

ウランバートル市ゲル地区の大気汚染削減対策の効率性評価に関する研究

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

オトゴンバヤル エンフツオルモン

目次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.1.1 研究対象地域(ゲル地区)の状況	2
1.1.2 ウランバートル市の大気汚染源	5
1.1.3 ウランバートル市の大気環境質	6
(1) 測定点の詳細	6
(2) 測定結果の提供	7
(3) ウランバートル市の大気汚染の状況	9
1.1.4 国家による大気汚染削減対策	12
1.2 研究の目的	15
1.3 既往研究のレビュー	15
1.4 本論文の構成	16

第2章 現地調査に基づくウランバートル市の大気汚染対策の費用便益分析

2.1 概説	19
2.2 分析方法	21
2.3 燃料消費及び汚染物質排出量削減量の推計	21
2.3.1 改善ストーブの燃料削減量	21
2.3.2 汚染物質排出量削減量の推計	22
2.4 健康便益の推計	23
2.5 費用及び便益の推計	25
2.6 費用便益分析結果	25
2.7 本章のまとめ	26

参考文献

第3章 室内空気汚染測定による費用効果分析

3.1 概説	28
3.2 室内汚染の測定	28
3.2.1 測定方法	28
3.2.2 PM2.5 測定装置の説明	30
3.2.3 測定結果	31
3.2.4 室内汚染の評価	34
3.3 改善ストーブの費用効果分析	35

3.4	本章のまとめ	35
第4章	仮想市場評価法（CVM）による大気汚染削減対策の健康便益の評価	
4.1	アンケート調査の概要	37
4.2	CVM 調査の方法	37
4.3	アンケート調査の結果	39
	(1) 個人属性について	39
	(2) 大気汚染の意識について	40
	(3) WTP の回答結果	43
4.4	WTP の推定	43
4.5	健康便益の推定	43
4.6	本章のまとめ	44
	参考文献	
第5章	ゲル地区の大気汚染対策に関する費用効果分析	
5.1	概説	46
5.2	研究方法	46
5.3	対策の設定	48
5.4	燃料消費及び汚染物質排出量削減量の推計	50
5.5	対策費用の推計	53
5.6	費用効果分析の結果	54
5.7	本章のまとめ	56
	参考文献	
第6章	ゲル地区の浮遊粒子状物質排出削減ポテンシャルのシナリオ分析	
6.1	インフラ増強を考慮した費用効率性の評価	59
6.2	シナリオ分析による削減ポテンシャルの推計	62
6.3	分析結果	63
6.4	本章のまとめ	64
	参考文献	
第7章	結論	66
7.1	得られた成果	66
7.2	研究成果を踏まえた提案	67
7.3	さらなる提案, 研究課題	68
	参考文献	

第1章 序論

1.1 研究の背景

モンゴルの首都ウランバートル市は、世界一大気汚染問題が深刻だとされている都市である^{1),2)}。ウランバートル周辺の大気汚染物質の測定結果によると、PM10、PM2.5の冬季（10月～4月）の月平均濃度は、それぞれ150～420 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と100～220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、モンゴル大気環境基準の1.5～4倍、WHO基準に対して4～9倍超過している（表1.1、表1.2）。主な汚染物質は、SO₂、PM10、PM2.5であり、その主要な発生源はゲル地区の暖房用石炭ストーブである。

ウランバートル市の人口の約60%（73万6425人、18万4千世帯：2012年）がゲル地区に居住しており、冬季の10月～4月にかけてゲル地区の世帯では、暖房のために世帯あたり年間約4トンの石炭と3.18トンの薪が消費され³⁾、大量燃焼による排気ガスが大気の下層域にたなびいてスモックが発生しており、住民の喘息や気管支炎等の健康被害が危惧されている。ウランバートル市で使用されている石炭のほとんどは、水分と灰分の含有量が多く、燃焼時に煤煙排出量が多い。着火時の不完全燃焼の時間が長く、すす、硫黄酸化物、窒素酸化物、一酸化炭素等の有害物質が大量に発生する。

表 1.1 モンゴル大気環境基準と WHO 大気環境基準⁴⁾

Pollutant		Averaging time	Mongolia AQG value ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	WHO AQG value ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Particulate matter	PM 10	24 hour	100	50
		1 year	50	20
Particulate matter	PM 2.5	24 hour	50	25
		1 year	25	10

表 1.2 2013年1月～4月、10月～12月のウランバートル市の月平均PM濃度⁵⁾

"Location"	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Exceedance ratio to AQGs	
			"Mongolia"	WHO
Central city areas	150-420	100-220	1.5-4	4-9
Ger areas	200-1250	200-500	2-13	10-20

Source: Public Radio International (PRI)

1.1.1 研究対象地域(ゲル地区)の状況

ウランバートル市の面積は 4,700km²で、その 78.8%がゲル地区、21.2%がアパート地区である。図 1.1 はウランバートル市の地図であり、赤線の内側がゲル地区、緑色線の内側が都心部のアパート地区である。アパートが立地する地域はゲル地区に囲まれて存在している。図 1.3~1.6 に、ゲル地区のタイプを示す。

ウランバートル市は、全部で9区に分かれ、区がさらに 152 ホローに分かれている。これらのホローはゲル地区と呼ばれ、住宅としてはゲルのみ立地する地域と、ゲルが存在しない地域に分かれる。本研究では、都心部から遠く離れた3区は対象としない。

過去10年間で、ウランバートルのゲル地区の世帯数は70%増加し、20万4161世帯となった。増加の主な要因は、農村からの人口の移動である。その主な原因は、厳しい気候条件により冬季に家畜を失った遊牧民や、大学進学や仕事のための若者の移住である。ゲル地区全世帯の推移を、図 1.2 に示す。

ウランバートル市の中心域を取り巻くように広がるゲル地区のほとんどが、470m²~590m²の土地に戸建やゲル(フェルトテント)を建てて住み、これがハシャーと呼ばれる木製の柵で囲まれている。ゲル地区における公共サービスのインフラは極めて脆弱で、配電網は来ているが、それ以外(上下水、熱等)のインフラはない。ウランバートルのような大都市では、ほとんどの建築物が火力発電所からの熱供給を受けている。それ以外の業務用建築物は、小規模な石炭ボイラを個別に保有して、暖房を行っている。

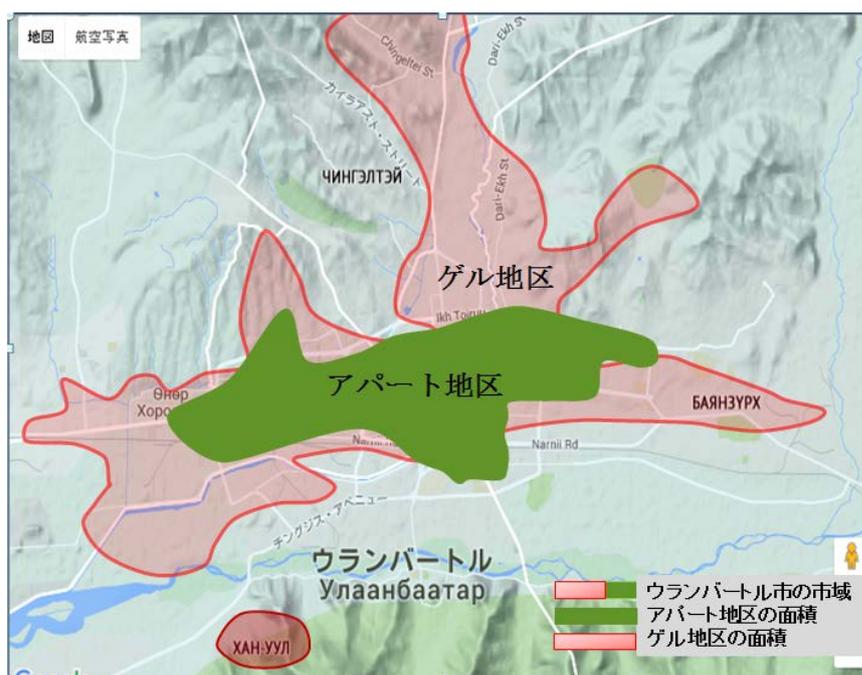


図 1.1 ゲル地区世帯の増加

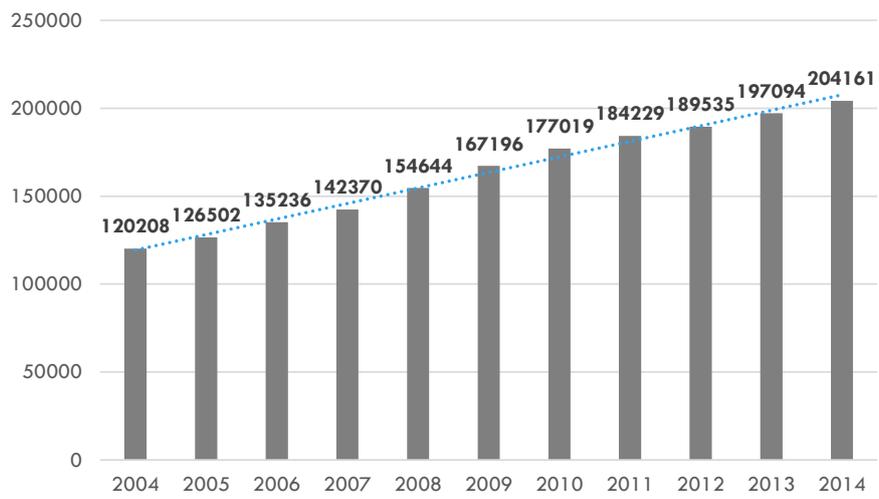


図 1.2 全ゲル地区の世帯の増加⁶⁾



図 1.3 ゲル地区冬季の様子



図 1.4 市内中心部のゲル地区



図 1.5 中間層のゲル地区



図 1.6 フリンジのゲル地区

ウランバートル市の年間平均気温は-3°Cであり、寒冷期の1月は-25°Cから-35°Cまでとなる。寒冷期は10月～4月まで7ヶ月間続く。ウランバートル市の気候概況を図1.7に示す。

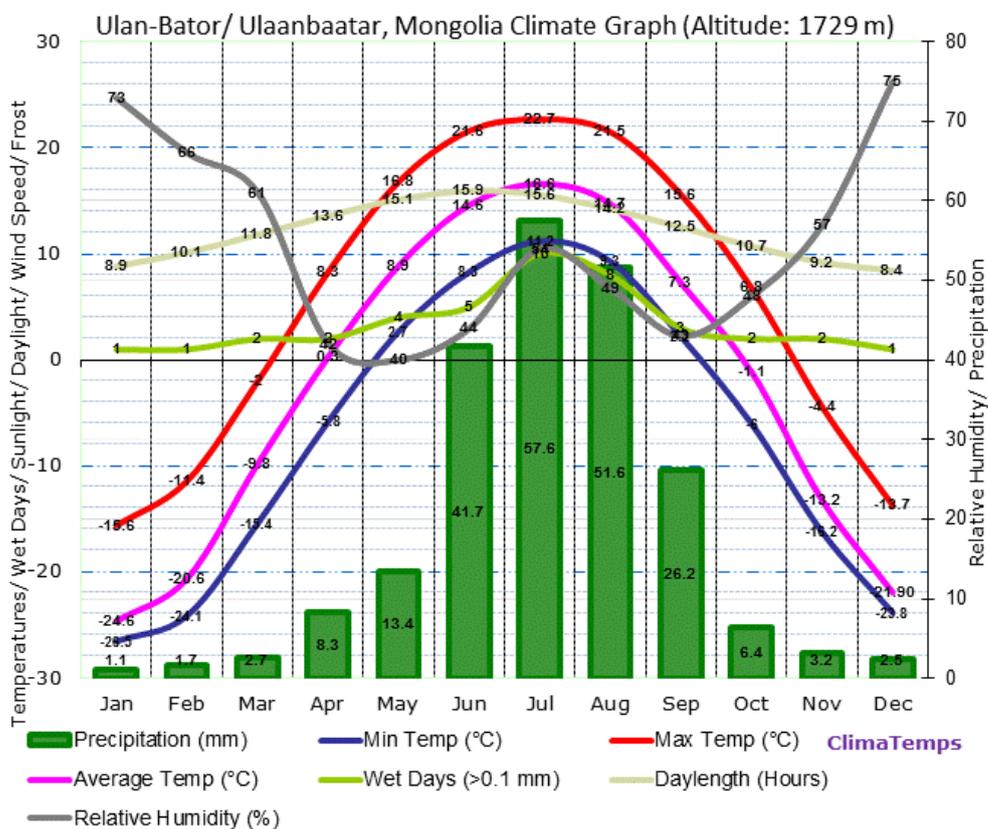


図1.7 ウランバートル市の気候概況⁷⁾

出典：http://www.ulaanbaatar.climatemps.com/

暖房のために利用されているストーブは主に2種に分かれ、ゲルではゲルストーブ、戸建てでは壁ストーブが利用されている（壁ストーブ57%、ゲルストーブ43%）。ストーブの写真を、図1.8、1.9に示す。図1.10に、ゲル地区内の燃料販売の様子を示す。



図1.8 ゲルストーブ



図1.9 ゲルストーブ



図1.10 石炭と薪の少量販売所

1.1.2 ウランバートル市の大気汚染源

ウランバートル市の大気汚染の発生源は、64%がゲル地区の18万世帯の石炭ストーブ、20%が29万7008台の自動車の排気ガス、6%が3箇所の火力発電所、6%が1,000箇所の中小ボイラ、4%が未舗装道路からの粉塵である。年間燃料消費量を、表1.3に示す。また、ウランバートル市の自動車台数の推移を、図1.11に示す。ウランバートル市の道路延長距離は566kmであり、そのうち113kmが未舗装道路である。

表 1.3 年間燃料消費量³⁾

	Annual coal consumption (t/year)	Annual wood consumption (t/year)
Get area	667,561	511,760
Coal Fired water Heater	19,857	
Heat only Boiler	113,975	
Power Plants	4,105,840	
Total	4,907,233	511,760

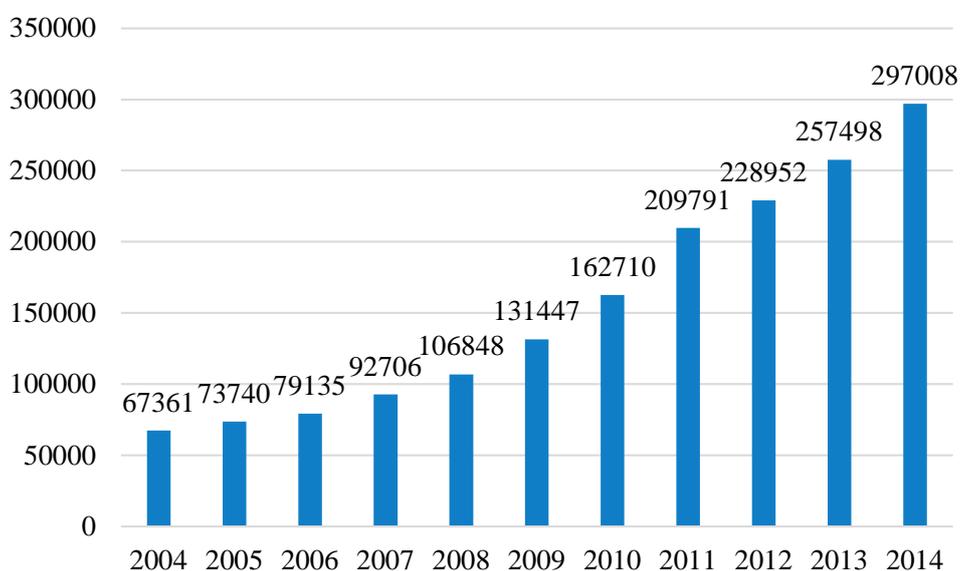


図 1.11 ウランバートル市内の自動車台数の推移⁶⁾

1.1.3 ウランバートル市の大気環境質

(1) 各測定点の詳細

市大気質庁が市内に設置している固定観測点（1. Tolgoit, 2. MNB, 3. Amgalan, 4. Nisekh）. 環境大気中の硫黄酸化物, 一酸化炭素, 粒子状物質（PM10, PM2.5）及び窒素酸化物濃度（24 時間平均）を毎日測定している. ウランバートル市の大気汚染測定局位置を, 図 1.12 に示す. 固定観測点と移動観測点の様子を, 図 1.13, 1.14 に示す.



ID	Name	Detailed Address	Start	End
Current Stations				
1	Tolgoit	65th secondary school, Tolgoit, Songinokhairkhan	2013-12	Up to now
2	MNB	Mongolian National Broadcaster, Bayangol	2009-02	Up to now
3	Amgalan	Botanik, Bayanzurkh	2013-12	Up to now
4	Nisekh	Between Airport and 4th Combined Heat and Power Plant	2009-04	Up to now
Previous Stations				
ex 1	Baruun 4 zam	Baruun 4 zam, Chingeltei	2009-04	2013
ex 3	2nd Emneleg	2nd Emneleg, Sukhbaatar	2009-03	2013

図 1.12 ウランバートル市の大気汚染測定局位置⁸⁾



図 1.13 固定観測点⁸⁾



図 1.14 移動観測点⁸⁾

表 1.4 環境大気質基準比較³⁾

物質名	平均化時間	単位	モンゴル	WHO	日本
二酸化いおう	10分平均	μg /m ³	500	500	
	20分平均	μg /m ³	450		
	1時間平均	μg /m ³			285
	3時間平均	μg /m ³			
	24時間平均	μg /m ³	20	20	114
	年間平均	μg /m ³	10		
一酸化炭素	30分平均	μg /m ³	60,000		
	1時間平均	μg /m ³	30,000		
	8時間平均	μg /m ³	10,000		25,000
	24時間平均	μg /m ³			12,500
二酸化窒素	20分平均	μg /m ³	85		
	1時間平均	μg /m ³		200	
	24時間平均	μg /m ³	40		123
	年間平均	μg /m ³	30	40	
粒子状物質 (PM10)	1時間平均	μg /m ³			200 ⁸⁾
	24時間平均	μg /m ³	100	50	100
	年間平均	μg /m ³	50	20	

出典：The Air Quality Department of the Capital City Capacity Development Mongolia (2012)

(2) 測定結果の提供

各観測点 (1.Tolgoit, 2. MNB, 3. Amgalan, 4. Nisekh) から得られた最新大気汚染状況を、1日平均値、30分平均値を大気指標として、ウランバートル市大気質庁のウェブサイト

に公開されている(図 1.15)。

また、2014 年からウランバートルの大気汚染監視ネットワークが開始され、大気環境質の測定データを直接に国民に公開するためスマートフォンから「O₂agaar」というアプリで見ることが可能になった。ウランバートル市内の 6 地区の大気環境質が大気質指標で表示されている。大気環境基準との比較を、表 1.4 に示す。

ウランバートルの大気汚染

市大気質庁による測定結果

ホーム 最新大気汚染状況 過去の大気汚染状況 このサイトについて

101

おすすめ シェア

大気汚染指標

大気汚染指標	数値
0 ~ 50	きれい
51 ~ 100	普通
101 ~ 250	弱い汚染
251 ~ 400	中程度の汚染
401 ~ 500	強い汚染
501 ~	非常に強い汚染

詳しくはこちらをごらんください。

なお、このサイトでは、モンゴルの法規に準じて大気汚染指標を計算しています。

リンク

- Air Quality Department, Capital City (Ulaanbaatar City, Mongolian contents)
- Meteorological Station - Pollution Research Control Information (Mongolian Government, Mongolian contents)

最新大気汚染状況(1日平均値、色は大気汚染指標)

	PM-10	PM-2.5	PM-1	CO	SO ₂	NO ₂	NO	O ₃	Temp.
	ug/m ³	deg C							
1. Tolgoit	160	131	127	2176	73	28	13	31	-25.3
2. MNB	154	141	138	2432	204	38	32		-19.1
3. Amgalan	118	92	86	1260	74	42	21	34	20.6
4. Nisekh	64	54	53	642	5	13	1	33	
Стандарт (MNS 4585 :2007)	100	50			20	40			

2016-03-08 00:00:00 から 2016-03-09 00:00:00 までの平均値

最新大気汚染状況(30分平均値、色は大気汚染指標)

	PM-10	PM-2.5	PM-1	CO	SO ₂	NO ₂	NO	O ₃	Temp.
	ug/m ³	deg C							
1. Tolgoit	50	24	20	383	38	2	1	57	10.6
2. MNB	39	33	31	448	16	14	5		-14.3
3. Amgalan	81	28	25	498	35	17	14	63	-20.9
4. Nisekh	34	21	20	289	3	6	-0	41	
Стандарт (MNS 4585 :2007)				60000					

2016-03-09 10:30:00 から 2016-03-09 11:00:00 までの平均値

最新大気汚染状況(48時間グラフ)

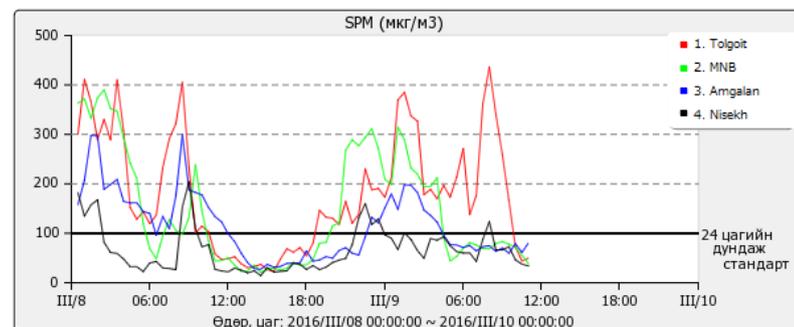


図 1.15 市大気質庁による測定結果⁵⁾

出典：Air Quality in Ulaanbaatar, <http://www.ub-air.info/ub-air/ja/>

(3) ウランバートル市の大気汚染の状況

2012～2015年の寒冷期（1-4月，10-12月）

2014年の10月～12月，2015年の1-4月の空気中の大気汚染物質の月平均濃度を2013，2014年と比較すると，PM10は $67\mu\text{g}/\text{m}^3$ （26%），PM2.5は $16\mu\text{g}/\text{m}^3$ （16%）， NO_2 は $7\mu\text{g}/\text{m}^3$ （14%）それぞれ減少した． SO_2 は変化してない．

2012-2015年の寒冷期（1-4月，10-12月）のウランバートル市の大気質状況を，大気汚染物質それぞれに以下の図に示す（赤線は大気環境基準）．

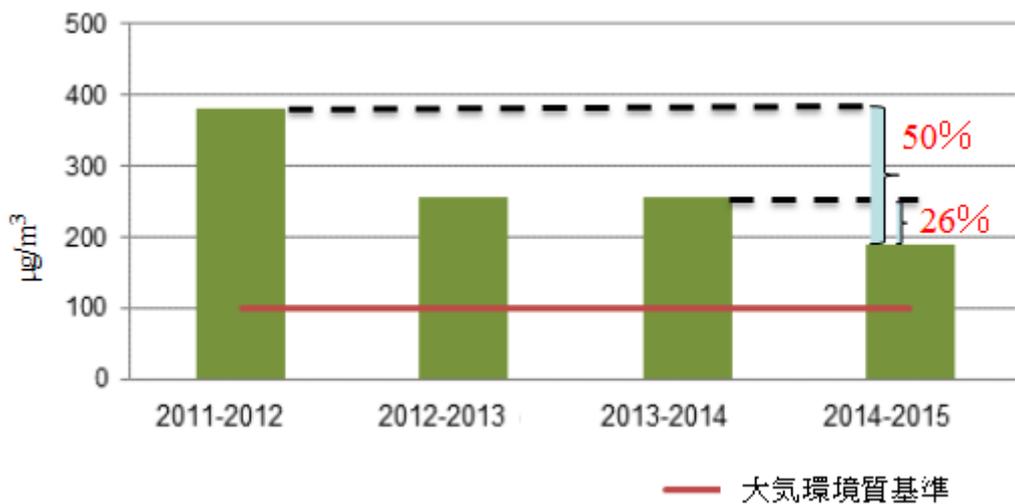


図 1.16 PM10の寒冷期の平均濃度，2011年～2014年⁹⁾

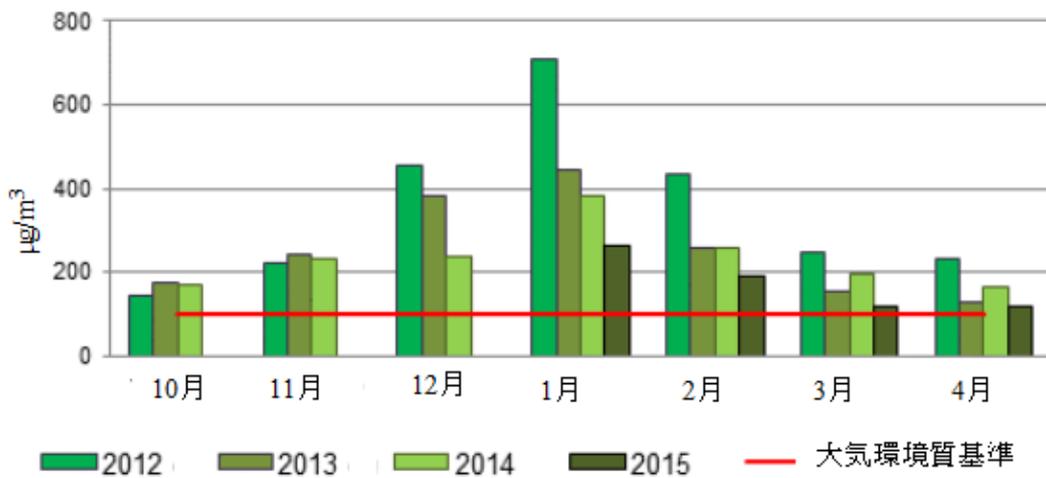


図 1.17 PM10の寒冷期の月平均濃度，2012-2015年⁹⁾

図 1.16 は、2014 年 10-12 月、2015 年 1-4 月及び寒冷期の PM10 平均濃度で、2011-2012 年と比較すると 50%減少、2012-2013 年、2013-2014 年に比べそれぞれ 26%減っている。大気環境基準との比較では、2011-2012 年は 3.8 倍、2012-2013 年、2013-2014 年はそれぞれ 2.6 倍、2014-2015 年は 1.9 倍超過している。

図 1.17 は、2014 年 10-12 月、2015 年 1-4 月の PM10 の月平均濃度であり、前年同期と比較して 10 月は $3\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2%)、11 月は $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4%)、12 月は $147\mu\text{g}/\text{m}^3$ (38%)、1 月は $121\mu\text{g}/\text{m}^3$ (32%)、2 月は $67\mu\text{g}/\text{m}^3$ (26%)、3 月は $76\mu\text{g}/\text{m}^3$ (39%)、4 月は $48\mu\text{g}/\text{m}^3$ (29%) それぞれ減っている。大気環境基準と比較すると、2014 年 10 月で 1.7 倍、11、

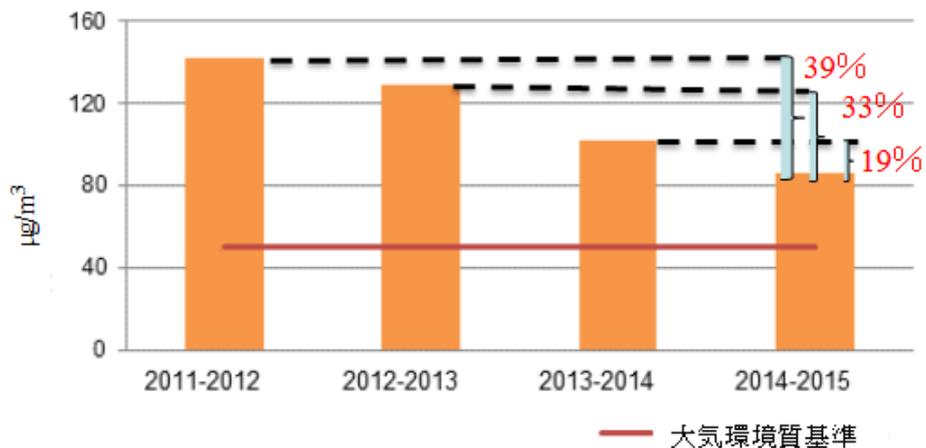


図 1.18 PM2.5 の寒冷期の平均濃度、2011 年～2014 年⁹⁾

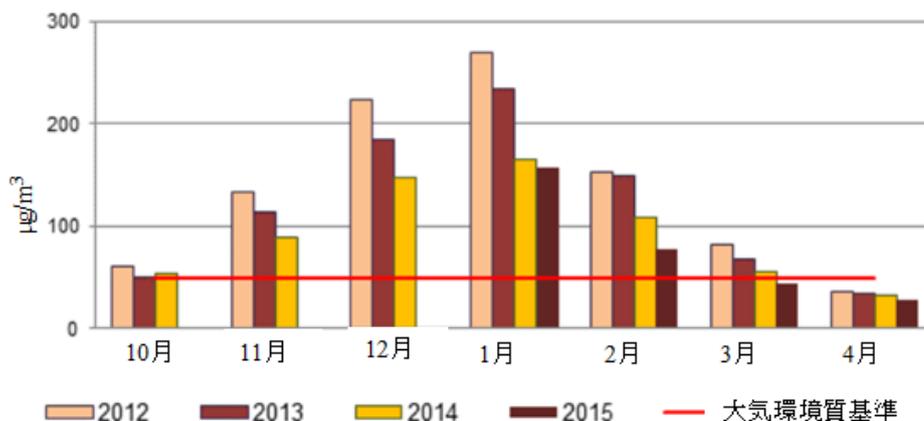


図 1.19 PM2.5 の寒冷期の月平均濃度、2012-2015 年⁹⁾

出典：National Agency for Meteorology and Environment Monitoring

12月はそれぞれ2.3倍、2015年1月は2.6倍、2月は1.9倍、3、4月はそれぞれ1.2倍超過している。

2014年10-12月、2015年1-4月の24時間の日平均最大値は、1月100 a1観測点（ゲル地区）の測定結果では、 $1,101\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、大気環境基準と比較して11倍超過している。

図1.18は、2014年10-12月、2015年1-4月及び寒冷期のPM2.5平均濃度で2011-2012年に比べ39%、2012-2013年に比べ33%、2013-2014年に比べ16%それぞれ減っている。環境大気質基準比較では2011-2012年は2.8倍、2012-2013年は2.6倍、2013-2014年はそれぞれ2.0倍、2014-2015年は1.7倍超過している。

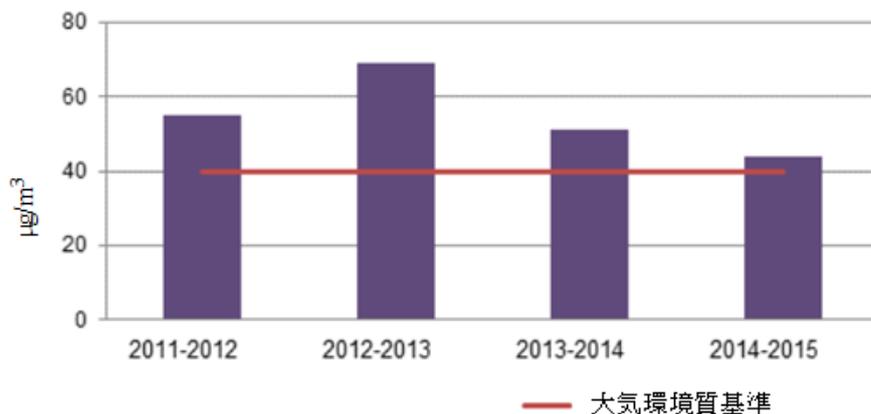


図 1.20 NO₂の寒冷期の平均濃度，2011年～2014年⁹⁾

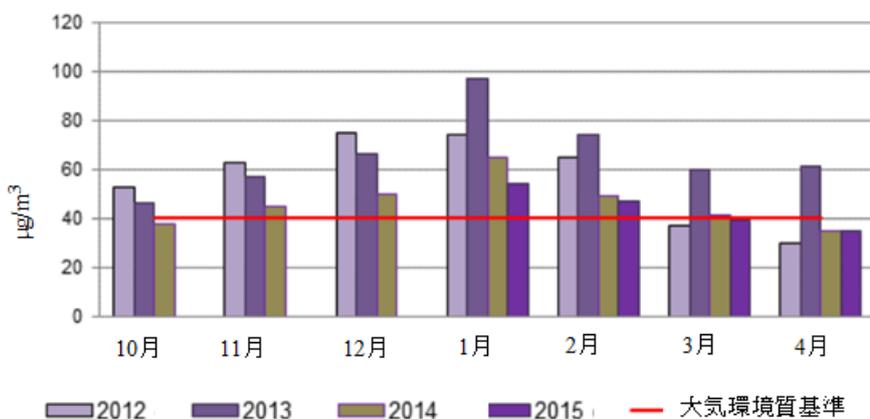


図 1.21 NO₂の寒冷期の月平均濃度，2012-2015年⁹⁾

出典：National Agency for Meteorology and Environment Monitoring

図 1.19 は、2014 年 10-12 月、2015 年 1-4 月のPM2.5 の月平均濃度である。前年同期と比較して、10 月は $4\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8%)、11 月は $24\mu\text{g}/\text{m}^3$ (21%)、12 月は $38\mu\text{g}/\text{m}^3$ (20%)、1 月は $9\mu\text{g}/\text{m}^3$ (5%)、2 月は $31\mu\text{g}/\text{m}^3$ (28%)、3 月は $12\mu\text{g}/\text{m}^3$ (21%)、4 月は $4\mu\text{g}/\text{m}^3$ (12%) それぞれ減少している。大気環境基準と比較して、2014 年 10 月は 1.1 倍、11 月は 1.8 倍、12 月は 2.9 倍、2015 年 1 月は 3.1 倍、2 月 1.6 倍超過しているが、3 月、4 月は大気環境基準より少ない。

2014 年 10-12 月、2015 年 1-4 月の 24 時間の日平均最大値は、1 月のBaruun4zam観測点の測定結果では $436\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、大気環境基準に比べ 8.7 倍超過している。

図 1.20 は、2014 年 10-12 月、2015 年 1-4 月及び寒冷期のNO₂平均濃度であり、2011-2012 年と比較して 20%、2012-2013 年と比較して 36%、2013-2014 年と比較して 14%それぞれ減少している。大気環境基準との比較では、2011-2012 年は 1.4 倍、2012-2013 年は 1.7 倍、2013-2014 年はそれぞれ 1.3 倍、2014-2015 年は 1.1 倍超過している。

図 1.21 は、2014 年 10-12 月、2015 年 1-4 月のNO₂の月平均濃度であり、前年同期と比較して、10 月は $9\mu\text{g}/\text{m}^3$ (17%)、11 月は $12\mu\text{g}/\text{m}^3$ (21%)、12 月は $16\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24%)、1 月は $11\mu\text{g}/\text{m}^3$ (17%)、2 月、3 月は $2\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4%) それぞれ減少し、4 月は変化していない。大気環境基準と比較すると、2014 年 11 月、12 月 1.1 倍、2015 年 1 月は 1.4 倍、2 月 1.2 倍超過しているが、10 月、3 月、4 月は大気環境基準より少ない。

2014 年 10-12 月、2015 年 1-4 月の 24 時間の日平均最大値は、11 月Baruun4zam観測点の測定結果では $135\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、大気環境基準と比較して 3.4 倍超過している。

1.1.4 国家により大気汚染削減対策

モンゴル政府は、外国の援助・協力を得て、これまでに下記の対策を実施してきた。2011 年から 2015 年までに、対策に活用した補助金及び予算を表 1.5 に示す。

- ・ ゲル地区への改善ストーブ（エネルギー効率を向上させ、大気汚染物質の排出量を軽減させる完全燃焼ストーブ）の導入
- ・ ゲル地区への改善燃料（セミュークス、練炭）の導入
- ・ 石炭ストーブの代わりに電気ヒーター利用する（夜間の電気料金を 50%割引制度）
- ・ ゲル地区世帯のアパートへの移転
- ・ ゲル地区住民に対するエネルギー効率の高い建物「グリーンハウス」の提案（熱損失を軽減させる断熱材を使用、暖房システムは電気ヒーター）

- ・ 暖房用ボイラーの交換
- ・ 市民が大気汚染状況を確認できるアプリケーションの開発
- ・ 自動車のナンバープレートによる入境制限
- ・ 第4火力発電所の改修

2011年から国家がウランバートル市の大気質改善ゾーンを設定し、その地域にともなう規制を承認している。ウランバートル市の大気質改善ゾーンは毎年更新されている。そこでは改善燃料（セミコークス、練炭）は19,039トンが2,000世帯に導入され、未加工石炭の使用が禁止されている。

2011年から2015年の間に、ゲル地区の従来ストーブを改善ストーブに転換する対策は、175,618世帯に対して77%の補助金を活用して導入された。ゲル地区世帯の90%が改善ストーブを購入しているが、利用している世帯数は不明である。

石炭ストーブの代わりに電気ヒーターを利用する対策は、28,000世帯を対象に検討されているが、暖房用に必要となる電力供給が不足するために、現在のところ進んでない。なお、ゲル地区において電気ヒーターを利用している世帯や、大気質改善ゾーンの58,600世帯の夜間（18:00～9:00の時間帯）の電気料金を50%割引している。

ゲル地区世帯のアパートへの移転対策は、現状ではあまり進んでいない。政府による低金利の住宅ローンがあり、20年間で支払う条件の政策が開始され、2014年5月7日の時点で住宅ローンの利用者は合計59,756人（図1.22）、その39,229人がウランバートル市内の市民である。

また、2013年からウランバートル市のゲル地区開発プロジェクトが開始され、市の予算から1478億トゥグルグ（0.73億ドル）が、ネットワークインフラ、道路、ダム等の建設が計画されている。それを見越して、蒸気配管の交換・増強工事が行われている。

ゲル地区世帯の土地をアパートと交換することで、アパート、戸建て、学校、幼稚園、オフィスビル等の建設用地を取得する政策もある¹²⁾。プロジェクトの計画面積は、1,506.1ヘクタールであり、2014年の時点で土地取得の計画面積の15%、1,189ゲル地区世帯が土地を譲っている。

ゲル地区に立地する住宅の熱損失が大きいいため、エネルギー効率の高い建物「グリーンハウス」をゲル地区世帯に提案する政策もある。エネルギー効率の高い建物は、熱損失を軽減させるために断熱材を利用しており、暖房システムは電気ヒーターを設置するのが通常である。

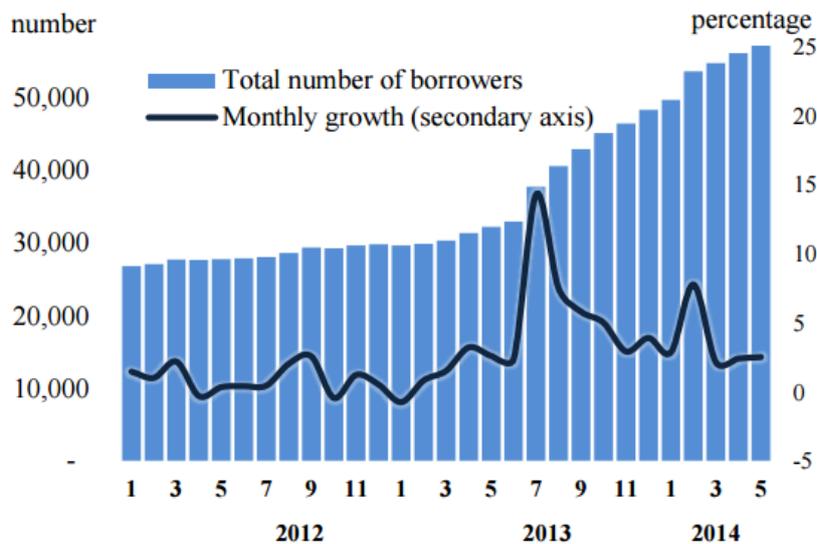


図 1.22 住宅ローンの総借入者¹⁰⁾

出典: Mortgage loan report, Bank of Mongolia, May 2014

表 1.5 国家により大気汚染削減対策の補助金及び予算^{11), 12)}

期間	対策種	対象世帯数	国補助金/予算 万ドル
2011-2015	改善ストーブ ¹¹⁾	175, 618	1, 100
2011-2015	改善燃料 ¹¹⁾ (セミコークス, 練炭)	2, 000	220
2011	電気ヒーター ¹¹⁾	28, 000	
2011-2015	電気料金を50%割引 ¹¹⁾ (18:00~09:00)	58, 600	
2013-2014	ゲル地区開発 プロジェクト ¹²⁾	ネットワークインフラ, 道路, ダム等	7300
2013-2014	ゲル地区世帯の アパート移転する契約 ¹²⁾	1, 189	
2011-2014	ヒーターボイラーの交換 ¹¹⁾	34個	759

1.2 研究目的

ウランバートル市の主要な大気汚染の発生源であるゲル地区の石炭ストーブ起因の大気汚染削減対策を対象に、各種対策技術の効果とその導入地域、さらに対策の導入時期を考慮した複数シナリオを構築し、ゲル地区の地域別最適オプションを見出すことが目的である。

1.3 既往研究レビュー

関連研究では、世界銀行の一連の調査²⁾がある。そこでは、2022年までの大気汚染物質（TSP）削減のための様々な対策とその効果が検討されている。しかし、ストーブ及び燃料の改善、電気ヒーター、アパートへの移転は取り上げられているが、従来の政策との連続性が考慮されており、大きな変革を伴う対策は含まれない傾向にある。（本研究では、新たな対策の追加、対策の組み合わせによるシナリオの追加と、計算条件の再考を行ったことが大きな相違点である。つまり、地域熱供給システム（District Heating System: DHS）の拡張と、太陽熱空気加熱（Solar Air Heat: SAH）との組み合わせシナリオの考慮である。）

ウランバートル市は、大気汚染対策を推進するために2006年に同市自然環境保護局に大気質課を設立し、その後、2009年2月に同部を首都大気質庁（以下、「AQDCC」）に格上げしたが、同庁職員は大気汚染の複雑な問題を取り扱うための知識と経験が不足していた。当時は各汚染源が大気環境に及ぼす影響が不明であり、大気汚染の原因や実施すべき対策を検討するにあたり、科学的根拠に基づいたデータがほとんど存在しない状態であった。

このような状況下で、JICAはウランバートル市の大気汚染対策能力を強化するため、技術協力プロジェクト「ウランバートル市大気汚染対策能力強化プロジェクト（2010年3月～2013年3月）」（以下、「フェーズ1」）を実施した。このプロジェクトの中で、AQDCC及び関係機関に対し、発生源インベントリ作成、大気拡散シミュレーションモデル構築、排ガス測定、ボイラ登録管理制度導入、発電所及びHOB等の診断・対策案の検討等に関する技術協力を行い、大気汚染対策を科学的根拠に基づき検討する能力の向上に貢献した¹³⁾。本研究では、その調査による発生源インベントリデータ、排ガス測定の排出係数を用いて計算条件の再考を行う。これにより、ゲル地区から発生する汚染物質の排出量をストーブ別、燃料別に算出できる。これは世界銀行による調査との大きな相違点である。

またCVM調査に関しては、「東アジアにおける環境政策の効率性評価に関する研究：クアラルンプール市、広島市、上海市のCVM調査および東広島市の選択型実験調査を事例」¹⁴⁾を踏まえ、新たにモンゴルにおける選択型実験調査を実施して、大気汚染削減対策による健康便益の評価を行なう。

1.4 本論文の構成

本研究は1～7章から構成されている。各章の具体的な内容については以下に記すとおりである。図1.14に論文の構成を示す。

第1章では、研究の背景、研究目的、概要、既往研究のレビューについて述べる。

第2章では、ウランバートル市の大気汚染物質削減プロジェクトを対象に、現地調査を踏まえ費用便益分析(CBA)を実施することで、その費用効率性を評価することである。具体的には改善ストーブ、電気ヒーター、グリーンハウス等の各プロジェクトを対象に分析する。

第3章では、改善ストーブの効果と燃料(石炭とセミコークス)の効果の評価するために、室内空気質の測定を現地にて実施し、各種対策のPM排出量削減量と対策コストを比較することで、費用効果分析する。具体的には、ゲルと戸建ての別に、改善ストーブ+石炭、従来ストーブ+石炭、従来ストーブ+セミコークスの組み合わせで、24時間測定を行う。

第4章では、仮想市場評価法(CVM)を適用することで、大気汚染削減対策による健康便益を評価する。具体的には、ゲル地区とアパート地区に住む400人の住民に対してCVMの二肢選択形式のアンケート調査を実施し、大気汚染濃度が高い5ヶ月間の家族の健康を守るための支払意志額(WTP)を推計する。

第5章では、新たにSAHを組み合わせたシナリオやDHSを考慮し、燃料消費削減量や対策コストの比較により費用効果分析を適用することで、それらの費用効率性を評価する。具体的にはSAHを改良型ストーブ、従来型ストーブ、電気ヒーター等と組み合わせるケース、DHSに接続するケース、ゲル地区の世帯をアパートに移転させるケース等の削減対策を対象に、費用効果分析を行う。各削減対策のTSPとPM10排出量削減量と対策コストを比較することで、費用効果分析を行う。

第6章では、第5章で見出した費用効率性の高い対策を対象に、ゲル地区の地域別最適オプションを算出することで、2024年までの最適な対策シナリオを求め、その浮遊粒子状物質の削減ポテンシャルを推計する。具体的には、SAH+電気ヒーター、DHS

への接続，ゲル地区世帯のアパートへの移転に対して，インフラ増強を評価範囲に含める．各削減対策に対して，設備投資（イニシャルコスト）と，燃料費節減を考慮した暖房費用（ランニングコスト）を30年間で推計する．

第7章において，本研究全体の成果をまとめる．

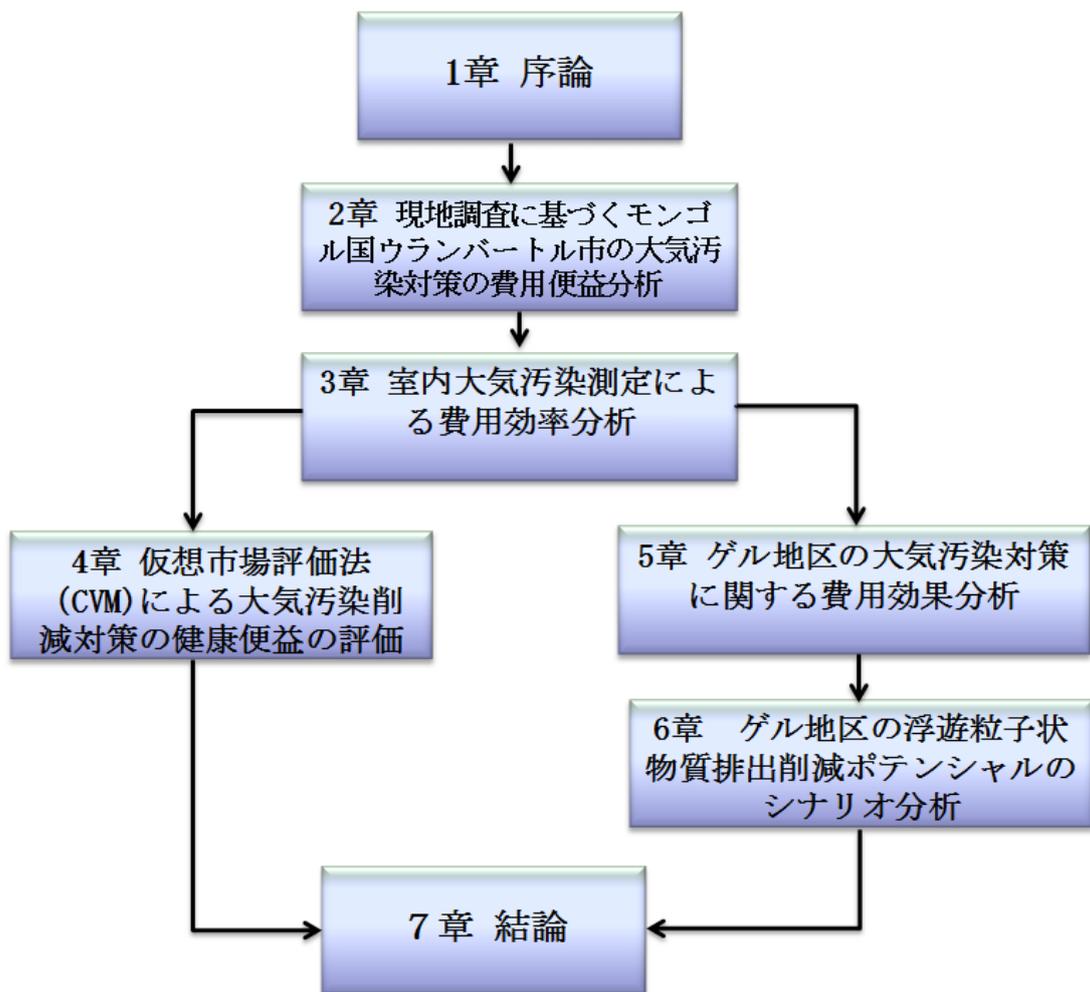


図 1.14 本論文の構成

参考文献

- 1) World Bank (2009) : Authors' illustration based on data from the China Environment Yearbook 2009 for Chinese cities, AMHIB study for UB, and WHO Air Quality Guidelines - Global Update 2005 for other cities
- 2) World Bank (2009) : Air Monitoring and Health Impact Baseline Study (AMHIB)
- 3) The Air Quality Department of the Capital City (2011) : Capacity Development Project for Air Pollution Control in Ulaanbaatar City Mongolia, Progress Report 2,
- 4) Mongolian Agency for Standardization and Metrology,
http://www.estandard.gov.mn/index.php?module=standart&cmd=standart_desc
- 5) Air Quality in Ulaanbaatar, <http://www.air.ub.gov.mn/archive/month.html>
- 6) Statistics Department of Ulaanbaatar, <http://ubstat.mn/Statistics>
- 7) Ulan-Bator/ Ulaanbaatar Climate & Temperature,
<http://www.ulaanbaatar.climateps.com/>
- 8) Air Quality in Ulaanbaatar, <http://www.ub-air.info/ub-air/about/station-map.html>
- 9) National Agency for Meteorology and Environment Monitoring
- 10) Mortgage loan report, Bank of Mongolia, May 2014
- 11) Air Quality Agency of the Capital city, Mongolia. City air quality improvement zones 2014
- 12) Ulaanbaatar city Ger Area Development Action Report, 2014
- 13) The Air Quality Department of the Capital City (2012) : Capacity Development Project for Air Pollution Control in Ulaanbaatar City Mongolia, Progress Report 3
- 14) 東アジアにおける環境政策の効率性評価に関する研究：クアラルンプール市，広島市，上海市の CVM 調査および東広島市の選択型実験調査を事例として広島大学大学院国際協力研究科 教授 松岡俊二，ほか 4 名，Working Paper Series Vol. 2003-19

第2章 現地調査に基づくウランバートル市の大気汚染対策の費用便益分析

2.1 概説

ゲル地区の大気汚染対策の短中期の削減プロジェクトとして、改善ストーブ、電気ヒーターと風力発電の組み合わせ、グリーンハウスの3つの対策について、費用便益分析を行った。

ゲル地区の従来ストーブを改善ストーブに転換する対策は、2,011年3月から2012年の間にゲル地区の大気汚染低減制限地域97,877世帯に対して実施され、77%の補助金を利用して導入された。改善ストーブはエネルギー効率を向上させる完全燃焼ストーブであり、大気汚染物質の排出量が従来ストーブに比べ少ないことで選択された。主に導入された2種の改善ストーブの図及び仕様を表2.1、図2.1に示す。

表 2.1 改善ストーブの仕様¹⁾

Type of improved stove	Ulzii stove	Khas stove
Fuel type	Solid coal and wood	Solid coal and wood
Heating surface	2m ²	2.18m ²
Heating Power	6.5kW	7.5kW
Heating capacity	60m ²	60-80m ²
Flue Diameter	130mm	130mm
Gross Weight	60kg	87.5kg
Fuel Loading	12kg	18kg
Dimensions (l,w,h)	360x55x680mm	450x570x775mm
Heating Efficiency	71% TS-EN-13240	74% TS-EN-13240

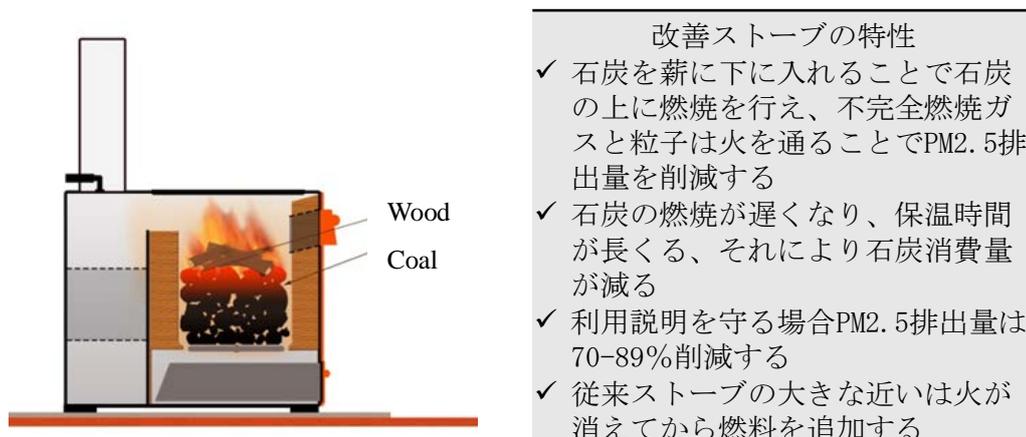


図 2.1 改善ストーブの燃焼過程¹⁾

石炭ストーブの代わりに電気ヒーター利用する対策は2011年3月からゲル地区の774世帯を対象に検討された。ゲル地区世帯において暖房に電気ヒーターを利用することは、大気汚染物質の排出量削減には効果が高い。しかし暖房のための電気料金は石炭のコストより高くなるので、ゲル地区において電気ヒーターを利用している世帯の電気料金（18:00～9:00の時間帯）を50%割引している。電気ヒーターをゲル地区世帯に供給するためには、暖房用に必要となる電力需要が増加する。

そこで、ここではモンゴルにおいて実施されている風力発電プロジェクトと電気ヒーターを組み合わせた対策について費用便益を分析した。モンゴル初の風力エネルギープロジェクトとして、50MWの「サルヒト風力発電所」が建設されている。年間約16.4万トンの二酸化炭素排出を削減させる予定である。30m²の戸建てとゲルの電気加熱のための平均電力需要を4kwとすると、50MWは12,500世帯分の電気ヒーター利用のための電力を供給できる可能性を有する。

ゲル地区の別の大気汚染対策として、エネルギー効率の高い建物である「グリーンハウス」対策がある。ウランバートル市のゲル地区では、43.0%がゲル、55.3%が戸建てに住んでいる。ゲルの熱損失は、国家断熱標準より4～5倍、戸建ては2～3倍であり、熱損失が大きいことが冬季の石炭消費量を増加させる要因の一つになっている。エネルギー効率の高い建物は、熱損失を軽減させるために断熱材を利用しており、暖房システムは電気ヒーターを設置するのが通常である。また、床暖房や太陽パネルも提案している。本分析では、ゲル地区世帯の所得を考え、上水と汚水タンクの設置されている30m²の住宅として住居費を推計し、年間600世帯がグリーンハウスに移転するとして推計した。ゲル地区の住民の所得から考えると、実際にはこの速度でグリーンハウスに移転することは困難であると考えられる。



図2.2 グリーンハウスの暖房システムの事例 2013年1月撮影：
太陽パネル，床暖房，電気ヒーター，

2.2 分析方法

ゲル地区の短中期の大気汚染対策プロジェクトを対象として、費用便益分析を実施した。直接的な便益のうちの燃料費節減を明らかにするために、改善ストーブ利用者にアンケート調査を用いて算出した。また、費用については対策の投資コスト、便益は燃料費の削減と健康便益について比較することで CBA を実施した。各種大気汚染削減から得られる健康便益を推計するために燃料消費量の削減による PM 削減排出量を推計し、死者数及び疾患等健康影響と支払意思額 (WTP) の調査結果から求めた。

2.3 燃料消費及び汚染物質排出量削減量の推計

2.3.1 改善ストーブの燃料削減量

改善ストーブ利用に関する現地調査では、2011 年 3 月から国家により実施されている改良型ストーブプロジェクトを対象として、その実態を調査するために、改良型ストーブ利用者 50 世帯に対してアンケート調査を行った。改良型ストーブとはエネルギー効率を向上させる完全燃焼ストーブであり、大気汚染物質の排出量が従来型ストーブに比べ少ないことで選択された経緯がある。調査地点については、ホローの行政担当者から改良型ストーブを購入した世帯の住所を得た。

アンケート調査の結果、改良型ストーブで燃料消費量が 30%削減していることがわかった。これによると、改良型ストーブによる石炭削減量は 7.5kg 以上のレンジが最も多いことがわかる(図 2.4)。冬期の最も寒い時期(11月~2月)の一日平均燃料消費量が 24 kgであることから、このレンジの世帯では石炭消費量を約 30%削減できたことになる。また、改良型ストーブは保温時間が長いので、従来型ストーブでは 1 日に 4~5 回火を維持するために燃料を補充する必要がある作業が、改良型では 2 回で済む。その



図 2.3 改善ストーブ(Ulzii)のイメージ

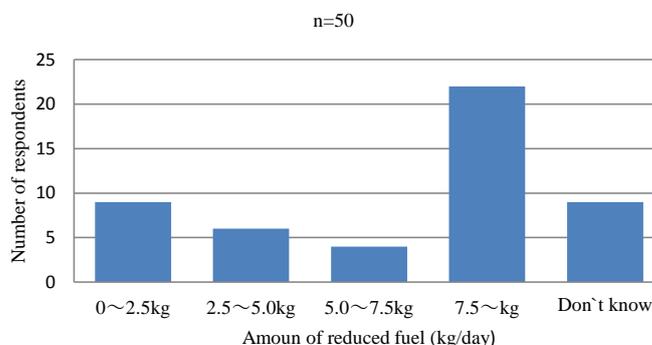


図 2.4 改善ストーブによる石炭削減量

ため、作業時間及び燃料消費量・費用の削減、室内汚染の改善による医療費や薬等の費用削減が便益として考えられる。

改良型ストーブの問題点として、従来のストーブより 鍋を置く面積が小さいため調理するには不便であり、人数が多い家族は電気ストーブを併用していることがわかった。改良型ストーブの利用方法は前のストーブと異なるので、使用方法を守らない場合一酸化炭素に暴露する可能性があり、また煙突を掃除する必要もあるが、正しい使い方をしていない利用者が多く、効果が十分発揮されていない実態があることもわかった。住民は、改良型ストーブの便益を理解しており需要は大きい、普及促進策の適用地域が限定されているため、ゲル地区全体に供給が進んでいないことも明らかとなった。

2.3.2 汚染物質排出量削減量の推計

ゲル地区各世帯年間平均燃料消費量は 4.2 トンである (表 2.2)。これをもとに、改善ストーブの配布数(97,877 世帯)と、現地調査から得た世帯の石炭消費削減割合(30%)を用いると、燃料消費の削減量を推計できる。電気ヒーターを利用する 12,500 世帯と、グリーンハウスに移転する 600 世帯については、年間 4.2 トン石炭を削減 (100%削減)とした。PM10 と PM2.5 の排出削減量は、以下の計算で算出した。表 2.3 に、排出係数 (emission factor) と各削減対策による PM10, PM2.5 の 2011~2026 年の PM 削減量を示す。

$$\begin{aligned} \text{排出削減量} &= \text{石炭削減量 (t)} \times \text{排出係数 (kg/t)} / 1,000 + \\ &\quad \text{薪 削減量 (t)} \times \text{排出係数 (kg/t)} / 1,000 \end{aligned}$$

表 2.2 住宅及び暖房システム種別石炭消費量と支出額 (2006 年 9 月~2007 年 4 月)²

Type of dwelling and heating system	Average household monthly income (Tg)	Total expenditure for coal (Tg)	Average raw coal used per household (t)
Ger	206,519	162,087	3.49
House without heating wall	240,836	176,073	3.9
House with heating wall	261,005	176,870	4.49
House with LPB	341,842	219,385	6.17
Hostel, dormitory, other	198,248	182,125	4.82
Total	247,788	174,767	4.19

表 2.3 各大気汚染削減対策による PM10, PM2.5 の削減量

Pollutant	Emission factor ³⁾		Ger area			
	Coal (kg/ton)	Wood (kg/ton)	Total emission without project (ton/ 15 year)	Emission reduction by improved stove (15 year/ton)	Emission reduction by electric heating (15 year/ton)	Emission reduction by green house (15 year/ton)
PM10	16	18.5	348,221	55,672	23,631	1,134
PM2.5	9.6	16.7	258,136	41,296	17,517	841

2.4 健康便益の推計

PM による健康便益（健康被害の低減）を各削減対策の削減量から推計するために、人口加重平均 PM 濃度を利用した。表 2.4 に、ウランバートルの人口加重平均 PM 濃度及び削減対策による削減量を示す。

各削減対策により得られる健康便益については、世界銀行が 2009 年に実施したウランバートル市の大気汚染による早死及び病気の対策への支払意思額(WTP)の調査結果¹⁾を用いて、式(2.1)及び式(2.2)を用いて推計した。

この調査は、世界銀行が数カ国において行った WTP の調査結果をもとにモンゴルに適用したものであり、早死リスクを 10 年間にあたり 0.5% (1,000 人中 5 人) と 1% 削減することに対する WTP を市民に訪ねる方法で実施されている。調査結果によると、市民は世帯購入の約 3% を 0.5% の早死リスク削減に支払う意思があるとの結果が得られ、これから統計的生命 (VSL) が 22,100 ドルであることが明らかになった。

推計に用いた大気汚染削減対策別パラメータを表 2.5 に、健康便益 (WTP) の推計結果を表 2.6 に示す。

表 2.4 ウランバートルの人口加重平均 (PWE) PM 濃度
及び大気汚染削減対策による削減量 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	PM10	PM2.5
Present situation (2011-2012) ⁴⁾	465.75	282.96
16% reduction by improved stove	7.32	9.65
6.8% reduction by electric heating	3.11	4.10
0.33% reduction by relocation into Green house	0.15	0.20

$$E = \{(RR - 1) / RR\} \times f_p \times POP \quad (2.1)$$

ここで,

E : 死者数及び疾患等健康影響を受ける事例数

RR : 汚染の2つのレベル間の健康影響の相対リスク

f_p : 健康影響の発生率

POP : 人口

また, RR は以下の式で求めた.

$$RR = \exp\{\beta \times (D - Dt)\} \quad (2.2)$$

ここで,

D : メッシュ列人口加重平均

Dt : PWE の閾値

β : PM における暴露反応係数

表 2.5 推計に用いた大気汚染削減対策別パラメータ⁴

Health end-point	(β) Exposure -response coefficient (PM metric)	(f_p) Baseline incidence rate	"Cost per case (US\$)"
Premature death (WB method)	SeeWB (2007)	0.0067	221,000 (WTP)
"Premature death "Pope et al.(2009)"	See text	0.0067	221,000 (WTP)
Chronic bronchitis	0.48 (PM10)	0.0148	70,720(WTP)
Respiratory hospital admissions	0.024(PM2.5)	0.0685	1,055 (COI)
Cardiovascular diseases hospital admissions	0.082(PM2.5)	0.0196	1,703 (COI)

表 2.6 各削減対策の健康便益の推計結果

Air pollution abatement measures	Premature death	Chronic bronchitis	Hospital admissions (Respiratory disease)	Hospital admissions (CVD)	Sum (million US\$/year)
16% reduction by improved stove	7.78	0.53	0.19	0.25	8.75
6.8% reduction by electric heating	3.31	0.22	0.08	0.11	3.72
0.33% reduction by relocation into Green house	0.15	0.01	0.01		0.17

2.5 費用及び便益の推計

純現在価値（NPV）について、投資コストと直接的な便益（燃料費節減）、健康便益を見積もり、11%の割引率 10) で 2011～2026 年の期間で計算した。各対策のコスト項目を表 2.7 に示す。NPV は、式(2.3)で表される。

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{Bt - Ct}{(1+r)^t} \quad (2.3)$$

ここで、

Bt : t 年次の便益

Ct : t 年次の費用

t : 年次

r : 社会的割引率

表 2.7 各大気汚染削減対策のコスト項目

Abatement measures	Public investments			Individual investments		
	Generation capacity	Infrastructure	Subsidies	Stoves	Home improvements	Energy savings
Improved stove				+		+
Electric heating + wind energy	+	+	+	+		
Relocation into Green house			+	+	+	

2.6 費用便益分析の結果

表 2.8 に、各削減対策の純現在価値と、15 年間の平均排出削減量及び投資コストを示す。

97,877 世帯の改善ストーブの NPV は 1.3 億ドルと推計された。ゲル地区から発生する汚染物質の 15 年間の削減量は、PM10 は約 56 千トン、PM2.5 は約 41 千トンであり、大気汚染削減による便益が大きいことがわかった。

12,500 世帯の電気ヒーター利用する場合の NPV は -283 万ドルとなり、直接的な便益がマイナスとなった。しかし、ゲル地区から発生する汚染物質の削減量は 15 年間で PM10 は約 24 千トン、と PM2.5 で約 18 千トンであり、電気ヒーター導入世帯である 12,500 世帯については削減量が一番多い。

また石炭を利用しないことで、燃料の購入、点火、家庭の清掃等の時間の節約と、風力発電所の場合は温室効果ガスの削減効果が高いと考えられる。ゲル地区全体を電気暖

表 2.8 15 年間の純現在価値，平均排出削減量，投資コスト

	Number of households	PM10 emission reduction 15 year/t	PM2.5 emission reduction 15 year/t	Emission reduction over 15 year	NPV million USD	Investment cost million USD
Improved stove	97,877	55,672	41,296	16	133.81	25.57
Electric heating+ wind energy	12,500	23,631	17,517	6.8	-2.83	133.03
Relocation into Green house	9,000	1,134	841	2.6	-80.65	189

房にするためには，電力需要が増大し，発電への大規模な投資が必要である。

9,000 世帯のグリーンハウスへの移転の NPV は-8,100 万ドルであり，これも直接的な利益はマイナスとなった。しかし石炭利用しないことで燃料の購入・点火・清掃等に要する時間の節約による便益や，さらに家庭の生活環境全般が変化することによるメリットが考えられる。ゲル地区から発生する汚染物質の削減量は，15 年間で平均 2.7%削減，PM10 で約 1.1 千トン，PM2.5 で約 0.84 千トンの削減であり，3つのケースの中で大気汚染物質の削減量は最も少ないが，生活環境全般にわたる広範なメリットが見込まれる。

2.7 本章のまとめ

本章では，ウランバートル市ゲル地区の大気汚染対策のうち，比較的短期間で実施可能な3つ対策を対象として費用便益分析を行った。その結果，改善ストーブは，比較的 low cost で，ゲル地区からの PM 排出量を約 16%削減でき，費用効率の高い対策であることが示された。

ゲル地区全体において暖房に電気ヒーターを利用すれば，ゲル地区からの大気汚染排出量は 100%近く削減され，長期的なメリットはあるが，必要な発電量を増やすために大規模な投資が必要となる。

グリーンハウスの移転は現状では進んでいないが，住宅ローンの金利が安くなれば，グリーンハウスへの移転が増える可能性があると考えられ，効果的な対策の1つといえる。さらに，室内空気環境への影響を費用便益分析の枠組みに加えることと，より長期的な対策を分析に含めることも課題である。後者のためには，人口や所得の将来予測や，都市成長管理を含め，よりダイナミックな分析とする必要がある。

参考文献

- 1) Air Quality Agency of the Capital city, Mongolia,
<http://www.airquality.ub.gov.mn/medee/halaaltiin-zuuh.html>
- 2) World Bank.: Baseline Fuel Consumption, Heating Stove, and Household Perception Survey, December 2007
- 3) World Bank.: Air Monitoring and Health Impact Baseline Study (AMHIB), June 2008 - May 2009
- 4) World Bank: Air Quality Analysis of Ulaanbaatar Improving Air Quality to Reduce Health Impact, pp. 21-25, 36-68, 2011.
- 5) 田中 勝: 循環型社会評価手法の基礎知識, pp. 129-13, 2007.
- 6) 森杉 壽芳, 宮城 俊彦: 都市交通プロジェクトの評価, pp. 109-1,1996.
- 7) ジョン・デイクソン メイナード・ハフシュミット: 環境の経済評価テクニック, pp. 47-50, 1993.
- 8) National Statistical office of Mongolia : Mongolia statistical yearbook, pp.82-89, pp301-31, 2010.
- 9) <http://www.estandard.mn/filebase/files/4585-2007>.
- 10) Mongolia Central Bank Discount rate. (31 December 2012) [Online]. Availavle:
http://www.indexmundi.com/mongolia/central_bank_discount_rate.html

第3章 室内空気汚染測定による費用効果分析

3.1 概説

2章では改善ストーブ(燃料消費の削減量)を含む各種対策の大気削減効果を評価したが、改善ストーブの効果と燃料(石炭とセミコークス)の効果を見るために排出量の測定が必要である。

本調査では、住宅の煙突から発生する排出量が外気温により変化するため室内汚染の測定を行え、ゲル地区の戸建てとゲルの室内空気質への影響を比較分析した。

測定項目は、PM2.5, PM10, TSP, COである。測定は2013年1月11日～1月17日の6日間に実施した。ウランバートル市の大気汚染低減制限地域の改善ストーブを配布されたゲル地区のバヤンズレフ区第13ホローのゲルと戸建てを調査対象とした。具体的には、ゲルと戸建ての別に、改善ストーブ+石炭、従来ストーブ+石炭、従来ストーブ+セミコークスの組み合わせで、24時間測定を計6回実施した。

燃料としては、NALAIKH鉱山の生石炭とMAK社のセミコークスを使用した。セミコークスはゲル地区の別の大気汚染対策として大の大気汚染低減制限地域に補助金を利用して普及されているセミコークスの製造コストが高いため1トンあたりの15万トグルグ(112ドル)である。石炭より安くするために1トンあたり6万トグルグ(45ドル)の補助金を利用している¹⁾。

測定に際し、室内気温を一定にするように燃料消費量を調節することも考えられるが、現実にはその厳密な実行は困難を伴うため、今回は、燃料消費量を一定にして測定した。なお、タバコを吸わない家庭を選び、家人に喫煙にさせないようにした。一つのゲルと戸建てを選択した理由は、断熱構造、面積、世帯数、世帯活動等を同じ状況にするためである。

3.2 室内汚染の測定

3.2.1 測定方法

ゲル地区の戸建てとゲルの室内空気質への影響を比較分析するために、PM2.5, PM10, TSP, COを測定した。ゲルと戸建ては15分インターバルで24時間サンプリング(PM2.5, PM10, TSP, CO)を全6回実施した。COを時間平均濃度の最大値とストーブに燃料を入れてからの8時間の平均濃度で、PM2.5, PM10, TSPは24時間の平均濃度の測定データを用いて評価した。測定機器の詳細を、表3.1に示す。

表 3.1 室内空気質の測定機器の仕様

	Name of equipment	Responsibility	Serial number Type	Measuring range
1	U12	Indoor air quality	H08-002-02	Indoor: Temperature: -20° to 70°C (-4° to 158°F) RH: 5% to 95% RH Outdoor: Temperature: -40° to 50°C (-40° to 122°F) in water or soil -40° to 100°C (-40° to 212°F) in air
2	Carbon Monoxide	CO measure	H11-001	1. 0 - 125 ppm: 0.2 - 124.3 ppm 2. 0 - 500 ppm: 1 - 497.1 ppm 3. 0 - 2000 ppm: 4 - 1988 ppm
3	Telaire	CO ₂ measure	tel-7001	0-2500ppm
4	DUSTTRAK 8530	Aerosol measure TSP, PM ₁₀ , PM _{2.5}	SN85301235	Measure aerosol concentrations corresponding to PM ₁ , PM _{2.5} , Resizable, PM ₁₀ or size fractions Aerosol concentration range 0.001 to 400 mg/m ³



図 3.1 測定機器はゲルではドアの反対側，ゲル中部から壁の間に 1.2m 高さで垂れ下げた



図 3.2 アパートでは重心の 1.2m 高さに置いた

3.2.2 PM 測定装置の説明

(1) 概要

DustTrak II (Model: 8530) は、ポータブル型で空気中のダスト・煙・ヒューム・ミストなどの測定が可能な測定装置である。バッテリーで作動し、データログ機能を有している。また、内部の光散乱式レーザーフォトディテクターがリアルタイムで粒子の重量濃度を測定する。表 3.2 に DustTrak II (Model: 8530) の仕様を示す。

表 3.2 DustTrakII (Model: 8530) 仕様²⁾

センサータイプ	90°散乱光
粒径範囲	0.1～10 μ m
粒子濃度範囲	0.001～400 mg/m ³
分解能	±0.1%
ゼロ安定	±0.002mg/m ³ (24 時、時定数 10 秒毎)
流量	1.4～3.0L (初期設定 3.0L)
流量精度	±5%設定 (内部フローにて制御)
温度係数	+0.001 mg/m ³ (°C毎)
作動温度	0～50°C
保存温度	-20～60°C
作動湿度	0～95%RH (結露なきこと)
時定数	1～60 秒でユーザー調整可
データ記録	5MB 搭載メモリー (>60,000 データポイント、45 日間、記録間隔 1 分時)
記録間隔	1 秒～1 時間でユーザー調整可
寸法	H135 × W216 × D224 mm
重量	2.0kg (バッテリー1 個)、2.45kg (バッテリー2 個)
通信	USB(ホスト・デバイス)、イーサネット、フラッシュメモリーからアクセス可

(2) 測定原理

一般的な PM_{2.5} 自動測定装置は、ポンプによって吸引した粒子を、インパクターを用いて分級したのちに、分級した粒子に光を照射した際の光散乱の強度を用いて重量濃度を算出する光散乱法か、分級した粒子を濾紙上に捕集し、捕集した粒子に β 線を当て β 線の透過量より重量濃度を算出する β 線吸収法が用いている。DustTrak II では光散乱法を採用しており、自動測定装置同様にポンプによって粒子を吸引している。外部より

吸引された粒子は装置本体に入る前に、選択された4種類のインパクター(PM1, PM2.5, PM4, PM10)により捕集効率50%にて分級される。DustTrak II (Model: 8530)の内部構成を図3.3に示す。

分級後、吸引口から内部に入った粒子は、流量の1/3がHEPAフィルターを通してシースイアーとして利用され、それ以外の粒子は検出器へと送られる。シースイアーは測定される粒子を含んだエアを覆うようにして検出器へと入る。シースイアーによって検出器が保護されることにより、DustTrak IIは安定した精度を確保し、メンテナンス頻度を抑えることが可能となっている。検出器に入った粒子はレーザーを通過し、その際に散乱した散乱光はフォトディテクターにて検出される。散乱光強度は粒子濃度、粒径分布、屈折率、形状等に依存しており、フォトディテクターからの信号は瞬時に重量濃度に変換されたのち、内部のロガーに保存される。検出後の粒子は、下部のグラヴィメトリックフィルター(q37 mm)に捕集され、重量や成分の測定に用いることが可能となっている²⁾。

3.2.3 測定結果

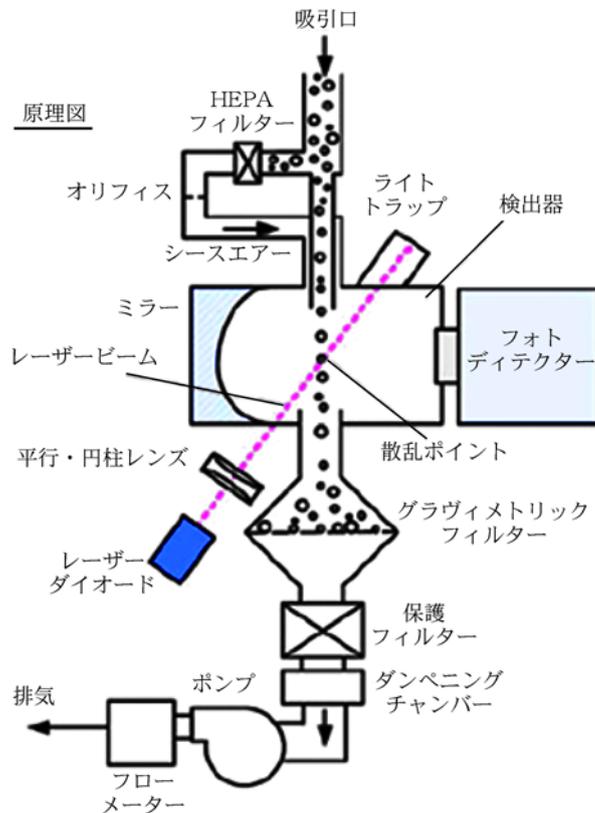


図 3.3 DustTrakII 内部のフローライン²⁾

図 3.4~3.9 に、ゲルと戸建ての測定結果（改善ストーブ+石炭，従来ストーブ+石炭，従来ストーブ+セミコークスのケース 24 時間の CO, TSP の時間平均濃度）を示す。

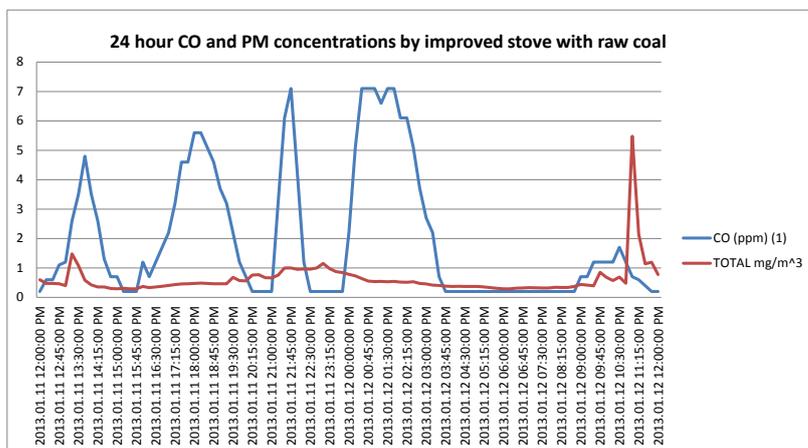


図 3.4 ゲルの測定結果（改善ストーブ+石炭のケース:24 時間の CO, TSP の時間平均濃度）

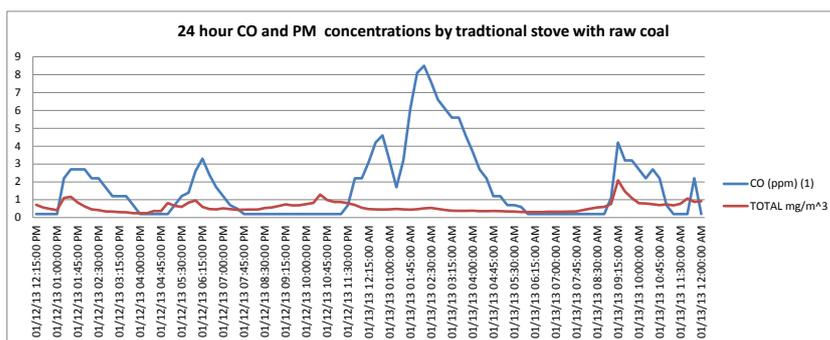


図 3.5 ゲルの測定結果（従来ストーブ+石炭のケース:24 時間の CO, TSP の時間平均濃度）

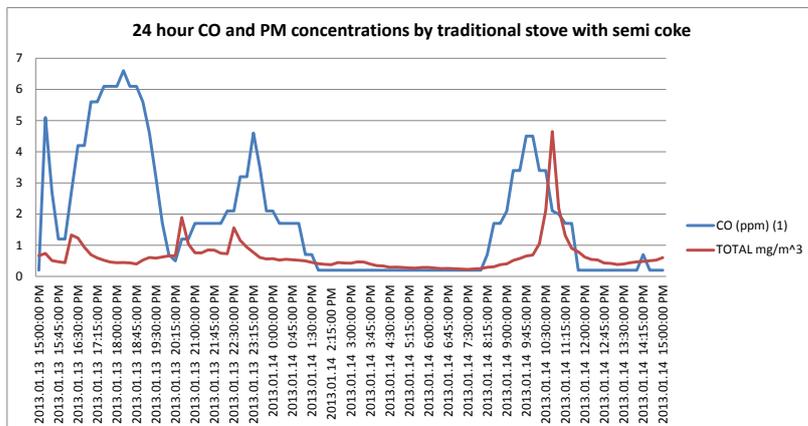


図 3.6 ゲルの測定結果（従来ストーブ+セミコークスのケース:24 時間の CO, TSP の時間平均濃度）

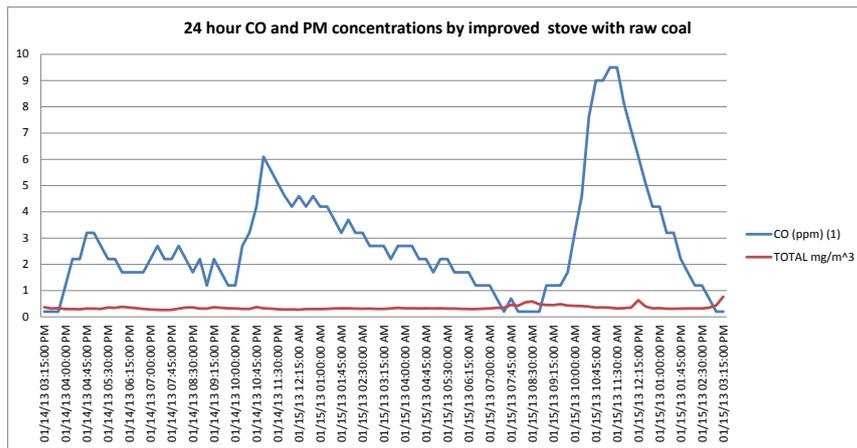


図 3.7 戸建てでの測定結果（改善ストーブ+石炭のケース:24 時間の CO, TSP の時間平均濃度）

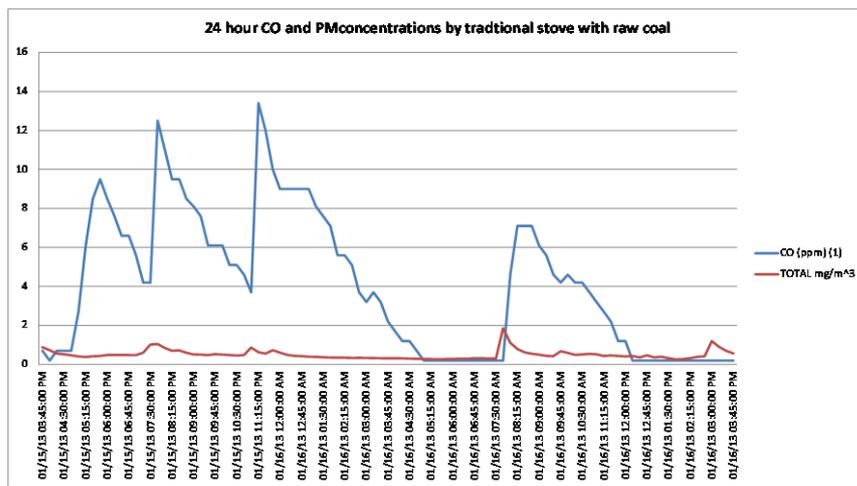


図 3.8 戸建てでの測定結果（従来ストーブ+石炭のケース:24 時間の CO, TSP の時間平均濃度）

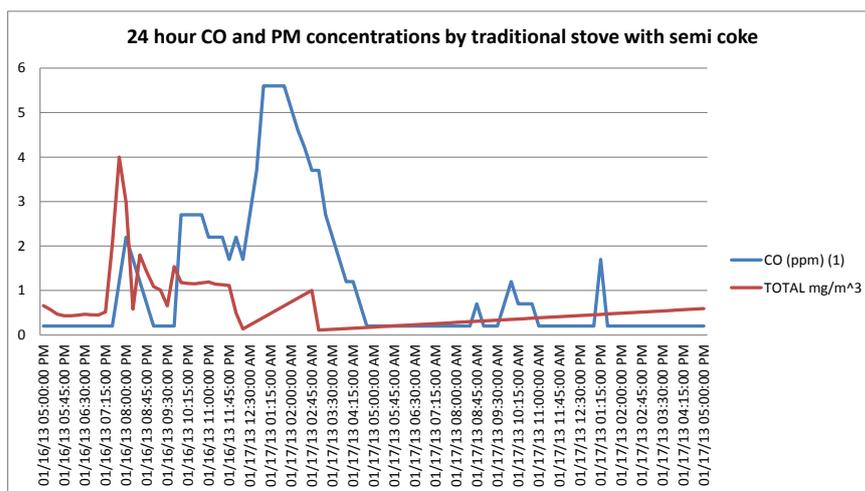


図 3.9 戸建てでの測定結果（従来ストーブ+セミコークスのケース : 24 時間の CO, の時間平均濃度）

3.2.4 室内汚染の評価

ゲルと戸建ての各ストーブのCO濃度は国家基準より少ないが、PM濃度は基準より3～6倍ぐらい超えていた。なお、室内気温は、戸建てで従来ストーブに石炭の利用では26℃、他の場合19.6～22.7℃であり、測定に影響してないと考えられる。ゲルでは、従来ストーブにセミコークスを利用したTSP濃度は0.64mg/m³で一番高い。改善ストーブのTSP濃度は、ゲルと戸建ての場合は0.34mg/m³と0.56mg/m³であり、従来ストーブより少ない。測定調査の結果と室内空気質の国家基準を表3.3、表3.4に示す。

表3.3 室内空気質の測定結果

	Stove type	Average indoor temp, °C	Average outdoor temp, °C	Relative humidity, %	CO, ppm		TSP, mg/m ³	PM10, mg/m ³	PM2.5 mg/m ³	Amount of fuel, kg
					Max1h	8h	24h	24h	24h	
Ger	Improved stove (raw coal)	22	-25.9	24.1	7	3.04	0.56	0.54	0.51	15.7
	Traditional stove (raw coal)	19.6	-26.7	24.8	7.4	3	0.59	0.57	0.55	17.6
	Traditional stove (semi-coke)	22.3	-18.7	28.3	6.1	3.33	0.64	0.62	0.57	15
Small house	Improved stove (raw coal)	22.7	-18.1	33.7	9.02	3.3	0.34	0.33	0.32	15.1
	Traditional stove (raw coal)	26	-21.9	31.5	9.62	7.8	0.5	0.48	0.46	16
	Traditional stove (semi-coke)	21.8	-20.5	36.3	5.5	2.54	0.59	0.58	0.57	16.1

表3.4 室内空気質の国家基準(MNS4585:2007)³⁾

CO	30 minute average	ppm	48.6
	1 hour average		24.3
	8 hour average		8.11
TSP	30 minute average	mg/m ³	0.5
	24 hour average		0.15
PM10	24 hour average	mg/m ³	0.1
PM2.5	24 hour average	mg/m ³	0.05
Indoor air temperature		°C	18-22
Indoor air relative		%	30-60

3.3 改善ストーブの費用効果分析

PM排出量削減と対策コストから、費用効果分析を行った。PM排出量 $0.01\text{mg}/\text{m}^3$ を削減するのに要するコストは、ゲルと戸建てでの改善ストーブ利用では 65.20US\$ と 15.1US\$ という結果が算出された。表 3.5 に結果を示す。

表 3.5 室内の PM 削減対策に関する費用対効果

	Stove type	TSP, mg/m^3	Difference in PM emissions of traditional stoves and improved stoves, mg/m^3	Improved and traditional stove price US\$	Difference in price of traditional stoves and improved stoves, US\$	Cost to reduce PM emission by $0.01\text{mg}/\text{m}^3$
Ger	Improved stove (raw coal)	0.566	0.025	234	163	65.2
	Traditional stove (raw coal)	0.591		71		
Small house	Improved stove (raw coal)	0.348	0.156	330	237	15.19
	Traditional stove (raw coal)	0.504		93		

3.4 本章のまとめ

本章では、改善ストーブの効果と燃料（石炭とセミコークス）の効果を見るために、ゲル地区の戸建てとゲルの室内空気質への影響を比較分析した。まず室内空気環境の測定では、改善ストーブと従来ストーブ及び、石炭とセミコークスの比較分析から、CO は基準以下であるが、PM は基準より約 3~6 倍超えていることが明らかになった（図 3.10, 3.11）。

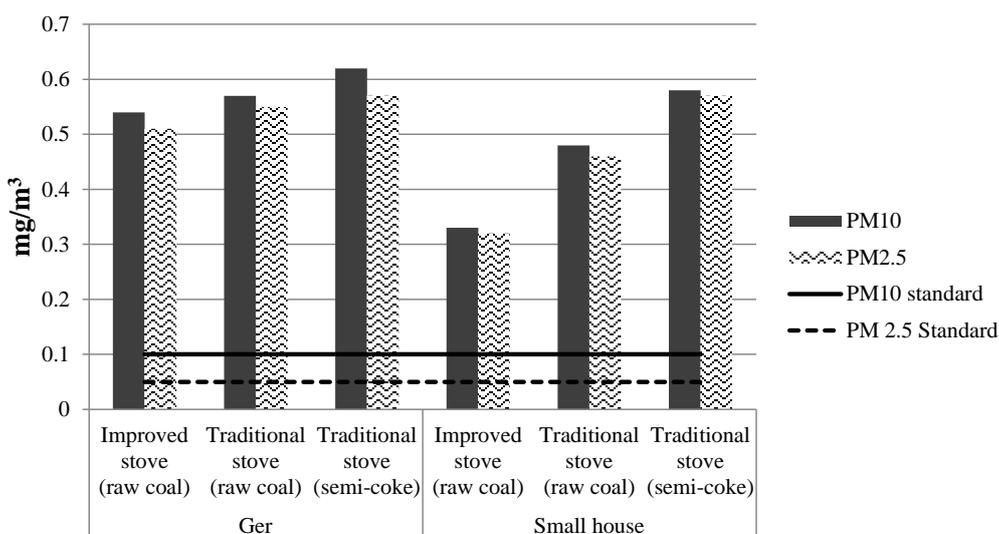


図 3.10 ゲルと戸建ての各ストーブの PM10, PM2.5 濃度

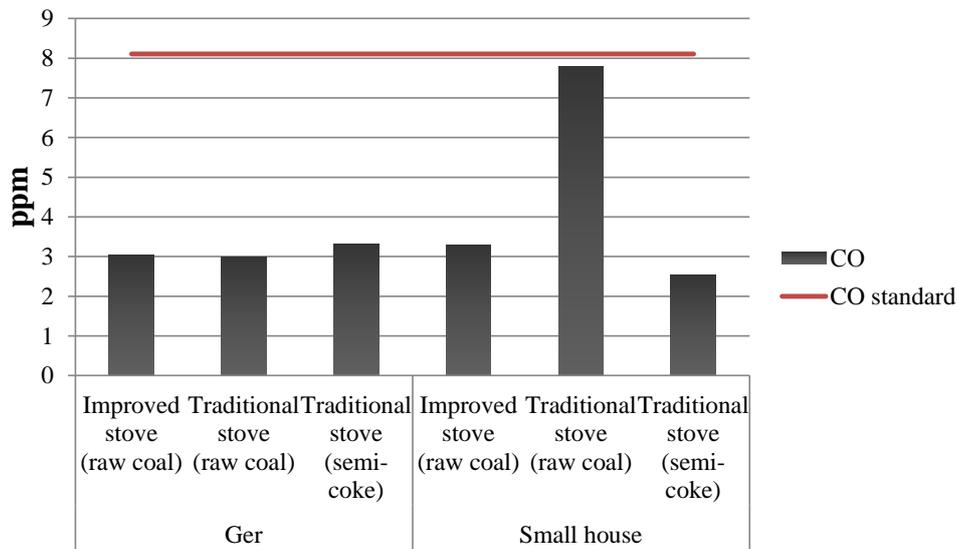


図 3.11 ゲルと戸建ての各ストーブの PM10, PM2.5 濃度

PM は、改善ストーブより従来ストーブが多いが、燃料に関しては石炭よりセミコークスから発生する PM の方が多い結果となった。これにより、改善ストーブの費用効果分析では、戸建てに改善ストーブ利用した方が費用対効果は高いことがわかった。しかし正しい使い方をしていないと、効果がないこともわかった。

今後の課題としては、まず、今回の測定対象のサンプル数及び測定回数が必ずしも十分でないため、より多くのサンプルが必要であるといえる。現地の住民意識調査することが必要である。さらに、室内空気環境への影響を費用便益分析の枠組みに加えることと、より長期的な対策を分析に含めることも課題である。

参考文献

- 1) Air Quality Agency of the Capital city, Mongolia,
<http://www.airquality.ub.gov.mn/medee/bolovsruulsan-tulsh.html>
- 2) ミニファイル ポータブル型分析装置「ぶんせき」編集委員会, 東京ダイレック株式会社中村馨
- 3) Mongolian Agency for Standardization and Metrology,
http://www.estandard.gov.mn/index.php?module=standart&cmd=standart_desc&sid=81

第4章 仮想市場評価法（CVM）による大気汚染削減対策の健康便益の評価

4.1 アンケート調査の概要

本章では、CVM を適用することで、大気汚染削減対策による健康便益を評価する。CVM の（ための）データ取得のために、市民に対してアンケート調査を行い、大気汚染から健康を守るための支払意志額（WTP）を推計する。これにより、市民の大気汚染による健康被害に対する意識を明らかにする。

アンケート調査は、現地で2回実施した。1回目の事前調査は、2014年9月にモンゴル科学技術大学の40人の学生に対して行った。ここでは、主にWTPに関する質問の理解や調査内容的確性を確認し、調査票の改善をするための実施した。調査内容は、主に3つの部分に分かれる。すなわち、大気汚染に対する意識、特にPM2.5による健康被害やPM2.5から身を守る方法について、次に、WTPに関する設問、最後に、個人属性の確認、性別、年齢、職業、居住形態、所得等の情報である。また、N95マスクについての説明を行い、回答者にはN95マスクを配布した。

2回目の調査は2014年10月に、ゲル地区とアパート地区に住む400人の市民に対して行った。これにより、大気汚染の原因であるゲル地区居住者の意識とアパート地区居住者の意識の違いを、WTPを用いて比較する。

アンケート調査の実施方法としては、ゲル地区とアパート地区の小学校を4ヶ所選択し、アンケート用紙を各クラスの担任に配布し、3日後に回収した。アンケート用紙は担任から児童を通じて両親に配布した。回答者全員に、謝礼としてN95マスクを配布した。

4.2 CVMの調査方法

ウランバートル市の大気汚染削減対策による健康便益を推計するために、CVMの二肢選択形式のアンケート調査を行った。大気汚染による健康被害を削減する方法としてPM2.5からの吸入暴露を防ぐN95マスクを対象に、N95マスクを利用することで健康被害を削減するためのWTPを明らかにする。

調査内容は、3つの部分に分かれている。すなわち、①大気汚染に対する意識、PM2.5による健康被害やPM2.5から身を守る方法、②WTP、③個人属性の確認、性別、年齢、職業、居住形態、所得等である。調査票の概要を、表4.1に示す。

表 4.1 CVM 調査内容

問題数	質問理由	内容
問題1問	大気汚染意識の確認	ウランバートル市の大気汚染の状況について
問題2問		大気汚染について情報を入手
問題3問		大気汚染の一番原因について
問題4問		大気汚染削減する一番効果的な対策
問題5問	PM2.5について意識の確認	PM2.5どのようなものですか
問題6問		PM2.5による健康被害について
問題7問		PM2.5から身を守る方法について
問題8問		外出の時、マスクをしていること
問題9問		N95マスクのついて
	PM2.5の説明と原因、対策	PM2.5に関する説明
		PM2.5の発生源
		大気汚染対策
問題10問	大気汚染によるに病気にかかる金額	医療費(薬、病院訪問)
問題11問		N95マスクは60%以上身を守ることができるとするとあなた利用しますか
問題12問	金額を支払うの理由と抵抗回答抽出	支払意思確認 (1回目)
問題13問		支払意思確認 (2回目: 1回目で「はい」の場合)
問題14問		支払意思確認 (2回目: 1回目で「いいえ」の場合)
問題15問		抵抗回答抽出, 金額を支払う理由 (支払う)に同意した場合)
問題16問		抵抗回答抽出, 金額を支払う理由 (支払う)に同意しない場合)
問題17問	個人属性の確認	性別
問題18問		年齢
問題19問		住居種
問題20問		職業
問題21問		同居している家族の人数
問題22問		家族の中で収入のある人の数
問題23問		世帯収入の確認

表 4.2 WTP の二肢選択形式の質問内容

項目	内容			
大気汚染削減プロジェクトの期間	2014-2020年			
プロジェクト効果	ウランバートル市の大気汚染が50%削減される			
健康を保護する対策	大気汚染から家族の健康を保護するため外出時にはPM2.5対応マスクを正しく着用する			
マスク利用の効果	粒子状物質 (PM2.5) から60%以上あなたの健康を保護する			
WTPの二肢選択形式の質問	大気汚染から家族の健康を守るために冬季に (11月~3月) 以下の提示額を7年間支払いことができますか.			
グループ	1	2	3	4
最初の提示金額 USD	16.4	11.0	13.7	19.7
二回目の上昇させた提示額 USD	54.8	27.8	21.9	32.9
二回目の低下させた提示額 USD	8.2	5.5	4.4	9.9

WTPに関しては、4つのグループに分け、グループ別に異なる金額を提示した (表 4.2)。WTPの二肢選択形式では、金額を2回提示するが、1段階目で賛成と回答した人に提示する2段階目の提示額は、1段階目の提示額より高い提示額とする。同じように1段階目で反対と回答した人に提示する2段階目の提示額は、1段階目との提示額より

低い提示額とする⁵⁾。

回答者には、表 4.2 の二肢選択形式の質問を提示した。

4.3 アンケート調査の結果

(1) 個人属性について

アンケート調査の回答率は 93.3% (373/400) である。アンケート調査の変数の説明、回答の標準偏差 (S.D.) を表 4.3 に示す。

回答者の平均年齢は 30～39 歳、性別は 55%が女性で、月平均世帯収入は 493 ドルである。職業に関しては 50%が有職者、21%が学生、13%が無職、6%が年金生活者である。

居住形態は、回答者の 40.2%がアパート、32.7%がゲル地区の戸建て、22.3%がゲル、4.8%がその他である。家族の平均人員数は 4 人であるが、うち 2 人が働いている。

平均世帯収入を居住形態に見ると、アパート地区は 493～712 ドル、ゲル地区の戸建ては 274～493 ドル、ゲルは 82～493 ドルである。居住形態による平均世帯収入を図 4.1 に示す。

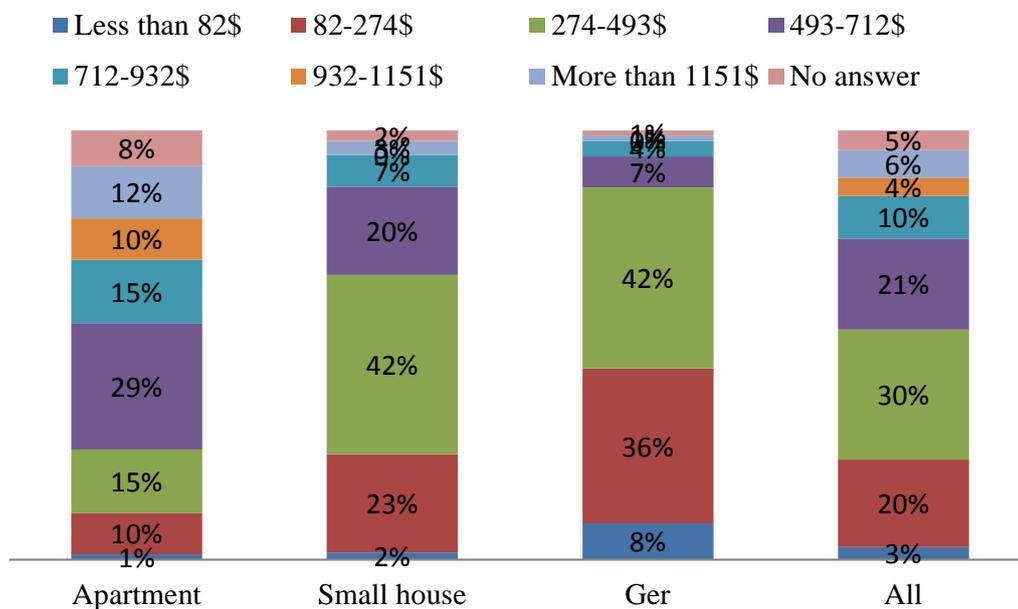


図 4.1 居住形態による平均世帯収入

表 4.3 アンケート調査の変数の説明及び回答の標準偏差 (S.D.)

Variables	Description	Mean	S.D.	Frequency	Percentage
Gender	Male=1, female=2	1.58	0.49	352.00	94.4%
Age	1(under 20), 2(20-29),3(30-39),4(40-49),5(50-59),6(over 60)	2.83	1.27	364.00	97.6%
Housing type	Apartments=1, detached house in germ area=2, germ=3, student dormitory=4, other=5	1.90	0.91	367.00	98.4%
Employment status	Student=1, private company employee=2, state officials=3, entrepreneurs=4, unemployment=5, retirement=6. other=7	3.30	1.84	362.00	97.1%
Family size	Number of family members	4.23	1.25	366.00	98.1%
Workers	Number of workers in family: 1(1 worker),2(2 workers),3(3 workers)4(4 workers), 5(other)	1.93	0.83	361.00	96.8%
Income	Family monthly income (unit: US\$) 1(below 82), 2(82-274), 3(274-493), 4(493-712), 5(712-932), 6(932-1151), 7(over 1151),	3.57	2.82	356.00	95.4%
Air quality of Ulaanbaatar	Air quality index: 1(0-50,very good), 2(51-100,good), 3(101-150, moderate), 4(151-200, bad), 5(201-300 very bad), 6(301-500, hazardous)	5.34	0.86	371.00	99.5%
Awareness of PM _{2.5}	do not know=1, a little know=2, know=3	1.67	0.72	372.00	99.7%
Awareness of health effect of PM _{2.5}	do not know=1, a little know=2, know=3	1.67	0.72	372.00	99.7%
Awareness of health protection from PM _{2.5}	do not know=1, a little know=2, know=3	1.52	0.65	372.00	99.7%
Awareness of N95 standard mask	Know well=1, know=2, using=3, do not know well=4, do not know=5	4.03	1.06	365.00	97.9%
Expenditure	Expenditure on respiratory diseases treatment per year (Unit: US\$) ___?	118.68	148.74	159.00	42.6%
Willing to use N95 mask	do not use=1, do not know=2, certainly use=3, use=4	2.84	0.85	357.00	95.7%

(2) 大気汚染に対する意識について

ウランバートル市の大気質に対する評価について、回答者の 53.4%が危険な状況、31.1%がとても悪い、11%が悪い、3.5%が良くないと回答している。大気汚染についての情報入手先に関しては、回答者の 61%がテレビ、23%がインターネット、9%が新聞である。

大気汚染の一番原因としては、ゲル地区の石炭ストーブが 86%を示している。大気汚染削減の効率的な対策としては、ゲル地区を地域熱供給システムに持続する対策が 45%、ゲル地区世帯をアパートに移転させる対策が 39%を示している。大気汚染の一番の原因と大気汚染削減の一番効果的な対策の回答結果を図 4.2, 4.3 に示す。

PM_{2.5} について意識では、アパート居住者がゲル地区の居住者より若干高いことわかった。PM_{2.5} についての回答結果を、居住形態別、年齢別に図 4.4, 4.5 に示す。さらに、PM_{2.5} による健康影響に関する意識について、年齢別に図 4.6 に示す。

PM2.5 からの吸入暴露を防ぐ N95 マスクについては、80%が知らないと回答したが、「N95 マスクを利用した場合は、PM2.5 を 60%以上除去できるとすると、あなた利用しますか」との質問に対して、62%が利用する、29%が良くわからないと回答している。

PM2.5 に関する説明、発生源、健康被害に関する情報をアンケート調査票の中で提供した。その上で、大気汚染による病気の治療に要する医療費（薬、病院）については、平均 118 ドル、最大では 1,096 ドルであった。回答者の 61%が、大気汚染起因の病気にかかっていると答えた。

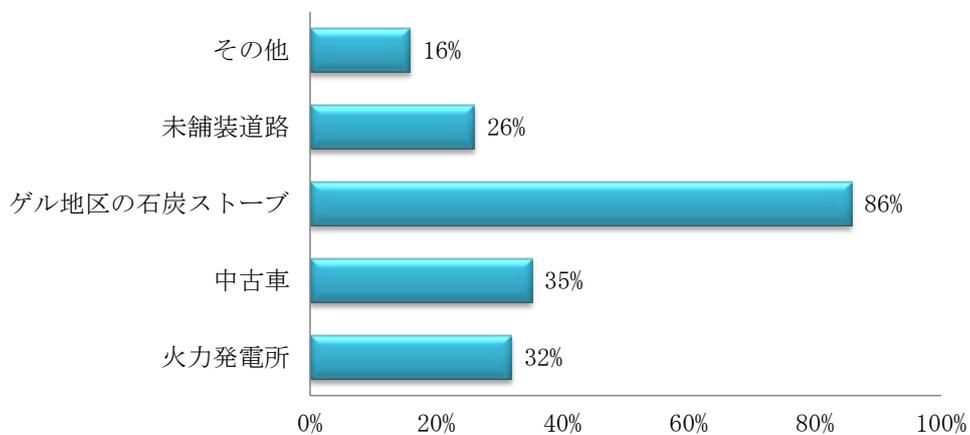


図 4.2 大気汚染の最も大きい原因

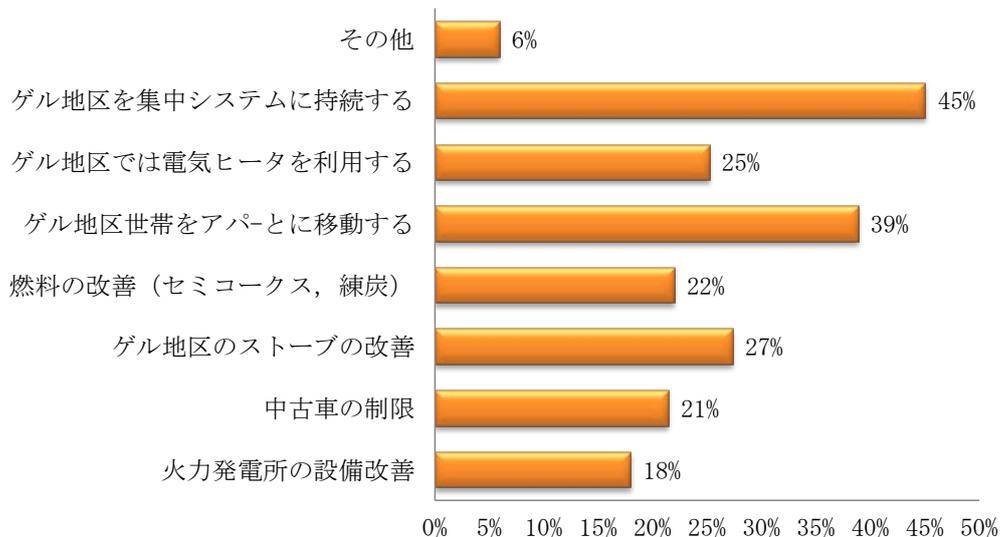


図 4.3 大気汚染削減の最も効果的な対策

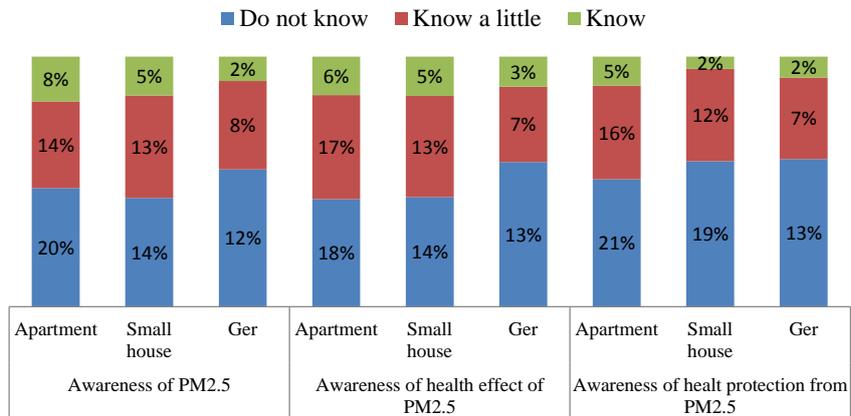


図 4.4 居住形態別の PM2.5 に対する意識

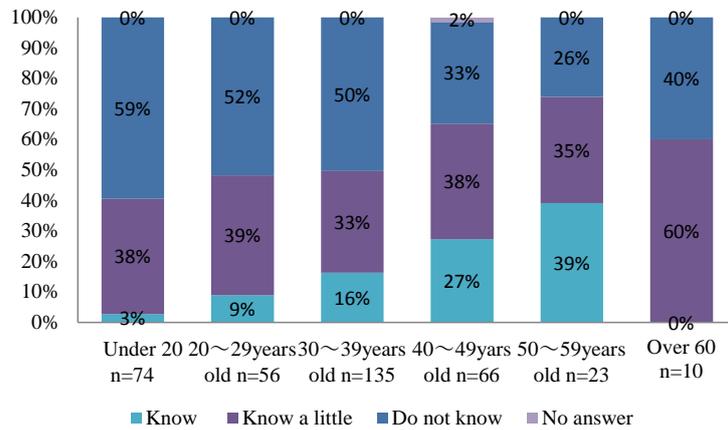


図 4.5 年齢別の PM2.5 に対する意識

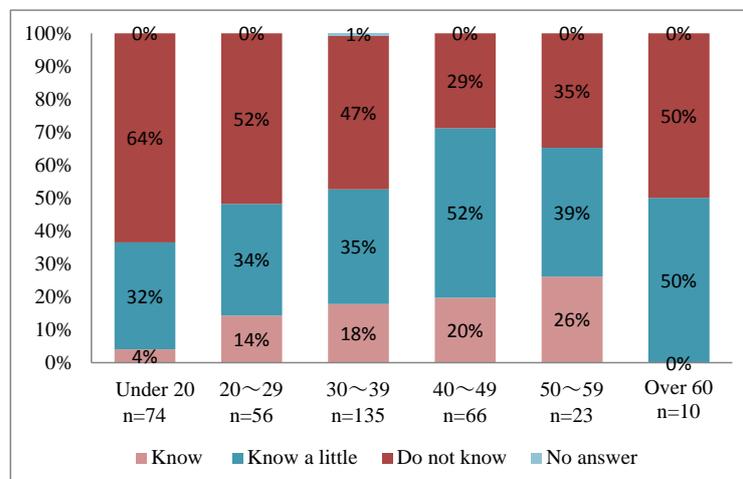


図 4.6 年齢別の PM2.5 による健康影響に対する意識

(3) WTP の回答結果

WTP に関する質問への回答率は 97%であった。WTP の回答結果を、表 4.4 に示す。ここで、「T1」は最初の提示金額、「TU」は2回目の増額した提示額、「TL」は2回目の減額した提示額である。「YY」は2回とも Yes の回答数、「YN」は1回目が Yes で2回目が No の回答数、「NY」は1回目が No で2回目が Yes の回答数、そして「NN」は2回とも No の回答数である。

表 4.4 WTP の回答結果

	Bound on WTP (US\$)			Responses to DBDC questions			
	T1	TU	TL	(YY)	(YN)	(NY)	(NN)
Group1	16.4	54.8	8.2	9	30	17	24
Group2	11	27.4	5.5	13	20	9	19
Group3	13.7	21.9	4.4	19	18	28	17
Group4	19.7	32.9	9.9	29	43	31	37

4.4 WTP の推定

表 4.4 の回答結果を用いて、CVMの解析ソフトウェアCVM.xsl version4⁴⁾を用いて推定した。その結果、WTPの平均値は 20.30 ドルと推定された。WTPの推定結果を、表 4.5 に示す。

表 4.5 WTP の推定結果

変数	係数	t値	p値		推定WTP	
constant	4.12	15.78	0.00 ***	(中央値)	14.35	
ln(Bid)	-1.55	-16.14	0.00 ***	(平均値)	32.47	裾切りなし
n	363.00				20.30	最大提示額 で裾切り
対数尤度	-507.05					

t 値は、変数の統計的信頼性を意味する。t 値の絶対値が大きいほど信頼性が高い。p 値は、確変数が影響してない確率を意味する。***は 1%水準で有意を意味する。N はサンプル数である。対数尤度はモデルの当てはまりを示すもので、数値が大きいほどモデルの精度が高いことを意味する。

4.5 健康便益の推定

大気汚染濃度の高い 11 月～3 月に、家族の健康を守るための支払われる月平均支払意志額は、20.30 ドルと推定された。これは、7 年間で大気汚染が 50%削減されるまで支払われる金額である。この結果を用いて健康便益を推計したところ、3.01 億ドルと算出された。なお、健康便益は以下の計算で算出した。

健康便益 = t年の世帯数×WTP 値×5 ヶ月(11月～3月)

4.6 本章のまとめ

本章では、ウランバートルの市民に対して CVM のアンケート調査を行い、大気汚染から健康を守るための WTP を推定した。

これにより、ウランバートル市の大気汚染削減対策による健康便益を推計した。その結果、7年間で大気汚染が50%削減されることでの健康便益は3.01億ドルと算出された。

また、市民の大気汚染に対する意識を問うたところ、ウランバートル市の大気質の評価についてはほぼ100%が悪い、そのうち53.4%が危険な状況と回答しており、かなり問題意識が高いことがわかった。大気汚染の一番原因としては、ゲル地区の石炭ストーブが86%であり、大気汚染削減の効率的な対策については、ゲル地区を地域熱供給システムに持続する対策が45%、ゲル地区世帯をアパートに移転させる対策が39%となった。

PM2.5 について意識は、アパートの居住者がゲル地区の居住者より若干高いことがわかった。PM2.5 からの吸入曝露を防ぐ N95 マスクについては、80%が知らないと回答したが、アンケート調査票の中で提供された PM2.5 に関する説明や健康被害等の情報により、62%が N95 マスクを利用すると回答した一方で、29%が良くわからないと答えている。

大気汚染による病気の治療に要する医療費(薬、病院)に関しては、平均医療費が118ドル、最大値は1,096ドルであり、61%が大気汚染起因の病気にかかっていることが明らかになった。

以上の結果から、市民の大気汚染に対する問題意識が高いが、PM2.5 に対して健康を守る意識が不足している。大気汚染による健康被害や健康を守る方法の情報提供によって意識が大きく変化することもわかった。

市民の意識を高めるためには、大気汚染による健康影響や健康被害を防ぐ方法に関して、ワークショップ、セミナー等を行うことや、テレビやインターネット等を利用することで、効果的な情報提供を行うチャンネルを整備することが必要である。

参考文献

- 1) 東アジアにおける環境政策の効率性評価に関する研究：クアラルンプール市、広島市、上海市の CVM 調査および東広島市の選択型実験調査を事例として広島大学大

- 学院国際協力研究科 教授 松岡俊二, ほか4名, Working Paper Series Vol. 2003-19
- 2) World Health Organization, Guidelines of conducting cost-benefit analysis of household's energy and health interventions, pp. 8-52.
 - 3) Robert Cameron Mitchell Richard T. Carson, Economic Evaluation of Environmental Quality by CVM, 2001, ch.8, pp.130-14. (in Japanese)
 - 4) 初心者のための環境評価入門, 栗山浩一 柘植隆宏 床子康, 2013年2月20日 ch. 13, pp. 253-265
 - 5) 環境と行政の経済評価, 肥田野 登る, 1999年12月20日
 - 6) T. Matsuno and T.Yaguchi, *Evaluation of development projects*, Japan: Tsukijichokan, 1999, ch. 2. (in Japanese)
 - 7) *Urban Air Quality Management Strategy in Asia, Guidebook*, Norwegian Institute for Air Research, Kjeller, Norway and Institute for Environmental Studies, The Free University, Amsterdam, the Netherlands, 2013, pp. 65-69.

第5章 ゲル地区の大気汚染対策に関する費用効果分析

概要

関連研究では、世界銀行の一連の調査²⁾がある。そこでは、2023年までの大気汚染物質（TSP）削減のための様々な対策とその効果が検討されている。しかし、ストーブ及び燃料の改善、電気ヒーター、アパートへの移転は取り上げられているが、従来の政策との連続性が考慮されており、大きな変革を伴う対策は含まれない傾向にある。本研究では、新たな対策の追加、対策の組み合わせによるシナリオの追加と、計算条件の再考を行ったことが大きな相違点である。つまり、DHSの拡張と、SAHとの組み合わせシナリオの考慮である。また本研究では、引用文献³⁾の測定結果による排出係数と燃料消費量を用いて計算した。2章の費用便益分に利用した世界銀行の一連の調査の排出係数とは大きな違いがある。2章では世界銀行の健康便益のデータを用いて費用便益分析を行った。本章では便益の経済評価の不確実性を排除するために、本研究では費用効果分析を採用する。

5.2 研究方法

ゲル地区の短中期の大気汚染削減対策に関して、以下の7ケースと無対策ケースの計8ケースを評価対象として費用効果分析を実施する。

- ◇ 従来型ストーブ（従来ケース）
- ◇ 改良型ストーブ
- ◇ 電気ヒーター
- ◇ SAH+従来型ストーブ
- ◇ SAH+改良型ストーブ
- ◇ SAH+電気ヒーター
- ◇ DHS への接続
- ◇ ゲル地区世帯のアパートへの移転

SAHを利用する場合のエネルギー需要量の計算に関しては、RETScreenSAHプロジェクトモデル⁵⁾を援用して計算を行い、その結果を用いて燃料削減量を推計する。SAHプロジェクトとは、カナダ天然資源省等で推進されており、建築物の壁等を利用して熱を吸収し、暖めた空気を室内に取り込むことで暖房用エネルギーの代替とするシステムである。図5.1、5.2に太陽熱暖房の構成要素及びSAHシステムの概要を示す。

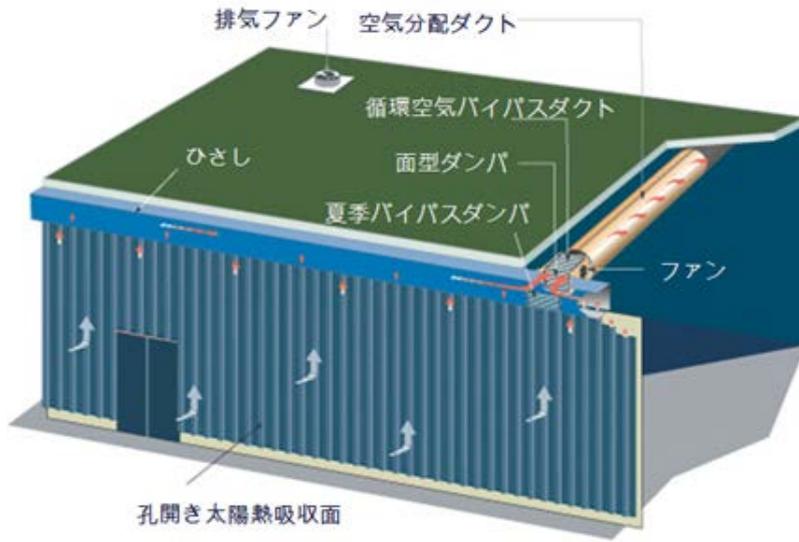
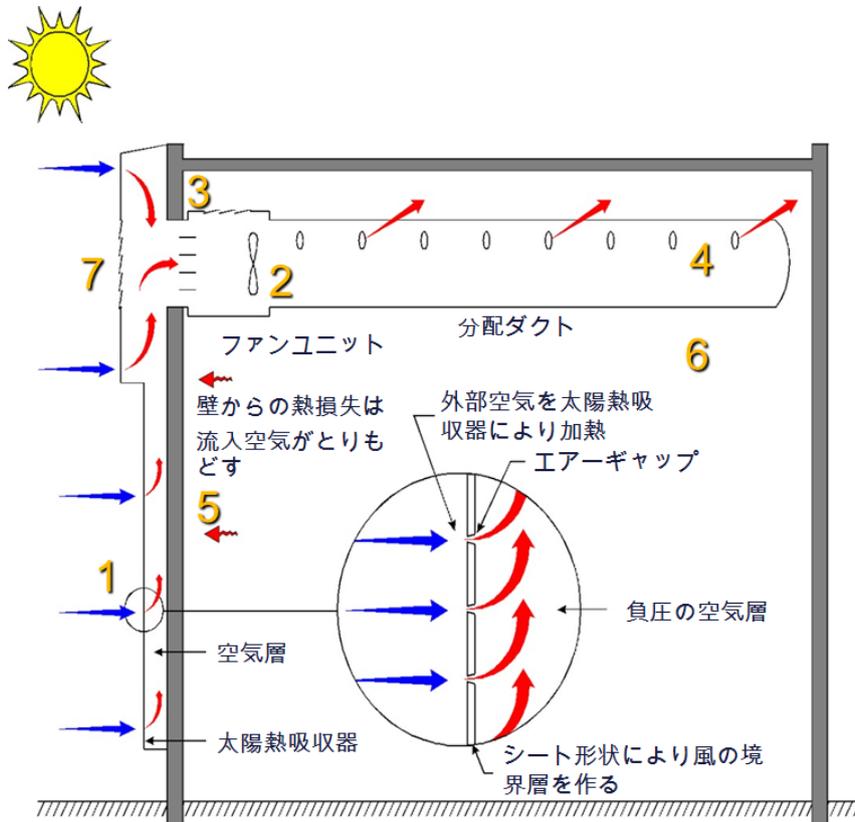


図 5.1 SAH の構成要素⁵⁾



5.2 図 SAH システムの概要⁵⁾

住宅の他，商業施設，工場や農業用乾燥施設等における利用が想定されている．またこれに関連して，空き缶を利用した簡易システムも全世界で提案されており，こちらは大変安価で製造可能なことが立証されている．

各削減対策の TSP と PM10 排出量削減量と対策コストを比較することで，費用効果分析を行う．

5.3 対策の設定

ゲル地区の大気汚染対策の短中期の削減対策として，改良型ストーブ，電気ヒーター，SAH と改良型ストーブ，従来型ストーブ，電気ヒーター等と組み合わせ，DHS への接続，アパートへの移転の 7 つの対策に加え，従来型ストーブ（無対策ケース）について，ゲル地区の 150,000 世帯を対象として，2016～2025 年までに各削減対策が年間 15,000 世帯ずつ導入されるとの計画をもとに，費用効果分析を行った．表 5.1 に対策設定を示す．なお，この間のゲル地区の人口及び世帯数の変動については，年率 4% で増加すると仮定して計算した．

ゲル地区の従来型ストーブを改良型ストーブに転換する対策は，2011 年 3 月からゲル地区の大気汚染低減制限地域のゲル世帯に対して実施され，改善ストーブ 1 台の購入費用のうち 77% は国の補助金でカバーされた¹²⁾．

石炭ストーブの代わりに電気ヒーターを利用する対策は，ゲル地区の世帯に政府が提案している対策の一つである．ゲル地区において暖房に電気ヒーターを利用することは，大気汚染物質の排出量削減には効果が高いが，一方で暖房のための電気料金は石炭の燃料費より高くなるため，ゲル地区において電気ヒーターを利用している世帯の電気料金

表 5.1 対策の設定条件

	対策種	対策導入期間	年間導入世帯数	導入世帯数	世帯あたりのランニングコスト計算	世帯あたりインシヤルコスト計算	インフラコスト	補助金
1	改良型ストーブ	2016-2025	15,000	150,000	年間石炭使用量	ストーブ価額	なし	なし
2	電気ヒーター				年間電力使用量	電気ヒーター価額		
3	SAH+従来型ストーブ				年間石炭使用量 (SAH含む)	ストーブ+SAH価額		
4	SAH+改良型ストーブ				年間電力使用量 (SAH含む)	改善ストーブ+SAHの価額		
5	SAH+電気ヒーター				年間電力使用量 (SAH含む)	電気ヒーター+SAHの価額		
6	DHSへの接続				火力発電からの熱供給	DHSに接続するパイプ設定コスト		
7	アパートへの移転					アパートの購入費用		

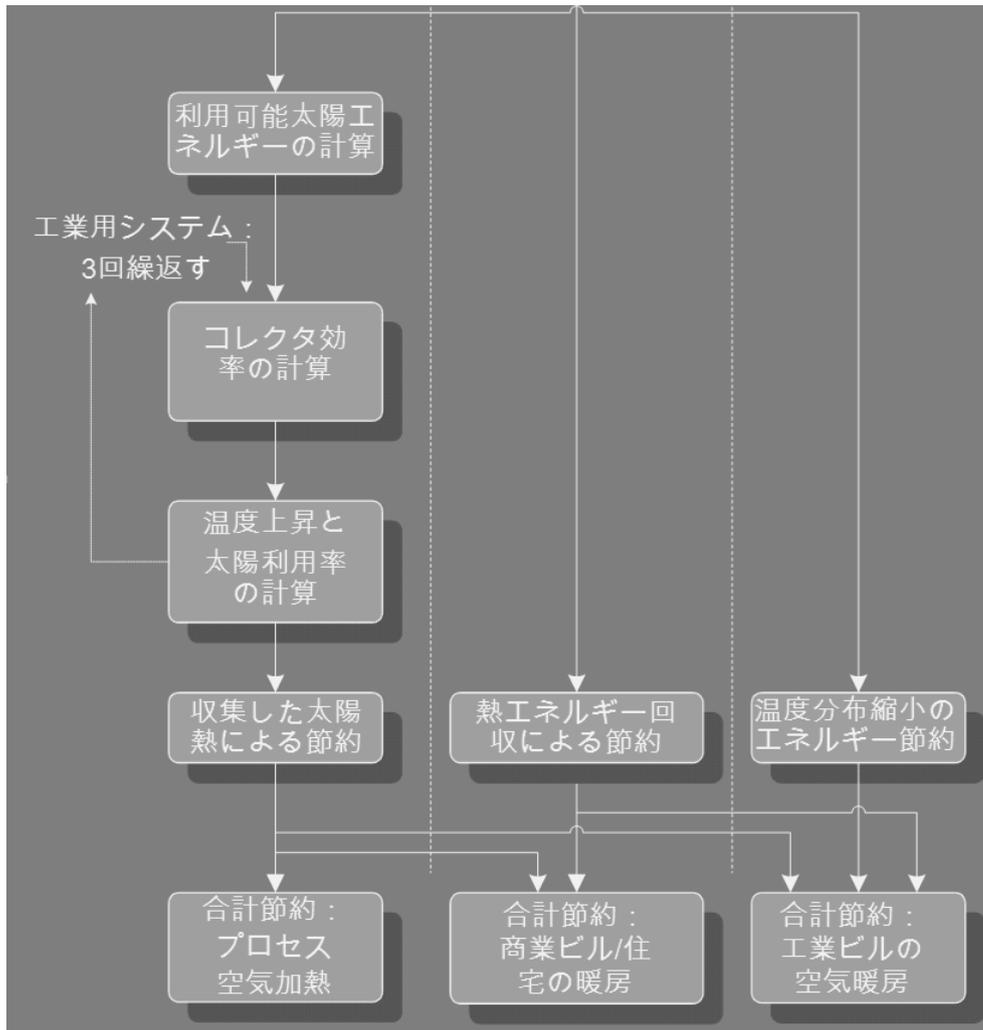


図 5.3 SAH エネルギーモデルのフロー⁵⁾

(18:00~9:00 の時間帯) を 50% 割引く政策をとっている。また、電気ヒーターをゲル地区世帯に供給するためには、暖房用に必要となる電力需要が増加するため、その緩和のために本給では、カナダ等の諸国において実施されている SAH プロジェクトと電気ヒーターを組み合わせる対策を設定することとした。

SAH プロジェクトの RETScreenSAH プロジェクトモデルを用いた計算を表 6 に示す。SAH と電気ヒーターの組み合わせ (Proposed case) の場合は、43m² の戸建てに利用する暖房用エネルギーに関して計算した。電気ヒーター利用する場合 (Base case) と比較して、SAH と電気ヒーターを組み合わせる場合 (Proposed case) の暖房用エネルギーは 14% 削減されるという結果が得られた。SAH エネルギーモデルのフローを図 5.3 に示す。

ウランバートル市では、火力発電所からの熱電併給等の地域暖房インフラがある。DHS 接続世帯では、世帯単位の暖房用燃料消費が不要となり、集中的な大気汚染対策が

可能となるため、効率性の面では有利となる可能性がある。しかし、現在ゲル地区はDHSの計画対象外地域であり、ゲル地域の住民がDHSにアクセスすることはできない。各世帯のDHSへの接続コストは、ウランバートル市及び農村部の200世帯のエコ地域プロジェクト⁷⁾における、世帯あたりインフラ費用の計算結果を用いて推計した。

ゲル地区の世帯をアパートに移転させる対策は、長期的に優位な対策となる可能性がある。ゲル地区の住民の所得から考えると、実際にはこの速度（15,000世帯/年）でアパートに移転することは困難であると考えられる。政府の対策としては、10%の未払いと20年間のローンが提案されている。または都市計画では、ゲル地区と土地をアパートに交換するプロジェクトが実施されている。

5.4 燃料消費及び汚染物質排出量削減量の推計

2011年統計データ⁸⁾をもとに、ゲル地区162,872世帯の大気汚染物質排出量をストーブ種別（壁ストーブ57%、ゲルストーブ43%）に推計した。推計には、ストーブ別燃料消費量と燃料別排出係数³⁾を用いた。世帯の年間燃料消費量は、ゲルストーブで3.49トンの石炭と3.27トンの薪、壁ストーブで4.49トンの石炭と2.99トンの薪である（表5.1）。

その結果、総排出量はTSPで4,907トン、PM10で3,847トンと推計された。そこから、2016～2025年までの間、各削減対策がゲル地区の年間15,000世帯（10年間で150,000世帯）に導入されることを想定し、排出削減量を推計した。SPMとPM10の排出削減量は、以下の計算で算出した。

$$\text{排出削減量} = \text{石炭削減量 (t)} \times \text{排出係数 (kg/t)} / 1,000 + \text{薪削減量 (t)} \times \text{排出係数 (kg/t)} / 1,000$$

ストーブ種別の排出係数(emission factor)と年間燃料消費量は表5.2のとおりである。

表 5.2 年間燃料消費量と排出係数³⁾

	Fuel type	Fuel usage (t/year)	Emission factor	
			TSP (kg/t)	PM10 (kg/t)
Ger stove	Coal	3.49	5.4	3.3
	Wood	3.27	3.82	3.82
Wall stove	Coal	4.49	3.4	2.1
	Wood	2.99	3.82	3.82

改良型ストーブの場合は、年間の配付数と、従来型ストーブに対する石炭消費削減率 (25%)¹²⁾ を用いて、燃料消費の削減量を推計した。

SAH の場合は、RETScreenSAH プロジェクトモデルを用いてウランバートル市のゲルを対象として計算した結果では、燃料消費量が 14%削減されるという結果が得られたので、それを用いて従来型ストーブ、改良型ストーブ、電気ヒーターと組み合わせる場合の燃料消費量の削減量を推計した。SAH のエネルギー削減量の計算に用いた入力情報と計算結果を、表 5.3, 5.4, 5.5 に示す。

表 5.3 RETScreenSAH プロジェクトモデルの入力情報⁵⁾

Solar air heater for ventilation		
Facility type	Residential	
Indoor temperature	°C	21
Air temperature - maximum	°C	35
R-value - wall	m ² - °C/W	1
Design airflow rate	m ³ /h	180
Operating days per week	d/w	7
Operating hours per day	h/d	24
Resource assessment		
Solar tracking mode	Fixed	
Slope	15	
Azimuth	0	

表 5.4 月別利用率と日射量の計算結果

Percent of month use heating		Daily solar radiation	
		Horizontal kWh/m ² /d	Tilted kWh/m ² /d
January	100%	1.59	2.40
February	100%	2.66	3.62
March	100%	4.08	4.91
April	100%	4.94	5.35
May	50%	5.72	5.88
June	0%	5.92	5.95
July	0%	5.32	5.40
August	0%	4.62	4.85
September	50%	3.93	4.44
October	100%	2.94	3.78
November	100%	1.79	2.67
December	100%	1.29	2.02
Annual		3.74	4.27
Annual solar radiation - horizontal		MWh/m ²	1.36
Annual solar radiation - tilted		MWh/m ²	1.56

表 5.5 収集した太陽熱による省エネ効果の計算結果

Heating system, SAH with electric heater			
	Base case	Proposed case	Energy saved
Project verification			
Heated floor area for building (m ²)	43	43	
Heating load for building (W/m ²)	100	85.69	
Total heating (MWh)	11.83	10.14	14%
Fuel type	Electricity	Electricity	
Seasonal efficiency	100%	100%	
Fuel consumption - annual (MWh)	11.83	10.14	
Fuel rate(USD/ kWh)	0.044	0.044	
Fuel cost (USD)	520.60	446.09	

電気ヒーター利用，DHS への接続，ゲル地区世帯のアパート移転の対策の場合は，ゲル地区世帯は石炭を利用しないため，大気汚染物質の排出量をゼロと計算した．電気ヒーター，DHS への接続，アパート移転対策の 3 ケースについては，ゲル地区世帯の内部での石炭消費がなくなるため，大気汚染物質の排出量をゼロと計算した．

図 5.4 に，各対策の TSP と PM10 の排出削減量を示す．電気ヒーター，DHS への接続，アパート移転対策の 3 ケースの TSP，PM10 の排出削減量が同じになるため，電気ヒーターに代表させて示している．

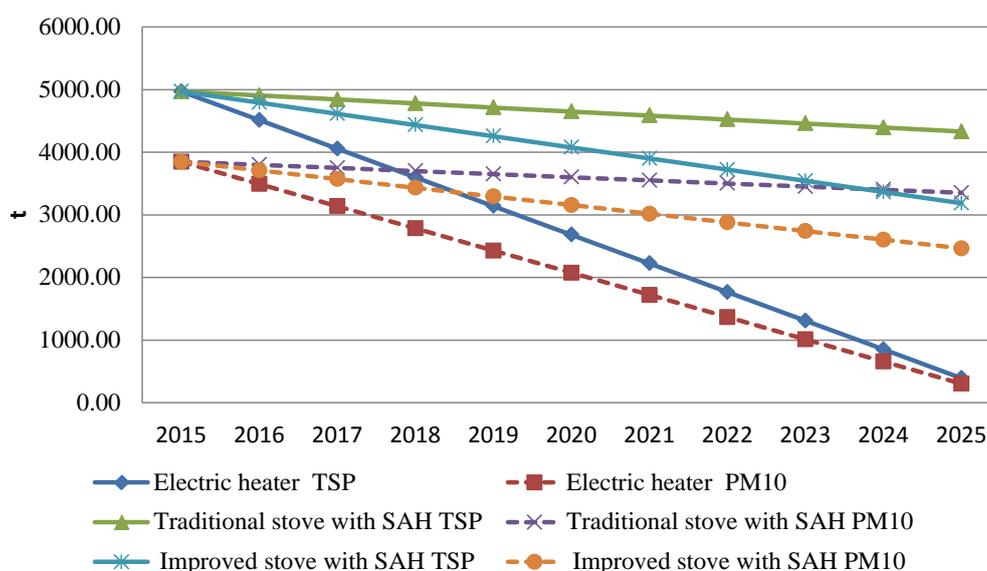


図 5.4 対策導入シナリオ別の TSP，PM10 排出量

5.5 対策費用の推計

費用について、各削減対策に対してゲル地区世帯あたりのイニシャルコストと、年間の燃料費節減を考慮した暖房費用のランニングコストを 2015～2025 年の期間で推計した。コスト計算には補助金、インフラ改善投資は含まれていない。

DHS のイニシャルコストは、ゲル地区世帯の住むゲルと戸建てを DHS に接続する場合のパイプコストを示している。アパートへの移転のイニシャルコストは、アパートの購入費用を示している。

各削減対策の世帯あたり及び15万世帯のイニシャルコストと10年間のランニングコスト、15万世帯10年間の排出削減量及び削減量あたりのコストを、表 5.6 に示す。世帯あたりランニングコストの詳細を、表 5.7 に示す。TSP と PM10 排出量削減のための対策コストから、費用効果分析を行った。

表 5.6 各削減対策の世帯あたりイニシャル／ランニングコスト、
排出削減量及び削減量あたりのコスト

Options	Cost per household		Cost per 150,000 households over 10 yr			Reduced emission over 10 year		Total cost per reduced emission	
	Initial cost USD	Running cost USD/ year	Initial cost million USD	Running cost million USD	Total cost million USD	TSP t	PM10 t	TSP million USD/t	PM10 million USD/t
Electric heater	300.00	520.60	45.00	780.90	825.90	4578.00	3544.00	0.18	0.23
SAH +electric heater	650 ⁵⁾	446.09	97.50	669.13	766.63	4578.00	3544.00	0.17	0.22
Improved stove	300 ¹²⁾	378.15	45.00	567.23	612.23	1144.00	886.00	0.54	0.69
SAH+ Traditional stove	250 ¹²⁾	433.61	37.50	650.42	687.92	641.00	496.00	1.07	1.39
SAH + Improved stove	550.00	343.39	82.50	515.09	597.59	1785.00	1382.00	0.33	0.43
District heating system	156 ⁰⁷⁾	24.00	234.00	240.00	474.00	4578.00	3544.00	0.10	0.13
Relocation into apartments	42441.43 ¹⁴⁾	24.00	6366.21	36.00	6402.21	4578.00	3544.00	1.40	1.81

表 5.7 世帯あたりランニングコストの詳細

	Options	A per households				
		Fuel consumption MWh/ year		Fuel rate USD/kWh		Running cost USD/ year
1	Electric heater	11.83		0.04		520.60
2	SAH +electric heater	10.14		0.04		446.09
		Coal t/ year	Wood t/year	Coal price USD/t	Wood price USD/t	
3	Improved stove	3.00	2.33	78.00	62.00	378.15
4	SAH+ Traditional stove	3.44	2.67	78.00	62.00	433.61
5	SAH + Improved stove	2.58	2.29	78.00	62.00	343.39
		Heating area m ²		Heating rate USD /month		
6	District heating system	41-80		3.00		24.00
7	Relocation into apartments	41-80		3.00		24.00

使用為替レート 1USD=1925MNT

5.6 費用効果分析の結果

図 5.5 に、各削減対策による 150,000 世帯の 10 年間排出削減量及び削減量あたりのコストを示す。図 5.6 に、各削減対策の削減量あたりのイニシャルコスト及びランニングコストを示す。

改良型ストーブの削減量あたりのコストはPM10（以下、同様）で69万ドル/トン、そのうちランニングコストは64万ドル/トンと推計された。ゲル地区から発生する汚染物質の10年間の削減量は、TSPは約1,144トン、PM10は約885トンであり、削減量あたりランニングコストはかなり高い。

SAH+改良型ストーブの場合の削減量あたりコストは41万ドル、そのうちランニングコストは35万ドルと推計された。10年間の削減量は、TSPで約1,785トン、PM10で約1,382トンであり、削減量あたりランニングコストが45%削減される。

電気ヒーターを利用する場合の削減量あたりのコストは23万ドル/トン、そのうちランニングコストは22万ドルと推計された。ゲル地区から発生する汚染物質の削減量は10年間でTSPは約4,577トン、PM10は約3,543トンであり、削減量はほぼ100%となる。

SAH+電気ヒーターの場合の削減量あたりのコストは22万ドル/トン、そのうちランニングコストが19万ドル/トンと推計され、SAH+電気ヒーターの場合のコストが比較

的安い、つまり効率的な対策といえる。SAHを利用することで、燃料消費量が削減され、結果的に温室効果ガスの削減対策にも効果的といえる。ただし、ゲル地区全体に電気ヒーターを普及させるためには、電力需要が増大し、発電への大規模な投資が必要である。

SAH+従来型ストーブの場合の削減量あたりのコストは139万ドル/トン、そのうちランニングコストは131万ドル/トンと推計された。ゲル地区から発生する汚染物質の10年間の削減量は、TSPは約640トン、PM10は約496トンであり、削減量あたりランニン

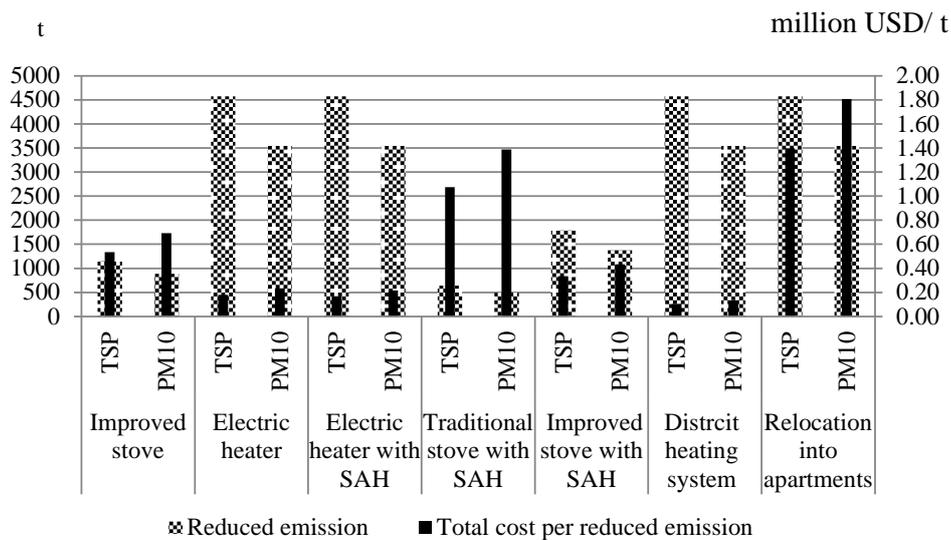


図 5.5 10年間の排出削減量及び削減量あたりのコスト

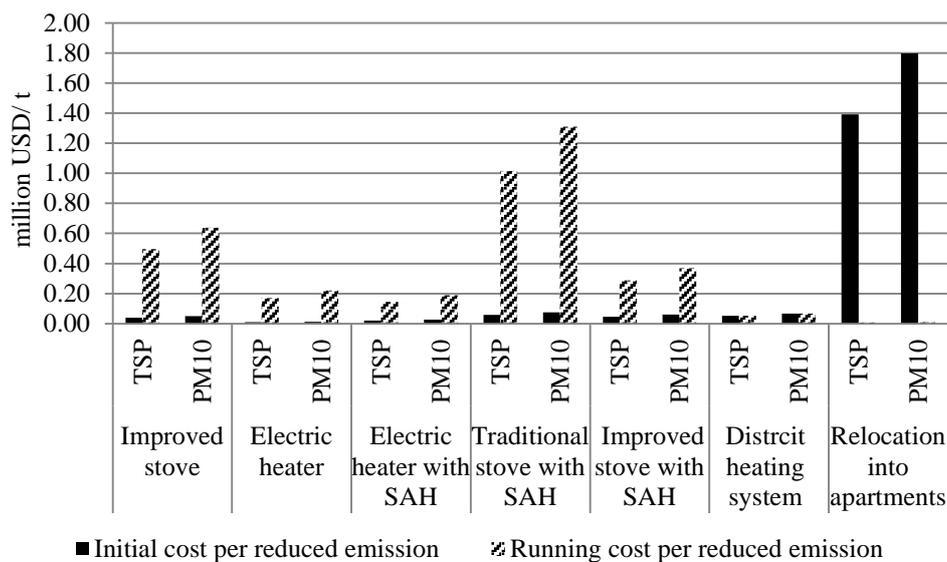


図 5.6 各削減対策の削減量あたりのイニシャル/ランニングコスト

グコストが一番高く、かつ削減量が最も少ないため、費用対効果の悪い対策といえる。

DHSに接続する場合の削減量あたりのコストは13万ドル/トン、そのうちランニングコストは7万ドル/トンと推計された。ゲル地区から発生する汚染物質の削減量は10年間でほぼ100%となる。削減コストが最小で、効率的な対策の一つといえる。

ゲル地区世帯のアパートへの移転の場合の削減量あたりのコストは181万ドル/トン、ランニングコストは1万ドル/トンと推計された。ゲル地区から発生する汚染物質の削減量は10年間でほぼ100%となり、年間15,000世帯がアパートに移動すれば10年後にはゲル地区は存在しないこととなる。さらに、家庭の生活環境全般が変化することによる、環境以外の多面的効果が生じる。本研究で想定した削減対策の中でコストが最も高いが、生活環境全般にわたる広範なメリットが見込まれる。

5.7 本章のまとめ

本研究では、ウランバートル市ゲル地区の大気汚染対策として、実施可能な7つ対策を対象として費用効果分析を行った。

その結果、削減量当たり総コストでは、①DHS、②SAH+電気ヒーター、③電気ヒーター、④SAH+改良型ストーブ、⑤改良型ストーブ、⑥SAH+従来型ストーブ、⑦アパートへの移転の順に小さい、つまり費用対効果の大きい対策となった(図5.2)。

これを、イニシャル/ランニングコスト別に見ると、イニシャルコストでは、①電気ヒーター、②SAH+電気ヒーター、③改良型ストーブ、④SAH+改良型ストーブ、⑤DHS、⑥SAH+従来型ストーブ、⑦アパートへの移転の順に費用対効果の高い対策となった(図5.5)。ランニングコストだけを見ると、①アパートへの移転、②DHS、③SAH+電気ヒーター、④電気ヒーター、⑤SAH+改良型ストーブ、⑥改良型ストーブ、⑦SAH+従来型ストーブの順に費用対効果の大きい対策となった。

電気ヒーター、あるいはSAH+電気ヒーターという対策は、ゲル地区からの大気汚染排出量はほぼ削減でき、さらに、石炭利用しないことによる燃料の購入・点火・清掃等に要する時間の節約による便益や、室内空気汚染の改善によるメリットが発生する。一方で、発電容量を増設するために、発電所に対する大規模な投資が必要となる。

また、ゲル地区の戸建ての熱損失は、国家断熱標準より2~3倍大きく、熱損失が大きいことが冬季の石炭消費量を増加させる要因の一つになっている。ゲル地区の戸建て住宅のエネルギー効率の高めるために、熱損失を軽減させる断熱材を利用することも必要であるといえる。

今回の推計では、DHSに接続する場合は、削減量あたりのコストが最小であり、ランニングコストもアパート移転に次いで少ない結果となった。現実的には、ゲル地区全体にDHSを普及させることは、地理的要因から困難であり、政府の計画にも含まれていない。

アパートへの移転は、現状ではあまり進んでいないが、政府からローンの金利が安くなり、20年間で支払う条件の対策が開始されたため、今後アパートへの移転が増える可能性があると考えられ、効果的な対策の1つといえる。

以上のような結果から、ゲル地区の地域別所得を考慮し、各種対策導入の制約条件を検討する必要がある。都心部に近いゲル地区世帯に供給されている土地は地価が高いため、アパートへ移転しない世帯が少なくない。そのため、都心部に近いゲル地区世帯に対しては、DHSの普及対象地域を拡大し、接続世帯を増やすことが望ましいと考えられる。また、ウランバートル市のゲル地区開発計画¹³⁾では、ゲル地区世帯の土地をアパートと交換する計画が実施されている。さらに、SAH+電気ヒーターの対策を2年間ローンで売却し、かつ夜間(18:00~9:00の時間帯)の電気料金を50%割引く制度を採用することで普及可能と考えられる。

今後の課題としては、今回評価対象としていない社会的コストと都市全体の大気汚染排出量を含める必要がある。つまり、DHSや発電所設置のためのコスト、運用によって発生する大気汚染である。さらに、環境面以外の多面的な便益、すなわち生活環境の改善を含めて費用便益分析を行うことも次なる課題といえる。

引用文献

- 1) World Bank (2009) : Authors' illustration based on data from the China Environment Yearbook 2009 for Chinese cities, AMHIB study for UB, and WHO Air Quality Guidelines - Global Update 2005 for other cities
- 2) World Bank (2009) : Air Monitoring and Health Impact Baseline Study (AMHIB)
- 3) The Air Quality Department of the Capital City (2012) : Capacity Development Project for Air Pollution Control in Ulaanbaatar City , Mongolia. Progress Report 3, pp.25-26
- 4) オトゴンバヤル エンフツオルモン, 松本 亨, Khaltai Galimbek (2013) : 現地調査に基づくモンゴル国ウランバートル市の大気汚染対策の費用便益分析, 土木学会論文集 G (環境) Vol. 69, No. 5, p.I_259-I_265
- 5) Minister of Natural Resources Canada (2015):RETSscreen International Clean Energy

Decision Support Centre, Clean Energy Project analysis

- 6) Air Quality in Ulaanbaatar, <http://www.air.ub.gov.mn/archive/month.html>
- 7) Atmor of Mongolia report (2012) : 200 世帯のための地下インフラネットワーク, pp.10-11 (モンゴル語)
- 8) National Statistical office of Mongolia (2010) : Mongolia statistical yearbook, pp.82-89, pp301-31
- 9) Minister of Natural Resources Canada, <http://www.retscreen.net>
- 10) Mongolian Agency for Standardization and Metrology
<http://www.estandard.mn/filebase/files/4585-2007>
- 11) Bank of Mongolia, <http://www.mongolbank.mn/>
- 12) Air Quality agency of the Capital City, <http://www.airquality.ub.gov.mn/>
- 13) Ger District Development, <http://ger.ub.gov.mn/>
- 14) Mongolian Construction site, <http://news.barilga.mn/>

第6章 ウランバートル市ゲル地区の浮遊粒子状物質排出削減ポテンシャルのシナリオ分析

6.1 インフラ増強を考慮した費用効率性の評価

本研究では5章の結果に基づき、効果の高いと考えられる3つの対策、すなわち SAH +電気ヒーター、DHS への接続、ゲル地区世帯のアパートへの移転に対して、本章ではインフラ増強を評価範囲に含める。

各削減対策に対して、設備投資（イニシャルコスト）と、燃料費節減を考慮した暖房費用（ランニングコスト）を30年間で推計した。コスト計算には、補助金は含まない。各削減対策の、イニシャルコストとランニングコストの推計結果を表6.1に示す。DHS への接続対策に対して、世帯あたりのネットワーク建設コストは8,250ドルで最も高いが、イニシャルコストを含めた総コストでは10,150ドルであり、最も少ない結果となった。このコストは配管の長さにより異なるため、ゲル地区をDHSに接続するためのコストを、都心部からの距離帯別に推計した。

具体的には、蒸気配管をゲル地区の道路の地下に埋設することを想定し、都心部（ゲル地区とそれ以外の境界）を原点として延長距離500メートル毎にコストを推計した。ゲル地区世帯は、470～590m²のハシャー(khashaa)と呼ばれる土地を国から供給されて、戸建やゲルに居住している。そこで、500メートルの配管で20世帯に供給可能とし、都心部から8kmまで計算した。ゲル地区開発計画¹²⁾によると、ゲル地区世帯の土地をアパートと交換して立てる計画では面積あたり世帯数の変換率（=アパート/ゲル）1.3とあるため、アパートの場合の500メートルあたり世帯数は26世帯と計算した。なおコストには、イニシャルコスト・ランニングコスト両方を含む。

表6.1 各削減対策のイニシャルコスト・ランニングコストの推計結果

	Investment cost						Running cost			Total cost / USD/ household /30 year
	Public cost USD/ household	Individual cost USD/ household	Total cost USD /household	Lifetime year	Total cost USD/ household/ 30 year	Total cost USD/year	Lifetime running cost USD/ household/ 30 year	Household's saving cost USD/ household/ 30 year		
Relocation to apartment	572	872	44,415	45,859	30	45,859	24	720	14,406	46,579
Connecting DHS	7,378	872	1,180	9,430	30	9,430	24	720	14,406	10,150
SAH+electric heater	2,000	3,760	650	6,410	10	1,950	446	13,383	1,743	15,333
Traditional stove	0	0	150	150	10	450	504	15,126	0	15,576

図 6.1 に、距離による世帯あたりのコストを示す。距離帯別の配管導入コストの推計を表 6.2 に示す。その結果、都心部から 1,500 メートルまでの世帯あたりの総コストが 840,147 ドルであり、アパートに移転するより少ないため、1,500 メートル以内のゲル地区世帯を DHS に接続することは可能であると考えられる。

SAH+電気ヒーター対策の世帯当たりの総コストは 15,333 ドルであり、都心部から 1,500 メートル以上のゲル地区世帯は、SAH+電気ヒーターを利用することが最適といえる。ただし、この対策は世帯に要するランニングコストが高いため、補助金政策を導入しないと普及は困難であると考えられる。

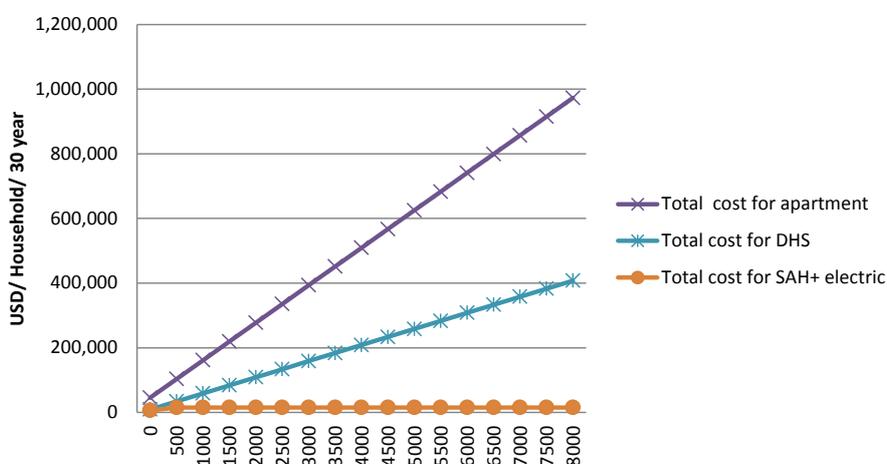


図 6.1 距離と世帯あたりコストの関係

Pipe length m	Pipe cost USD/m	Apartment to DHS household /500m	DHS household/500m	Relocation apartment Total cost USD	DHS Total cost USD	SAH+ electric Total cost USD
0	0	0	0	45,859	9,430	6,410
500	590.22	26	20	103,788	34,336	15,576
1000	590.22	26	20	161,718	59,241	15,576
1500	590.22	26	20	219,647	84,147	15,576
2000	590.22	26	20	277,577	109,052	15,576
2500	590.22	26	20	335,506	133,958	15,576
3000	590.22	26	20	393,435	158,863	15,576
3500	590.22	26	20	451,365	183,769	15,576
4000	590.22	26	20	509,294	208,674	15,576
4500	590.22	26	20	567,223	233,580	15,576
5000	590.22	26	20	625,153	258,485	15,576
5500	590.22	26	20	683,082	283,391	15,576
6000	590.22	26	20	741,012	308,296	15,576
6500	590.22	26	20	798,941	333,202	15,576
7000	590.22	26	20	856,870	358,107	15,576
7500	590.22	26	20	914,800	383,013	15,576
8000	590.22	26	20	972,729	407,918	15,576

表 6.2 距離帯別の配管導入コストの推計

なお、348MWの新たな火力発電所が建設中であり、これにより新たに約 87,000 世帯に対して蒸気を供給可能となる¹³⁾。

ウランバートル市のゲル地区開発計画では、ゲル地区世帯の土地をアパートと交換することで、アパート、戸建て、学校、幼稚園、オフィスビル等の建設用地を確保する政策がある¹²⁾。それを見越して蒸気配管の交換・増強工事が行われており、また、アパートへの移転が増えると予想される。

また、「ウランバートル第5火力発電所プロジェクト」はコンセッション契約で2008年～2020年に建設する予定である。450MWの電力と587MWの熱電併給の火力発電所を設立される。シナリオ分析による削減ポテンシャル推計の設定条件を表6.3、6.2に示す。

表 6.3 シナリオ分析による削減ポテンシャル推計の設定条件

ゲル地区に導入対策	対策導入期間	導入世帯数	年間導入世帯数	対策のエリア設定	インフラ設定	延床面積	熱需要量	
DHSの接続	2016-2019	42,000	14,000	中心部から1.5km (熱搬送効率)	2015年348MWのHOBが設立された 2020年に450MWの電力と587MWの熱電併給の第5火力発電所を設立	43m ² (戸建て)	24USD/year (41-80m ² 熱料金)	ゲル地区の年平均世帯増加率4%
アパートへの移転	2015-2024	60,000	6,000	ゲル地区の中心部		45m ² (2部屋の平均面積)	24USD/year (41-80m ² 熱料金)	
SAH+電気ヒーター	2019-2024	160,000	26,666	中心部の1.5km以外		43m ² (戸建て)	10.14MWh/year	

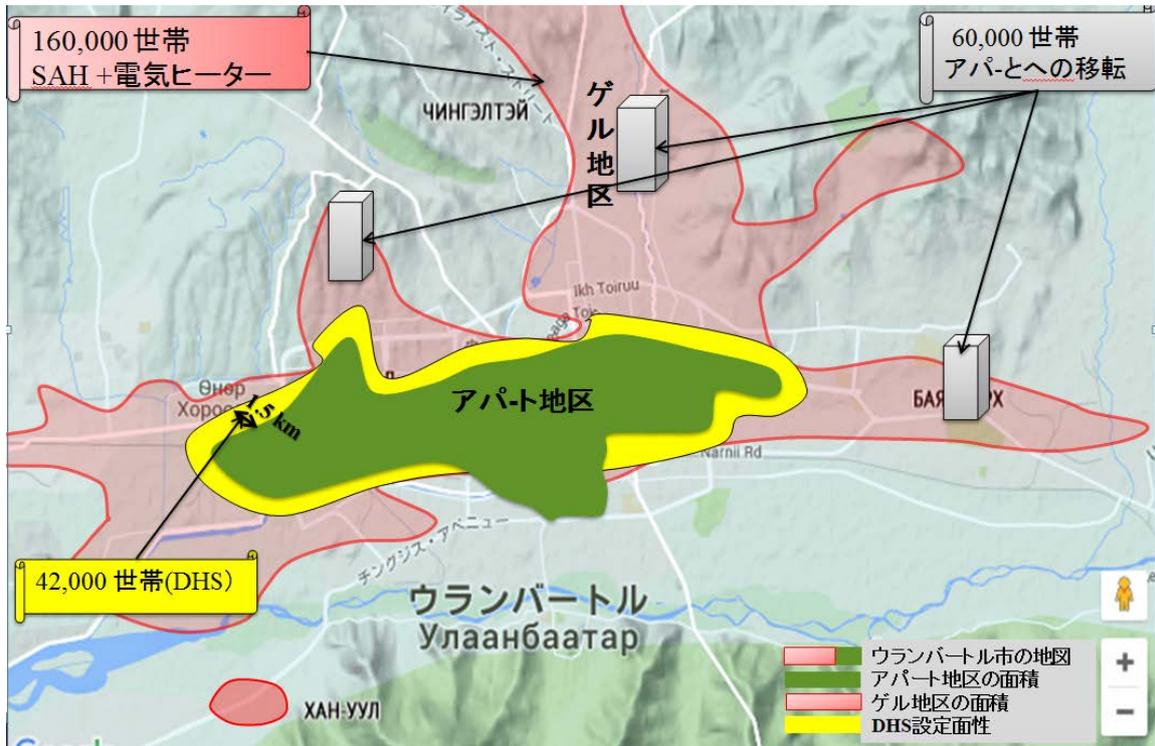


図 6.2 2015 年～2024 年までに対策別導入と世帯数の設定

6.2 シナリオ分析による削減ポテンシャルの推計

ウランバートル市は、全部で 9 区に分かれ、区がさらに 152 ホローに分かれている。これらのホローは、ゲル地区と呼ばれ住宅としてはゲルのみ立地する地域と、ゲルが存在しない地域に分かれる。アパートが立地する地域はゲル地区に囲まれて存在している。ホロー別世帯数データから、ゲル地区の世帯数データを利用し、ゲル地区の世帯数の増加率を算出した（都心部から遠く離れた 3 区の世帯数は含まない）。2012 年の統計データ⁹⁾をもとに、ゲル地区の世帯数 185,000 世帯、年平均増加率 4%として、2015～2024 年までの世帯数を予測し、3 種の対策を導入する世帯数を、以下のシナリオのもの設定した。

まず、ゲル地区世帯のうち DHS に接続する 1.5km 以内の世帯数を、地図より約 42,000 世帯と推計した。これを年間 4200 世帯×10 年間で DHS に接続するとした。

1.5km 以上離れたゲル地区世帯では、SAH+電気ヒーターの対策として年間 16,000 世帯に導入されるとし、ゲル地区世帯のアパートへの移転は年間 6,000 世帯と想定し、10 年間で合計 260,000 世帯に対して 3 種の対策が導入されるとした。これら 3 種の対策の組み合わせをプロジェクトケースとし、一方で、削減対策を実施しないケースを

BAUとして、両者を比較した。

TSPとPM10の排出削減量は、5章の計算結果を用いてDHSや発電所設置によって発生する排出量を踏まえ、算出した。プロジェクトケースは、電気ヒーター、DHSへの接続、アパート移転対策それぞれ、ゲル地区世帯の内部では石炭を消費しないため、大気汚染物質の排出量をゼロと計算した。図6.3に、年別対策別導入世帯数の設定とコストを示す。

6.3 分析結果

図6.4に、TSPとPM10の排出削減量を示す。DHSや発電所設置のための運用によって発生する大気汚染排出量を含め、10年間でTSPとPM10の排出削減量は50%と58%となることがわかる。なお、この考え方はゲル地区の大気汚染対策としての評価であり、都市全体を考えると発電所での石炭消費はなお存在する。

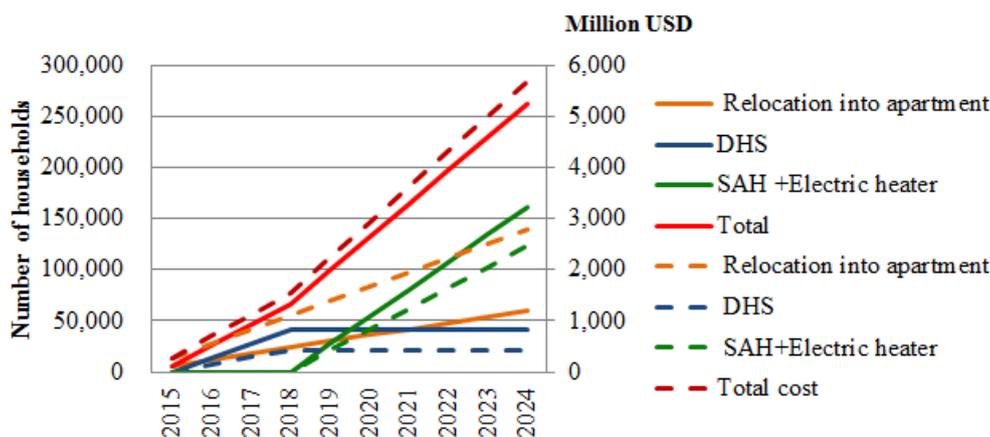


図 6.3 年別対策別導入世帯数の設定とコスト

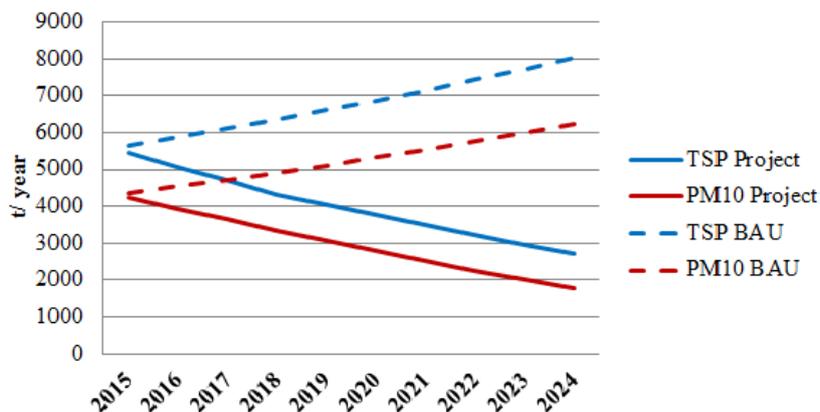


図 6.4 TSP, PM10 の排出削減量

6.4 本章のまとめ

ウランバートル市ゲル地区の浮遊粒子状物質排出削減ポテンシャルのシナリオ分析を行った。

ウランバートル市ゲル地区の大気汚染対策として、実施可能な7つ対策を対象として費用効率性を評価した。その結果、削減量当たり総コストでは、①DHS、②SAH+電気ヒーター、③電気ヒーター、④SAH+改良型ストーブ、⑤改良型ストーブ、⑥SAH+従来型ストーブ、⑦アパートへの移転の順に小さい、つまり費用効率性の高い対策であることがわかった。なお、ここではインフラ増強コストを含んでいない。

次に、費用効率性、実現可能性双方を考慮し、上記①、②、⑦について、インフラ増強コストを加味して評価を行った。その結果、都心部から1.5km以内のゲル地区については①の方が⑦よりコストが低くなるため、DHSへの接続の可能性があると判断された。そこで、インフラ整備計画を考慮し、2024年までの対策導入シナリオを、SAH+電気ヒーター160,000世帯、DHSへの接続42,000世帯、ゲル世帯のアパートへの移転60,000世帯として評価した。その結果、約56.7億ドルの費用を要し、2024年にはTSP、PM10の排出削減量が9年に対して50%、58%近くなるとの結果となった。なお、ここにはDHSや発電所の運用によって発生する大気汚染排出量を含めている。

以上のような結果から、都心部に近いゲル地区世帯に対しては、DHSの普及対象地域を拡大し、接続世帯を増やすことが望ましいと考えられる。一方で、都心部から遠いゲル地区世帯の場合は、アパート移転、あるいはSAH+電気ヒーターが望ましいといえる。アパート移転の方がランニングコストは小さいため、イニシャルコストの補助に対する効果的な政策が導入されることで、普及は可能だと考えられる。SAH+電気ヒーターについても、普及のためには夜間の電気料金を割引制度の導入等の効果的政策が望まれる。

今後の課題としては、今回評価対象としていない都市全体の大気汚染排出量を含めることである。さらに、環境面以外の多面的な便益、すなわち生活環境の改善を含めて費用便益分析を行うことも次なる課題といえる。

参考文献

- 1) World Bank (2009): Authors' illustration based on data from the China Environment Yearbook 2009 for Chinese cities, AMHIB study for UB, and WHO Air Quality Guidelines - Global Update 2005 for other cities

- 2) World Bank (2009) : Air Monitoring and Health Impact Baseline Study (AMHIB),
- 3) The Air Quality Department of the Capital City (2012) : Capacity Development Project for Air Pollution Control in Ulaanbaatar City Mongolia, Progress Report 3, pp.25-26
- 4) オトゴンバヤル エンフツォルモン, 松本 亨, Khaltai Galimbek (2013) : 現地調査に基づくモンゴル国ウランバートル市の大気汚染対策の費用便益分析, 土木学会論文集 G (環境) Vol. 69, No. 5, p.I_259-I_265
- 5) Enkhtsolmon OTGONBAYAR and Toru Matsumoto: Environmental and Economic Assessment on Air Pollution Abatement option in Ulaanbaatar Considering Income Level by Region, Poster presentation at The Second European Conference on Sustainability, Energy & the Environment (ECSEE2014). Brighton England
- 6) Air Quality Agency of the Capital City: <http://www.airquality.ub.gov.mn/> (2013.5.31 参照)
- 7) World Bank (2011): Air Quality Analysis of Ulaanbaatar Improving Air Quality to Reduce Health Impact, pp. 21-25, 36-68
- 8) Minister of Natural Resources Canada (2015): RETScreen International Clean Energy Decision Support Centre, Clean Energy Project analysis
- 9) Atmor of Mongolia report (2012): 200 世帯のための地下インフラネットワーク, pp.10-11 (モンゴル語)
- 10) National Statistical office of Mongolia (2010): Mongolia statistical yearbook, pp.82-89, pp301-31
- 11) オトゴンバヤル エンフツォルモン, 松本 亨 (2015): ウランバートル市ゲル地区の大気汚染対策に関する費用効果分析, 日本環境共生学会第18回(2015年度) 学術大会発表論文集 (印刷中)
- 12) Legal Information System: <http://www.legalinfo.mn/annex/details/5857?lawid=9138> (2015.7.20 参照)
- 13) Development Bank of Mongolia: <http://www.dbm.mn/> (2015.8.1 参照)

第7章 結論

7.1 得られた成果

本研究は、ウランバートル市の主要な大気汚染の発生源であるゲル地区の石炭ストーブの大気汚染削減対策を対象に、ゲル地区の地域別最適オプションを見出すことを目的に、各種対策技術の費用効率性を評価したものである。対策の導入地域と時期を考慮した複数シナリオを構築することで、浮遊粒子状物質の削減ポテンシャルを詳細に推計した。

第1章では、研究の背景としてウランバートル市の大気汚染の現状と研究対象地域となるゲル地区の状況、研究目的、既往研究のレビューについて述べ、本研究の位置づけを明確にした。

第2章では、ウランバートル市の主要な大気汚染の発生源である、ゲル地区の石炭ストーブの大気汚染物質削減プロジェクトを対象に、現地調査を踏まえ費用便益分析を実施することで、その費用効率性を評価した。具体的には改善ストーブ、電気ヒーター、グリーンハウス等の各プロジェクトを対象に分析を行った。本章の主な成果は、以下の通りである。

- ・改良型ストーブで燃料消費量が30%、PMが16%削減している。
- ・改善ストーブは費用効率の高い対策であるが、必ずしも正しい利用方法を守っていない、つまり正規の効果を得られていない可能性がある。

第3章では、改善ストーブの効果と燃料（石炭とセミコークス）の効果の評価するために、室内空気質の測定を現地にて実施し、各種対策のPM排出量削減量と対策コストを比較することで、費用効果分析を行った。本章の主な成果は、以下の通りである。

- ・PMは、改善ストーブより伝統的なストーブが多い。
- ・改善ストーブの費用効果分析では、ゲルにおいて改善ストーブに転換するより戸建てにおいて改善ストーブに転換する方が、費用対効果が高い。

第4章では、ウランバートルの市民に対してアンケート調査を行い、大気汚染から健康を守るためのWTPを推定するためにCVMを適用した。本章の主な成果は、以下の通りである。

- ・7年間で大気汚染が50%削減されることの健康便益は3.01億ドルと算出された。
- ・PM2.5に関して、市民は、大気汚染から健康を守る方法に関する知識が不足している。情報提供によって意識が大きく変化する。

第5章では、新たな対策の追加、対策の組み合わせによるシナリオの追加と、計算条件の再考を行った。新たにSAHを組み合わせたシナリオやDHSを考慮し、燃料消費削減量や対策コストの比較により費用効果分析を適用することで、それらの費用効率性を評価した。本章の主な成果は、以下の通りである。

- ・削減量当たり総コストでは、①DHS、②SAH+電気ヒーター、③電気ヒーター、④SAH+改良型ストーブ、⑤改良型ストーブ、⑥SAH+従来型ストーブ、⑦アパートへの移転の順に費用対効果が大きい。

第6章では、第5章で見出した費用効率性の高い対策を対象に、ゲル地区の地域別最適オプションを算出することで、2024年までの最適な対策シナリオを求め、その浮遊粒子状物質の削減ポテンシャルを推計した。本章の主な成果は、以下の通りである。

- ・①、②、⑦について、インフラ増強コストを加味して評価を実施。都心部に近い(1.5km以内)ゲル地区世帯に対しては、DHSの普及対象地域を拡大し、接続世帯を増やすことが望ましい。都心部から遠いゲル地区世帯の場合は、アパート移転、あるいはSAH+電気ヒーターが望ましい。

7.2 研究成果を踏まえた提案

以上のような成果を踏まえ、ウランバートル市の大気汚染対策のために以下のような施策、対策が必要であると考えます。

- ・市民の意識を高めるために、ワークショップやセミナー、テレビやメディアを通じて、効果的な情報提供を行う必要がある。
- ・アパート移転の方がランニングコストは小さいため、イニシャルコストの補助に対する効果的な政策が導入されることで、普及は可能だと考えられる。
- ・SAH+電気ヒーターの普及のためには、夜間電気料金の割引制度の導入等の効果的政策が望まれる。ただし、ゲル地区住宅は熱損失が大きいため、断熱性能の強化、住宅リフォームについても併せて実施することが必要。
- ・モンゴルでは石炭資源が豊富に存在しており、価格が安いいため石炭から石油や天

然ガスへ転換することは現実的ではない。そのため、ゲル地区の暖房のために、DHS の敷設や電気ヒーター利用のための発電容量増設が必要である。

7.3 さらに提案，研究課題

本論文の対象範囲ではないが，さらに以下のような対策を研究対象に加えることで，より総合的な対策評価・提案につながるものと認識している。

- ・大気汚染対策とともに低炭素社会，循環型社会への同時移行を考慮すると，火力発電のための燃料に，下水汚泥や廃棄物等を利用すること，そのために先進国の技術を活用することも検討する必要がある。これは同時に，都市ごみや下水汚泥の処理能力向上にも大きなメリットがある。
- ・ウランバートル市の PM 発生源の一つに未舗装道路から発生する砂塵がある。この削減対策として，日本等において開発されている「石炭火力発電所で発生した石炭灰を骨材として使用する Clinker Road 工法舗装」が有効となる可能性がある。これは，火力発電所の石炭灰のリサイクルともなり，対策導入の促進が期待されるコベネフィット（相乗便益）の1つといえる。
- ・再生エネルギーとして，風力発電と太陽空気加熱を取り上げたが，今後の課題としては，地中熱の導入を想定したアプローチを加えることを検討したい。

参考文献

- 1) 株式会社 環境緑化保全コンサルタント，<http://kurinka.com/index.html>

謝辞

本博士論文は、2011年4月から2016年3月の間、北九州市立大学の松本研究室で実施した研究成果を取りまとめたものです。この5年間に、北九州市立大学大学院国際環境工学研究科教授 松本亨先生には本研究の遂行に際し、研究面の指導のみならず生活面でもご支援していただき、大変お世話になりました。心から感謝しています。これからも、様々な場面でお世話になるとことが多いと思いますが、よろしく願い申しあげます。

大変お忙し中に副査を引き受けいただき、学位論文の審査を通じて貴重なご助言を下さいました北九州市立大学国際環境工学研究科の二渡了先生、野上敦嗣先生、井上浩一先生に深く感謝を申し上げます。

共同研究協力者であり、貴重なデータを提供して下さいましたモンゴル市大気環境質庁の Kh. Galimbek 様、モンゴル科学技術大学で働く機会を与えて下さいましたモンゴル科学技術大学の Ts. Erkhembayar 先生、Ch.Baasandash 先生にも御礼申し上げます。

本研究に関して大変貴重な情報やご助言を下さいました北九州市環境局の石田謙吾様、内藤英夫様、山下俊郎様、青柳祐治様、永田エンジニアリングの久保泰雄様にも、この場をお借りして御礼申し上げます。

本研究を遂行する過程で、日本企業等の奨学金をいただき、そのおかげで多くの論文執筆や学会発表の機会を頂くことができました。特に、この1年は国際協力機構(JICA)の Higher Engineering Education Development (HEED) Project に支えていただきました。改めて御礼申し上げます。また、学会発表や論文査読を通じて、国内外の多くの先生方に貴重なアドバイスをいただきましたことに対しても、感謝しています。

5年間という長い間に、家族のような存在であった松本研究室の先輩、同級生、後輩の皆さん、そして秘書の安村さんには、大学生活の様々な場面で支えて頂き、本当にありがとうございました。

最後に、遠く離れた場所からいつも応援し、支えてくれた家族にも感謝したいと思います。本当にありがとうございました。

これからモンゴル科学技術大学の研究者として、モンゴルと日本の共同研究に参画する予定です。今まで日本で学んだことや経験を、モンゴルの環境問題を解決するために少しでも貢献できるよう、頑張っていきたいと考えています。

2016年3月15日

オトゴンバヤル エンプツォルモン