

アジア諸国の廃棄物埋立地におけるCDM事業に資する温室効果ガス排出削減量予測および排出削減対策の評価に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

循環型社会・廃棄物研究センター

資源化・処理処分技術研究室

循環技術システム室

(研究委託先)

龍谷大学理工学部 環境ソリューション工学科

井上雄三

山田正人・遠藤和人

大迫政浩・李淑熙

石垣智基

平成16～18年度合計予算額	33,750千円
(うち、平成18年度当初予算額	10,125千円)

[要旨]

我が国における排出削減目標達成とアジア途上国における持続可能な廃棄物処理システムの構築の双方を満たすCDM事業に必要な一連の手法を示した。アジアの廃棄物ストリームでは、廃棄物の野積みや野焼きが未だ主流であり、収集率の向上を基本として有機性廃棄物の資源化と埋立地の設置と改善が課題である。ベトナムの都市を事例に、埋立地に向かう有機性廃棄物量の推計には、ストリーム毎の廃棄物の組成を求めることが重要であることを示した。東南アジアに適用可能な新しい排出量削減技術として、木くず混入覆土材によるメタン酸化技術を開発し、含水率や透気係数等の土壌物性の制御が重要であることを明らかにした。東南アジア地域の埋立地における廃棄物分解速度定数を、ガス放出量の観測や廃棄物の掘削試料で評価し、これらを用いて埋立地からのメタン放出量がより正確に予測可能であることを示した。埋立地表面におけるフラックスを計測する手法として、赤外線レーザーメタン検出器ーチャンバー法を開発し、 10^0 から 10^2 g-CH₄/m²/dayの範囲では従来法と等価であり、数～数十分間で即時にフラックスを評価可能な手法として有効であることを示した。廃棄物処理分野に対するCDM事業の環境に対する持続可能性の評価に、事業導入前後を比較する廃棄物ストリームをバウンダリとしたLCAが有用であることを示した。また、温室効果ガスの低減効果と他の環境影響にはトレードオフの関係があるため、温室効果ガス削減量が大きい技術導入が、必ずしも環境的な持続性の面で有利ではないことをアジア都市の事例より示した。

[キーワード] 廃棄物管理、クリーン開発メカニズム、埋立地、アジア、メタン

1. はじめに

我が国の2000年度の温室効果ガス総排出量は1990年の総排出量に対して8.0%の増加となっており、2008-2012年における削減目標(1990年比6%減)を国内対策のみで達成することはきわめて困難な状況になっている。そのため、クリーン開発メカニズム(CDM)や共同実施(JI)など京都メカニズムを活用する排出削減対策が、目標達成に向けて必要不可欠となっている。経済発展が著しい多くのアジア諸国において、有機物を含有する廃棄物が大量に埋立処分されてい

る現状を鑑みると、廃棄物埋立地におけるメタンの発生抑制や回収利用による排出量の削減は CDM 事業の対象として極めて有望である。一方で、埋立地からのメタン排出量の評価では、統計からの推計法、個別サイトにおける観測法ともに、特にデータの乏しい途上国において、得られた値の不確実性が問題視されており、精度向上と検証が求められている。様々な気候帯また社会条件下にある途上国に適合した国家排出目録や、個別サイトにおける排出量予測法が精緻化されなければ、CDM 事業の効果やベースラインの正当性の評価が困難となる。また、個別サイトにおけるモニタリング結果が不正確であれば、そこからの排出量はクレジットとして認定されない。埋立地メタン排出量の削減方法としては、分別収集した後、堆肥化・焼却などの処理を行い、有機性廃棄物の埋め立てを回避する方法、埋立地内部を好気状態で管理し、メタンの生成量を低減する方法、また、発生したメタンを回収利用または酸化分解させる方法が挙げられる。しかし、途上国において、埋立地の構造の変更、通気やメタン回収のための設備の設置には技術と経済が伴わず、発生源分別の徹底や中間処理施設の設置には社会的な困難さがあり、これら、我が国等、先進国の廃棄物管理で培われてきた手法をアジア諸国へ適用することは決して容易ではない。さらに、廃棄物分野における CDM 事業では、クレジットや収益だけでなく、未発達な廃棄物処理システムの改善によって、公衆衛生の向上や公害問題の解決等の根源的なメリットが得られるべきである。以上の課題を解決し、持続的な CDM 事業の立案と実施に向けた知見の集積を行うことは、我が国の国策である排出削減目標達成のため、早急に取り組むべき課題である。

2. 研究目的

本研究では、我が国における排出削減目標達成、ならびにアジア途上国における持続可能な廃棄物処理システムの構築の双方を見据えた CDM 事業の計画に必要な一連の手法の整備を目的とした。まず、国家および都市レベルでの廃棄物ストリームや埋立地の現状に関する基礎情報を収集し、ベトナムの都市を事例対象地域として、埋立地メタン排出量推計の方法論を提示した。次に、東南アジア地域で適用可能な埋立地メタン削減技術を開発するため、現地調達可能な材料を覆土材として利用し、メタン酸化を効率化する覆土工法と埋立地管理手法を提案した。また、ベトナムとタイの埋立地でメタン放出量や埋立廃棄物の性状を調べ、東南アジア地域の埋立地におけるメタン排出係数を得た。CDM 事業におけるベースライン設定と事後評価に必要な現地で継続的に実施可能なモニタリング手法として、埋立地メタンのレーザーメタン検出器－チャンバー法ならびにオープンパス・フーリエ変換赤外分光 (FTIR) を用いた全放出量計測手法の開発を行った。さらに、廃棄物処理分野における CDM 事業の温暖化を含めた環境影響を、適正処理の観点から総合的に評価する手法として、ライフサイクルアセスメント (LCA) の適用性を検討した。

3. 研究方法

(1) 国家レベルでの廃棄物埋立地からのメタン排出量推定法の提示

①アジアにおける廃棄物処理の現状

既存文献ならびに、ベトナム、韓国、中国、タイ、モンゴル、インドネシアの廃棄物管理専門家を招聘して開催したワークショップ (The 1st Workshop on Improvement of Solid Waste Management and Reduction of GHG in Asia, Yokohama, Kanagawa, Japan, 18-19 January 2007) にて、アジアにおける廃棄物管理体制、廃棄物ストリームならびに埋立地の状況に関する

情報を収集・整理した。

②ベトナムにおける廃棄物埋立量の推計

既存文献等により、ベトナムのハノイ市およびホーチミン市における廃棄物処理の発生量、排出量、ごみ質等の現状把握を行い、産業構造、排出インベントリー、物質収支フローの推計のための基礎データを整理した。ハノイ市においては市街区の収集形態が異なる3種類の収集ごみについて現地で組成調査を行った。また、都市環境公社等の関係事業者等にヒアリング調査等を実施し、廃棄物処理システムの改善等の可能性等について調べた。以上の情報を統合して、ハノイ市およびホーチミン市の廃棄物ストリームを示し、組成別の物質フローを作成して、埋立廃棄物の品目別埋立量の経年変化を推計した。

③埋立地覆土におけるメタン酸化技術の開発

メタン酸化反応を効率的に活用する覆土バイオフィルター層を提案するとともにその適正な維持管理手法を構築するため、実験用覆土カラムを用いてメタン酸化能を評価した。覆土カラムは、φ200 x 100 cm のアクリル製円筒状カラムであり、シリンジでガス試料を採取可能なポートを 10 cm ピッチで設置し、深度方向のガス濃度分布を測定可能とした。ガスは、マスフローコントローラによって流量調整を行い、メタン 60%と二酸化炭素 40%の混合ガスを、滅菌水を湛水したガス洗浄瓶にいったん通水し、ガスを湿潤させた上で、底部よりカラムへ導入した。また、覆土層下に空隙部分を設けて差圧計を設置し、覆土層下と大気圧間の差圧をモニタリングした。覆土材として豊浦標準珪砂（TK28b, 豊浦産業）を用い、東南アジア地域で利用可能な資材として農業系廃棄物を混合した。木屑は市販の動物用の木屑敷料を粉砕して用いた。稲藁・粃殻はそれぞれ滋賀県産のコシヒカリの稲藁、滋賀県産の赤米（五穀米）の粃殻を用いた。混入する時は標準砂とサンプルを体積比 95:5 の割合で混合した。覆土材の透気係数は、土壤通気性測定器（DIK-5001, 大起理化工業）を用いて測定した。また、覆土材の真比重は、土壤物理環境測定法に基づいて測定し、見かけ比重の結果と併せて、間隙率を算出した。

覆土カラム上部は通常開放系であるが、一定期間毎に上部（地表面相当）からのメタンおよび二酸化炭素の放出量を測定し、流入量との差から覆土層におけるメタン酸化率を算出した。放出量の測定は、カラム上部にアクリル製平板を設置し、カラム上部の空間内のガス成分濃度を経時的に評価した、ガス成分濃度の変化からガスフラックスを算出した。メタンおよび二酸化炭素濃度の分析は、ガスクロマトグラフ（GC-14B, 島津製作所製）を用いて行った。検出器は熱伝導率検出器（TCD）である。分離カラムは Molecular Sieve 5A、ならびにキャリアガスには窒素を用い、注入口および検出器の温度は 120℃、カラム温度は 70℃の条件を用いた。

表 1 pmoA 増幅用プライマー

プライマー	塩基配列
pmoA189	GGNGACTGGGACTTCTGG
pmoA682	GAASGCNGAGAAGAASGC

覆土内に生息するメタン酸化細菌の計数を遺伝子型による方法（MPN-PCR 法）で行った。メタン酸化細菌の保有する pMMO をコードする遺伝子として pmoA を対象として、pmoA に特異

的なプライマーペア（表 1）を用い、熱偏性 95℃（1 分）、アニーリング 54℃（1 分）、伸長 72℃（2 分）を 35 サイクルの条件で行った。PCR 増幅断片は、1.5%アガロースゲル電気泳動後、エチジウムブロマイド染色により確認した。得られた pmoA のコピー数を以って、メタン酸化細菌の存在量を推定した。

（２）埋立地におけるメタン排出量計測手法の高度化

①メタン放出量の観測

2004年度はベトナム・ハノイ市のNam SonおよびTay Mo廃棄物埋立地、2005年度はベトナム・ホーチミン市のGo CatおよびPhouc Hiep埋立地、ならびに2005年度と2006年度にはタイのHua Hin 衛生埋立地におけるメタン放出量調査を実施した。

ハノイにおける埋立廃棄物は、ハノイ市都市環境公社（URENCO）の収集する一般都市廃棄物、道路清掃ごみ、産業廃棄物等であり、大部分を生活系廃棄物が占めている。Tay Mo埋立地はハノイ市中心部から10km程離れた地区に位置しており、公式記録では1998年に埋め立てを終了しているが、聞き取り調査では、その後2000年頃まで廃棄物の投棄が続いていた。Nam Son埋立地は後を引き継ぐものであり、ハノイ市中心部からは60km程離れた郊外に位置している。Nam Son埋立地の建設・埋立計画はフェーズ1および2に分割されており、フェーズ1は2001年に埋め立てが終了し、埋立面積は13haである。一方、フェーズ2は埋め立てと建設が並行して行われている。うちセル4についてはすでに埋立てが完了（50ha）しており、調査時にはセル5が埋め立てられていた。

ホーチミン市において、現在廃棄物が搬入されている埋立地は、Go Cat、 Phouc Hiepの二か所であり、ほぼ等量ずつ搬入されていた。Go Cat埋立地は現在25 haの敷地面積を有しているが、ほぼ満杯になりつつあるため、100万 m³の容量追加を計画している。中間覆土および最終覆土の厚さは約50 cmであるが、表面にシートを敷設しメタンガス回収および発電を実施していた。平均ガス回収量は400 m³/日、メタン濃度は55 %で運転されており、3520 kg/日（147 kg/日）のメタンが回収されていると推算された。

タイのHua Hin埋立地は4.4 haの敷地面積を有しており、1996年より廃棄物の搬入が開始され、調査時に埋立中であった。2005年末までの埋立量は166,101 tonである。埋立地は四区画に分割されており、Aゾーンは1996年から2001年まで埋め立てられていた。Bゾーンはその後供用が開始され、調査時に埋立中の区画である。なお、CおよびDゾーンは埋立前の区画である。

地表面におけるメタン放出地点を、レーザーガス検知器（LMD）（SA3C15A, アンリツ(株)）を用いて事前スクリーニングし、メタン放出候補地点として、閉鎖型チャンバー法により各ポイントの地表面メタンフラックスを測定した。半開放型のチャンバーを地表面に設置後、一定時間後にチャンバー内に貯まったガスを採取し、メタン濃度変化から地表面におけるメタンフラックスを評価した。

②LMDを用いた現場対応型閉鎖式チャンバー法の開発

静置式チャンバー法において、チャンバー（PVC 製、

表 2 ノンタブリ廃棄物組成

	Weight (%)
paper	7.03
plastic	17.24
glass	2.23
metal	0.73
non metal	0.78
organic	0.38
pot. Haz.	0
food	64.35
C&D non-wood	0
C&D wood	1.57
Textiles	1.72
others	3.97

φ200 mm × 1 m) 内のガス濃度の上昇を LMD により現場で測定した。我が国の産業廃棄物最終処分場およびタイ国の都市ごみ最終処分場において地表面にチャンバーを設置し、チャンバーの上部の蓋に開けた窓よりレーザー光を照射、地面に置いた振動板または反射板をターゲットとして、チャンバー内のメタン濃度の経時変化を計測し、地表面メタンフラックスを求めた。同地点で常法、すなわち、一定時間毎にチャンバー内のガスを採取し、実験室で GC 法にてメタン濃度を計測する従来法と比較した。なお、両者の計測時間は 1 地点当たり 5~15 分間である。

③廃棄物分解速度係数の評価

日本の埋立地からの温室効果ガス排出量算定に用いられていた Sheldon Arleta モデルでメタン排出量算定手法に係るパラメータ評価を実施した。Sheldon Arleta モデルとは、下水汚泥の嫌気性消化実験に基づいて考えられたモデルであり、全分解期間の 35%の時点でガス発生量が最大になると仮定するとともに、この時点を通り過ぎる半値時と定め、実際の埋立地からのメタン発生量の推定に適用したものである¹⁾。Los Angeles 郊外の Sheldon Arleta 埋立地においては、埋立廃棄物を易分解性（厨芥・草類）および中分解性（紙・繊維）に分類し、それぞれの分解に係る半値時を 9 年および 36 年と設定している¹⁾。また、我が国の排出量算定に当たっては、各地の調査事例を参考に食物くず、紙・繊維類および木くずについて、それぞれの半値時を 3 年、7 年、および 21 年と設定している²⁾。半値時は、気象条件、埋立地の管理状態、埋立廃棄物の性状等に応じて変化するものであり、東南アジア途上国の埋立地からの排出量算定に際しては、現地の状況に適合した半値時の設定が必要である。タイの Nakon Prathom 埋立地で埋立物をボーリング掘削により採取し、組成を調べた。埋立前の廃棄物組成は Nakon Prathom 埋立地の位置する Nontaburi 県での調査結果（表 2）を用いた。全量中の DOC 分率は、厨芥類 0.17、紙・繊維類 0.4、木類 0.3 とした。求められた DOC について排出量は以下の式³⁾で求めた。

$$E = MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times 16/12 \quad (a)$$

ここで、MCF（嫌気性分解係数）=1.0、DOC（分解性有機炭素量）、DOC_F（異化 DOC 係数）=0.5、F（メタン分率）=0.5、である。

④埋立地からの全メタンフラックス計測手法の開発

日本国内の有機性廃棄物が多量に埋め立てられた一般廃棄物最終処分場において現地観測を行った。メタン濃度をオープンパス FTIR (IMx Monostatic System, Unisearch Associate Inc.) で、鉛直方向の風速を三次元超音波風向風速計 (SAT-540, (株)カイジョーソニック製) を用いて測定した。約 130 m × 60 m の範囲を測定領域とした。測定領域を横切る 1 測線において測線長の平均メタン濃度および鉛直方向の風速の 24 時間連続計測を実施した（図 1）。

測定領域の地上 1.5m 面に存在するメタンの上方への移送量を、次式に従ってメタンフラックスに変換した。また、リファレンスのため、測定領域において閉鎖式チャンバー法でメタンフラックスを測定した。

$$\text{メタンフラックス (ml/sec)} = C \times A \times B \quad (b)$$

ここで、C は地上 1.5m 面のメタン濃度 (ppm)、A は測定面積 (m² : =130×60)、B は上方へ

の移送速度 (m/s) である。

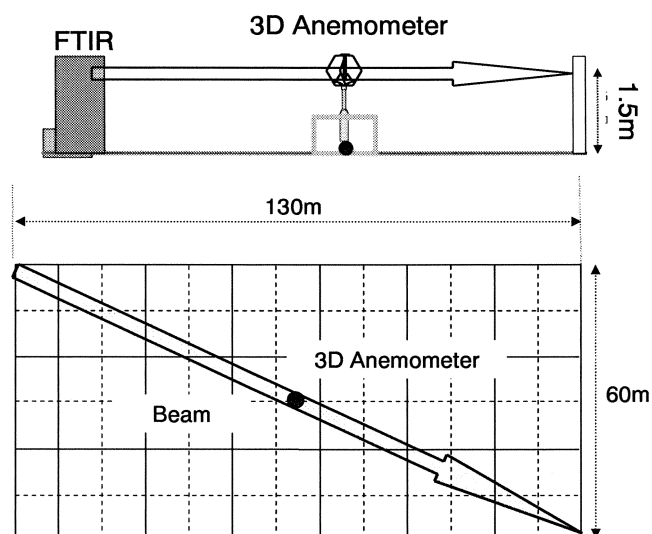


図1 メタンフラックスの計測イメージ (上：立面図、下：平面図)

(3) 埋立地からの温室効果ガス排出量削減対策実施の効果予測モデルの設計

本研究では、LCA手法^{4,5)}を廃棄物処理改善によるCDM事業の温室効果ガス低減及び環境持続可能性の評価の手段として適用した。LCAはISOの基準によりシステムの全過程における複数項目の環境影響を評価する技法として国際的に広く通用され、温室ガスの低減量の算定とCDM事業の持続可能性の判断ができる。アジア開発途上国の都市廃棄物中の約50%程度が有機性廃棄物であることを勘案し、2005年に生ごみ（食品廃棄物）の埋立禁止が実施され、現在、生ごみを分別排出してリサイクルしている韓国のソウル市を対象として、その政策効果を1997年と2005年で比較した。まず、主となる技術システムとして埋立、焼却、コンポスト化、飼料化のシステムについて生ごみのマテリアルフローと質の変化を明らかにし、構成するプロセス毎の投入・産出データをインベントリーデータとして整備した。データは、各種文献資料、LCAソフトウェア IWM^{7,8)}のデータベース、実際の施設データなどから引用や推定によって集積した。ソウルにおける食品廃棄物の分別時とごみ全体の中に分別されずに存在するときの組成について表3に示す。4種類のシステムフローと投入・産出データを整理した結果を図2に示す。これらのデータを基に、食品廃棄物の発生量及び方法別の処理量の実績を踏まえて、1997年と2005年の評価を行った。

表3 ソウル市で処理される生ごみの特性

組成 (%重量)	分別された生ごみ	分別されていない生ごみ
水分	79.7	56.7
灰分	4.6	10.3
可燃分	15.7	32.9
炭素	8.3	15.8
水素	1.3	2.2
酸素	5.4	13.6
窒素	0.7	1.3
硫黄	0.0	0.0
低位発熱量 (KJ/kg)	1,748	3,525

埋立される廃棄物の量と性状は、発生する廃棄物がどのような方法で処理されるかによって変わるため、埋立ガス回収だけではなく多様な廃棄物処理技術を適用した様々な埋立回避シナリオを設定して、ベトナムのハノイ市の埋立廃棄物の管理改善を通じたCDM事業の可能性を評価した。ハノイ市の都市廃棄物の組成を表4に示す。将来の技術システムオプションとしては、発生源での分別、埋立ガスからのエネルギー回収（発電）、焼却／発電、炭化、機械的・生物学的処理（バイオガス化含む）、コンポスト化などの要素システムを組み合わせた8つのシナリオ（ベースシナリオ含む）を設定した。インベントリーデータの整備などの大まかな方法は、ソウルの場合と同様である。

表4 ハノイ市の都市ゴミの組成

組成	組成 (%)	水分 (%)	生分解性 有機炭素 (%)	総炭素含有量 (乾燥重量%)	総炭素中化石系 炭素含有量 (%)
有機物*	47.8	60	17	43	-
紙	5.6	10	40	46	1
ゴム、皮革	0.1	16	-	67	20
プラスチック	8.6	0	-	75	100
繊維	2.6	20	24	50	20
木材	0.7	15	43	50	-
ガラス	0.5	0	-	-	-
金属	0.1	0	-	-	-
その他	34	10	-	3	100
合計(%)	100	33.3	11		

*有機物は生ごみと庭ごみが1:1であるとした

4. 結果・考察

（1）国家レベルでの廃棄物埋立地からのメタン排出量推定法の提示

①アジアの廃棄物処理の現状

ア．廃棄物の発生と組成

表5 アジア諸国における廃棄物の組成¹⁰⁾

組成 (重量%)	中国 (上海)	インド	インド ネシア	韓国	フィリ ピン	トルコ (イスタン ブール)	日本
年	1998	1995	1993	2001	1999	2000	2000
有機物	67.3	41.8	70.2	32.8	45	43	34
紙類	8.8	5.7	10.9	23.8	15	7.8	33
プラスチック	13.5	3.9	8.7	-	17	14.2	13
ガラス類	5.2	2.1	1.7	2.8*	-	5.2	5
金属類	0.7	1.9	1.8	-	6	5.8	3
繊維類 とその他	4.5	44.6 (textile 4.3)	6.2	40.6**	9	23.1	12

* 金属類と陶磁器類を含む

** 灰を含む

1997年にアジアの都市域では1日当たり約76万トンの廃棄物が発生している⁹⁾。将来発生する廃棄物量は、地域における人口や工業化の急速な進展により、現在のレベルより数倍大きくなるこ

とは明白である。また、アジアの人口密度は世界の他の地域よりも大きい。開発途上にあるアジア諸国の都市ごみ（MSW）の組成は、西洋先進国や日本とは大きく異なる（表5）。先進国の廃棄物にはリサイクル可能物が多く、生分解性の廃棄物が少ない。日本を除くアジア諸国の廃棄物は、バイオ廃棄物がそのほとんどを占める。暖房や炊事に石炭や薪を用いている場合には、都市ごみには多くの灰や塵が含まれる。

イ．廃棄物の処分と環境問題¹¹⁾

開発途上国の都市の都市ごみの処分は野積み（ダンピング）が主流である。埋立地は湿地や低地にあることが多く、廃棄物を土地造成に用いている。クアラルンプールでは都市の周囲にあるスズ鉱山の廃坑を廃棄物の処分に利用している。中国やインド、インドネシアのような人口が多い国を含めて、多くの国では90%以上の廃棄物を埋め立てている。不適正な埋め立てや野積みは表面水と地下水をひどく汚染する。粘土ライナーが用いられることもあるが、地下水位や地下水汚染やガスの移動についてはほとんど考慮されていない。有害廃棄物や医療系廃棄物、動物系廃棄物はほとんど管理されていないが、野積みの一区画は動物系廃棄物や医療系廃棄物用に計画されていることが多い。都市ごみの収集サービスを受けていない地域では、廃棄物はあらゆる水域に不法投棄されている。海洋投棄を行っているところもあるが、それより多くの廃棄物が河川や水路に不法投棄され、海へとたどり着いている。

アジアの開発途上国のほとんどでは、廃棄物が野積された場所が居住地の近くにある。人の健康や野生動物、環境質への影響のため、野積みによって由来する様々な有毒化学物質への曝露が懸念される。現在、ごみ拾い人による廃棄物の非管理焼却、メタンガスの生成、高度な廃棄物焼却技術の欠落および野火による低温燃焼が、アジアの開発途上国の廃棄物の野積みの主な問題である。

埋立地／野積みは重要な大気へのメタン供給源である。有機物と水分の含量が多いことがメタンの大量発生に繋がる。アジアの開発途上国のほとんどはGDPレベルが低く、環境保全に使える経費がごく限られている。さらに、これらの国々では飲料水、下水ならびに大気汚染問題も解決されておらず、廃棄物管理は優先順位が低い課題である。したがって、近い将来における大きな改善は期待できない。これは、将来的にアジアの開発途上国における埋立地が大量の有機性廃棄物を受け入れ、メタンを発生し続けることを意味している。この点でアジアにおける埋立地のCDMプロジェクトが地球温暖化防止に重要である。

ウ．アジアの廃棄物ストリーム

（ア）中国

13億の人口、960万 km²の面積を抱える発展途上国であり、また急速に発展している国でもあるが、廃棄物処理サービスは都市部しかカバーしておらず、農村部や小都市はカバーしていない。中国には都市と呼ばれる街が161箇所あり、都市部の人口は352.2百万、都市住民の比率は約30%である。都市化が進展しており、80年代と比較して都市部人口は3倍以上となっている。161都市のうち43%が東部（沿海部）、37%が中央部に所在しており、西部に所在する都市は18%に過ぎない。ごみは155.8百万tが当局により収集されているが、2005年ベースで1981年の5倍以上と年平均7.4%増加している。都市ごみの一般的な性状としては、水分、有機物、プラスチック、灰及びタイルの割合が高いに対し、廃棄物中に含まれる回収可能な資源量が少ない。PETや金属カン、新聞紙等は収集される前に住民らによって分別回収、売却される。最近では、一部

の都市でプラスチックや食品廃棄物が増加しており、タイルや灰（練炭カス）が減少している。

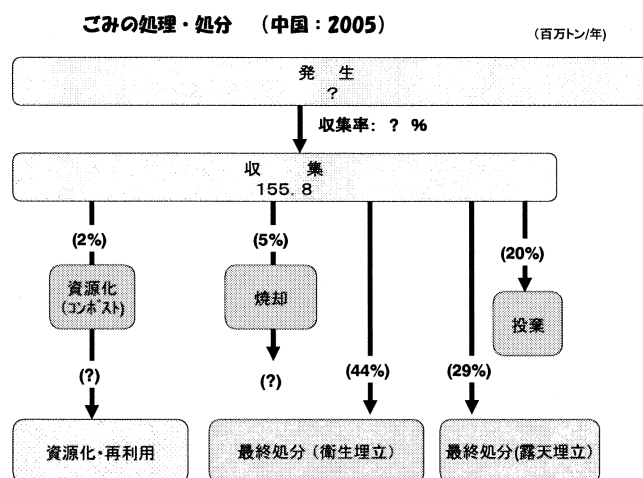


図 3 中国における廃棄物ストリーム（2005 年, 単位:百万 ton）

衛生処理は 80 年代に始まり、2005 年末には 52%の廃棄物が衛生処理されている。処理の内訳では、44%が衛生埋立処分、2%がコンポスト化、5%が焼却処理されている。それ以外には 29%が定められた場所に露天埋立をされているほか、20%が道路わきや川などに投棄されている（図 3）。大都市と中小都市とでは、廃棄物処理の方法も異なっており、大都市でのほうが中小都市でよりも高度な処理がなされている。東部沿海部での焼却処分率は中部西部よりも高く、焼却処理施設のほとんどは東部にある。

（イ）インドネシア

人口は 245 百万人（2006 年 6 月）、総面積は 200 万 km²である。インドネシアにおける廃棄物処理政策では、「グローバル・アジェンダ 21」という持続可能な開発及び環境保護についての枠組みを設定している。排出源の内訳は家庭が 48%、市場が 24%、店舗等の商業活動が 9%、オフィスが 1%、工場等が 1%、公共施設が 5%、路上廃棄物が 5%、排水路が 1%、その他が 6%等である。1 人 1 日当たりの排出量を 800 g とすると、人口増加により 2000 年には 1 日あたり 164,675 ton であった廃棄物の排出量は 2025 年には 218,912 ton となり、この 20 年での廃棄物排出量の増加は 24.5%に達したことになる。大都市への人口移動により、中小都市では排出量が減少し、大都市で増加している。都市部での廃棄物処理において、行政当局による収集率は約 40%であり、収集後は最終処分場に行くものもあれば、単に投棄されるものもある。単純投棄される量は 7.5%、コンポスト化やリサイクルされるものが 1.6%あるが、各家庭での焼却が 35.4%あり、川や道路、公園などに不法投棄される量は 15.3%にのぼっている（図 4）。インドネシアにおける廃棄物組成の 65%が有機物である。バリ島の事例では、85%が有機廃棄物で占められており、残り 15%の無機系は主としてプラスチック及び紙である。

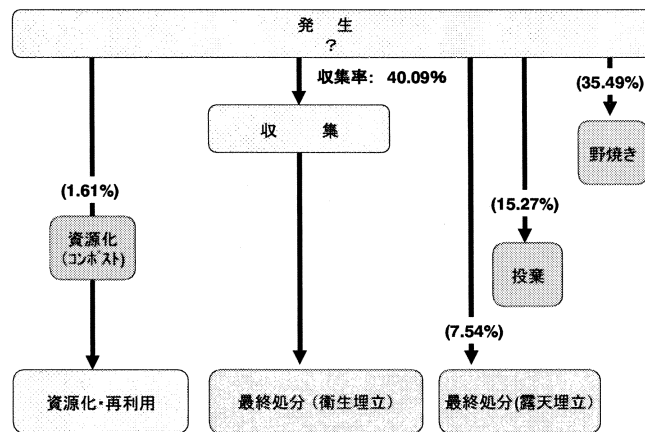


図 4 インドネシアにおける廃棄物ストリーム (2001)

(ウ) モンゴル

モンゴルでは、広大な国土面積に比べて人口が 260 万人と少なく、放牧生活を基本とし定住しないため、これまでは廃棄物処理が大きな問題となることはなかった。しかし、急激な都市化により、問題は顕在化してきた。特に、モンゴル人口の半数が首都ウランバートルに居住しており廃棄物問題も深刻である。農村部では乳製品や食肉等の自然物の消費が大半を占めているが、都市では多くの容器包装類を使用するようになった。廃棄物の排出総量は 1 日当たり約 750 ton で、うち約 80% が家庭廃棄物であり、紙、有機物、プラスチックの量が多い。モンゴルでは、清掃スタッフが家庭からの廃棄物を収集して公共の場所に集め、そこで 10% 未満の小規模な、ペットボトルに限った分別を行っており、残りは埋立処分場に運搬されている (図 5)。処分場は露天埋立であり、面積は年々拡大し、管理状況は良くない。第一次マスタープランでは 2010 年までに収集サービスが全ての家庭をカバーし、収集された廃棄物は衛生埋立処分場に運搬処分され、環境への悪影響を最小限にとどめることになっている。廃棄物処理施策の優先順位としてはまず排出量の削減で、再利用およびマテリアルリサイクルがこれに続き、最後が熱回収と衛生埋立となっている。衛生埋立処分場の候補地はすでに上がっており、目標年の 2010 年までに供用開始される予定である。

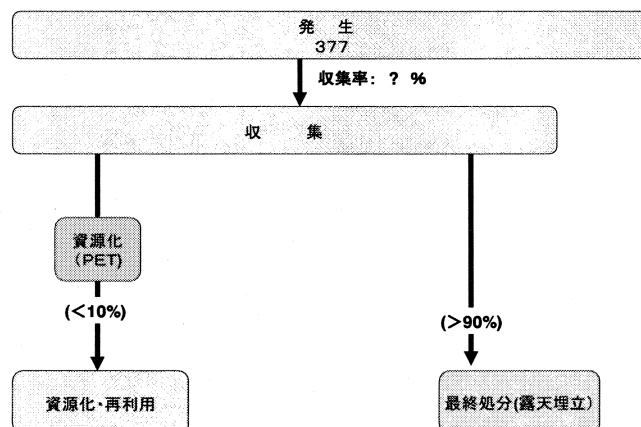


図 5 モンゴルにおける廃棄物ストリーム (2005 年, 単位: kg/人/年)

(エ) タイ

タイの都市は大都市、都市、周辺部の3分類に類型され、ごみの排出量は大都市（バンコク首都圏）が1.6 kg/人/日、都市部で概ね1.0 kg/人/日、周辺部で0.4 kg/人/日、全体では0.66 kg/人/日である。バンコクの排出量は増加しているものの、排出原単位については減少している。これはバンコク市当局の施策でごみ減量と排出源分別・資源リサイクルが推進されているからである。バンコクのごみの増加は周辺各都市の廃棄物処理が不十分であるために起きている。総廃棄物の21%がバンコクから、32%がそれ以外の都市、周辺部からが47%である。14.3 百万 ton/年(4 万 ton/日)の排出量のうち約22%がリサイクルされており、処理、処分されている廃棄物は78%である。処理・処分は約65%がオープンダンプングで、衛生埋立処分は34%である。焼却処理は1%に過ぎない。良好に管理されている埋立処分場は33箇所しかない。バンコクには2箇所の大規模な埋立処分場があり、郊外の市とパタヤには約104箇所の衛生埋立処分場がある。清掃工場が3箇所稼働しており、4箇所目がプーケット建設中である。

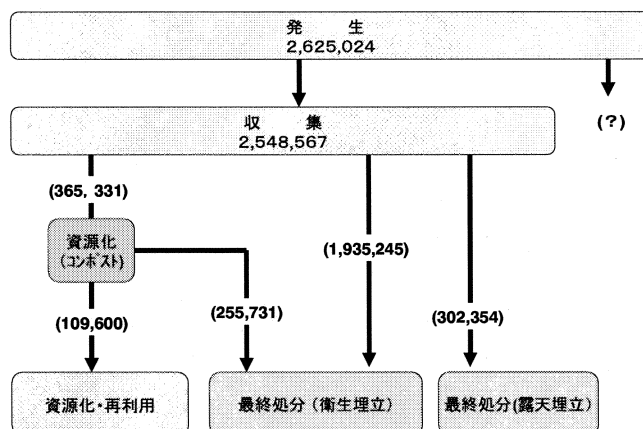


図5 タイ・バンコク市における廃棄物ストリーム（単位：ton/年）

バンコクの2006年時点での人口は570万人であるが、実際排出される廃棄物の量はこの570万人の人口だけから出されるものではなく、郊外から通勤してくる人たちの排出分も含まれている。郊外も含めてバンコク大都市圏として考えると、圏内人口は990万人となる。バンコクにおけるフローは年間260万tの排出のうち210万tが埋立処分（総量の約80%）されており、残りはコンポスト化やオープンダンプングなどである（図6）。大きな処理プラントは3箇所、中継所が1箇所ある。処理プラントにはコンポスト処理施設があるが、いずれにせよ残量は埋立処分場に運搬され、廃棄物処理は埋立処分が主流である。排出源からのごみの分別は大きく3つに分かれる。まず家庭からのごみのうち一部の有価物が収集業者に買い取られる（第一次分別）。次にBMA当局の収集車による回収で、戸別収集に家の前につけて収集するが、このときも有価物を分別して業者に売ることがある（第二次分別）。スカベンジャーによる処分現場での分別（第三次分別）である。バンコク以外の市街地では、排出量の84%が処理処分されており、そのうち65%が不適正な処分をされており、適正な処分をされているのは約16%、リサイクルは約19%である。

(オ) 韓国

1970年代からの産業の発展と都市化、1990年代の急速な経済成長は廃棄物の排出量を急増さ

せ、廃棄物処理は社会問題となった。この傾向は 1988 年のソウルオリンピック開催によって大きく変貌をとげ、廃棄物処理は近代化された。1990 年代には廃棄物の複合的な処理が導入された。これにより持続可能な成長を目指す資源循環型社会への転換がなされた。廃棄物処理の根拠法規は廃棄物処理法及び資源保護・リサイクル促進法である。廃棄物の総量は年々増加をたどり増加率は年率 10.3%に達する。一般廃棄物の増加率は 2%程度であり、産業廃棄物、なかでも建設廃材の伸びが大きい。図 6 に廃棄物ストリームを示す。

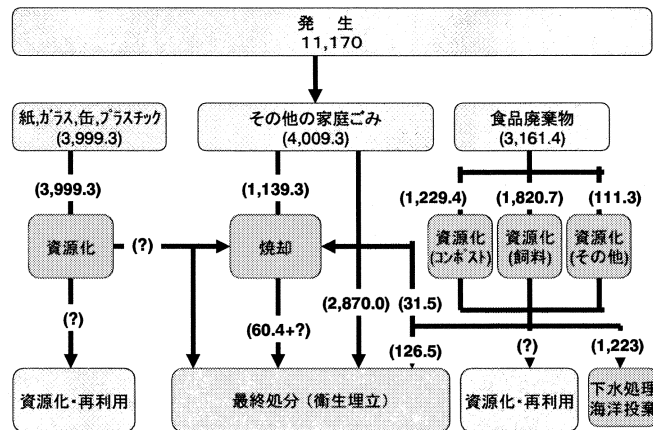


図 6 韓国・ソウル市の廃棄物ストリーム（2005 年，単位：ton/日）

一般廃棄物の埋立処分率は急減しており、2011 年には 17.0%になることが見込まれている。リサイクル率も少しずつ上昇しており、1998 年の約 35%から 2011 年には 53%に達しようとしている。焼却処分率の上昇はきわめてゆるやかで、2011 年に 30%に達する。ソウル市の 2005 年の一般廃棄物発生量は日量約 11,170 ton で、これは資源化可能物と食品廃棄物、その他の廃棄物に分別される。統計データも一部あるが、推計データもあり、マテリアルフローを作成するのに十分なデータがない。このため多くの改善が必要である。食品廃棄物が約 3,000 ton 排出され、埋立処分率は 1997 年の 84.0%から 2004 年には 4.7%へと激減している。これは 2005 年から、食品廃棄物の直接埋立処分が禁止されたためである。これに対しリサイクル率は急伸していて、80%以上の食品廃棄物が分別回収されリサイクル施設に運搬されている。食品廃棄物処理施設は 200 以上が稼動しており、その総数のうち 85%以上が飼料化、コンポスト化施設である。量的にも 80%以上が飼料化、コンポスト化によるものである。しかし、液状成分は下水道処理や海洋投棄され、この量は約 40%に達する。

②ベトナムにおける廃棄物埋立量の推計

ア．ハノイ市

（ア）廃棄物処理体制

ハノイ市はベトナム北部の紅河デルタの中央の低地に位置する。総面積は921 km²で、農地が47%、宅地が13%、特別利用用地が22%である。平均人口は293万人で、都市区が7区、村区が5区であり、118のコミューンで構成されている。年平均気温（平年値）が23.5℃、年間降水量（平年値）が1700 mmで、気候帯としては温帯～亜熱帯に属する。

ハノイ市で廃棄物管理を所轄する当局は、ハノイ市人民委員会傘下の科学技術環境局（DOSTE : Hanoi Department of Science , Technology and Environment）と交通・都市公共

事業局（TUPWS：Hanoi Transport and Urban Public Works Service）である。DOSTEは廃棄物計画、埋立地管理、許認可を担当しており、TUPWSは都市施設・システムの運用を所管する事業局であり、多くの部門が企業化されている。ハノイ市市街区のごみ処理は、TUPWS傘下のハノイ都市環境公社（URENCO：Hanoi Urban Environment Company）が管理しており、主な業務はごみ収集運搬・処理、道路清掃（散水）、し尿の汲み取り、公衆便所の清掃管理である。URENCOが所轄する市街区はBa Dinh, Tay Ho, Hoan Kiem, Hai Ba Trung, Dong Da, Thanh Xuam, Cau Giayの7区であり、面積は90 km²（全市の約10%）、人口は約172 万人（全市の59%）、収集率は約84%である。URENCO は総務部門の他、6箇所の環境事業所（収集運搬地区別）、ナムソン廃棄物処理事業所（埋立処分場）、コーディエン廃棄物事業所（コンポスト施設）、医療系廃棄物・産業廃棄物処理事業所、ワークショップ（収集車両、ハンドカート等の整備等）を運営している。

（イ）廃棄物ストリーム

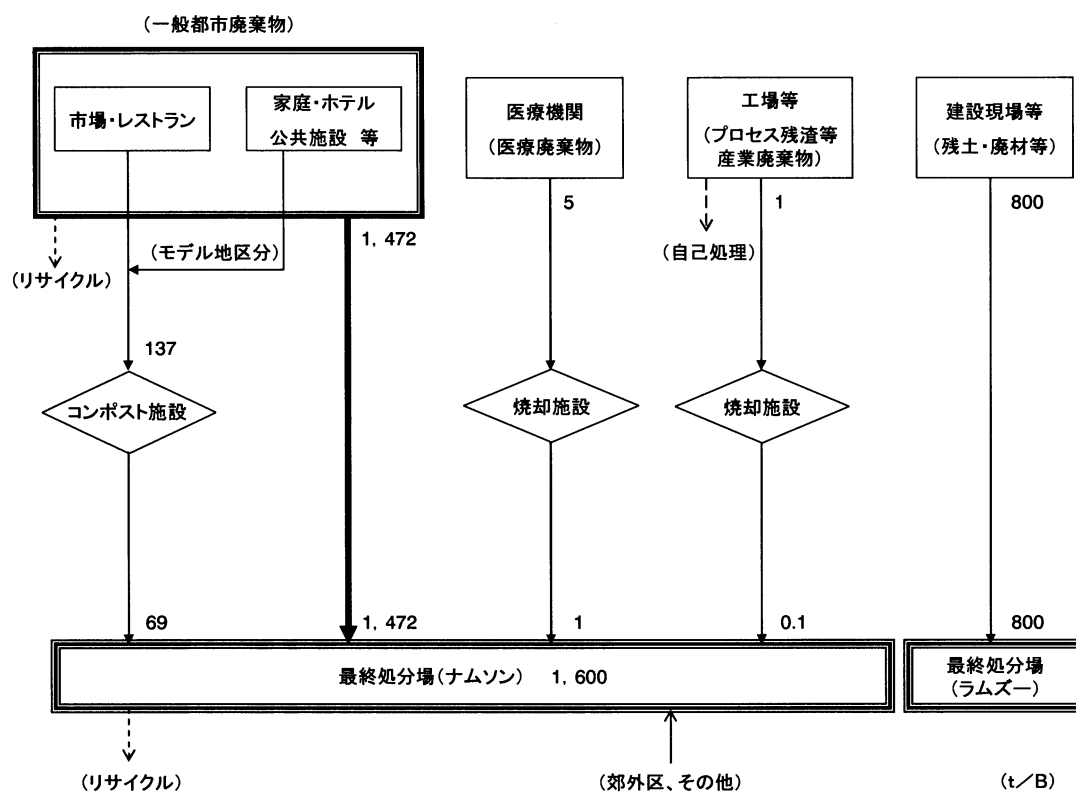


図7 ハノイ市市街区の廃棄物ストリーム（2002年）

一般家庭や小規模商店等から発生する「一般都市廃棄物」は、ハンドカートにより一次収集された後、ハンドカート集積所にて運搬車に積み替えられ、ナムソン処分場に運搬されて埋め立てられている。また、市場やレストラン等から発生する食品系の有機性廃棄物、およびHoan Kiem区の一部で分別収集された有機系ごみは、コーディエンコンポストプラントにおいて堆肥化されて、残渣が埋立処分されている。金属やプラスチック容器等の有価物は、ごみ発生時と埋立処分時にWaste Pickerにより回収されている。市内の病院・診療所等から発生する「医療系廃棄物」

は専用車両にて収集され、焼却処理された後、残渣が埋立処分されている。製品製造プロセス等から発生する「産業廃棄物」は原則として自己処理（委託処理を含む）とされており、直接埋立処分または産業廃棄物焼却施設を経由して、残渣が埋立処分されている。建設現場等から発生する残土や廃材等は専用の最終処分場にて直接埋立処分されている。

URENCO所轄の事業所での聞き取り調査で得られた2002年の処理・処分実績を図7に示す。1日当たりの一般都市廃棄物の排出量は1,609 ton/日である。うち8.5%に相当する137 ton/日がコンポスト施設に搬入処理され、残渣が69 ton/日（残渣率：50.4%）最終処分された。また、91.5%に相当する1,472 ton/日が直接埋立処分された。URENCO本社の集計では、2002年の年間発生量（収集量）は537,177 tonであり、年間搬入日数は334日となっている。医療系廃棄物は5 ton/日、産業廃棄物は1 ton/日焼却され、それぞれの残渣1 ton/日、0.1 ton/日が最終処分された。また、建設残土等は800 ton/日発生し、全量が直接埋立処分された。

表 7 ごみ組成

組成区分	収集ごみ① （市場ごみを含まない）		収集ごみ② （市場ごみを含む）		平均 %	JICA (1994) %	分別ごみ （有機系ごみ）	
	kg	%	kg	%			kg	%
厨芥・草・葉	36.5	39.4	49.6	56.3	47.8	42.0	34.4	75.0
紙	5.8	6.2	4.4	4.9	5.6	5.3	1.0	2.1
ゴム・皮革	0.3	0.3	0.0	0	0.1	7.2	0.1	0.1
プラスチック	7.8	8.4	7.8	8.8	8.6		2.0	4.3
繊維	2.0	2.2	2.6	2.9	2.6	1.8	0.1	0.2
木・竹	0.5	0.5	0.8	0.9	0.7		5.3	11.6
ガラス	0.8	0.9	0.1	0.1	0.5	1.4	0.0	0.0
骨・貝殻	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	1.3	0.0	0.0
金属	0.3	0.3	0.0	0	0.1	0.6	0.2	0.3
陶器	0.3	0.3	1.7	1.9	1.1	40.6	0.0	0.0
ガレキ・その他	38.2	41.2	21.0	23.8	32.5		3.0	6.4
合計	92.6	100	88.2	100	100	100	45.9	100

（ウ）ごみ組成

ハノイ市市街区の収集ごみ（市場ごみを含まないもの）、収集ごみ（市場ごみを含むもの）、市場ごみを含む分別ごみ（有機系）についてごみ組成分析を行った。結果を表7に示す。収集ごみを平均すると厨芥・草・葉が最も多く47.8%、次いでガレキと分別不能な微細物等が32.5%であり、両者で約80%を占めていた。また、プラスチックが8.6%、紙が5.6%、繊維が2.6%であり、JICAの調査¹²⁾と概ね同じ傾向にあった。日本のごみ組成と比較すると、ガラス、金属、プラスチック、特に紙の割合が小さく、ガレキ・その他の割合が大きい。前者はごみ発生時点における有価物の回収、後者は調理や暖房に使われている燃料（練炭等）の燃え殻と道路清掃ごみの混入に起因すると考えられる。コンポスト施設での堆肥化のため分別収集されている有機系ごみの組成は厨芥・草・葉が全体の75%を占め、堆肥化に不適なものが25%含まれていた。

（エ）廃棄物埋立量の経年変化

既存資料と調査で得られた実績値をもとに有機性廃棄物の過去の埋立処分量及び将来見込みの推計を行った。まず、JICAの調査で推計されている2000年から2010年の収集量を成長曲線で回帰して過去の収集量に外挿した。JICAの推計値を補正するため、聞き取り調査による実績値を用いて成長曲線を将来に外挿し、1990年から2005年までの一般都市廃棄物収集量を求めた。結果を図8に示す。

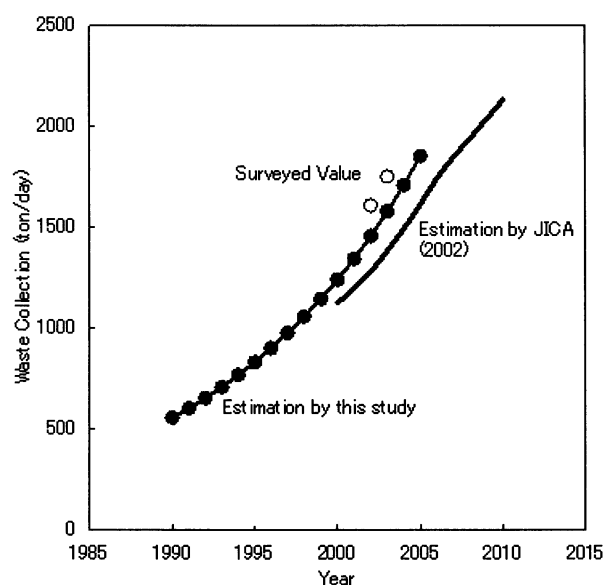


図8 一般都市廃棄物収集量推計値

表8 有機性廃棄物埋立量推計値

年	(ton/year)			
	厨芥・草・葉	紙	木・竹	その他
1990	88972	10368	1347	85387
1991	96394	11233	1459	92510
1992	104435	12170	1581	100227
1993	109560	12480	3896	101628
1994	118700	13521	4221	110106
1995	128602	14649	4573	119290
1996	139330	15872	4954	129241
1997	150953	17196	5368	140025
1998	163546	18630	5816	151705
1999	177189	20184	6301	164361
2000	191971	21868	6826	178074
2001	207985	23692	7396	192927
2002	225336	25669	8013	209021
2003	244133	27810	8681	226459
2004	264499	30130	9405	245351
2005	286564	32644	10190	265817

ハノイ市では2000年にコンポスト施設の稼働を開始し、直接埋立ではない有機性廃棄物のストリームが生じた。そこで、収集された廃棄物をコンポスト廃棄物（市場ごみおよび分別ごみ）と直接埋立廃棄物に分けて埋立量を推計した。まず、収集ごみにおける有機系ごみの割合（8.5%：図7参照）は一定として、各年の収集ごみをコンポスト化廃棄物と直接埋立廃棄物に分けた。コンポスト化施設に向かう廃棄物は表7の分別ごみの組成であるとして、図7に示したコンポスト化施設における処理量（137 ton/day）と残渣量（69 ton/day）より、厨芥・草・葉の残渣率を40%、その他のコンポスト不適物の残渣率を100%とした。直接埋め立てられる廃棄物の組成には、表7の収集ごみの平均組成割合を用いた。また、収集サービスの年間稼働日数は334日とした。推計結果を表8に示す。

イ．ホーチミン市

（ア）廃棄物処理体制

ホーチミン市のごみ処理状況は、ホーチミン市人民委員会天然資源環境部（DONRE）とホーチミン市環境公社（CITENCO）の協力を得て、聞き取り調査を実施した。市内で発生する廃棄物の収集、処分は CITENCO が実施していた。ごみ収集率は、2000 年の時点で 90% である。収集方法としては、一般家庭、小規模商店等から発生する一般都市廃棄物は、ハンドカートにより一次収集（収集・街路清掃）された後、積替えステーションを経由して埋立地に搬出される。また、ホテル等の大規模な事業所ではパッカー車（10 ton）で直接収集が行われている。市場にはオート三輪自動車（2 ton）で一次収集（収集・街路清掃）された後、積替えステーションを経由して埋立地に搬出される。公式統計として資源回収は計上されていないが、街路に段ボール、衣類、金属、ガラス、プラスチック類を収集する非公式な資源回収者が多数存在した。公式な廃棄物埋立地は 3 箇所あり、現在 2 箇所稼働、1 箇所はすでに埋立完了していた。ハノイ市と異なり、埋立地での資源回収は行われていなかった。中間処理としては、医療廃棄物のみ焼却施設で焼却されていた。1981 年に公社とデンマークの JV でコンポストプラントが設置（250 ton/日の高速堆肥化施設）されたが、運転・維持管理費が高い、コンポストの品質が良くない等の課題により、1989 年以来運転を休止し現在は使用されていない。

（イ）廃棄物ストリーム

2000 年にホーチミン市内から発生した廃棄物は 4,210 ton/年である。なお、過去における廃棄物発生量は把握されていないが、ごみ収集量は 1983～1992 年までの数量が実績ベースで把握されている。廃棄物発生量の年次変化を表 9 に示す。2000 年にホーチミン市で発生した廃棄物 4,210 ton/年を廃棄物の区分でみると、生活系（家庭・市場・レストラン）の廃棄物が 79%、3,347 ton/日で、建設系廃棄物が 21%、858 ton/日、医療廃棄物が 0%、4.6 ton/日となっている。ホーチミン市の廃棄物の発生量をハノイ市と比較してみると、生活系廃棄物の発生割合が 12 ポイント高く、生活系 1 人 1 日当たりの発生量はホーチミン市が 661 g で、ハノイ市の 549 g（2001）より若干高い。市内総生産高当たりの総発生量はホーチミン市が 2.91 ton/億 VND で、ハノイ市の 4.01 ton/億 VND とより低い。なお、総生産に対するサービス産業のウエイトが高い地域では、総生産当たりの廃棄物量は減少する傾向にあり、日本でも同様な傾向にある。

ホーチミン市の廃棄物処理フローを図 9 に示す。発生量のうち、家庭・市場・レストランから発生量 3,347 ton/日、収集率が 90% であることから、3,012 ton/日が埋立処分されていることになる。また、建設系廃棄物は、収集量 858 ton/日の全量が埋立処分されている。なお、医療廃棄物については、4.6 ton/日の全量が焼却処理されており、焼却灰（残渣 10% と仮定）0.46 ton/日が埋立処分されている。

（ウ）ごみ組成

入手した資料では、ごみ組成にかなりの幅があり、合計が 100% を大きく超える。よって本調査においては、入手した資料の最大値を採用し、その合計値が 100% になるよう廃棄物ごとに按分した（表 10）。

（エ）品目別の発生量の推計

市場については、現地ヒアリングした結果を基に推計した。市内には、8 箇所の市場が存在するが、平均的な規模である市場（ベンタン）でヒアリングを実施した。ごみ収集は、2 ton 車（実

際の積載重量は 1.5 ton 程度と推定)、4 台で中継基地を 4 回往復し、ごみ収集を 1 日に昼と夕方の 2 回とし、また、市内には 8 箇所の市場があることから、768 ton/日と推計した。

表 9 ホーチミン市における廃棄物の発生量

		(ton/日)				備 考
西暦	計	生活系	建設系	医療系	ごみ収集量	
実績	1983				498	*1
	1984				464	*1
	1985				556	*1
	1986				555	*1
	1987				542	*1
	1988				649	*1
	1989				850	*1
	1990				848	*1
	1991				1,346	*1
	1992				1,689	*1
	1993				1,962	*3
	1994				2,235	*3
	1995				2,509	*3
	1996				2,782	*3
	1997				3,055	*3
	1998				3,328	*3
	1999				3,602	*3
	2000	4,210	3,347	858	4.6	*2
予測	2001	4,609	3,638	971		*2
	2002	4,978	3,929	1,049		*2
	2003	5,376	4,243	1,133		*2
	2004	5,806	4,583	1,223		*2
	2005	6,270	4,949	1,321		*2
	2006	6,772	5,345	1,427		*2
	2007	7,314	5,773	1,541		*2
	2008	7,899	6,235	1,664		*2
	2009	8,531	6,734	1,797		*2
	2010	9,213	7,272	1,941		*2

*1 : (社)国際厚生事業団¹³⁾

*2 : Source: Department of Transport and Public Work, 2001

*3 : 1992、2000 年を用いた直線補間より算出。

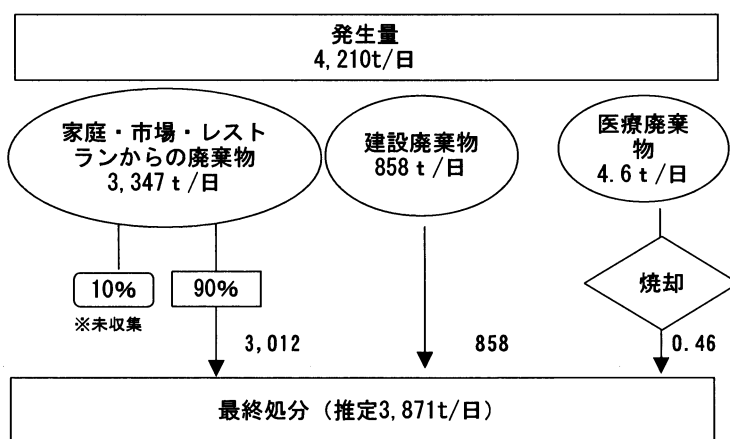


図 9 ホーチミン市における廃棄物処理フロー (2000 年)

1992 年時点における生活系廃棄物に対する家庭系（市場、飲食店・ホテルを除く）廃棄物の割合 49.6%を用いた。また、生活系廃棄物総量から、市場及び上記の家庭系廃棄物量を除いた量を、飲食店・レストランの発生量とした。品目別の発生量を推計した結果を表 11 に示す。2000 年におけるホーチミン市の発生量 4,210 ton/日のうち、食品廃棄物が 1,719 ton/日で最も多く、以下、

建設系廃棄物が 858 ton/日、ビニールが 300 ton/日等となっている。

表 10 ホーチミン市のごみ組成

成分	組成 (%)				平均
	家庭	学校	飲食店・ホテル	市場	
食品廃棄物	38.3	39.2	83.0	40.6	50.3
貝がら、たにし、カニなど	0.0	0.0	0.0	4.1	1.0
竹、わら	0.0	0.0	0.0	3.1	0.8
紙	7.8	14.2	2.3	4.6	7.2
段ボール	1.8	0.0	0.4	2.0	1.1
ビニール	14.5	17.8	4.4	2.6	9.8
油脂	4.3	9.8	5.0	1.7	5.2
布類	5.6	2.0	0.0	23.6	7.8
皮革	0.0	2.2	0.0	0.6	0.7
木材	2.9	10.5	0.0	2.1	3.9
ゴム（軟らかいもの）	0.0	0.0	0.0	2.3	0.6
ゴム（硬いもの）	1.1	0.0	0.0	1.7	0.7
ガラス	9.9	1.3	0.8	2.0	3.5
カン	4.0	2.1	1.2	0.9	2.1
金属類	1.3	0.0	0.0	2.4	0.9
陶磁器類	4.2	0.0	1.1	0.6	1.5
小石	3.7	0.0	0.0	1.6	1.3
灰	0.0	0.0	0.0	0.9	0.2
発泡スチロール	0.5	1.0	1.7	2.6	1.5

表 11 ホーチミン市の品目別発生量（2000 年）

成分	(ton/日)					
	家庭、学校	飲食店・ホテル	市場	小計	建設系、医療系廃棄物	合計
食品廃棄物	628	779	311	1,719	51.4%	1,719 40.8%
貝がら、たにし、カニなど	0	0	31	31	0.9%	31 0.7%
竹、わら	0	0	24	24	0.7%	24 0.6%
紙	128	22	36	185	5.5%	185 4.4%
段ボール	30	4	15	49	1.5%	49 1.2%
ビニール	238	41	20	300	9.0%	300 7.1%
油脂	70	47	13	130	3.9%	130 3.1%
布類	92	0	181	273	8.2%	273 6.5%
皮革	0	0	5	5	0.1%	5 0.1%
木材	47	0	17	63	1.9%	63 1.5%
ゴム（軟らかいもの）	0	0	17	17	0.5%	17 0.4%
ゴム（硬いもの）	18	0	13	31	0.9%	31 0.7%
ガラス	163	8	15	186	5.5%	186 4.4%
カン	66	12	7	85	2.5%	85 2.0%
金属類	21	0	18	40	1.2%	40 0.9%
陶磁器類	68	10	5	83	2.5%	83 2.0%
小石	61	0	12	73	2.2%	73 1.7%
灰	0	0	7	7	0.2%	7 0.2%
発泡スチロール	8	16	20	44	1.3%	44 1.1%
小計	1,640	939	768	3,347	100.0%	3,347 79.5%
建設系廃棄物					858	858 20.4%
医療系廃棄物					4.6	4.6 0.1%
合計						4,210 100.0%

（オ）品目別埋立量の推計

DONRE からの収集資料等より、1983 年からのごみ収集量の実績量で把握できるが、250 ton/日のコンポストプラントが稼動していた 1981 年～1987 年の期間は、詳細な処理実績は不明である。そこで、埋立量の推計は、1990 年以降とした。医療廃棄物は 1990 年当時から焼却処理が行われており、発生量の実績は 2000 年が把握されている。そこで、ホーチミン市の病床数実績（1997-2004）から一次回帰式により、過去及び将来の病床数を推計し、2000 年における病床数当たりの医療系廃棄物発生量を推計年に乗じて医療系廃棄物の発生量を推計した（図 11）。

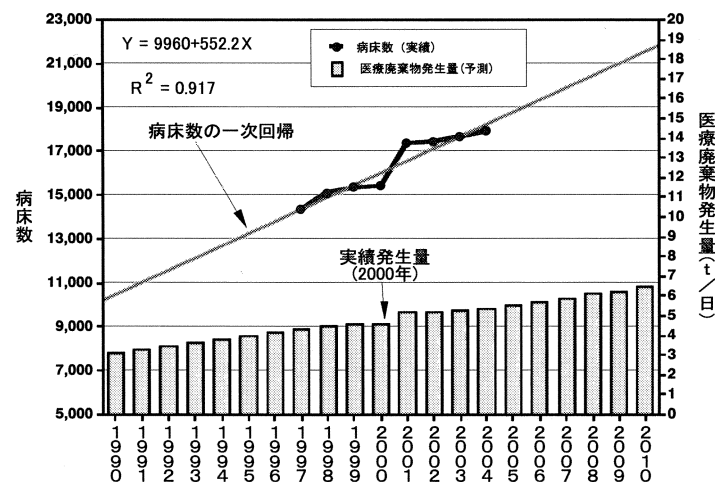


図 11 医療系廃棄物発生量の推計

表 12 ホーチミン市の埋立量の推計

						(ton/日)	備考
西暦		計	生活系	建設系	医療系	埋立量	
実績	1983					498	*1
	1984					464	*1
	1985					556	*1
	1986					555	*1
	1987					542	*1
	1988					649	*1
	1989					850	*1
	1990				3.1	848	*1
	1991				3.3	1,346	*1
	1992				3.5	1,689	*1
	1993				3.6	1,962	*3
	1994				3.8	2,235	*3
	1995				3.9	2,509	*3
	1996				4.1	2,782	*3
	1997				4.3	3,055	*3
	1998				4.5	3,328	*3
	1999				4.6	3,602	*3
予測	2000	4,210	3,347	858	4.6	3,875	*2
	2001	4,614	3,638	971	5.2	4,250	*2
	2002	4,983	3,929	1,049	5.2	4,590	*2
	2003	5,381	4,243	1,133	5.3	4,957	*2
	2004	5,811	4,583	1,223	5.3	5,353	*2
	2005	6,276	4,949	1,321	5.5	5,781	*2
	2006	6,778	5,345	1,427	5.7	6,243	*2
	2007	7,320	5,773	1,541	5.9	6,743	*2
	2008	7,905	6,235	1,664	6.1	7,282	*2
	2009	8,537	6,734	1,797	6.2	7,864	*2
	2010	9,219	7,272	1,941	6.4	8,492	*2

*1 : (社)国際厚生事業団¹³⁾

*2 : Source: Department of Transport and Public Work, 2001

*3 : 1992、2000 年を用いた直線補間より算出。

1990～1999 年は中間処理施設が存在していなかったため、埋立量は既存のごみ収集量実績を用いて、「収集量＝埋立量」とした。なお、医療系廃棄物の埋立量は、焼却後の残渣（残渣率 10% 設定）分とした。2000 年については、実績値を用いた。2001～2010 年の間は、既存資料から得られた将来予測の発生量を用いた。なお、生活系廃棄物については、現状の収集率 90% が将来も不変と仮定し、生活系廃棄物発生量の 90% 分が収集され、埋立処分されるものと仮定した。また、医療系廃棄物の埋立量は、焼却後の残渣（残渣率 10% 設定）分とした。以上の埋立量の推計結果

を表 12 に示す。

発生時点と埋立時点の廃棄物の組成が同様とあると仮定し、前節で推計した埋立量に品目別発生量の構成比を用いた。本調査で現地調査を行った結果では、街路に段ボール、衣類、金属、ガラス、プラスチック類を収集する非公式な資源回収者が多数存在した。しかしながら、これらの資源回収量の定量的把握ができないため、発生時点と埋立時点の廃棄物の組成を同様とした。2000 年の品目別埋立量を推計した結果（表 13）、埋立量の 40%が食品廃棄物で最も多く、次いで建設系廃棄物が 22.2%となっており、この 2 品目で全体の 62%を占めていた。

表 13 ホーチミン市の品目別埋立量の推計結果（2000 年）

成分	(ton/日)					
	家庭、学校、飲食店・ホテル	飲食店・ホテル	市場	小計		建設系、医療系廃棄物
食品廃棄物	566	701	280	1,547	51.4%	
貝がら、たにし、カニなど	0	0	28	28	0.9%	
竹、わら	0	0	21	21	0.7%	
紙	115	20	32	167	5.5%	
段ボール	27	4	14	44	1.5%	
ビニール	214	37	18	270	9.0%	
油脂	63	42	12	117	3.9%	
布類	83	0	163	246	8.2%	
皮革	0	0	4	4	0.1%	
木材	42	0	15	57	1.9%	
ゴム（軟らかいもの）	0	0	16	16	0.5%	
ゴム（硬いもの）	16	0	12	28	0.9%	
ガラス	146	7	14	167	5.5%	
カン	60	11	6	76	2.5%	
金属類	19	0	17	36	1.2%	
陶磁器類	61	9	4	75	2.5%	
小石	54	0	11	66	2.2%	
灰	0	0	6	6	0.2%	
発泡スチロール	8	15	18	40	1.3%	
小計	1,476	845	691	3,012	100.0%	
建設系廃棄物						858
医療系廃棄物（焼却灰）						0.5
合計						3,871

③埋立地覆土におけるメタン酸化に関する検討

ア．覆土材料の性状

東南アジア諸国の気候の特徴として、降水量が多いことが挙げられる。本研究では、こうした特性を有する東南アジア諸国の廃棄物埋立地の覆土を想定しており、覆土材の含水率に関して検討を加えた。覆土材料として、豊浦標準砂、稲わら、木くず、もみ殻の混合材料を対象としてガスの透気性の観点から性状評価を行った（表 14）。水分調整を行わない場合、最も透気係数が高かったのは稲わらを 5%混入させた標準砂の水分未調整時で 3.0 cm/sec であった。標準砂と木くずおよび標準砂ともみ殻の混合材の透気係数は、標準砂のみの透気係数と同程度であった。また、実埋立地の覆土の透気係数とも同程度であることが示された（表 15）。いずれの混合材においても、含水率が高くなるにつれて透気係数は減少する傾向が確認された。稲わらの混合は 5%程度の水分含量までは透気係数を若干効果があったが、いずれもオーダーが変わるほどの効果はないことが示された。また、木くずは含水率が 10%と高くなった場合に稲藁混合時よりも、透気性を高く保つことが示された。

表 14 覆土材料の透気係数 (cm/sec)

	水分未調整	水分 5%	水分 10%
標準砂のみ	2.3	2.1	1.4
標準砂+木くず	2.3	2.1	1.8
標準砂+稲わら	3.0	2.4	1.6
標準砂+もみ殻	2.4	2.4	1.3

表 15 実際の埋立地覆土の透気係数 (cm/sec)

	透気係数
SY 埋立地覆土 (日本)	5.1
FS 埋立地覆土 (日本)	2.8
AN 埋立地覆土 (日本)	2.2
HH 埋立地覆土 (タイ)	1.1

イ. 標準砂を充填した覆土カラムによるメタン酸化

豊浦標準砂の含水率を調整した上で、埋立地を模した混合ガスを覆土カラムに透過させた結果を図 12 に示す。水分を含んだ状態では透気性が低下し、濃度勾配が安定するまでの時間も長くなり、また濃度勾配からも大気への侵入量が制限されているのが確認される。ただ、図 12A に示すように、埋立地ガス流量を 10 SCCM (standard cc per minutes) と設定した場合、大気への侵入深さは表層 50cm 程度まで確認された一方、100 SCCM とした場合、表層下 10cm 程度までの侵入にとどまっていたことから、ガス発生量も大気への拡散侵入に関連することが示唆された。

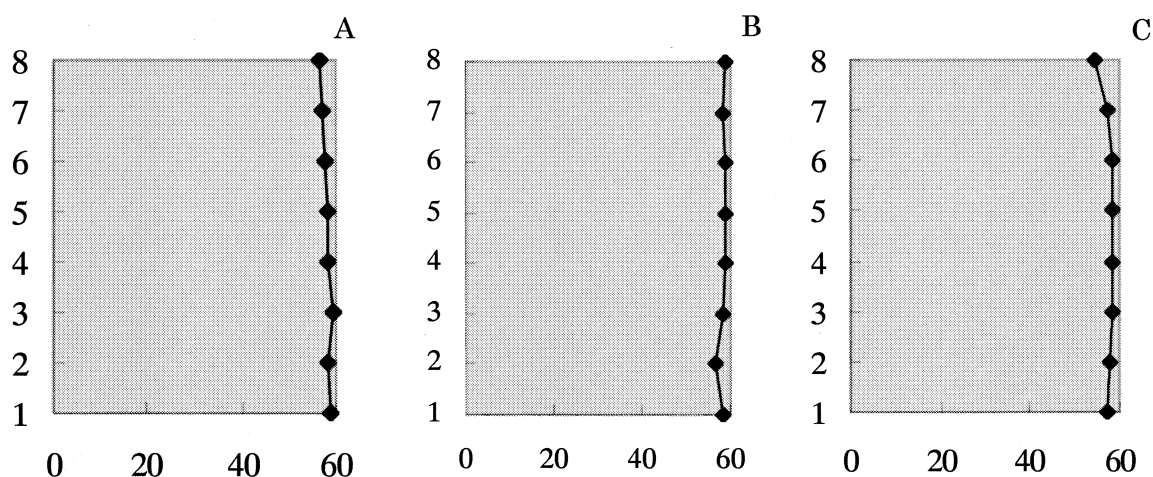


図 12 標準砂を充填した覆土カラム中の垂直メタン濃度分布

A:含水率 5%, 流量 10 SCCM, B:含水率 10%, 流量 10 SCCM, C:含水率 10%, 流量 100 SCCM

カラム内でのガス成分のマスバランスについて表 16 に示す。流入ガス量は設定流量およびガ

ス濃度から、また放出ガス量はカラム上部でのフラックス測定結果にカラム断面積を乗じて算出した。また、メタン酸化率は、二酸化炭素への転換によりバランスが取れていることを確認した上で、メタンガス量の減少から算出した。含水率 10%では、濃度勾配から判断するとメタン酸化に必要な酸素の供給が不足していると考えられるが、実際には最も高いメタン酸化率を示した。今回の実験系においては、含水率 10%が至適条件と考えられたが、その理由として、含水率が 15%の場合は、ガスの透過性および酸素の供給が不足し、十分なメタン酸化の基質が供給されないこと、および含水率 5%の場合は、メタン酸化細菌に必要な水分が不足すること、が考えられた。ただし、両条件ともメタンが酸化されていないわけではなく、いずれも 4 割前後のメタン酸化が確認されていることから、現場のガス発生量ならびに環境条件に合わせて材料を選定することで、覆土層に十分なメタン酸化力を保持させることが可能となる。

表 16 覆土カラムにおけるガスのマスバランス

充填材料	流入ガス量		放出ガス量		メタン酸化率
	メタン	二酸化炭素	メタン	二酸化炭素	
標準砂・含水率 5%	4.7 ml/min	3.2 ml/min	2.9 ml/min	5.0 ml/min	38.3 %
標準砂・含水率 10%	7.2 ml/min	4.8 ml/min	3.5 ml/min	8.5 ml/min	51.4 %
標準砂・含水率 15%	8.9 ml/min	5.9 ml/min	4.7 ml/min	4.7 ml/min	43.8 %

ウ．東南アジアの埋立地を考慮した覆土混合材によるメタン酸化

農業系資材を混合させた覆土材を用いた場合のメタン分解挙動を図 13 に示す。ここでは、埋立地におけるメタン放出量が日本に比べて高いことを考慮に入れてカラムへのガス流量を 100 SCCM に設定して実験を行った。木くずを 5%混入させた標準砂を含水率 10%に調整した場合に、最も高いメタン分解率として 17%が得られた。木くずを混入した覆土材はメタン分解率が総じて高く、木くずを 5%混入させた標準砂を含水率 5%に調整した場合にも、メタン分解率 14%と、他と比較すると高い数値が得られた。その他に高いメタン分解率が得られた覆土材としては、標準砂に稲わらを 5%混入させ含水率を 10%に調整した場合ならびにもみ殻を 5%混入させた水分未調整の場合いずれもメタン分解率 13%といった結果が得られた。混入させる材料が稲わらともみ殻では含水率に応じてメタン分解率が大きく異なることが示された。

異なる覆土材を用いたカラム実験後における覆土材中における *pmoA* のコピー数の分布を表 17 に示す。*pmoA* 遺伝子は、全てのメタン酸化細菌が有する *pMMO* をコードする遺伝子であることから、メタン酸化細菌数との関連性が考えられる。標準砂のみの場合を除き、表層 10cm 下よりも 30cm 下の方が 1-3 オーダー程度 *pmoA* 数が多い傾向が示された。*pmoA* 遺伝子が最も多かったのは稲わらを混入させた標準砂の含水率 10%のカラムの深度 30cm で 1.1×10^8 MPN/g だった。メタン分解率が 10%を超えた混合材および含水率の条件においては、いずれも *pmoA* 遺伝子が 10^7 オーダー以上検出された。以上のことから、細菌数が一定量存在している条件下であれば、メタン分解率に大きく貢献するのは透気係数などの土壌の物理性であることが推測される。

微生物によるメタン酸化が起こるのは表層から酸素が侵入する深度までであるが、一方で、基質であるメタン濃度は表層に近づくに連れて減少する。深度 30cm の方が *pmoA* 遺伝子が多いという結果は、この深度付近におけるメタン酸化細菌の活発な反応を示唆している。

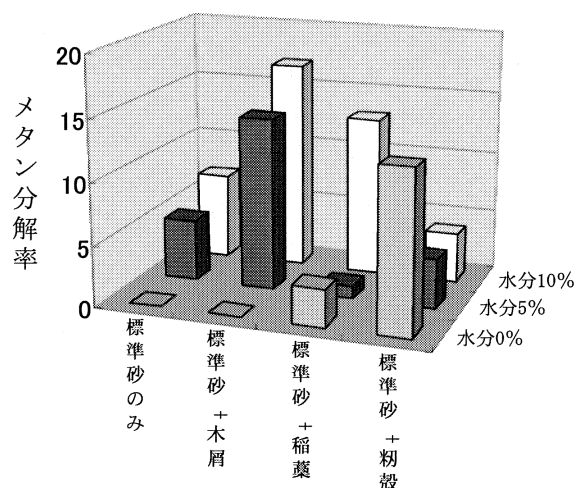


図 13 異なる覆土材によるメタン分解率 (%)

表 17 異なる覆土材における *pmoA* コピー数

サンプル	場所	MPN・コピー/g・土壌
標準砂のみ 含水率 10%	表層 10cm	5.5×10^7
	表層 30cm	6.8×10^6
標準砂+木くず 含水率 5%	表層 10cm	4.2×10^5
	表層 30cm	1.1×10^7
標準砂+木くず 含水率 10%	表層 10cm	3.6×10^5
	表層 30cm	1.6×10^7
標準砂+稲わら 含水率 10%	表層 10cm	2.9×10^5
	表層 30cm	1.1×10^8
標準砂+もみ殻 水分未調整	表層 10cm	7.5×10^6
	表層 30cm	2.1×10^7
標準砂+もみ殻 含水率 10%	表層 10cm	1.8×10^6
	表層 30cm	2.1×10^6

(2) 埋立地におけるメタン排出量計測手法の高度化

① ハノイ市の埋立地からのメタン放出量

ハノイ市の埋立地における地表面メタンフラックス計測結果の概要を、表18に示す。Tay Mo 埋立地での調査においては、LMDによるスクリーニングにより、6地点を放出代表点に選んだ。これらの地点において正のフラックスを示したのは、2地点のみであった。また、この他に無作為に選んだ7地点のうち正のフラックスが検出されたのは1地点のみであった。Tay Mo埋立地に

おけるメタンフラックス分布を図13に示す。29 ml/min/m²が最高値であり、Kriging法による全放出量は1.15 ml/min/m²と算出された。Nam Son埋立地フェーズ1においては、事前スクリーニングにより13地点を代表点として選び、うち10地点で正のフラックスが確認された。無作為に決定した1地点ではメタンフラックスは検出されなかった。Nam Son埋立地フェーズ1地区におけるメタンフラックス分布を図14に示す。最も高いフラックスである150 ml/min/m²を示した地点の周辺に、15.37 ml/min/m²のフラックスが点在していた。対象地からのKriging法による全放出量は21 ml/min/m²と算出された。Nam Son埋立地セル4においては、事前スクリーニングにより16地点を代表点として選び、うち10地点で正のフラックスが確認された。無作為に抽出した2地点の内1地点からも正のフラックスが確認された。Nam Son埋立地セル4地区におけるメタンフラックス分布図を図15に示す。100 ml/min/m²を超えるフラックスがセル北端部分を中心に5点検出されるなど、本地区は極めて活発なメタン生成期にあった。また、対象地からのKriging法による全放出量は76 ml/min/m²と算出された。

以上の結果から、年次の異なる埋立地から発生するメタン放出量は経時的に減少していた。今回調査対象とした3地区に投入される廃棄物は生活系廃棄物が中心でありその性質もほとんど変化していないと考えられる。また、Nam Son埋立地のフェーズ1およびセル4は埋立方法と維持管理が同じである。また、Tay Mo埋立地の埋立方法は積み上げ式であるが、高さがあり覆土が施工されていることから、Nam Son埋立地と同様に内部が嫌気条件にあると考えられる。以上より、3地区を埋立経過年数が違う同じ埋立地と見なして、メタンガス放出量の速度論的解析を行った。

3地区の埋立終了からの経過年数より埋立地からのメタン放出量の変化を図16に示した。図の減少パターンより、メタンガス発生量が次の一次反応式に従うと仮定した。

$$C_t = C_0 \exp(-kt) \quad (c)$$

ここで、 C_0 (ml/min/m²) は反応開始時のメタン発生量、 C_t (ml/min/m²) はt年後におけるメタン発生量、 k (/year) は一次反応定数である。

表18 地表面メタンフラックス計測結果

	フラックス計測地点数内訳				フラックス範囲 ml/min/m ²	平均(ml/min/m ²) と変動係数	全放出量 (ml/min/m ²)
	測点数	正	負	非検出			
Tay Mo	13	3	4	6	-2.8~29	4.38±277%	1.15
Nam Son (phase 1)	14	10	2	2	-0.89~150	22.5±186%	21
Nam Son (cell4)	18	11	7	0	-5.6~770	120±171%	76

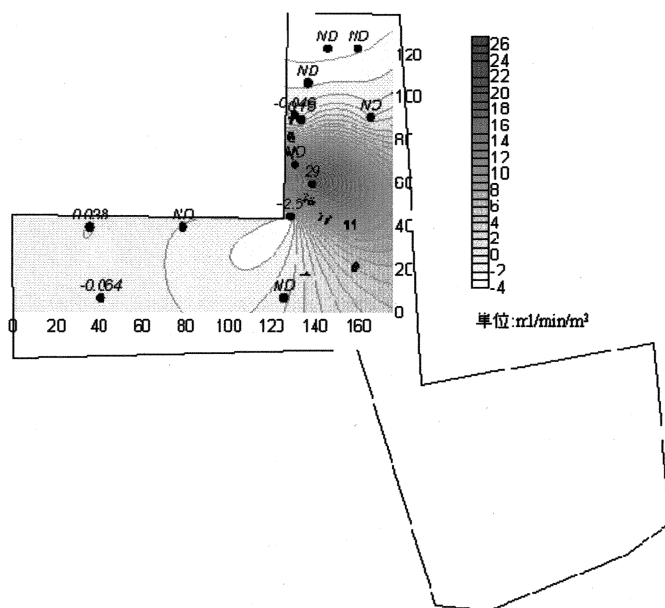


図13 Tay Mo 埋立地におけるメタンフラックス分布

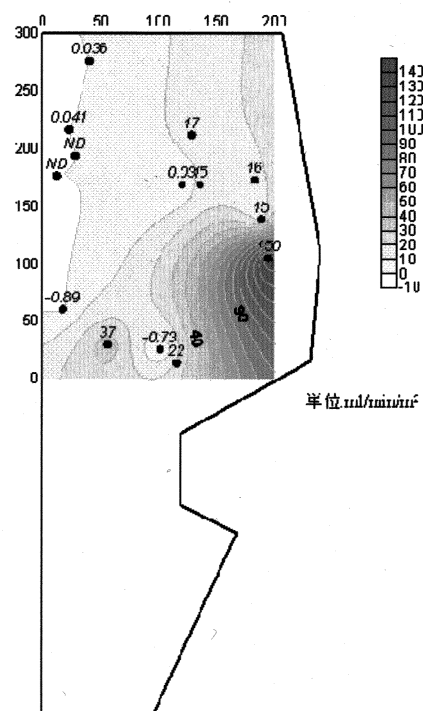


図14 Nam Son埋立地フェーズ1におけるメタンフラックス分布

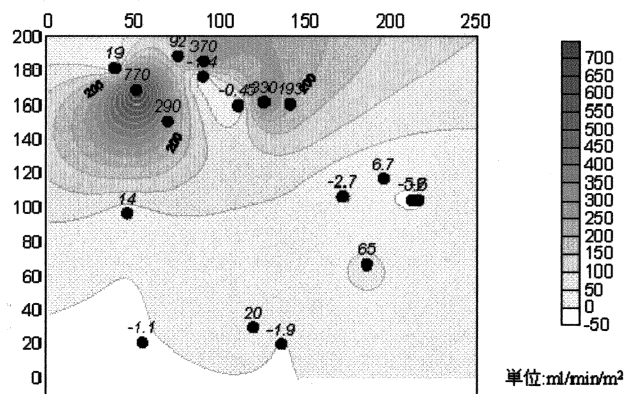


図15 Nam Son埋立地セル4におけるメタンフラックス分布

図16における一次反応速度は0.74 /year また半減期は0.94年と算出された。この半減期はIPCCが定めるデフォルト値（4-7年）^{3,6,14)}に比較して極めて小さい。IPCCの値は主に西欧の埋立地で求められた値であるが、東南アジアの埋立地では廃棄物（食物）の性状、気候（温暖多雨）および埋立地管理の方法が異なるため、廃棄物分解およびメタン発生速度が速いと考えられる。

（1）に示した有機性廃棄物埋立量の経年変化より、First Order Decay（FOD）モデル^{3,6,14)}を用いてメタン放出量の経年変化を推計した。有機性廃棄物埋立量のうち、1997-1999年はTay Mo埋立地、2000-2001年はNam Son埋立地フェーズ1地区、および2002-2004年前半までは同埋立地セル4地区に埋め立てられたとした。また、先に求めた一次反応速度係数に基づいて分解するとした。各埋立品目の生分解性有機炭素（DOC）含有率を、厨芥類0.17、紙・繊維類0.4、木

竹類0.3とし、組成より、埋立物全体のDOC含有率を0.20とし、(a)式より、メタン発生ポテンシャルを求めた。推計結果を図17に示す。現地調査の結果得られたメタン放出量を年換算すると、Tay Mo埋立地で $0.030 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 、Nam Son埋立地のフェーズ1地区で $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ 、同埋立地のセル4で $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ となる。これらの値は図17の推計結果とよく一致している。

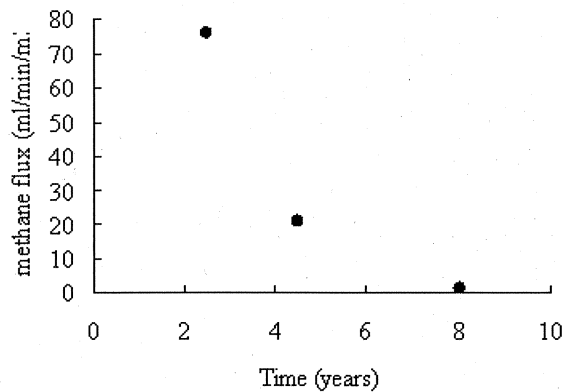


図 16 全メタン放出量の経年変化

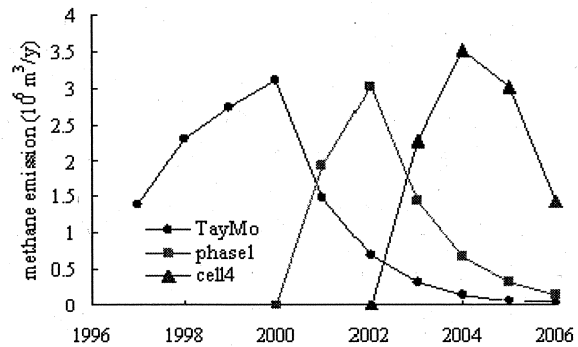


図 17 ハノイ市埋立地からのメタン排出量推計値

②ホーチミン市の埋立地からのメタン放出量

ホーチミン市の Go Cat 埋立地は、地表面にシートを敷設しメタンガス回収および発電を実施している。地表面でのメタンフラックスは、ガス回収のためのシートが敷設されている区画で 0.84 g/hr/m^2 (19.6 ml/min/m^2)、シート未敷設の範囲では 372 g/hr/m^2 (8671 ml/hr/m^2)であった。

一方、Phouc Hiep 埋立地は、約 50ha の敷地を有している最も新しい埋立地である。覆土の厚さはおよそ 20cm 程度であり、廃棄物の飛散防止のため一部シートが被覆されているが、現状ではガス回収は実施されていない。浸出水の水質は COD が 5,000~30,000 mg/l ときわめて高く、内部が強い嫌気状態にあることが推測された。埋立はセル工法で、セル 1 の地表面でのメタンフラックスは、 0.84 g/hr/m^2 (19.6 ml/min/m^2) から 162 g/hr/m^2 ($3,785 \text{ ml/min/m}^2$)、セル 2 のフラックスは 39.8 g/hr/m^2 (928 ml/min/m^2) の範囲であった。以上のように、ホーチミン市の埋立地からはメタン放出量が極めて高い傾向が示された。

③タイ埋立地からのメタン放出量

Hua-Hin 埋立地表面において閉鎖型チャンバー法により計測されたメタンフラックス分布を図 18 に示す。より効率的な調査を実施するための手法として、同埋立地において、閉鎖式チャンバー法の事前スクリーニング手法についても検討した。我が国で観察されるようなメタン放出領域と地表面温度との明確な関係¹⁶⁾は見られなかった。一方、LMD を地表面のスキニングに活用することで、測定地点の決定を行った結果、平均フラックスは A ゾーンにおいて $0.592 \text{ g/m}^2/\text{hr} \pm 155\%$ 、B ゾーンにおいて $2.03 \text{ g/m}^2/\text{hr} \pm 167\%$ と算出された。この値は、我が国で最終処分場において通常観測されるメタンフラックスの 100 倍以上ときわめて高い発生量である。またハノイの埋立地における平均フラックスは、 $0.075 \text{ g/m}^2/\text{hr}$ (埋立完了後 5 年) から $2.06 \text{ g/m}^2/\text{hr}$ (埋立完了後 1 年) であり、ほぼ同程度の値であるといえる。

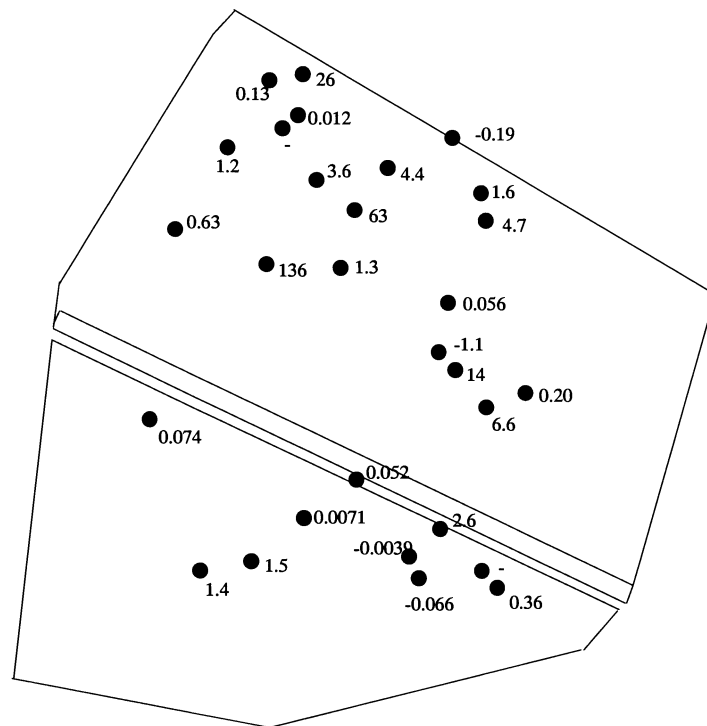


図 18 Hua-Hin 埋立地におけるメタンフラックス分布 (単位:g/m²/hr)

④掘削廃棄物を用いた分解速度の推定

タイにおける Sheldon Arleta モデルの半値時の算出を目的として、Nakon Prathom 埋立地における埋立物掘削および各種分析を行った。表 19 に、今回掘削により得られた試料分析の結果および同じサイトにて以前行われた分析結果を併せて示した。0 年の組成および 1 年の VS および炭素率は、他の分析値と比較して傾向が異なった。組成についてはタイ国内の分析値を参考として半値時の算出を行った。VS の減少から有機物全体の分解を勘案するとともに有機物分である厨芥、紙・繊維、木の組成の変化について検討した結果、厨芥類の半値時は約 2.5 年と算出された。また紙類および繊維類については組成分析で検出できなかった試料もあり、得られたデータだけで判断すると約 2 年となるが、通常厨芥類より半値時が短くなるとは考えられず、厨芥と同じく 2.5 年と設定した。また、木類については 6.5 年ときわめて短い半値時が得られた。これらの設定値は掘削物の性状から判断してタイ特有の気象等の条件により分解が速いという条件を示していると言えるが、検討期間が短くデータの欠損もあることから、その信頼性については十分注意する必要がある。

Nakon Prathom 埋立地における搬入廃棄物計画量を元にして、一次反応モデルおよび Sheldon Arleta モデルによってメタン放出量を評価するとともに、その比較を行った。今回用いた廃棄物組成は対象地域である Nontaburi 県での調査結果調査を踏まえた表 2 に示す組成を用いた。Nakon Prathom 埋立地からのメタン排出量算定結果を図 19 に示す。Sheldon Arleta モデルによると排出量が最大となる時期は一次反応モデルによる算出より遅くなるが、その時期はタイ半値時の場合 2010 年、日本半値時の場合 2012 年となった。また、一時反応モデルで示された二段階のピークを有する排出挙動は確認されなかった。

表 19 埋立物分析結果 単位: %

埋立年数	組成分析									VS	C
	厨芥	紙	繊維	プラ	皮革	木	金属	ガラス	その他		
	70	5.2	0.95	14	0.033	0.53	0.93	2.6	5.8		
0年*	26	13	5.8	24	0.020	20	1.2	5.3	4.6	77	43
1年**	65	0	0.21	35	0.21	0.21	0	0		25	14
2年*	49	3.8		44		4.0			39	44	24
2年**	45	0.19	2.2	50	-	1.1	0.58	0.72		46	25
7年***	39	0	1.9	54	0.53	1.4	0.37	0		30	17

*Chart et al 1999, **実処分場コア分析, ***テストセルコア分析

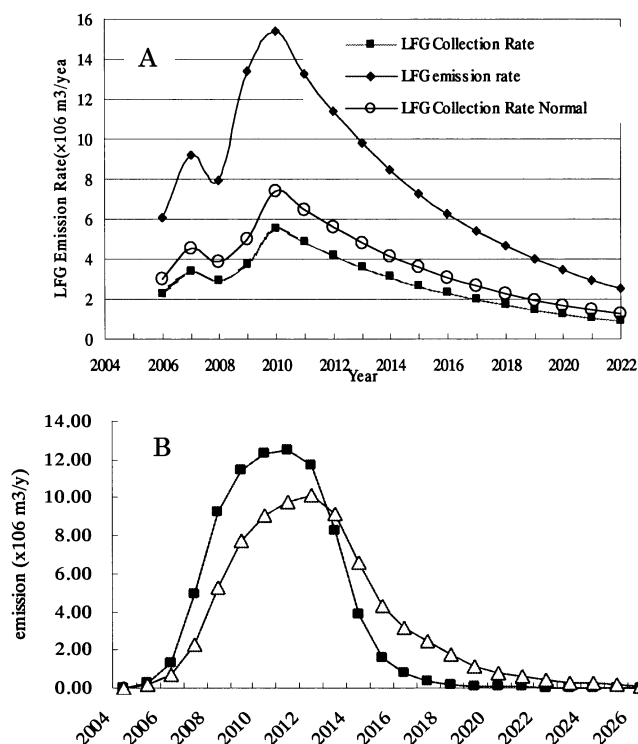


図 19 メタン発生量経年変化,

A:一次反応モデル B: Sheldon Arleta モデル (■タイ半値時, △日本半値時)

⑤埋立地からの全メタンフラックス計測手法の開発

FTIRによるメタン濃度の結果を図20に示す。平均メタン濃度はおよそ2~12ppmの範囲であった。水平方向の風速が小さい時間帯にメタン濃度が高くなる傾向がみられた。また、鉛直方向の風速は概ね0.0~0.5m/sの範囲にあり、調査期間の中では日中（9~15時頃）に大きくなる傾向がみられた。これは処分場の地表面が水平ではなく傾斜があるため、処分場地表面に沿って風が吹くと風の鉛直成分も大きくなるためと考えられた。

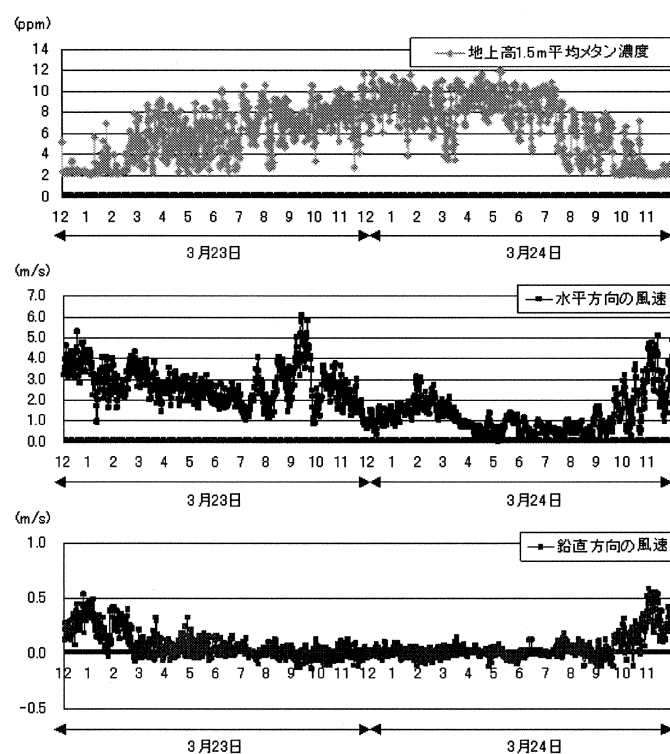


図20 測定結果（上からCH₄平均濃度、水平方向風速、鉛直方向風速）

130m×60mの範囲におけるメタンフラックスを推計した結果を図21に示す。なお、負のメタンフラックスは、鉛直方向の風速がマイナス（上方から下方に吹く成分）になるとフラックスが見かけ上マイナスになっていることを示す。また、メタン濃度及び鉛直方向の平均風速には、1分毎のデータを1時間毎に平均した値を用いた。フラックスは1時間毎の平均で-1,361～5,591 ml/sと算出された。メタンフラックスの平均値は1,975 ml/s（7.11 m³/h）、日累計値は171 m³/dであった。閉鎖型チャンバー法で測定したメタンフラックスの平均値は16.7 ml/min/m²であり、測定領域からの放出量は130 l/min（7.83 m³/h）となり、両者の値は近い。

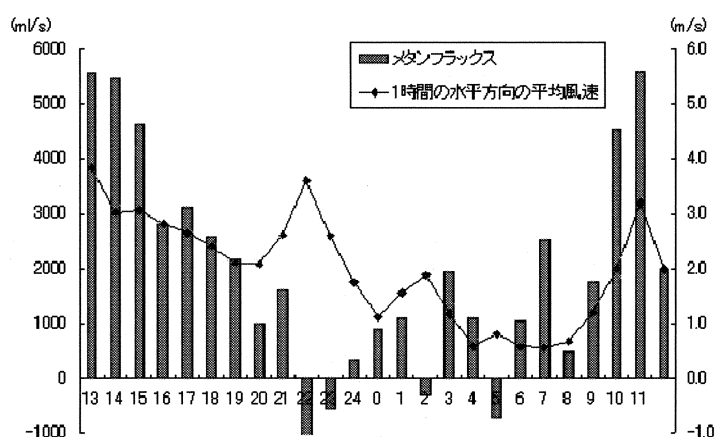


図 21 メタンフラックスおよび水平方向の平均風速の時間変動

⑥埋立地におけるメタン排出量計測手法の高度化

LMDのターゲットとして振動板を用いた場合のLMDーチャンバー法と従来法（グラブサンプルのGC測定）を比較した。従来法で計測した地表面メタンフラックスが $-0.31 \sim 1.11 \text{ g} \cdot \text{CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ の範囲にある我が国の産業廃棄物処分場において、LMDによる測定値（ $n=12$ ）との寄与率（ r^2 ）は0.33、回帰直線の傾きは0.50であった。タイ国の都市ごみ最終処分場では、従来法で測定した地表面メタンフラックスが $-0.07 \sim 274 \text{ g} \cdot \text{CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ の範囲にあり、LMDによる測定値（ $n=21$ ）との寄与率（ r^2 ）は0.82、回帰直線の傾きは1.07であった（図22）。以上は、LMDーチャンバー法がフラックスの大きいところ（ $10^0 \text{ g} \cdot \text{CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ 以上）で有効であり、小さいフラックスにおける計測値のずれはLMDの検出限界（ $5 \sim 10 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ ）によるものであると考えられる。

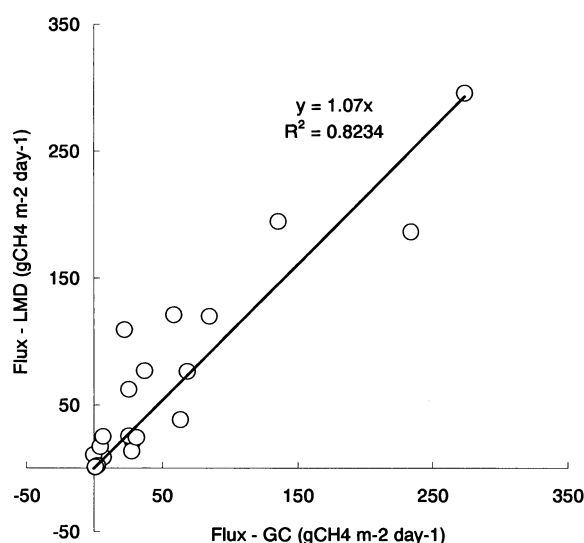


図22 LMDーチャンバー法と従来法の比較（Hua Hin埋立地，振動板）

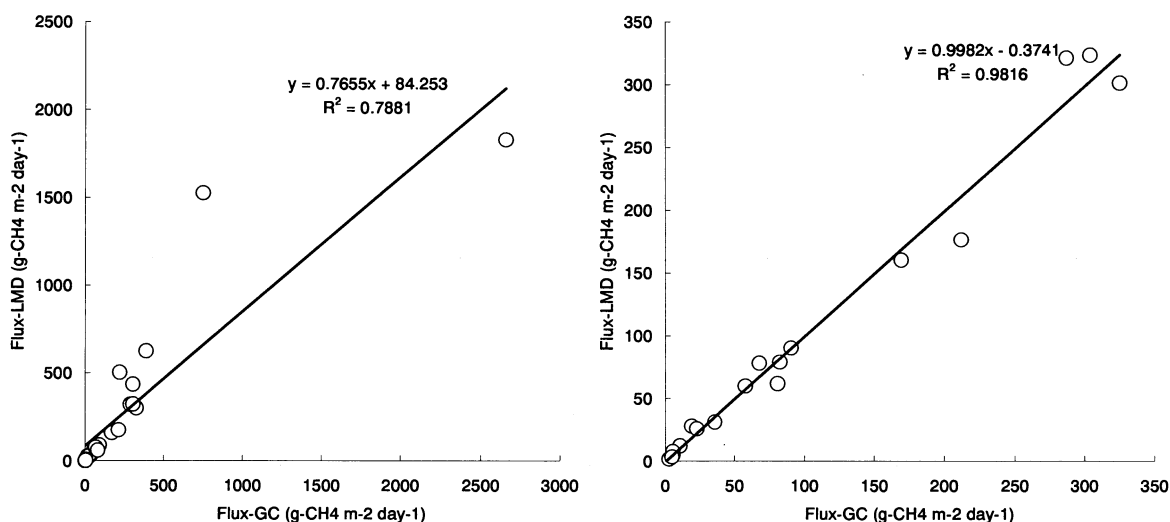


図23 LMDーチャンバー法と従来法の比較（Hua Hin埋立地，反射板）

左：全データ 右： $350 \text{ g} \cdot \text{CH}_4/\text{m}^2/\text{day}$ 以下のデータ

また、ターゲットとして反射板を用いた場合、従来法で計測した地表面メタンフラックスが0.78～2,700 g-CH₄/m²/dayの範囲にあるタイ国の都市ごみ最終処分場において、LMDによる測定値(n=24)との寄与率(r²)は0.79、回帰直線の傾きは0.77であったが、データセットより、350 g-CH₄/m²/day以上を除いた場合(n=19)、寄与率(r²)は0.98、回帰直線の傾きは1.00となった(図23)。フラックスが極端に大きいところでは、計測時間内(5～10 min)にチャンバー内のガス濃度が飽和したと考えられる。

以上は、LMD・チャンバー法の地表面メタンフラックス計測手法の有効性と限界を示すものである。小さいフラックスについては、計測機器の精度向上、また極度に大きいフラックスについてはチャンバーの大きくすることや計測時間短縮が必要である。しかし、現時点でも、10⁰から10² g-CH₄/m²/dayの範囲で地表面メタンフラックスを、現場において数～数十分間で多測点を計測・評価可能な手法として有効であることが示されたといえる。

(3) 埋立地からの温室効果ガス排出量削減対策実施の効果予測モデルの設計

①ソウル市

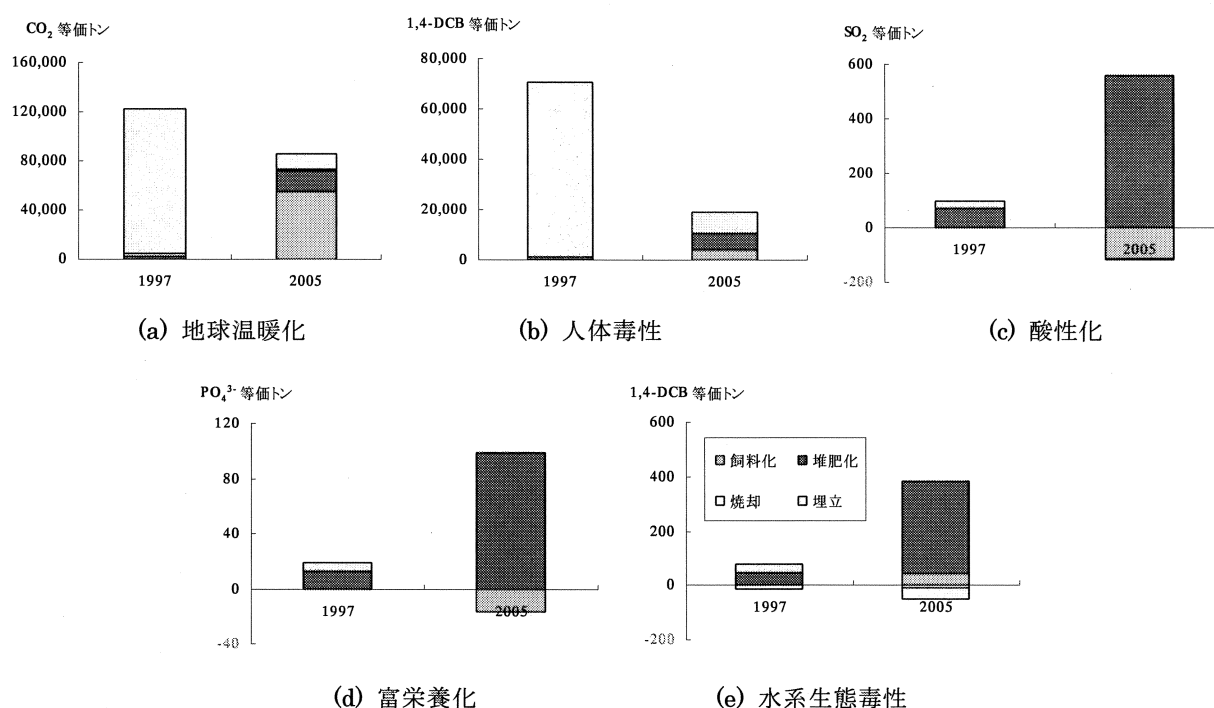


図24 ソウル市の生ごみ政策による環境影響の変化(1997-2005)

韓国の生ごみ分別排出及びリサイクル政策は1997年に導入され、2005年からは全ての残飯の直接埋立が禁止されている。従って、1997年と2005年のソウル市の生ごみの発生量と処理方法における環境影響を比較した結果、埋立処理が90%以上から10%未満に大きく減少した。これによって地球温暖化の影響が12万CO₂-tonから8万6千CO₂-tonに30%ほど減少した。また、埋立ガスが主要な寄与源となった人体への毒性影響も70%程度減った。一方、代表的な生ごみのリサイクル方法である飼料化と堆肥化(コンポスト化)では、飼料化の環境影響が比較的に小さいことが明ら

かになった。堆肥化の場合は、堆肥化の過程から発生するアンモニアなどの悪臭物質の管理が環境的に重要であると判断された。廃棄物処理から発生する汚染物質の他に、処理過程で必要な電力及び燃料の消費も酸性化、富栄養化及び水系生態毒性などに影響を与えていた。ソウル市の生ごみ処理における環境影響の変化を図24に示す。

②ハノイ市

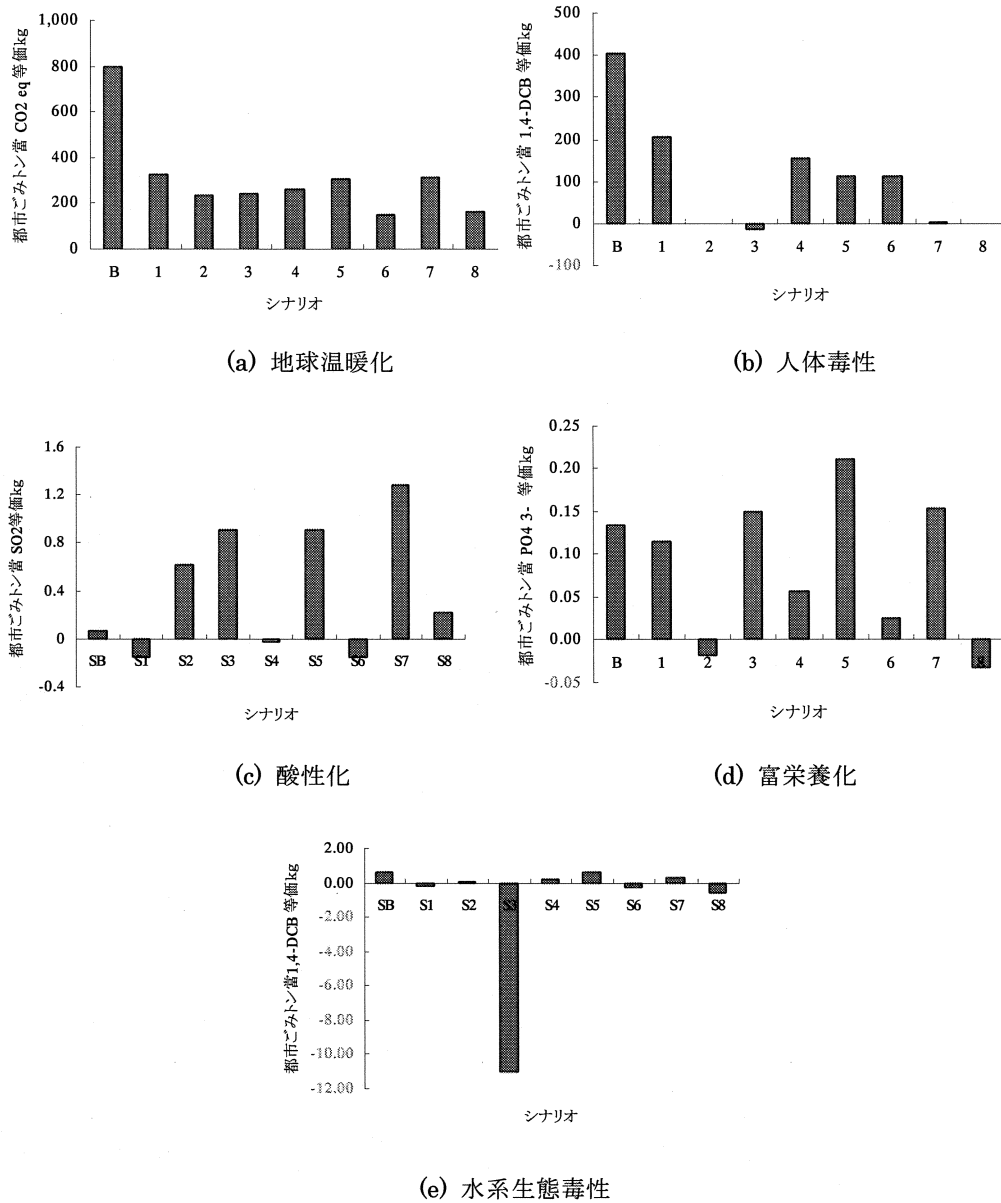


図25 ハノイ市の廃棄物処理シナリオ別環境影響

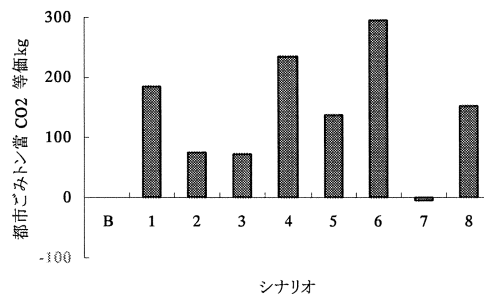


図26 ハノイ市の廃棄物処理シナリオ別温室ガス低減可能量(2003-2012)

現在の埋立地の条件を基準として、S1：埋立ガスの回収(50%)、S2：焼却して埋立、S3：炭化、S4：機械・生物学的な前処理の後埋立、及びS5-S8：有機物の別途処理（それぞれ、有機物の堆肥化、嫌気性消化、有機物を除外した成分の埋立、焼却して埋立）のシナリオ評価を行った。その結果、既に最も広く適用されている埋立ガスの回収シナリオはエネルギーの消費は少ないが、埋立地の消費、環境的影響及び温室効果ガス低減量などの側面で比較的评价が低かった。一方、焼却や炭化などの熱処理の場合は、エネルギーの消費量が多いが、埋立容積は非常に大きく減少した。その他、有機物を別途に処理する場合も、40%以上の埋立容積の減少効果を期待することができた。また、廃棄物の処理によるエネルギーの回収は、化石燃料の生産または消費を回避するため、環境的に非常に肯定的な効果を示した。CDM事業に関連して温室効果ガスの低減量を比較した。埋立ガスの回収により、埋立廃棄物の1トン当たり約200 kg-CO₂が低減できると評価され、CDM事業として潜在的価値が大きいことが確認された。しかし、環境的影響の側面では肯定的ではなかった。さらに、有機物を生物学的に処理してリサイクルする方法、あるいは埋立する方法は140-300 kg-CO₂の温室効果ガスを低減できるだけでなく、埋立ガスの回収に比べて環境的影響と埋立地所要量も小さくなることが明らかになった。特に、好気性処理よりは嫌気性処理がエネルギー回収による利益があるため、CDM事業としてもっと有利であると評価された。ハノイ市における埋立対象の固形廃棄物の処理改善による環境影響及び温室効果ガスの低減可能量を、図25及び図26に示す。

5. 本研究により得られた成果

- (1) アジアの開発途上国において廃棄物管理は優先順位が低い課題であり、将来的に埋立地が大量の有機性廃棄物を受け入れてメタンを発生し続けることを意味している。この点でアジアにおける埋立地のCDM事業が廃棄物管理の改善と地球温暖化の防止に重要である。また、アジアの廃棄物ストリームにおいては、有機物のリサイクルは進められているものの、廃棄物の野積みや野焼きが未だ主流であり、収集率の向上を基本として、有機性廃棄物の資源化と埋立地の設置と改善が課題となっている。
- (2) ベトナム・ハノイ市ならびにホーチミン市を事例対象地域として、既存資料と現地調査の組み合わせにより、埋立地に向かう有機性廃棄物ストリームを推計する手法を示した。有機性廃棄物埋立量の精緻な推計のためには、廃棄物の発生量または収集量だけではなく、直接埋立、資源化処理等のストリーム毎の廃棄物の組成を求めることが重要である。

(3) 東南アジア諸国に適用可能、維持管理が容易、安価な新しい排出量削減技術として、覆土によるメタン酸化技術を示した。現地調達可能な農業系資材として、木くずを混入した砂（含水率10%）において、17%というメタン分解率が達成され、メタン酸化反応は表層から30cm下で活発であることが示された。東南アジア地域の気候の特徴である雨季と乾季に対応可能という観点からは、幅広い含水率で高いメタン分解率を示した木くず混入覆土材を用いるのが適している。また、メタン酸化細菌数が一定量（*pmoA* 遺伝子数で 10^7 オーダー程度）存在していれば、メタン酸化に影響するのは透気係数などの土壌物性であることが示唆された。

(4) 最終処分場における温室効果ガス排出量を観測し、排出量推計のための速度定数を評価した。廃棄物埋立量と埋立物組成の統計と、ガス放出量の観測や廃棄物の掘削試料から評価されたメタン生成速度を用いることで、埋立地からのメタン放出量が正確に予測可能であることを示した。また、以上で評価したメタン排出量ならびに速度定数は、情報が限られている東南アジア地域の廃棄物埋立地からのメタン排出挙動に関する貴重な知見である。

(5) 埋立地表面におけるフラックスを簡易かつ迅速に計測する手法として、赤外線レーザーメタン検出器(LMD)を利用した手法（LMD・チャンバー法）を開発し、国内ならびにタイの埋立地に適用して従来法と比較した。本手法は、小さいフラックスならびに極度に大きいフラックスに対する改善が必要であるが、現時点でも、 10^0 から 10^2 g-CH₄/m²/dayの範囲では従来法と同等にフラックスを計測することが可能であり、現場において、数～数十分間で、多測点を計測・評価可能な手法として有効であることを示した。また、オープンパスFTIRを用いた全メタン放出量計測手法は、低労力であり、地形に左右されず、連続観測可能であり、閉鎖式チャンバー法に代わる埋立地メタン放出量のモニタリング手法として有望であると考えられた。

(6) 廃棄物処理分野のCDM事業の環境に対する持続可能性の評価に、事業導入前後における廃棄物ストリームをバウンダリとしたLCAが有用であることを示した。また、CDM事業による温室効果ガスの低減効果と他の環境影響の間にはトレードオフの関係があるため、温室効果ガス削減量が最大な技術導入が、必ずしも環境面で持続性が最大ではないことを、アジア都市の事例より示した。

6. 引用文献

- 1) 池口孝 (1983): 埋立地における発生ガスの挙動 (その3) , 都市清掃, 36, 298-302
- 2) 環境省 温室効果ガス排出量算定方法検討会 (2002): 温室効果ガス排出量算定量に関する検討結果 第3部 廃棄物分科会報告書 平成14年8月
- 3) IPCC (1997): Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Greenhouse Gas Inventory, Reference Manual, JT Houghton, LG Meira Filho, B Lim, K Treanton, I Mamaty, Y Bonduki, DJ Griggs and BA Callender (eds), IPCC/OECD/IEA, UK Meteorological Office, Bracknell
- 4) F. McDougall, P. White, M.Franke, P.Hindle (2001): Integrated solid waste management: a Life Cycle Inventory, Blackwell Publishing, UK.
- 5) J.B. Guinee (2002). Handbook on life cycle assessment – operational guide to the ISO standards, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- 6) IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Eggleston

- H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds), IGES, Japan
- 7) White, P.R., Franke, M. & Hindle, P. (1995). Integrated solid waste management:a life cycle inventory, Balckie Academic & Proferssional
- 8) McDougall, F., White, P., Franke, M. & Hindle, P. (2001). Integrated solid waste management:a life cycle inventory 2nd edition, Blackwell Publishing
- 9) World Bank (1999): What is waste: Solid waste management in Asia, <http://www.worldbank.org/html/fpd/urban/publicat/whatawaste.pdf>
- 10) Idris A., Inanc B. and Hassan M.N. (2004): Overview of waste disposal and landfills/dumps in Asian countries, Journal of Material Cycles and Waste Management, 6(2), 104-110
- 11) Inanc B., Idris A., Terazono A. and Sakai S. (2004): Development of a database of landfills and dump sites in Asian countries, Journal of Material Cycles and Waste Management, 6(2), 97-103
- 12) JICA (2002): ヱトナム社会主義共和国ハノイ市廃棄物管理改善計画基本設計調査報告書
- 13) (社)国際厚生事業団 (1994) ベトナム社会主義共和国ハノイ市及びホーチミン市廃棄物調査報告書, 平成 6 年 3 月
- 14) IPCC (2000): Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, J Penman, D Kruger, I Galbally, T Hiraishi, B Nyenzi, S Emmanul, L Buendia, R Hoppaus, T Martinsen, J Meijer, K Miwa and K Tanabe (Eds), IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japan
- 15) Tomonori Ishigaki, Masato Yamada, Masanao Nagamori, Yusaku Ono and Yuzo Inoue (2005): Estimation of Methane Emission from Whole Waste Landfill Site Using Correlation between Flux and Ground Temperature, Environmental Geology, 48(7), 845-853

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表

- ①Tomonori Ishigaki, Masato Yamada, Masanao Nagamori, Yusaku Ono and Yuzo Inoue
Estimation of Methane Emission from Whole Waste Landfill Site Using Correlation between Flux and Ground Temperature
 Environmental Geology, 48, 7, 845-853, 2005

(2) 口頭発表

- ①Tomonori Ishigaki, Masanao Nagamori, Masato Yamada, Yusaku Ono, Yuzo Inoue
Emission of non-methane aliphatic hydrocarbons from waste landfills
 Special Symposium on Technology and R&D Trends on Inorganic Waste Recycling (May. 2005, Andong, Korea)
- ②Tomonori Ishigaki, Hiromi Sawamura, Kazuto Endo, Masato Yamada, Masanao Nagamori, Yusaku Ono, Kazuo Kamura, Yu Hara, Mistuyasu Takata, Yuzo Inoue
Analysis of microbial community and biodegradation of waste in landfills in Japan
 10th International Waste Management and Landfill Symposium (Oct. 2005, Sardinia, Italy)

③Yamada M., Ishigaki T., Endo K., Inoue Y., Nagamori M., Ono Y., Ono Y.

Distribution of temperature and methane flux on landfill surface

10th International Waste Management and Landfill Symposium, (Oct. 2005, Sardinia, Italy)

④石垣智基, 遠藤和人, 山田正人, 井上雄三, 長森正尚, 小野雄策, 福井博

最終処分場地表からの埋立地ガス放出挙動の原位置評価手法の開発

第 16 回廃棄物学会研究発表会 (2005 年 11 月 : 仙台)

⑤石垣智基, 山田正人, 植木義晴, 大塚康治, Bulent Inanc, 大迫政浩, 井上雄三

東南アジア地域の廃棄物埋立地からの温室効果ガス排出量の算定ーベトナム・ハノイ市における事例

第 27 回全国都市清掃研究発表会 (2006 年 2 月 : 高松)

⑥遠藤和人, 小峯秀雄, 石垣智基, 呉佳曄

多機能型最終覆土の最終処分場への適用に関する提案

第 41 回地盤工学研究発表会 (2006 年 7 月 : 鹿児島)

⑦山田正人, 遠藤和人, 阿部誠, 坂内修, 朝倉宏, 井上雄三, 相沢智之, 梅宮知佐, 中根英昭, 石垣智基, 上江川幸雄, Komslip Wang-Yao, Sirintornthep Towrayoon, 高橋通正, 福井博, 小野芳朗

最終処分場からのメタン放出量の 2 つの新しい現場計測手法

第17回廃棄物学会研究発表会 (2006年11月, 小倉)

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

本研究で得られたマテリアルフロー解析による埋立地からの温室効果ガス放出量の推計手法や排出係数に関する知見は、我が国における日本国温室効果ガスインベントリ報告書、ならびに 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventoriesの作成に活用された(研究代表者は両報告書の検討委員)。また、アジア途上国における埋立地からの温室効果ガス放出量の推計手法、観測手法ならびに削減方策の評価手法は、民間企業との共同研究により、我が国からのCDMプロジェクト立案への活用を予定している。