

タイ王国における廃棄物処理事業の初期環境評価

京都大学 稲積真哉 ^{*1}
 京都大学 大津宏康 ^{*2}
 鴻池組 谷澤勇気 ^{*3}

by Shinya INAZUMI, Hiroyasu OHTSU and Yuki TANIZAWA

本研究は、タイ王国における廃棄物処理事業に対して初期環境評価を実施し、中間処理過程および最終処分過程において廃棄物に如何なる処理を施せば費用と環境の両方に対して効率的であるか、複数の廃棄物処理シナリオ間で比較するものである。具体的には、想定した各廃棄物処理シナリオにおける長期的な処理コストおよび環境負荷（CO₂ および CH₄ 排出量）を定量的に推定している。さらに、CO₂ 貨幣価値原単位を用いることで、環境負荷を環境コストとして内部化している。その結果、処理コストは現状の廃棄物処理事業をモデル化したベースラインシナリオが最も低額である一方、焼却処理施設と CH₄ 利用施設を建設した廃棄物処理シナリオが最も高額である。また、環境負荷は焼却処理施設と CH₄ 利用施設を建設した廃棄物処理シナリオが最も小さく、ベースラインシナリオが最も大きい。また、バンコク首都圏においては、CH₄ 利用施設を建設する廃棄物処理シナリオがトータルコストならびに環境影響指標の観点から、処理コストと環境負荷の双方に対して効率的である。さらに、廃棄物発生量、CO₂ 貨幣価値原単位、および評価期間における不確実性は、廃棄物処理事業における処理コストならびに環境コストの推定に大きな影響を及ぼすことを示した。

【キーワード】 温室効果ガス、初期環境評価、環境コスト、処理コスト、廃棄物処理

1. はじめに

世界中において環境問題は深刻なものとなっており、例えば急激な都市化や温暖化による公害、森林破壊、および土壌汚染等の対策に迫られている。一方、環境問題対策の 1 つとしては、1997 年に第 3 回気候変動枠組条約締約国会議（COP3）で採択された京都議定書が挙げられる。京都議定書は具体的な約束期間と削減目標を設定したものであり、先進国全体において 2008～2012 年の期間、1990 年比 5% の温室効果ガスの削減が義務付けられている。また、議定書の中では、クリーン開発メカニズム（CDM）、共同実施（JI）、ならびに排出権取引といった新たな経済メカニズムが導入された¹⁾。このように、二酸化炭素（CO₂）の削減活動による排出削減量を取引することで、CO₂ 排出量削減活動に対して最適な投資の対象となる。

本研究では、タイ王国における廃棄物処理事業に

対して初期環境評価を実施し、中間処理過程および最終処分過程において廃棄物に如何なる処理を施せば費用と環境の両方に対して効率的であるか、複数のシナリオ間で比較するものである。

2. タイ王国における廃棄物処理事業の現状と廃棄物発生量の将来予測

本研究はタイ王国のバンコク首都圏に着目している。タイ王国は国土面積約 51.4 万 km² であり、日本の約 1.5 倍である。また、タイ王国の人口は約 6,800 万人であり、東南アジアの中ではインドネシア（約 2 億 3,000 万人）、フィリピン（約 9,200 万人）、およびベトナム（約 8,700 万人）に次いで 4 番目に多い²⁾。なお、後述するバンコク首都圏には、全人口の約 1/10、すなわち約 600 万人が集中している。しかしながら、地方からの出稼ぎ者が多く、実際には、800～900 万人いるのではないかと報じられている。

^{*1} 京都大学大学院工学研究科

075-383-3262

inazumi.shinya.3c@kyoto-u.ac.jp

^{*2} 京都大学大学院工学研究科

075-383-3260

ohtsu.hiroyasu.6n@kyoto-u.ac.jp

^{*3} (株)鴻池組

03-5617-7500

tanizawa_yk@konoike.co.jp

タイ王国の季節は雨季（5 月～10 月）、寒気（11 月～2 月）、および暑気（3 月～4 月）に分けられる。雨季には季節風の影響を受けることで、毎日のように 1～2 時間程度の激しいスコールが降り、オープンダンピングで埋め立てられた最終処分場が崩壊する可能性がある。また、暑気には最高気温が 40℃ 近くに達することもあり、最終処分場内の廃棄物が自然発火し、大火災となる可能性もある^{2), 3)}。そのため、廃棄物の処理および管理を徹底することで大火災に対応しなければならない。

タイ王国は 1992 年に気候変動枠組条約に署名し、1999 年には京都議定書にも署名している。なお、タイ王国は温室効果ガス排出量の削減義務を負わない非付属書 I 国であり、CDM 事業のホスト国となることができる^{4), 5)}。タイ王国は削減義務を負わないものの、年々増加する廃棄物に対応するため焼却処理施設の導入、衛生埋立処分場の増設、さらにリサイクルを国家施策の 1 つとして推進してきた。特に、リサイクルのキャンペーン活動を行い、当該コンセプトは徐々に国民に浸透してきたものの、廃棄物の分別基準の曖昧さや回収システムの不对応等により、回収された廃棄物の内、リサイクルされた廃棄物の割合は 2000 年で 7%（2000 年時点で日本は 14.3%、欧州は 50%以上の国もある）と苦慮している^{3), 6)}。なお、廃棄物の管理は中央政府が技術ならびに資金面でサポートしつつ、地方行政機関が行っている。国家施策としては 1975 年に国家環境保全法が制定されたが、十分に機能せず 1992 年に廃止された。同年、新たに国家環境保全推進法が制定され、現在は環境基本法に相当する国家環境質向上法の下で環境問題に関する規制が定められている。

バンコク首都圏とは、バンコク都にサムットプラカーン、パトンタニ、サムットサコン、ナコンパトム、およびノンタブリーの周辺 5 県を加えた地域の総称である。バンコク首都圏では廃棄物の約 98～99%が回収されている。また、交通渋滞を避けるために午後 6 時以降に回収は行われている。ただし、バンコク首都圏には小道や行止りが多く、収集効率が悪い。さらに、収集作業員は副収入として収集作業時に廃棄物の中から有価物をリサイクル可能物として回収するため、作業効率がより悪くなっている⁶⁾。バンコク首都圏で収集された廃棄物は、中継基地施

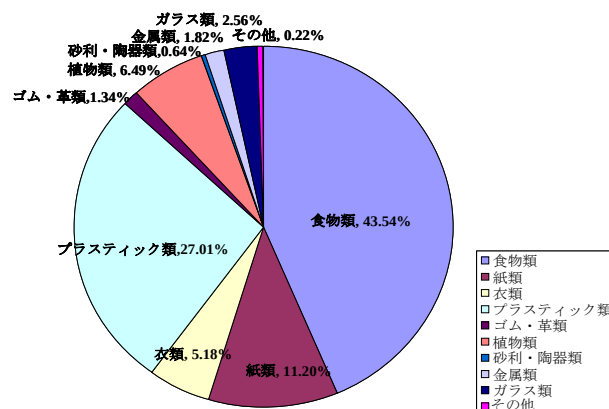


図-2 バンコク首都圏における廃棄物組成

設（廃棄物の積替え等が行われる施設）であるオンヌット、ノンケン、ならびにターランに運ばれ、パノムサーラカムおよびカンペンセンにある衛生埋立地で処分されている³⁾。

本研究で構築する環境評価手法におけるインプットとして重要要素には、廃棄物組成と廃棄物発生量を挙げることができる。図-1 はバンコク首都圏における廃棄物組成³⁾を示している。これより、食物類とプラスチック類で 70%近くを占めている。そのため、食物類とプラスチック類に含まれる C 原子由来の CO₂ およびメタン (CH₄) 排出量が多い。なお、本研究では長期間における環境評価を行うものの、バンコク首都圏における経済の安定状況から評価期間中の廃棄物組成は一定とした。

バンコク首都圏における廃棄物発生量 Q (t/日) について、本研究では式-1 を用いて定量的に推定する。

$$Q = Q_p P \times 1000 \quad \text{式-1}$$

ここで、 Q_p : 1 人当たりの廃棄物発生量 (kg/人・日)、 P : 人口 (人) である。タイ王国の環境保全及び推進の指針・枠組みを示すものとして、国家環境委員会 (National Environmental Board) により内閣に提案され、1996 年 11 月に承認された国家環境質向上政策・計画 (Enhancement and Conservation of National Environmental Quality Policy and Plan) における一般廃棄物に関する目標・指針 (マスタープラン) が掲げられている (表-1 参照)³⁾。当該マスタープランの 1 つとして「一般廃棄物の発生量を 1.0kg/人・日以下とする」目標がある。しかしながら、2009 年時点では

約 1.6kg/人・日と未達成である。そこで、この目標が評価期間（2010～2029 年）である 20 年間に達成するように、2010 年の 1 人当たりの廃棄物発生量 Q_P を 1.6kg/人・日、2029 年の 1 人当たりの廃棄物発生量 Q_P を 1.0kg/人・日として、 Q_P が直線的に減少するように設定する。一方、バンコク首都圏における 1950、1960、1970、1980、1990、および 2000 年の人口 P は各々判明している（表-2 参照）⁷⁾。これら既知の人口 P から将来の人口 P の推移を回帰分析によって定量的に推定する。既知の人口 P によれば、1960～1990 年まで約 2.6 倍となっているが、1990～2000 年まで 1.05 倍になっており、将来における人口 P の推移は安定に向かうとして仮定する。そこで、回帰分析には様々な種類があるが、本研究では人口 P が安定に向かう性質を表現できる対数回帰を使用する。既知の人口 P と回帰分析で推定した人口 P の将来予測を図-2 に示す。さらに、1 人当たりの廃棄物発生量 Q_P と人口 P を掛け合わせることでバンコク首都圏の廃棄物発生量の将来予測を行う。図-3 に予測した推移を示す。人口 P は緩やかに増加しているものの、1 人当たりの廃棄物発生量 Q_P が減少しているため、結果的にバンコク首都圏の将来における廃棄物発生量 Q は減少している。

3. 初期環境評価手法
(1) シナリオの設定

廃棄物の処理過程は収集、中間処理、運搬、および最終処分の 4 過程に区分される。通常、当該廃棄物処理過程には 2 つのケースが考えられる。すなわち、(i)都市圏全ての廃棄物を収集して中間処理施設まで輸送し、中間処理を施した後、中継基地施設に輸送するケースと、(ii)都市圏全ての廃棄物を中継基地施設まで輸送した後、各々の中間処理施設へと輸送するケースである。最終処分量が多い場合、最終処分場の飽和により最終処分場が別の箇所に移る可能性があるため、中間処理施設の位置が最適化されない。そこで、中間処理施設の位置が必ず最適化されるよう、本研究では最終処分場が遠距離にあっても対応できる(ii)のケースを仮定している。

本研究では、何の処理も実施しない廃棄物処理フローをモデル化したベースラインシナリオ（現状の廃棄物処理事業に相当）、ベースラインシナリオに

表-1 タイ王国における廃棄物処理に関する家政策・指針（マスタープラン）

目標	指針
バンコク首都圏における一般廃棄物の発生量を1.0kg/person/day以下とする。	収集・運搬・処理・処分を含む効率的な一般廃棄物管理体制の確立。
バンコク首都圏における一般廃棄物のリサイクル率を15%以上にする。	廃棄物発生率の管理、リサイクルと再利用の促進。
バンコク首都圏における一般廃棄物を全て管理する。市外での未処理廃棄物を10%以下にする。	一般廃棄物処理のインフラ建設・運営の民間活力の促進。
各県で衛生的な一般廃棄物管理のマスタープランの策定を確実にし、適切な処理を有する。	一般廃棄物監視に民間や市民の参加の促進。

表-2 バンコク首都圏における既知の人口推移

年	1960	1970	1980	1990	2000
人口(人)	2,126,453	3,077,361	4,711,000	5,546,937	5,844,607

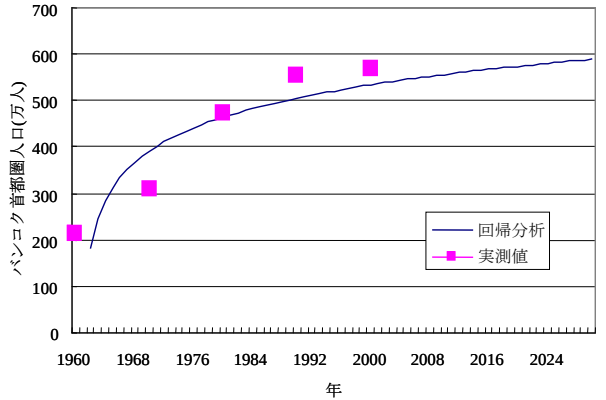


図-2 バンコク首都圏における人口予測

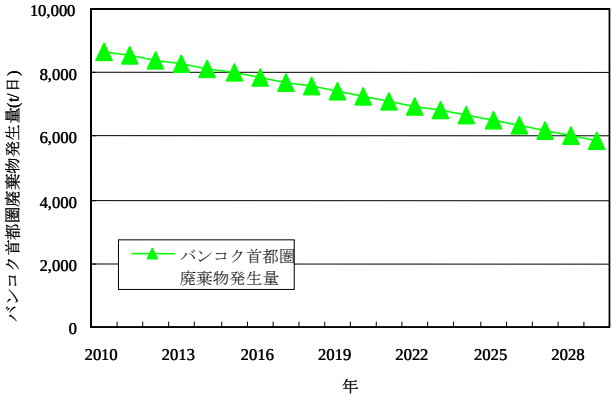


図-3 バンコク首都圏における廃棄物発生量予測

対して何らかの廃棄物処理を施した 5 種類のシナリオを作成する（表-3 参照）。さらに、5 種類のシナリオにおいて、廃棄物発生量、廃棄物組成、および人口等をインプットとして、各々の処理コストと環

境負荷を評価期間 20 年で定量的に推定する。

収集過程は、地域内における廃棄物を各収集地点から収集および運搬する過程である。収集車両が満杯になった地点で中間処理施設および中継基地施設に運ばれる⁸⁾。

中間処理過程は、収集された廃棄物に対して減量化を目的として処理を行う過程である。本研究では中間未処理（中継基地施設のみ）、資源分別処理、および焼却処理の 3 種類のシナリオを想定する。資源分別処理は、運び込まれた廃棄物において紙類、ペットボトル類、瓶類、鉄類、およびアルミニウム類のリサイクルを行い、当該売却によって利益を得ることができる。焼却処理は、搬入された廃棄物を燃焼することで最終処分量の大幅な削減（これにより最終処分場建設コストが削減される）が見込まれる⁸⁾。

運搬過程は、中継基地施設から最終処分場まで廃棄物および廃棄物処理残渣を運搬する過程である⁸⁾。

最終処分過程は、廃棄物または廃棄物残渣量を搬入する過程である。本研究では、オープンダンピングおよびオープンダンピング+CH₄利用施設建設の 2 種類のシナリオを想定する。オープンダンピングは廃棄物の野積みであり、廃棄物浸出水等の管理は行われない。しかしながら、オープンダンピングのシナリオにおいては、タイ王国における環境に対する意識の向上を考慮し、最終処分場が飽和した際に覆土工事を行うこととする。CH₄利用施設は最終処分場から排出する温室効果ガスを回収ならびに燃焼し、発電することで売電収入を得るとともに本来大気中に放出される CH₄を CO₂に変換することができる。

表-3 想定した廃棄物処理シナリオ

処理過程	中間処理	中継	最終処分場
ベースライン	未処理	中継基地	オープンダンピング・覆土
シナリオ 1	資源分別	中継基地	オープンダンピング・覆土
シナリオ 2	焼却	中継基地	オープンダンピング・覆土
シナリオ 3	未処理	中継基地	オープンダンピング・覆土、メタン利用施設
シナリオ 4	資源分別	中継基地	オープンダンピング・覆土、メタン利用施設
シナリオ 5	焼却	中継基地	オープンダンピング・覆土、メタン利用施設

表-4 タイ王国における価格原単位

項目	単位	記号	価格原単位(円)	参考
電力	円/kWh	X ₁	20	都市ゴミ処理システムの分析・計画・評価 ⁹⁾
重油	円/L	X ₂	34	同上
軽油	円/L	X ₃	96	Changes in Bangkok Retail Oil Prices
人件費	円/人・年	X ₄	720,000	タイにおける廃棄物メタン利用事業に関するプロジェクト設計書作成調査 ⁹⁾
重機および車両整備補修費	円/台	X ₅	1,000,000	都市ゴミ処理システムの分析・計画・評価 ⁹⁾
重機購入費	円/台	X ₆	32,000,000	同上
収集車購入費	円/台	X ₇	600,000	同上
運搬車購入費	円/台	X ₈	10,000,000	同上
焼却施設基準建設費	円/10t-日廃棄物	X ₉	500,000,000	同上
資源分別施設基準建設費	円/10t-日廃棄物	X ₁₀	200,000,000	同上
中継基地施設基準建設費	円/10t-日廃棄物	X ₁₁	10,000,000	同上
メタン利用施設基準建設費	円/10t-日廃棄物	X ₁₂	3,170,000	タイにおける廃棄物メタン利用事業に関するプロジェクト設計書作成調査 ⁹⁾
埋立処分地基準建設費	円/10000m ² -処分地面積	X ₁₃	200,000,000	都市ゴミ処理システムの分析・計画・評価 ⁹⁾

(表-4 参照)。

CO₂ 排出量を定量的に推定するためには、CO₂ 排出量原単位を用いる。すなわち、CO₂ 排出量は電力、軽油、および重油の使用量に CO₂ 排出量原単位を乗ずることによって推定できる。これらには積上げ法と産業連関分析法の 2 種類の推定方法¹⁰⁾がある。積上げ法は各々要素の製造から資源採取まで遡って設定しなければならず、作業量が膨大になる。そこで、本研究では産業連関分析によって推定された値を用いる。すなわち、「温室効果ガスの排出・吸収に関する国家目録作成のための IPCC ガイドライン (IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change、1996 年改定)」¹¹⁾では、エネルギー原料に対して使用用途に基づく排出係数のデフォルト値を定めている。排出係数のデフォルト値を基に、産業界の生産活動に伴う取引金額をまとめた産業連関表を分析することで CO₂ 排出量原単位が求められる。本研究ではタイ王国の産業連関表から推測した値を用いる。森泉ら¹²⁾は、タイ王国の産業連関表とエネルギーバランス表を用いて CO₂ 排出量原単位を推計している(表-5 参照)。

(2) 各種原単位の設定

廃棄物処理コストならびに環境負荷を定量的に推定するために用いる最も重要な要素として、原単位が挙げられる。価格原単位とは材料や製品、および土木建築工事等の単位量に対して必要な価格である。

廃棄物処理コストを定量的に推定するためには、価格原単位を用いる。価格原単位は地域毎に値が異なるため、適用地域によって調査する必要がある。本研究では、文献⁹⁾に記載された種々の現場調査ならびに施設担当者へのヒアリングから得られた各種原単位の推奨値を用いて各処理コストを推定する

(3) 処理コストおよび環境負荷の設定

表-6 に各過程において推定する処理コストを示す。処理コストは、施設建設コストや埋立地建設コスト等のイニシャルコストと人件コストや燃料コスト等のランニングコストに分けられる。イニシャルコストは評価開始年、耐用年後、および最終処分場が飽和した年に計上される。ランニングコストは、評価期間中に常に計上されるものである。

環境負荷として廃棄物処理における CO₂ 排出量と CH₄ 排出量を定量的に推定する。廃棄物の処理フロー中には様々な場面で CO₂ が排出される。そのため、CO₂ の影響領域を考える必要がある。廃棄物の収集から埋立までの活動で直接的および間接的な CO₂ 排出が考えられる。例えば、直接的な CO₂ 排出とは電力使用に伴う CO₂ 排出である。このような各過程において排出する CO₂ を表-7 に示す。

最終処分場から排出する CH₄ は、中間処理を行わない場合には膨大な量である。CH₄ 排出量の推定は非常に重要である。一般的な手法として IPCC ガイドライン¹¹⁾ に示されている手法がある。最終処分場からの CH₄ 排出量 G_{MG} (t/年) は、式-2 で定量的に推定される。なお、廃棄物に含まれる C 原子は分解するのに時間を要するため、最終処分場においてのみ CH₄ が排出するものとする。

$$G_{MG} = R_{\chi} \times MCF \times DOC \times DOC_F \times F_{MG} \times \frac{16}{12} \quad \text{式-2}$$

ここで R_{χ} : 廃棄物投棄量 (t/年)、 MCF : CH₄ 補正係数 (管理方法によって決定される係数であり、一般的な値である 1 とした)、 DOC : 分解性有機炭素、 DOC_F : 不同 DOC 係数 (最終処分場内の温度 T で表される関数で本研究では $T=35^{\circ}\text{C}$ のときの 0.77 としている)、 F_{MG} : 埋立地ガス中の CH₄ 体積分率 (0.5) である。また、 DOC は以下の式-3 で示される。

$$DOC = 0.4A + 0.17B + 0.15C + 0.3D \quad \text{式-3}$$

ここで A : 紙、布類の炭素成分比、 B : 食物以外の腐敗しやすい有機物の炭素成分比、 C : 食物の炭素成分比、 D : 植物の炭素成分比である。

本研究では CH₄ の回収を考慮するため、C 原子の分解期間を考慮しつつ 1 年毎に排出する CH₄ 排出量

表-5 タイ王国における CO₂ 排出量原単位

項目	記号	単位	価格原単位
電力	Y ₁	kg-CO ₂ /kWh	71.07
重油	Y ₂	kg-CO ₂ /L	3.08
軽油	Y ₃	kg-CO ₂ /L	2.70

表-6 各処理過程において推定するコスト

	赤字：処理費用、緑字：処理便益
収集・運搬過程	
収集・運搬	車両購入費 人件費、燃料費、車両整備補修費
中間処理過程	
焼却処理施設	施設建設費 人件費、燃料費、施設整備補修費
分別処理施設	施設建設費 人件費、電力費、燃料費、施設整備補修費 資源売却費
中継基地施設	施設建設費 人件費、電力費、施設整備補修費
最終処分過程	
メタン利用施設	施設建設費 人件費、施設整備補修費 売電費
埋立処分地	埋立地建設費、最終覆土費、重機購入費 人件費、電力費、施設整備補修費

表-7 各処理過程において推定する CO₂ 排出

収集・運搬過程	
収集・運搬	燃料使用に伴う CO ₂ 排出
中間処理過程	
焼却処理施設	廃棄物燃焼時の CO ₂ 排出、燃料使用に伴う CO ₂ 排出
資源分別施設	電力使用に伴う CO ₂ 排出、燃料使用に伴う CO ₂ 排出
中継基地施設	電力使用に伴う CO ₂ 排出
最終処分場	
メタン利用施設	電力使用に伴う CO ₂ 排出
埋立処分地	燃料使用に伴う CO ₂ 排出

を定量的に推定する必要がある。IPCC ガイドラインには一次減衰モデルを使用するが、実際は C 原子の分解に時間を要する。そこで、Sheldon Arleta モデル¹³⁾ を用いる。このモデルは、下水汚泥の嫌気性消化実験の結果に基づいて考えられたもので、無次元化した時間とガス量の関係がガス化曲線と与えられている。全分解期間の 35% の時点でガス排出量が最大且つ半減期としている。また、廃棄物からの CH₄ 排出量の半減期と分解期間に基づいて CH₄ 生成速度が設定され、その速度を積分することにより、各年度の分解率を算定できる。

CH₄ 排出量の半減期と分解期間は、各廃棄物について表-8 のように設定されている。これより、木く

ずの C 原子は CH₄ となるまでかなりの年月を要する。なお、CH₄ 利用施設では CH₄ を全量回収することは難しいため、推定した値の 50%を回収できるものとした。

CH₄ は同重量の CO₂ と比較して温暖化に対する効果が 21 倍であるとされている。そこで、本研究では CH₄ : 1kg につき CO₂ : 21kg として、CO₂ 排出量に加えた等価 CO₂ 排出量で評価を行う。

(4) CO₂ 貨幣価値原単位の設定

環境負荷は実際に見える値でないため、どれほど環境に配慮した技術であっても、コストが高額であれば途上国にとっては全く無意味な技術と言わざるを得ない。そこで、環境負荷に見える形にするため、CO₂ 貨幣価値原単位を用いる。CO₂ 貨幣価値原単位は、推定した等価 CO₂ 排出量に乗じることで貨幣換算することができる（本研究では環境コストと呼ぶ）。

CO₂ 貨幣価値原単位は 3 つの手法^{14), 15)} で推定される。各々の特徴とともに以下に示す。

①被害コストに基づく設定

環境の悪化による被害を、実際の被害額や支払意志額によって把握する方法である。政策動向の影響を受けにくく、外部要因に対しても比較的安定であり、且つ国際的な公平性にも配慮できる計測である。既往の研究により多くの推定事例が存在している。その中の 103 個の事例の内、中間値（446 円/t-CO₂）と平均値（2,967 円/t-CO₂）がかけ離れている、すなわち、推定された値にはかなりばらつきがある。

②対策コストに基づく設定

環境を維持および向上するための対策コストによって、環境の価値を把握する方法である。削減目標および削減手法の設定によって数値に幅が生じている。さらに京都議定書以降の各国の目標設定に原単位が大きく依存する可能性があり、技術革新によっても対策コストは変化するため、中長期的に外部要因の影響を受けやすい。こちらも既往の研究により多くの推定事例が存在しており、少し高めの設定となる傾向がある。

③排出権取引価格に基づく設定

排出権取引市場における取引価格を評価値とする方法である。市場の成熟度に大きく依存するが、現時点では市場が成熟しているとは言えないと多くの

表-8 廃棄物に関する半減期と C 原子分解時間

廃棄物の種類	半減期	分解期間
食物くず	3年	10年
紙・繊維くず	7年	21年
木くず	36年	103年

組織が指摘している。既往の研究もあまり多くは扱われていない。

平成 19 年に設置された「公共事業評価手法に関する検討会」において検討されてきた結果 10,600（円/t-C）とすることが提案された。本研究においては、その値を CO₂ に換算した CO₂ 原単位 2,890（円/t-CO₂）を用いる。

4. バンコク首都圏における廃棄物処理事業の初期環境評価

(1) 各シナリオにおける処理コスト

図-4 および図-5 は、処理コストの累積および過程別の内訳を示している。なお、将来の処理コストは社会的割引率を用いて現在価値として統一している。これより、処理コストは約 1、100～1、700 億円である。また、処理コストの累積推移からイニシャルコストの影響が顕著に大きい。特に、焼却処理施設の建設を想定したシナリオ 2 および 5 におけるイニシャルコストが処理コスト全体に対して高額である。これは焼却処理施設の建設コストが非常に高額であること、評価期間の後半で高額なコストを要する新たな最終処分場建設コストが社会的割引率によって現在価値として低く評価されることが原因である。また、処理コストの過程別内訳から焼却処理施設の結節を想定したシナリオ 2 および 5 においては、中間処理過程における処理コストの割合が最も大きい。他のシナリオにおいては最終処分過程における割合が大きいことから、焼却処理施設ならびに新規最終処分場の建設コストが相対的に高額であることが伺える。

ここで、開発途上国では上記結果を参考にし、最も処理コストが低額なベースラインシナリオを最適シナリオとして選択する可能性が高い。これは、廃棄物運搬のために運搬車から排出する CO₂ 排出や最終処分場において排出する CH₄ 等、実際に見えないものについては、開発途上国において考慮されるこ

とが少ないためである。そこで、次節では環境影響を定量的に評価し、シナリオ間で比較・検討を実施する。

(2) 各シナリオにおける環境コスト

CH₄ は分解に時間が必要なため、最終処分場から排出される量を考慮している。図-6 は、ベースラインにおける各年に埋め立てられた廃棄物からの CH₄ 排出量推移を 5 年分示したものである。例えば、濃青色は、2010 年に埋め立てられた廃棄物から CH₄ 排出量の推移を表している。また、山が 2 つ形成している要因は、食物類の半減期（3 年）と紙類および繊維類の半減期（7 年）の相違に起因している。バンコク首都圏では食物類の割合が紙類および繊維類の割合に比べ大きいいため、山が大きくなっている。さらに、廃棄物埋立量が年々減少しているため、CH₄ 排出量も同様に減少していることが山の大きさからも推測できる。

図-7 は、各シナリオにおける累積等価 CO₂ 排出量を示している。最終処分場から排出される CO₂ 量は、ベースラインにおいて 20 年で約 1,730 万 t であり、他の処理過程と比較しても大量に排出されているが、それ以上に CH₄ 排出量の影響が大きい。すなわち、バンコク首都圏における廃棄物処理事業の中で、最終処分場からの CH₄ 排出量は地球温暖化に大きな影響を与えている。なお、社会全体における影響を表す等価 CO₂ 排出量に関しては、社会的割引率を適用していない。

バンコク首都圏における環境コストの累積を図-8 に示す。累積環境コストは 20 年間で約 1,100～2,400 億円であり、累積処理コストと比較してもオーダーレベルで差はなく、いずれに対しても削減すべきコストであると考えられる。ベースラインシナリオでは環境コストが最も高額であり、一方、シナリオ 5 が最も低額である。CH₄ は分解に時間を要するため、初年度はいずれのシナリオにおいても全体的に環境コストが低額であるものの、焼却処理施設の建設を想定したシナリオ以外は時間経過とともに環境コストが大幅に増加する。シナリオ 2 および 5 における環境コストに顕著な差異がない原因は、廃棄物を焼却することによって、最終処分場で CH₄ に変換される C 原子の大部分が CO₂ に変換されるためである。

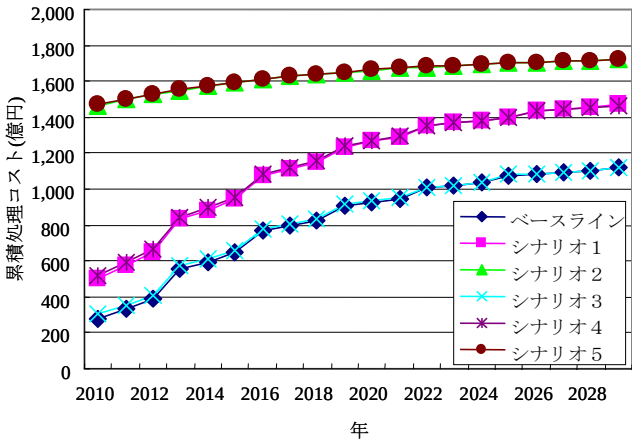


図-4 各処理シナリオにおける累積処理コスト

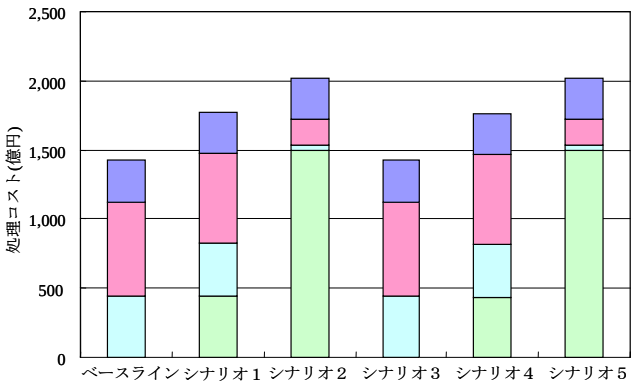


図-5 各処理シナリオにおける処理コストの処理過程別内訳

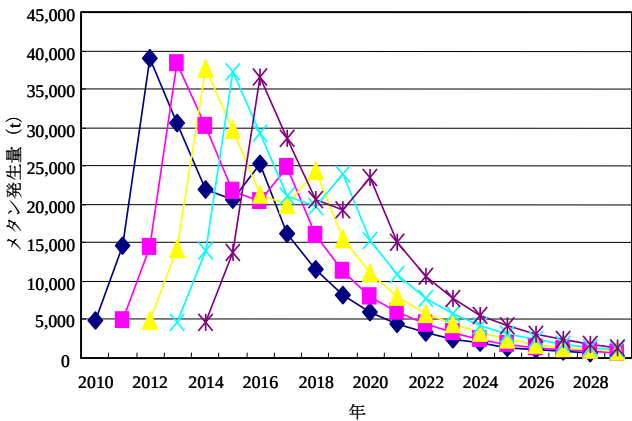


図-6 各年に埋め立てられた廃棄物からの CH₄ 排出量推移（5 年分）

一方、ベースラインシナリオとシナリオ 1 では、最終処分場における CH₄ 排出量が環境負荷の大部分を占めているため、シナリオ 3 と 4 において CH₄ を CO₂ に変換することで環境コストが約 6 割に抑えら

れる。また、環境コストには社会的割引率を設定していないため、いずれのシナリオにおいても評価期間を通じて増加し続けている。

(3) 環境影響に対するシナリオ間比較

トータルコストは、処理コストと環境コストを足し合わせたコストとして定義する。なお、トータルコストを最も抑制できるシナリオは、経済面にも環境面にも優れていると判断できる。

バンコク首都圏におけるトータルコストの累積を図-9に示す。トータルコストが最も低額なシナリオはシナリオ3であり、約2,700億円であった。逆に、トータルコストが最も高額なシナリオはベースラインシナリオであり、約3,600億円であった。すなわち、バンコク首都圏において現状採用されているベースラインシナリオは、処理コストが低額であるものの、環境影響を含めて考えると効率的ではないと考えられる。一方、イニシャルコストが低額なベースラインシナリオならびにシナリオ1のトータルコストは、評価開始から13年目でイニシャルコストが高額であるシナリオ2および5のトータルコストを超過する。すなわち、イニシャルコストが高額であっても環境負荷の小さい廃棄物処理技術は、トータルコストを抑制することができる可能性を示した。

さらに、環境影響を含めた評価方法として環境影響指標 E_F を用いる。環境影響指標 E_F はベースライン以外のシナリオに適用可能な指標であり、以下の式-4で推定される。

$$E_F = \frac{\Delta C_E}{\Delta C_D} \quad \text{式-4}$$

ここで、 ΔC_E ：ベースラインシナリオにおける環境コストと評価するシナリオにおける環境コストの差の絶対値、 ΔC_D ：ベースラインシナリオにおける処理コストと評価するシナリオにおける処理コストの差の絶対値である。一般的には ΔC_E が大きく、且つ ΔC_D が小さければ、低額の投資コストで環境を改善できているため効率的であり、すなわち、環境影響指標 E_F が大きければ環境効率的であると判断できる。

バンコク首都圏における環境影響指標 E_F を環境コスト差および処理コスト差とともに表-9に示す。これより、シナリオ3における環境コスト差は他のシ

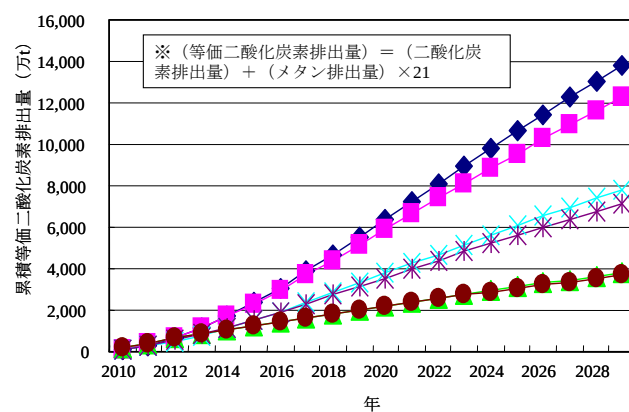


図-7 各処理シナリオにおける累積等価 CO₂ 排出量

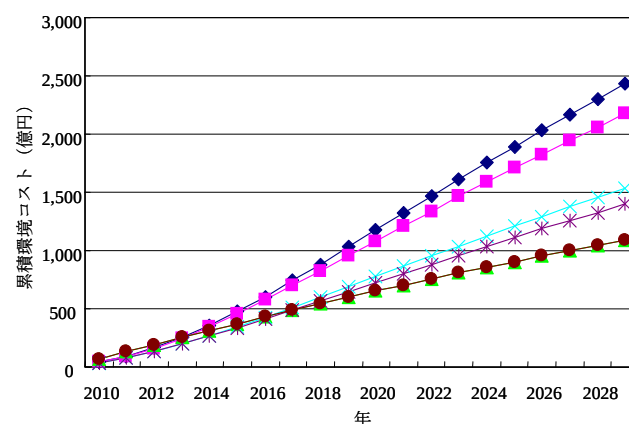


図-8 各処理シナリオにおける累積環境コスト

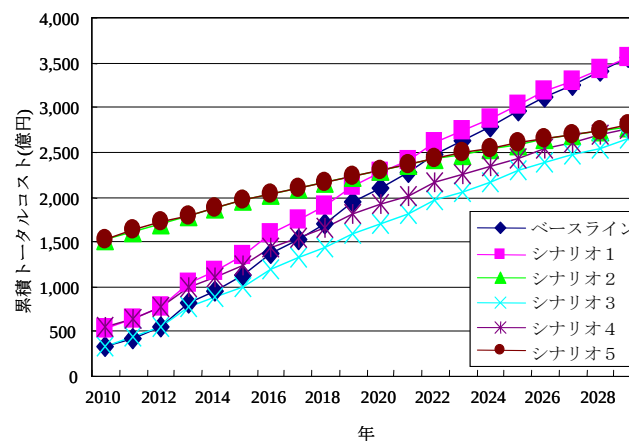


図-9 各処理シナリオにおけるトータルコスト

ナリオと比較して大きくないが、処理コスト差が小さいため、結果、環境影響指標 E_F が大きくなっている。これは、シナリオ3における売電収入と安価な施設建設コストのためである。よって、トータルコストおよび環境影響指標 E_F の両方において、バンコク首都圏ではシナリオ3が最も環境効率的であるこ

とが考えられる。

(4) 初期環境評価における不確実性要素の検証

a) 廃棄物発生量の不確実性

前節までは、対数回帰式に基づく廃棄物発生量予測をインプット値として採用している。本項では、幾何ブラウン運動に基づく複数の廃棄物発生量予測をインプット値として採用する。幾何ブラウン運動においてトレンド μ とボラティリティ σ は、過去の傾向から推定される。バンコク首都圏の廃棄物発生量が2004～2009年まで既知であるため、当該6年間の平均と分散を求め、100通りの廃棄物発生量推移を定量的に推定する（図-10 参照）。さらに、当該廃棄物発生量推移をインプットとし、各シナリオにおける評価期間20年の処理コストおよび環境コストを定量的に推定する。図-11は、ベースラインシナリオにおける処理コストにおける頻度分布である。処理コストは約1,000～1,250億円のばらつきがある。図-12は、ベースラインシナリオにおける環境コストの頻度分布である。環境コストは約3,850～4,200億円のばらつきである。よって、廃棄物発生量の不確実性は、いずれのコストに対して大きな影響を与える。

b) CO₂ 貨幣価値原単位の不確実性

本項では、2章で述べたCDM事業において取り引きされるCertified Emission Reductions (CER) 価格の推移に着目する。CERは2005～2009年の間、約5～21ユーロ¹²⁾で取り引きされている。そこで、ユーロならびに円相場の変動も考慮し、CO₂ 貨幣価値原単位を600～3,000円/t-CO₂に設定した上、各シナリオにおける環境コストを推定する。その結果の一例を図-13に示す。これより、CO₂ 排出量にCO₂ 貨幣価値原単位を乗じて求められる環境コストは、CO₂ 貨幣価値原単位に比例して増加する。ベースラインシナリオでは環境コストが830～4,140億円となり、廃棄物発生量の不確実性に伴う環境コスト（図-12 参照）よりも大きなばらつきが確認できる。すなわち、CO₂ 貨幣価値原単位は、廃棄物発生量以上に環境コストに影響を与える。

c) 評価期間の不確実性

図-9ではイニシャルコストが高額なシナリオ2および5が、ランニングコストおよび新規最終処分場の建設コスト等が高額なその他のシナリオより、年

表-9 各処理シナリオにおける環境影響指標

	ベースラインとの環境コスト差(百万円)	ベースラインとの処理コスト差(百万円)	環境影響指標
ベースライン	0	0	
シナリオ1	25,982	35,032	0.74
シナリオ2	134,640	59,544	2.26
シナリオ3	90,202	178	508
シナリオ4	103,699	34,037	3.04
シナリオ5	134,645	59,606	2.26

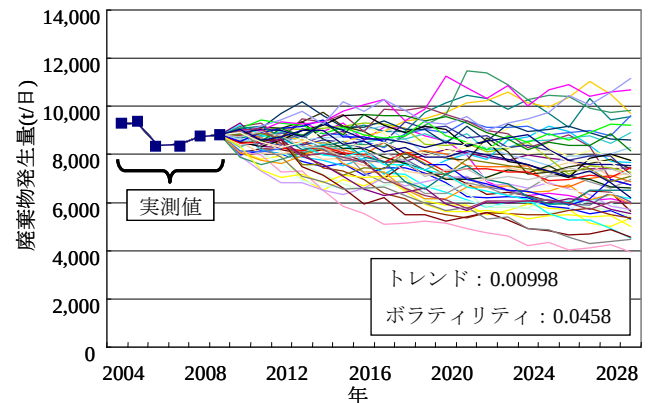


図-10 幾何ブラウン運動に基づく廃棄物量予測

経過に伴いトータルコストが抑制される可能性を表している。そこで、初期環境評価の期間が非常に重要である。一般的に社会基盤構造物の耐用年数は、40～50年であるとも言われている。そこで、廃棄物処理事業の耐用年数を50年まで延長した場合における初期環境評価を実施する。なお、評価期間20年以降は1人当たりの廃棄物発生量を1kg/人・日に設定し、人口は対数回帰式を適用した。また、廃棄物組成は評価期間20年と同様で変化しないとした。その結果を図-14に示す。50年で最もトータルコストが低額なシナリオはシナリオ2であり、また、最も高額なシナリオはシナリオ1であった。シナリオ2および5は環境コストが低額に抑えられるため、トータルコストが低額となる。すなわち、評価期間が長ければ有利である。シナリオ1はリサイクル可能な有価物が少なく、CH₄ 排出源の内、多くを占める食物くずを減少できないため、環境コストもベースラインシナリオと大差なく、施設の建設コストや整備補修コストが必要なため、ベースラインシナリオよりトータルコストが高額の結果となる。評価期間20年で最もトータルコストが低額であったシナリオ3は、2034年（19年目）においてシナリオ2に逆転される。

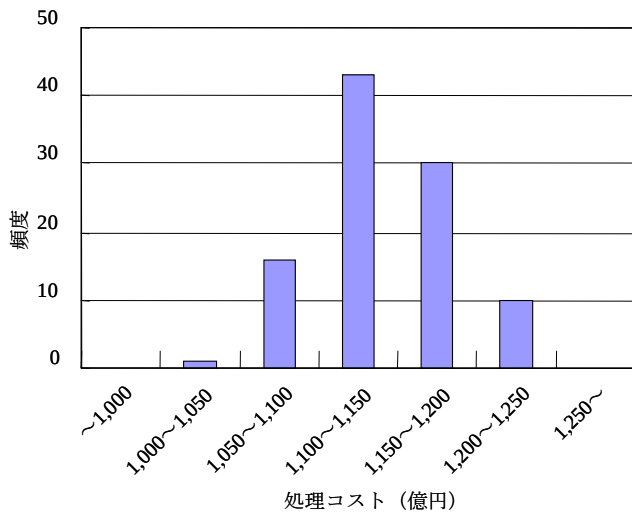


図-12 処理コストの頻度分布

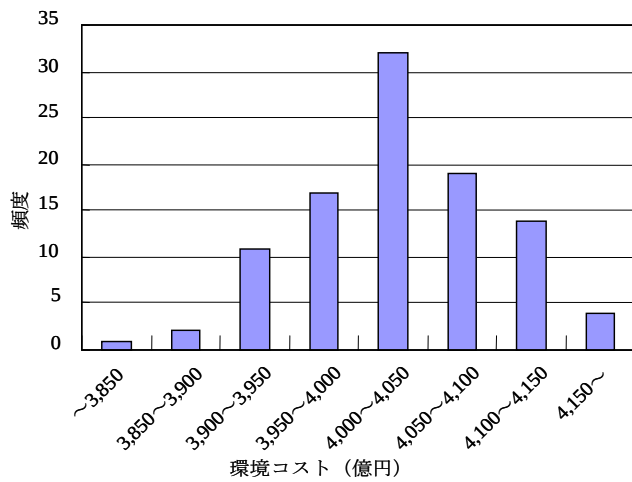


図-12 環境コストの頻度分布

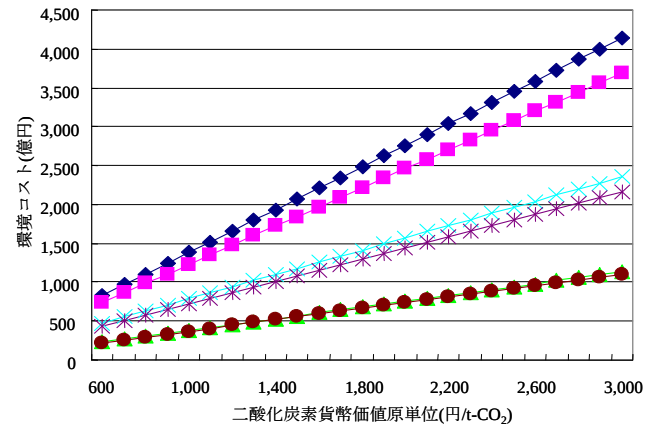


図-13 各処理シナリオの環境コストに対する CO₂ 貨幣価値原単位の感度

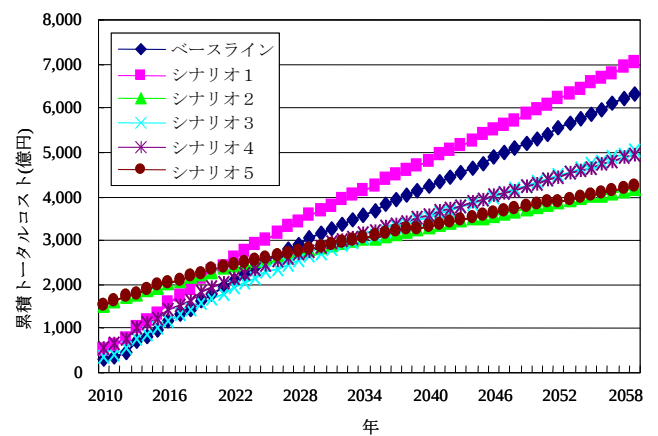


図-14 各処理シナリオにおける累積トータルコスト（評価期間：50 年）

すなわち、評価期間も初期環境評価に大きく影響を与える。

5. おわりに

本研究では、タイ王国バンコク首都圏における廃棄物処理事業に対して初期環境評価を実施した。具体的には、設定した各廃棄物処理シナリオにおける長期的な処理コストおよび環境負荷（CO₂ および CH₄ 排出量）を定量的に推定した。さらに、CO₂ 貨幣価値原単位を用いて、環境負荷を環境コストとして内部化した。

得られた成果は以下のとおりである。

- 1) 処理コストは現状（ベースラインシナリオ）が最も低額であり、且つ焼却処理施設と CH₄ 利用施設を建設したシナリオが最も高額である。一

方、環境負荷は焼却処理施設と CH₄ 利用施設を建設したシナリオが最も小さく、ベースラインシナリオが最も大きい。

- 2) 処理コストは、シナリオ 2 および 5 において焼却処理施設の建設コストが高額なため中間処理過程の割合が高く、その他のシナリオでは新規の最終処分場建設コストが高いため最終処分過程の割合が高い。
- 3) 環境負荷は、焼却処理を行うシナリオにおいて廃棄物を焼却した際に排出する CO₂ 排出量が多い。一方、焼却処理を行わないシナリオでは、大部分が最終処分場に埋め立てられた廃棄物から排出する CO₂ および CH₄ で占められている。
- 4) バンコク首都圏においては、CH₄ 利用施設を建設するシナリオがトータルコストならびに環境影響指標の観点から、処理コストと環境負荷の

双方に対して環境効率的である。

- 5) 廃棄物発生量、CO₂ 貨幣価値原単位、および評価期間における不確実性は、廃棄物処理事業における処理コストならびに環境コストの推定に大きな影響を及ぼす。

廃棄物処理事業が確立されていない開発途上国に事業援助を実施する際、我が国では現状、最終処分場を対象とした CDM あるいは ODA 事業を行い、CH₄ 利用施設を建設する試みがなされている⁵⁾。一方、京都議定書の第 1 約束期間以降の CER 活用が保障されていないため、長期に渡って CO₂ 排出量が削減される巨大プロジェクトは避けられる傾向にある。しかしながら、CER が長期に活用できる場合、廃棄物処理事業を始め多くの巨大プロジェクトは CDM 事業として認定される可能性がある。この場合、本研究において明らかにした長期間においてトータルコストが最も低額であった焼却処理施設建設の廃棄物処理シナリオが注目される可能性がある。

謝 辞

本研究は、京都大学グローバル COE プログラム「アジア・メガシティの人間安全保障工学拠点」の一環として援助を受け、実施したものである。ここに記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 国際協力銀行：排出権市場動向レポート 2010，国際協力銀行，2010。
- 2) 日本貿易振興機構：アジア各国における産業廃棄物・リサイクル政策情報提供事業報告書，日本貿易振興機構，2007。
- 3) Muttamara, S. and Leong, S.T.: The evolution of solid waste management in Bangkok, Thammasat Int. J. Sc. Tech., Vol.9, No.1, 2004.
- 4) Ministry of Science, Technology and Environment, Bangkok: Thailand's Initial National Communication

under the United Nations Framework Convention on Climate Change, 2000.

- 5) 大林組，日立造船：平成 16 年度 CDM/JI 事業調査，タイにおける廃棄物メタン利用事業に関するプロジェクト設計書作成調査報告書，2005.
- 6) Pollution Control Department (PCD), Ministry of Natural Resources and Environment: Thailand State of Pollution Report 2005, Ministry of Natural Resources and Environment, 2005.
- 7) 佐々木創：バンコクにおける一般廃棄物管理の現状と課題－レジーム・アクター分析を応用して－，タイ研究，第 4 号，pp.21-39，2004.
- 8) 稲積真哉，大津宏康，塩谷智基，勝見 武，石川憲俊：バンコク首都圏の廃棄物処理に関する環境影響評価・環境会計に基づく環境経済評価，土木学会論文集 F4（建設マネジメント）特集号，Vol.66, No.1, pp.1-12，2010.
- 9) 松藤敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価，技報堂出版，2005.
- 10) 国立環境研究所：日本国温室効果ガスインベントリ報告書，国立環境研究所，2008.
- 11) Intergovernmental Panel on Climate Change: Revised 1996 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, NGGIP Publications, 1997.
- 12) 森泉由恵，本藤祐樹：タイの産業連関表を用いた CO₂ 原単位の推計，エネルギー・資源，Vol.29, No.4, pp1-7，2008.
- 13) 環境省地球環境局：事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン，環境省，pp.2-47，2003.
- 14) 環境省：温室効果ガス排出量算定方法検討会－廃棄物分科会－報告書，環境省，2002.
- 15) Tol, R.S.J.: The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties, Energy Policy, Vol.33, pp.2064-2074, 2005.

Initial Environmental Examination on Waste Management in the Kingdom of Thailand

By Shinya INAZUMI, Hiroyasu OHTSU and Yuki TANIZAWA

In this paper, the long-term environmental impact on a waste treatment project in developing countries was evaluated, and several waste treatment scenarios were compared to discover which waste treatment would be more effective, both economically and environmentally, in the intermediate treatment and the final treatment process. Specifically, we evaluated the environmental impact for a waste treatment project in the Bangkok Metropolitan area in Thailand, and estimated the long-term treatment cost and environmental load (CO_2 and CH_4 emissions) quantitatively regarding assumed waste treatment scenarios. And by utilizing the monetary value of CO_2 emissions intensity, we incorporated the environmental load as an environmental cost. As a result, as for the treatment cost, the baseline scenario modeling the current waste treatment project was found to be the least expensive, while the scenario constructing incineration plants and facilities with CH_4 was found to be the most expensive. As for the environmental load, on the other hand, the scenario constructing incineration plants and facilities with CH_4 was found to have the least load, while the baseline scenario was found to have the most loads. Also, in the Bangkok Metropolitan area, the scenario constructing facilities with CH_4 was found to be effective in both treatment cost and environmental load from the viewpoints of total cost and the environmental impact index. Furthermore, it was found that uncertainties regarding the amount of waste, monetary value of CO_2 emissions intensity, and the evaluation period greatly influenced the estimation of the treatment and environmental cost in the waste treatment project.