

学位請求論文

中国大都市を対象とした廃プラスチック
回収・再資源化システムの最適化に関する研究

平成 28 年 9 月 20 日

北九州市立大学 大学院 国際環境工学研究科
環境システム専攻 環境資源システムコース

叢 日超

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 中国における廃プラスチックの現状	1
1.1.2 廃プラスチックリサイクルシステムの課題	2
1.1.3 システム再構築の必要性	3
1.2 研究の目的と構成	4
1.2.1 研究の目的	4
1.2.2 本論文の構成	4
参考文献	6
第2章 既往研究と本研究の位置づけ	7
2.1 既往研究	7
2.1.1 天津市及び中国における廃プラスチックの現状に関する既往研究	7
2.1.2 廃プラスチック及び廃棄物リサイクルシステム構築に関する既往研究	7
2.1.3 最適化計算に関する既往研究	8
2.1.4 GIS解析に関する既往研究	8
2.1.5 LCAに関する既往研究	9
2.2 本研究の位置づけ	9
参考文献	10
第3章 現地調査に基づく廃プラスチック回収・再資源化の現状と改善策の検討	12
3.1 現地調査の詳細	12
3.2 システムの問題点と改善策の検討	16
3.3 天津市周辺の廃プラスチックフローの推計	19
3.4 結果の考察	23
参考文献	24
第4章 廃プラスチックリサイクルシステムの空間シミュレーションとLCA	25
4.1 諸言	25
4.2 輸送システム改善効果の推計評価	26
4.3 改善システムの環境負荷削減効果	34
4.4 結果の考察	36
参考文献	37

第5章 廃プラスチック収集・運搬システムの最適化	43
5.1 諸言	43
5.2 解析手法	43
5.2.1 発生量とケース設定	43
5.2.2 輸送過程の最適化計算	44
5.3 算出結果	51
5.3.1 中継場数及び輸送車両数の最適解	51
5.3.2 GISを用いた輸送過程の最適化手法	54
5.4 結論	56
参考文献	57
第6章 まとめと今後の課題	58
6.1 まとめ	58
6.2 今後の課題	60

謝辞

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 中国における廃プラスチックの現状

中国の経済発展とともに、プラスチックの生産・消費・廃棄量も急速に増大してきた。深刻化する廃棄物の増大に対処するために、回収・処理システムの整備と、セクターとしての静脈産業の発展が期待されている。中国国家统计局の統計データによると、2013年度中国におけるプラスチック製品の製造量は6,189万トン弱となった。廃家電製品の処理、廃自動車の解体処理、ゴムとプラスチック製品の加工・再製造、省エネ・環境配慮型等の新エネルギー産業等六大産業の発展を中心として、2002年に天津市子牙循環経済産業園区が設立した(図1.1)。2007年に中国の国家級循環経済園区に認定され、2008年日中政府の協議の上で、天津市と北九州市の間に協力協定を締結したことを始め、子牙循環経済産業園区は日中間循環経済協力プロジェクトとして注目されてきた。天津市の都市鉱山基地の役割として、国内回収及び海外から輸入された廃棄物から有価物を取り出し、原材料として製造業に提供している。2009年1月1日から施行された「中華人民共和国循環経済促進法」は2008年8月29日に中国政府にて公布された。中国北部最大の静脈産業集積地として子牙循環経済産業園区が発展しつつあるが、天津市付近には「廃プラスチック産業の巨人」と呼ばれる河北省文安県が存在する。天津市廃プラスチック関係事業者の話によると、天津市内から回収された廃プラスチックは粗処理を経てほとんど文安県にある廃プラスチックリサイクル業者に転売され、そこで再製品化される。文安県の強みは、中国国内のみならず海外にまで及ぶ廃プラスチックの回収ルートを持つことと、再資源化した後に製品を作ることができるサプライチェーンを構築していることにある。一方、廃プラスチックリサイクル産業の発展による水汚染、土壌汚染等の環境問題が深刻化しており、廃プラスチックのリサイクルに伴い環境問題が拡大するという背景が存在することを念頭に、天津市における廃プラスチックのリサイクルシステムの現状¹⁾を読み解くことが必要といえる。

回収拠点(現地で回収亭と呼ばれる)の運営主体が住民に近い建物を借り、人口高密度地域で有価廃棄物の買い取りを展開している。それに対して、インフォーマルセクターとされる業者は、個人回収業者が自転車及び三輪バイクの後部に荷車がついた回収自転車に乗って、郊外の住居地を巡回して中古品を買い取っている。



図 1.1 天津 (Tianjin) 市と子牙 (Zi'ya) の位置

上述したルートから回収された廃プラスチックは、市場（中継場）に運搬され、市場のオーナーに販売される。主な市場は個人が所有・運営しており、安い貸金で人力で分別しているのが特徴である。種類別に分別された廃プラスチックを文安県のリサイクル業者に転売し、買取価格の差による利益を得ている。それに対して、フォーマルな市場では正式な回収企業が所有しているが数は少ない。

天津の廃プラスチックの最終的な販売先である文安県では、主なりサイクル業者はいわゆる家庭内産業であり、自宅の庭での手作業による分別や洗浄を経て、小規模な装置でバケツ等への再製品化を行っている。

1.1.2 廃プラスチックリサイクルシステムの課題

天津市の廃プラスチックの回収は、フォーマルとインフォーマルなセクターが同時に存在している。フォーマルなセクターは政府指定の回収企業が所有する回収拠点であり、今では中国全土に存在している再生資源回収システムである。こういった回収拠点では、廃プラスチックと一緒に他の有価物も同時に買い取っているため、保管場所の確保のために買取品の出荷を迅速にする必要がある。それに対して、インフォーマルなセクターとして個人回収業者らは中古品買取の営業許可を持っておらず、人口密度が低い農村地域において隠れた存在として違法な営業活動を展開している。インフォーマルな回収ルートによる廃プラスチックの流通は、いわばグレーな位置づけである。

インフォーマルな市場は主に一時的な空地に設置されており、地方政府は市場の機能や役割を認めつつも、廃品保管場所を市内から郊外に移転させたいという意向があると考えられる。静脈産業を含む工業の郊外移転は、天津に限らず、中国の都市計画における一つの傾向であり、都市開発が進むにつれ、インフォーマルな市場の用地の確保が困難になる

という中長期的リスクを抱えている。もう一つの問題は、非効率な収集・運搬システムにある。回収拠点と市場の間の運搬については、インフォーマルな市場までの運搬については、個人回収業者は回収自転車や回収三輪車等を利用して廃プラスチックを運搬している。こういったインフォーマル市場は、経済効率性、環境性、労働衛生性の観点から良い状況とはいえない。正式な回収業者が所有するフォーマルな市場では、回収拠点ごとに一定的な回収量に応じて軽量トラックによる運搬が実施されているが、複数の回収拠点を回るようなミルクラン回収方式(巡回回収)は実施されていない。さらに、市場から再生業者までの輸送では、市場にはプレス機がないため、トラックに乗せる際に積載率が 50%しか達しておらず、輸送効率が悪いという問題もある。

「廃プラスチック産業の巨人」と呼ばれる河北省文安県は、廃プラスチックの収集・分類・破砕、さらには再資源化と製品化が行われているが、洗浄廃液による土壌汚染などが問題化しつつある。短期的には政府による取り締まりにより再資源化事業者が操業中止に追い込まれる可能性があり、中長期的には工業団地への集約化などが考えられ、現状の販売先である文安県が安定的に存在することは考えにくい。環境負荷や作業環境への配慮はなく、経済(もうけ)優先のやり方で実施されている。

上述したような問題をまとめると、天津市における廃プラスチックリサイクルシステムのインフォーマルな市場、さらにそれに関連する非効率な収集・運搬システム、販売先での環境汚染問題が課題といえる。

1.1.3 システム再構築の必要性

天津市の地域特性を考えると、システム再構築の必要性があるといえる。まず、中国国内の他のエリアと比べると、天津住民からの廃ペットボトルやプラスチック廃棄製品などの買取価格は、華南地方と比べてほど30%安いという現状がある。廃プラスチック産業として、天津市にはビジネス面の優位性があると考えられる。

もう一つ有利な点としては、回収・運搬効率向上の余地があることである。巡回回収方式や圧縮過程等の導入による、輸送効率化に伴い燃料消費の削減ができると考えられ、安価な買取価格に対してさらにコストを削減することで、巨大な利益を生む可能性がある。

最後のポイントとしては、国内外から集積した廃家電解体の基地として、天津子牙循環経済産業区は天津市政府からの関与が大きいという点である。産業区は用地の取得や基本的な整備が終了しているように、事業進捗度が早いのが特徴である。さらに、市内から産業区まで 1 時間弱で結ぶ高速道路が隣接している。他の都市で計画されているリサイクル団地と比較すると、市政府の関与度合いと事業の進捗度において子牙循環経済産業区は群を抜いている。

上述した問題点とポイントに基づき、天津市に最適なりサイクルシステムの再構築が喫緊の課題であり、環境負荷を考慮する前提でリサイクルシステムの実施を確保するため最

適な方案を提示する必要があるといえる。

1.2 研究の目的と構成

1.2.1 研究の目的

天津市における廃プラスチックリサイクルの現状に対して、環境負荷を考慮しながら、最適な改善策を見つけることによる最適なシステムの提案と提案システムの環境負荷削減効果を求めるのが本研究の目的である。具体的には、文献調査や現地調査等の分析結果と最適化計算結果から現状システムに基づいて最適なシステムの構築を行い、GISを用いてシステム解析して輸送計画の作成と改善ケースと現状ケースの環境負荷削減効果を求める。さらに、LCA手法を用いて環境に与える影響を分析する。

1.2.2 本論文の構成

本論文は、上記の目的に即した研究成果をまとめたものであり、全6章で構成される。各章の関係については、図1.2に示す構成図のようになっている。

第1章では、研究の背景について論じ、本研究の目的と構成を述べた。

第2章では、廃プラスチックに関して、天津市及び中国における廃プラスチックの現状に関する既往研究、廃プラスチック及び廃棄物リサイクルシステム構築に関する既往研究、最適化計算に関する既往研究、GIS解析に関する既往研究、LCAに関する既往研究をレビューしたうえで、本研究分野の研究の現状を明らかにした。その後、既往研究の特徴や不足点等をまとめ、本研究の位置づけを明確にした。

第3章では、天津市にて3回現地調査によるリサイクルシステムにおいて各セクターの現状を明らかにした。現状システムの問題点を把握した上で、それに対する改善策を検討し、仮説として提示した。現地拠点で実施した廃プラスチックの組成調査の結果から廃プラスチックの発生量を推計した。さらに、現地調査と文献調査によるデータ・情報に基づいて天津市の廃プラスチックフローを推計した。

第4章では、3章で推計した廃プラスチックの発生量を機能単位で、GISを用いて空間シミュレーションを実施し、さらに、提案したシステムの環境負荷削減効果をLCAで求めた。GISの応用について具体的には、天津市の廃プラスチックの回収分布図から、中継場と回収拠点の最適な位置を地図上配分し、最短ルートを見つけ、シミュレーションにより廃プラスチックの輸送による移動距離を読み取り、改良トンキロ法を用いてGHG評価を行い、改善策の効果を求めた。提案システムに対して非リサイクルシステムを比較シナリオとして両者間のGHG削減効果を評価した。

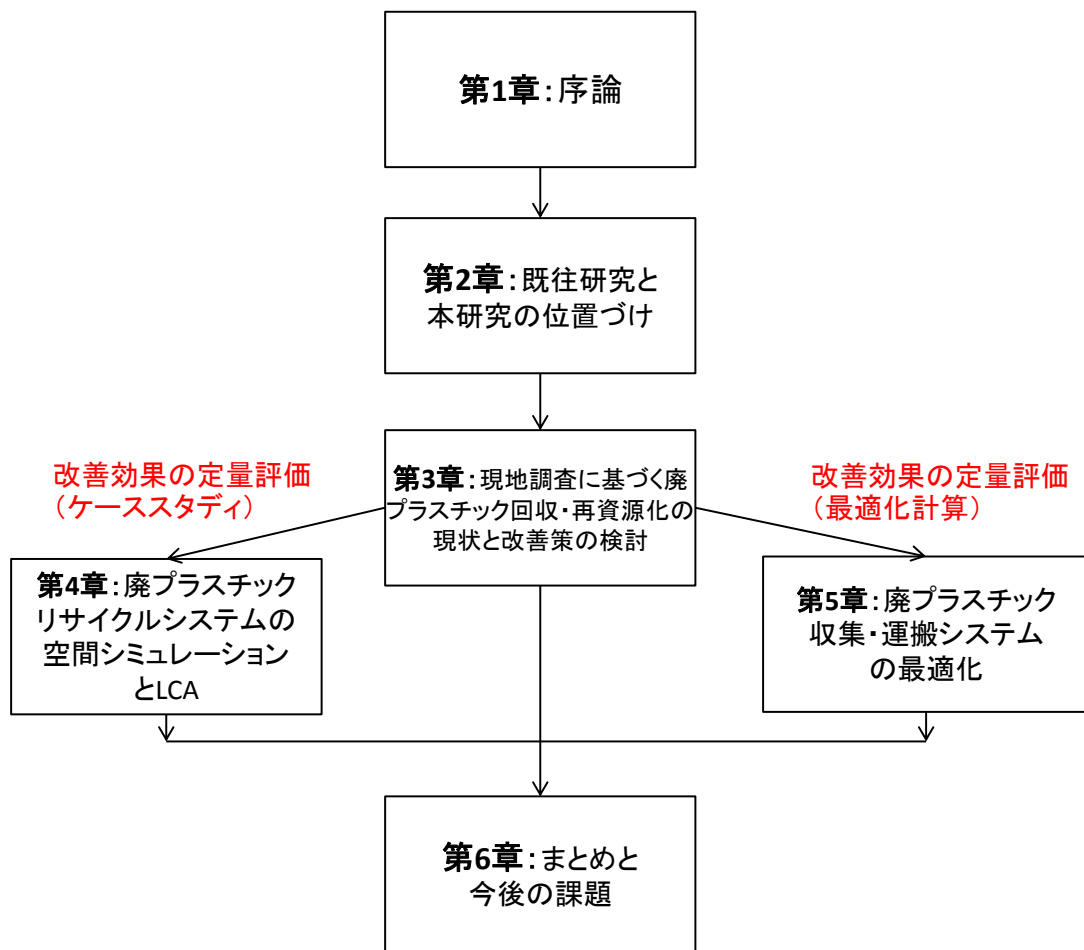


図 1.2 本研究の構成図

第5章では、3章で推計した廃プラスチックの発生量を基づいて、天津市の廃プラスチック収集・運搬システムの最適化問題を検討した。政策パラメータの中でも感度が大きい、中継場数と輸送用車の配分に着目し、それらの最適な決定方法について、検討した。具体的には、GCMの考えを援用し、輸送用車移動距離の計算からコスト及びCO₂排出量それぞれのモデル式を構築した。次に、組合せ最適化問題による近似解法を用いて、中継場数の変更によるコストとCO₂排出量の値分布を求め、中継場数と輸送用車配分数を見出した。さらに、多目的最適化問題として、CO₂排出量を環境コストに換算し、重み係数法で経済コストと環境コストの和を最小にするときのパレート最適解集合を見出し、パレート解の曲線を求め、重み係数の値における最適な中継場数や輸送車両数等を決定した。さらに、コストとCO₂の値をそれぞれ標準化した後に重み係数法でパレート最適解集合の曲線を求めた。これにより、アカウントされるパラメータ数の変動による目的関数の分布傾向が明らかになった。

第6章では、本研究で得られた知見を総括するとともに、結論と課題について述べた。

参考文献

1. 東信太郎：天津市における廃プラスチックの材料リサイクル事業について，
INDUST 11月号， Vol.26, No.11, pp.26-31, 2011

第 2 章 既往研究と本研究の位置づけ

2.1 既往研究

2.1.1 天津市及び中国における廃プラスチックの現状に関する既往研究

プラスチックの消費量に関する地域的な研究は行われていないため、中国の全体的な情報を取り上げた。銭伯章ら¹⁾は、2000～2005年中国におけるプラスチック製品の生産量と合成樹脂の消費量について紹介し、中国における廃プラスチックの回収販売が行われる集積市場の位置分布と廃プラスチックを原料として車の燃料等の再生技術の詳細を取り上げた。楊虎山²⁾は、1990年の天津市における廃プラスチックの年間回収が1,882トンである述べ、包装廃棄物の現状と存在問題について紹介した。

近年は、廃プラスチックの主流な供給源として廃棄家電製品が注目されてきた。Liら³⁾の研究によると、中国では、現在約2,000万人が廃家電回収処理業に従事しているが、廃プラスチックの再生過程から出る有害物質に関する処理が重視されていないため、環境汚染問題が深刻化してきたことが報告されている。朱培武ら⁴⁾の研究結果では、インフォーマルな業者が主導する回収処理で使用した技術が古く、有害廃棄物を処理しないまま排出することにより、重金属等の汚染が中国の各地で引き起こしているとされる。許建林ら⁵⁾は、中国の基準に基づいて、入境廃プラスチックの洗浄の際に出る排水のCOD値、pH値、重金属、揮発性有機化合物等の濃度を計測し分析した結果、COD値が基準値より極めて超えていることや、国の規制にない有害物質の検知を報告した。Fraunhofer⁶⁾は、中国の法律により2000年から廃棄家電製品の輸入が禁止されたが、中古品市場や再生材料等への需要が伸びたため、様々なルートで廃家電が中国に不法に輸入されているようだと言った。廃プラスチックのリサイクルによる問題が発生しつつあるが、李叢志⁷⁾の研究結果では、再生資源としての需要の視点から廃プラスチックの輸入はまだ必要があるとしており、統計データを分析し、中国の資源不足の現状による再生可能な廃プラスチックの必要性と中国政府が廃プラスチック輸入に関する管理措置について述べた。

姚義ら⁸⁾は、アンケートと文献調査等の方法で宜昌市廃プラスチックの回収と処理に関する研究を行った。調査結果により、宜昌市における廃プラスチック主には市内回収してから市外の再生工場に転売されることが報告されている。さらに、天津市を対象地として姚叢容ら⁹⁾は廃棄家電製品の回収処理に関するアンケート調査を行った。

2.1.2 廃プラスチック及び廃棄物リサイクルシステム構築に関する既往研究

Christofides¹⁰⁾の研究結果によると、廃プラスチックの回収は輸送経路問題にモデル化さ

れ、一つ及び複数のデポから地理的範囲内に分布する多くの需要地点までの合理的なデリバリーと回収ルートの設定問題のように解釈している。Fleischmann ら¹¹⁾の研究では、自治体廃プラスチックの回収は逆物流の範囲内である。Beullens ら¹²⁾の研究によると、2種類（アークとノード）の回収方式の組合せは実際にも存在しており、一般的なルーティング問題と対応する。輸送経路問題を現実的な形でモデル化のために、場所の間の距離行列はMicrosoftのMapPointで作成している¹³⁾。代替廃棄物処理施設の導入について評価のために、Rodionov ら¹⁴⁾は、ロシアサンクトペテルブルクの都市固形廃棄物管理システムを同様な方法でモデル化した。

2.1.3 最適化計算に関する既往研究

Ishikawa¹⁵⁾は、家庭系から排出される包装廃棄物のリサイクルのための輸送モデル(Grid City Model: GCM)を提案し、家庭からの廃PETと固形ごみの回収でモデルの実用性を検証した。静脈物流の輸送計画に関する最適化の既存研究として、劉ら¹⁶⁾は、輸送費用の最小化を目的として定式化し、近似解法と分枝限定法による厳密解法を提案した。佐藤ら¹⁷⁾は、廃棄太陽電池パネルの輸送計画問題に着目し、コスト評価でストックヤードの最適配置を検討した。

2.1.4 GIS解析に関する既往研究

GIS手法も、いくつかの廃棄物管理システムに応用されてきた。例えば、Senthilら¹⁸⁾は、GISを用いて重心法で廃棄ビンの空間分布を推計し、廃棄ビン回収箱の位置を提案した。Draganら¹⁹⁾は、生徒の送迎による輸送コストを低減するために2段階の再最適化アプローチを導入した。Kyessiら²⁰⁾は、GISを用いて固体廃棄物の収集コストの最小ルートを設定し、既存ルートと比較を行った。Tavaresら²¹⁾は、廃棄物回収のため回収・運搬過程による燃料消費の最小化をケーススタディとして3Dルートのモデルを作成した。Bhambulkarら²²⁾は、GISのネットワーク分析機能を活かして生活ごみ回収の最短距離ルートを作成した。

地域のリサイクルシステムにおける輸送問題について、田畑ら²³⁾は、愛知県の製造業からの紙くずを評価対象として1km²メッシュの発生分布を推計し、グラフ理論を用いて輸送距離が最小となる収集・輸送領域を定め、各領域における再資源化施設の配置を遺伝的アルゴリズムで解いた。村上ら²⁴⁾は、GISデータを利用して1km²メッシュのごみ発生分布を求め、収集施設からの距離と発生分布の図をもとにトリップと距離を求め、グリッドシティモデルと同様の方法を用いて移動距離を求める方法を示した。寺川ら²⁵⁾は、京都市を対象として廃食用油のBDF化と軽油代替による市バスへの利用に伴う環境負荷をライフサイクルの観点から評価しているが、収集・輸送プロセスの解析において、GISを利用して最短距離のルートを検索し、走行距離を求めた。藤原ら²⁶⁾は、GISを用いてごみ収集域から中継輸送

施設までの輸送距離を求める方法を提案し、全ごみ収集車の総移動距離を最小にする中継輸送施設の位置をGISを用いて探索する実用的な方法を提案した。さらに現状ケースとの収集輸送距離を比較し、グリッドシティモデルとの比較も行った。

2.1.5 LCAに関する既往研究

廃プラスチックの材料リサイクルのLCAに関しては、砂田²⁷⁾はPETボトルへの印刷技術について、直接印刷技術を導入する場合(ケミカルリサイクル)と現状のラベルを引き続き使用する場合(材料リサイクル)との環境負荷をLCAを用いて評価した。MRの方はCRより環境負荷が小さい結果を得た。廃プラスチックのケミカルリサイクルについては、福原ら²⁸⁾は、横浜市のプラスチック製包装容器のリサイクルを評価対象として、高炉還元剤原料とアンモニア原料化に対するLCAを実施した。リサイクルフローに投入することでCO₂及び残渣排出量はかなり減少する結果を得た。またNO_x、SO_x排出量は増加するものの、焼却を行わないことによるCO₂排出量とエネルギー消費量の削減に大きく貢献する結果も得た。稲葉ら²⁹⁾は、その他プラスチック製容器包装の管理システム(ごみ焼却発電によるサーマル・リサイクル、鉄鋼産業におけるコークス炉原料化及び高炉原料化によるケミカル・リサイクル)のLCAについて、適切なシステム境界の設定方法について検討した。

2.2 本研究の位置づけ

以上のように、本研究のスコープに関連する既往研究を整理したが、中国大都市を対象とした廃プラスチック発生量推計に関する研究はなく、同様に中国大都市を想定した廃プラスチックの材料リサイクルのLCAに関する研究もない。さらに、廃プラスチックの回収・輸送の最適化構築に関する既往研究がほとんど存在しないが、これは企業秘密に関わる廃プラスチック回収のデータやが入手しにくいことや、廃プラスチックの材料リサイクルに関するインベントリデータが整備されていないこと等が主な原因だと考えられる。

本研究では、可能な限り現地調査を通して中国のオリジナルなデータを収集し、それを使用して適切な方法を用いて分析を行うことを前提に、現段階でどうしても入手できないデータについては、日中両国のデータの類似性を十分に検討した上で、類似性の高い日本のデータを利用することで定量的な評価を行うこととした。

現地の最新情報、データ入手のために、3回現地調査を経て天津市の廃プラスチックに関する現状を明らかにすることによって合理的な改善策を提案する。さらに、最適なパラメータを決定するために最適化計算を実施し、そのパラメータを利用した上でLCAを行う。

具体的には、天津市では、住民たちは近くにある回収拠点に行って廃プラスチックを売

り、回収トラックは中継場から回収拠点に向かって出発し、廃プラスチックを積載して中継場まで戻り、中継場で細分別されてからリサイクル工場まで運搬される。よって、この輸送過程はノードのルーティング問題としてモデル化することができる。

輸送過程において、最適なパラメータを決定するために、GCMと改良トンキロ法をベースにしてモデル化し、政策パラメータの中で感度が大きい中継場数と輸送用車の配分に着目した。さらに、多目的関数の最適化問題のパレート解を試算した。

本研究では、輸送過程におけるGHG排出量の削減のために、まずGISを用いて天津市における回収可能な廃プラスチックの分布図を作成し、回収拠点の位置を合理的に決定し、中継場からリサイクル工場までの最短輸送距離図を作成することで総移動距離を推計する。さらに、それを用いてLCAを輸送過程に適用する。

参考文献：

1. 楊虎山, 天津市包装廃棄物現状と思考, 国外包装技術誌, 第6期, pp.52-54, 1991
2. 錢伯章, 朱建芳: 廃プラスチック回収利用現状と技術発展, 化学工業誌, 26(12), pp.33-40, 2008
3. Li, B. : E-Waste Recycling and Related Social Issues in China. Energy Procedia, pp.2527-2531, 2011
4. 朱培武, 蔣建平 : 破棄電気電子製品処理: 挑戦と対策, 統計科学与实践, 第2期, pp.25-27, 2010
5. 許建林, 龔益飛, 周友泉, 輸入廃プラスチックの加工処理による水環境への影響研究, 浙江万里学院学報, 第2期, pp.95-98, 2008
6. Fraunhofer IZM, Sector Review of Waste of Electronic and Electrical Equipment (WEEE), Country Report : China (confidential report). International Finance Corporation, 2008
7. 李叢志, 中国において再生可能な廃プラスチック輸入の現状と発展, 再生資源と循環経済誌, 第12期, pp.35-38, 2012
8. 姚義, 李寧, 王碧倩 : 宜昌市廃プラスチックの回収と処理に関する調査研究, 科学技術風誌, 第21期, pp.276-277, 2012
9. 姚叢容, 陣星 : 中国都市電子廃棄物回収処理現状--天津市の調査をもとに, 資源科学, Vol.31 No.5. pp.836-843, 2009
10. Christofides, N: The vehicle routing problem. RAIRO-Oper.Res.-Rech.Oper. 10(v1), pp.55-70, 1976
11. Fleischmann M, Bloemhof-Ruwaard J. M, Dekker R, van der Laan E, van Nunen J. A. E. E, Van Wassenhove L. N: Quantitative models for reverse logistics: a review. Eur. J. Oper. Res. 103(1). pp.1-17. 1997
12. Beullens P, Van Wassenhove L, Van Oudheusden D: Reverse Logistics: Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chain. Collection and Vehicle Routing Issues. Springer-Verlag, Berlin (Chapter 5), 2004
13. Microsoft : Microsoft Mappoint 2011 Europe, 2012, <http://www.microsoft.com/mappoint/en-us/mappointeu.aspx>

14. Rodionov M, Nakata T: Design of an Reasonable Waste Utilization System: A Case Study in St. Petersburg, Russia, Sustainability. No. 3, pp.1486-1509, 2011
15. Ishikawa, M. : A Logistics Model for Post-Consumer Waste Recycling, J. Pack. Sci. Technol. Vol. 5, No. 2, pp.119-130, 1996
16. 劉威, 森雅夫, 水野真治: 多品種の輸送を考慮した配慮センターの配置問題について, 日本経営工学会誌, Vol. 41, No. 3, pp.207-212, 1990
17. 佐藤太平, 松本亨, 藤山淳史: 太陽電池パネル廃棄量の将来推計と再資源化のための輸送計画, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 69, No. 6, pp.293-299, 2013
18. Senthil J, Vadivel S, Murugesan J: Optimum Location of Dust Bins Using Geo-Spatial Technology: A Case Study of Kumbakonam Rural, Tamil Nadu, India, Advances in Applied Science Research, 3(5), pp.2997-3003, 2012
19. Dragan D, Tomaž Kramberger, Andrej Lisec, Marko Intihar, Kiemen Prah: Using GIS for the Optimization of Pupils Transportation: The Case of Laško Municipality, Logistics & Sustainable Transport, Vol. 2, No. 3, pp.35-51, 2011
20. Kyessi A, Mwakalinga V: GIS Application in Coordinating Solid Waste Collection: The Case of Sinza Neighborhood in Kinondoni Municipality, Dar es Salaam City, Tanzania, FIG Working Week 2009, Surveyors Key Role in Accelerated Development, Eilat, Israel, pp.3-8, 2009
21. Tavares G, Zsigraiova Z, Semiao V, Carvalho M. G: Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. Waste Manage. No. 29, pp.1176-1185, 2009
22. Bhambulkar A: Municipal Solid Waste Collection Routes Optimized With ArcGIS Network Analyst, International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, Vol No. 11, Issue No. 1, pp.202-207, 2011
23. 田畑智博, 後藤尚宏, 藤江幸一, 井村秀文, 薄井智貴: 発生源空間分布から見た廃棄物輸送・再資源化施設の適正配置に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol30, pp.315-322, 2002
24. 村上進亮, 藤井実, 森口祐一: 一般廃棄物の収集・運搬モデルの開発, 第16回廃棄物学会研究発表講演論文集, pp.298-300, 2005
25. 寺川卓志, 東野達: 京都市における廃食用油の BDF 利用システムのリサイクル評価, Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 29, No. 6, pp.1-7, 2008
26. 藤原健史, 日下部友祐: GIS を用いた収集輸送の距離計算と中継輸送施設に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol. 36, pp. 299-308, 2008
27. 砂田和博, 平尾 雅彦: PET ボトルへの直接印刷技術導入のライフサイクル評価, 化学工学会, 研究発表講演要旨集, N120, 2005
28. 福原一朗, 鈴木, 朗本, 藤, 祐樹: 横浜市のプラスチック製容器包装の資源化による環境負荷低減効果, 日本 LCA 学会, 研究発表講演要旨集, pp.204-205, 2005
29. 稲葉陸太, 橋本 征二, 森口 祐一: 鉄鋼産業におけるプラスチック製容器包装のリサイクルの LCA, 廃棄物学会誌, Vol. 16, No. 6, pp.467-480, 2005

第 3 章 現地調査に基づく廃プラスチック回収・再資源化の現状と改善策の検討

3.1 現地調査の詳細

天津市の廃プラスチックシステムの現状を把握するために、現地調査を 3 回実施した。1 回目は平成 23 年 9 月 13～15 日に、天津市にて回収・中間処理業者への現地調査を実施した。2 回目は平成 24 年 9 月 17 日～21 日、天津市にて天津市周辺の廃プラスチック再生企業への調査を実施した。さらに、3 回目は平成 24 年 11 月 20～29 日、天津市にて廃プラスチック中間処理企業への調査を実施した。調査の詳細は以下のようになっている。

A. 回収拠点について：

天津市現地再生資源回収利用事業者の協力により、天津市内の回収拠点で廃プラスチックの組成調査を実施した。2,500 世帯をカバーする回収拠点で、一週間にわたって回収された廃プラの分析結果は表 3.1 が示すようになっている。

表 3.1 天津市回収拠点からのサンプル分析結果

サンプルのデータ分析	重量	単位	割合
PP雑色	142.25	kg	0.2836
HDPE雑色	106.45	kg	0.2122
雑品	71.25	kg	0.1420
MIX:PP・PS・ABS	41.25	kg	0.0822
PP再生品、黒色	36.35	kg	0.0725
PVC	31.25	kg	0.0623
PP透明	21.25	kg	0.0424
PE膜状	17.75	kg	0.0354
HDPE無色	7.3	kg	0.0146
PVC透明	6.65	kg	0.0133
運搬用袋	6.5	kg	0.0130
PS	5.05	kg	0.0101
ABS	3.05	kg	0.0061
PET雑色	2.55	kg	0.0051
PP医療廃棄物	1.5	kg	0.0030
PMMA	1.25	kg	0.0025
合計	501.65	kg	1.0000

- 回収拠点の数は、およそ 450 か所。
- 収集量については、以下の通り：
 - ・ P E T 60～70kg/日
 - ・ 硬質プラスチック 30～40kg/日

※硬質プラスチックについては、1元/kgで販売している。

- PET、硬質プラスチック以外のプラスチック(フィルム状・膜状のもの)については、回収量が多くないものの、回収は行われている。
- 回収拠点は、集合住宅や住宅が密集しているような人口密度の高いエリアにあり、回収業者は人口密度が低い場所を巡回している。
- 現地事業者の担当者によると、買取価格を深圳と比較した場合、30%ほど安価となっている。

B. 個人回収業者について：

- 回収拠点以外の人口密度が低いエリアでは、個人回収業者が郊外地域に巡回して廃プラスチックを買い取っている。
- 5,000台の回収車(三輪自転車やバイク等)があり、回収車は収集した物品を中継場に持ち込む。

主な個人回収業者は営業許可を持っておらず、違法な中古品の回収活動をしている。

C. 中継処理場(市場)について：

さらに、10~15の回収拠点を取りまとめている市場(中継場)を視察した。

- 回収拠点単位で、トラックなどによる市場(中継場)までの運搬が行われている。複数の回収拠点を回り、中継場へ運搬するような巡回集荷(ミルクラン)方法は実施されていない。
- 回収拠点からの物品に加え、30台程度の市中回収業者のリヤカー付き自転車が市場(中継場)に物品を持ち込む。
- 中継場で、第1次分別を実施している。
- 一般的に、市場(中継場)には5~10人の従業員がおり、分別作業等を実施している。
- 視察した市場(中継場)では、9人の従業員が廃プラスチックを20種類に分別している。素材・製品別、さらに色分けによる分別を実施している。
- 中継場は、半定住・半固定的であり、常に数も場所も変化している。ただし、一部の中継場は排出先との契約で設置しており、固定ではないが常に排出先の周辺に設置されている。
- この市場(中継場)では、回収拠点での買取価格に10%上乗せした額で廃プラスチック類の買取をしている。ここから他の業者に販売する場合も、さらに10%上乗せした価格で販売する。
- 廃プラスチックについては、中継場から他の業者(80%は河北省の文安県、霸州市などへ流入)に販売している。
- 実態の把握は難しいが、何百というレベルの中継場があると考えている。

D. 販売先 文安県について：

- 販売先は、河北省の文安県の業者となる。
- 天津市内で回収される廃プラスチックのうち、80～90%は河北省の文安に販売されていると考えられる。
- 文安は、20年にわたり廃プラスチック産業に携わってきた歴史がある。「汚い、キツイ・疲れる、重労働」と言われる産業ではあるが、コミュニティ全体で手作業による分別等を実施しており、回収から再資源化、さらには再製品化までを一貫して行うことができるような、サプライチェーンが構築されている。
- 天津市内で回収された家庭から排出される廃プラスチック類は、いったん中継場にまとめられ、粗選別が行われる。中継場には文安からのトラックが回収に向かい、必要なものだけを買取る。

文安では、コミュニティ全体でリサイクルを実施している。具体的には、手選別により、中継場で分類された廃プラスチックをさらに細かく分別している。また、異物の除去も行われている。そして、廃プラスチックについての油などの汚れを、洗剤を利用して洗浄している。その際、汚水は河川に流されており、地下水や土壌を汚染する問題が発生している。さらに、大きな部品や部材は解体し、その上で粉碎し、トウモロコシの粒ほどの大きさに揃えられている。

- また、再資源化したプラスチックについては、原材料として販売する他、文安の工場でプラスチック製品の生産が行われている。
- 製品の生産については、バージン材の仕入れも実施しており、華南の企業も進出してきている。
- 天津市内で使用されているプラスチックのうち、60%程度は文安で生産されたものだと考えられる。
- 15日に一度、文安県から引き取りのトラックがやってくる。一度に、10トンの廃プラスチックを運んでいく。(1か月で20トン販売している計算となる)
- 8月の報道で、廃プラスチックの一大集積地である河北省文安に取り締まりが入り、環境負荷が大きい業者の操業が難しくなったと聞き、その影響をうかがった。

E. 子牙循環経済産業区について:

子牙産業園区は用地の取得や基本的な整備等が完了し、市内と産業区を1時間弱で結ぶ高速道路も開通済みである。子牙循環産業区には、次の4つの分野において、リサイクル産業の計画が実施されている。

1つ目の機械・電機については、20～30年前から欧米や旧ソ連、日本から輸入されていた歴史がある。2つ目の家電については、テレビや冷蔵庫、PCが中心となる。産業区では2社が操業を開始している。3つ目の自動車については、工場が建設中となっている。自動車に関する工程をまとめた、統一されたリサイクル工場が建設される予定である。4つめのゴム・廃プラスチックについては、3社の進出が予定されている。被覆電線を扱う企業と、家電に含まれるプラスチックを扱う企業の2社は事業が進んでいる。自動車からの廃プラ

スチックについては、自動車のリサイクル工場が完成した後に、事業が始まるだろう。つまり、廃プラスチックについては、まだ事業をスタートさせている企業はない。

平成 24 年 9 月 21 日に基本的にバージン材を利用して携帯電話部品、自動車内装部品等を製造する天津市のプラスチック製造企業に視察した。この企業から加工ロスの手データを入手した。



図 3.1 現地廃車解体工場現場

平成24年11月27日に廃車解体事業を展開している企業に視察した。解体工場現場は図3.1が示し、さらにプラスチックの含有量のデータ（表3.2）を入手した。

表 3.2 車のプラスチック含有量データ

車種	プラ含有量	単位
santtna	10	kg/台
シャリイ	30	kg/台
福田	20	kg/台
東風	15	kg/台
南昌	20	kg/台
宇通	30	kg/台
友易	15	kg/台
平均含有量	20	kg/台

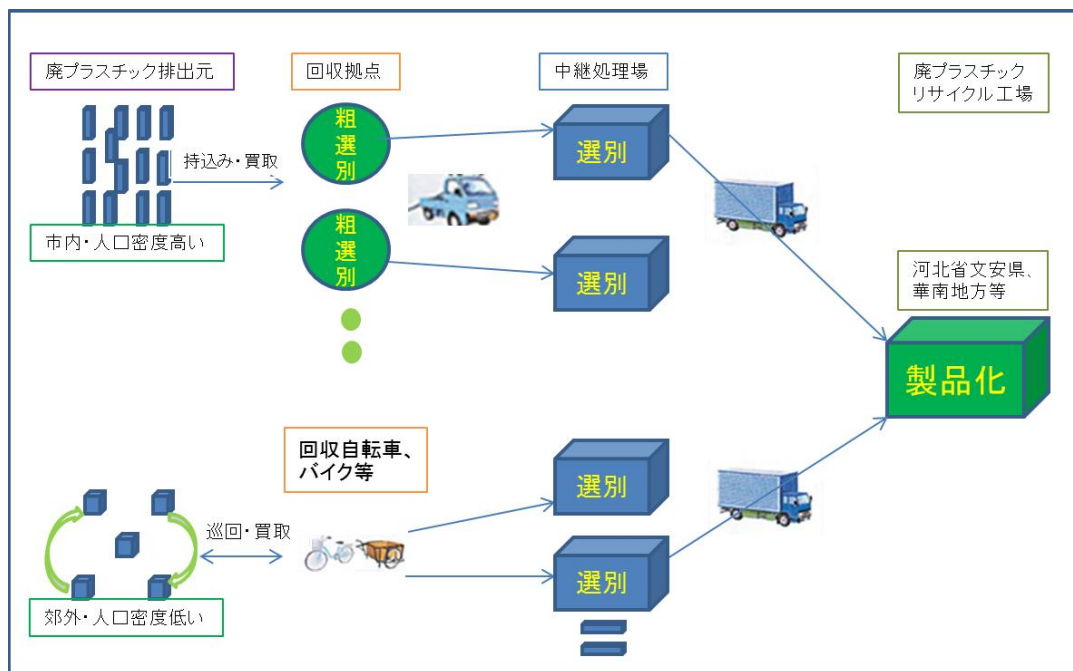


図 3.2 天津市廃プラスチック現状システム

以上の調査から、天津市の廃プラスチックのリサイクルシステム現状が明らかになった。現状システムを図 3.2 に示す。

3.2 システムの問題点と改善策の検討

天津市における廃プラスチック産業の現状を読み解くために重要なポイントは、天津市内の3つセクターと、中国北方における最大な廃プラスチック集散地である河北省文安県という「廃プラスチック産業の巨人」の存在である¹⁾。

第一のセクターは、現地で回収亭と呼ばれる「回収拠点」である。天津市内の比較的人口密度が高いエリアに、およそ900か所程度の回収拠点があり、住民から持ち込まれる不要となったペットボトルやプラスチック製品、古紙や廃金属などを品目ごとに買い取っている。主な回収拠点は個人業者が住宅地に近いところに空家を借りて中古品の買取をしている。これらの業者は正式な廃プラスチック再生企業と廃プラスチック取引の契約を結んでおり、一定量になると軽量トラックで定期的に運搬する。回収拠点では、買取品の放置場所の不足が課題となっている。

第二のセクターは、廃品回収人という「個人回収業者」である。自転車の後部に荷車がついた回収車に乗って、郊外の住宅地を巡回し、住民から廃プラスチックや古紙、金属などの不用品を買い取っている。個人回収業者の数は、1万と推計される。これらの業者は営業許可を持っておらず、インフォーマルの存在として違法営業活動をしている。

第三のセクターは、廃プラスチックの集散基地としての存在「市場」である。市場の

数は約100ヶ所であり、少数の市場は正式なプラスチック再生企業が所有しており、主な市場は個人業者が所有している。回収拠点に集められた廃プラスチックなどの物品は、トラックなどで正式な市場に運搬される。市場にはプレス機がないため、トラックに乗せる際に積載率が低くなり、輸送効率が悪いという問題もある。それに対して、個人回収業者は三輪自転車やバイク等で回収物を個人の市場に運んでいる。安い貸金で、一時的な建設用地等の空地进行を借りて人力で廃プラスチックを分別しているのが特徴である。細分別品と回収品の値段の差による利益を得るのは市場の運営の根本となる。こういった市場では、土地利用の保障や輸送効率の向上、作業環境等の整備等が課題となっている。

天津市で集約された廃プラスチックは、主に天津市に隣接している河北省文安県の廃プラスチック再生業者に販売される。文安県には、中国国内の廃プラスチックの流入や日本や欧米からの廃プラスチックの輸入も大量に行われている。文安県の廃プラスチックリサイクル業者は、所謂家内産業であり、自宅の庭での手作業による分別や洗浄を経て、小規模な装置でバケット等に再製品化されている。環境負荷や作業環境への配慮はなく、経済優先のやり方で実施している。廃プラスチックの再資源化に伴う廃水の随意での垂れ流しによる水汚染や土壌汚染などが深刻化しており、政府による取り締まりも実施されているようである。環境問題は廃プラスチックのリサイクル産業の課題となっている。

前述した三つセクターと販売先から、定期的な往復輸送による回収拠点での放置場所の不足、個人回収業者の違法営業、市場での土地利用の保障や輸送効率の向上および作業環境等の整備、販売先である文安県で二次製造による環境汚染等の問題が緊急な課題になっていると考えられる。課題に対して改善策を以下のように検討した。

1点目は、回収拠点での買取品の放置場所が不足している問題に対して、回収頻度を増やし、一回のトリップで複数の回収拠点を回るミルクラン式を実施する方法である。

2点目は、インフォーマルなセクターである個人回収業者の違法営業に対して、回収拠点の設置で個人回収業者を代替する方法である。

3点目は、市場での土地利用の保障や輸送効率の向上、作業環境等の整備等の課題に対して、すべての市場を正式な回収企業が所有すること、固定的な場所に配置して作業環境も整備すること、プレス機を導入すること等の方法である。

4点目は、販売先の文安県の環境汚染問題に対して、廃プラスチックを天津市内に流通させるように、子牙循環経済産業園区内に廃プラスチックの再生工場を立地させ、文安の代わりに販売先を天津市内再生企業にする方法である。

現状システムに対して、図3.3のような改善システム「天津市廃プラスチック提案モデル」を提示した。

このモデルの最大のポイントは、市場の機能を発展・改善させた「中継処理場」の設置である。中継処理場は、市の協力を得て用地を取得し、市内数か所に大規模な施設として造営する。廃プラスチックの拠点回収と結合し、細かい選別や圧縮による輸送効率化などの「第1次加工」を実施する機能を有する。正式な回収企業及び政府が所有することによつ

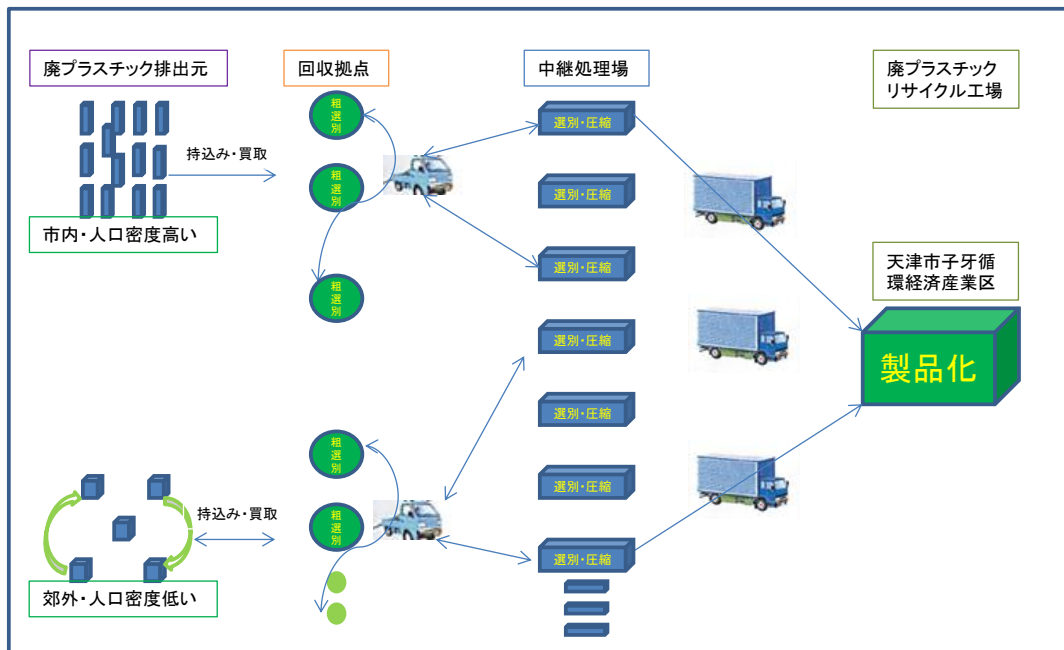


図 3.3 天津市廃プラスチック提案モデル

て、施設の運営は正式化される。

次の提案は、拠点と市場間の回収過程に、巡回回収方式を実施することである。回収頻度に伴ったトラック輸送を実施することで、放置場所不足の緩和や大幅な効率改善等の利点を得ることができる。

最後の改善点は、「廃プラスチック産業の巨人」である文安県の代わりに、天津子牙経済産業区を販売先とすることである。近年中国では、様々な都市においてリサイクル団地が建設されている。この背景にあるのは、静脈産業を集約化し、環境対策が配慮した郊外の工業団地へ移転させようといった政府の思惑である。天津市政府が運営される産業園区は市政府の関与度が高く、園区内工業廃水や有害廃棄物等の管理が十分に配慮されているほか、市中の廃プラスチック事業者を集約することも計画されている。園区に進出する企業が安定的な販売先になれば、中継処理場から産業区への運搬も効率化することが可能となる。これらの措置によって提案モデルの実現が可能と考えられる。

3.3 天津市周辺の廃プラスチックフローの推計

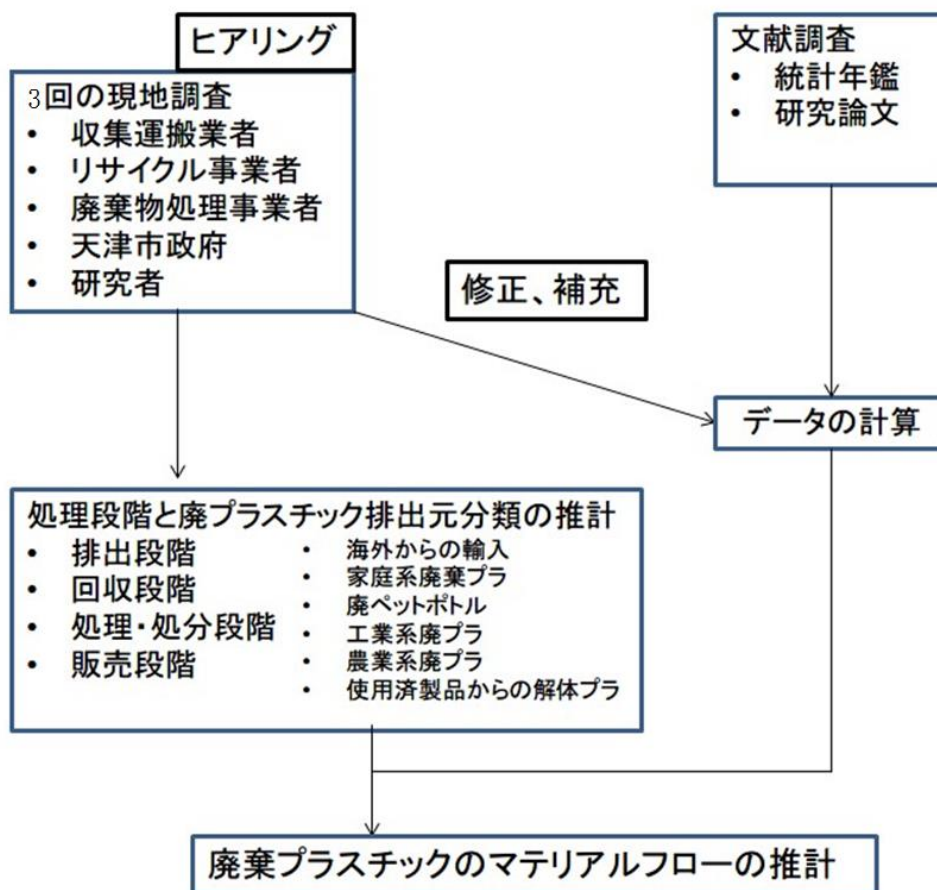


図 3.4 廃プラスチックフローの推計の流れ

本研究では、天津市における再資源化可能な廃プラスチック賦存量を推計するために、まずマテリアルフローを推計した²⁾。中国では、廃プラスチックの発生に関する統計、あるいは推計に用いることができる情報が十分に整備されていない。そこで本研究では、前節で触れた 3 回の現地調査を通じ、天津市の収集運搬業者、リサイクル事業者、廃棄物処理事業者、政府部門、研究者等に対してヒアリングを実施し、廃プラスチックの年間回収量の推計に必要な情報を得た。それに各種統計データを加え、排出段階、回収段階、処理・処分段階、販売段階の 4 段階に分けて推計した。対象とした廃プラスチックの排出源は、輸入、家庭系廃プラスチック、廃ペットボトル、工業系廃プラスチック、農業系廃プラスチック、使用済製品（家電、自動車等）の解体プラ、以上 6 つである。中国では、PET ボトルの回収率が少なくとも 80%以上に達しているといわれている、PET ボトルはその他のプラと回収・再資源化ルートが異なるため、家庭系廃プラスチックと分けて扱った。廃プラ

プラスチックマテリアルフローの推計過程は図 3.4 に示す通りである。今回の廃プラスチックフローは6つ部分を含み、推計の詳細は以下となる。

(1) 輸入廃プラスチック

環境部固体廃棄物センターの公表データ³⁾により（天津海関における輸入量 2011 年 1,481,749 トン）、うち市内仕向量(表 3.3 が示す)は、658,550 トンである。粗処理を経て、主なものは天津市外へ流出し、再生された。

(2) 家庭系廃プラスチック（PET 以外）

現地調査により、1つ回収拠点で一週間にわたり、501.6kg を回収した（回収範囲は 2,500 世帯）というデータから天津市全体に拡大計算した。現地拠点で廃プラスチックサンプルは 16 種類に分別され、重量と割合等のデータも得た。家庭系廃プラスチック（PET 以外）年間回収量 35,760 トンと推計した。

天津市民は廃 PET の価値を知っているため、主な廃 PET は主な回収業者と専門的な廃 PET 再生企業に回収される。よって今回の推計値には廃 PET は除外されていると考えて良い。保管スペースの制限、廃棄物回収への参加協力度の低いこと、廃プラスチックの分別が面倒だと思われやすいこと等の原因により、回収量は実際の発生量より小さいことがわかっていてる。

(3) 家庭系廃 PET ボトル

2010 年天津における廃 PET の量は中国 2010 年 PET⁴⁾の消費量から天津市の消費量を推計し、回収率を乗じて回収可能な廃 PET の量を 25,331 と推計した。

$$\begin{aligned} & \text{中国の PET ボトル年間消費量 (2010 年) / 全国の人口} \times \text{天津市の人口} \times \text{回収率} \\ & = (360+2.0-70.6) \text{ 万トン} / 133,972 \text{ 万人} \times \text{天津市 } 1,294 \text{ 万人} \times 90\% \text{ (仮定)} = 25,331 \\ & \text{トン} \end{aligned}$$

(4) 工業系廃プラスチック

生産工程のロスから回収可能な廃プラスチック対象として、生産量にロス率を乗じて推計した。生産ロスは日本のロス率⁵⁾を参考し、加工ロスは日本のロス率と現地企業の加工ロス率を参考して推計を行った。

工業ロス = 生産ロス + 加工ロス :

生産ロス率 (2010 年) = 生産ロス 20 万トン / 国内の樹脂生産量 1,270 万トン

加工ロス率 (2010 年) = 加工ロス 57 万トン / (樹脂生産量 1,270 万トン + 再生樹脂投入量 44 万トン)

1. 天津市から発生する生産ロス = 市内合成樹脂生産量⁶⁾ 274.67 万トン \times 0.016 = 43,255 トン

2. 天津市から発生する加工ロス = 市内産業への投入量 \times 0.043 = 91,300 トン (日本のプラ協のロス割合を参考にする)

市内産業への投入量 :

表 3.3 天津港經由の廃プラスチック輸入量市内仕向

事業者	許可量[t]	事業者	許可量[t]
天津市 TCL	4000	天津金佰斯特塑料	4000
天津市天合金論再生	6000	天津仁義橡塑制品	5000
天津東海成英	8000	天津日盛塑料	1000
天津天塑集团	20000	天津市億利特塑料再生	2000
天津三和環保科技	8000	天津三和環保科技	8000
天津泰邦管材	5000	天津天塑	3000
天津美垂化工	3000	天津市富星源	27000
天津日盛塑料	1000	天津華郡有色金属加工	14800
天津慧能塑料	14000	天津慧能塑料	8000
天津万和塑料	9000	天津華郡有色金属加工	14400
天津誠信塑料原料	9000	天津天塑	38000
天津市富興源国際貿易	8500	天津慧能塑料	21500
天津万和塑料	15000	天津梁城工貿	42000
天津三和環保科技	4000	天津万和塑料	37000
天津天厦金属	14000	天津富星源国际贸易	12500
天津天塑	2500	天津華盟塑料	6000
天津恒興化纖	2000	天津鼎元興塑料	15000
天津華慶百勝	5000	天津保润来	25400
天津美垂化工	3000	天津東海成英	18000
天津集裝袋厂	9000	天津市合力高分子	16000
天津華盟塑料	10600	天津天厦金属	19000
天津新安模具	7600	天津市双榮紙制品	29600
天津信諾科技	5000	天津浜海公司中国物資再生	16250
天津集裝袋厂	9000	天津華郡有色金属加工	2400
天津綠天使	4000	天津誠信塑料原料	46000
天津津裕再生	4500	天津市集裝袋厂	10000
天津恩愛環保	1500	天津天意达	9500
天津富星源国際貿易	2000	天津市梁城工貿	8000
天津誠信塑料原料	5000	天津金佰斯特塑料	4000
市内合計[t]	658,550		

a, 2010年中国合成樹脂の投入量 6,365 万トン+廃プラスチックの輸入量 777 万トン-輸出量 74,728 トン=7,134 万トン

b, 2010年天津市プラスチック製品製造業 (Manufacture of plastic) は全国製造量の割合 : 1,719,955 トン/58,303,809 トン=2.9%

c, 天津市産業への投入量=a×b=207 万トン

※あるいは、市内企業のヒアデータ (プラ製機械部品製造業) : 投入量×加工ロス率=48,737 トン

工業廃プラスチックの回収量は、約年間 91,992~134,554 トン

(5) 農業系廃プラスチック

農業から回収可能な廃プラスチックは、農業用プラスチック膜の消費量から回収率を乗じて推計した。

2009年天津で農業用プラ膜の使用量⁷⁾ : 12,640 トン ; 地膜の使用量 : 5,891 トン

天津市の農業用膜の使用量×回収率 (100%と仮定) =12,640 トン

(6) 廃家電及び廃自動車の解体プラスチック

解体業から回収可能な廃プラスチックは廃家電解体企業と廃車解体企業に分けて解体量にプラの含有率を乗じて推計した。

・廃家電の場合 : 「天津市廃棄電気電子製品処理発展計画」⁸⁾より天津市 2009.5~2010.10 における 4つの回収企業の 5 大類家電の実際回収量の統計データ, 2009年と 2010年の天津市統計年鑑⁹⁾から 2009年車の廃棄量を推計し, それぞれの廃棄量にプラの含有率を乗じる (2011年の調査データ)

テレビ 381,640 台×17kg/台+冷蔵庫 39,004 台×21kg/台+洗濯機 66,738 台×17kg/台+エアコン 5,129 台×3.75kg/台+パソコン 24,953 台×7.55kg/台=8,649t

・廃車の場合 : 廃棄量 28,595 台数×含有量 20kg/台=572t

以上より, 家電と車の解体からでるプラスチックの合計は 9,221t と推計される。

全体な廃プラスチックフローの結果を, 図 3.5 が示す。

3.4 結果の考察

本研究では、3回の現地調査により現状が明らかになり、現状システムの問題点に対して改善モデルを提案した。さらに、廃プラスチックのフローを推計した。

現地調査の結果のまとめは以下のようになる。

天津市内の人口高密度地域には、廃プラスチック等の有価廃棄物の買い取りを行っている回収拠点（現地で回収亭と呼ばれる）が約 1,000ヶ所存在しており、その運営主体は住居地に近いところにビルを借りて買い取り業を展開している。主な回収拠点は、大規模な収集運搬企業が所有している。他の形態としては、個人回収業者が、自転車の後部に荷車がついた回収自転車に乗って、郊外の住居地を巡回して中古品を買い取っている。

回収拠点等のバイヤーに集まった廃プラスチック等の物品は、トラック等で中継場（市場）に運搬され、中継場のオーナーに販売する。主な市場は個人が所有・運営しており、安い貸金で人力で分別しているのが特徴である。種類別に分別された廃プラスチックを文安県のリサイクル業者に転売し、利益を得ている。市場にはプレス機がないため、トラックに乗せる際に積載率が低いため、輸送効率が悪いという問題もある。本来は営業許可が必要であるが、実際は許可を持っていない業者も存在している。

子牙経済循環産業区では、リサイクル産業が集まり、4つの分野においてリサイクル産業の計画があるが、廃プラスチックの再資源化をしている企業はまだない（現地調査当時）。

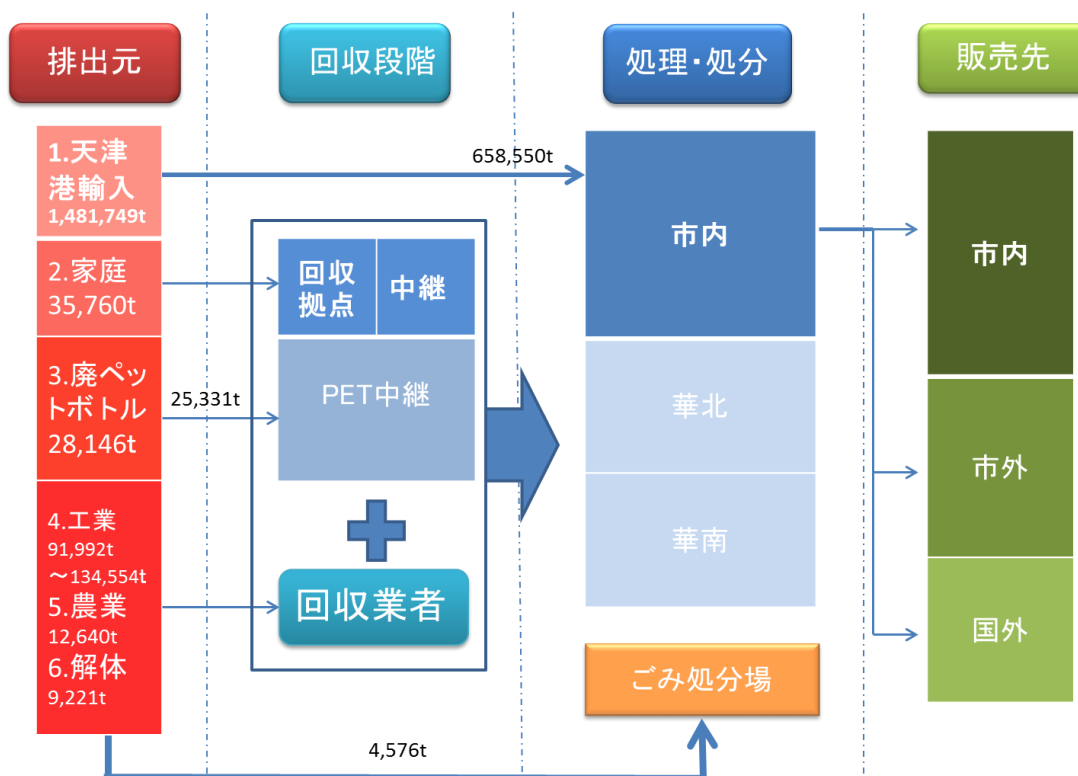


図 3.5 天津市廃プラスチックフローの推計結果

文安県の廃プラスチックリサイクル現状を把握し、廃プラスチック再生による環境への影響等を明らかにした。さらに、天津市内プラスチック製造企業において、工場製造ラインでの加工ロスのデータについても調査した。天津市の回収拠点から廃プラスチック組成調査を実施し、廃プラスチックの組成データを入手した。さらに、天津市の廃プラスチックフローを推計した。その結果、以下のような知見を得た。

- 天津市の廃プラスチック収集ポテンシャルは、最大 84～88 万トン/年である。
 - 輸入を除くと、18～22 万トン/年
- 輸入廃プラスチックの市内でのペレット・フレーク化後の販売先は、河北、山東、江蘇である。
- 工業系廃プラスチックと家庭系廃プラスチックの一部は、市内で造粒・再生されるが、大分部は粗加工後、河北、山東省の工場に販売される。
- PP, PE 類は河北, PC, PS, ABS 類は寧波, 上海, 慈溪, PET 類は山東, 河北で主に再生される。
- 本研究の評価対象である家庭系廃プラスチックの年間発生量は、年間約 36 千トンと推計され、うち有償で回収可能なのは 85.5%である。

参考文献

1. 東信太郎：天津市における廃プラスチックの材料リサイクル事業について，INDUST 11 月号，Vol.26, No.11, pp.26-31, 2011
2. 松本亨，村上恵美子：天津市廃プラスチック材料リサイクル事業実現可能性調査の成果報告，北九州市と天津市の協力による循環経済促進フォーラム，2011
3. 中華人民共和国環境保護部データセンター/ 固体廃棄物管理/ 制限類ある固体廃棄物の輸入について，<http://datacenter.mep.gov.cn/>
4. 2010 年度 PET の生産量・輸入量・輸出量について，
<http://www.cnbeverage.net/news.asp?cid=%D2%FB%C1%CF%B0%FC%D7%B0&csid=%D2%FB%C1%CF%B0%FC%D7%B0%B6%AF%CC%AC&aid=11860>
5. プラスチック循環利用協会：2014 年プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理性分の状況，<http://www.pwmi.or.jp/pdf/panf2.pdf>
6. 中国出版社：中国統計年鑑，pp.553, 2011
7. 中国出版社：中国農村統計年鑑，pp.48, 2010
8. 中国商務部：天津市廃棄電気電子製品処理発展計画(中国語)，2009
9. 中国出版社：天津市統計年鑑，pp.321, 2010

第4章 廃プラスチックリサイクルシステムの空間シミュレーションとLCA

4.1 諸言

中国の経済成長と都市化の発展とともに、中国での廃プラスチックの発生量が急増している。近年、循環経済の概念は中国でも発展しつつある。循環経済とは、ものの生産、流通、消費過程における資源の減量化、再利用、再生等の活動の総称である¹⁾。企業、地域、社会全体を対象としている。中国の国内廃棄物と輸入家電廃棄物に対処するために、天津市では子牙循環経済産業園区が2002年に設立され、2007年に国家レベルの循環経済産業園区として認定された。主な園区内の企業は、解体・分別過程により他の製造企業に提供する原料生産を目的として事業を展開しており、廃プラスチックを再製品化する企業が必要と指摘されている。

施設の需要の大きさ、解析に必要な関連データの入手しやすさといった事情を考慮し、天津市を研究対象地を選んだ。前述した現状システムの問題点を鑑みると、現状システムに対する有効な改善策が必要であると考えられた。家庭系廃プラスチックを対象とする現状のリサイクルシステムに対して、回収・運搬過程のプロセス改善や、天津市内で発生する廃プラスチックのリサイクル企業の新規立地、より効率的な再生技術の導入等である。本章では、空間シミュレーションの手法を用いて合理的な改善策の効果を明らかにすることと、LCAでリサイクル事業の環境負荷の削減効果を求めることとした。評価内容を目的に応じて2つの部分に分けて行った。前半では、GIS技術を用いて回収・運搬過程をシミュレーションし、天津市において回収可能な廃プラスチック分布図を作成し、最短輸送距離ルートを見つけ、現状ケースと提案ケースから排出されるGHGを比較するためにそれぞれの移動距離を推計した。後半では、リサイクルと非リサイクルのGHGをLCAを適用して推計し、リサイクル事業の環境負荷削減効果を求めた。なお、前半と後半のシステム境界の設定が違うことには注意が必要である。

廃プラスチックの回収は輸送経路問題 (Vehicle routing problem: VRP) としてモデル化した。天津市では、住民たちは廃プラスチックを近くにある回収拠点に持参して売り、回収トラックは中継場から回収拠点にプラスチック等を改修するために出向き、廃プラスチックを積載して中継場まで戻り、中継場で資源を細分別した後にリサイクル工場まで運搬する。そのためこの輸送過程は、ノードのルーティング問題としてモデル化することができる。

GIS手法を廃棄物管理システムに応用した。研究では、ARC/GIS10.0を用いて異なる回収方式及び異なる積載率の廃プラスチックの輸送過程をシミュレートし、それに基づいて現状に対する有効な改善策を検討した。GHG排出量をできるだけ削減することを主目的として解析を行う。

本章では、一次輸送過程において異なる回収方式と、二次輸送過程において異なる積載

率を想定して GHG 削減効果を比較した。

4.2 輸送システム改善効果の推計評価

プラスチックの回収と運搬過程を区別するために、ここでは、回収過程を一次輸送、運搬過程を二次輸送と呼ぶ。システムを改善するために、一次輸送では回収頻度を加えて巡回回収を往復輸送の代替案とし、二次輸送では輸送効率を上げるため、中継場に圧縮機を導入するとし、リサイクル工場を子牙に立地させるという改善策を考えた。図 4.1 が示すように、現状ケースに対して理想なシステムを改善ケースと定義した。郊外地域におけるインフォーマルな個人回収業者の数が判断できない状況にあり、そのフォーマル化のためにトラックを利用することを代替案とした。両ケースにおいて施設の数が同じであると設定し、さらに回収手段の効果を求めるため両ケースにおいて一次輸送の積載率は同じとした。積載率向上の効果を求めるために、二次輸送における両ケースの積載率の設定は異なる。回収可能な廃プラスチックの分布、輸送距離の解析、さらに環境負荷の算出等の解析スキームを図 4.2 に示す。

都心部と郊外部の人口密度の差が大きいため、都心部 6 区と郊外部 10 区に分けて解析を行った。表 4.1 に示すように、現地調査のデータにより必要となる拠点数は、計算によると 1,465 ヶ所となった。実際では都心部が 6 区に配分され、今回の解析では都心部において 6 か所の中継場が配置された。計算結果による都心部では 491 ヶ所の拠点数が必要だが、総拠点数が平均的に配分し易いため、今回の解析では都心部において 486 ヶ所を配置した。従って郊外部は 979 ヶ所が配置された。輸送過程に関する解析用パラメータを、表 4.2 のように設定した。回収頻度は、計算により 1 トリップに回る拠点数は 4 ヶ所となった。1 つの中継場がカバーする拠点数は、郊外部では 40 と設定した。中国の都市の交通ルールの一つ

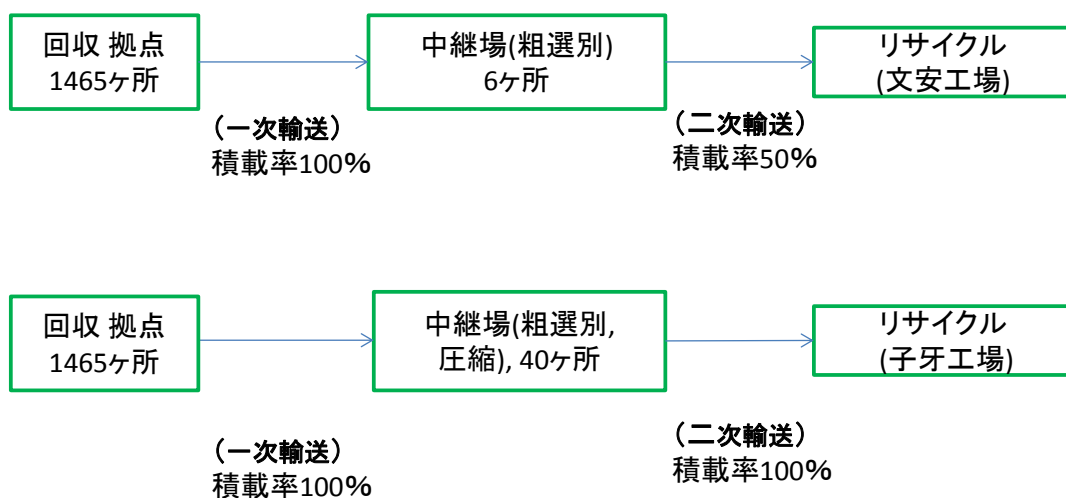


図 4.1 ケースの定義

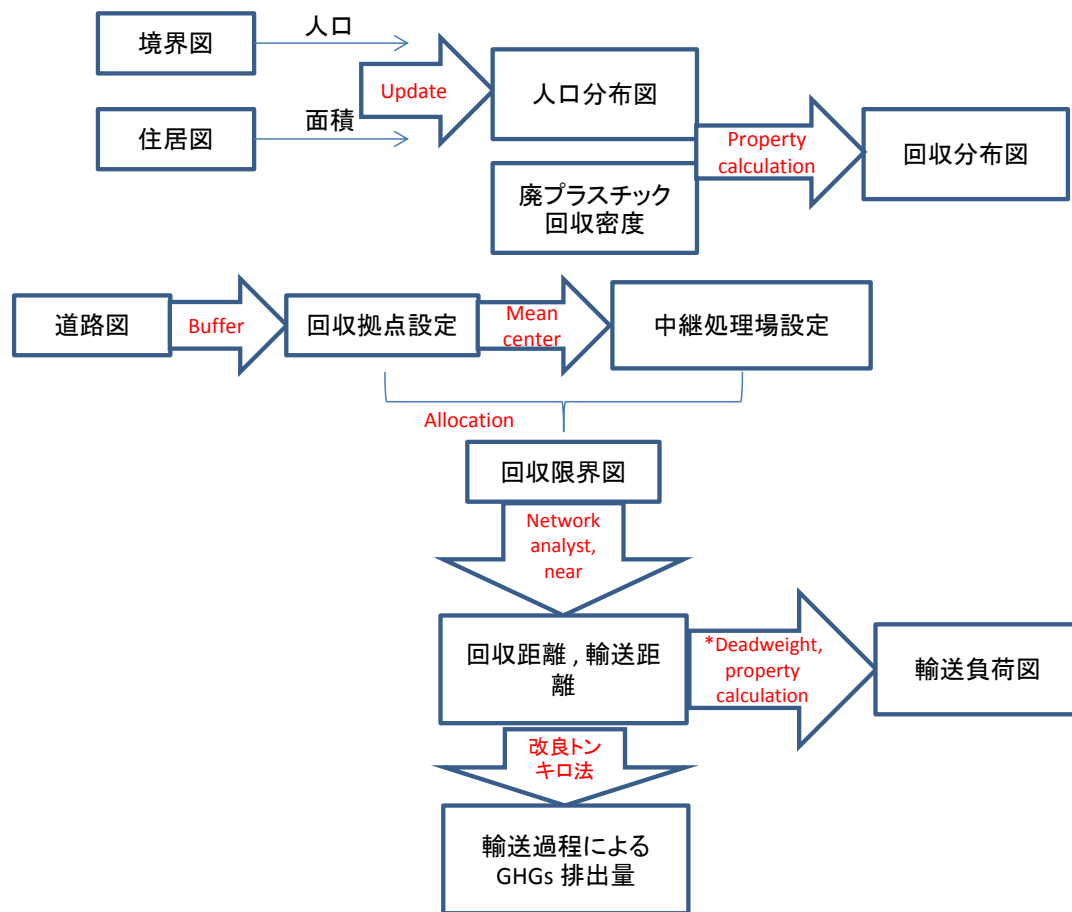


図 4.2 GIS 解析スキーム

では、都心エリアには大型トラックの通行が禁止されているため、一次輸送用車の最大積載量は 2 トン、郊外は 4 トンと設定した。二次輸送用車は 4 トントラックを利用する。

GIS 解析に用いたデータは、天津市住居点分布図、道路図、行政計画図、廃プラスチック回収原単位、天津市第六次人口調査データである。

まず、各区の人口データを行政計画図に入力し、農村人口と都市人口を区別した上でそれに住居点分布図を重ね合わせをし、人口密度分布図を完成させる。それに、人口密度分布図を活用し、属性テーブルで廃プラスチック回収原単位を乗じ、Properties の機能によるデータを 100m×100m のグリッドで表示することで、廃プラスチック発生分布図(図 4. 3)が推計できる。Dot density の機能で 1,465 ヶ所回収拠点の位置を決定し、GHG 排出量ができるだけ削減するというコア規則を考慮した上で、すべての回収拠点を道路の近く配置させるとした。そのため、道路図を利用し、バッファゾーン(緩衝地帯)を作成したが、都心部では 50m、郊外部では 200m のバッファゾーンを設定し、すべての拠点を緩衝地帯内に配置するように調整した。行政計画図を参考にして中継場の範囲を決め、中継場の位置を地理的中心の応用である mean center 機能を用いて決定する。都心部では 6 区の限界線を参考した上で 6 グループに分け、郊外部では 1 つの中継場がカバーする拠点数を一致

させることや回収距離短縮等をベースとして 40 グループに分け、回収拠点と中継場の配分回収限界図（図 4.4）を作成した。

輸送距離（km）は以下の式で計算する：

$$\begin{aligned} D_t &= \text{一次輸送距離} + \text{二次輸送距離} \\ &= (D_{pr} + D_{pc}) + (D_{sr} + D_{sc}) \end{aligned} \tag{4.1}$$

ここで、 D_t は総輸送距離、 D_{pr} は郊外部一次輸送距離、 D_{pc} は都心部一次輸送距離、 D_{sr} は郊外部二次輸送距離、 D_{sc} は都心部二次輸送距離である。

GIS を用いて距離を計算するために、輸送過程を都心部と郊外部それぞれに 2 ステップに分けて計算した。一次輸送過程はいくつの回収ユニットに分けて距離を算出した。都心部では、一つの中継場から出発し、3 つの回収拠点を巡回して廃プラスチックを回収し、中継場に戻ることを 1 ユニットと定義し、郊外部では 4 つ回収拠点を巡回すると定義した。回収頻度は政策変数として変更できると考えられる。二次輸送過程では、各中継場から出発し、リサイクル工場まで廃プラスチックを運搬して中継場に戻ることを 1 ユニットと定義した。距離を計算するために、一次輸送において、1 ユニットは拠点から最も近い道路までの距離の 2 倍プラス施設間道路上の移動距離と考えた。ArcCatalog10 で道路図の shapefile ファイルをネットワークに変換し、ArcMap の Network Analyst 機能で新規最短回収ルートを作成し、拠点を入力し、最短回収距離ルートを見つけて各回収ルートの道路上の移動距離を読み込む。具体的には、一次輸送において 1 ユニットの最短ルートは一つの中継場から出発し、最も近い拠点に向って移動し、次はこの拠点に最も近い拠点に向かって移動し、都心部では続いて 3 番目の拠点に移動し、最初の中継場に戻る。郊外部では 4 つ拠点を巡回して戻る。中継場からリサイクル工場までの最短ルート（図 4.5）も同様な方法で作成できた。ArcMap の Near 機能で拠点から最も近い道路までの距離を読み取ることにより図 4.6 を作成した。これと道路上の移動距離を活用して、中心 6 区 486 か所の回収拠点を 1 回回る移動距離を計算できる。同様に、周辺 10 区 979 拠点の移動距離も計算できる。さらに、回収頻度を乗じ、一次輸送の総距離を算出した。同様な考えを活用して二次輸送の総距離も計算した。

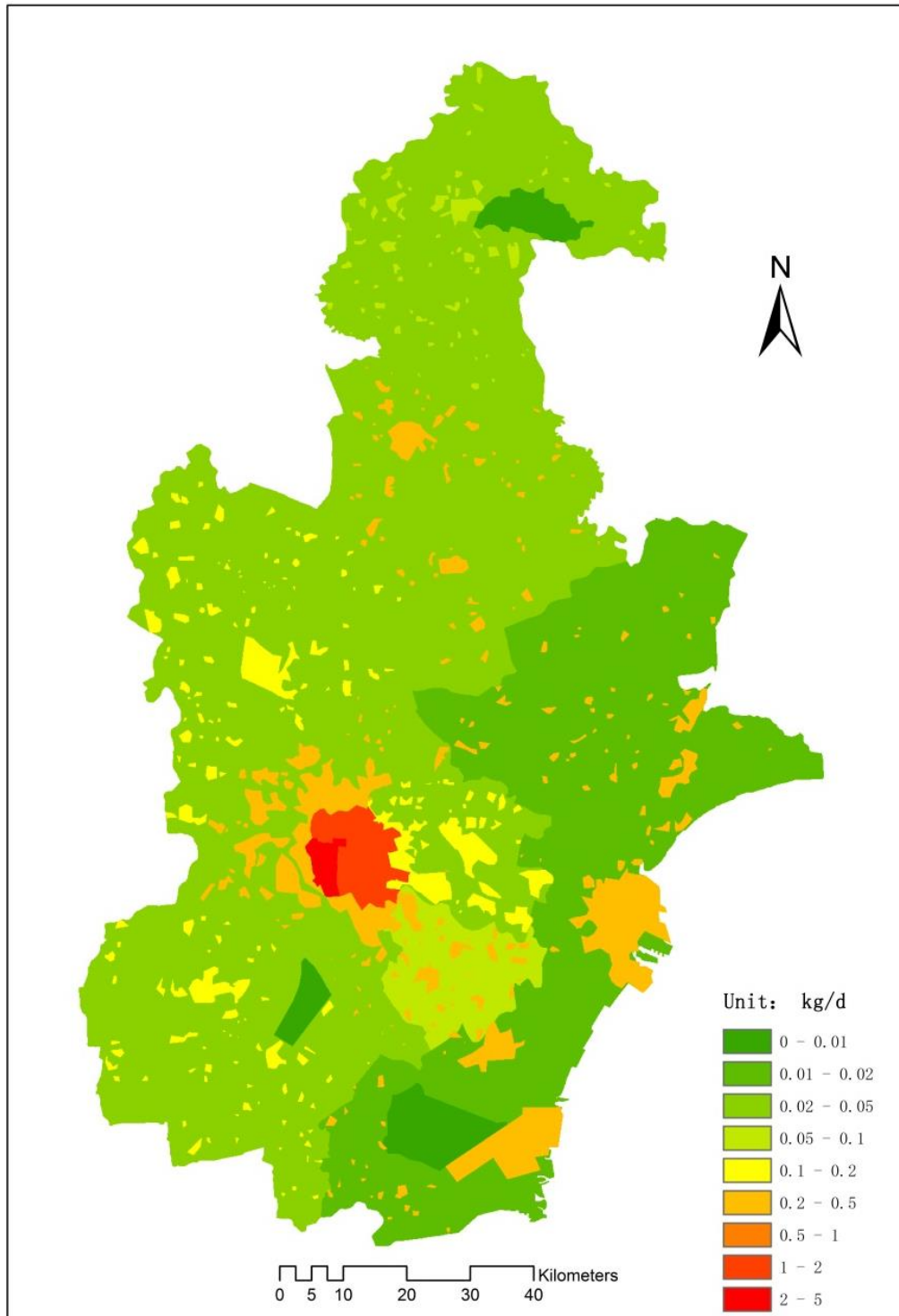


図 4.3 廃プラスチック回収分布図

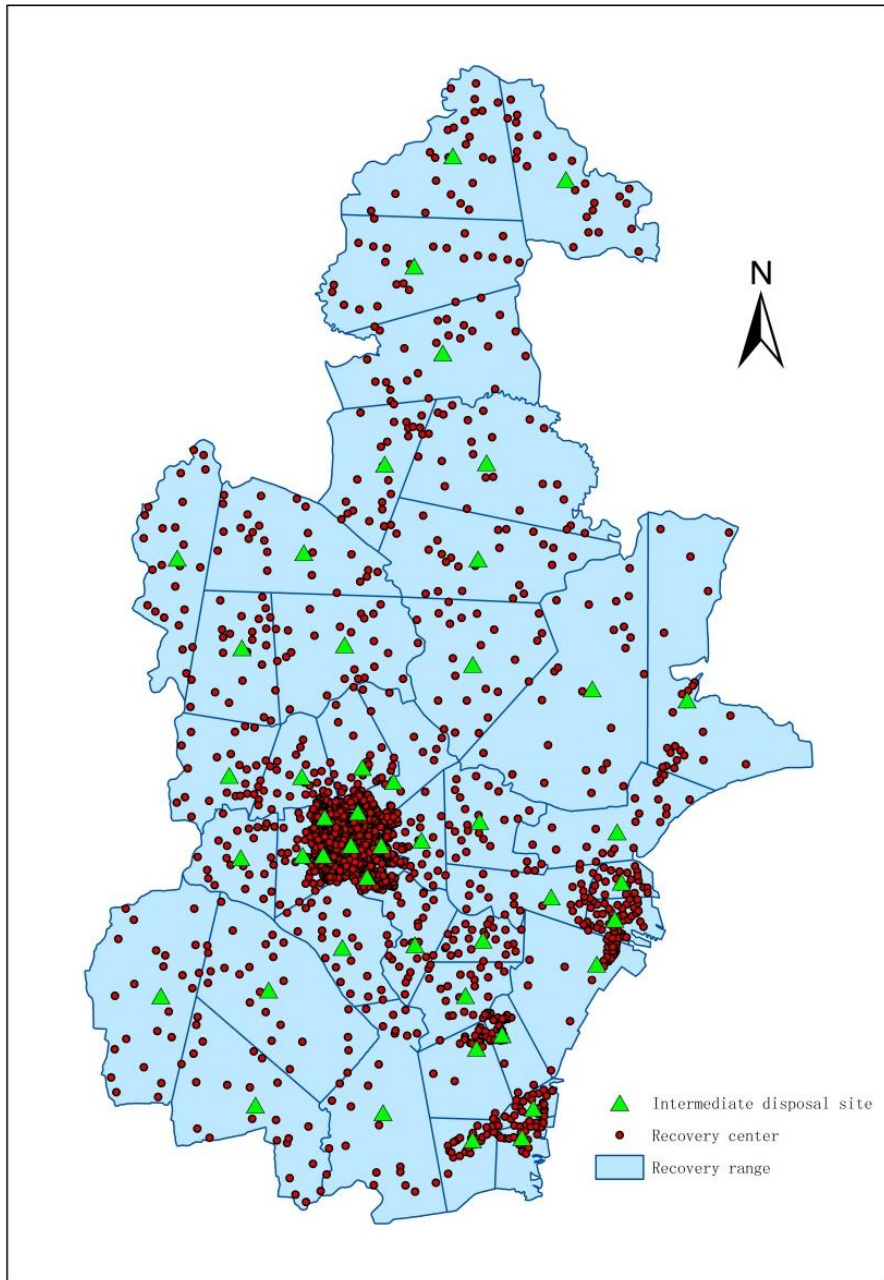


图 4.4 回收限界图

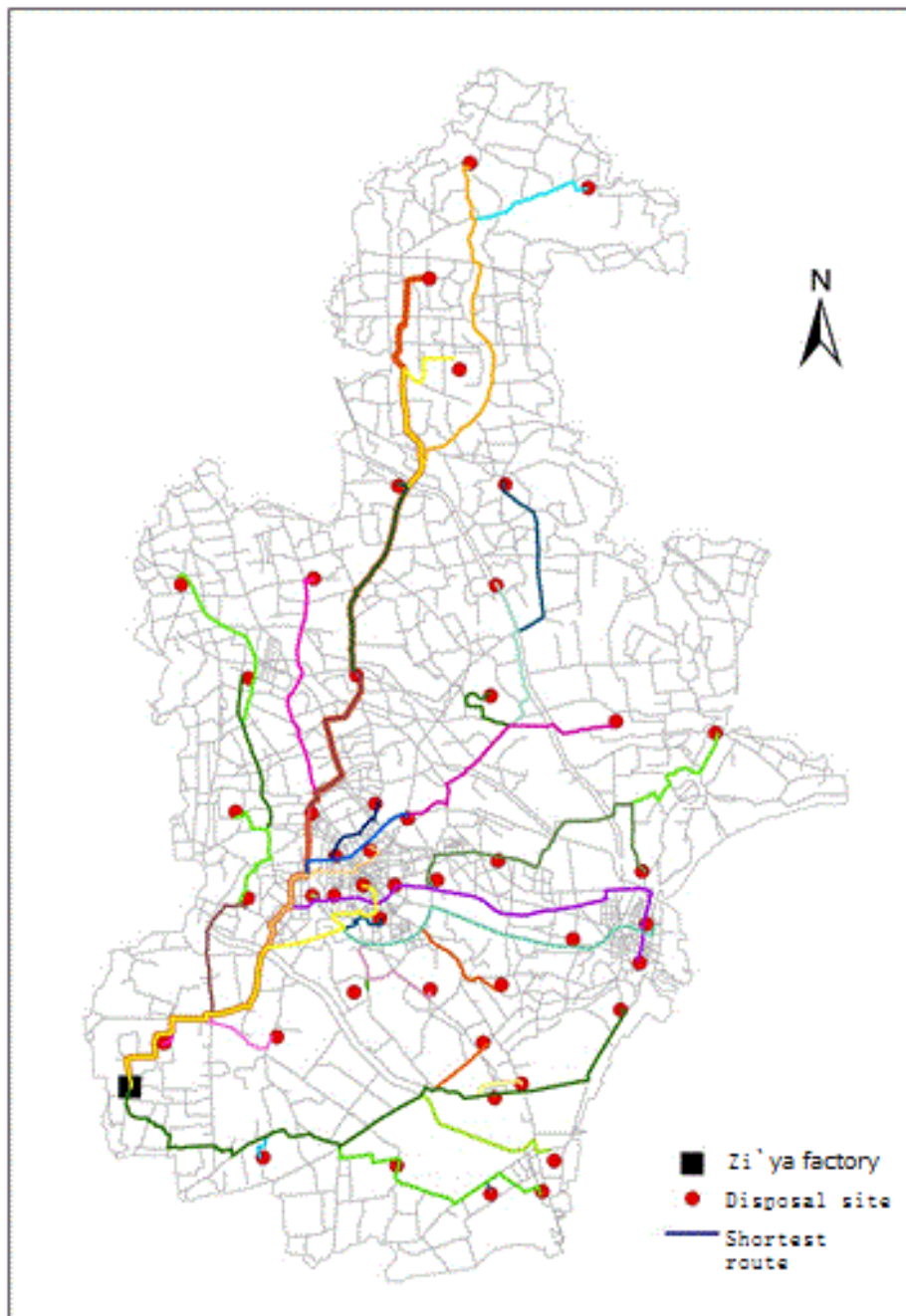


図 4.5 工場までの最短ルート図

比較結果を図 4.7 に、計算の詳細を表 4.3 に示す。参照値として、現状ケース（積載率 100%）における計算結果も挙げている。

表 4.3 を見ると、改善ケースにおいて一次輸送及び二次輸送の 1 回のトリップに掛かる距離は現状ケースの値より小さい。その原因は、回収方式と積載率が違うことである。総移動距離も同じ傾向であり、現状ケースに対して改善ケースによる総距離の削減量は 3,200,072km で、現状ケース（積載率 50%）の約 65.6%である。図 4.7 から、現状ケース（50%）に対して、改善ケースの一次輸送距離削減分は現状ケース（50%）の約 2.4%であ

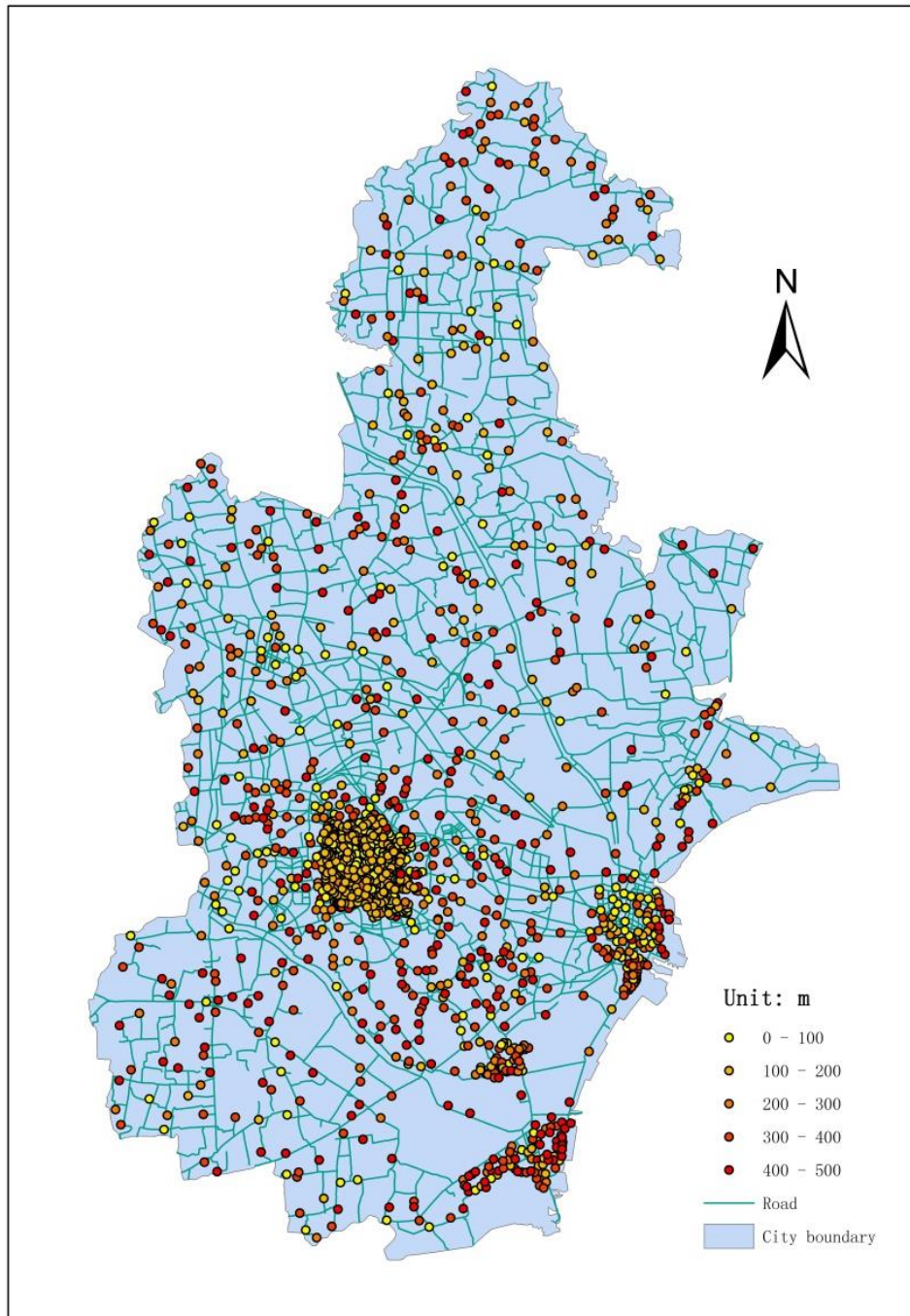


図 4.6 最も近い道路までの距離図

る。現状ケース（50％）に対して現状ケース（100％）は，郊外部では二次輸送距離の削減分が現状ケース（50％）の約 33.5％であり，総距離の削減分は 46.6％である。

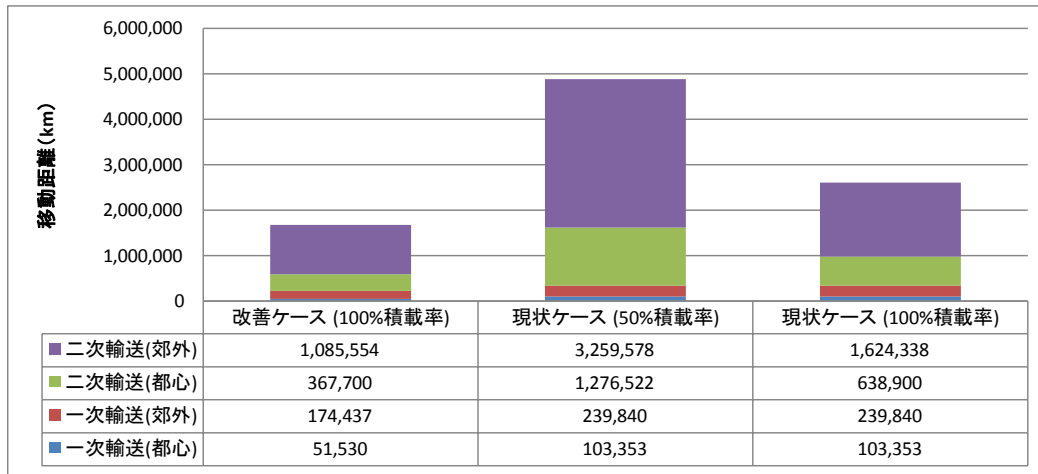


図 4.7 総移動距離の推計結果

現状ケースの二次輸送では、積載率が低いため輸送用車の稼働率が大きくなっていると考えられる。現状（積載率 100%）と比較した改善ケースの二次輸送の距離削減分は、現状（積載率 50%）の約 16.6%であり、この削減分はリサイクル工場の位置変更による改善効果である。以上の結果により、積載率の向上は距離の削減に最も有効的な手段であり、往復回収方式より巡回回収方式の方が移動距離の削減ができ、今回の状況では、都心部より郊外部において距離の削減効果が大きいことがわかる。

輸送用車の燃料消費量は、改良トンキロ法³⁾により計算した。この値に GHG 排出原単位を乗じて、輸送過程による GHG 排出量を計算した。図 4.8 に結果を示す。圧縮過程に関するデータは、処理能力 0.1t/h（出力 5kw）の小型圧縮梱包機を参照して GHG 排出量を計算した。計算結果によると、改善ケースは現状ケース（50%）と比較すると、GHG の年間削減量は 12,197 トンであり、現状ケース総量の約 65.9%である。一次輸送による GHG 排出

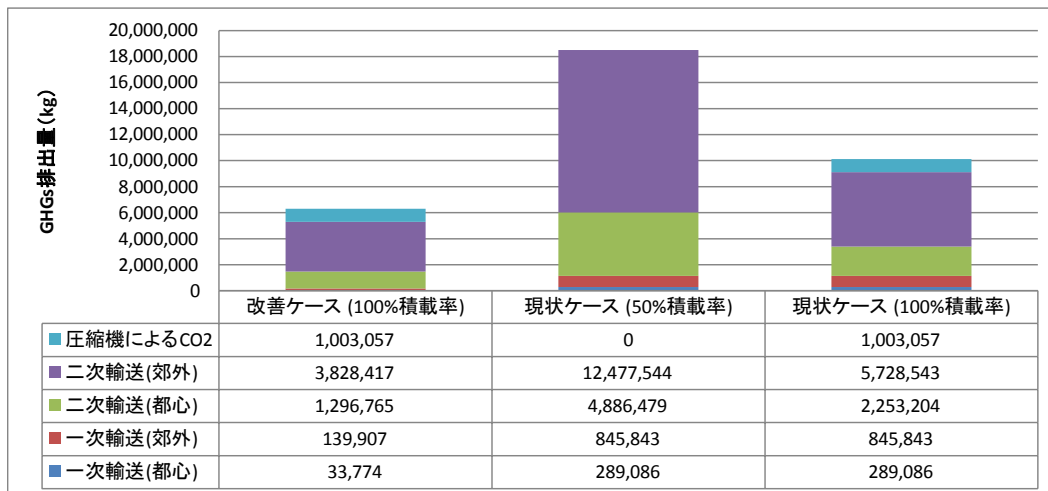


図 4.8 総 GHG の推計結果

量では、現状ケースに対する改善ケースの GHG 削減量は現状ケース総量の約 5.2%である。両現状ケースの二次輸送を比較すると、現状（50%）に対して現状（100%）の GHG 削減分は現状（50%）総量の 50.7%であり、圧縮機械による GHG 排出量の増加分は現状総量の約 5.4%である。よって、圧縮過程による GHG 削減分は現状総量の約 45.3%である。二次輸送において、現状（100%）に対する改善ケースの GHG 削減分は現状（50%）総量の約 15.4%であり、これはリサイクル工場の位置変更の改善効果となる。以上の計算結果により、圧縮過程の導入は GHG 削減分の主要因となること、往復回収方式より巡回回収方式が GHG の削減ができること、文安から子牙リサイクル工場の位置変更も GHG 削減に効果があることがわかった。また、都心部より郊外部において GHG の削減効果が大きいことがわかった。改善ケースより現状ケースの積載率が低いため燃費が悪くなり、GHG の削減効果が距離の削減より大きいことが明らかとなった。

4.3 改善システムの環境負荷削減効果

LCAを行うにあたり、プロジェクトシナリオは回収、廃プラスチックの再生、残渣の焼却、輸送、埋立等の過程を含むと定義し、ベースラインシナリオは原料採取、新規樹脂の製造、回収、廃プラスチックの焼却、輸送、埋立等の過程を含むと定義した。ここでの回収過程と輸送過程は前節での解析と同様に設定し、焼却施設の位置はベースライン、プロジェクトシナリオ同様に子牙の廃プラスチック再生工場の位置と同様に設定した。新規樹脂製造のインベントリデータは日本のデータを参考にしたため、新規樹脂の製造工場の位置は指定しない。比較のため、両シナリオにおいて回収拠点と中継場の数、回収ルート等の設定が一致となった。

図4.9が示すように、LCAのためシステム境界を定義した。機能単位は、家庭系廃プラスチック収集量35,760トンの処理である。回収に掛かる距離は、前章のGIS解析から得た。LCAの算出式は以下のようにになっている：

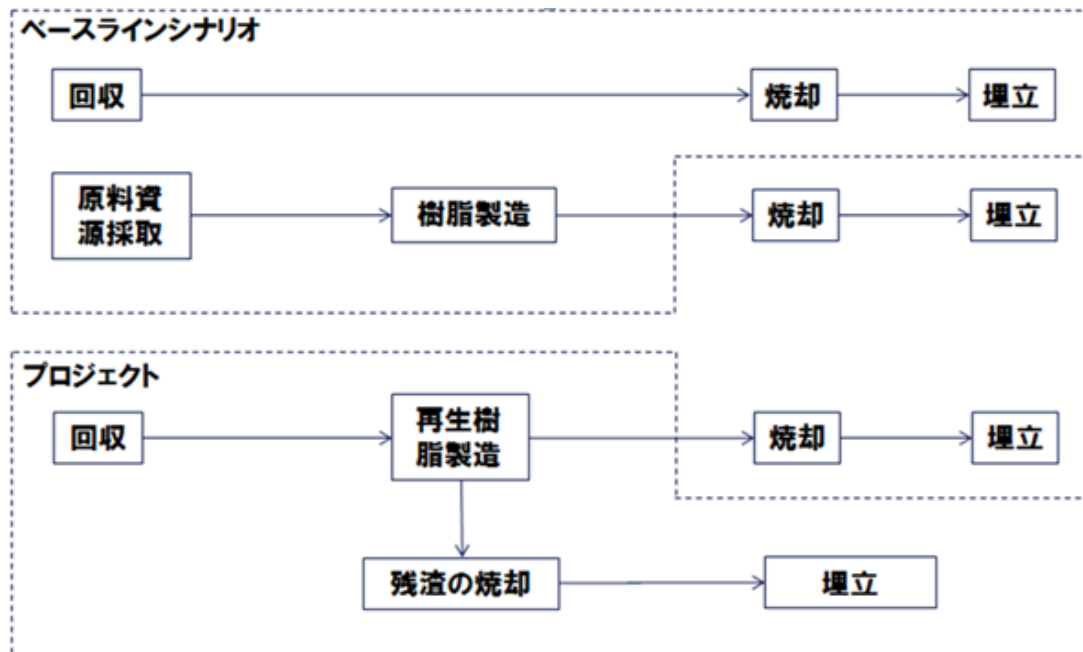


図 4.9 LCA のシステム境界

$$\begin{aligned}
 E_b &= E_n + E_{t1} + E_i + E_{ta} + E_l \\
 &= W_r \times R \times R' \times ec_1 + W_r \times D_1 \times ec_2 + W_r \times ec_3 + W_r \times R_1 \times D_2 \times ec_4 + W_r \times R_1 \times ec_5 \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

ここで、

E_b : ベースラインシナリオによる GHG 総排出量 (t- CO₂-eq)

E_n : 新規樹脂の製造による GHG 排出量

E_{t1} : 廃プラスチックの回収による GHG 排出量

E_i : 焼却過程 GHG 排出量

E_{ta} : 焼却灰の輸送による GHG 排出量

E_l : 焼却灰の埋立による GHG 排出量

と

$$\begin{aligned}
 E_p &= E_{t2} + E_{rm} + E_{tr} + E_{ir} + E_{ta} + E_l \\
 &= W_r \times D_1 \times ec_2 + W_r \times R \times ec'_1 + [W_r \times (1 - R) + W_r \times R \times (1 - R')] \times D_3 \times ec_4 + [W_r \times \\
 &\quad (1 - R) + W_r \times R \times (1 - R')] \times ec_3 + [W_r \times (1 - R) + W_r \times R \times (1 - R')] \times R_1 \times D_4 \times ec_4 + \\
 &\quad [W_r \times (1 - R) + W_r \times R \times (1 - R')] \times R_1 \times ec_5 \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

ここで、

E_p : プロジェクトシナリオによる GHG 総排出量 (t- CO₂-eq)

E_{t2} : 廃プラスチックの回収による GHG 排出量

E_{rm} : 廃プラスチックの再生による GHG 排出量

E_{tr} : 残渣の輸送による GHG 排出量

E_{ir} : 残渣の焼却による GHG 排出量

E_{ta} : 焼却灰の輸送による GHG 排出量

その他の項目（パラメータ設定、単位、データソース）の詳細は、表 4.4 に示す。現地廃プラスチック再生産業界のエネルギー消費等に関する統計がないため、日本の廃プラスチック処理促進協会のデータ^{4,5)}を参考にし、特にプロジェクトシナリオにおいて廃プラスチックの再生は廃 PET の再生過程と仮定して原単位データを引用した。さらに、GHG の算出に関する原単位データは、温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン⁶⁾を参考にした。

LCA の算出結果を表 4.5 に示す。ベースラインシナリオに対して、プロジェクトシナリオの GHG 削減量は年間 101,738 トン t-CO₂-eq で、ベースラインシナリオ総量の約 75.5% である。主な削減の寄与分は、廃プラスチックの焼却と新規樹脂の製造である。プロジェクトシナリオでは、輸送過程から排出される GHG が総排出量の 16.3%、廃プラスチック再生過程からの約 19.7%、残渣の焼却からが 64% である。ベースラインシナリオでは、輸送過程から排出される GHG が総排出量の 4.9%、新規樹脂の製造が 32.1%、廃プラスチックの焼却が 63.9% である。新規樹脂の製造による GHG 排出量はプロジェクトシナリオ総排出量より多いため、廃プラスチックのリサイクルの効果が大きいことがわかる。

4.4 結果の考察

本研究では、GIS を用いて天津市における廃プラスチックの輸送過程をシミュレートし、両ケースの輸送過程による移動距離を算出した。LCA を用いてプロジェクトシナリオとベースラインシナリオを比較し、改善システムの環境負荷を推計した。これにより、以下のような結果を得た。

- 改善ケースによる GHG の年間削減量は 12,197 トンであり、現状ケース総量の約 65.9% である。圧縮過程の導入は GHG 削減量の主要な要因となり、単なる GHG の削減を目的とすれば、巡回回収方式は人口高密度地域に適応する。子牙再生工場の位置代替による GHG 削減効果が大きい。従って、今回の現状に対しての改善策は効果が高い。
- LCA の推計結果により、プロジェクトシナリオの GHG 削減量は年間 101,738 トン t-CO₂-eq で、ベースラインシナリオ総量の約 75.5% となる。主な削減寄与分は廃プラスチックの焼却と新規樹脂の製造である。新規樹脂の製造による GHG 排出量はプロジェクトシナリオ総排出量より多いため、廃プラスチックのリサイクルの効果は大きいといえる。

以上の推計による輸送過程に対する改善策は、GHG の削減に有効であることが明らかになった。本研究で得られた知見を社会実装するためには、効果を定量的に示すことが有効

であり、回収率や回収効率の向上やリサイクル施設の建設が重点的に取り組むべき対策であることを示せた。

課題としては以下が挙げられる。

- 工業系の廃プラスチックフローを精緻化するために、業種別に詳細な実態調査を実施する必要がある。
- 文安ケースに対して水汚染問題に関する評価が必要である。
- コスト評価や中継場数の最適な決定等の問題を検討する必要がある。
- LCA の精緻化のためには、現地の産業部門の物質収支を考慮した原単位の見直しが必要である。

参考文献

1. 中華人民共和国循環経済促進法,
<http://www.gov.cn/flfg/2008-08/29/content1084355.htm>
2. Xue Y. H, Matsumoto T, Zuo J : Study on the GIS based Visible Analysis of Waste Disposal Flow of Beijing, Abstract, Proceedings of International Conference on Circular Economy and Regional Sustainable Development, 36, pp.1-4, 2005
3. 経済産業省・国土交通省：物流分野の CO2 排出量に関する算定方法ガイドライン, pp II-34, 2007, <http://www.greenpartnership.jp/pdf/GHG/GHGbrochure.pdf>
4. プラスチック処理促進協会：石油化学瀬品の LCI データ調査報告書, pp.33, 2009
<https://www.pwmi.or.jp/data.php?p=hokoku>
5. プラスチック処理促進協会：プラスチック廃棄物の処理・処分に関する LCA 調査研究報告書, pp.85-96, 2001, <https://www.pwmi.or.jp/data.php?p=hokoku>
6. 環境省：温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン, pp.25-57, 2015

表 4.1 GIS 解析のための施設数の設定

項目	値	単位
調査において一つ拠点からの回収量	501.65	kg
一拠点がカバーする世帯数	2,500	世帯
調査における回収期間	7.5	日
天津市人口	12,938,224	人
天津市総世帯数	3,661,848	世帯
廃プラスチック回収原単位	0.00757225	kg /人・日
全地域に必要な拠点数 (理論値)	1,465	箇所
都心部人口	4,343,040	人
計算による都心部に必要な拠点数	491	箇所
都心部に必要な拠点数 (仮定値)	486	箇所
都心部に設置する中継場数	6	箇所
郊外部人口	8,595,184	人
計算による郊外部に必要な拠点数	974	箇所
郊外部に必要な拠点数 (仮定値)	979	箇所
郊外部に設置する中継場数	40	箇所

表 4.2 改善ケースの輸送過程においてパラメータ設定

項目	値	単位
都心部エリア		
廃プラスチック回収原単位	0.00757	キロ/人・日
都心部人口	4,343,040	人
年間回収量	12,003,610	kg
回収頻度	36	回/年
回収拠点数	486	箇所
一トリップにおいて一拠点での回収量	686	kg
一次輸送用車の最大積載量	2,000	kg
輸送過程における積載率	100	%
中継場数	6	箇所
一中継場がカーバする拠点数	81	箇所
一回のトリップに回る拠点数	3	箇所
一回回収頻度において一中継場での回収回数	27	回
二次輸送用車の最大積載量	4,000	kg
郊外部エリア		
郊外部人口	8,595,184	人
年間回収量	23,755,994	kg
回収頻度	24	回/年
回収拠点数	979	箇所
一トリップにおいて一拠点での回収量	1,011	kg
一次輸送用車の最大積載量	4,000	kg
輸送過程における積載率	100	%
中継場数	40	箇所
一中継場がカーバする拠点数	24	箇所
一トリップに回る拠点数	4	箇所
一回回収頻度において一中継場での回収回数	6	回
二次輸送用車の最大積載量	4,000	kg

表 4.3 両ケースの距離計算結果

改善ケース	一次輸送年間回数	全ての拠点を一回回るによる一次輸送距離の和(km)	全ての中継場を工場まで一回の輸送による二次輸送距離の和(km)	二次輸送年間回数	合計
都心部 エリア (6)	36	1,431	368	500	419,230
郊外部 エリア (40)	24	7,268	3,643	149	1,259,991
総移動 距離	1,679,222km				
現状ケース	一次輸送年間回数	全ての拠点を一回回るによる一次輸送距離の和(km)	全ての中継場を工場まで一回の輸送による二次輸送距離の和(km)	二次輸送年間回数	合計
都心部 エリア (6)	13	3,975	639	999	1,379,875
郊外部 エリア (40)	6	19,987	5,451	299	3,499,419
総移動 距離	3,200,072km				

表 4.4 LCA のためのパラメータ設定とデータソース

記号	項目	値	単位	備考
W_r	廃プラスチック回収総量	35,760	トン/年	本研究による推計値
R	回収された廃プラスチックの有効利用率	85.50	%	現地調査による値
R'	廃プラスチックの再生率 (廃PETを参照)	87.8	%	プラスチック処理促進協会の調査データ
ec_1	新規樹脂の製造によるGHG排出原単位	1.61	トン-CO ₂ 換 算値 /トン	プラスチック処理促進協会
ec'_1	再資源化によるGHG排出原単位	0.21	トン-CO ₂ 換 算値 /トン	プラスチック処理促進協会
ec_2	廃プラスチックの輸送によるGHG排出原単位	0.33	kg-CO ₂ 換 算値 /トン・キ ロ	改良トンキロ法
ec_3	焼却によるGHG排出原単位	3.97	トン-CO ₂ 換 算値 /トン	プラスチック処理促進協会
ec_4	残渣や焼却灰の輸送によるGHG排出原単位	0.20	kg-CO ₂ 換 算値 /トン・キ ロ	改良トンキロ法
ec_5	焼却灰の埋立によるGHG排出原単位	0.03	トン-CO ₂ 換 算値 /トン	プラスチック処理促進協会の調査データ
R_1	焼却灰の割合	2.13	%	プラスチック処理促進協会
D_1	年間総移動距離	1,679	10 ³ キロメ ートル	GISによる計算値
D_2	焼却場1から埋立地までの距離	51	キロメー トル	Google Mapsによる測量値
D_3	リサイクル工場から焼却場までの距離	23.20	キロメー トル	Google Mapsによる測量値
D_4	焼却場1から埋立地までの距離	49.80	キロメー トル	Google Mapsによる測量値

表 4.5 LCA の推計結果

	項目	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
ベースライン シナリオ	原油の生産による GHG 排出量	2,510,137	44,214	
	原油の輸送による GHG 排出量	1,336,421	790	
	精製過程による GHG 排出量	8,217,816	104	
	石油化学 GHG 排出量	30,286,365	403	
	廃プラスチックの回収による GHG 排出量	5,289,840	24.81	27.43
	廃プラスチックの焼却による GHG 排出量	140,109,485		6,079
	焼却灰の輸送による GHG 排出 量	15,488	0.29	0.27
	埋立による GHG 排出量	22,316		
	合計	131,964,470	45,536	6,107
	総 CO ₂ 換算値	134,813,839 kgCO ₂ 換算値/年		
リサイクル シナリオ	廃プラスチックの回収による GHG排出量	5,289,840	24.81	27.43
	再資源化によるGHG排出量	6,500,259		
	残渣の輸送によるGHG排出量	82,464	1.55	1.45
	残渣の焼却によるGHG排出量	20,932,416	677.56	645.46
	焼却灰の輸送による GHG 排出 量	3,771	0.07	0.07
	埋立によるGHG排出量	5,626		
	合計	32,814,374	704	674
総CO ₂ 換算値	33,038,223 kgCO ₂ 換算値/年			
総GHG 排出量の削減量		101,775,617 kgCO ₂ 換算値/年		

第5章 廃プラスチック収集・運搬システムの最適化

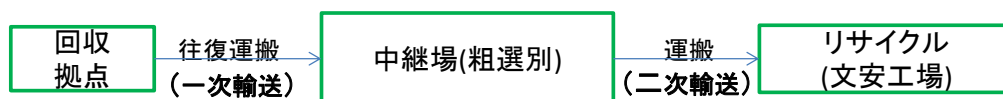
5.1 諸言

本章では、第3章で推計した家庭系廃プラスチックの発生量に基づいて、天津市の廃プラスチック収集・運搬システムの最適化問題を検討した。政策パラメータの中でも感度が大きい、中継場数と輸送用車の配分に着目し、それらの最適な決定方法について検討した。さらに、多目的最適化において推計された中継場数をもとに、GIS解析手法を活かし第4章と異なるパラメータで空間解析を行い、現状ケースと改善ケースを比較することで環境面の効果を求める手法を提示した。

5.2 解析手法

5.2.1 発生量とケース設定

- 現状ケース:



- 改善ケース:

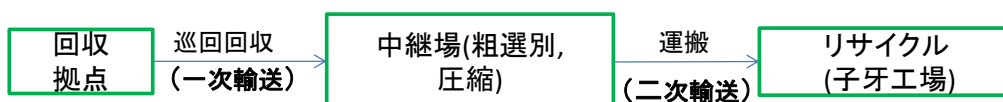


図 5.1 比較ケースの設定

現状ケースでは、回収拠点と中継場間の往復輸送を一次輸送と定義し、現地関係事業者ヒアリングの結果による積載率を50%と設定した。中継場と文安のリサイクル工場までの輸送を二次輸送と定義し、積載率が50%と設定した。改善ケースでは、回収拠点と中継場間の一次輸送は巡回輸送とし、現状ケースと比較のため積載率を現状ケースと同様50%と設定した。中継場と子牙のリサイクル工場までの輸送を二次輸送と定義し、ヒアリングによる機械圧縮過程を入れるため積載率を90%と設定した。評価対象システムを、図5.1のように設定した。システム内の輸送用車と場内施設等の運用によるコスト及びCO₂排出量が、本研究の評価対象である。

中国では、廃プラスチックの発生に関する統計、あるいは推計に用いることができる情

報が十分に整備されていない。これに関して著者らは既往研究において、PET 以外の家庭からの廃プラスチック発生量を年間約 36 千トン、うち有償で回収可能なのは 85.5%と推計している¹⁾。

5.2.2 輸送過程の最適化計算

(a) 解析フローの説明

本研究では、最適な中継場数の決定方法と輸送用車の配分に着目し、天津市の家庭系廃プラスチックの収集・運搬システムを評価対象として、GCMをベースとして環境負荷(CO₂)と費用(コスト)のモデル式を構築し、中継場数と輸送用車配分を近似解法と重み係数法を用いて最適解を求めた。さらに、GISの解析手法の詳細を提示した。

輸送過程における解析の手順を、図5.2が示す。まず、解析にあたり、図5.3に示すようなGCMの考えを援用し輸送用車移動距離の計算からコスト及びCO₂排出量それぞれのモデル式を構築する。次に、組合せ最適化問題による近似解法を用いて、中継場数の変更によるコストとCO₂排出量の値分布を求め、中継場数と輸送用車配分数を見出す。さらに、多目的最適化問題として、CO₂排出量を環境コストに換算し、重み係数法で経済コストと環境コストの和を最小にするときのパレート最適解集合を見出し、パレート解の曲線を求めて、重み係数の値における最適な中継場数や輸送車両数等を決定する。さらに、コストとCO₂の値をそれぞれ標準化した後に重み係数法でパレート最適解集合の曲線を求める。

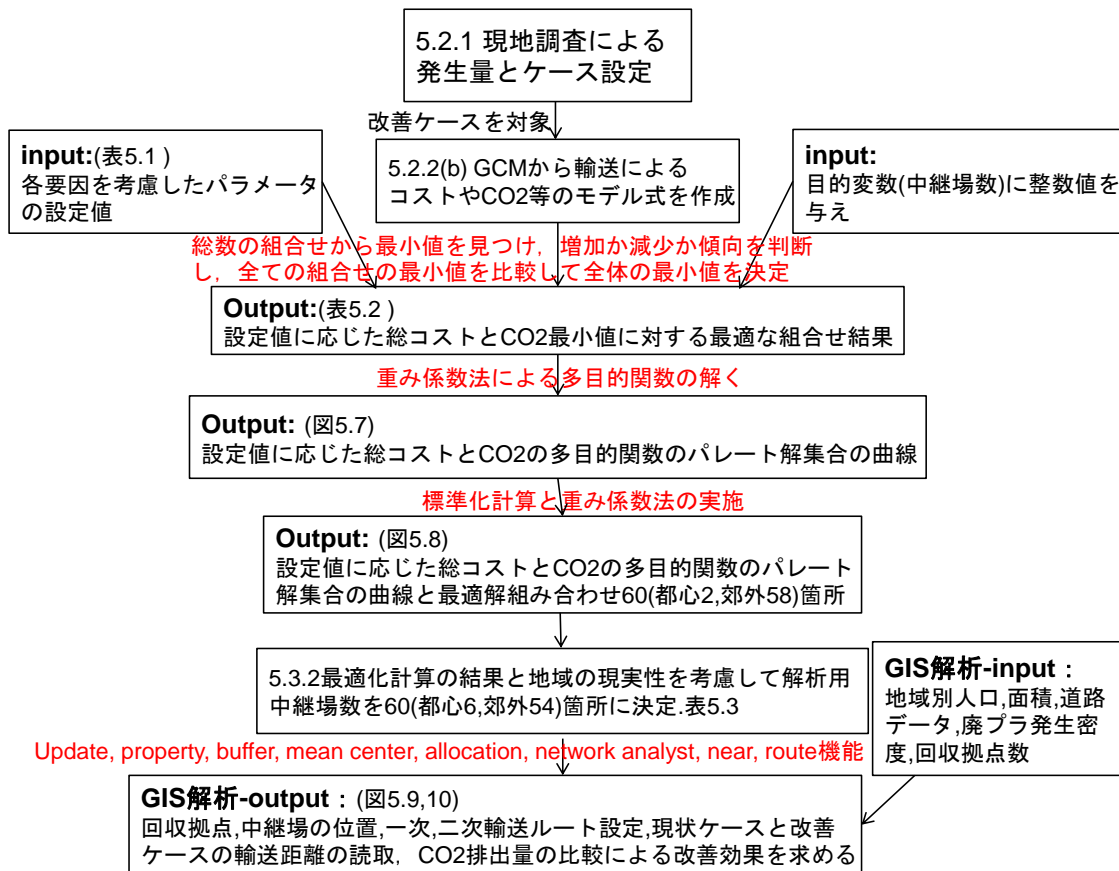


図 5.2 輸送過程の解析フロー

その後、地図情報を活用し、GIS を用いて廃プラスチックの回収分布から、中継場と回収拠点の位置を配分し、最短ルートを見つけ、シミュレーションにより廃プラスチックの輸送による移動距離、輸送負荷や CO₂ 排出量を推計し、現状ケースと改善ケースを比較することで環境面の効果を求める手法を提示する。

図 5.3 が示す GCM のように、一次輸送では都心部及び郊外部における一つ中継場のカバーエリアを空間範囲とイメージし、左側の図の真中に中継場を設置し、右の部分の一つ回収ユニット（一トリップに回る各拠点）と想定する。二次輸送では全市とし、左側の図の真中にリサイクル工場を設置し、右の部分の一つ中継場と想定して平均移動距離の計算式を考える。

(b) モデル式の概略

目的関数：

最小化：総 CO₂ 排出量（一次輸送 + 二次輸送 + 中継場運用）及びコスト（一次輸送 + 二次輸送 + 中継場運用）

制約条件：

中国の都市の交通ルールの一つでは、都心エリアには大型トラックの通行は禁止されているため、一次輸送用車の最大積載量は2トン、郊外は4トンと設定した。二次輸送用車は4トントラックを利用する。

中継場の総面積値は、市内空地面積より小さいことを考えると、中継場数の最大値が制約される。計算の簡易さを考慮し、各中継場の面積値は日本の廃プラスチックリサイクル事業者の平均的な状況を鑑みて、1,000m²と設定する。

一次輸送と二次輸送の作業員1日の作業時間を8時間、年間260日出勤と設定する。

(c) モデル式の詳細

天津市では、都心部と郊外部の人口密度の差が大きいいため、都心部（中心6区）と郊外部（周辺10区）に分けてモデルを構築する。二次輸送用車は子牙産業区で分別された資源物を天津港まで輸送し、戻る時に各中継場から廃プラスチックを輸送することを想定するため、コストとCO₂排出量の計算では片道分しか含まない。モデル式は以下のようになっている。記号のcは都心部を示し、rは郊外部、1は一次輸送、2は二次輸送、pは中継場を示す。

CO₂排出量（都心部）：

$$E_c = E_{c1} + E_{c2} + E_{cp} \quad (5.1)$$

$$E_{c1} = e \times g_{c1} \times c_{c1} \times \gamma_1 \times \left(\frac{f_c \times c_{c1} \times \gamma_1 \times \sqrt{A_c \times N_c}}{R_c} + \sqrt{\frac{A_c}{x_c}} \right) \times \frac{R_c}{c_{c1} \times \gamma_1} \quad (5.1-a)$$

$$E_{c2} = e \times g_{c2} \times c_{c2} \times \gamma_2 \times \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{A_c + A_r}{x_c + x_r}} \times \frac{R_c}{c_{c2} \times \gamma_2} + e_p \times x_c + \theta \times \frac{R_c}{j} \times q \quad (5.1-b)$$

$$E_{cp} = e_p \times x_c + \theta \times \frac{R_c}{j} \times q \quad (5.1-c)$$

ここで、

E_c ：都心部における廃プラスチック輸送によるCO₂排出量（kg/年）、 e ：燃料のCO₂排出原単位、 g_{c1} ：一次輸送用車のトンキロあたりの燃料消費原単位、 f_c ：廃プラスチックの回収頻度、 c_{c1} ：一次輸送用車の最大積載量、 γ_1 ：一次輸送の積載率（50%）、 A_c ：都心部エリアの面積、 A_r ：郊外部の面積、 N_c ：回収拠点数、 R_c ：年間回収量、 x_c ：都心部にある中継場数、 x_r ：郊外部にある中継場数、 g_{c2} ：二次輸送用車のトンキロあたりの燃料消費原単

位, γ_2 : 二次輸送の積載率 (90%), e_p : 中継場の圧縮機以外の日常活動によるCO₂排出量, θ : 電力のCO₂排出係数, j : 圧縮機の処理能力, q : 圧縮機の出力
CO₂排出量 (郊外部) :

$$E_r = E_{r1} + E_{r2} + E_{rp} \quad (5.2)$$

$$E_{r1} = e \times g_{r1} \times c_{r1} \times \gamma_1 \times \left(\frac{f_r \times c_{r1} \times \gamma_1 \times \sqrt{A_r \times N_r}}{Rr} + \sqrt{\frac{A_r}{x_r}} \right) \times \frac{R_r}{c_{r1} \times \gamma_1} \quad (5.2-a)$$

$$E_{r2} = e \times g_{r2} \times c_{r2} \times \gamma_2 \times \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{A_c + A_r}{x_c + x_r}} \times \frac{R_r}{c_{r2} \times \gamma_2} \quad (5.2-b)$$

$$E_{rp} = e_p \times x_r + \theta \times \frac{R_r}{j} \times q \quad (5.2-c)$$

都心部と郊外部の輸送によるCO₂排出量の算出式は、上で示した式のように一次輸送、二次輸送、中継場設備運用の3つを含む。同様な考えでドライバーの給与、燃料費用、中継場運用による日常費用、施設のメンテナンス費用等を含む、コストに関するモデル式を構築した。

コスト (都心部) :

$$C_c = C_{c1} + C_{c2} + C_{cp} \quad (5.3)$$

$$C_{c1} = a_{c1} \times y_{c1} + cf \times g_{c1} \times c_{c1} \times \gamma_1 \times \left(\frac{f_c \times c_{c1} \times \gamma_1 \times \sqrt{A_c \times N_c}}{R_c} + \sqrt{\frac{A_c}{x_c}} \right) \times \frac{R_c}{c_{c1} \times \gamma_1} \quad (5.3-a)$$

$$+ m_1 \times y_{c1} + 260 \times s \times b \times h_1 \times y_{c1}$$

$$C_{c2} = a_{c2} \times y_{c2} + cf \times g_{c2} \times c_{c2} \times \gamma_2 \times \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{A_c + A_r}{x_c + x_r}} \times \frac{R_c}{c_{c2} \times \gamma_2} \quad (5.3-b)$$

$$+ m_2 \times y_{c2} + 260 \times s \times b \times h_2 \times y_{c2}$$

$$C_{cp} = \beta_c \times a_p \times x_c + m_p \times x_c + 260 \times s \times b \times h_p \times x_p \quad (5.3-c)$$

ここで,

C_c : 都心部におけるコスト (万円/年), a_{c1} : 一次輸送用車の車両コスト (耐用年数10年),

y_{c1} : 一次輸送用車数, cf : 燃料価格, s : 時給, b : 作業員1日の作業時間, h_1 : 一次輸

送車1台あたりの作業員数, h_2 : 二次輸送車1台あたりの作業員数, y_{c2} : 二次輸送用車数,

h_p : 中継場1ヶ所あたりの作業員数, m_1 : 一次輸送車1台の年間維持費用, a_{c_2} : 二次輸送車の車両コスト (耐用年数10年), m_2 : 二次輸送車1台あたりの年間維持費用, β_c : 中継場1ヶ所あたりの年間貸金, A_p : 中継場1ヶ所あたりの面積, m_p : 中継場1ヶ所あたりの設備維持費用
コスト (郊外部) :

$$C_r = C_{r1} + C_{r2} + C_{rp} \quad (5.4)$$

$$C_{r1} = a_{r1} \times y_{r1} + cf \times g_{r1} \times c_{r1} \times \gamma_1 \times \left(\frac{f_r \times c_{r1} \times \gamma_1 \times \sqrt{A_r \times N_r}}{R_r} + \sqrt{\frac{A_r}{x_r}} \right) \times \frac{R_r}{c_{r1} \times \gamma_1} \quad (5.4-a)$$

$$+ m_1 \times y_{r1} + 260 \times s \times b \times h_1 \times y_{r1}$$

$$C_{r2} = a_{r2} \times y_{r2} + cf \times g_{r2} \times c_{r2} \times \gamma_2 \times \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{A_c + A_r}{x_c + x_r}} \times \frac{R_r}{c_{r2} \times \gamma_2} \quad (5.4-b)$$

$$+ m_2 \times y_{r2} + 260 \times s \times b \times h_2 \times y_{r2}$$

$$C_{rp} = \beta_r \times A_p \times x_r + m_p \times x_r + 260 \times s \times b \times h_p \times x_r \quad (5.4-c)$$

各制約条件を考慮して以下の関係式を構築した,
一台車一回トリップに掛かる時間 :

$$T = \frac{L}{v} + n \times t \quad (5.5)$$

ここで,
 T : 1トリップにかかる時間, L : 回収拠点と中継場間の往復移動距離, v : 平均速度,
 n : 1トリップで回る拠点数, t : 各回収拠点における作業時間

GCMを援用して, 一次輸送における1トリップあたりの移動距離は, 中継場から収集エリアまでの往復移動距離プラス収集エリア内回収拠点間の移動距離という考えで作成した. 工場と中継場間における二次輸送の平均移動距離の計算式は, 一次輸送と同様の考えで収集エリア内の移動を除外して作成した.

都心部一次輸送の場合の1台1日あたりトリップ数 (M_{c1}) :

$$M_{c1} = \frac{R_c}{y_{c1} \times c_{c1} \times \gamma_1 \times 365} \quad (5.6)$$

都心部二次輸送の場合の1台1日あたりトリップ数 (M_{c2}) :

$$M_{c2} = \frac{R_c}{y_{c2} \times c_{c2} \times \gamma_2 \times 365} \quad (5.7)$$

郊外部における一次輸送と二次輸送用車の1日のトリップ数についても同様に定式化した。1トリップに掛かる時間×1日のトリップ数=1日作業時間（8時間）という関係がある。以下の関係式が求まる。

$$T \times M = 8 \quad (5.8)$$

都心部一次輸送：

$$\frac{R_c}{y_{c1} \times c_{c1} \times \gamma_1 \times 365} \times \left(\frac{1}{v_{c1}} \times \sqrt{\frac{A_c}{x_c}} + \frac{f_c \times c_{c1} \times \gamma_1 \times \sqrt{A_c \times N_c}}{R_c \times v_{c1}} + \frac{f_c \times c_{c1} \times \gamma_1 \times N_c \times t_1}{R_c} \right) = 8 \quad (5.8-a)$$

郊外部一次輸送：

$$\frac{R_r}{y_{r1} \times c_{r1} \times \gamma_1 \times 365} \times \left(\frac{1}{v_{r1}} \times \sqrt{\frac{A_r}{x_r}} + \frac{f_r \times c_{r1} \times \gamma_1 \times \sqrt{A_r \times N_r}}{R_r \times v_{r1}} + \frac{f_r \times c_{r1} \times \gamma_1 \times N_r \times t_1}{R_r} \right) = 8 \quad (5.8-b)$$

都心部二次輸送：

$$\frac{R_c}{y_{c2} \times c_{c2} \times \gamma_2 \times 365} \times \left(\frac{1}{v_{c2}} \times \sqrt{\frac{A_c + A_r}{x_c + x_r}} + t_2 \right) = 8 \quad (5.8-c)$$

郊外部二次輸送：

$$\frac{R_r}{y_{r2} \times c_{r2} \times \gamma_2 \times 365} \times \left(\frac{1}{v_{r2}} \times \sqrt{\frac{A_c + A_r}{x_c + x_r}} + t_2 \right) = 8 \quad (5.8-d)$$

ここで、

v_{c1} ：都心部一次輸送用車の平均速度、 v_{r1} ：郊外部一次輸送用車の平均速度、 t_1 ：一次輸

送回収拠点での作業時間、 v_{c2} ：都心部二次輸送用車の平均速度、 v_{r2} ：郊外部二次輸送用

車の平均速度、 t_2 ：二次輸送中継場での作業時間

変数の設定については、表 5.1 に示すとおりである。中継場の運用による CO₂ 排出量を、処理能力 0.1t/h（出力 5kw）の小型圧縮梱包機による排出量と、それ以外の設備のエネルギー消費による合計とし、年間 CO₂ 排出量を 1t と仮定した²⁾。

表 5.1 輸送過程の解析に関するパラメータ設定

	項目	一次輸送	値	二次輸送	値	単位
	都心 エリア	輸送用車最大積載量	c_{c1}	2	c_{c2}	4
移動速度		v_{c1}	40	v_{c2}	60	km/h
トンキロ原単位		g_{c1}	2E-04	g_{c2}	7E-05	L/kg・km
耐用10年、一台車輛コスト		a_{c1}	2	a_{c2}	5	万円
回収拠点数		N_c	486			箇
年回収量		R_c	12,004			トン
面積		A_c	177			km ²
回収頻度		fc	48			回/年
中継場貸金		β_c	1			万円/m ² ・年
郊外 エリア		輸送用車最大積載量	c_{r1}	4	c_{r2}	4
	移動速度	v_{r1}	50	v_{r2}	60	km/h
	トンキロ原単位	g_{r1}	1E-04	g_{r2}	7E-05	L/kg・km
	耐用10年、一台車輛コスト	a_{r1}	5	a_{r2}	5	万円
	回収拠点数	N_r	979			箇
	年回収量	R_r	23,756			トン
	面積	A_r	11,582			km ²
	回収頻度	f_r	36			回/年
	中継場貸金	β_r	0.5			万円/m ² ・年
	共通 項目	トラックの積載率	γ_1	50	γ_2	90
電力のCO2排出係数		θ	561			kg-CO2/kwh
小型梱包圧縮機処理能力		j	100			kg/h
小型梱包圧縮機の出力		q	5			kw
各回収拠点での作業時間		t_1	0.5			時間
各中継場での作業時間		t_2	1			時間
作業員時給		s	0.1			万円/時
1日の作業時間		b	8			時間/日
燃料価格		cf	0.01			万円
各中継場設備によるCO2		e_p	1,000			kg-CO2/年
各中継場の維持費用		m_p	40			万円/年
各中継場の作業員数		h_p	2			人
軽油のCO2原単位		e	3.009			kg/L
設備維持費用		m_1	20	m_2	30	万円/年
作業員配属数		h_1	2	h_2	1	人

5.3 算出結果

5.3.1 中継場数及び輸送車両数の最適解

都心部と郊外部の中継場数それぞれに、整数値を 1 からの順次与え、組合せることにより、総コストと総 CO₂ 排出量の値が導出できる。これにより、総コストでは中継場数が 3 (都心 1ヶ所, 郊外 2ヶ所) の場合に最小となり、CO₂ 排出量では中継場数が 87 (都心 15ヶ所, 郊外 72ヶ所) の場合に最小になることがわかる。中継場の総数が増加すると、総コストと CO₂ 排出量いずれの場合も、一旦減少した後に増加する傾向が見えた。その後、両関数を一緒に考えるため、表 5.2 が示すように総数が 2 から 87 まで X が各値を取る際にコストの最小値の行から CO₂ 排出量の最小値の行まで合計 676 行の値を残し (例えば、全てコストの値を見ると、X に値を与える際に x_c が 1 を取る際にコスト最小になるため、X が 87 を与える際に、 x_c が 1 から 15 「CO₂ 排出量の最小値を取る」までの値を残した)、その後は 676 行の値を対象として重み係数法と標準化の検討を行った。

本研究のような複数指標を用いた最適化、つまり多目的最適化問題を解く際の一つの考え方として、指標の統合化がある。日本で公的に用いられる CO₂ 貨幣価格原単位に、2,890 円/t・CO₂ (2006 年値) がある³⁾。ここでは、これを活用して CO₂ 排出量をコスト (環境コ

表 5.2 モデル式による改善ケースの計算結果

X	x_c	x_r	y_{c1}	y_{r1}	y_{c2}	y_{r2}	C 万円	E kg	C_E 万円
2	1	1	5	16	1	5	13,158	2,285,601	660.539
3	1	2	5	13	1	4	12,852	1,969,897	569.300
4	1	3	5	12	1	4	13,229	1,822,227	526.624
5	1	4	5	11	1	4	13,833	1,731,792	500.488
6	1	5	5	11	1	4	14,546	1,669,154	482.386
7	1	6	5	10	1	4	15,322	1,622,539	468.914
8	1	7	5	10	1	3	16,136	1,586,164	458.401
9	1	8	5	10	1	3	16,977	1,556,808	449.917
9	2	7	5	10	1	3	17,396	1,552,886	448.784
...
38	7	31	5	8	1	3	46,485	1,303,403	376.684
...
56	10	46	5	8	1	3	65,003	1,275,156	368.520
...
60	2	58	5	8	1	3	64,995	1,297,194	374.889
60	3	57	5	8	1	3	65,421	1,286,806	371.887
60	4	56	5	8	1	3	65,880	1,281,056	370.225
60	5	55	5	8	1	3	66,353	1,277,495	369.196
60	6	54	5	8	1	3	66,834	1,275,179	368.527
...
87	1	86	5	8	1	2	90,370	1,319,739	381.405
...
87	15	72	4	8	1	2	96,964	1,263,451	365.137
88	15	73	4	8	1	2	97,916	1,263,469	365.143

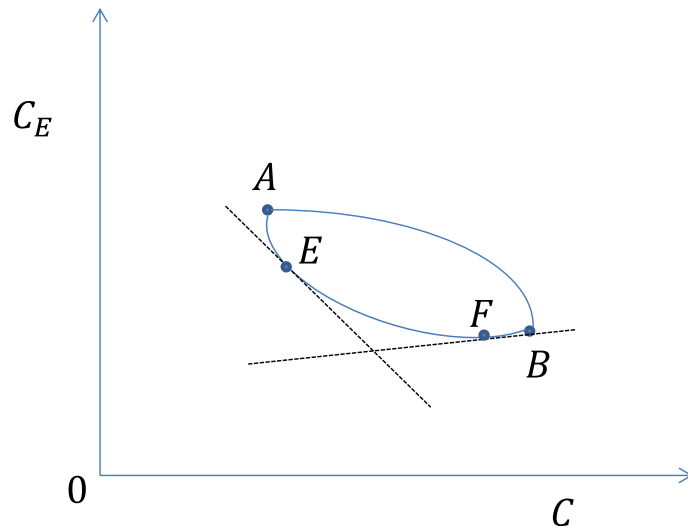


図 5.4 多目的関数とパレート最適解集合

ストという) に換算し、重み係数法⁴⁾で最適な値を見つけることとする。CO₂排出量の値を環境コストに変換した結果は、表 5.2 の最後の列に示している。

コストの目的関数 C と環境コストの目的関数 C_E を重み係数 ω ($0 \leq \omega \leq 1$) を用いて足し合わせて、次の関数を定義する。

$$f = \omega \times C + (1 - \omega) \times C_E \quad (5.9)$$

目的関数空間において、 f は ω がある値をとる時、実行可能領域内で f を最小にする解がパレート最適解集合の一つの点になる。 ω の値を 0 から 1 まで逐次変更して f を最小にする解を求めれば、図 5.4 の点 A から B までのパレート最適解集合の曲線を求めることが

表 5.3 C と C_E を重み係数を乗じた値分布

X	x_c	x_r	ω	f
87	15	72	0	5.5E-01
4	1	3	0.1	1,797
3	1	2	0.2	3,026
3	1	2	0.3	4,254
3	1	2	0.4	5,482
3	1	2	0.5	6,711
3	1	2	0.6	7,939
3	1	2	0.7	9,167
3	1	2	0.8	10,395
3	1	2	0.9	11,624
3	1	2	1	12,852

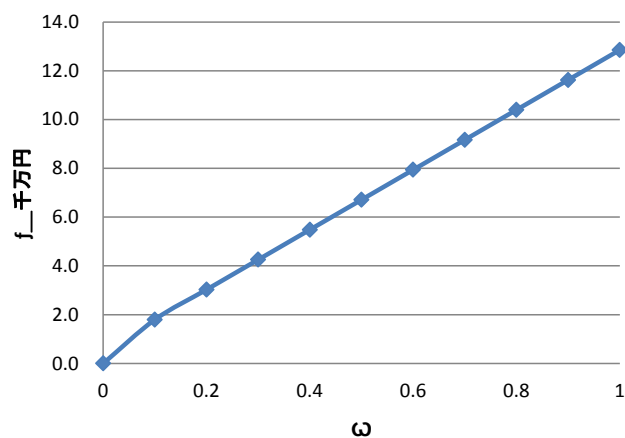


図 5.5 パレート最適解集合の曲線

表 5.4 C と E を標準化重み係数を乗じた値分布

X	x_c	x_r	ω	f
38	7	31	0	0.0010
60	2	58	0.1	0.0447
60	2	58	0.2	0.0691
60	2	58	0.3	0.0612
60	2	58	0.4	0.0533
60	2	58	0.5	0.0453
60	2	58	0.6	0.0374
60	2	58	0.7	0.0294
60	2	58	0.8	0.0215
60	2	58	0.9	0.0136
56	10	46	1	0.0052

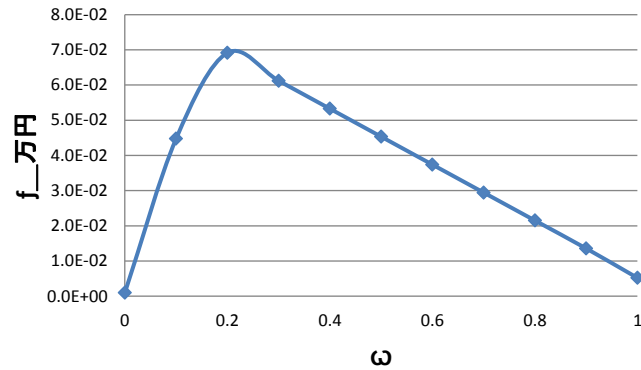


図 5.6 標準化後のパレート最適解集合の曲線

できる。そこで、重み係数を 0 から 1 までに調整しながら f 最小の値（例えば点 E, F, 等）を見つけ、パレート解の曲線を求める。

ω の値を (0, 0.1~0.9, 1) まで与えながらそれぞれの最小値（パレート最適解）を取り曲線（図 5.5）を作る。左辺の値表を見ると、パレート解を見出すために f が最小値を取る際に必要な中継場総数 X の値はほぼすべて 3 となり、都心部中継場数は 1、郊外部は 2 となるため、これとコスト最小の最適解と同じだと考えられる。さらに、 ω を 0.001 から 0.999 まで逐次に変更して重み係数法で検討したが、最適解が 3 (1, 2) という結果が変わらない。これによって環境コストに重み係数法の適用が最適解の探索に役に立たないが判明し、別の手法を考える必要がある。

また、上記とは別に、コストと CO_2 の値をそれぞれに標準化計算⁵⁾し、標準化の式は式 5.10 が示す。求まった標準化変数を用いて上記同様に重み係数を用いてパレート最適解の曲線（図 5.6 が示す）を求めた。左辺の変数の値を見ると、最適解曲線を作成する際に ω の値は 0.1 から 0.9 までに対する f を取る際の中継場数は 60 ヶ所（都心部 2、郊外部 58）黄色部分が半数以上の割合を示したため、これが今回多目的関数の最適解だと考えられる。この際に、都心部一次輸送用車必要台数は 5、二次輸送用車は 2 台、郊外部一次輸送用車は 9、二次輸送用車は 3 となる。さらに、 ω を 0.001 から 0.999 まで逐次に変更して最適化検討したが、標準化後の最適解 60 (2, 58) と傾向が一緒だという結果がわかっている。

$$\text{標準化(Standardization): } Z = \frac{x - \mu}{\sigma} = \frac{\text{変数} - \text{平均値}}{\text{標準偏差}} \quad (5.10)$$

以上の最適化検討から、環境コストに重み係数法の適用という考えが最適解の探索に効かないことがわかっている。コストと CO_2 排出量の値を標準化して重み係数法の応用が最適解の探索に効くが、重み係数の値がいくつ変更しても最適解に影響しないということが明らかになっている。

5. 3. 2 GIS を用いた輸送過程の最適化手法

図 5.2 では、GCM ベースの最適化計算によって中継場数を決定し、GIS により廃プラスチック排出分布と回収拠点の位置を取得し、その両者から最適な輸送経路を導出する解析フローを示した。回収条件に応じてパラメータの設定が表 5.5 に示す。本来は最適化計算の確定値に従って中継場を設置するが、ここでは、天津市の都心部には 6 区に設置される地域性と解析の簡易さを考慮し、都心部 6 ヶ所（1 ヶ所で 81 回収拠点カバー）、郊外部 54 ヶ所（1 ヶ所で 18 回収拠点カバー、最後の 1 ヶ所は 25 拠点をカバー）の中継場を設置することを想定し、以下の論を進める。

本研究では ARC/GIS10.0 版を用いて、解析に用いたデータは、天津市住居点分布図、道路図、行政計画図、廃プラスチック回収原単位、天津市第六次人口調査データである。人口密度の差が大きいため、都心部 6 区と郊外部 10 区に分けて解析を行った。解析手順を以下に示す。

まず、各区の人口データを行政計画図に入力し、農村人口と都市人口を区別した上でそれに住居点分布図を重ね合わせして、人口密度分布図を完成させる。

それで、人口密度分布図を活用し、属性テーブルで廃プラスチック回収原単位を乗じ、Properties の機能によるデータを 100m×100m のグリッドで表示することで、廃プラスチック発生分布図が推計できる⁶⁾。その後、道路図を利用し、バッファ区を作成、dot density の機能で回収拠点の位置を決定する。行政計画図を参考にして中継場の範囲を決め、中継場の位置を重心法の応用である mean center 機能で決める。その後、回収拠点と中継場の配分図を作成する。

(a) 一次輸送段階の距離解析

例えば、都心部には年間回収回数が 36、積載率が 100%、輸送用車の最大積載量は 2 トンの場合、年間総排出量から計算すると、1 トリップに回る回収拠点数が 3 になり、3 つ回

表 5.5 解析パラメータの設定

都心部	値	単位	郊外部	値
原単位	0.00757	kg/人・日	原単位	0.00757
人口	4,343,040	人	人口	8,595,184
一日の排出量	32,887	kg	一日の排出量	65,085
総回収量	12,003,610	kg	総回収量	23,755,994
頻度	36	回	頻度	18
一回回収期間内の排出量	333,434	kg	一回回収期間内の排出量	1,319,777
回収拠点数	486	箇所	回収拠点数	979
一か所の排出量	686	kg	一か所の排出量	1,348
輸送用車の最大積載量	2,000	kg	輸送用車の最大積載量	4,000
積載率	100%		積載率	100%
一回回る拠点数	3	箇所	一回回る拠点数	3
中継場数	6	箇所	中継場数	54
1つ中継場がカバー拠点数	81	箇所	1つ中継場がカバー拠点数	18
1回回収にかかるトリップ数	27	回	1回回収にかかるトリップ数	6

収拠点と中継場間の道路距離プラス各拠点を最も近い道路までの往復距離を1ユニットとする。

ArcCatalogで道路図のshapefileファイルをネットワークを変換し、ArcMapのNetwork Analyst機能で新規最短回収ルートを作成して各回収ルートの距離を読み込む。中心6区各回収拠点486か所を1回を回る移動距離を計算できる。同様に、周辺10区979拠点の移動距離も計算できる。

一次輸送の移動距離 D_1 (km) :

$$\begin{aligned} D_1 &= D_{c1} + D_{r1} \\ &= L_{c1} \times T_{c1} + L_{r1} \times T_{r1} \end{aligned} \tag{5.11}$$

ここで、

D_{c1} : 都心部一次輸送による総移動距離, D_{r1} : 郊外部一次輸送による総移動距離, L_{c1} :

都心部一次輸送一回トリップの移動総距離, T_{c1} : 都心部年間一次輸送回数, L_{r1} : 郊外部

一次輸送一回トリップの移動総距離, T_{r1} : 郊外部年間一次輸送回数

(b) 二次輸送段階の距離解析

GISで各中継場から工場までの最短輸送ルートを作成し、片道輸送距離を計算し、都心部と郊外部の年間総輸送回数を乗じ、都心部と郊外部の輸送距離の和を求める。

二次輸送の移動距離 D_2 :

$$\begin{aligned} D_2 &= D_{c2} + D_{r2} \\ &= L_{c2} \times T_{c2} + L_{r2} \times T_{r2} \end{aligned} \tag{5.12}$$

輸送過程による総距離は、 D_1 と D_2 の和である。また、GISで計算した収集・運搬距離(図5.7)から、属性テーブルで輸送負荷を計算し、改良トンキロ法⁷⁾を用いてCO₂排出量を計算した。改善ケースと現状ケースについて、GISで計算した距離値を活用したCO₂排出量の推計値と削減量を求めた。表5.6と図5.8に示す。

表 5.6 GISによる推計結果

都心6,郊外54ヶ所	現状ケース (50% 積載率)トン	改善ケース (90% 積載率)トン	削減量トン
CO2排出量(都心部)	1,004	632	372
CO2排出量(郊外部)	2,599	1,540	1,058
総量	3,603	2,173	1,430
削減量の割合	0.397		

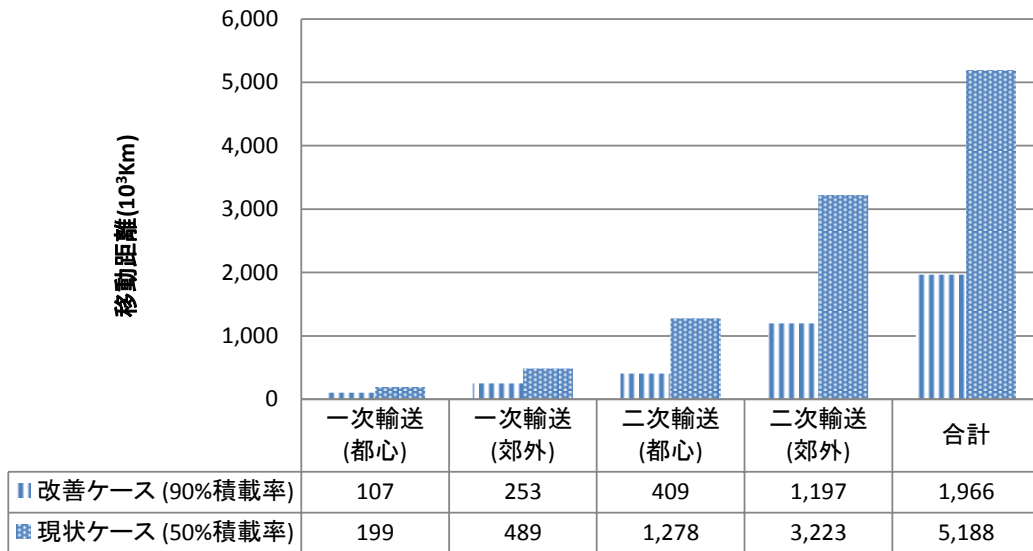


図 5.7 GIS による移動距離の推計結果

GISによる推計結果を見ると、現状ケースから改善ケースのCO₂削減量は1,430t-CO₂で、現状ケース排出量の約40%である。GISの推計結果とモデル式の結果（表5.2に60「6, 54」行の値）を比較すると、GISの方がCO₂排出量の推計値が大きいことがわかる。

5.4 結論

本研究では、中国の大都市のうち天津市を対象に、家庭系廃プラスチックのリサイクル

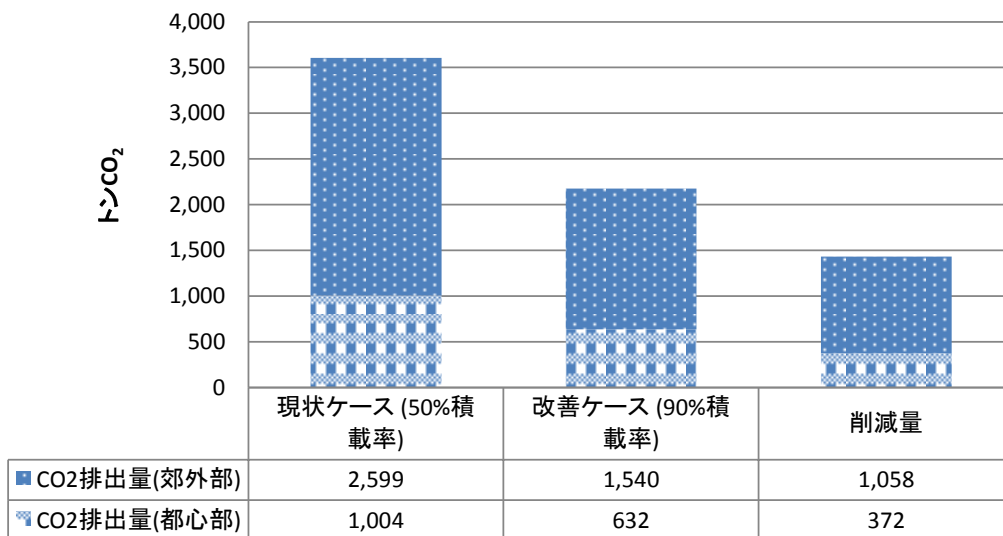


図 5.8 GIS による CO₂ 排出量の推計結果

のための収集・運搬システムの最適化による改善効果を提示することを目的とした。収集・運搬システムの推計には GCM をベースとした最適化計算による中継場数と、GIS を用いた詳細な輸送距離に基づく輸送過程の CO₂ 排出量を推計することで、天津市の廃プラスチック収集・運搬システムの改善案による CO₂ 削減量を推計した。

本研究により明らかにした点を以下にまとめる。

- ・ GCM をベースにした収集・運搬モデルによる最適化計算により、コスト面から見ると中継場総数 3ヶ所の場合が総コスト最小となり、CO₂ 排出量から判断すると、中継場数が 87ヶ所の場合が最小となる。
- ・ さらに、経済と環境 2つ目的関数を同時に考える際のパレートの最適解集合の曲線を求め、標準化前後計算のパレート最適解を見つけた。
- ・ GIS による解析により、廃プラスチックの回収システムの現状と改善案の環境負荷削減効果を推計した。改善案による収集・運搬段階の CO₂ 削減量は、年間 1,430t-CO₂ であり、現状の約 40%である。
- ・ 回収拠点から中継場より、中継場からリサイクル工場までの輸送負荷の方が大きい。改善ケースにおける中継場での圧縮減容化の効果は大きい。

なお、本研究が対象とする廃プラスチックの回収リサイクルは、天津市内の民間企業による実施が想定され、回収拠点や中継場の土地の確保には市政府からの協力を得る必要がある。本研究によるシステム改善が実現すれば、環境負荷の削減とともに輸送コストが削減されるため、市政府、民間企業ともに利益が一致する。そのため、互方の理解が得られれば回収拠点や中継場の再編は不可能ではないといえる。

参考文献

1. 叢日超, 松本亨, 李文超, 徐鶴: GIS を用いた天津市の廃プラスチック回収・再資源化システムの提案, 日本環境共生学会第 16 回, pp.186-194, 2013
2. エコアクション 21:リスト検索・認証・登録事業者リスト-廃棄物処理業・リサイクル業-環境活動レポート. http://www.ea21.jp/list/ninsho_search.php
3. 国土交通省: 改定案 新旧対応表, 2007. <http://www.mlit.go.jp/common/000016479.pdf>
4. Fishburn, P.C.: Additive Utilities with incomplete Product Set: Applications to Priorities and Assignments, Operations Research Society of America(ORSA), 1967
5. 中川雅央: 情報科学・システム工学-確率・統計-正規分布
6. Xue, Y.H., Matsumoto, T. and Zuo, J.: Study on the GIS based Visible Analysis of Waste Disposal Flow of Beijing, Abstract Proceedings of International Conference on Circular Economy and Regional Sustainable Development, p.36, 2005
7. 環境省: 第 II 編 温室効果ガス排出量の算定方法, pp. II-38-41, 2012

第6章 まとめと今後の課題

6.1 まとめ

本研究では、中国大都市を対象とした廃プラスチックの回収・再資源化システムの最適化を指向し、必要なデータ・情報収集と解析手順を提案し、天津市に適用した。具体的には、天津市における廃プラスチックのリサイクル現状を現地調査により解明し、そこで得た情報から廃プラスチックのフローを推計した。また、回収・再資源化システムの問題点に対して改善策を検討し、それを定量的に評価するために GIS を用いた輸送距離の解析と LCA により GHG を評価した。さらに、最適化手法を援用して輸送システムの最適化を図り、輸送過程の CO₂ を評価した。

各章の成果は以下のとおりである。

第 1 章では、研究の背景について述べた。つまり、天津市で集められた廃プラスチックが大量に河北省の文安県に流出し、文安県では水汚染や土壌汚染等の問題が指摘されており、天津市の廃プラスチックシステムの再構築が緊急になっていること、一方で、天津市にある子牙循環経済産業園区の開発が進みつつあるが、市内の回収・運搬システムには改善の余地が大きいとの現状を概説し、天津市のような大都市の廃プラスチックの回収・再資源化システムを改善するための手法開発との本研究の目的と構成を述べた。

第 2 章では、廃プラスチックに関して、天津市及び中国における廃プラスチックの現状に関する既往研究、廃プラスチック及び廃棄物リサイクルシステム構築に関する既往研究、最適化計算に関する既往研究、GIS 解析に関する既往研究、LCA に関する既往研究をレビューしたうえで、本研究分野の研究の現状を明らかにした。その後、既往研究の特徴や不足点等をまとめ、本研究の位置づけを明確にした。

第 3 章では、天津市にて 3 回現地調査によるリサイクルシステムにおいて各セクターの現状を明らかにした。現状システムの問題点を把握した上で、それに対する改善策を検討し、仮説として提示した。現地拠点で実施した廃プラスチックの組成調査の結果から廃プラスチックの発生量を推計した。さらに、現地調査と文献調査によるデータ・情報に基づいて天津市の廃プラスチックフローを推計した。

第 4 章では、3 章で推計した PET ボトルを除く家庭系廃プラスチックの処理を機能単位として、GIS を用いて空間シミュレーションを実施し、さらに本研究にて提案した改善システムの環境負荷削減効果を LCA を用いて求めた。

- ・改善策の主なポイントは、往復回収から巡回回収とすること、中継場に圧縮機を導入することで2次輸送の積載率を向上させること、再資源化工場を管理の行き届いたりサイクル団地の工場を利用することの3点である。
- ・GISの応用により、人口分布から発生分布を算出した。道路図から、中継場と回収拠点の最適な位置を決定し、最短ルートを見つけ、シミュレーションにより廃プラスチックの輸送による移動距離を算出した。さらに、改良トンキロ法を用いてGHG評価を行い改善策の効果を求めた。
- ・評価の結果、現状に対する改善案の輸送距離の削減率は65.6%、収集・運搬段階のGHG削減効果は65.9%削減である。
- ・改善システムに対して非リサイクルシステムを比較シナリオとして両者間のGHG削減効果を評価した結果、非リサイクルに対するリサイクルシナリオによるGHG排出量の削減率は75.5%である。

第5章では、同じく3章で推計した家庭系廃プラスチックの発生量に基づいて、天津市の廃プラスチック収集・運搬システムの最適化問題を検討した。政策パラメータの中でも感度が大きい、中継場数と輸送用車の配分に着目し、それらの最適な決定方法について検討した。さらに、多目的最適化において推計された中継場数をもとに、GIS解析手法を活かし4章と異なるパラメータで空間解析を行い、現状ケースと改善ケースを比較することで環境面の効果を求める手法を提示した。

- ・輸送距離については、GCMの考えを援用し、輸送用車移動距離の計算からコスト及びCO₂排出量それぞれのモデル式を構築した。
- ・組合せ最適化問題による近似解法を用いて、中継場数の変更によるコストとCO₂排出量の値分布を求め、中継場数と輸送用車配分数を見い出した。最適化計算の結果により、コスト面から見ると中継場総数3ヶ所の場合が総コスト最小となり、CO₂排出量から判断すると、中継場数が87ヶ所の場合が最小となった。
- ・多目的最適化問題として、CO₂排出量を環境コストに換算し、重み係数法で経済コストと環境コストの和を最小にするときのパレート最適解集合を見い出し、パレート解の曲線を求め、重み係数の値における最適な中継場数や輸送車両数等を決定した。さらに、コストとCO₂の値をそれぞれ標準化した後に重み係数法でパレート最適解集合の曲線を求めた。これにより、最適な解は中継場の総数が60ヶ所、都心部2ヶ所、郊外部58ヶ所との結果を得た。

本研究で得られた主要な結論は、以下のとおりである。

- ・現地調査において、収集運搬業者、リサイクル事業者、廃棄物処理事業者、政府部門、研究者等に対してヒアリングを実施することで、廃プラスチック回収・再資源化システムの現状を分析し、詳細な分析の前にまず改善策を提示した。また、ヒアリング調

査，組成調査，統計情報を踏まえ，廃プラスチックフローを推計した．

- ・政策パラメータの中でも感度が大きい中継場数と輸送用車の配分に着目し，それらの最適な決定方法について提示した．GCM と改良トンキロ法をベースにした家庭系廃プラスチックの収集・運搬モデルを構築し，モデル化による最適化計算を実施し，コスト面，環境面だけを考慮した場合の最適な中継場数・輸送車両数をそれぞれ算出した．さらに，経済と環境 2 つ目的関数を同時に考える際のパレートの最適解集合の曲線を求め，標準化前後計算のパレート最適解を導出した．
- ・住居メッシュ，道路図，行政計画図と，人口データ，廃プラスチック排出原単位データから，GIS を用いて輸送過程をシミュレーションし，中継拠点と輸送距離の導出を行う手法を提示した．
- ・さらに，提案した回収・再資源化システムの環境負荷削減効果を求めるために，LCA を適用して非リサイクルケースと比較したリサイクルケースの GHG 削減効果を算出する手法を確立した．

すなわち，現地調査による基礎情報の他，組成調査による廃プラスチック発生量とフローの推計，住居メッシュ・道路図を用いた発生分布と輸送ルート of 推計，多目的最適化手法を用いた中継場数・輸送車両数の決定と GIS による輸送ルートの最適解の導出，以上の情報を統合化させて LCA を用いてライフサイクル環境負荷削減効果を推計するという一連の手法を提示し，天津市に適用した．本手法は，中国大都市において入手できる情報であり，他都市においても適用可能であり，かつ有用といえる．

なお，本研究が対象とする廃プラスチックの回収リサイクルは，天津市内の民間企業による実施が想定され，回収拠点や中継場の土地の確保には市政府からの協力を得る必要がある．本研究によるシステム改善が実現すれば，環境負荷の削減とともに輸送コストが削減されるため，市政府，民間企業ともに利益が一致する．そのため，互方の理解が得られれば回収拠点や中継場の再編は不可能ではないといえる．

6.2 今後の課題

今後の課題としては，以下が挙げられる．

- ・工業系の廃プラスチックフローを精緻化するために，業種別に詳細に実態調査を実施する必要がある．
- ・LCA の精緻化のためには，現地の産業部門の物質収支を考慮した原単位の見直しが必要である．

謝 辞

博士前・後期課程の5年間、多くの方々からご支援及びご指導を頂くことにより、本博士学位論文を無事に完成することができました。この場を借りて、感謝の気持ちを表せていただきたいと思います。

本論文を作成するにあたり、恩師である北九州市立大学教授松本亨先生は私の進学を早めに受け入れていただき、ここに感謝の意を表します。さらに、松本研究室の一員として学業から生活まで様々な面でご意見・ご支援を頂きました。松本先生は、終始暖かい激励と丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。再び、研究の道を導いていただいたことに心より感謝申し上げます。

学位論文審査において、貴重なご指導とご助言を頂いた北九州市立大学大学院国際環境工学研究科の野上敦嗣教授、同 二渡了教授、同 津田恵吾教授に心より感謝を申し上げます。多数の有用なコメントを頂き、ありがとうございました。

本研究の現地調査にあたり、中国の天津理工大学の胡彪准教授、南開大学の徐鶴教授や叢培芳教授等の先生たちには、現地調査実施のため様々な支援を頂きました。ここに、感謝を申し上げます。

松本研究室の在籍している皆様と卒業した先輩諸氏には、研究面や生活面等も大変お世話になりました。ここに記して、心より感謝を申し上げます。

最後になりますが、私が博士課程に進学することに対して、理解と献身的な協力を頂きました両親に感謝いたします。

2016年9月20日