

8. 北京市の都市生活廃棄物処理システムの最適整備に関する研究

Study on Improvement of Municipal Solid Waste Disposal System of Beijing Considering Environmental Load and Cost

左 健* ・ 松本 亨* ・ 本坊 紀史** ・ 薛 咏海* ・ 楊 建新***
Jian ZUO*, Toru MATSUMOTO*, Norifumi HONBO**, Yonghai XUE*, Jianxin YANG***

ABSTRACT; Beijing's MSW (Municipal Solid Waste) amount has increased rapidly with the rapid economic development and population increase in recent years. However MSW treatment and disposal facilities are not enough due to different reasons such as financial deficit. Environmental pollution in the urban area, resulted from MSW that was not properly disposed, has become serious environmental and social problems. In this study, prediction for MSW generation and collection, and scenario analysis on demand of MSW treatment and disposal facilities in the future, were done as a preliminary discussion of improvement strategies for Beijing's MSW treatment and disposal. In particular, the multiple regression analysis model, which made the rate of urbanization (the non-farm population / the total population) and the rate of the tertiary industry GDP the explanatory variable, and made the MSW collection amount per person the Criterion Variable, had been built. And three scenarios are set under three different conditions respectively, i) all new facilities are landfills, ii) new facilities are incinerators mainly, iii) new facilities are built according to the Beijing's MSW strategies on disposal rates of landfill and incineration in 2020. MSW treatment and disposal facilities' requirement till 2020 are estimated by the three scenarios. In consideration of the intermediate treatment and the final disposal, the MSW disposal flow model including the amount of reclamation and recycling till 2020 are built by the three scenarios. Moreover, energy consumption and CO₂ emission by life cycle assessment (LCA) and cost assessment had been applied in the research.

KEYWORDS; municipal solid waste, disposal system, LCA, cost analysis, Beijing

1 はじめに

中国の発展著しい大都市では、都市化と消費水準の上昇により、生活廃棄物発生量の増加と、プラスチック類や紙類の増加をはじめとした質的变化が進んでいる。これに対して、適正な処理・処分施設の整備は十分でなく、環境汚染源となっているだけでなく、将来的な最終処分場用地の確保にも困窮の兆しが見えてきている。このような状況において、都市部における収集率の向上や、農村部への収集範囲の拡大に取り組む必要にも迫られている。

急速な経済発展に伴う資源消費量の増大は、輸入量拡大と資源の将来的な逼迫懸念に通じつつある。そのため、廃棄物の発生抑制、資源総合利用（リサイクル）の促進による最終処分量の減少、エネルギー消費効率を含む資源利用効率の向上を中心とした「循環経済」の構築は、中国においても重要な政策課題となっている¹⁾。

ここで、適正処理のための施設建設や設備導入のためには、巨額の投資と資源投入が必要である。また、寿命の長い社会資本の整備は、ライフサイクル概念を導入した戦略的検討が必要といえる。本研究では、中国大都市における都市生活廃棄物（以下、MSW: Municipal Solid Waste）処理システムの最適整備を検討するために、2020年までのMSW収集量の将来予測を実施した後、MSW処理に関わる物質フローモデルの構築とそれに

* 北九州市立大学国際環境工学部環境空間デザイン学科

Department of Environment Space Design, Faculty of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu

** 日立物流ソフトウェア（株）

Hitachi Distribution Software Co., Ltd.

*** 中国科学院生態環境研究センター

Research Center for Eco-Environmental Sciences, The Academy of Science

よるシミュレーションやシナリオ分析を行う。さらに、それを元に、LCA及びコスト評価を実施する。対象都市は、1986年に人口1,000万人を超え、今後も人口増加が続くと予想される北京市とする。

2. MSW 収集量の将来予測

2.1 人口及び収集率

北京市では、地域によって収集率、1人あたりMSWの発生量ともに異なる。そのため、各地域のMSW収集量を、式(1)のように考え、予測する。地域については、城区・近郊区、城郷結合部(城区・近郊区と遠郊区の境界)、遠郊区に分けて考える。

$$W = \sum_{i=1}^3 w_i P_i r_i \quad (1)$$

ここで、W:MSW収集量、w:一人あたりMSW排出量、P:人口、r:収集対象人口割合である。添字については、i=1:城区・近郊区、2:城郷結合部、3:遠郊区とする。

北京市の全人口は、戸籍人口と暫住人口(戸籍がない状態で6か月以上滞在)に分類され、戸籍人口は、さらに非農業人口と農業人口に分類される。

城郷結合部の人口については、2020年までは現在のレベル(120万人)とする。MSW収集対象人口割合は、2003年30%、2004年50%、2005年80%、2006年90%、2007年以降100%という、市の計画値を採用する。ここで注意すべきことは、城郷結合部が行政的な区分ではないため、その人口は実際には、城区・近郊区あるいは遠郊区の統計に内包されていることである。そのため、城区・近郊区、遠郊区の収集人口を計算する際には、各地域に内包される城郷結合部人口を除く必要がある。なお、城郷結合部人口は、統計的には城区・近郊区と、近郊区に50%ずつ属するものと仮定した。

城区・近郊区及び遠郊区の人口予測であるが、各地域の非農業人口と戸籍人口については、過去5年間の年平均増加率を用いて推計し、暫住人口については、北京市全域の計画値(2020年の上位推計4.50百万人¹⁾)を採用し、両地域に配分した。配分率は過去の傾向及び将来の政策を考慮して、城区・近郊区の暫住人口割合を、2003-2005年に70%、2006-2010年に65%、2010-2015年に60%、2016-2020年に55%と設定した。その結果、城区・近郊区及び遠郊区の人口は増加傾向を示し、2020年にはそれぞれ11.2百万人、6.8百万人に達する。

MSW収集率率について、城区・近郊区のMSW収集範囲がほぼ全域に達するため、2002年に100%となるように設定した。遠郊区は、計画値(城郷結合部と同じ値)を用いた。

2.2 一人あたりMSW収集量

城郷結合部の一人あたり収集量は、現状の1.95kg/日(計測値²⁾)を2020年まで一定とした。それ以外の一人あたりMSW収集量の予測に関しては、式(2)のような重回帰モデルを構築した。

$$w = 2.2282 p_{urb} - 0.3023 g_{third} - 0.2718 \quad (2)$$

ここで、w:一人あたりMSW収集量、 P_{urb} :都市化率(非農業人口/全人口)、 g_{third} :第三次産業GDPの割合。一人あたりMSW収集量の実績値は、収集対象人口あたり収集量で推計した。なお、1991年から1999年のMSW収集量については、実績データに収集車両の積載率を考慮した換算係数0.60³⁾を乗じて実績載量を求め、推計した。2000-2002年については実データを使用した²⁾。2003-2020年の第三次産業GDPの割合については、2020年に75%に達するという市の計画値に基づいて推計した。その結果、2003-2020年の間、一人あたり収集量は対前年比で2-3%の増加傾向がみられ、2010年0.86kg/day、2015年0.95、2020年1.05に達する結果が得

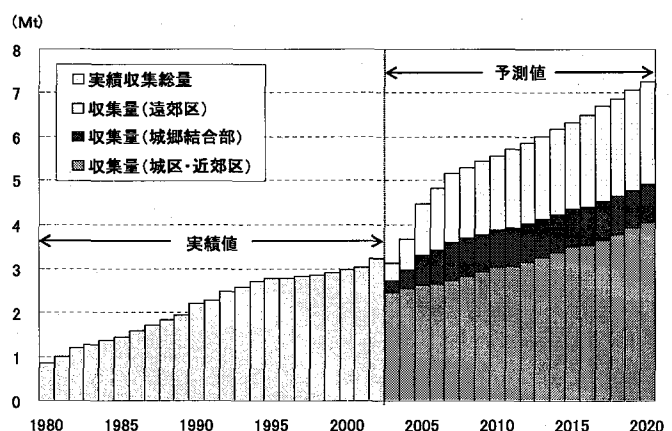


図-1 北京市都市生活廃棄物収集量予測結果

られた。

2. 3 北京全域のMSW収集量の予測結果

図-1は、北京市のMSW収集量の将来予測結果を示している。MSW収集量については、2004年以降2020年まで常に増加傾向を示し、2010年5.56Mt、2015年6.33Mt、2020年7.26Mtと予測された。主な増加要因は、都市化率の増加による一人当たりMSW収集量の増加、MSW発生人口及び城郷結合部、遠郊区における収集率の上昇である。MSW収集量の増加傾向は、総じて、経済活動の活発化とそれによる消費水準の向上、MSW収集率の向上によるといえる。

3. 処理・処分施設整備と処理フローに関するシナリオ分析

3. 1 要処理量と処理施設能力の比較

収集されたMSWに対する無害化処理率は、2002年で88%である。その内訳は、資源ごみ分別によるリサイクル率（堆肥以外）約5%、堆肥化11%、焼却3%、埋立（衛生埋立+簡易埋立）81%である³⁾。無害化処理率の将来目標値は、2003年91%、2004年95%、2005年98%、2006年以降100%と計画されている³⁾。

図-2(a)は、2020年までのMSW収集量の推移と、既設の焼却、堆肥、衛生埋立施設の処理能力を示している。既存処理施設とは、簡易埋立のデータは未入手であることと、2007年以降使用しないことになっているため、含んでいない。また、2007年までの北京市のMSW処理計画が概ね既定路線となっているため、建設計画も含むこととした。既存施設の総処理能力は、2007年が最大で、4.3Mtであるが、2017年以降には埋立場の容量が大幅に減少するために2.5Mtトンとなる。2020年には、リサイクル以外の中間処理要処理量[=収集量×無害化処理率×(1-資源ごみの分別率5%)]は、既存施設より4.4Mtほど超えることがわかる。

3. 2 処理シナリオの設定

2008-2020年の間の必要な新設施設（堆肥場、焼却場、衛生埋立場）の導入時期及び導入規模・数を求めるために、以下の3つのシナリオを設定してシミュレーションを行った。新設施設の設定ルールとして、処理能力は堆肥化施設1,000トン/日、焼却施設1,500トン/日、衛生埋立場2,000トン/日とし、使用期限は、堆肥化施設と焼却施設は20年、衛生埋立は2020年までの稼働と仮定した。堆肥化処理の残渣（10%発生率^{注1)}）と焼却残渣（15%の発生率^{注2)}）の合計を、中間処理残渣と位置づけ、両者ともに最終処分は衛生埋立とする。

設定した各シナリオは下記のとおりである。

- ① シナリオ1（埋立重視ケース）：新設施設を埋立場のみとする。
- ② シナリオ2（焼却重視ケース）：リサイクル以外の中間処理不足分を全て焼却とする。焼却残渣の発生による要処分量も考慮して埋立場の追加必要量を想定する。
- ③ シナリオ3（北京市の処理計画³⁾）に沿うケース：2020年の処理割合を埋立30%、総合利用35%（堆肥30%、リサイクル5%と仮定）、焼却35%と、北京市のMSW処理計画に沿うように堆肥化施設、焼却施設及び埋立場を設定する。

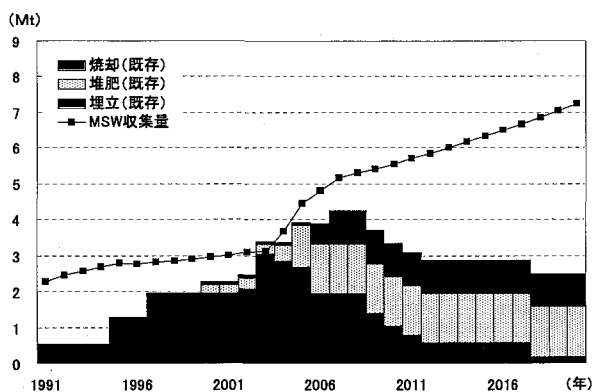
3. 3 シミュレーション結果

各シナリオについてのシミュレーション結果を、図-2(b)～(d)に示す。要処理・処分量というのは、中間処理量と中間処理残渣を含む最終処分量の合計である。ここで中間処理量とは、リサイクル以外の堆肥化施設、焼却施設に流れるMSWの合計であり、ここから発生する残渣と直接埋立場に流れる量を合計した値を要処理・処分量と定義する。どのシナリオにおいも、2003年～2020年のMSW収集量と既存施設能力の差は同じであるが、処理方式の違いにより、要処

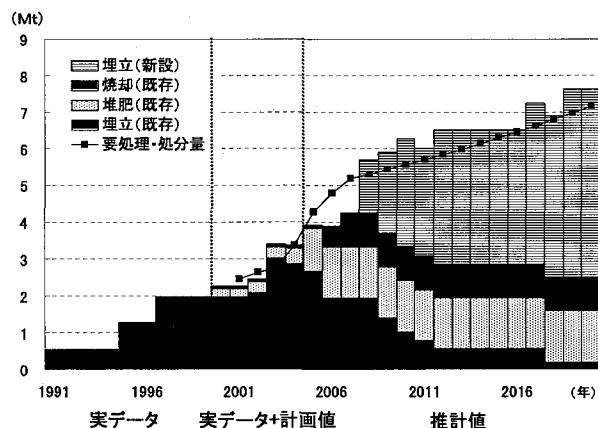
表-1 シナリオ別の新規施設導入時期及び累計

年	シナリオ1	シナリオ2		シナリオ3		
	埋立	埋立	焼却	埋立	堆肥	焼却
2008	2	1	2	1	1	-
2009	3	1	3	1	2	1
2010	4	1	4	1	2	2
2011	4	2	4	1	2	3
2012	5	2	5	2	2	3
2013	5	2	5	2	2	3
2014	5	2	5	2	2	3
2015	5	2	5	2	2	3
2016	5	2	6	3	2	3
2017	6	2	6	3	2	3
2018	6	3	6	3	2	3
2019	7	3	6	3	2	3
2020	7	3	6	3	2	3

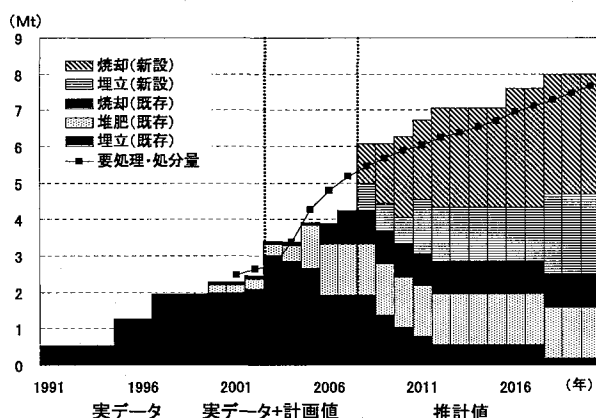
追加施設の建設時期



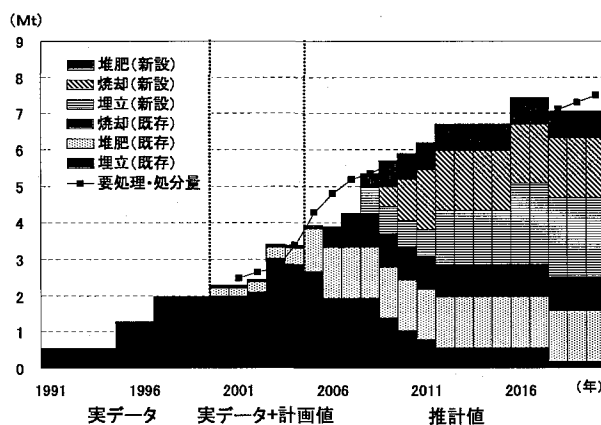
(a) MSW収集量と既存施設の処理能力



(b) シナリオ1 (埋立重視ケース)



(c) シナリオ2 (焼却重視ケース)



(d) シナリオ3 (北京市の2020年処理計画に沿う場合)

図-2 シナリオ別の要処理・処分量と必要処理施設の推計結果

注：要処理・処分量＝中間処理量（堆肥、焼却）＋最終処分量（直接埋立、堆肥・焼却の残渣の埋立）

理・処分量が異なるため、当然ながら要処理・処分量と既存施設能力との差も異なる。この差を埋めるための、シナリオ別の新規施設導入数は、表-1のようになる。

- ① シナリオ1 (図-2 (b))：2020年の要処理・処分量は7.2Mtであり、既存施設能力との差は4.7Mtとなる。2020年までの新設施設の累計数は、埋立場7カ所である。
- ② シナリオ2 (図-2 (c))：2020年の要処理・処分量は7.7Mtであり、既存施設能力との差は5.2Mtとなる。2020年までの新設施設の累計数は、焼却施設3カ所、埋立場6カ所である。
- ③ シナリオ3 (図-2 (d))：2020年の要処理・処分量は7.5Mtであり、既存施設能力との差は5.0Mtとなる。2020年までの新設施設の累計数は、堆肥化施設2カ所、焼却施設3カ所、埋立場3カ所である。

4. 施設整備シナリオに基づくMSW処理フローの推計

2002年と、2008年及び2020年のMSWの発生・収集から資源ごみの回収、堆肥化、焼却、埋立までのMSW処理フローモデルを構築した。

MSW発生量は、MSWの収集量と直接投棄されるMSW以外に、市政府による収集以前に回収される資源ごみの合計と考える。MSWの収集以前に分別・回収される有価な資源ごみ回収量は、統計データに含まれない。これを推計するためには、資源ごみの回収率あるいは、一人あたり回収量を何からの方法で設定する必要がある。城区・近郊区においては、回収率を25%^{注2)}と設定して推計算した。城郷結合部は、石炭灰の排出量が多く資源ごみの割合が低いと考えられ、25%の回収率を適用できない。そのため、城郷結合部の一人あたりMSW排出量(2.2kg/日、発生ベース)から一人あたりMSW収集量(1.95kg/日)を除いて一人あたりの資源ごみ回収原単位(ただし収集以前)を0.25kg/日と推計した。この回収原単位を、2020年まで一定をして設定した。

堆肥化については、残渣発生率を北京の実績データ 0.10^{注1)}を使用した。堆肥の収率については、日本のデータを参考にして、投入量（湿ベース）の20%とした⁴⁾。

以上に従って推計した処理フローの結果を図-3に示す。2002年と2020年の大きな違いは、2002年には野積に流れるMSWが発生量の32%あるのに対して、2020年には収集率と無害化処理率100%を達成していることである。2020年のシナリオ別のMSW処理割合を見ると、堆肥化はシナリオ1が19%、シナリオ2が19%、シナリオ3が29%である。一方、焼却は、シナリオ1が13%、シナリオ2が58%、シナリオ3が35%である。シナリオ3が35%である。

5. LCA及びコスト評価

2002年（実績値）及び2008年、2020年（予測値）のシナリオ別の環境負荷を評価するために、MSW収集・輸送、焼却、総合利用、埋立のLCAを行った。なお、計算

にあたっては、中国科学院生態環境研究センターによるLCI（Life Cycle Inventory）原単位を用いた⁵⁾。表-2は、2008年と2020年の焼却灰のリサイクル、浸出水の収集・処理及び排ガスの収集・エネルギー回収の設定条件を示す。図-4がLCEとLCCO₂の結果を示す。ただし、LCC₂は、CH₄とN₂Oについてもそれぞれ特性化係数（GWP100年）によって等価換算し、算入している。

これによると、下記のような結果が得られた（図-4）。

- 1) LCEについては、シナリオ2は焼却におけるごみ発電の効果により最も優位な結果となった。その次が、シナリオ3である。
- 2) LCCO₂では、シナリオ3が最も低い。2020年には、シナリオ1の62%、シナリオ2の89%に相当する。焼却におけるN₂O、埋立における有機性廃棄物から排出されるCO₂とCH₄の効果により、LCEとはかなり異なる結果が得られた。

一方、LCAと同様に、収集・運搬、総合利用、焼却及び埋立の4つのプロセスについて、建設コスト及び運用コストを、2002年（現状値）及び2008年、2020年（予測値）のシナリオ別に比較した。単位MSWあたりの建設コスト及び運用コストを求め、それにMSW処理量に乗じることでそれぞれのコストを算出した。ここで、収集・運搬の建設コストについては、中継ステーションのみを対象としている。MSW処理量あたりの建設コストに関しては、各種施設の建設投資^{注1)}と使用年限（中継ステーションは30年、焼却と堆肥施設は20年、埋立場の設計容

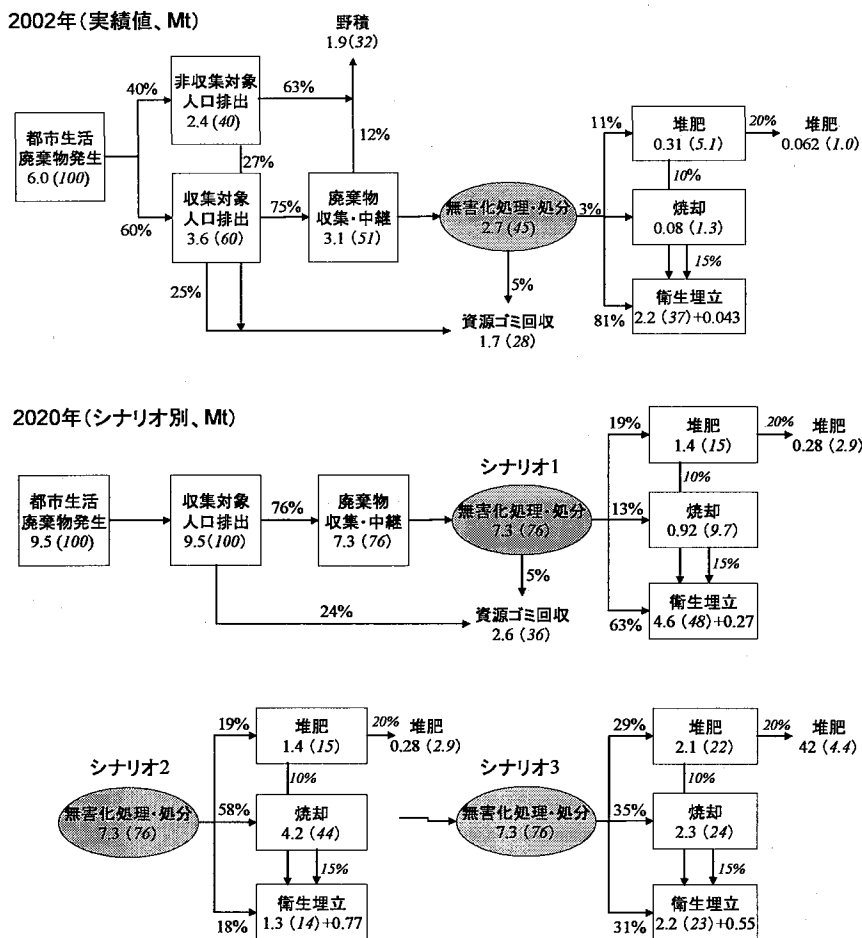


図-3 MSW処理フローの推計結果

表-2 LCAにおける設定条件

		焼却灰の リサイクル	埋立場の浸出水		埋立場の排ガス	
			収集	処理	収集	エネルギー回収
2002年	実績値	0%	0%	0%	0%	0%
2008年	シナリオ1	50%	30%	50%	30%	50%
	シナリオ2	50%	30%	50%	30%	50%
	シナリオ3	50%	30%	50%	30%	50%
2020年	シナリオ1	50%	50%	100%	50%	100%
	シナリオ2	50%	50%	100%	50%	100%
	シナリオ3	50%	50%	100%	50%	100%

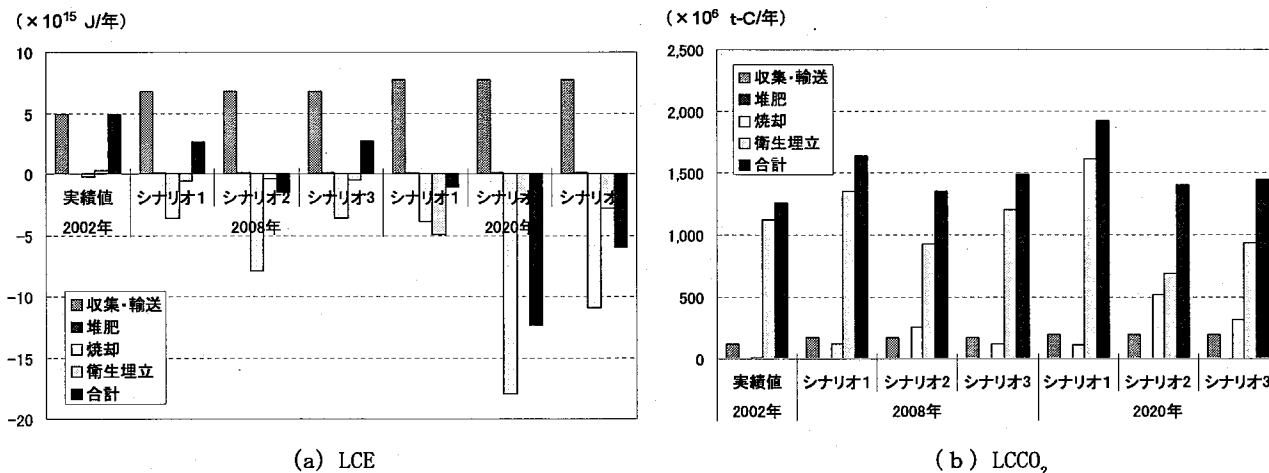


図-4 シナリオ別のLCE及びLCCO₂の結果

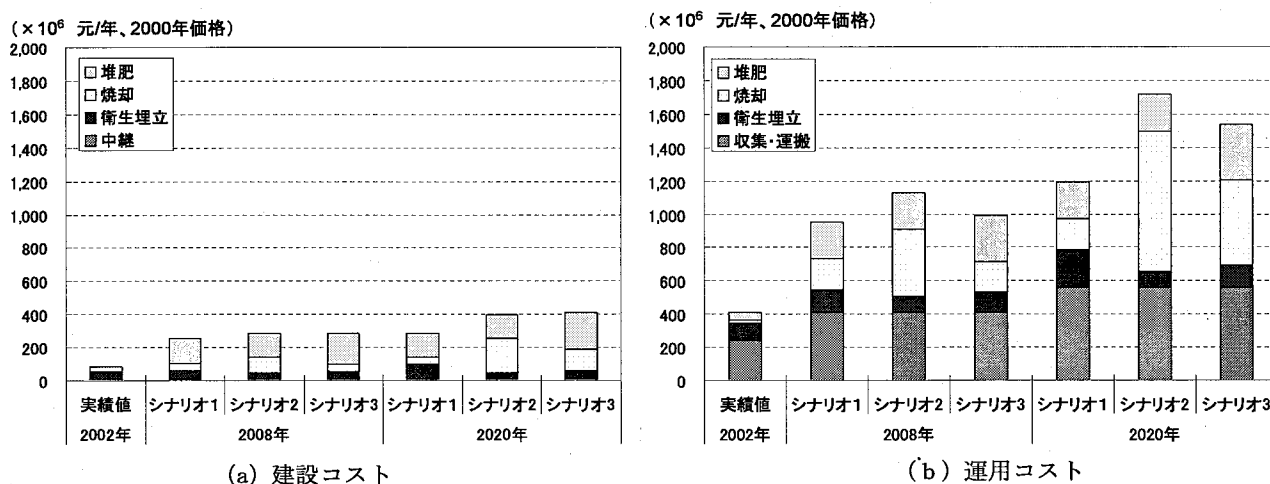


図-5 シナリオ別のコスト評価の結果

量から算出) から求めた。運用コストに関して、焼却施設は現在北京市に存在しないため、中国他都市で運用されている焼却施設の平均コスト (200 元/ t) ^{注2)}、それ以外は北京市の2000年の実績値を原単位として用いた^{注1), 2)}。プロセス別の単価を見ると、建設コストは堆肥が最も建設単価が高く、運用コストでは焼却が最も運用単価が高くなっている。その結果、下記のような結果が得られた (図-5)。

- 1) 建設コスト、運用コスト、合計コストともに、シナリオ2が最もコストが高く、次いでシナリオ3である。2020年においては、シナリオ2はシナリオ1の約1.7倍、シナリオ3はシナリオ1の約1.5倍である。
- 2) いずれのシナリオにおいても、建設コストは運用コストの約1/4に相当する。

表-3 2008年～2020年までのシナリオ別の必要資金 (新施設の初期投資及運用コスト)

	必要資金 (x 10 ⁶ 元)			割合			シナリオ1との比較		
	合計	初期投資	運用	合計	初期投資	運用	合計	初期投資	運用
シナリオ1	15,886	2,100	13,786	100%	13%	87%	1	1	1
シナリオ2	23,461	4,140	19,321	100%	18%	82%	1.5	2.0	1.4
シナリオ3	22,336	4,591	17,745	100%	21%	79%	1.4	2.2	1.3

注: 2000年価格

次に、2000年～2020年の間の建設投資及び運用コストの累積額に関するシナリオ別比較を行った。建設投資については、2008年から2020年の間に新たに建設する施設導入数の推計結果（表-1）をもとに、単位施設あたり必要投資額を乗じて、今後必要となる建設投資を求めた。運用コストについては、図-5の推計で用いた単位MSWあたり運用コストにMSW処理量を乗じて求めた。表-3に、建設投資と運行コストの累積投資額を示す。建設投資のみだとシナリオ3が約46億元（2000年価格）で最も大きい結果となったが、建設投資と運用コストの合計値で見ると、シナリオ2が約234億元で最も大きいことがわかる。

6. おわりに

本研究では、中国の巨大都市を代表して北京市を対象に、MSW収集量の2020年までの将来予測と、シナリオ別の処理・処分施設整備必要量推計及び処理フローモデルの構築を行った。これらにより、以下の結果が得られた。

- 1) GDPに対する第三次産業GDPの割合と都市化率（非農業人口／総人口）を説明変数に採用して、一人当たりMSW収集量を予測する重回帰モデルを構築した。これと、城郷結合部の収集量予測を合計した値を北京市の収集量として予測した。
- 2) MSW排出量の今後の変化について、埋立場重視ケース（シナリオ1）、焼却重視ケース（シナリオ2）、北京市の2020年処理計画に沿うケース（シナリオ3）の3種類のシナリオを設定し、中間処理量と最終処分量の合計値として要処理量を推計した。
- 3) 中間処理及び最終処分工程の他、資源回収と不衛生処理も考慮した、MSW処理フローモデルを構築した。
- 4) 2020年までの、MSW処理システムの3つのシナリオに対して、エネルギーとCO₂（GWP100年）によるLCAとコスト評価を行った。その結果、埋立場重視ケースは、コストは最小になるが、環境負荷が最大になることを示した。

今後の研究課題としては、消費の変化とそれに伴うMSWの質的变化の予測を含んだMSW処理フローモデルの構築を行うことや、システムダイナミクスモデルを構築し、より精緻なシミュレーションを実施することなどが考えられる。

謝辞

本研究は、文部科学省若手任期付研究員支援「東アジア都市のための環境評価ツールの開発」（代表：松本亨）の一環として行った成果の一部である。また、中国環境科学院固体廃棄物污染防治技術研究所王琪所長、北京師範大学陳晋助教授、北京市市政管理委員会金永麒上級技師には、データや情報の提供にご協力頂いた。記して謝意を表する。

注釈

注1) 北京市市政管理委員会へのヒアリング調査による。

注2) 中国環境科学院へのヒアリング調査による。

参考文献

- 1) 北京市政府：北京市の都市総合計画（2004-2020年）：<http://news.21cn.com/dushi/csts/2005/01/14/1942918.shtml>, 2005
- 2) 北京市統計局編：北京統計年鑑各年版（1990-2002），中国統計出版社，1991-2003
- 3) 北京市政府専門家顧問団環衛組，北京市環境衛生設計科学研究所：北京市綠色オリンピック都市ごみ污染防治戰略研究，2003（中国語）
- 4) 北海道大学大学院工学研究廃棄物資源工学講座廃棄物処分工学分野：都市ごみの総合管理を支援する評価計算システムの開発に関する研究，1998
- 5) 楊 建新・徐 成・王 若松編：製品ライフサイクルアセスメントの方法及び応用，気象出版社，2002（中国語）