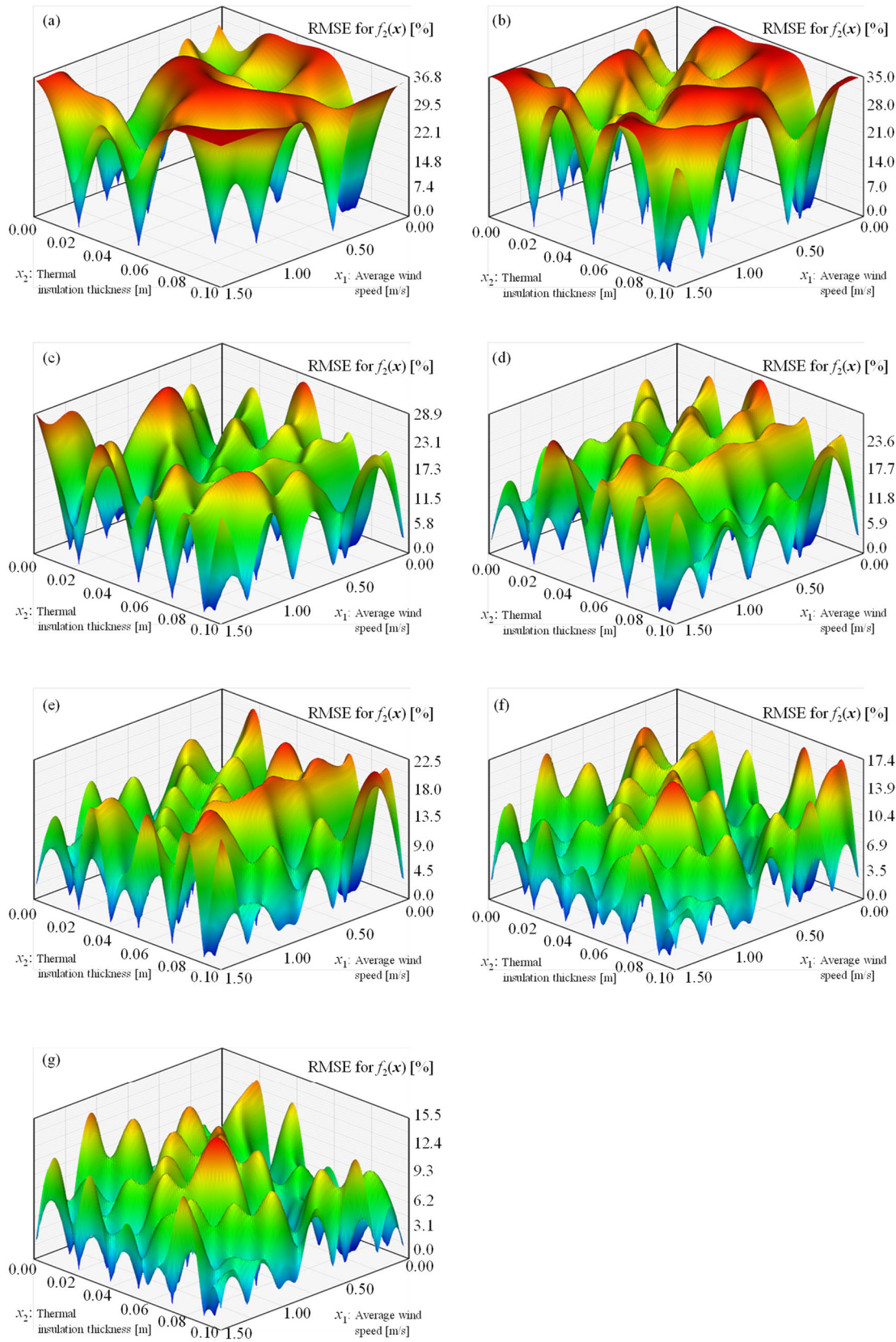


Figure 5.6 Process of the Metamodeling (reducing RMSE for $f_2(x)$): (a) End of initial sampling; (b) Cycle 1; (c) Cycle 2; (d) Cycle 3; (e) Cycle 4; (f) Cycle 5; (g) Cycle 6

尚、 $f_1(x)$ の近似精度については初期サンプリング時点で概ね良好であり、RMSE や EI に関する応答曲面を図示する必要性が低いことから Figure 5.6 や Figure 5.7 では省略している。まず、 $f_1(x)$ の応答曲面及び Figure 5.6 (a)の $f_2(x)$ の応答曲面と MOGA により、 $f_1(x)$ 及び $f_2(x)$ の RMSE を最大化する設計変数の組み合わせを探索する。そして、MOGA の結果の個体をクラスター分析にかけ、各ソルバーに割り当てる設計変数の組み合わせを決定し、追加サンプリングを実施する。1 回目の追加サンプリングの設計変数の組み合わせとその実施結果は Table 5.5 の Cycle 1 に示す通りである。

Table 5.5 Results of the additional sampling for reducing RMSE

| Cycle | No. | x_1 | x_2 | $f_1(x)$ | $f_2(x)$ | $f_3(x)$ | RMSE for $f_1(x)$ | RMSE for $f_2(x)$ |
|-------|-----|-------|-------|----------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| 1 | 21 | 0.36 | 0.09 | 24.4 | 0.02 | 4,935 | 2.7 % | 29.4 % |
| | 22 | 1.27 | 0.10 | 10.9 | 0.03 | 17,410 | 10.2 % | 36.8 % |
| | 23 | 0.03 | 0.00 | 66.7 | 0.07 | 411 | 10.1 % | 32.1 % |
| | 24 | 0.61 | 0.03 | 20.4 | 0.52 | 8,362 | 1.8 % | 35.5 % |
| | 25 | 1.40 | 0.09 | 10.4 | 1.19 | 19,192 | 7.2 % | 36.8 % |
| | 26 | 0.83 | 0.04 | 16.2 | 0.63 | 11,378 | 6.1 % | 35.9 % |
| | 27 | 1.02 | 0.05 | 13.7 | 0.72 | 13,983 | 1.1 % | 34.6 % |
| | 28 | 1.50 | 0.09 | 9.9 | 1.13 | 20,563 | 13.7 % | 36.8 % |
| 2 | 29 | 0.03 | 0.10 | 50.5 | 1.38 | 411 | 5.1 % | 35.0 % |
| | 30 | 0.09 | 0.06 | 43.6 | 0.29 | 1,234 | 1.7 % | 35.0 % |
| | 31 | 0.08 | 0.03 | 47.7 | 0.07 | 1,097 | 2.3 % | 34.1 % |
| | 32 | 0.61 | 0.08 | 18.5 | 1.45 | 8,362 | 1.0 % | 34.8 % |
| | 33 | 0.78 | 0.06 | 16.2 | 0.94 | 10,693 | 0.7 % | 34.8 % |
| | 34 | 0.91 | 0.10 | 13.8 | 0.05 | 12,475 | 1.9 % | 34.9 % |
| | 35 | 1.44 | 0.07 | 10.4 | 0.85 | 19,741 | 0.6 % | 35.0 % |
| | 36 | 1.36 | 0.01 | 14.4 | 0.04 | 18,644 | 1.9 % | 32.7 % |
| 3 | 37 | 0.76 | 0.09 | 15.8 | 0.06 | 10,419 | 0.3 % | 23.1 % |
| | 38 | 1.14 | 0.09 | 11.9 | 0.03 | 15,628 | 0.5 % | 25.3 % |
| | 39 | 1.21 | 0.02 | 14.4 | 0.08 | 16,588 | 0.4 % | 23.3 % |
| | 40 | 0.66 | 0.01 | 22.3 | 0.25 | 9,048 | 0.2 % | 25.6 % |
| | 41 | 1.23 | 0.00 | 18.7 | 0.02 | 16,862 | 0.9 % | 26.7 % |
| | 42 | 1.50 | 0.00 | 16.3 | 0.01 | 20,563 | 5.5 % | 29.4 % |
| 4 | 43 | 0.29 | 0.00 | 39.7 | 0.09 | 3,976 | 0.7 % | 23.6 % |
| | 44 | 1.24 | 0.06 | 11.7 | 0.79 | 16,999 | 0.2 % | 27.1 % |
| | 45 | 0.03 | 0.05 | 54.0 | 0.12 | 411 | 0.5 % | 27.6 % |
| | 46 | 0.40 | 0.04 | 25.1 | 0.62 | 5,484 | 0.2 % | 22.2 % |
| | 47 | 1.48 | 0.04 | 10.8 | 0.30 | 20,289 | 0.4 % | 26.4 % |
| | 48 | 0.78 | 0.02 | 18.1 | 0.29 | 10,693 | 0.1 % | 21.5 % |
| | 49 | 1.00 | 0.10 | 13.0 | 0.04 | 13,709 | 0.1 % | 13.1 % |
| | 50 | 0.01 | 0.03 | 60.6 | 0.22 | 137 | 0.6 % | 12.2 % |
| 5 | 51 | 0.01 | 0.01 | 65.7 | 0.35 | 137 | 0.4 % | 17.1 % |
| | 52 | 0.26 | 0.05 | 30.4 | 0.65 | 3,564 | 0.1 % | 20.9 % |
| | 53 | 0.27 | 0.07 | 29.0 | 0.74 | 3,701 | 0.1 % | 20.6 % |
| | 54 | 0.23 | 0.10 | 30.1 | 0.09 | 3,153 | 1.2 % | 22.9 % |
| | 55 | 0.51 | 0.07 | 20.8 | 1.11 | 6,991 | 0.1 % | 19.8 % |
| | 56 | 0.77 | 0.07 | 16.1 | 1.09 | 10,556 | 0.1 % | 20.5 % |
| | 57 | 1.36 | 0.03 | 12.8 | 0.13 | 18,644 | 0.2 % | 18.6 % |
| | 58 | 1.50 | 0.06 | 10.2 | 0.70 | 20,563 | 0.3 % | 21.4 % |
| | 59 | 1.28 | 0.08 | 11.2 | 1.09 | 17,547 | 0.2 % | 21.1 % |
| 6 | 60 | 1.50 | 0.10 | 9.7 | 0.22 | 20,563 | 0.8 % | 22.9 % |
| | 61 | 0.43 | 0.01 | 28.4 | 0.19 | 5,895 | 0.3 % | 15.8 % |
| | 62 | 0.38 | 0.03 | 26.5 | 0.64 | 5,209 | 0.1 % | 13.7 % |
| | 63 | 0.03 | 0.07 | 52.4 | 1.19 | 411 | 0.8 % | 16.1 % |
| | 64 | 0.03 | 0.09 | 51.1 | 1.55 | 411 | 0.8 % | 16.6 % |

そして、初期サンプリング結果に追加サンプリング結果を追加し、応答曲面を作成し、応答曲面の精度を確認した。1 回目の追加サンプリング結果を反映させた $f_2(x)$ の RMSE に関するの応答曲面は Figure 5.6 (b) の通りである。Figure 5.6 (b) では Table 5.5 のサンプリングナンバー No. 21 ~ 28 までの結果を反映させているため追加サンプリング点周囲の RMSE が低減している。このように僅かではあるが、初期サンプリング後よりも RMSE が低下した空間が散見される。これを繰り返していった結果、6 回目の追加サンプリング後に得た $f_2(x)$ の RMSE に関するの応答曲面が Figure 5.6 (g) である。

Figure 5.6 (a) と Figure 5.6 (g) を比較すると追加サンプリングにより RMSE が全体的に低下した事がわかる。ただし、6 回の追加サンプリング後でも未だ精度改善の余地は残っている。しかし、最大でも RMSE が 15% 程度であることやこれ以降の RMSE の精度改善を試みるとサンプリング数が膨大となるためこの時点で RMSE の応答曲面を用いた追加サンプリングを終了とした。

5.4.3 EI の改善 (追加サンプリング)

EI の改善は RMSE の追加サンプリング段階終了後のメタモデルの EI の応答曲面 (Figure 5.7 (a) ($f_2(x)$ のみ示す)) を利用する。

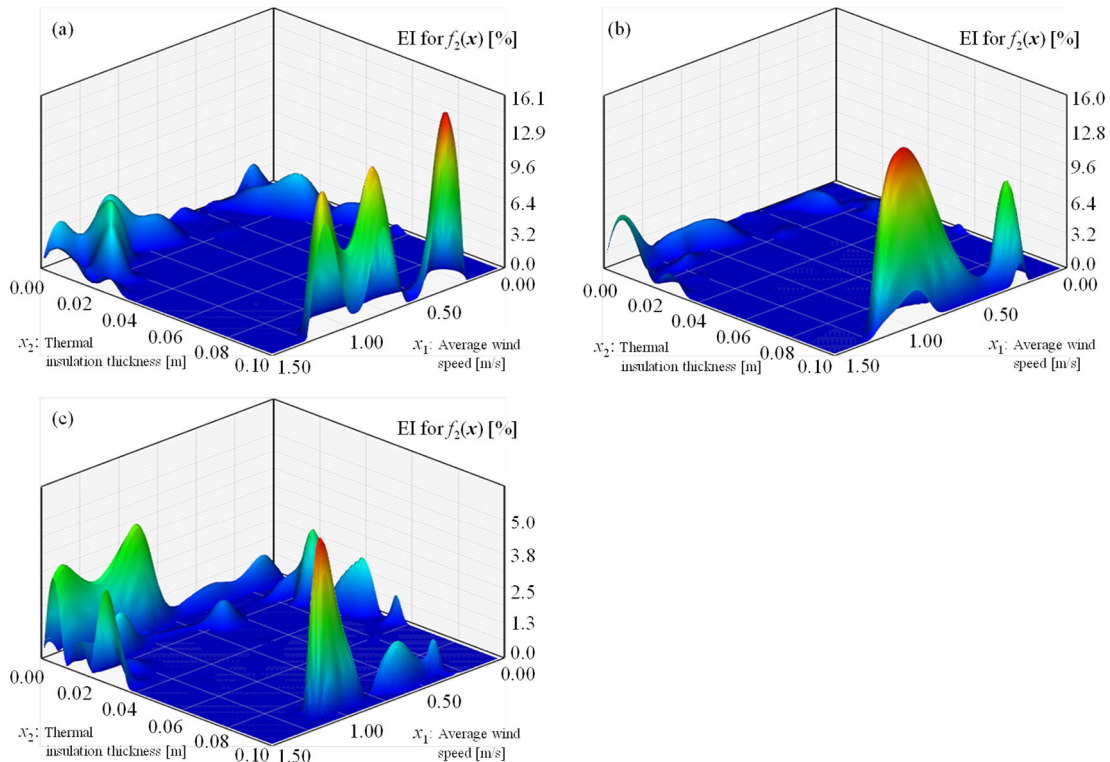


Figure 5.7 Process of the Metamodeling (reducing EI for $f_2(x)$):

(a) End of additional sampling Cycle 6; (b) Cycle 7; (c) End of additional sampling Cycle 8

改善の流れは RMSE の場合と同様である。EI の応答局面と MOGA を利用して EI が最大となる追加サンプル点の探索により得た設計変数の組み合わせ及びサンプリング結果を Table 5.6 に示す。

Table 5.6 Results of the additional sampling for reducing EI

| Cycle | No. | x_1 | x_2 | $f_1(x)$ | $f_2(x)$ | $f_3(x)$ | EI for $f_1(x)$ | EI for $f_2(x)$ |
|-------|-----|-------|-------|----------|----------|----------|-----------------|-----------------|
| 7 | 65 | 0.14 | 0.00 | 50.8 | 0.06 | 1,919 | 0.0 % | 2.3 % |
| | 66 | 0.19 | 0.02 | 37.8 | 0.06 | 2,605 | 0.0 % | 3.2 % |
| | 67 | 0.33 | 0.10 | 25.3 | 0.05 | 4,524 | 0.0 % | 13.5 % |
| | 68 | 0.77 | 0.10 | 15.5 | 0.12 | 10,556 | 0.0 % | 5.8 % |
| | 69 | 1.12 | 0.10 | 11.9 | 0.04 | 15,354 | 0.0 % | 8.0 % |
| | 70 | 1.03 | 0.00 | 20.6 | 0.03 | 14,120 | 0.0 % | 4.3 % |
| | 71 | 1.20 | 0.01 | 15.8 | 0.04 | 16,451 | 0.0 % | 5.6 % |
| | 72 | 1.29 | 0.02 | 13.8 | 0.07 | 17,684 | 0.0 % | 3.1 % |
| 8 | 73 | 0.31 | 0.01 | 33.4 | 0.18 | 4,250 | 0.0 % | 0.9 % |
| | 74 | 0.19 | 0.03 | 36.5 | 0.14 | 2,605 | 0.0 % | 0.2 % |
| | 75 | 0.89 | 0.01 | 19.1 | 0.05 | 12,201 | 0.0 % | 1.2 % |
| | 76 | 1.39 | 0.00 | 17.2 | 0.01 | 19,055 | 0.0 % | 4.4 % |
| | 77 | 1.50 | 0.01 | 13.4 | 0.05 | 20,563 | 0.0 % | 5.5 % |
| | 78 | 0.29 | 0.095 | 27.1 | 0.03 | 3,976 | 0.0 % | 8.7 % |
| | 79 | 0.37 | 0.095 | 23.9 | 0.03 | 5,072 | 0.0 % | 4.3 % |
| | 80 | 0.75 | 0.095 | 15.8 | 0.12 | 10,282 | 0.0 % | 8.6 % |
| | 81 | 0.98 | 0.095 | 13.2 | 0.03 | 13,435 | 0.0 % | 15.3 % |
| | 82 | 1.10 | 0.095 | 12.1 | 0.04 | 15,080 | 0.0 % | 11.2 % |

また、追加サンプリングの結果を反映させた $f_2(x)$ の EI の応答曲面は Figure 5.7 (c) の通りである。Figure 5.7 (a) と比較して大域解となり得る解空間での精度が向上していることが分かる。この段階で、大域解付近では後述の最適解の探索段階では実用的な精度を有していると判断し、2 回の追加サンプリングで EI の改善を終了とした。

5.5 メタモデリングの結果及び最適解の探索

5.5.1 応答曲面・設計変数の寄与率

Figure 5.8 に $f_1(x)$ と $f_2(x)$ に対する設計変数の寄与率を示す。

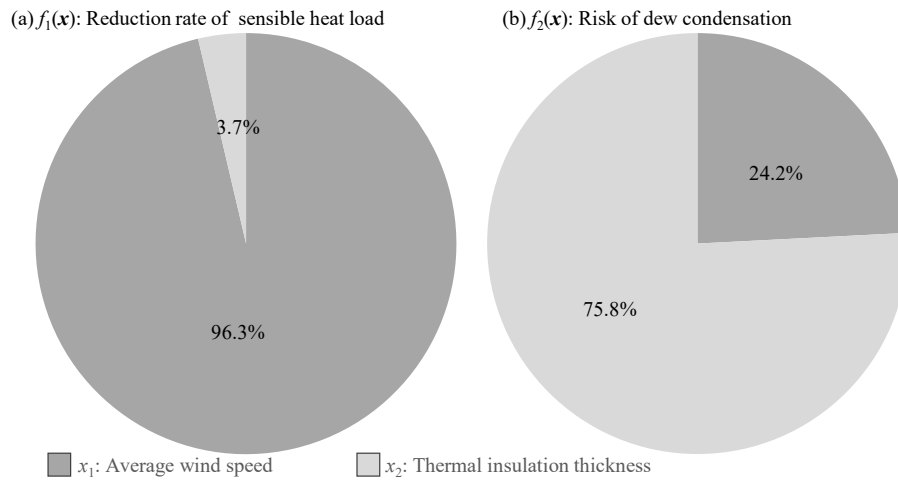


Figure 5.8 Contribution ratio of the Design variables to the Objective function: (a) $f_1(x)$; (b) $f_2(x)$

寄与率の分母は全設計変数を最小から最大とした時の応答曲面の変化の分散、分子が各設計変数を最小から最大とした時の応答曲面の変化の分散として算出している。尚、設計変数の制約条件の幅により寄与率は変化する。また、 $f_3(x)$ は Eq. 5.4 に示した通り、 x_1 の関数であるため、寄与率や応答曲面は作成しているが、図示を省略する。Figure 5.8 (a)より $f_1(x)$ はほぼ外気導入量で決定される。しかし、Figure 5.8 (b)の $f_2(x)$ の寄与率を見ると、 x_1 の寄与率は 24.2%、 x_2 が 75.8%である。 x_2 (断熱材厚さ) が効く理由は、 x_1 のある点で x_2 の値を動かしたときの変化量が x_2 のその変化量よりも大きいためである。 $f_1(x)$ は x_1 が支配的ではあるが、 $f_2(x)$ は x_2 の値に応じて大きく変化するため、性能を検討する際には、どちらの設計変数も軽視はできないと言える。

$f_1(x)$ と $f_2(x)$ の応答曲面を Figure 5.9 及び Figure 5.10 に示す。

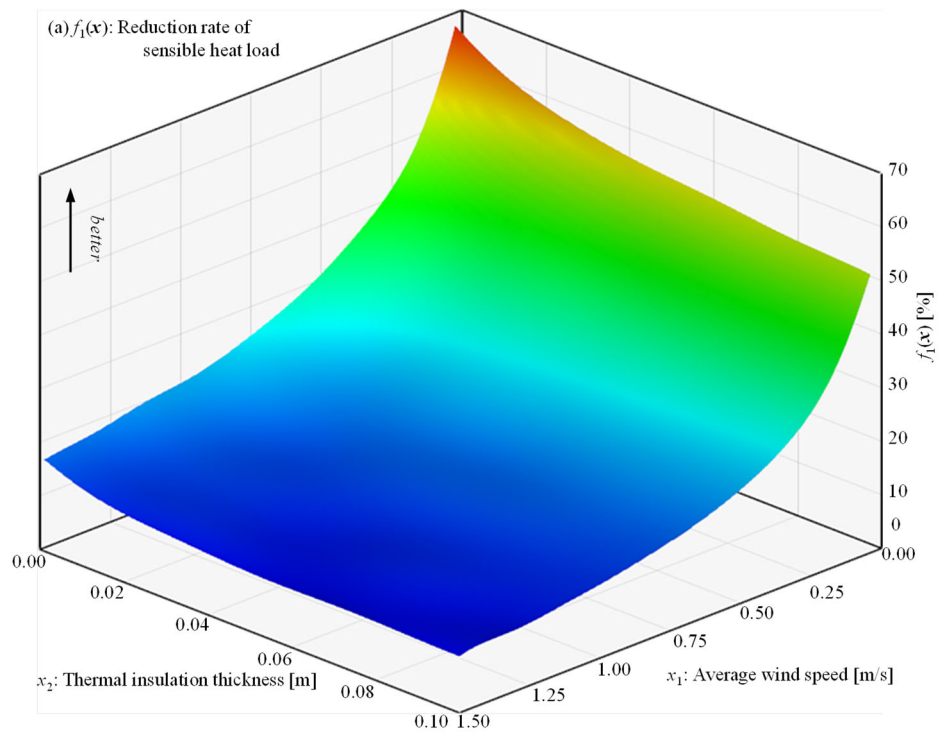


Figure 5.9 Metamodel: $f_1(x)$ Reduction rate of sensible heat load for outdoor air-conditioning system

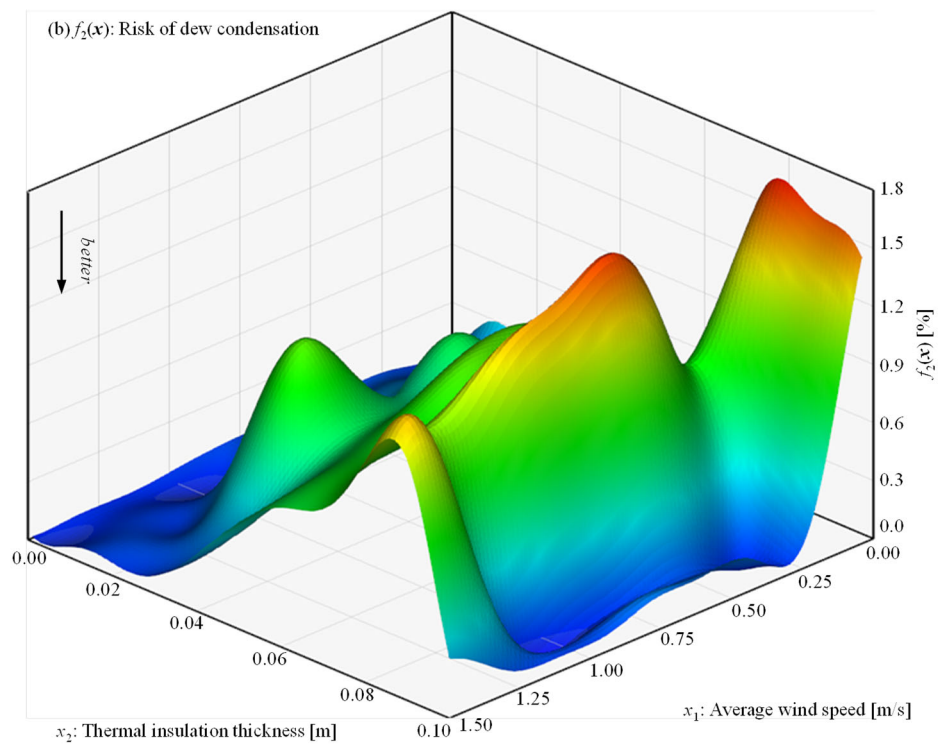


Figure 5.10 Metamodel: $f_2(x)$ Risk of dew condensation

まず、Figure 5.9 より外気導入量と 1F 床の断熱性能が低いほど、システムの導入による省エネ効果が高い。これは、外気導入量が小さい場合、地下ピットの出口温度が外調機の吹き

出し設定温度に近くなり、また、断熱性能が低いと建物 1F 床からの貫流熱をシステムで回収（システム性能を上げる方向に働く）しているためである。一方で Figure 5.10 の結露リスクは多峰性に富む非線形性の強い応答曲面であり、大域解は $x_1=1.46\text{m/s}$ 、 $x_2=0.00\text{m}$ にあるが、 $x_1=0.35\text{m/s}$ 、 $x_2=0.09\text{m}$ など、複数の局所解が存在している。 $x_2=0.08\text{m}$ の場合かつ $x_1=0.01$ 、 0.60 、 0.95 、 1.42m/s 付近では $f_2(x)$ の値が高い。特に、 $x_2=0.08\text{m}$ の比較的 $f_2(x)$ の値が大きい稜線から x_2 に $+0.01\text{m}$ ほど行くとすぐに局所解に到達することが見て取れる。従って、設計変数が僅かに異なるだけで結露リスクは大きくなるため、設計変数の選択は極めて慎重にする必要があると考えられる。尚、結露リスクが非線形な応答曲面を示した理由としては、露点温度制御が機能するためと推察される。露点温度制御時は前述したとおり、1h おきに外気導入の判断を行っているが、各設計変数が僅かに変化することで変化前は制御が機能していない時間帯に制御が機能して外気導入を行って結露し、その後露点温度制御が機能し続けてしまうといったことで非線形性が強まったものと考えられる。

ただし、この $f_2(x)$ の応答曲面は露点温度制御のサンプリング点（代表点）が変化するだけで形状が大きく異なることが予想されるため、普遍的に用いることができるものではない。従って、シミュレーションのみならず、現実のシステムへの適用も考慮に入れた露点温度制御用の表面温度のサンプリング点の決定手法の提案を行い、シミュレーション実施者や設計者が、サンプリング点を恣意的に決定することによる応答曲面の形状の変化（ゆらぎ）を抑えた上で、多数の設計変数を考慮に入れた普遍的に用いることのできる応答曲面の提示を今後の検討課題と位置づけている。

5.5.2 最適解の分布

Figure 5.11 に MOGA で出力された個体の三次元最適解分布を、Figure 5.12 に二次元最適解分布を示す。

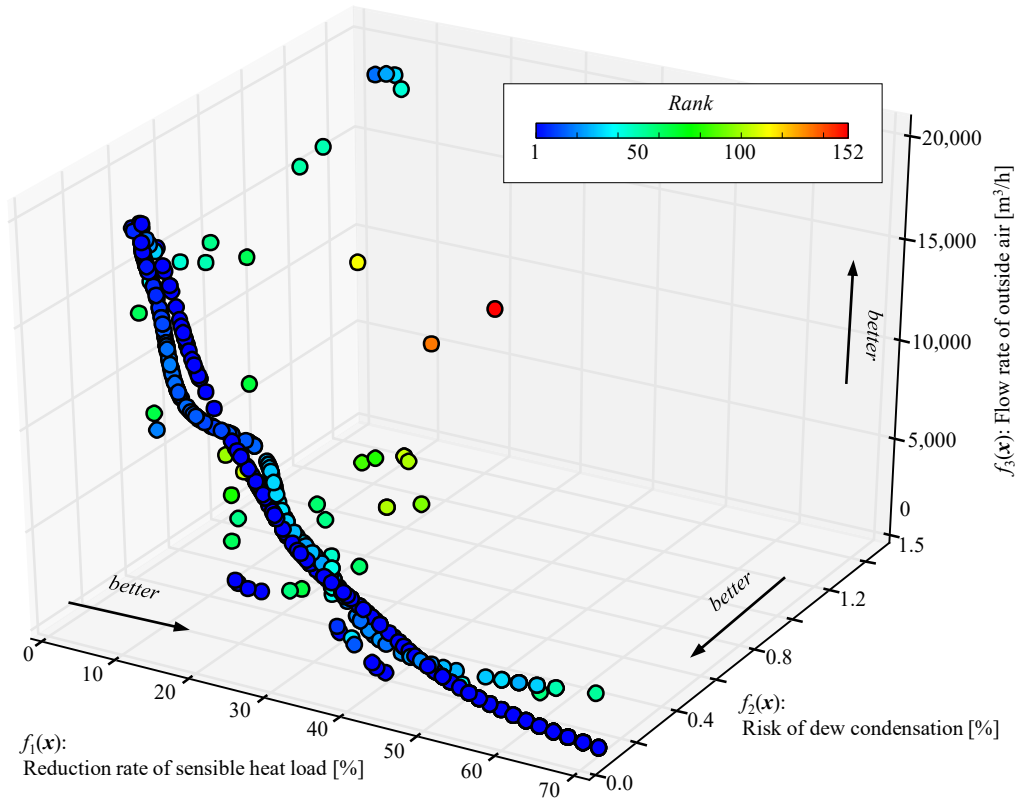


Figure 5.11 Distribution of three-dimensional optimal solutions

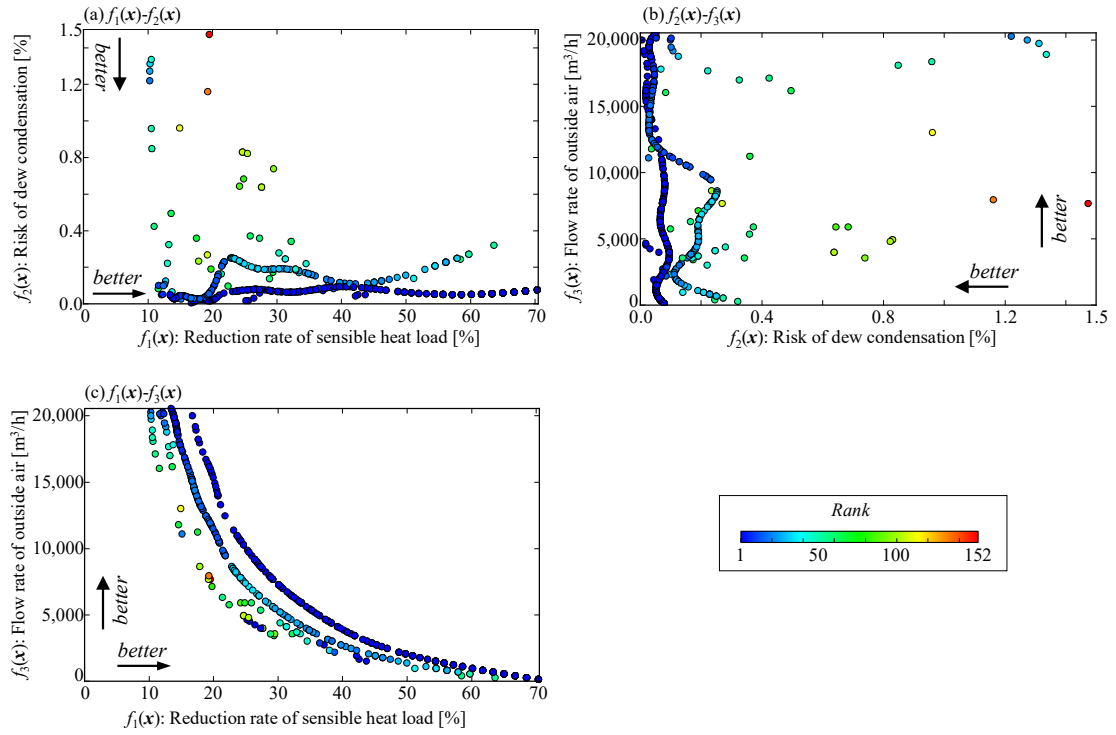


Figure 5.12 Distribution of two-dimensional optimal solutions: (a) $f_1(x) - f_2(x)$; (b) $f_2(x) - f_3(x)$; (c) $f_1(x) - f_3(x)$

Figure 5.12 については、三次元分布を二次元的に図示しているため、各図でいずれか一種の目的関数の値を無視して描画している。まず、 $f_1(x)$ と $f_2(x)$ 、 $f_2(x)$ と $f_3(x)$ に着目すると、どちらも解の評価が高い解を選択でき、最適解分布にトレードオフの関係性は確認できない。しかし、Figure 5.12 (c)のように $f_1(x)$ と $f_3(x)$ は強いトレードオフの関係にあり、 $f_1(x)$ の評価が高い解を選択しようとする、 $f_3(x)$ を犠牲にしなければならず、その逆も同様である。また、パレートフロントは $f_1(x)$ 及び $f_3(x)$ で概ね形成されている。これは、 $f_2(x)$ の応答曲面での大域解、局所解の空間に $f_1(x)$ と $f_3(x)$ のどちらかの目的関数の評価が高い解空間が存在するためと考えられる。また、この理由により、Figure 5.12 (b)のようにパレートフロントから $f_2(x)$ の値が高い（評価が低い）方にシフトした空間に Rank の高い劣解が存在するものと推察される。Figure 5.13 に設計変数の最適解の分布を示す。

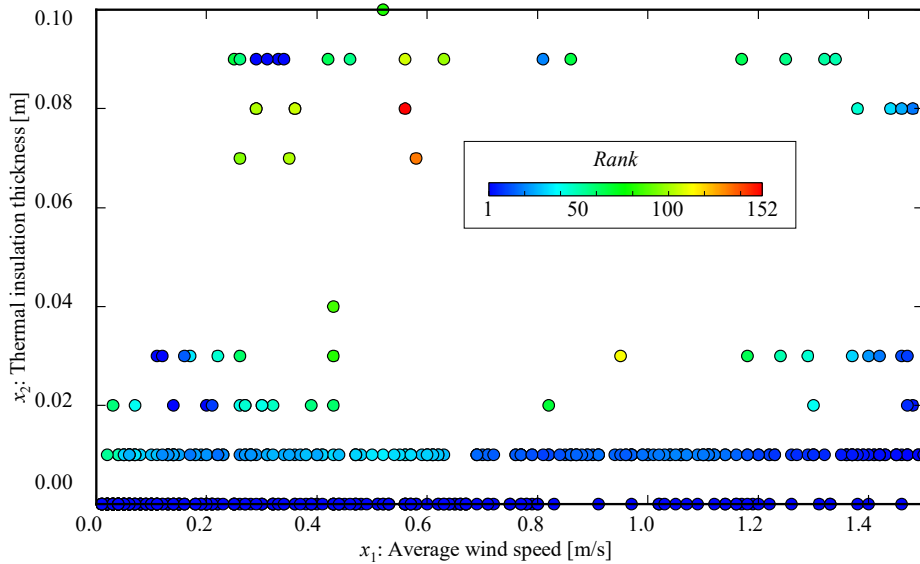


Figure 5.13 Distribution of optimal solutions (Design variable)

$x_2=0 \sim 0.01\text{m}$ 付近の設計空間に最適解が集中しており、一部 $x_2=0.09\text{m}$ にも最適解は存在している。しかし、 x_1 については幅広く最適解が分布している。

Figure 5.14 に平面での最適解及び設計変数の分布を示す。

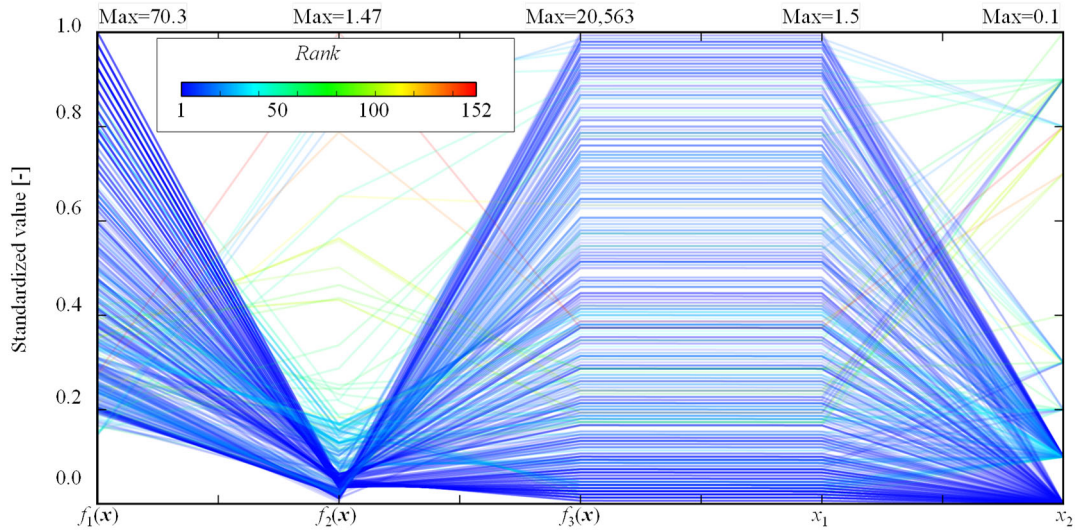


Figure 5.14 Combination of optimal Objective function and Design variable

同図は各目的関数の解の最小（最大）もしくは設計変数の制約条件の最大値を 1.0 として基準化した図である。つまり、 $f_1(x)$ は 1.0 に近いほど評価が高いことを示している。設計段階では先に要求する外気導入量（ $f_3(x)$ もしくは x_2 ）の範囲を決めた上で、 $f_1(x)$ の値が大きく、 $f_2(x)$ の値が小さい解を選択するものと考えられる。Figure 5.14 より、 x_2 は 0m ~ 0.01m に解の候補が存在しており、 $f_3(x)$ の候補の中で上記の設計変数を含む解を $f_1(x)$ 及び x_2 と照らし合わせながら選択することとなる。次節では同図を利用した設計手法について述べる。

5.6 解の候補を利用した設計手法の提案

Figure 5.15 に最適解の候補を利用した設計プロセスを示す。ここでは要求する $f_3(x)$ の範囲を 8,225 ~ 12,338m³/h (0.4 ~ 0.6) と定めた場合を仮定して説明する。まず、Figure 5.14 からその範囲をとる解を抽出する(Figure 5.15, 1)。

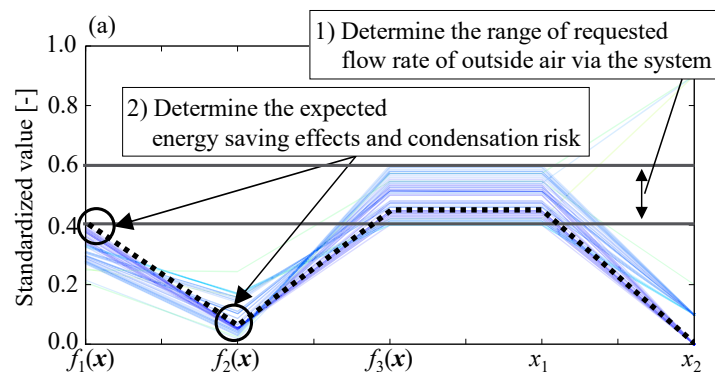


Figure 5.15 Design process for an EAHE system using the figure of combination of optimal Objective function and Design variable (1, 2)

この段階でその範囲をとる x_2 は概ね $0 \sim 0.01\text{m}$ ($0.0 \sim 0.1$) を通っていることが分かる。さらに、その中から期待できる目的関数（外調機の顕熱処理熱量削減率、結露リスク）のバランスがとれた解を選別する(Figure 5.15, 2)。すると、Figure 5.16 のように設計変数 $x_1=0.65\text{m/s}$ 、 $x_2=0\text{m}$ のとき、 $f_1(x)$ が 27% (0.38) 程度、 $f_2(x)$ が 0.08% (0.05) 前後の解を選択することができるⁱ。

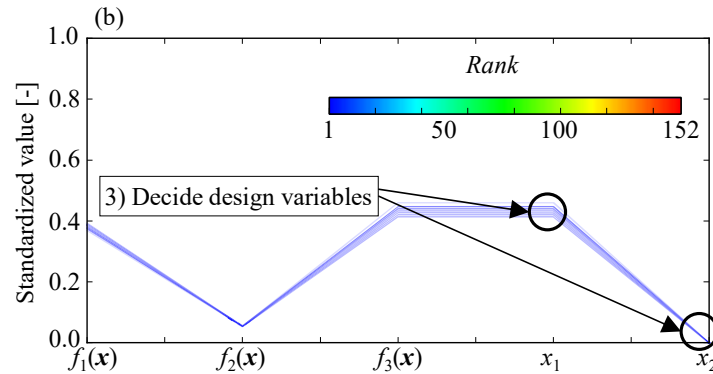


Figure 5.16 Design process for an EAHE system using the figure of combination of optimal Objective function and Design variable (3)

このように事前に応答曲面などを求め、そこから最適解の候補を探索し、提示することで設計変数の決定に際しての大きな指針となりうるものと考えられる。ただし、本論文では、一つの建物に導入されたシステムを対象としたメタモデリングであったため、このモデルで普遍的な設計はできない。しかし、典型的な形状ごとの幅広い設計変数に対応したメタモデルを構築することで、設計者が解析を行わずとも容易に設計変数を決定することができるため、普遍的な設計手法の確立は十分可能であると推察される。このような普遍的なメタモデル・最適解の候補の提示については今後の課題として位置づけている。

5.7 まとめ

本章では土壌熱交換システムの設計段階において、設計者側の要求性能に応じて設計変数を検討することのできるメタモデル（応答曲面）や多目的遺伝的アルゴリズムを用いた解の候補の提示による設計資料等の整備を目的として、設計変数の数を 2 種とし、サンプリング手法に流れ場の計算負荷を低減した非定常解析手法を採用した逐次近似最適化を実施し、応答曲面や解の候補の提示、並びに各種性能に対する設計変数の影響度を分析した。得られた知見は以下の通りである。

ⁱ この設計変数の組み合わせで解の検証を追加の非連成解析により実施したところ、 $f_1(x)=27.0\%$ 、 $f_2(x)=0.089\%$ であった。これらの値はメタモデルの予測値とほぼ一致しており、検証は一点のみではあるものの、メタモデルの近似精度は良好である可能性が高いことが示唆された。

- 1) 設計変数を地下ピットの面風速と一階床面の断熱材厚さとして外気負荷削減率と結露リスクのメタモデリングを実施した。外気負荷削減率は線形的な減少の形をとったが、結露リスクは非線形で多峰性に富む形となった。
- 2) 結露リスクは地下ピットの面風速 $x_1=0.01\text{m/s}$ 、一階床面の断熱材厚さ $x_2=0.08\text{m}$ の場合に最大となった。一方で大域解は $x_1=1.00\text{m/s}$ 、 $x_2=0.09\text{m}$ にあるが、 $x_1=0.25\text{m/s}$ 、 $x_2=0.09\text{m}$ 、 $x_1=1.00\text{m/s}$ 、 $x_2=0.00\text{m}$ などに複数の局所解が存在した。
- 3) 最適解の分布性状として、外気負荷削減率と外気導入量は強いトレードオフの関係にあり、パレートフロントが明確に現れていた。
- 4) x_2 は $0\text{m} \sim 0.02\text{m}$ 、 0.09m に解の候補が存在しており、設計時には外気導入量の候補の中で上記の設計変数を含む解を外気負荷削減率及び x_2 と照らし合わせながら選択すべきと考えられる。

参考文献

- 5.1) 石川善美, 長友宗重, 吉野博, 木村茂夫: クールチューブの地中熱回収性能に関する数値シミュレーション, 日本建築学会東北支部研究報告集, pp. 151-158, 1991.6
- 5.2) 井上宇市, 石野久彌, 谷本潤, 水出喜太郎: 実験計画法によるクールチューブの土壌蓄採熱効果に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 41-44, 1992.10
- 5.3) R. Kumar, A.R. Sinha, B.K. Singh and U. Modhukalya: A design optimization tool of earth-to-air heat exchanger using a genetic algorithm, Renewable Energy, Vol. 33, No. 10, pp. 2282-2288, 2008.10
- 5.4) 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ, 日本建築学会, 2000
- 5.5) scikit-learn developers: scikit-learn version 0.18.1, <http://scikit-learn.org/stable/> (accessed 2017.1.4)

第6章 強化学習による運用制御手法の開発

6.1 背景及び目的

6.1.1 背景

地下ピットは通常、意匠・構造設計との関係性が深いが故に設計の自由度も低い。このため、形状に対する最適化は建物ごとに制約条件が大きく異なることから、普遍的なシステム性能の向上を視野に入れると、運用条件の最適化を目指した運用手法の提案が望ましいと考える。しかし、システム自体の熱容量が膨大であるため、制御結果の応答スケールが極めて長大であり、将来的な影響を加味した上での最適な運用条件（制御則）を構築することが困難である。このため、システム運用段階では、要求風量に応じたスケジュール制御や逐次の外気及びシステム内の状況に基づいた制御により運用されているのが実情^{6.1)}である。最適な制御則を構築する場合、地下ピット経由での外気導入のタイミングやその風量について、外気条件やシステム内部の情報から将来的な状態を予測・評価し、動的に制御を行う必要があると言える。

動的な制御手法として Model Predictive Control (MPC) が選択肢に挙げられるが、本システムの場合、予測ホライズンを求めるために数時間～数十時間先を予測しつつ、最適な行動を出力していく必要がある。特に外気温度・湿度等の外乱の影響もあり、広範な予測ホライズンにわたる精度の維持には限界があることから、MPC の適用は難しい。しかし近年、制御性や制御モデルの転用などの観点から、機械学習による制御の研究や開発が活発化している。機械学習の中でも、強化学習は Figure 6.1 に示すように制御対象から得られる状態 s とユーザーが目的に応じて定義する報酬 r から、行動 a を決定するプロセスを通して、報酬の総和を最大化するような制御則を学習していく点に着目が集まっている。

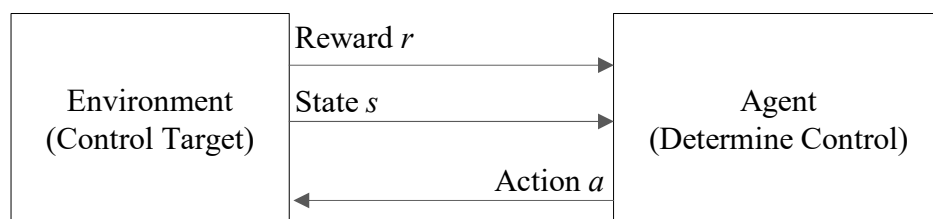


Figure 6.1 Diagram of reinforcement learning

強化学習を用いた建築設備の制御に関しては国内外で徐々に研究や導入が進みつつある。Wang ら^{6.2)}のサーベイ論文では、強化学習を用いた建築設備システムの制御に関する研究事例をまとめている。同論文によると、2015 年以降に文献数が増加しており、特に空調や中央熱源（暖房）、蓄電システムが主流であり、MPC に次ぐ次世代の制御手法として着目されている。空調システムへの適用事例として、Wei ら^{6.3)}や Valladares ら^{6.4)}の研究のように、

強化学習アルゴリズムの一種である Q 学習や DQN による制御や従来制御との比較を通じて、強化学習による制御の適用可能性を検討した事例がある。更に、日本国内における研究事例として、池田ら^{6.5)}は、地域エネルギーシステムの熱源設備及び蓄熱槽の運用最適化を ϵ DE-RJ^{6.6)}及び Q 学習により実施し、それらの制御性能を検証している。結果として、 Q 学習では学習は進んだものの、 ϵ DE-RJ の方が良好な結果を示しており、 Q 学習の適用限界や強化学習に適した最適化対象などについて議論している。工藤ら^{6.7)}は、PCM を利用した換気システムを対象に Q 学習による制御手法を提案している。学習時には、インデックスを時間、カラムを風量とした Q テーブルを作成した上で、事前に定義した気象データの環境下で学習する手法をとっている。結果として従来の制御結果よりも制御性能は高かったが、課題としてロバスト性を担保する場合には、多数の Q テーブルを準備する必要があることを示している。

6.1.2 目的

このように、強化学習による制御は建築空間等の状態数が多くなる複雑な課題に対しても応用が可能であり、本対象システムのみならず、建築設備全体の運用最適化のような問題にも対応できる手法である。強化学習は従来の動的な制御手法による最適制御が困難であった土壤熱交換システムにおいて、最適な制御則を構築できる可能性があるものの、同システムの制御に強化学習を適用した研究事例は無い。そこで本論文では、土壤熱交換システムを対象に省エネ性能の確保と結露発生の抑制を両立させた制御則の構築及びその検証を目的とする。本章では、筆者が開発した土壤熱交換システムの長期性能予測が可能な手法（以下、非連成解析）を環境とした強化学習の制御問題を定義し、学習環境の実装及び学習を実施する。特に本章では報酬の定義にあたって、事実及び反事実の行動の結果を報酬とし、効率的な学習を行うアルゴリズムを実装しており、強化学習により得られた制御結果とスケジュールに応じた制御等との比較を通じて、その有効性を検証する。更に、学習結果として得られた制御則をもとに、強化学習が選択する行動の傾向を分析する。

6.2 土壤熱交換システムの運用制御への強化学習の適用

6.2.1 学習環境の構築

強化学習のアルゴリズムは Python や C などのプログラミング言語で実装されていることが一般的となっている。一方で、プログラミングを行わずとも MATLAB の機械学習ツールボックス「Reinforcement Learning Toolbox^{6.8)}」などにて学習環境を構築することも可能となっている。本論文では、強化学習側の処理において土壤熱交換システムのシミュレータ側との通信や複雑な処理等を要するため、Python にて強化学習を実装した。

実装内容の大まかな流れを Figure 6.2 に示す。

```

0. Set EPISODE, STEP
1. Initialize Q-Network
2. for episode <- 1 to EPISODE do
3.   Start CFD
4.   Write YAML ( $s_t$ ) by CFD
5.    $s_t$  <- Read YAML
6.   for step <- to STEP do
7.      $a_t$  <- Predict  $s_t$  by Agent
8.     Write YAML ( $a_t$ )
9.     Read YAML ( $a_t$ ) on CFD
10.    Calculate CFD
11.    Write YAML ( $s_{t+1}$ ,  $r_{t+1}$ , info) by CFD
12.     $s_{t+1}$ ,  $r_{t+1}$ , info <- Read YAML
13.    Feed experience ( $a_t$ ,  $s_t$ ,  $r_{t+1}$ ,  $s_{t+1}$ ) to Agent
14.    Update Q-Network
15.     $s_t$  <-  $s_{t+1}$ 

```

Figure 6.2 Process of developed implementation

同図では、強化学習のアルゴリズムに DQN、モデルベースでの学習を想定しており、下線部がシミュレータ側の処理を示す。尚、強化学習の環境側のカプセル化手法として、gym^{6,9)} がデファクトスタンダードとなっており、実装にあたっては gym でカプセル化を行い、reset 関数 (Figure 6.2 の 3., 4. の処理に相当) を実行するとシミュレータ側から初期状態 s_0 が戻り、Agent から出力される行動 a_t のインデックスを引数とする step 関数 (Figure 6.2 の 9.~11. の処理に相当) を実行すると状態 s_{t+1} 、報酬 r_{t+1} 、環境の終了 d_{t+1} が戻るように前述までのシミュレータの出力タイミング等を変更した。Agent 及びシミュレータは中間ファイル (YAML) を介しての通信とした。学習の流れを解説すると、まず、1. にて Q-Network を初期化し、学習エピソードのループに入る。エピソード開始直後にシミュレータを実行させ、step ループ直前の状態 s_0 を得る。次に 7. の通り、Agent に対して s_t (reset 直後は $t=0$) を入力として実行する行動 a_t を得る。そして 9.~11. に示したとおり、 a_t を YAML に書き込み、シミュレータ側を a_t の条件で 1 ステップ進捗させ、結果として次状態 s_{t+1} や報酬を得るⁱ。シミュレータ側でそれらを受領後、Agent の学習データの格納庫である experience に経験データを蓄積させ、Q-Network を更新させ、1 ステップの終了とする。学習時はこれらのループ及びエピソードのループを回し、様々な経験データの蓄積及び学習を続け、誤差関数を収束させる。これらをより具体的に描画したフローは Figure 6.3 の通りである。

ⁱ 実際には報酬の計算はシミュレータ側から別途送信される情報をもとに Python 側で実行している。

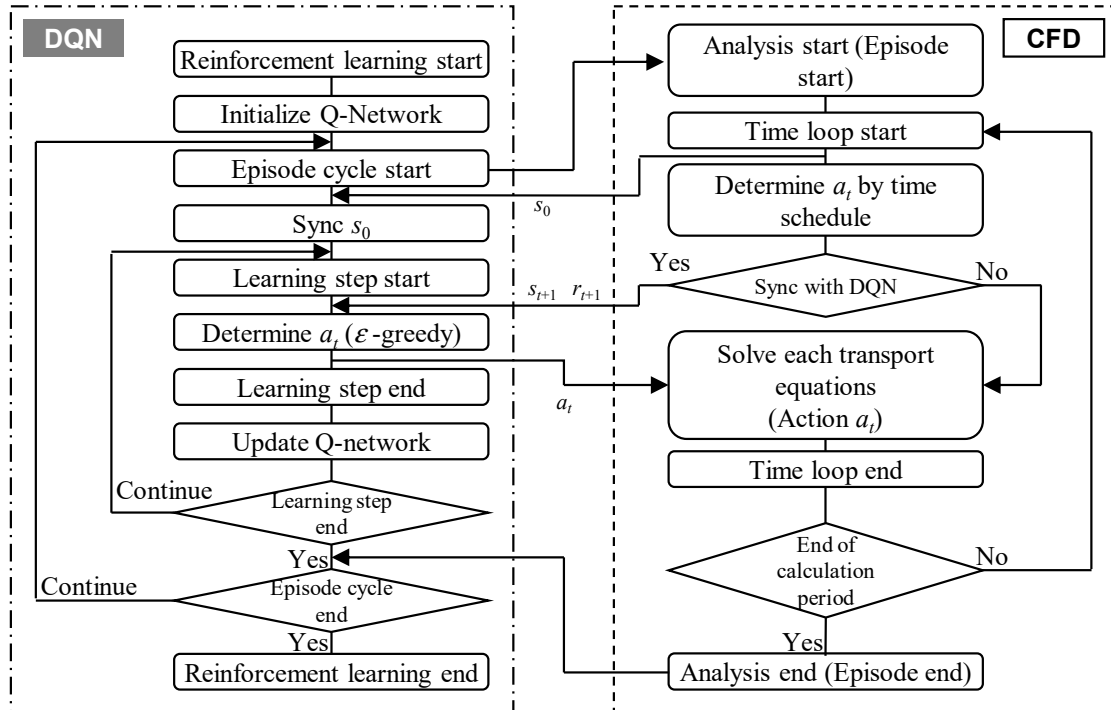


Figure 6.3 Training flow with CFD simulator

6.2.2 強化学習の問題設定

状態・行動を Table 6.1 のように設定した。

Table 6.1 Definition of state and action

| | |
|------------|---|
| State s | State s Fresh air volume, Outside air temperature, Outside air absolute humidity, Outside air enthalpy, Solar radiation, Dew point temperature, Surface temperature 0~7, Relative humidity 0~7 |
| Action a | 0m ³ /s, 8,100m ³ /s |

状態 s は外気導入量や外気温湿度、エンタルピーなどの気象条件に加え、実運用時において現実的に取得可能なパラメータであるシステム内の代表点 8 点の表面温度や相対湿度とした。行動 a は Figure 6.4 の通り、システムを経由させて外調機へ導入するか、システムを経由せず外調機へ導入するかの二値の離散行動である。つまり、強化学習の Agent が $a_t=0$ を出力した場合は、MD_o 開、MD_e 閉となり、外気を直接、外調機へ導入する。 $a_t=1$ を出力した場合は、MD_o 閉、MD_e 開となり、システムを経由して外調機へ導入する。Figure 6.4 において、 T は温度、 x は絶対湿度、下付き添字 e はシステム流出口、 o は外気、OA は外調機入口、SOA は外調機出口を示す。

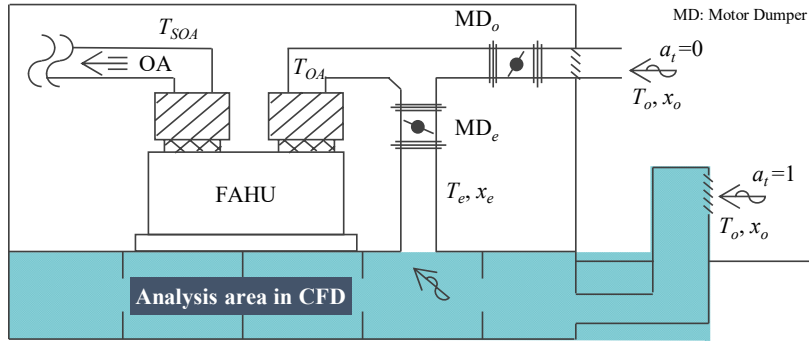


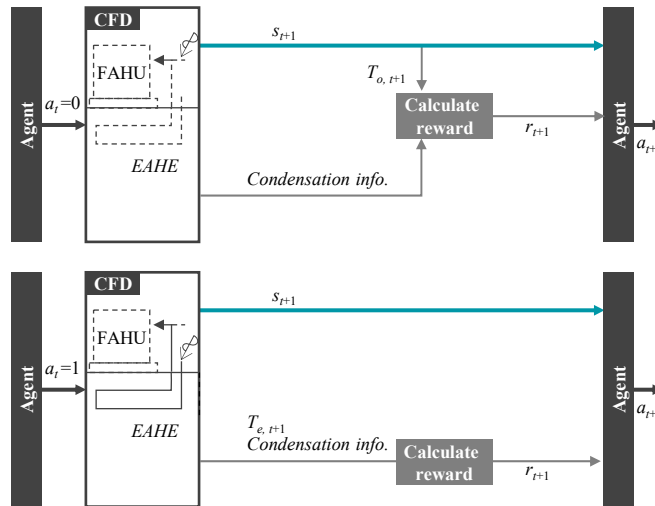
Figure 6.4 Diagram of EAHE.

If $a_t=0$ then, MD_e is closed and MD_o is opened. If $a_t=1$ then, MD_e is opened and MD_o is closed.

6.3 FCRE による報酬設計手法の提案

6.3.1 Single Discrete Action 環境

外調機の外気負荷低減を目的とした報酬 r_1 、システム内の結露発生を導外気の空気質汚染リスクと見なし、結露の抑制を目的とした報酬 r_2 の二種を定義し、それらの報酬の最大化を今回の強化学習の目的とする。強化学習における通常の報酬の与え方は、Figure 6.5 に示した例のように、強化学習の Agent が選択した行動 a_t に応じて環境(CFD)の風量を操作し、 $a_t=1$ の場合はシステムを経由した外気温度(T_e)、 $a_t=0$ の場合は直接外調機に外気を導入したときの外気(T_o)をもとに r_1 を計算し、さらにその時のシステム内部での結露情報を用いて r_2 を計算する。


 Figure 6.5 Common reward calculation methods in RL. Above: $a_t=0$, Below: $a_t=1$

更に、 r_1 及び r_2 から逐次報酬 r_{t+1} を求め、状態 s_t と共に Agent に返すフローを繰り返し、報酬総和を最大化する方策を獲得していく。つまり、通常の強化学習では行動 a を実施し、その行動のみの結果に対する即時報酬を得ることを前提としており、選択しなかった行動

(反事実)は評価されない。同様の行動を評価する機会は、類似した状況下となる遠い将来のステップ・エピソードである。従って、多様な経験を獲得するために多くの試行回数を繰り返す必要があることから、学習の収束に時間を要する。

今回の問題設定では行動が離散値であり、行動選択肢も 2 種と限定的であることから、別の視点で報酬を定義する。報酬の計算フローを Figure 6.6 に示す。

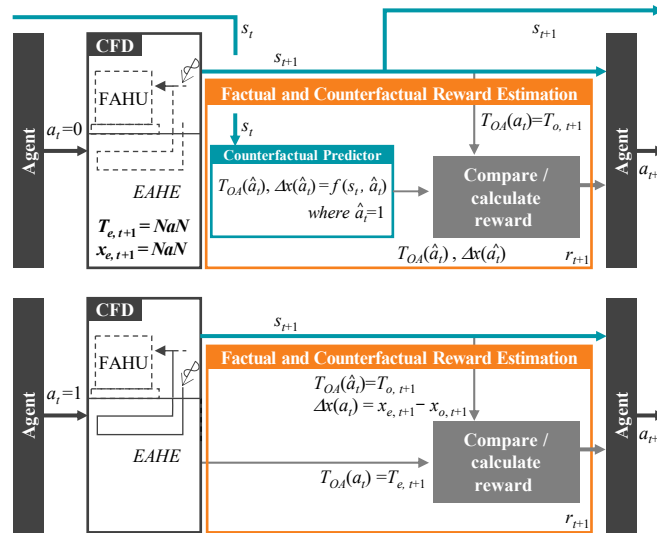


Figure 6.6 Reward calculation method by FCRE. **Above:** $a_t = 0$, **Below:** $a_t = 1$

特徴的な点は、実行した行動に加えて、反事実の結果を予測し、報酬計算に組み込む点である。一般的な強化学習の報酬の計算手法と比較して、選択した行動が正しいのか、反事実の行動が正しいのかを比較し、選択した行動に対するフィードバックが即座に行えるため、学習の安定性、最適な方策獲得の可能性及び学習収束速度の向上が期待できる。尚、強化学習を用いずとも、全ての行動選択肢に対して次のステップで得られる報酬を予測して先読みを行い、貪欲に優れている方を選択していく方法も考えられる。強化学習では「報酬総和を最大化」を目的としているため、最終的に得られる報酬総和が高ければ良く、一時的に逐次報酬が悪化することを許容している。例として、本システムにおける報酬を考える。冬期にシステムを利用すると、温熱を取得 (= 冷熱をコンクリートや土壌に蓄熱) するため、短期的には高い報酬を得られるが、長期的に見ると、冷熱を過剰に蓄熱することで夏期のシステム表面温度が低下し、結露が発生してしまい、結果として得られる報酬総和が低くなる結果が得られることもあり、貪欲に行動することが適切であるとは限らない。強化学習では、報酬総和を最大化する目的があるため、そのバランスを考慮しつつ行動を決定していくことが可能であり、土壌熱交換システムにおける制御手法として適していると考えられる。

本論文で提案する手法は、レコメンデーションシステムなどで近年着目されている Counterfactual Machine Learning の分野における Off-Policy Evaluation^{6,10)} の考え方に近い。以降では、本手法を Factual and Counterfactual Reward Estimation (FCRE) と呼ぶ。

Figure 6.6 について、 r_1 の計算フローを例にして FCRE による報酬の計算手法を解説する。 $a_t=1$ の場合、報酬を計算するために必要なデータ($T_{e,t+1}$, $T_{o,t+1}$)は状態 s_{t+1} などと共に環境側より取得可能であり、外調機入口温度 T_{OA} を $T_{e,t+1}$ としてシステム経由時の外調機出入口温度差 ΔT を計算する。更に、 T_{OA} を $T_{o,t+1}$ とすると反事実である $\hat{a}_t=0$ の行動時の結果と読み替えられるため、直接外気導入時の外調機出入口温度差を導出できる。そして、 $a_t=1$ と $\hat{a}_t=0$ の温度差をもとに優劣を判断して報酬 r_1 を算出する。

一方で、 $a_t=0$ の場合、環境側ではシステム経由で外気を導入しないことになるため、 $T_{o,t+1}$ は取得可能であるが、 $T_{e,t+1}$ は $a_t=1$ の条件ではないため取得できない。言い換えると、 T_e は流量平均温度であり $a_t=0$ の際には計算することができない。流出口付近の温度をセンシングして T_e とすることも可能ではあるが、 $a_t=0$ の条件では雰囲気温度であり、本来、取得したい T_e とは別物であるため値としては利用できない。

そこで、状態 s_t と a_t を説明変数として $T_{e,t+1}$ を予測する回帰モデルを構築し、適宜予測することで、選択した行動及び反事実の行動 \hat{a}_t の外調機出入口温度差を算出し、比較を行うことで、選択した行動 a_t の適・不適を評価するⁱ。

1) 省エネ性に関する報酬

省エネ性に関する報酬 r_1 は Eq. 6.1 のように外調機の外気負荷を想定し、出入口温度差の比較を通じて算出する。外気導入時間帯は行動の選択肢に関わらず、定風量での外気導入かつ、外調機は全外気型を想定しているため、厳密に外気負荷を計算する必要がないことから、温度差で報酬を定義した。また、土壤熱交換システムでは、一般的に顕熱のみの処理を想定しているため、温度差のみで外調機負荷を評価する。

$$r_{1,t+1} = \frac{\Delta T(a_t) - \Delta T(\hat{a}_t)}{T_{std}} \quad 6.1$$

$$\Delta T(a) = \begin{cases} T_{OA}(a) - 22 & (\text{if winter and } T_{OA}(a) < 22) \\ 26 - T_{OA}(a) & (\text{if summer and } T_{OA}(a) > 26) \\ T_{OA}(a) - 20 & (\text{if spring / fall and } T_{OA}(a) < 20) \\ 28 - T_{OA}(a) & (\text{if spring / fall and } T_{OA}(a) > 28) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \quad 6.2$$

$$T_{OA}(a_t) = \begin{cases} T_{o,t+1} & (\text{if } a_t = 0) \\ T_{e,t+1} & (\text{if } a_t = 1) \end{cases} \quad 6.3$$

$$T_{OA}(\hat{a}_t) = \begin{cases} f(s_t, \hat{a}_t) & (\text{if } \hat{a}_t = 1) \\ T_{o,t+1} & (\text{if } \hat{a}_t = 0) \end{cases} \quad 6.4$$

\hat{a}_t は反事実の行動を示す。例えば、 $a_t=0$ のとき、 \hat{a}_t は 1 である。 T_{std} は報酬を正規化するための基準値 (4.0) である。 ΔT は外調機の吹出温度差であり、Eq. 6.2 ~ Eq. 6.4 を用いてそれぞれ算出する。Eq. 6.2 の季節の定義は 4 月・5 月・10 月を中間期 (春期・秋期) とし、6 月 ~ 9

ⁱ 環境のオブジェクトを逐次 deep-copy できる場合は、予測モデルを構築する必要はなく、環境を複製した上で、全ての選択肢を計算すれば良い。しかし、今回は CFD のソルバーの拡張性の都合上、逐次の環境の複製が極めて困難であることから、次ステップ $t+1$ の反事実の結果を予測するモデルを構築した。

月を夏期、11月～3月を冬期とした。 r_1 はEq. 6.1での正規化後、 $-1.0 \sim 1.0$ の範囲でクリップする。

Eq. 6.1を解説すると、例えば夏期に $a_t=1$ で $T_{e,t+1}=30.0$ 、 $T_{o,t+1}=31.5$ の場合、 $\Delta T(a_t=1)=-4.0$ 、 $\Delta T(\hat{a}_t=0)=-5.5$ となる。吹出温度差が0に近い $a_t=1$ を選択したほうが省エネであるため、 $r_{1,t+1}=0.375$ で正の値をとる。一方で夏期に $a_t=0$ で、 $T_{OA}(a_t=0)=31.5$ 、 $T_{OA}(\hat{a}_t=1)=30.0$ のとき、 $r_{1,t+1}=-0.375$ で負の値をとり、反事実である $\hat{a}_t=1$ の選択が適切であったとAgentにフィードバックされる。

2) システム内部での結露発生ⁱに関する報酬

システム内部での結露を抑制するための報酬 r_2 は、選択した逐次の行動に応じてどの行動が適切であったかをEq. 6.5のように判断し計算した。 $\Delta x(a)$ は、Eq. 6.6により求める。

$$r_{2,t+1} = \begin{cases} 1 & (\text{if } a_t = 0 \text{ and } \Delta x_{t+1}(\hat{a}_t) < 0.0) \\ -1 & (\text{if } a_t = 1 \text{ and } \Delta x_{t+1}(a_t) < 0.0) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \quad 6.5$$

$$\Delta x(a) = \begin{cases} f(s_t, \hat{a}_t) & (\text{if } \hat{a}_t = 1) \\ x_{e,t+1} - x_{o,t+1} & (\text{if } a_t = 1) \end{cases} \quad 6.6$$

r_1 と異なり、 $a_t=0$ 及び $\hat{a}_t=0$ の際、システム流出入口湿度差が定義できないため、 $a_t=1$ 及び $\hat{a}_t=1$ の湿度差をもとに r_2 を計算する。 $a_t=1$ の場合、環境側より取得した実データを用いて算出する。一方で $a_t=0$ の場合、 $x_{e,t+1}$ を取得できないため、Counterfactual Predictorを用いて $\Delta x(\hat{a}_t=1)$ を直接予測する。 $\Delta x(a)$ が負の場合には、システム経由の外気導入により、結露が発生していたと判断できる。このため、 $a_t=1$ での行動時に $\Delta x(a_t=1)$ が負の場合は、「選択した行動により結露が発生」とし、 $r_{2,t+1}=-1$ のペナルティを課す。また、 $a_t=0$ の行動時に $\Delta x(\hat{a}_t=1)$ が負の場合は、「反事実の行動により結露が発生」と考え、システムを経由させないという判断が正しいということで、 $r_{2,t+1}=1$ となる。

制御の本来の目的は「結露を抑制する」ことである。この目的をそのまま報酬に設定するといくつかの不都合が生じる。例えば、代表点の結露水の凝縮・蒸発の有無や、代表点の結露量の増減に応じた報酬の定義方法等が考えられるが、実環境への適用を考慮すると、同様の変数の取得は困難であるため、不適である。その他、現実的に取得でき得る情報として、代表点での結露水の有無が考えられる。この手法では、一度結露が生じ、蒸発するまでに数十～数百ステップを要する場合、継続して報酬にペナルティがかかり続けるような状況に陥る。Eq. 3.107の2項目が再帰的に記述できることから推察される通り、時間割引率 γ を0.99などとしても、学習においては遠い将来の行動価値を無視して、近い将来の報酬を意識することとなる。つまり、 γ_{t+n} で現時点から n ステップ進んだ将来の行動価値が減衰することから、 n が大きい、遠い将来の行動価値は無視される。このため、どのような行動をとっても近い将

ⁱ 尚、シミュレータもしくは実環境でリアルタイムに空気質汚染を評価することが困難であるため、本論文ではその一番の要因と考えられる、システム内での結露の発生の抑制を制御目的の一つに位置づけている。

来全てにペナルティがかかってくるため、報酬の最大化が難しくなることが予想される。事前に結露水の有無に応じた報酬を定義した上で、学習を実施したところ、数十～数百ステップの間でどのような行動をとっても報酬を得られない、もしくはペナルティを受けるような学習となり、結果として夏期に必ず $a_t=0$ を出力するもしくは通年で $a_t=0$ を出力する解に陥ることが多かった。このため、逐次報酬を適切に評価できるように、システム流出入口の絶対湿度差を用いて結露の有無を評価して報酬を定義した。

3) 報酬のスカラー化

Agent には報酬をスカラーで渡す必要がある。単純に即時報酬 r を r_1 と r_2 の和とした場合には、 r_1 と r_2 の獲得頻度・スケールが大きく異なり、各報酬が不均衡となる可能性がある。不均衡となった場合には、報酬を獲得しやすい方が他方の報酬を奪い合うような学習結果が予想される。そこで、即時報酬 r を Eq. 6.7 のように各報酬を調整している。各報酬の重み w は事前に重みのバランスを検討の結果、 $w = (0.4 \ 0.6)$ とした。

$$r = r \cdot w^T (\text{where } r = (r_1 \ r_2)) \quad 6.7$$

6.3.2 Multi Discrete Action 環境

6.3.1 で定義した FCRE の手法を応用させ、Multi Discrete Action を想定した場合の報酬の設計手法について解説する。基本的な考え方は Single Discrete Action と同様であり、外調機の外気負荷の削減を目的とした報酬 r_1 、システム内の結露発生を導入外気の空気質汚染リスクと見なし、結露の抑制を目的とした報酬 r_2 の二種を定義し、それらの報酬の最大化を今回の強化学習の目的とする。Multi Discrete Action での FCRE の計算フローを Figure 6.7 に示す。前述の通り、Single Discrete Action (Figure 6.6) の計算フローと同様であり、大きな違いは、反事実の行動が複数存在するため、すべての反事実の行動の結果を CP で予測を行う点である。

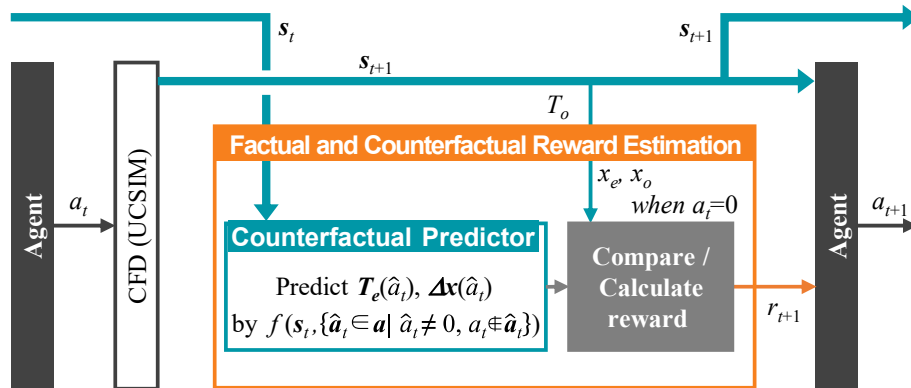


Figure 6.7 Reward calculation method by FCRE for Multi Discrete Action

1) 省エネ性に関する報酬

省エネ性に関する報酬 r_1 の計算過程を解説する。Eq. 6.8 の各行動時のシステム流出口温度のベクトル T_e を Eq. 6.9 を用いて準備する。Eq. 6.9 では、実際に行動した結果である T_e は観測値を用い、反事実の行動の結果は CP による予測結果を用いる。尚、 $a_i=0$ のとき、システム流出口温度は意味をなさないため、Eq. 6.9 では求めず、任意の値を設定しておく。

$$T_e = (0.0 \ T_e(a_{t,1}) \ \cdots \ (a_{t,N_{action}})) \quad 6.8$$

$$T_e(a_{t,i}) = \begin{cases} T_e(a_{t,i}) & (if \ a_{t,i} \notin \hat{a}_t \text{ and } i \neq 0) \\ f(s_t, a_{t,i}) & (if \ a_{t,i} \in \hat{a}_t \text{ and } i \neq 0) \end{cases} \quad 6.9$$

T_e を算出した後に、Eq. 6.10 ~ 6.12 の計算を行い、各行動時の外調機頭熱負荷ベクトルを求める。

$$T_{OA} = \frac{T_e \circ a + T_o(\max(a) - a)}{\max(a)} \quad 6.10$$

$$\Delta T = \begin{cases} T_{OA} - 22 & (if \text{winter and } T_{OA} < 22) \\ 26 - T_{OA} & (if \text{summer and } T_{OA} > 26) \\ T_{OA} - 20 & (if \text{spring / fall and } T_{OA} < 20) \\ 28 - T_{OA} & (if \text{spring / fall and } T_{OA} > 28) \\ 0 & (else) \end{cases} \quad 6.11$$

$$Q = -C_p \times \rho \times \frac{\max(a)}{3,600} \times \Delta T \quad 6.12$$

最後に Q の最小値と実際に行動した結果得られた Q の差を基準値で除して r_1 を算出する。

$$r_1 = \frac{\min(Q) - Q(a_t)}{Q_{std}} \quad 6.13$$

2) システム内部での結露発生に関する報酬

次にシステム内部での結露を抑制するための報酬 r_2 は r_1 同様にシステム流出入口の絶対湿度差のベクトル Δx を準備し、これらの比較を通じて算出する。

$$\Delta x(a_{t,i}) = \begin{cases} x_e(a_{t,i}) - x_o & (if \ a_{t,i} \notin \hat{a}_t \text{ and } i \neq 0) \\ f(s_t, a_{t,i}) & (if \ a_{t,i} \in \hat{a}_t \text{ and } i \neq 0) \end{cases} \quad 6.14$$

$$\Delta x = (0.0 \ \Delta x(a_{t,1}) \ \cdots \ \Delta x(a_{t,N_{action}})) \quad 6.15$$

r_2 の算出にあたり、 \hat{a}_t の評価も行う点は、 r_1 と変わらない。 r_2 の評価は絶対湿度差ではなく、Eq. 6.16 のように時間あたりのシステム流出入口の通過水分量差、つまり、内部での結露量 [kg/h] で評価する。しかし、その差は行動毎に大きな乖離が予想される点や r_2 をスケーリン

グする際の基準値の設定が困難であることなどの理由で、ranking の処理により、降順で順位付けを行い *Cnd-Rank* を得る。尚、Eq. 6.16 の clip は蒸発が生じた場合に $\rho \Delta x \circ a$ を 0 に置き換えるための処理を表す。

$$Cnd-Rank = \text{ranking}(\text{clip}(\rho \Delta x \circ a, -inf, 0.0)) \quad 6.16$$

最後に Eq. 6.17 に示す通り、最適行動時（1 位）と実際に選択した行動時の順位との差をとり、- 1.0 ~ 0.0 の範囲に r_2 を収める。

$$r_2 = \frac{1 - Cnd-Rank(a_t)}{N_{action} - 1} \quad 6.17$$

3) 報酬のスカラー化

最終的に求めた r_1 及び r_2 をスカラーに変換するが、単純な和とした場合、それぞれの報酬の獲得頻度やスケールの相違により、どちらかの報酬を獲得するような傾向に収束する恐れがある。このため、各報酬の足並みを揃えるために、 r_1 及び r_2 に対して重み w を乗じ、下式のように r を求め、Agent へフィードバックする。

$$r = r \cdot w^T \quad 6.18$$

以降は Single Discrete Action の FCRE の手法を用いて解析及び学習を実施する。

6.4 解析条件

6.4.1 CFD

今回の学習対象の CFD のモデル及びその条件を Figure 6.8、Table 6.2 にそれぞれ示す。

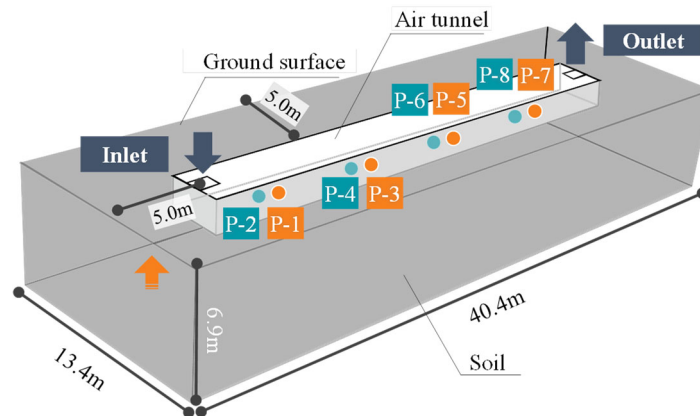


Figure 6.8 CFD model of EAHE system

Table 6.2 Condition of CFD

| | Pre steady analysis | Main unsteady analysis |
|---------------------------------------|--|--|
| Calculation period / Time interval | - | 1/1 ~ 12/31 / 3,600s (Approaching period: 1 year) |
| Mesh | 110(X) × 48(Y) × 21(Z) = 205,920, Structured grid | |
| Domain | 40.4m(X) × 13.4m(Y) × 6.9m(Z) | |
| Scheme for advection term | 1 st -order upwind scheme for advection term | |
| Turbulence model | Standard k - ε model | - |
| Inflow boundary (Flow) | $U_i = \{0.0, 2.25\}$, $k_i = 3 / 2 (U_i \times 0.05)^2$, $\varepsilon_i = C_{\mu}^{3/4} \cdot k_i^{3/2} / l_i$ | U_i : Accordance with loading flow fields |
| Inflow boundary (Temp. and humidity) | - | $T_o = T_{outside, t} + \max(T_{outside}) \times N_{T, t}$, $x_o = x_{outside, t} + \max(x_{outside}) \times N_x$ |
| Outlet boundary | Free slip | |
| Wall boundary in the air tunnel | Velocity: General logarithmic function | Temperature: General logarithmic function Humidity: Lewis relationship (Exponent=0.67) |
| Upper side boundary of the air tunnel | - | Surface temperature: 22.0~26.0°C, Heat transfer coefficient: 23.0W/(m ² ·K) |
| Initial temperature | - | Results of the one-dimensional heat conduction analysis |
| Ground surface boundary | - | Surface temperature: Sol air temperature ^{6.11)} , Convective heat transfer coefficient: 17.9W/(m ² ·K) |
| Soil side and bottom | - | Adiabatic condition |

U_i : Wind speed [m/s], l_i : Length scale (=1.0) [m], k_i : Turbulence kinetic energy [m²/s²], ε_i : Dissipation rate of k_{in} [m²/s³], C_{μ} : Model constant (=0.09) [-],
 T_o : (Inlet) Outside temperature [°C], $T_{outside}$: Outside temperature (Meteorological Data^{6.11)}) [°C],
 x_o : (Inlet) Outside absolute humidity [kg/kg], $x_{outside}$: Outside absolute humidity (Meteorological Data^{6.11)}) [kg/kg],
 N : Random noise for each time, $-0.01 \leq N \leq 0.01$

解析の流れとしては、1) 流れ場の取得、2) 初期温度の取得、3) 本解析（強化学習や比較対象の解析）の順で実施した。共通の条件として、モデルは流路長さ 25.2m、幅 3.0m、高さ 1.5m と一般的なストレート型のシステムを模擬したものとした。強化学習を実施するにあたり、強化学習の収束に要するエピソード数のオーダーが未知数であったため、形状を簡略化したシステムかつ、メッシュを限定した上でモデル化を行った。各物性値は Table 4.3 と同様である。気象データは拡張アメダス気象データ^{6.11)}の福岡県八幡における標準年のデータを使用した。尚、本解析及びその助走期間は、空気の温度・湿度輸送、地下ピット表面の対流・放射熱伝達と地下ピット表面の仮想レイヤでの結露水の凝縮・蒸発及びコンクリート・土壌の熱伝導を連成させた三次元非定常解析である。

1) 流れ場の取得

非連成解析では、事前に流れ場を定常解析にて求めておき、本解析時にスケジュールもしくは強化学習の行動出力値等に応じて作成した流れ場を適宜読み込み、切り替える。流れ場の取得にあたっては、Table 6.2 の Pre steady analysis に示した条件で等温定常解析を実施した。風量は 0 m³/h ($a_i=0$)及び 8,100 m³/h ($a_i=1$)の二種類を想定し、流入風速を 0.0 m/s 及び 2.25 m/s と設定し、それぞれの流れ場を取得した。

2) 初期温度の取得

初期温度は、解析を次の 2 段階に分けた上で、三次元温度場を取得し、それを本解析時の初期温度分布に設定する。

- (a) 地中の鉛直方向の一次元熱伝導解析を 20 年間実施し、周期的定常状態となった時点（解析終了時点の 12 月 31 日 24 時）での鉛直方向の土壌温度プロファイルを取得した。同解析の条件は Table 4.2 と同様として解析を実施した。
- (b) 取得したそれぞれの深さでの一次元温度プロファイルを CFD の三次元モデルの深さに対応させ、一次元的な初期温度としてコンクリート及び土壌に与え、1 年間の非連成解析を実施し、解析終了時の三次元温度分布を取得した。初期温度を除くその他の解析条件は、Table 6.2 の Main unsteady analysis に示したものと同様であり、読み込む流れ場は毎日 9:00~18:00 にシステム経由で外気導入するスケジュールに従う。本解析時には、ここで、取得した三次元の温度場を初期条件として設定することで、1 年間の助走期間を設けたもの見なす。尚、助走期間では流入温度等の計算に用いるノイズ N を 0.0 とした。

3) 本解析

比較対象となる Random 及び Baseline での制御時の解析、強化学習での解析、FCRE の予測モデルのデータセット作成時の解析は Table 6.2 の Main unsteady analysis に示した条件にて実施する。それぞれの違いは、毎日 9:00 ~ 18:00 において、1 回/時間の頻度で読み込む流れ場の決定手法が異なる点である。Random 及び FCRE の予測モデルのデータセット作成用の解析では、流れ場の切り替えをランダムに行う。Baseline はシステム経由で外気導入を行う。強化学習では強化学習が選択した a_t の値に応じて 2 種の流れ場を切り替える。尚、共通事項として 18:00 ~ 翌 9:00 の間は外気導入を行わないものとしている。

Table 6.1 に示した状態値として、代表点の表面温度及びその表面から 50mm 離れた位置の相対湿度があるが、具体的な取得位置は Figure 6.8 青（ピット底面）、橙色（ピット側面）で示した計 8 点である。解析時には環境側の不規則性を持たせるために、外気温度・外気絶対湿度の最大値の $\pm 1.0\%$ (± 0.34 、 ± 0.000204 kg/kg) の範囲で一様乱数を毎ステップ生成し、外気温度・外気絶対湿度に生成した乱数を加算したものを流入温度及び流入絶対湿度に設定している。その他、表面での結露・蒸発やその量は、4.3 と同様の手法にてタイムステップ毎に各メッシュの結露・蒸発速度を定義し、結露は空気-コンクリート間に設けた仮想のレイヤに蓄積することで、非定常的な結露・蒸発現象を再現する。尚、結露水の拡散や消失は考慮に入れていない。

6.4.2 FCRE の予測モデルの構築

1) FCRE 予測モデルの概要

先述の通り、反事実となる次ステップ（1 時間後）の報酬を計算するための流出口温度 $T_{e,t+1}(T_{OA}(\hat{a}_t))$ 及び流出入口絶対湿度差 $\Delta x(\hat{a}_t)$ の予測モデルを構築する。入力を各状態値 s_t (Table 6.1 の State 欄を参照) 及び反事実の行動 \hat{a}_t 、出力を $T_{OA}(\hat{a}_t)$ 及び $\Delta x(\hat{a}_t)$ とした回帰モデルを

構築し、 $a_t=0$ の際に反事実の $T_{OA}(\hat{a}_t)$ 及び $\Delta x(\hat{a}_t)$ を予測し、報酬を計算していくⁱ。尚、入力 s_t について、Table 6.1 の *State* のうち、現ステップの外気導入量が出力に影響を及ぼすことは考えにくく、次ステップでの行動 a_t による影響が支配的となることから、外気導入量の特徴量を除いた。

使用する予測アルゴリズムは LightGBM^{6,12)} を採用した。LightGBM は決定木アルゴリズムをベースとした勾配ブースティング手法の一種である。まず、勾配ブースティングとは、複数の回帰モデル（弱学習器）を作成し、最終的に一つの学習器に統合していくアンサンブル学習と呼ばれる学習手法の代表的な解法の一つである。ブースティングでは、弱学習器ごとに学習を行い、予測誤差を次の弱学習器に伝播させ、その誤差を訓練データとして用いて誤差を最小化させるように弱学習器をネスティングする。勾配ブースティング手法は主に XGBoost^{6,13)}、LightGBM がよく用いられる。LightGBM の特徴として、ブースティング時の分岐先の決定手法等が効率化されており、学習時間・精度・利便性の面で極めて優れているため、データサイエンスや機械学習の分野で多く利用されている。

2) FCRE の予測モデルの計算条件

学習に用いるデータは環境側で流れ場の選択（風量の変更）をランダムに選択して得られる $\{s_t, a_t, T_{e, t+1}, \Delta x_{t+1}\}$ を 10 年分蓄積したものとした。データセットの内、 $a_t=0$ のデータは予測に用いないため、取り除いており、学習に使用したデータサンプル数は 16,239 である。Training データ、Test データの割合はそれぞれ 90%、10%として、Training データは K-Fold Cross-Validation により、モデルの学習・検証を 5 回繰り返し、Training データ全てで学習した後に、Test データで再度、モデルの検証を行う。学習に使用した入力データの一部を Figure 6.9 に散布図行列図として示す。

ⁱ Multi Discrete Action にて絶対湿度差の値に応じた r_2 を定義することを想定して、 r_2 算出時に用いる予測モデルは分類ではなく、回帰による手法を採用している。

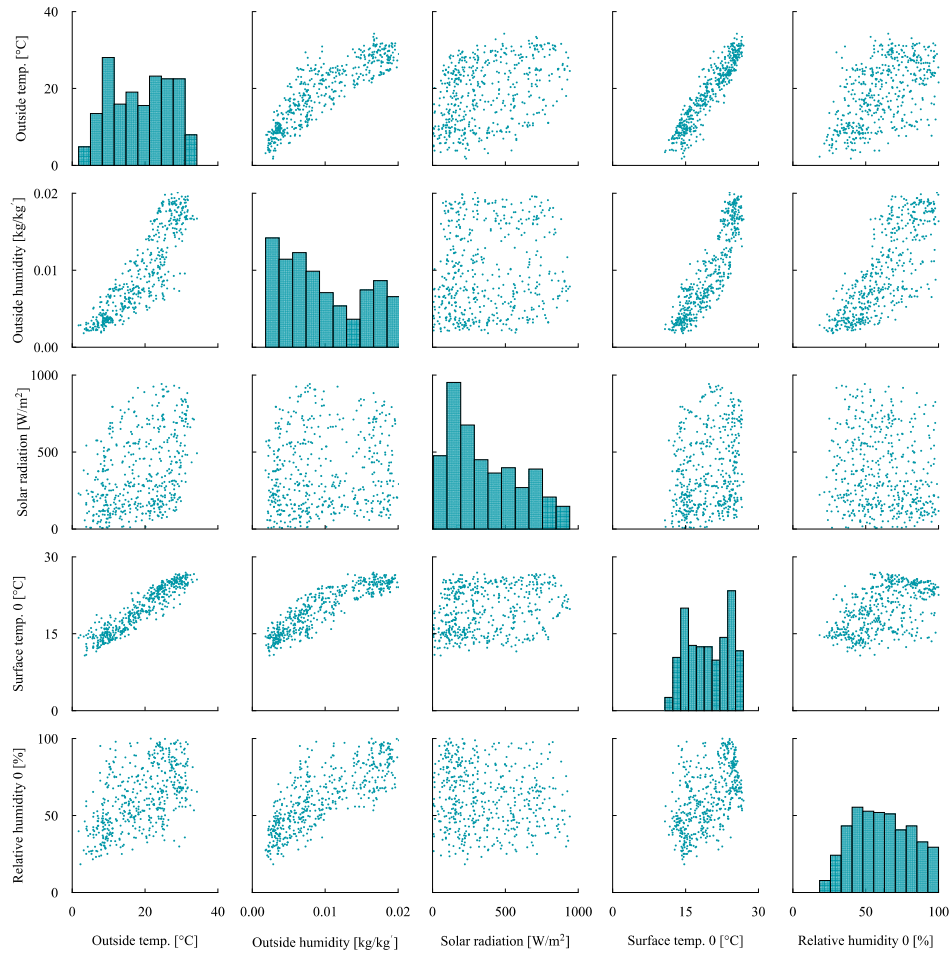


Figure 6.9 Pairplot matrix of the input data at training the Counterfactual Predictor

LightGBM のハイパーパラメータは、ベイズ最適化手法をベースとするハイパーパラメータ探索フレームワークの Optuna^{6.18)} を用いて決定した。

6.4.3 強化学習の条件設定

強化学習の条件を Table 6.3 に示す。

Table 6.3 Conditions of reinforcement learning

| | |
|-----------------------------|---|
| Episode (step) | Training: 30, Evaluation: 5 (3,649 steps / episode) |
| Algorithm | DQN ^{6.14)} + Double DQN ^{6.15)} + DDQN ^{6.16)} + PER ^{6.17)} |
| Discount factor γ | 0.99 |
| Exploration rate ϵ | Linear schedule, $\epsilon_0=1.0$, $\epsilon_N = 0.02$ |
| Learning rate η | 0.0005 |
| Replay memory buffer | 50,000 |
| Q-Network / Batch size | 22×64×64×2 / 32 |

強化学習のアルゴリズムは DQN をベースとし、Double DQN・DDQN・PER の手法を組み込む。行動が離散的な環境では、NN の中間層を深くせずとも Q 関数を表現できることから、中間層 64×64 の 3 層とした。学習は Table 6.4 に示した環境で実行した。

Table 6.4 Execution environments

| | |
|-------------|---|
| PC | Intel® Core™ i7-4790K, RAM 8GB |
| Environment | CFD: Cradle STREAM v. 14.1 |
| Agent | Stable Baselines 2.10.1 ^{6,19)} (Python 3.7) |

6.5 解析結果

6.5.1 FCRE の予測モデルの予測精度

予測結果として、検証データの正解値及び予測値の散布図を Figure 6.10 に示す。更に、検証データ及び Cross-Validation の RMSE 及び決定係数を Table 6.4 に示す。

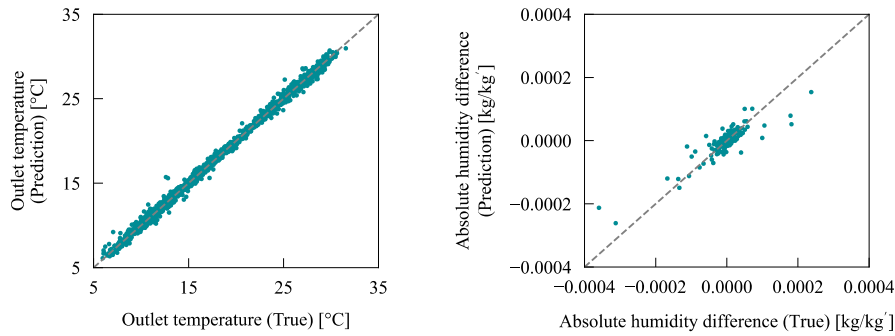


Figure 6.10 Prediction results.

Left: Outlet temperature, Right: Absolute humidity difference

Table 6.5 Prediction accuracy

| | RMSE | R2 |
|--------------------------------------|--|---------------|
| Outlet temperature [°C] | 0.39 (0.40) | 0.996 (0.996) |
| Absolute humidity difference [kg/kg] | 9.8×10^{-6} (10.2×10^{-6}) | 0.745 (0.675) |

Parentheses indicates mean cross-validation score

1 時間後の流出温度は現時点の外気温度や表面温度などと相関が高いため、予測誤差はほとんど生じない。このため、RMSE や決定係数の値から確認できるように、予測精度は良好である。一方、絶対湿度差は特に強い因果関係にある 1 時間後の外気絶対湿度の情報がない中、予測する条件のため予測誤差が大きい。しかし、報酬で計算する上では、細かい誤差は重要ではない。絶対湿度差が正か負かを判定できれば良く、この場合は十分な予測精度を有しており、実用上は差し支えない。本章での報酬 r_2 は、予測値の正負で決まり、分類タスクとみなすことができる。その場合の Confusion Matrix は下表の通りであり、Accuracy = 73.5%、Recall = 67.5%である。

Table 6.6 Confusion matrix of the Counterfactual Predictor

| True Class | Predicted Class | |
|------------|-----------------|----------|
| | Positive | Negative |
| Positive | 518 | 249 |
| Negative | 182 | 675 |

Positive indicates Δx is negative value.

強化学習のエージェントの学習は、正確に予測できていたデータに傾くと考えられ、概ね適切に予測できていたことから、予測ミスによる学習への影響は限定的であると推察する。以上のことから、FCRE では本予測モデルを採用する。

6.5.2 強化学習の進捗

重み調整後の報酬総和 R_1 、 R_2 及びその和である R を Figure 6.11 に示す。 R_1 は Eq. 6.1 に重み w_1 を乗じた各エピソードの報酬総和、 R_2 は Eq. 6.5 に重み w_2 を乗じたものである。4 エピソード目までに最終の報酬総和と同等となっていることから、早い段階から、大まかな方策を獲得していることがわかる。 R_1 、 R_2 を確認すると、 R_1 よりも R_2 の報酬総和が低い傾向にあり、 R_1 を優先的に獲得するような学習結果であることが確認できた。

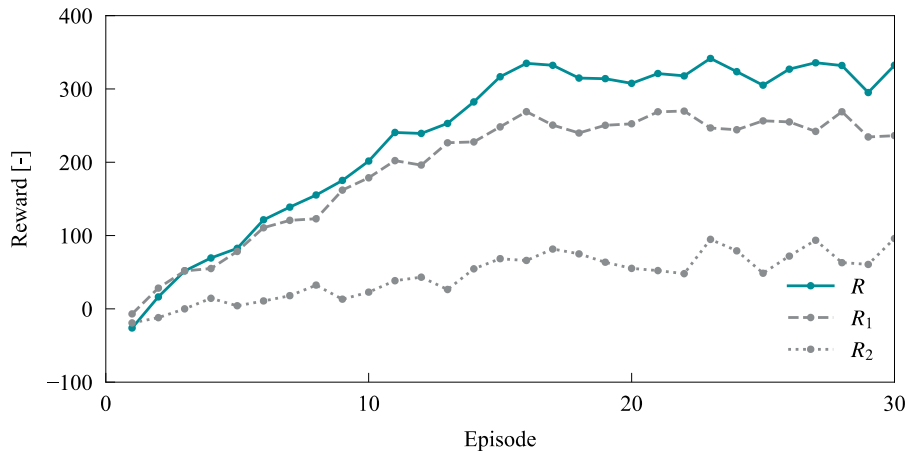
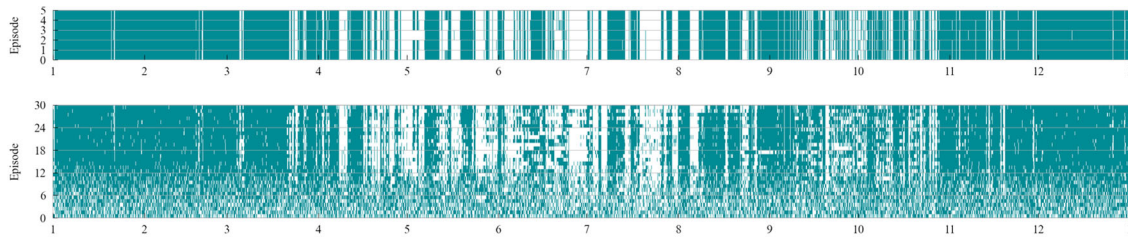


Figure 6.11 Total reward each episode

Figure 6.12 に強化学習が選択した行動のヒートマップを示す。1～3 エピソード目では、 ϵ -greedy 法によるランダムな行動選択が生じやすいことに加え、学習初期のため、方策が固まっていなかったことから、行動の選択に規則性は確認できない。しかし、Figure 6.11 に示した通り、4 エピソード目以降に R_1 及び R_2 の報酬が安定した結果と照らし合わせると、このエピソード以降、 R_2 の報酬を高めるように夏期の外気導入を行わないような方策を獲得していることが確認できる。一方、冬期は結露の可能性が低いいため、 R_1 を高めるためにほとんどの時間帯で外気を導入するように判断している。その後は、エピソードが進行しても大勢に変化は無く、学習初期で獲得した方策と同様の行動を選択し、学習を進めていた。


Figure 6.12 Action heatmap. Colored indicates $a_t=1$

6.5.3 Random 及び Baseline との比較ⁱ

Figure 6.13 に Random、Baseline、強化学習による制御時の外調機処理熱量を示す。年間外調機処理熱量は Random、Baseline、強化学習でそれぞれ 113.6GJ、105.5GJ、108.6GJ であった。年間では Baseline が最も省エネという結果であった。しかし、Figure 6.12 で確認できるように強化学習では冬期の外気導入を積極的に行っていたため、Baseline とほぼ差はない。Baseline と強化学習の処理熱量で差が生じるのは 7～8 月の夏期であった。この時期は表面温度が低い上、外気の湿度が高く結露しやすい条件であるため、Figure 6.12 示した通り、高湿な外気をシステムに導入しないような行動を選択することから、省エネ効果が低減する結果となっている。

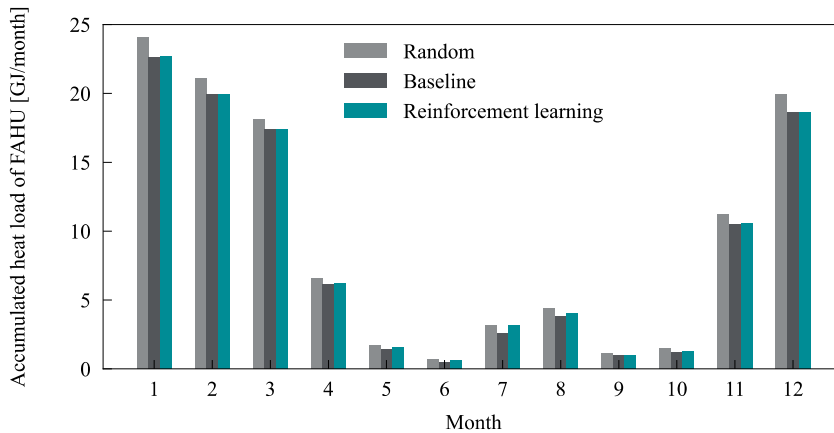


Figure 6.13 Monthly accumulated heat load of FAHU

Figure 6.14 に制御別の結露面積割合を示す。結露面積割合とは、システムの表面積に対して、各時刻で表面に結露水が存在する面積の割合である。尚、グラフが煩雑となるため、7 日ごとの最大値をプロットしている。Random では、7 月初旬にシステム内のほぼすべてで結露が生じるような時間帯（最大で 96.1%）があるなど、システム内部が高湿度環境に暴露されることから、真菌等の増殖による導入外気の空気質汚染が懸念される。また、Baseline も

ⁱ Table 6.2 の CFD の計算条件で述べた通り、地下ピット表面の結露水の蒸発・凝縮潜熱や表面の仮想レイヤの結露水の排水等は計算で再現していないため、結露の過大評価につながっている恐れがある。このため、Figure 6.13 及び Figure 6.14 の比較結果は絶対的な値での比較ではなく、相対的に判断されるべきである。

同様に 6 月中旬から 7 月中旬にかけて大部分で結露が生じることがあり（最大で 72.6%）、空気質汚染が懸念される。一方で、強化学習により制御を行うことで、大幅に結露が抑制できており、結露面積割合は最大で 27.3%であった。この結果から、強化学習による制御を適用することで空気質汚染リスクは大きく低減できるものと推察される。

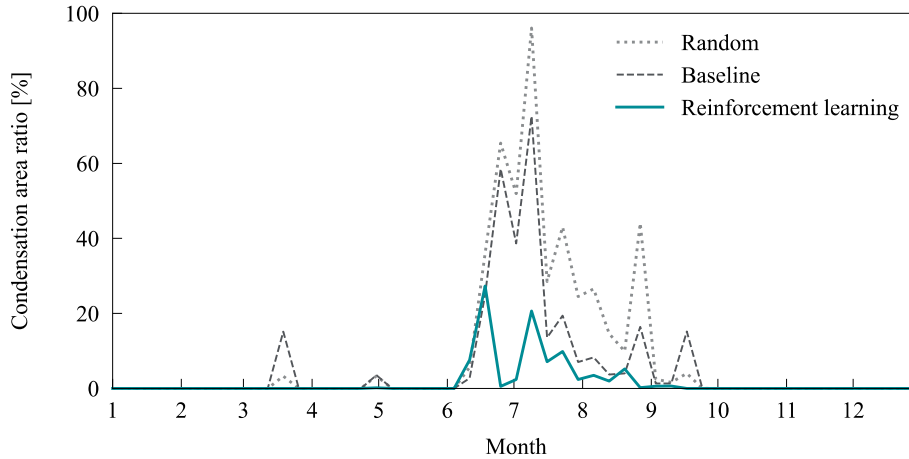


Figure 6.14 Condensation area ratio

Figure 6.15 は Figure 6.8 に示した代表点において、結露水が存在した時間の合計（各ケース、5 回の評価分）を示したものである。

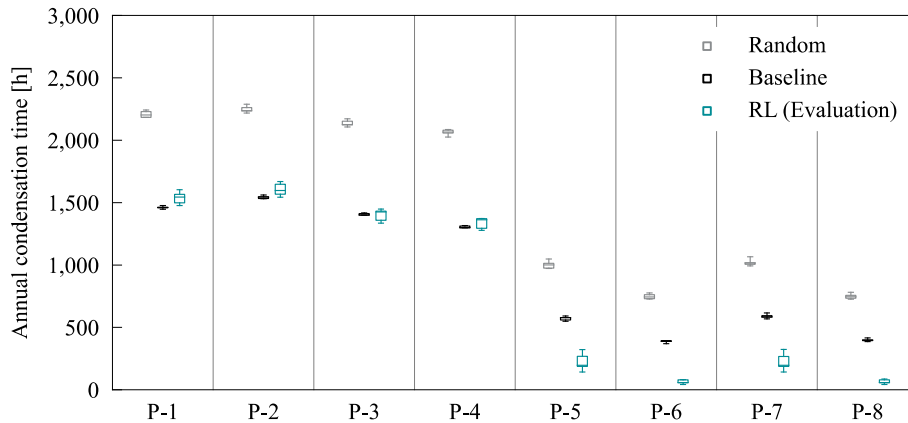


Figure 6.15 Annual condensation time at each representative point

流路前半では、Baseline と RL の差はほとんどない。一方で結露の抑制という観点からは、流路後半において RL が有効であることが確認できた。報酬 r_2 は、一定量の結露の発生の有無に応じて決まる。流路前半部のように夏期の表面温度が比較的高い部位では結露は発生するものの、その量はごく僅かで報酬 r_2 に寄与するほどではないものと推察される。一方で流路後半は表面温度が低く、一度に大量の結露が発生する傾向にある。このため、RL では流路後半の結露を改善する方向に学習していたものと考えられる。

6.5.4 外気導入の判断

Figure 6.16・Figure 6.17・Figure 6.18 に夏期の各時刻の露点温度と代表点の表面温度（最小）及び選択した行動の関係をそれぞれ示す。

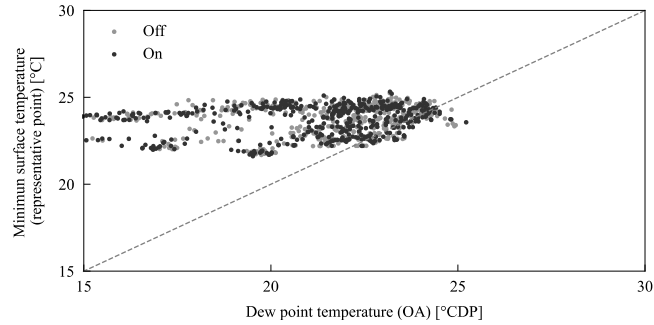


Figure 6.16 Relationship dew point temp. and surface temp. (Random)

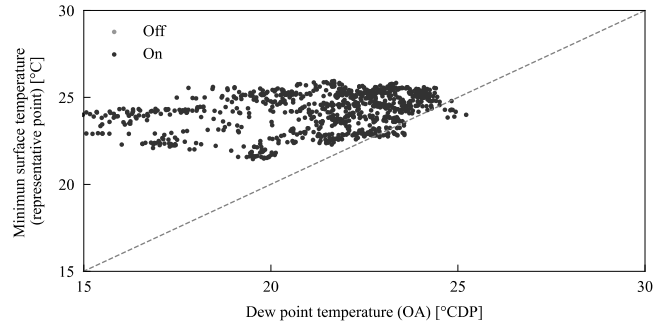


Figure 6.17 Relationship dew point temp. and surface temp. (Baseline)

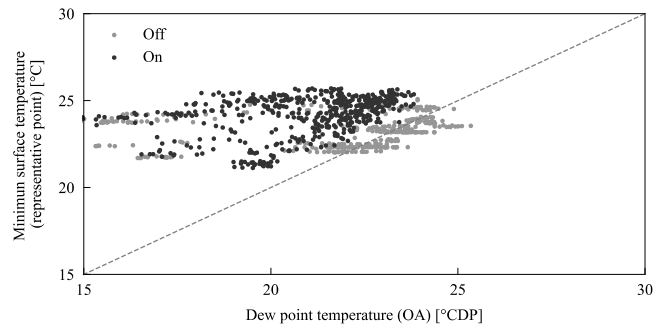


Figure 6.18 Relationship dew point temp. and surface temp. (Reinforcement learning)

まず、Figure 6.16 に示したとおり、Random のケースでは、外気導入の選択が無作為に選択されるため、表面温度が外気露点温度を下回る条件でも外気導入する場合があることがわかる。このため、結露時間割合や結露面積割合が高い結果につながった。Baseline の Figure 6.17 は確実に外気導入を行うことから、同図では Off の行動がない。Figure 6.14 や Figure 6.15 で示した結露状況の結果において、Baseline のほうが結露状況が改善されていた理由としては、Random では外気絶対湿度が低く内部の結露水が蒸発側に遷移する状況でも外気導入が

オフを選択する場合があるため、結露水が除去される機会が少ないためと推察される。その観点から、Baseline のように継続的に外気導入を行うほうが良い結果となった。最後に、Figure 6.18 に示した強化学習の判断結果では、外気露点温度よりも表面温度が低い状況（同図の斜め線の下部）では、積極的に外気を導入しないような行動を選択していたため、結露は抑制できていた。斜め線の上部で外気導入 On の判断がなく、若干の余幅がある理由は、同図で示した代表点以外の部位で外気露点温度と表面温度が近いもしくは表面温度のほうが低い状況が発生するためと推察される。また、表面温度が外気露点温度よりも高い状況では結露が生じる可能性が低いいため、積極的な外気導入を実施していた。熱的な観点からの強化学習の判断結果を Figure 6.19 に示す。

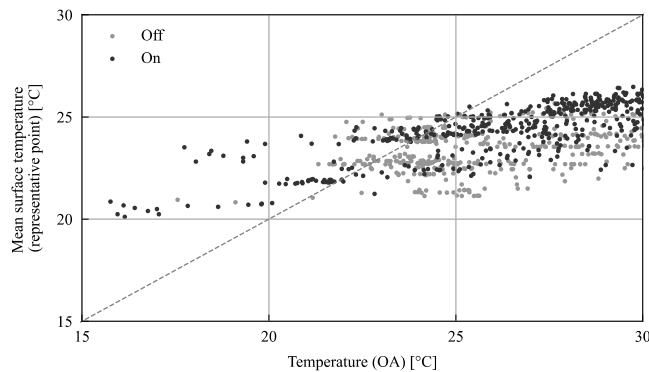


Figure 6.19 Relationship OA temp. and surface temp. (Reinforcement learning)

同図は x 軸を外気温度、y 軸を代表点の平均表面温度としたものである。同図の y 軸の平均表面温度 20～25 の範囲に着目すると外気導入 On のデータ群において、Figure 6.18 に示したとおり露点温度が 25 を超えることがほとんどない（結露が発生しない）ため、省エネを目指して外気導入を行っていたことが伺える。

6.5.5 学習済み Agent の行動確率

実際に Figure 6.20～Figure 6.41 にて学習済みの Agent を用いた行動確率の感度解析から、Agent が省エネを目指す方策や結露を回避する方策を学習できたか考察する。同図は状態 S の内、x 軸の状態値を除き、 S をそれぞれ 0.0～1.0（正規化済み）とした条件で、 x_o を 0.0～1.0 の範囲で動かした場合の行動確率であり、行動確率が 0.5 を超えると Agent は $a_i=1$ （8,100m³/h でのシステム経由の外気導入）を選択する。尚、正規化に用いた最大・最小値は Table 6.7 に示した通りである。

Figure 6.30 のように露点温度が高いと結露発生が同図より、結露が生じにくい条件（ S が大きい＝表面温度等が高い）では x_o には依存せず、 $a_i=1$ を選択することがわかる。一方で、結露が生じやすい条件（ S が小さい＝表面温度等が低い）では、 x_o の上昇とともに $a_i=0$ を選択し、内部での結露発生を回避する傾向が見て取れた。

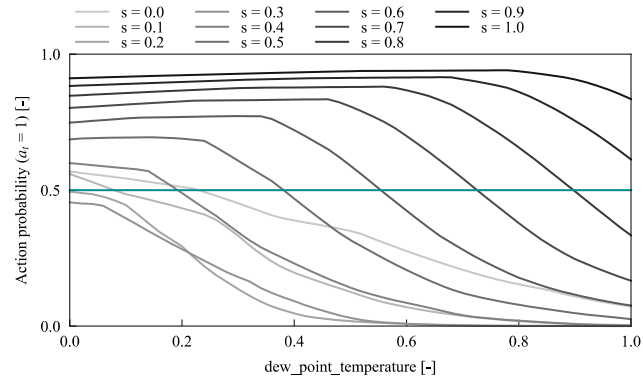


Figure 6.20 Action probability (Dew point temperature)

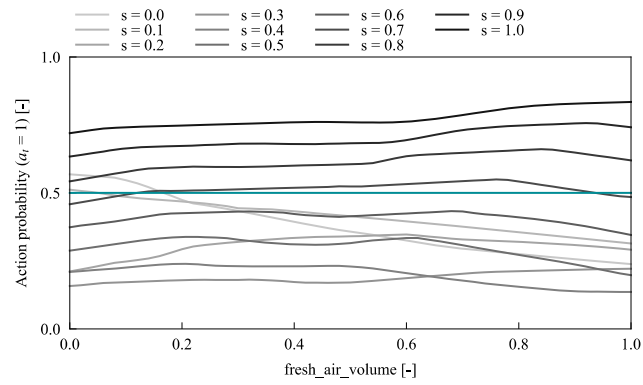


Figure 6.21 Action probability (Fresh air Volume)

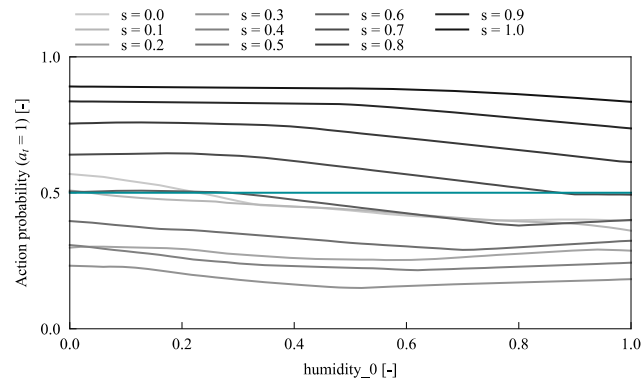


Figure 6.22 Action probability (Humidity at P0)

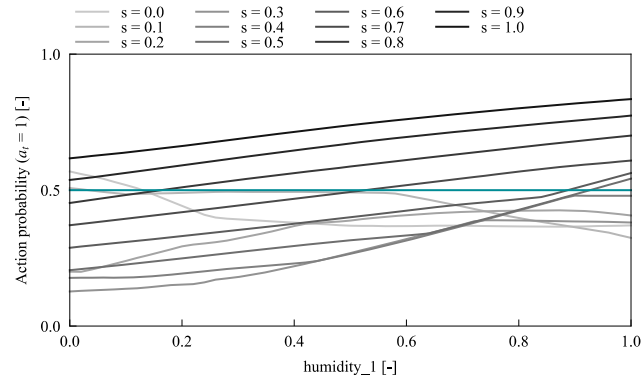


Figure 6.23 Action probability (Humidity at P1)

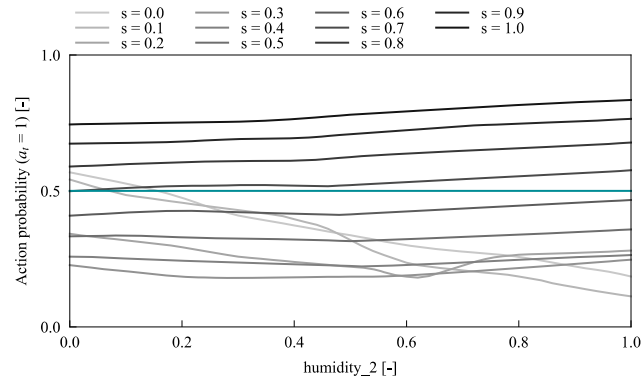


Figure 6.24 Action probability (Humidity at P2)

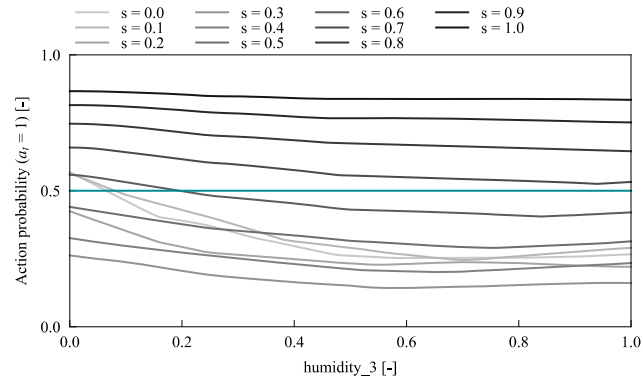


Figure 6.25 Action probability (Humidity at P3)

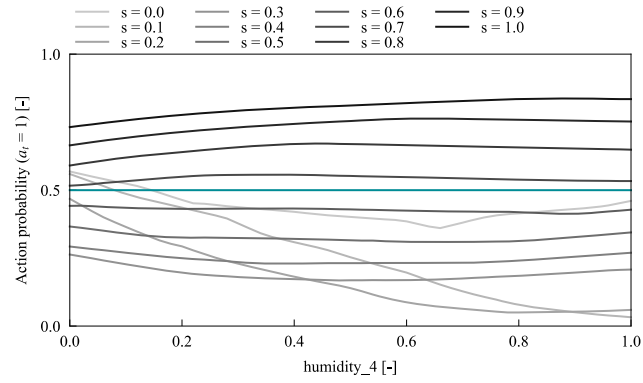


Figure 6.26 Action probability (Humidity at P4)

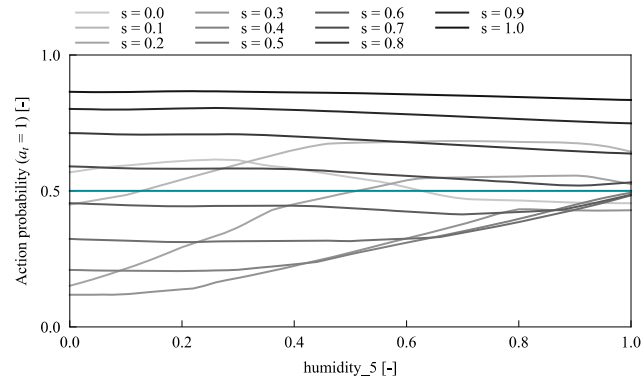


Figure 6.27 Action probability (Humidity at P5)

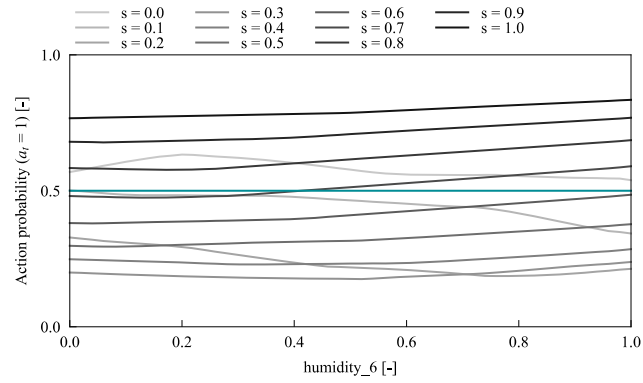


Figure 6.28 Action probability (Humidity at P6)

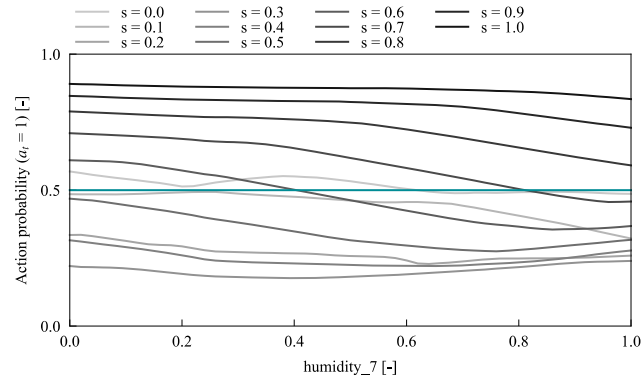


Figure 6.29 Action probability (Humidity at P7)

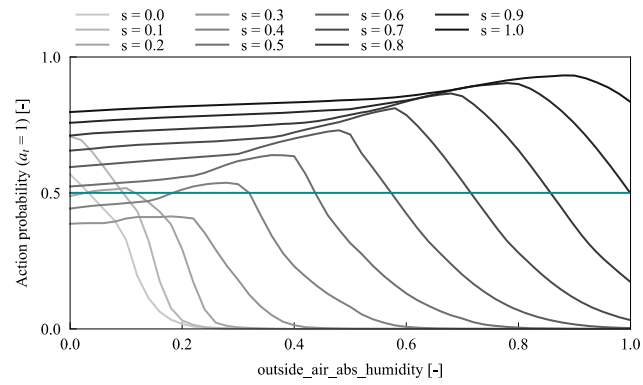


Figure 6.30 Action probability (Outside air absolute humidity)

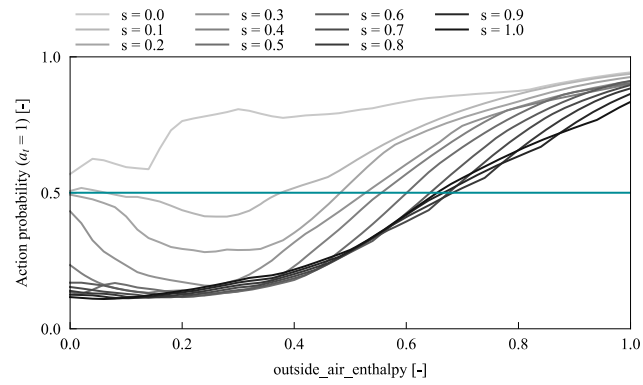


Figure 6.31 Action probability (Outside air enthalpy)

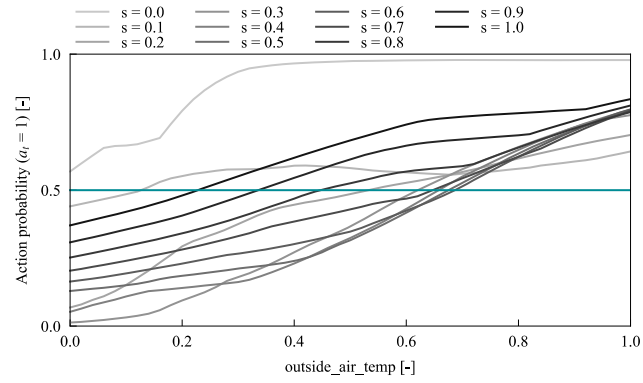


Figure 6.32 Action probability (Outside air temperature)

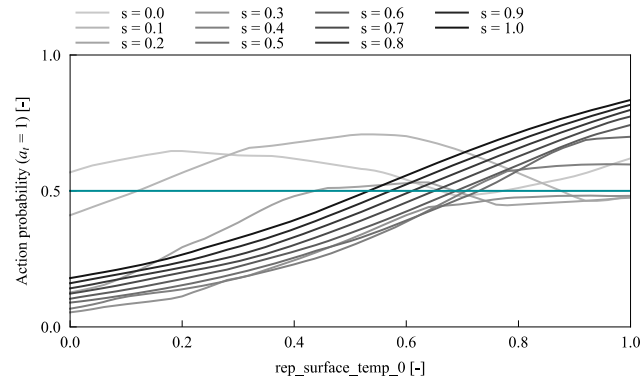


Figure 6.33 Action probability (Surface temperature at P0)

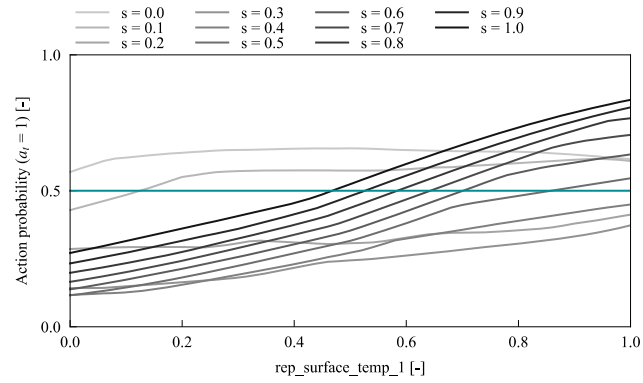


Figure 6.34 Action probability (Surface temperature at P1)

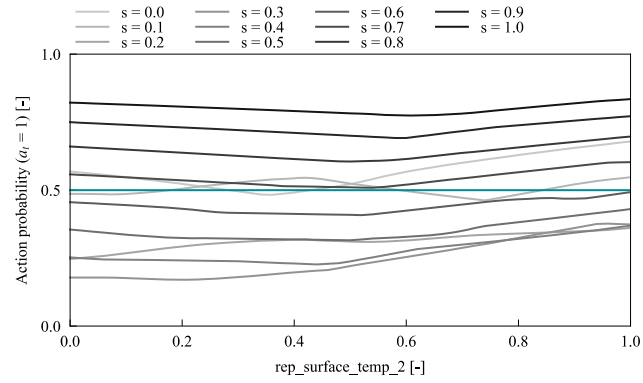


Figure 6.35 Action probability (Surface temperature at P2)

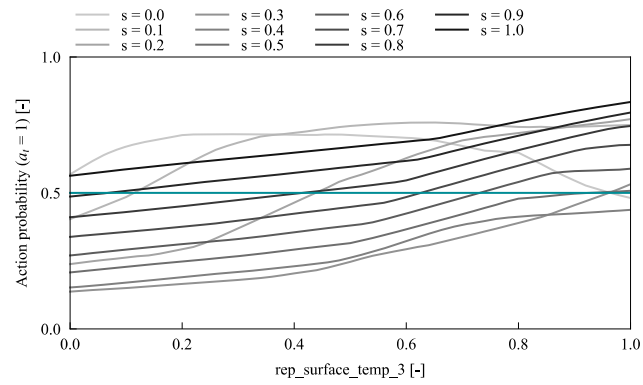


Figure 6.36 Action probability (Surface temperature at P3)

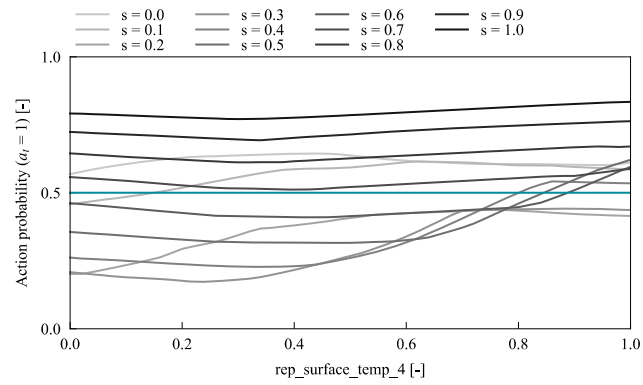


Figure 6.37 Action probability (Surface temperature at P4)

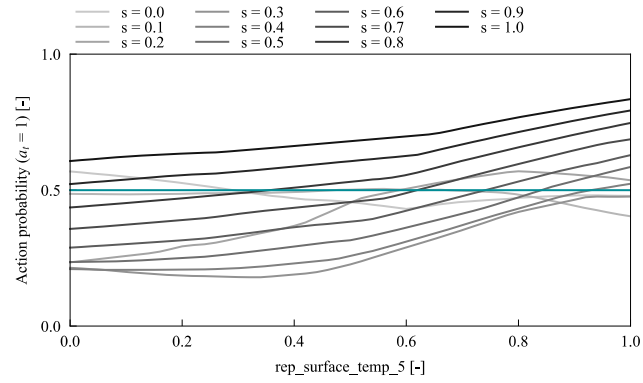


Figure 6.38 Action probability (Surface temperature at P5)

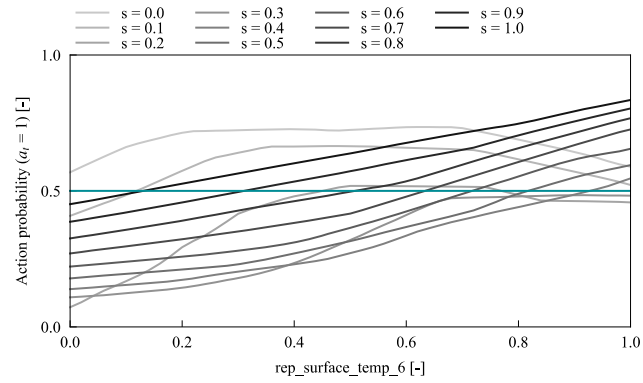


Figure 6.39 Action probability (Surface temperature at P6)

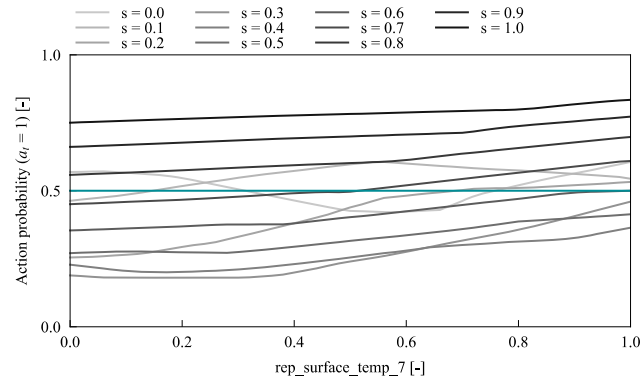


Figure 6.40 Action probability (Surface temperature at P7)

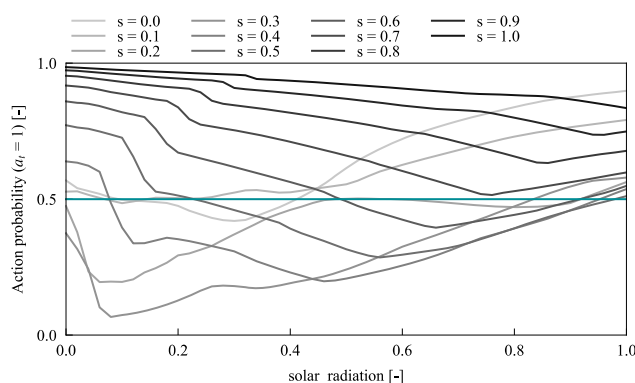


Figure 6.41 Action probability (Solar radiation)

Table 6.7 Min/Max Values for normalization

| States | Min | Max | States | Min | Max |
|--------------------------|-----|-------|-------------------------|-----|-------|
| outside_air_temp | -10 | 40 | humidity_0 | 0 | 100 |
| outside_air_abs_humidity | 0 | 0.025 | humidity_1 | 0 | 100 |
| outside_air_enthalpy | 0 | 100 | humidity_2 | 0 | 100 |
| solar_radiation | 0 | 1000 | humidity_3 | 0 | 100 |
| dew_point_temperature | -20 | 40 | humidity_4 | 0 | 100 |
| rep_surface_temp_0 | 0 | 30 | humidity_5 | 0 | 100 |
| rep_surface_temp_1 | 0 | 30 | humidity_6 | 0 | 100 |
| rep_surface_temp_2 | 0 | 30 | humidity_7 | 0 | 100 |
| rep_surface_temp_3 | 0 | 30 | fresh_air_volume | 0 | 8100 |
| rep_surface_temp_4 | 0 | 30 | outlet_air_temp | -10 | 40 |
| rep_surface_temp_5 | 0 | 30 | outlet_air_abs_humidity | 0 | 0.025 |
| rep_surface_temp_6 | 0 | 30 | | | |
| rep_surface_temp_7 | 0 | 30 | | | |

6.6 まとめ

本章では、土壤熱交換システムの運用制御の最適化を目指し、省エネ効果を維持しつつ、導入外気の空気質汚染リスクを低減することを目的として強化学習による学習環境の構築並びに学習を実施した。下記に得られた知見を示す。

- 1) 筆者が開発した土壤熱交換システムの長期性能予測手法を用いて強化学習の環境を構築した。
- 2) 強化学習の報酬の設計にあたっては、実際に行動した結果の評価のみならず、反事実の行動も予測・評価し、双方を比較することで、強化学習の Agent が選択した行動を相対的に評価する手法をとった。結果として少ないエピソードで大まかな方策を獲得することができ、学習の収束性が高いという結果が得られた。

- 3) 強化学習の制御時とスケジュールに応じて制御を行った場合とを比較すると、外調機処理熱量は約 1.3%増加したものの、システム内部での結露発生的大幅な抑制が可能であることが示唆された。
- 4) 強化学習の行動選択では、結露発生の可能性の高い夏期において、システム経由の外気導入を制限する傾向にあった。また、冬期は結露が発生しにくい条件であるため、ほとんどの時間においてシステム経由で外気を導入する判断を下していた。
- 5) 強化学習を用いた制御により、省エネ性と導入外気の空気質汚染の抑制を両立させた運用制御が可能であることを確認した。

参考文献

- 6.1) 吉岡沙野, 田中宏明, 奥宮正哉, 尹奎英: CO₂ 濃度制御・クールヒートトレンチ・全熱交換器を組み合わせた外気負荷削減システムの効果検証 第2報 クール/ヒートトレンチと全熱交換器の導入効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 1275-1276, 2011.7
- 6.2) Wang, Z. and Hong, T.: Reinforcement learning for building controls: The opportunities and challenges, Applied Energy, Vol. 269, 2020.7
- 6.3) Wei, T., Wang, Y. and Zhu, Q.: Deep Reinforcement Learning for Building HVAC Control, Proceedings of the 54th Annual Design Automation Conference 2017, 2017.6
- 6.4) Valladares, W., Galindo, M., Gutiérrez, J., Wu, W., Liao, K., Liao, J., Lu, K. and Wang, C.: Energy optimization associated with thermal comfort and indoor air control via a deep reinforcement learning algorithm, Building and Environment, Vol. 155, pp. 105-117, 2019.3
- 6.5) 池田伸太郎, 大岡龍三: 地域エネルギーシステムの最適化における 学習的探索手法と機械学習の複合アルゴリズムの開発 第2報 建物間熱融通システムの運用最適化における強化学習との比較, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 254, pp. 23-32, 2018.5
- 6.6) 池田伸太郎, 大岡龍三: 地域エネルギーシステムの最適化における学習的探索手法と機械学習の複合アルゴリズムの開発 第1報 蓄熱槽を含む地域冷暖房システムにおける最適運用計画決定手法, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 42, pp. 11-20, 2017.4
- 6.7) 工藤和樹, 森太郎: 機械学習を利用した蓄熱換気予熱システムの制御手法の開発, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 84, No. 759, pp. 515-524, 2019.5
- 6.8) MathWorks: Reinforcement Learning Toolbox (online), <https://jp.mathworks.com/products/reinforcement-learning.html> (accessed 2021.5.19)
- 6.9) OpenAI: Gym, <https://gym.openai.com/> (accessed 2021.5.19)

- 6.10) Joachims T. and Swaminathan A.: Tutorial on Counterfactual Evaluation and Learning (SIGIR '16), Cornell University (online), <https://www.cs.cornell.edu/~adith/CfactSIGIR2016/> (accessed 2020.12.10) (参照 2020.12.10)
- 6.11) 日本建築学会：拡張アメダス気象データ, 日本建築学会, 2000
- 6.12) Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q. and Liu, T: LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree, Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'17), 2017.12
- 6.13) Chen, T. and Guestrin, C.: XGBoost: A Scalable Tree Boosting System, arXiv: 1603.02754, 2016.3
- 6.14) Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., Graves, A., Riedmiller, M., Fidjeland, A. K., Ostrovski, G., Petersen, S., Beattie, C., Sadik, A., Antonoglou, I., King, H., Kumaran, D., Wierstra, D., Legg, S. and Hassabis, D.: Human-level control through deep reinforcement learning, Nature, Vol. 518, pp. 529–533, 2015.2
- 6.15) van Hasselt, H., Guez, A. and Silver, D.: Deep Reinforcement Learning with Double Q-learning, arXiv: 1509.06461, 2015.9
- 6.16) Wang, Z., Schaul, T., Hessel, M., van Hasselt, H., Lanctot, M. and de Freitas, N.: Dueling Network Architectures for Deep Reinforcement Learning, arXiv: 1511.06581, 2015.11
- 6.17) Schaul, T., Quan, J., Antonoglou, I. and Silver, D.: Prioritized Experience Replay, International Conference on Learning Representations 2016 (ICLR 2016), 2016.5
- 6.18) Akiba, T., Sano, S., Yanase, T., Ohta, T. and Koyama M.: Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework, Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (KDD '19), pp. 2623-2631, 2019.7
- 6.19) Hill, A., Raffin, A., Ernestus, M., Gleave, A., Kanervisto, A., Traore, R., Dhariwal, P., Hesse, C., Klimov, O., Nichol, A., Plappert, M., Radford, A., Schulman, J., Sidor, S. and Wu, Y: Stable Baselines, <https://github.com/hill-a/stable-baselines> (accessed 2020.12.10)

第7章 総括

7.1 総括

本論文では、土壤熱交換システムの諸性能の予測を可能とするために、計算負荷を低減した非定常 CFD をベースとした長期性能予測手法の開発を行った上で、同手法を評価関数とした逐次近似最適化による設計変数の最適化及び同手法を環境とした強化学習による運用制御の最適化を実施した。第 1 章では研究の背景及び目的を示した。第 2 章では研究対象である土壤熱交換システムを扱った既往研究レビューを行った。第 3 章では、本論文での開発等に関連する CFD、最適化、強化学習についての理論的な背景の解説を行った。第 4 章では、土壤熱交換システムの長期性能予測手法の開発・検証を目的として、現実的な解析時間で予冷・予熱効果の熱的な性能予測を行うことのできる計算手法の提案を行い、実在オフィスの地下ピットを対象に年間性能予測を実施すると共に、従来の手法との比較により提案手法の有効性を検証した。更に、同性能予測手法を用いた結露評価手法の提案を行い、真菌の増殖予測モデルと連成させることで、空気質汚染リスクと予冷・予熱効果の両面から外気導入手法の検討を行った。第 5 章では逐次近似最適化によるシステム設計の最適化を主な目的としており、土壤熱交換システムの設計段階で、設計者側の要求性能に応じて設計変数を検討できる応答曲面や解の候補の提示による設計資料等の整備を行った。第 6 章では、強化学習を用いた土壤熱交換システムの最適制御則の構築を目的として、同システムの運用最適化問題を解くために長期性能予測手法を強化学習の環境として、強化学習による運用制御の有効性を検証した。強化学習の報酬の設計に際しては、反事実の行動の結果を報酬計算に組み込む Factual and Counterfactual Reward Estimation を提案した。以下に本論文で得られた知見を示す。

7.1.1 長期性能予測手法の開発（第 4 章）

- 1) Ar 数が小さく慣性力が支配的な流れ場においては浮力の影響が小さいことから長期的に見ても流れ場はほとんど変化しない。このため、非連成解析で使用する流れ場による精度の依存性は確認できず、従来の完全連成解析と比較して年間取得熱量の誤差は 1% 以下であった。更に、Ar 数が大きく、流れ場が浮力の影響を受ける場合の非連成解析に関しても、僅かに精度が低下するものの、完全連成解析との誤差は 3% 以下であった。
- 2) 完全連成解析による年間性能予測の計算時間として数十日を要した。非連成解析を用いることにより 6 時間以内での解析が可能となり、本提案手法は計算コストと解析精度の双方を両立させた設計段階における年間性能予測手法として十分有用であることを確認した。

- 3) 非連成解析に対して湿度輸送方程式を連成させた場合でも、大幅な解析時間の低減が可能であり、年単位での結露性状と予冷・予熱効果の把握が可能となった。
- 4) 同一の外気導入部・外気導入量でも、外気の取り入れ口を1つから2つにすると予冷・予熱効果が数十%のオーダーで低下した。
- 5) 3月や9月、また冬季の雨天日等でも結露が発生する可能性が示唆され、雨天時には土壤熱交換システムの利用を制限するなどの対策が有効であると推察された。
- 6) 外気の導入経路が複雑であった場合でも、結露が発生する可能性の高い点に表面温度の計測点を置き、露点温度制御を導入することで結露の発生を抑制できる可能性を有していた。また、露点温度制御の導入により夏季の予冷効果が1~3割程度低下したが、冬季の予熱効果にはあまり寄与しないことが示唆された。以上よりシステム利用時における結露発生と省エネルギーのトレードオフの関係性が示唆された。
- 7) 結露時間割合と菌糸長さは対数の関係にあった。これは、使用した真菌の増殖予測モデルで扱われる胞子の発芽、菌糸の成長は共に湿度依存性が強く、結露状態（相対湿度100%）が数時間継続しただけで、胞子内の含水率が上昇し発芽と判定したり、成長速度が5mm/hになったりと、結露の発生が菌糸長さに多大な影響を与えたためであると推察された。

7.1.2 逐次近似最適化によるシステム設計の最適化（第5章）

- 1) 設計変数を地下ピットの面風速と一階床面の断熱材厚さとして外気負荷削減率と結露リスクのメタモデリングを実施した。外気負荷削減率は線形的な減少の形をとったが、結露リスクは非線形で多峰性に富む形となった。
- 2) 結露リスクは地下ピットの面風速 $x_1=0.01\text{m/s}$ 、一階床面の断熱材厚さ $x_2=0.08\text{m}$ の場合に最大となった。一方で大域解は $x_1=1.00\text{m/s}$ 、 $x_2=0.09\text{m}$ にあるが、 $x_1=0.25\text{m/s}$ 、 $x_2=0.09\text{m}$ 、 $x_1=1.00\text{m/s}$ 、 $x_2=0.00\text{m}$ などに複数の局所解が存在した。
- 3) 最適解の分布性状として、外気負荷削減率と外気導入量は強いトレードオフの関係にあり、パレートフロントが明確に現れていた。
- 4) x_2 は $0\text{m} \sim 0.02\text{m}$ 、 0.09m に解の候補が存在しており、設計時には外気導入量の候補の中で上記の設計変数を含む解を外気負荷削減率及び x_2 と照らし合わせながら選択すべきと考えられる。

7.1.3 強化学習による運用制御手法の開発（第6章）

- 1) 強化学習の報酬の設計にあたっては、実際に行動した結果の評価のみならず、反事実の行動も予測・評価し、双方を比較することで、強化学習の Agent が選択した行動を相対的に評価する手法をとった。結果として少ないエピソードで大まかな方策を獲得することができ、学習の収束性が高いという結果が得られた。

- 2) 強化学習の制御時とスケジュールに応じて制御を行った場合とを比較すると、外調機処理熱量は約 1.3%増加したものの、システム内部での結露発生的大幅な抑制が可能であることが示唆された。
- 3) 強化学習の行動選択では、結露発生の可能性の高い夏期において、システム経由の外気導入を制限する傾向にあった。また、冬期は結露が発生しにくい条件であるため、ほとんどの時間においてシステム経由で外気を導入する判断を下していた。
- 4) 強化学習を用いた制御により、省エネ性と導入外気の空気質汚染の抑制を両立させた運用制御が可能であることを確認した。

7.2 課題

第 4 章以降で想定しているシステム性能のうち、省エネルギー効果は厳密に言えば土壌熱交換システムを導入することによる空調機+外調機の消費エネルギーの削減効果である。これは、建物 1 階床面からシステムへ熱貫流の影響があり、場合によっては空調分をシステム内で回収することも考えられ、建物全体での熱の流れを考慮する必要があるためである。この点に関しては本論文では、「外調機のみ」の省エネ効果を見ていたが、本来であれば建物全体を評価対象として拡張しておく必要がある。このため、全体での省エネ効果の検討については CFD+エネルギーシミュレーションツールとの双方向の連成解析によって行うことを今後の課題としている。

第 5 章にて実施したメタモデリングについては設計変数を 2 種、目的関数を 3 種と応答曲面を実運用時に用いる上では考慮する設計変数が不足している。メタモデリングの第一段階であったため、考慮する項目を限定したが、考慮する設計変数を増やすことでより普遍的な設計資料の整備につながるため、今後は設計変数を増加させた上でのメタモデリングも視野に入れている。

第 6 章において、割引率などのハイパーパラメータや報酬の重み付けなどのパラメータスタディを行っておらず、それらの設定によっては、制御性の向上の可能性や制御時の特性が大きく異なってくると予想される。このため、パラメータスタディ等を通じて、制御結果との関係性を明らかにする必要があると考えている。また、Multi Discrete Action 環境での検証も今後の課題として考えている。その他、実建物への適用に向けた課題として、学習済みの NN を制御ロジックに直接組み込んだ場合、CFD による環境と現実環境との乖離により適切に制御が実施できない可能性がある。この点については、学習済みの NN を用いて現実世界でリアルタイムに制御しつつ学習を行うオンライン学習、実建物にて従来制御を 1 年程度行い、データを蓄積した上で、そのデータを用いて学習済みの NN を更新するオフライン学習等、様々な手法が考えられる。このため、実建物へ適用を踏まえ、学習済みの強化学習モデルの汎化性能及び適切な再学習の手法についてシミュレーションや実環境をもとに検証を行う必要があると考える。

謝辞

本論文は筆者が北九州市立大学国際環境工学部から北九州市立大学大学院国際環境工学研究科環境工学専攻（博士前期課程・博士後期課程）に在籍中の４年半の研究成果をまとめたものです。

本論文を進めるにあたり、ご指導・ご鞭撻を賜りました、北九州市立大学 国際環境工学部 白石靖幸教授に大変深く感謝いたします。本論文の第４章の解析のプログラムについては株式会社ソフトウェアクレイドル安永龍一氏に有益な助言を頂きました。ここに同氏に対して感謝の意を表します。さらに、日頃、親身になって接していただいた、富安雄太氏、堤結城氏、牟田彬俊氏を始めとする研究室の方々にも心より深く感謝いたします。

また、本論文の一部は公益財団法人 LIXIL 住生活財団の調査研究助成及び科学研究費補助金(課題番号:19H02301)を受けたものです。ここに記して深甚なる謝意を表します。

2021 年 9 月末日

塘田研仁