

課題名	B-071 廃棄物分野における温室効果ガスインベントリの高度化と削減対策の評価に関する研究		
課題代表者名	山田正人（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）		
研究期間	平成19-21年度	合計予算額	99,933千円（うち20年度 31,488千円） ※予算額には、間接経費を含む。
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(1) 我が国の廃棄物ストリームにおける窒素フローの評価とN₂OおよびNH₃の削減対策の評価 (学校法人龍谷大学)</p> <p>(2) 我が国の排水ストリームにおける炭素・窒素フローの評価とCH₄およびN₂Oの削減対策の評価 (国立大学法人大阪大学)</p> <p>(3) アジア途上国の廃棄物ストリームにおける炭素フローの評価とCH₄の削減対策の評価 (独立行政法人国立環境研究所)</p>		
研究概要	<p>研究概要</p> <p>1. はじめに（研究背景等）</p> <p>我が国では京都議定書による温室効果ガス排出削減目標の達成が非常に困難な状況にあり、削減対象とするべき排出源について、温室効果ガスの種別に技術導入効果を最大化する戦略が緊急に求められる。また、途上国等に対してクリーン開発メカニズム（CDM）等を活用する戦略が同時に重要となる。廃棄物分野には排出源として、埋立、排水の処理、廃棄物の焼却等が含まれ、プラスチック焼却による二酸化炭素（CO₂）と共に、焼却および有機物の生物分解によるメタン（CH₄）および一酸化二窒素（N₂O）の排出が大きく、2004年度では全分野のそれぞれ31%および16%を占める。CH₄およびN₂Oは地球温暖化係数が大きいいため単位削減量に対する効果が大きく削減のターゲットとして有利である。また、現在のインベントリには、世界的に研究例が少なく確実な排出係数が設定できない（埋立地N₂O、生物処理[堆肥化]CH₄・N₂O、野焼きCO₂・CH₄・N₂O）、または我が国が設定した排出係数が用いられているが取得された時期が古い（焼却CH₄・N₂O、排水処理CH₄・N₂O）などの問題があり、これらの更新と高度化が学術的かつ政策的に重要である。特に、2000年以降の循環型社会の形成による技術の多様化と進歩に合わせて排出係数を更新しなければ、正しい削減量が評価できず、適正な技術の選択がなされない。さらに、廃棄物処理システムが未整備である途上国へ埋立地CH₄を削減する技術を導入すれば大きい削減効果が見込まれ、目標達成の重要な手段となる。加えて、IPCC2006年ガイドラインに言及された窒素酸化物（NO_x）、アンモニア（NH₃）等前駆物質の排出量算定法の検討を、上記の排出係数の更新と合わせて、2012年以降も視野に入れて進める必要がある。廃棄物は産業および生活から不可避にかつ定期的に発生するため活動量はpush型のフローを形成する。したがって、廃棄物分野では、省エネのように需要を絞り込むのではなく、廃棄物の種類毎に炭素および窒素フローを特定・制御して、全体として温室効果ガス排出量が最小化される処理・処分技術へと導くことが戦略である。焼却処理が主流である我が国においてはN₂O・NH₃をもたらす窒素フローが、直接埋立処分が主流である途上国においてはCH₄をもたらす炭素フローの制御が重要である。また、主たる環境保全と両立する技術を選ぶ必要がある。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>サブテーマ(1)では廃棄物分野における排出源である、廃棄物の燃焼（焼却・野焼き）、投棄地（埋立地・不法投棄）からの含窒素温室効果ガスおよびその前駆物質の排出挙動を明らかにすることを目的とする。サブテーマ(2)では、排水処理分野におけるCH₄およびN₂O排出係数インベントリの高度化により、排水ストリームにおける炭素・窒素フローを明らかにすること、および処理技術ごとのCH₄・N₂O排出量削減効果を定量的に評価することを目的とした検討を行った。サブテーマ(3)では、アジア途上国の廃棄物処理・処分過程における炭素フローを明らかにし、有機物埋立回避と埋立技術導入によるCH₄削減および環境保全効果を求めることを目的とした。地域性、産業構造、気候帯毎に、埋立地CH₄の排出モデルパラメータと削減技術の適用性・効果を整理し、排出量算定とCDM事業化のための技術導入スキームの構築を試みた。</p> <p>3. 研究の方法</p> <p>(1) 我が国の廃棄物ストリームにおける窒素フローの評価とN₂OおよびNH₃の削減対策の評価</p> <p>1) 一般廃棄物処理における窒素ストリームの評価</p>		

廃棄物中の窒素の算出において対象とする性状情報は、物理組成の調査データが充実していた平成10年度で統一した。また総量については平成18年度で統一した。元素組成についてはまず、乾ベースの組成に換算し、ごみの物理組成毎の窒素含有量から累積加算することにより、乾燥ごみ1 kg中の窒素量を算出した。焼却処理残渣および他の中間処理の残渣の窒素濃度については処理方式ごとの年間処理量の割合を調査し、各処理方式で発生する残さ性状の違いも加味して求めた。

2) 処分場表面からのガス排出実態調査

閉鎖型チャンバーを土壌表面に設置し、チャンバー内の成分濃度増加を時間の関数としてフラックスを算出した。閉鎖型チャンバー法により採取したガス中の CH_4 および亜酸化窒素濃度は、水素炎イオン化検出器およびパルス放電光イオン化検出器付きガスクロマトグラフGC14Bで分析した。

3) 埋立地覆土における安定同位体比による CH_4 酸化率算出法

覆土内のガスを採取するために土壌表面を約40cm掘削した地点よりガスを採取した。覆土における CH_4 酸化率は安定同位体比の変化に基づく覆土層上下のマスバランスにより算出した。

4) 廃棄物焼却施設における N_2O 等の排出調査

12の一般廃棄物焼却施設と4つの産業廃棄物焼却施設を調査対象とした。排ガスの採取は誘引通風機前等で行った。排ガスをテドラバッグに採取したが、 N_2O 測定用のガス採取は、バッグ中での N_2O の生成防止のため H_2O 、 CO_2 等を前除去して行った。これとは別に同時にガスを採取し、ガス中の NO_x 、 O_2 、 CO 、 CO_2 濃度をガス濃度連続測定装置で測定した。

5) もみがら、RDF（ごみ固形燃料）の七輪を用いた燃焼による N_2O 等の排出調査

野焼きを模擬した七輪による燃焼実験を行った。すなわち、七輪の約10cm上にステンレス製あるいは蛇腹式のプラスチック製ダクトを置きファンで吸引した。燃料はもみがらとRDFを用いた。ガスの採取および分析は一般廃棄物焼却炉での調査に準じて行った。

(2) 我が国の排水ストリームにおける炭素・窒素フローの評価と CH_4 および N_2O の削減対策の評価

1) 産業排水処理施設に関するインベントリデータ調査

H県のガス製造業者（A社）及びS県のプラスチック製造業者（B社）に対して実施した。

2) し尿処理施設からの CH_4 、 N_2O 排出量の精緻化

文献調査によって、標準脱窒素処理方式および高負荷脱窒素処理のし尿処理施設の排出係数の精緻化を試みた。

3) コミュニティ・プラントにおける温室効果ガス排出量の調査

処理人員と処理方式が異なるS県の8つのコミュニティ・プラントにおいて CH_4 および N_2O を2007～2009年に測定した。

4) 終末処理場から排出される CH_4 、 N_2O の調査および排出係数の精緻化

終末処理場の温室効果ガス排出係数の根拠資料となっているこれまでの調査結果の確認、ならびに昨今の調査事例の文献調査を行った。また、2009年に東京都下水道局施設管理部にヒアリング調査を行った。

5) 統計からみた下水処理プロセスの処理水質および温室効果ガス排出量の評価

下水を 1m^3 処理するために排出される環境負荷物質量を下水の生物処理プロセスごとに明らかにした。負荷物質ごとの地球温暖化係数および富栄養化係数を乗じて特性化し、影響領域ごとに総和を求めることで地球温暖化影響および富栄養化影響を算定した。

(3) アジア途上国の廃棄物ストリームにおける炭素フローの評価と CH_4 の削減対策の評価

1) 埋立地 CH_4 排出モデルのアジアへの適合化と埋立地メタン削減術の評価

東南アジアのタイ、マレーシア、および我が国において生ごみ等の有機性廃棄物を埋め立てた実績のある埋立地においてボーリングバー穿孔による孔内ガス濃度測定と閉鎖型チャンバー法でメタン放出量等の計測を行った。

2) 世界における都市廃棄物ストリームの形成パターンの提示

文献ならびに専門家ワークショップより、世界の国または都市における廃棄物ストリームと廃棄物フローを把握・整理し、直接埋立、焼却処理、生物処理の割合を三角図（ternary diagram）上に示した。

3) 東南アジアにおける都市廃棄物ストリームの把握

東南アジア8カ国の中央政府及び主要都市（主に首都）に対して調査票を送付し、都市廃棄物の収集・処理フロー、物理組成等の都市廃棄物管理データの提供を依頼した。また、ベトナム国の90の都市環境公社（URENCO: Urban Environment Company）に対して都市廃棄物管理に関する調査票を配

布した。さらにハノイ近郊の15社の工場を有する企業（製造業）に対して、廃棄物の排出量、品目、ならびに排出先（処理技術）についてアンケート調査実施した。

4) 埋立地CH₄削減によるCDM事業の持続性評価手法の開発

ハノイ市について現状シナリオとごみ処理を改善する4つの代替シナリオを設定し、IPCCガイドライン、化学量論計算およびIWMモデルを用いて、環境影響と温室効果ガス排出量、エネルギー消費量、埋立処分量、認証排出削減量（CER）ポテンシャルを評価した。また、ベトナム国において人口統計等を用いて2010年から2025年までの都市廃棄物排出量を推計し、現状維持と国家戦略の再資源化目標利率を達成する3つの代替シナリオについて温室効果ガス排出量の推移を予測した。

4. 結果及び考察

（1）我が国の廃棄物ストリームにおける窒素フローの評価とN₂OおよびNH₃の削減対策の評価

1) 一般廃棄物処理における窒素ストリームの評価

平成18年度においては、日本全国の収集ごみ量約4900万tのうち、含有されている窒素量は約22万t（約0.45%）であった。焼却施設における処理方式ごとの1年間の処理量の割合は、ストーカ式が85%ならびに流動床式が15%であり、処理方式を勘案した、焼却灰中の可燃分は5.1%になると算出された。直接焼却以外にもその他の中間処理を経た残渣が焼却処理され、焼却灰として埋立処分される量は436万t（うち、窒素量は2200 t）であった。直接埋立と中間処理残渣の埋立により、合計681万tの廃棄物が埋め立てられ、その内の窒素量は8700 t（約0.13%）と算出された。収集ごみ中に22万t 含有されていた窒素は、間処理を経ることで減少し、全体で8700 tとなり、そのうち各処理施設から最終処分場へ埋め立てられた窒素量は2800 t程度であった。同様にごみ中の含有率で見ても、収集時には0.45%であったのが埋め立て時には0.13%にまで下がっている。よって多くの窒素は焼却処理等で排出するガスとして窒素酸化物などのかたちで大気中などに放出されていると考えられた。廃棄物の発生時点において、直接搬入ごみ中に占める窒素の割合は全体の収集ごみに対しては2.7%にも満たなかった。しかし、最終処分場に一年で持ち込まれる廃棄物中の窒素8700 tのうち、その68%近くが直接埋立によって持ち込まれることが明らかにされた。将来的な廃棄物管理の変化に伴い物理組成が変化することで、窒素ストリームも強く影響を受ける可能性が推測された。直接埋立を処分場への窒素負荷という観点で捉え、廃棄物管理の高度化による窒素搬入量の削減と、それに伴う中間処理施設への窒素負荷増加など、長期的な廃棄物管理体系の監視が必要であると考えられた。

2) 埋立地からのCH₄排出係数の評価

各サイト埋立期間の違いによってCH₄フラックスは異なるが、全てのサイトにおいて処分場の安定化の進行に伴い、時間経過とともにCH₄排出量が漸減していることが示された。2004年6月に埋立が終了しているANサイトにおいては、他のサイトに比べ比較的高いフラックスが確認された。他のサイトは埋立終了から5年から15年経過しており、埋立層内における有機物の分解が進んでいると推測される。またANサイトにおける処理廃棄物は、事業系および家庭系一般廃棄物、下水汚泥を含む産業廃棄物などの多くが焼却処理を経ないで直接埋め立てられており、分解性有機物が多量に処分されている。これらのことから埋立終了からの経過日数、また埋立物の特徴によって、CH₄生成量が大きく影響されると考える。FSサイト、ANサイト、SSサイトおよびNHサイトにおけるCH₄排出量の排出挙動より、全サイトにおける埋立終了から調査実施日までの期間およびCH₄フラックス測定結果に基づき、CH₄排出量の経時的な減衰が一次反応式に従うと仮定して、一次反応速度定数（ k ）の算出を行った。算出結果より、FSサイト、ANサイト、SSサイト、NHサイトおよびOCサイトにおける k の値はそれぞれ0.11 /年、0.06 /年、0.16 /年、0.12 /年および 0.36 /年であった。これらの値は、IPCCの定める排出インベントリ算定ガイドライン(2006)によるデフォルト値 $k = 0.03$ /年に比べて高く、日本国内の廃棄物埋立地に対して、0.06-0.16 /年を新たな分類として提案できる可能性が示唆された。また、実測値から一次反応速度（ k ）を算出することにより、廃棄物の分解に伴うCH₄排出量の減衰をより正確に示すことが可能である。

3) 埋立地からのN₂O排出量の評価

埋立地から発生するN₂Oは現在のところ温室効果ガスの算出対象となっていないが、しばしばその放出が懸念されている。本調査により埋立地からのN₂Oの排出自体は確認されたが、調査地点数に対する検出地点数の割合は極めて小さく、CO₂換算でCH₄の10分の1から100分の1程度であることが確認された。CH₄とN₂Oの両フラックスの関係性には、(i) CH₄フラックスの増加とともにMichaelis-Menten型の飽和曲線を示すもの、(ii)非常に小さいCH₄フラックスに対してN₂Oのフラックスを示す2パター

ンが確認された。前者は、当該地点から排出されるガスが、嫌氣的反応に伴って生成したものであり、主に脱窒過程で生成した N_2O であることが示唆される。一方後者は、当該地点から排出されるガスが、強い嫌氣的反応によるものではない、あるいは当該地点付近が比較的好氣的条件にあることによると推測される。すなわちこれらの地点より排出される N_2O は好氣的な硝化反応過程での生成可能性が示唆された。処分場からの N_2O の排出は CH_4 に比べると低いと判断されるが、埋立層の環境変化に伴う排出挙動の長期的な変動については充分明らかではなく、今後も注目する必要があるといえる。

4) 処分場表層における CH_4 酸化率の評価

各地点における CH_4 酸化率の実態調査をもとにサイトごとの平均値を算出した結果、国内処分場の CH_4 酸化率は9.5%から22%までの範囲で分布していた。すべてのサイトの結果をまとめると、 CH_4 酸化率は16%と算出された。処分場毎の CH_4 排出量と CH_4 酸化率を比較したところ、日本国内の埋立地において排出量が低いほど酸化率が高くなる傾向にあることが示された。この結果より覆土内における CH_4 酸化の活性が高いほど CH_4 排出量が低くなることが考えられる。また、埋立終了からの期間が長ければ CH_4 酸化率も高いことが示された。日本の埋立地では、埋立終了してからの安定化進行につれて CH_4 排出量が低くなることで、 CH_4 酸化率の増加に影響しているということが考えられた。日本では埋め立てられる廃棄物が焼却などで無機化されており、有機物量が少なく、廃棄物層における CH_4 発生ポテンシャルが諸外国に比べて低いこと、埋立終了してからの時間経過による CH_4 排出量の低下が酸化率の増加に影響しているということから、 CH_4 酸化挙動は CH_4 排出量に依存しているということが考えられた。

5) 廃棄物焼却施設における N_2O 等の排出挙動

一般廃棄物焼却施設における N_2O 、 CH_4 の濃度および排出係数は1993年の安田のストーカ式焼却炉の報告例に比べて1桁以上低いことがわかった。これは、この間実施されたダイオキシン類対策により、燃焼温度の高温化、滞留時間の確保、ガス攪拌が進んだためと思われる。特に N_2O 、 CH_4 の場合、大気中の濃度レベルの低いものが半分以上を占めた。 N_2O 濃度は燃焼温度との間に負相関が、 CO との間には正相関がある場合が多かった。 N_2O 、 CH_4 との間に何らかの関係があるとはいえない。 CH_4 の相関係数をみると、前述した N_2O ほどの関係はみられなかった。 CO の相関係数をみると、燃焼温度と負相関がある場合が多かった。以上のことから、相対的ではあるが、 N_2O 、 CO 等に最も関係するのは燃焼温度といえる。しかし、燃焼温度は施設により測定する位置が異なるため、施設相互間で共通項目として単純に使用できないことに注意する必要がある。

産業廃棄物焼却施設における通常運転時での排ガス濃度等および排出係数の算出結果は、今回調査した施設が大型のものが多かったためか、一般廃棄物焼却施設に比べて特に高いということはない。 N_2O 濃度は流動床式焼却炉で高く、下水汚泥の焼却施設では最も高かった。

6) もみがら、RDFの七輪を用いた燃焼による N_2O 等の排出挙動

野焼きを模擬して行った七輪による燃焼実験で、もみがら、くだいたRDFともくすぶり状態で CO 、 CH_4 などの未燃ガス成分の濃度が高かった。くすぶり状から小炎燃焼への移行で CO_2 が上昇、 CO が下降した。RDFの場合、小炎燃焼で NO_x が急増した。RDFを加湿して燃焼させ、くすぶり状態から小炎燃焼への移行でも CO_2 の増加がみられた。くすぶり状態でも七輪底部の温度は $600^{\circ}C$ 近くになっている場合があることに注意する必要がある。

(2) 我が国の排水ストリームにおける炭素・窒素フローの評価と CH_4 および N_2O の削減対策の評価

1) 産業排水処理施設に関するインベントリデータ調査

ガス製造業者に対する調査から、生物処理の前処理である加圧浮上において95%以上の有機物が除去されていることが明らかとなった。プラスチック製品製造業に対する調査から、排水中のBODの89%が化石資源由来であり、このBODの分解に由来する CO_2 を考慮すると、約4倍の温室効果ガス排出量が算定されることが示唆された。

2) し尿処理施設からの CH_4 、 N_2O 排出量の精緻化

N_2O 排出係数は、高負荷脱窒素処理方式において、主反応槽が複数の施設では単一の施設より明確に高い排出係数を示すことが明らかとなった。高負荷脱窒素方式は、1990～1994年においては0.030であるが、単一0.030、複数0.19、2003年以降は0.019であるが、単一0.00075、複数0.024g N_2O /kgNと

精緻化できた。

3) コミュニティ・プラントにおける温室効果ガス排出量の調査

コミュニティ・プラントからの温室効果ガス排出係数は、現状では0.2 kg-CH₄/人/年、0.039 kg-N₂O/人/年と設定されているが、8施設における現場調査からは、0.047 kg-CH₄/人、0.0023 kg-N₂O/人と小さな値が得られた。

4) 終末処理場から排出されるCH₄、N₂Oの調査および排出係数の精緻化

現状のCH₄の排出係数は、処理方式によらず、一律に880 mg-CH₄/m³とされているが、最近のデータによると、標準活性汚泥法で620 mg-CH₄/m³、A2O法で440 mg-CH₄/m³と設定できる。A2O法のような窒素除去プロセスでは、CH₄が脱窒反応の水素供与体として消費されるため、CH₄排出量も抑制することができると思われる。現状のN₂Oの排出係数は、処理方式によらず、一律に160 mg-N₂O/m³とされているが、最近のデータによると、標準活性汚泥法で91 mg-N₂O/m³、AO法で46 mg-N₂O/m³、A2O法で9.4 mg-N₂O/m³と設定できる。窒素除去型の処理方式では、適切に硝化と脱窒が進行すれば、N₂O排出量は小さくなると考えられる。

5) 統計からみた下水処理プロセスの処理水質および温室効果ガス排出量の評価

終末処理場の生物処理プロセスとして、標準活性汚泥法、嫌気好気活性汚泥法、嫌気無酸素好気活性汚泥法、循環式硝化脱窒法、硝化内生脱窒法、ステップ流入式多段硝化脱窒法などの栄養塩類の除去プロセスを対象に下水道統計のデータを整理した。終末処理場における様々な処理プロセスは、富栄養化指標と地球温暖化指標がトレードオフの関係にあることが示唆され、硝化や脱窒に伴う温室効果ガス発生機構の科学的解明が必要であることが明らかとなった。

(3) アジア途上国の廃棄物ストリームにおける炭素フローの評価とCH₄の削減対策の評価

1) 埋立地CH₄排出モデルのアジアへの適合化と埋立地メタン削減術の評価

熱帯における有機物の一次分解定数(k)を、埋立構造やごみ質が類似する複数の処分場のメタン放出量を時系列で並べることにより、0.33/年と算出した。廃棄物埋立地表面フラックスと覆土下の埋立地ガス組成の測定により、覆土のメタン酸化率(OX)と好気性分解補正係数(MCF)を評価する手法を示した。日本および東南アジアの埋立地において、OXはIPCCガイドラインのデフォルト値よりも大きいこと、また、メタン酸化率は一定比率ではなく、埋立経過年数や覆土厚の関数として単位面積あたりの酸化速度を与えるべきであることを示した。また、熱帯の埋立地のMCFは、0.5を下回る領域もあったが、平均的には約1.0であり嫌気性埋立であることが示された。

2) 世界における都市廃棄物ストリームの形成パターンの提示

世界の廃棄物ストリームを三角図上で比較検討し、直接埋立の割合が大きい初期の段階では生物処理が主要な埋立前処理の一つとなっているが、より多くの直接埋立の削減のために主に焼却処理が導入されるという一般的な傾向を示した。また、GDPと比較することにより埋立前処理の導入には経済成長が必要であることを示した。

3) 東南アジアにおける都市廃棄物ストリームの把握

アンケート調査により東南アジアの主要都市とベトナムの都市における都市廃棄物、ハノイ市周辺の製造業廃棄物の組成とストリームを示した。アンケートで回答があった都市廃棄物中の厨芥割合はIPCCによるデフォルト値よりも大きかった。2008年実績でベトナム国の都市廃棄物の収集原単位は636 g/人/日で、収集された都市廃棄物の4%はコンポスト処理され、96%は嫌気性埋立されていた。製造業から発生する有機性廃棄物は炭素換算で90%以上は再生利用されており、埋立処分へと向かうフローは5%に過ぎなかった。

4) 埋立地CH₄削減によるCDM事業の持続性評価手法の開発

ハノイ市の廃棄物処理システムを改善した場合の温室効果ガスと環境負荷の増減をLCAにて評価した。代替シナリオの中では、中間処理として嫌気性発酵とコンポスト化を併用するシナリオが、多くの側面において環境影響が少なく、望ましい代替シナリオであった。ベトナム国の国家戦略で設定された都市廃棄物に関する将来の管理目標値を達成するため、コンポスト処理型、メタン回収嫌気性埋立型、準好気性埋立型の代替シナリオを導入した際の温室効果ガス排出量を評価した。2010

年から2025年までの積算でベースラインシナリオのそれぞれ51.3%、77.1%、79.4%であり、準好気性埋立がCDM事業として一般的なメタン回収嫌気性埋立と温室効果ガス削減において競合可能な技術であることを示した。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

廃棄物埋立地からの N_2O 排出に関する報告は世界的に見てきわめて乏しく、排出挙動に関する知見はほとんどない状況である。本研究で得られた成果は、 N_2O の排出が我が国の埋立地においては非常に稀であり排出量の寄与としては小さいこと、ならびにその排出メカニズムとしては嫌氣的生成と好氣的生成の双方に由来することが示され、廃棄物埋立地あるいは投棄地の維持管理が排出挙動に大きく影響することが示された。これらの成果は新規性が高く学術的にも意義深いものであるといえる。また、我が国の埋立地表層における CH_4 酸化挙動は欧米諸国での既報とは異なることを示し、さらに CH_4 と細菌の活性および CH_4 排出挙動との関係性を示すことで、気候帯や廃棄物管理手法の異なる地域での新たな覆土層の機能評価や維持管理につながる知見が提供されたといえる。

産業排水処理施設をヒアリングすることにより、前処理によって大半の有機物が除去されることで従来の算定方法では温室効果ガス排出量を過大評価してしまう場合や、化石燃料由来の有機物からの CO_2 発生量を過小評価している可能性が示唆された。排水原水の組成を把握し、生物処理槽への流入濃度を明確にする必要があることが明らかとなった。また、実測値の存在する終末処理場、し尿処理施設に関して、好気処理と窒素除去対応処理との排出係数の相違、処理システム（反応槽数）による排出係数の相違が明らかになり、これらのことより、運転・制御技術の向上によって排出係数の大幅な低減が図れる可能性が見出された。これらの成果は、 CH_4 ・ N_2O に影響を及ぼす因子の特定など、排水処理分野の CH_4 ・ N_2O 排出特性の解明につながる重要な知見である。また、下水道統計等に基づく資料調査の結果、終末処理場における様々な処理プロセスは、富栄養化指標と地球温暖化指標がトレードオフの関係にあることを示唆し、硝化や脱窒に伴う温室効果ガス発生機構の科学的な精査が必要であることが明らかとなった。

本研究で得られたk、MCFおよびOXの現場計測法ならびに、東南アジアおよび日本の埋立地での実測例は新規性および有用性が高いものである。IPCCモデルにおけるOXの問題点と改善点を実証データと共に指摘した。廃棄物ストリームダイアグラムは廃棄物処理の構造や成因を解析する新たなプラットフォームである。ベトナムにおける都市廃棄物と製造業廃棄物について、実データを取得・解析し、シナリオ分析するという、廃棄物ストリームの炭素フロー制御による温室効果ガス削減効果を定量的に示す全体的な手法を提示することができた。

(2) 地球環境政策への貢献

高度な中間処理が実施されている我が国の廃棄物管理体系は、炭素だけでなく窒素由来の温室効果ガス排出削減にも貢献しており、廃棄物適正管理・公衆衛生と温室効果ガス削減というコベネフィットを達成しているシステムとして、今後の国際協調的な排出削減の取組の中で提案可能になる。IPCC第四次報告書で言及されたような、日本の埋立地からの N_2O 排出可能性については考慮の必要はなく、緩和技術としての日本型埋立管理の正当性を示す論拠として、本成果が活用されることが期待される。また、埋立地表層における CH_4 酸化率について、我が国固有の排出係数を提示するとともに、その長期的な変化についても検討する必要性を示したことで、今後のインベントリ作成の精緻化に貢献可能であると考えられる。

し尿処理施設の N_2O 排出係数は、高負荷脱窒素処理方式において、主反応槽が複数の施設では単一の施設より明確に高い排出係数を示すことが明らかとなった。コミュニティ・プラントからの温室効果ガス排出係数も、新たな値を提案することができた。終末処理場の温室効果ガス排出係数も、標準活性汚泥法、AO法、A2O法において提案することができた。また、下水道統計等に基づく資料調査の結果、標準活性汚泥法、嫌気好気活性汚泥法、ステップ流入式嫌気好気活性汚泥法などの終末処理場における様々な処理プロセスの富栄養化指標と地球温暖化指標が示され、今後の終末処理場の施設更新の際のプロセス選択の指針につながる結果が得られた。

K、MCFとOXの現場計測法ならびに評価法は、CDM事業等において準好気埋立技術を導入した場合に、その効果を検証する具体的なモニタリング手法を提示するものであり、埋立地CDMにメタンガス回収、有機物埋立回避に続く新たな方法論を与え、我が国によるCERの取得に貢献するものである。実際に平成20年度コベネフィットCDMモデル事業において、補助対象事業に対して、これらの手法の導入を提案した。また、途上国の廃棄物ストリームの改善を、温室効果ガス削減ならびに環境負荷という多項目で評価する手法は、我が国が提唱する途上国におけるCo-Benefitな温暖化対策を評価する具体的な手法を与えるものである。今後、アジアにおける廃棄物管理の改善と温室効果ガス削減に関するワークショップや、IPCC/Emission Factor Database Editorial Board、温室効果ガス排

出量算定方法検討会、また具体的なCDM Methodologyやプロジェクト設計書（PDD）作成への参加を通じて、本研究成果の普及に努める。

6. 研究者略歴

課題代表者：山田正人

1965年生まれ、京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了、工学博士、現在、独立行政法人国立環境研究所主任研究員

主要参画研究者

(1) 占部武生

1945生まれ、横浜国立大学工学部卒業、現在、龍谷大学理工学部教授（博士（工学））
石垣智基

1974生まれ、大阪大学大学院工学研究科修了、龍谷大学理工学部准教授、現在、独立行政法人国立環境研究所主任研究員（博士（工学））

(2) 池道彦

1963生まれ、大阪大学工学部卒業、現在、大阪大学大学院工学研究科教授（博士（工学））
惣田訓

1972生まれ、大阪大学工学部卒業、現在、大阪大学大学院工学研究科准教授（博士（工学））

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

- 1) Tomonori Ishigaki, Chu Van Chung, Nguyen Nhu Sang, Michihiko Ike, Koji Otsuka, Masato Yamada, Yuzo Inoue, Estimation and Field Measurement of Methane emission from waste landfill in Hanoi, Vietnam, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 10, 2, 165-172, 2008
- 2) Rahul R. Upadhye, Daisuke Inoue, Tomonori Ishigaki, Kazunari Sei, Michihiko Ike, Microarray Analysis of Eubacterial Community and Bacterial Pathogens in Leachate from Three Different Landfills of Japan, *Environmental Engineering Research*, 45, 195-202, 2008
- 3) 長森正尚, 小野雄策, 河村清史, 山田正人, 石垣智基, 小野芳朗, 最終処分場における埋立地ガス組成の経年変化－多量成分と脂肪族炭化水素, *廃棄物学会論文誌*, 19, 4, 244-254, 2008
- 4) Hiromi Sawamura, Masato Yamada, Kazuto Endo, Satoshi Soda, Tomonori Ishigaki and Michihiko Ike, Characterization of microorganisms at different landfill depths using carbon-utilization patterns and 16S rRNA gene based T-RFLP, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 109, 2, 130-137, 2010

(2) 査読付論文に準ずる成果発表（社会科学系の課題のみ記載可）

なし

B-071 廃棄物分野における温室効果ガスインベントリの高度化と削減対策の評価に関する研究
(1)我が国の廃棄物ストリームにおける窒素フローの評価と N_2O および NH_3 の削減対策の評価

龍谷大学理工学部

占部武生・石垣智基

平成 19～21 年度合計予算額 25, 373 千円

(うち、平成 21 年度予算額 7,888 千円)

※予算額には、間接経費を含む。

[要旨] 一般廃棄物約 4900 万 t(H18)のうち窒素含有量は約 22 万 t(0.45%)と見積もられた。直接埋立と中間処理残さ埋立により 681 万 t の廃棄物が埋め立てられ、その内の窒素量は 8700 t(0.13%)と算出された。直接埋立物中の窒素は収集廃棄物中窒素の 2.7%に過ぎないが、埋立物中窒素の 68%近くを占めることが明らかにされた。将来的な廃棄物管理の高度化による窒素ストリームの変化について追跡する必要性が示された。処分場の安定化の進行に伴い、時間経過とともにメタン排出量が漸減していることが示された。実測値から一次減衰速度を算出したところ 0.06-0.16 /年となり、パラメータの地域分類の再検討の必要性が示唆された。埋立地からの N_2O 排出はきわめてまれであり、ごく一部で確認された排出も、 CO_2 換算で CH_4 の 1/10 から 1/100 程度であった。埋立地 N_2O の発生由来はサイト毎に嫌氣的反応と好氣的硝化反応での生成に分類された。埋立層の環境変化に応じた長期的な排出挙動について知見集積が必要である。国内埋立地覆土での CH_4 酸化率は 16%と算出されたが、係数は一定ではなく安定化進行に伴う CH_4 排出量の低下による酸化率の増加が示された。一般廃棄物焼却施設における N_2O 、 CH_4 の濃度および排出係数は既報に比べて 1 桁以上低いことが明らかにされた。これはダイオキシン類対策による燃焼温度・滞留時間など維持管理の高度化によるものと推測された。 N_2O 排出に関係する項目として燃焼温度が挙げられたが、施設により測定位置が異なることに留意すべきである。産業廃棄物の大型焼却施設は一般廃棄物と同程度の排出量であった。野焼きを模した燃焼実験において、くすぶり状から小炎燃焼への移行で CO_2 が上昇した。RDF (ごみ固形燃料) の場合小炎燃焼で NO_x が急増した他、加湿して燃焼させることによりくすぶり状態から小炎燃焼への移行でも CO_2 の増加が確認された。

[キーワード] 廃棄物分野、亜酸化窒素、焼却、野焼き、埋立地

1. はじめに

廃棄物分野からの温室効果ガス排出は、CDM (クリーン開発メカニズム) 事業を通じた我が国の排出削減目標達成などの面で注目を集めている。この分野から大量に排出されるメタンおよび亜酸化窒素は温暖化係数が大きいため、単位削減量に対する効果が高く、削減対象として有利であると考えられる。その反面、これらの排出量を算定する場合に用いられる排出係数が、きわめて不正確であり、しかも最新の技術に対応していないという問題が挙げられる。すなわち、適正で効果的な削減技術を選択するための大前提である、排出量の確実性・削減技術の性能が正しく評価できる状態ではないことが問題であるといえる。

2. 研究目的

本研究では、廃棄物分野における排出源である、中間処理および投棄地からの含窒素温室効果ガスおよびその前駆物質の排出挙動を明らかにすることを目的とした。具体的には、本年度においては、廃棄物埋立地からの CH_4 および N_2O の排出挙動に関する知見の集積およびメカニズムの解明を目的として、廃棄物管理における窒素ストリームを明らかにし、中間処理および最終処分される窒素量の評価を試みる。また、埋立地からの N_2O 排出に関する実態調査を通じて、排出量の把握とその排出メカニズムの解明を行う。アジアにおける CDM 事業への適用も視野に入れ、埋立地覆土の CH_4 酸化能力の評価と排出係数としての評価についても検討する。さらに焼却施設での排出係数の提示と野焼きを念頭に置いた温室効果ガス排出挙動に関する知見を集積する。

3. 研究方法

(1) 一般廃棄物処理における窒素ストリームの評価

廃棄物分野の排出源における含窒素化合物の排出挙動を評価するために、廃棄物の処理フローにおける窒素ストリームを明らかにし、その消長について検討した。廃棄物中の窒素の算出において対象とする年度は、組成の調査データが充実していた平成 10 年度のものでできる限り統一した。また総量については平成 18 年度で統一した。調査対象地は、札幌、仙台、東京都 23 区、横浜、名古屋、大阪および京都の 7 都市で、それぞれの物理組成（湿ベース）の公的機関のデータを元にした。なおこの 7 都市の合計で全国のごみ搬入量の 4 割近くを占めていた。対象とした収集ごみは、可燃ごみ、不燃ごみ、混合ごみ、資源ごみ、粗大ごみの 5 種類についてそれぞれ調査し、直接搬入ごみについては、物理組成の地域差が大きいことから便宜上混合ごみとして計算した。元素組成についてはまず、物理組成ごとの水分率の代表値（表 1-1：田中 2000）を用いて乾ベースの組成に換算した。次に、ごみの物理組成（紙類、プラスチック類、厨芥類、繊維類、木竹類、その他）の各窒素成分（表 1-2：田中ら 2003）を累積加算することにより、乾燥ごみ 1 kg 中の窒素濃度を算出した。その後、ごみ水分が W (%) のとき、 $(1-W/100)$ を乗じて湿りごみ 1 kg 中の窒素濃度に換算した。焼却処理残渣（以下、焼却灰と略す）および他の中間処理の残渣の窒素濃度については、処理方式によってその数値が変わってしまう。そのため、処理方式ごとの年間処理量の割合を調査し、各処理方式で発生する焼却灰の三成分の違いも考慮に入れて、それぞれの含有量（泊正雄 1996）を積算して求めた。また、ごみの三成分は日本全国の平均値である、水分 49%、可燃分 45%、灰分 6%を採用した。焼却灰の三成分はほとんどが灰分となり、組成のデータが不足したため、焼却前後で可燃分中の窒素含有率は変わらないと仮定して計算した。

表 1-1. 物理組成ごとの水分率（湿重量 1 kg あたりの水分量）

	厨芥	紙類	布類	プラ・ ゴム	金属類	びん・ 陶器	草木類	木製 粗大	家電類
W (kg/kg)	0.85	0.4	0.2	0.25	0.03	0.03	0.4	0.05	0.05

表 1-2. ごみの物理組成別の可燃分中の元素組成（乾ベース）

物理組成	紙類	プラスチ ック類	厨芥類	繊維類	木竹類	ゴム・皮革
窒素(重量%)	0.35	0.55	3.15	3.67	0.78	2.18

(2) 最終処分場における廃棄物中の菌体由来の窒素および炭素の定量方法

試料は、AM (A~C 地点) および FS (D~F 地点) 処分場において採取した、深さ 0.5~5 m までの計 12 の廃棄物サンプルを用いた。サンプル約 10 g をビーカーに採取し、沸騰石を入れたクロロホルム、水で湿らせた濾紙とともにデシケータ中に入れた。クロロホルムが沸騰してからさらに約 2 分間脱気した後、25°C の暗所に 24 時間静置し、クロロホルムにより燻蒸した。その後クロロホルムをデシケータ内から取り出し、サンプル中のクロロホルムを除去するために脱気を 3 回行った。サンプルに 40 mL の 0.5 M 硫酸カリウム溶液を加えて 25°C、200 rpm で 30 分間振とう抽出を行った。また、燻蒸開始時に非燻蒸のサンプルについても同様に抽出した。燻蒸および非くん蒸のサンプルから得られた懸濁液を吸引ろ過した。窒素については、得られた濾液中に抽出された可溶性窒素成分を吸光光度法 (波長:385 nm) により定量した。燻蒸サンプルの定量値から非くん蒸サンプルの定量値を差し引いて乾土当りに換算し、抽出態窒素量 (E_N) とした。炭素については、はじめに特級試薬のフタル酸水素カリウム 2.125 g を精製水に溶かし 1 L として (炭素濃度 1000 mg/L) 標準液の作成を行った。燻蒸および非くん蒸のサンプルについて 10 倍希釈し、島津製作所の全有機炭素計 (TOC-VCSN) を使用して溶存有機炭素濃度を測定し、乾土 1 kg 当たりの有機性炭素量 (E_C) を算出した。菌体由来の窒素 (B_N) および菌体由来の炭素 (B_C) については、 $B_N = E_N \times 2.22$ 、 $B_C = E_C \times 2.64$ という関係 (JENKINSON, D.S. 1988) を用いて算出した。ここで、係数 2.22 および 2.64 は微生物の無機化率を示すファクター $k_C=0.45$ 、 $k_N=0.57$ で校正した値である。

(3) 実態調査実施地点

廃棄物埋立地からのメタンおよび亜酸化窒素の排出挙動に関する知見の集積を目的として、地表面ガスフラックスに関する実態調査を行い、埋立地からのメタンおよび亜酸化窒素の発生量を評価した。

1) AM サイト

本処分場の調査対象は 1990 年 1 月に埋立が開始され、2002 年 3 月に埋立を終了した産業廃棄物処分場の管理型区画である。処理対象廃棄物は一般廃棄物焼却残さ、産業廃棄物・災害廃棄物、陸上残土および浚渫土砂である。本処分場は海面埋立地である。

2) AN サイト

山間型の一般廃棄物処分場であり、本処分場の埋立期間は 1979 年 6 月~2004 年 6 月であり、敷地面積は 258400m² の山間型の一般廃棄物最終処分場である。処理対象廃棄物は、混合ごみ、可燃ごみ、不燃ごみ、直接搬入ごみ、粗大ゴミ、破碎ごみ、中間処理残渣および焼却残渣である。

3) SK サイト

本処分場は 2000 年に閉鎖された産業廃棄物の管理型処分場であり、河川敷から住宅地付近まで拡大した平地型(積み上げ式)の処分場である。処理対象廃棄物は、污泥、鉍さい、廃プラスチック、建設廃材、ガラス、陶磁器および燃え殻である。

4) FS サイト

産業廃棄物の管理型処分場であり、海岸付近を掘削した後、埋め立てを行った投入型の処分場である。埋立期間は第 1 区画が 1982 年から 1988 年、第 2 区画が 1988 年から 1990 年、第 3 区画が 1990 年から 1995 年、第 4 区画が 1995 年から 2000 年および第 5 区画は 2001 年から 2009 年である。主な処理対象廃棄物は、有機汚泥、無機汚泥、燃え殻、鉍さい、ばいじんである。

5) PB サイト

本サイトはマレーシア国ペナン州に位置する生活廃棄物の埋立地であり、埋立期間は 2001 年から 2007 年である。積み上げ式の嫌気性埋立構造であり、浸出水の集水管および処理は不十分である。現在、東南アジア諸国の廃棄物処理は直接埋め立てに依存している。また、東南アジア諸国ではその建設維持コストの不足によりほとんどの施設で埋立地からの浸出水は未処理のまま近隣環境へ放流されているのが現状である。

6) IO サイト

本処分場の調査対象は 1992 年 1 月に埋立が開始され、2002 年 3 月に埋立を終了した産業廃棄物処分場の管理型区画である。処理対象廃棄物は一般廃棄物、産業廃棄物・災害廃棄物、陸上残土および浚渫土砂である。本処分場は海面埋立地である。

7) NH サイト

山間型の一般廃棄物処分場であり、1993 年 6 月に閉鎖された旧処分場と供用中の新処分場にて調査を行った。焼却残渣、不燃物、粗大ゴミおよびその他などである。

(4) 閉鎖型チャンバー法によるガスフラックスの評価

閉鎖型チャンバーを土壌表面に設置し、チャンバー内の濃度増加を時間の関数として測定した。チャンバーが小さい場合には常に拡散により混合が起こるが、大きなチャンバーでは攪拌装置が必要となる。本研究の調査では、直径 51.0cm、高さ 17.5cm のアクリル製円筒状のものを用いた。土壌表面からのガス成分フラックスは次式により算出した。

$$F = V/S \times dc/dt$$

ただし、 $F[\text{mL}/\text{m}^2/\text{min}]$:ガスフラックス、 $V[\text{m}^3]$:チャンバー内体積、 $S[\text{m}^2]$:チャンバー設置面積
 $C[\text{mL}/\text{m}^3]$:ガス濃度、 $t[\text{min}]$ 時間、なお検出限界は絶対値 $0.0005(\text{mL}/\text{m}^2/\text{min})$ とし、それ以内の分析値は ND と表記した。

(5) ガス濃度の分析

閉鎖型チャンバー法により採取したガス中の CH_4 および N_2O 濃度は、水素炎イオン化検出器 (FID) およびパルス放電光イオン化検出器 (PDD) 付きガスクロマトグラフ GC14B (島津製作所、京都) により測定した。ステンレスカラム (D-1785) を使い、窒素をキャリアガスとし、検出器温度 120°C 、カラム温度 70°C で分析した。

(6) 安定同位体比による CH_4 酸化率算出法

覆土内のガスを採取するために土壌表面を約 4cm 掘削した地点に閉鎖型チャンバーを設置しガス採取した。覆土におけるメタン酸化率は覆土層上下のマスバランスに基づき次式より算出した。

$$f_{\text{oxio}} = \frac{\delta_{\text{out}} - \delta_{\text{in}}}{1000(\alpha_{\text{ox}} - \alpha_{\text{trans}})}$$

f_{oxio} : CH_4 酸化率、 δ_{out} : 覆土から放出される CH_4 の炭素同位体比 (‰)、 δ_{in} : 覆土へ流入する CH_4 の炭素同位体比 (‰)、 α_{trans} : 移流輸送の同位体比ファクター; 1.0094

α_{ox} : 同位体比ファクター; $\alpha_{\text{ox}} = \text{slope} / (1 + \text{slope})$ 、 slope : X 軸 $\log(\delta + 1000)$, Y 軸 CH_4 濃度 (ppm) の対数を取り、プロットした時の傾き。

同位体比ファクターとは、同位体比を分析する際に生じる誤差を補正する係数である。埋立地覆土内で起こる CH₄ の拡散現象を無視して CH₄ 酸化率を求めるならば α_{trans} を 1 とするが、CH₄ 酸化率の値の精緻化のために拡散現象を考慮して α_{trans} を 1.0094 とした。 δ_{in} は埋立地のガス抜き管から放出される CH₄ の炭素同位体比とした。

(7) 炭素安定同位体比測定

土壌掘削した地点に閉鎖型チャンバーを設置しガスを採取するとともに、実験室における炭素安定同位体比測定を行った。閉鎖型チャンバー法により採取したガス中の CH₄ の炭素同位体比は Trace GC&GC Isolink&ConFlo IV&DELTA V Advantage (Thermo Fisher) により測定した。炭素安定同位体比 ($\delta^{13}C$) は次式に従って標準試料からの相対千分率偏差(‰)で示した。

$$\delta^{13}C = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000$$

R_{sample} : 試料中の ¹³C/¹²C 比 (モル比)、 R_{standard} : ワーキングスタンダードの ¹³C/¹²C 比 (モル比)
ただしワーキングスタンダードの測定誤差は 0.06‰以下である。

(8) 埋立地覆土による CH₄ 酸化試験

75 mL 容ガラス製バイアル瓶中に NMS 培地 25 mL を加え滅菌した上で、実態調査で採取した覆土試料 1g を添加した。ブチルゴム栓で密栓した後、気相部分の CH₄ 濃度を 1000 ppmv となるように調製し、28℃、120 rpm で 5 日間往復振とう培養し、気相 CH₄ 濃度を評価した。

(9) 廃棄物焼却施設における N₂O 等の排出調査

表 1-3 に示す 12 の一般廃棄物焼却施設と 4 の産業廃棄物焼却施設を調査対象とした。排ガスの採取は誘引通風機前等で行った。その際排ガスを 1L/min、5 分程度テドラバッグに採取したが、

表1-3 調査対象施設の一覧

焼却施設	竣工後年数	公称処理能力	焼却対象ごみ	ガス冷却方式	集塵方式	HCl 除去方式	NOx対策	白煙防止の有無	備考		
一般廃棄物	F1	ストーカ式(バッチ式)	13	14t/8h×2炉	可燃ごみ、リサイクル選別可燃物	水噴射	ろ過式	全乾式	燃焼制御	あり	
	F2	ストーカ式(準連続式)	9	30t/8h×3炉	可燃ごみ	水噴射	ろ過式	全乾式	燃焼制御	なし	
	F3	ストーカ式(全連続式)	13	45t/24h×2炉	可燃ごみ	水噴射	電気集塵機	全乾式	燃焼制御	あり	
	F4	ストーカ式(全連続式)	21	85t/24h×2炉	可燃ごみ、破砕可燃物	水噴射	ろ過式	全乾式	尿素噴霧	あり	
	F5	ストーカ式(全連続式)	10	300t/24h×3炉	可燃ごみ	全ボイラー	ろ過式	全乾式	触媒脱硝	あり	
	F6	流動床式(準連続式)	28	50t/16h×2炉	可燃ごみ、粗大破砕可燃物	水噴射	電気集塵機	全乾式	燃焼制御		ダイオキシン類分解用燃焼室あり
	F7	流動床式(全連続式)	22	90t/24h×2炉	可燃ごみ	水噴射	ろ過式	全乾式	尿素噴霧	あり	
	F8	表面溶融式(全連続式)	11	38t/24h×2炉	可燃ごみ、粗大破砕可燃物	水噴射	ろ過式	全乾式	触媒脱硝	あり	
	F9	シャフト式(全連続式)	7	75t/24h×2炉	可燃ごみ、リサイクル選別可燃物	全ボイラー	ろ過式	全乾式	触媒脱硝	あり	
	F10	ガス化溶融式(全連続式)	2	47.5t/24h×2炉	可燃ごみ	水噴射	ろ過式	全乾式	尿素噴霧	あり	
	F11	ガス化溶融式(全連続式)	8	75t/24h×2炉	可燃ごみ	全ボイラー	ろ過式	全乾式	燃焼制御+触媒脱硝	あり	
	F12	炭化炉式(バッチ式)	1	35t/8h×2炉	可燃ごみ、リサイクル選別可燃物	水噴射	ろ過式	全乾式	尿素噴霧	あり	
産業廃棄物	G1	キルン+後燃焼ストーカ式(全連続式)	14	100t/24h×1炉	有機汚泥、廃油、廃プラスチックなど	水噴射	ろ過式	全乾式	触媒脱硝	なし	
	G2	キルン式(全連続式)		48t/24h×1炉	廃油、廃アルカリ、廃プラスチックなど	水噴射	ろ過式	全乾式	触媒脱硝	なし	
	G3	流動床式(全連続式)	14	72t/24h×1炉	廃油、廃アルカリ、廃プラスチックなど	水噴射	ろ過式	全乾式	触媒脱硝	なし	
	G4	回転炉床式(全連続式)	27	5t/h	下水汚泥、廃プラスチック、繊維など	水噴射	湿式サイクロン	洗煙式	燃焼制御	なし	

N₂O 測定用のガス採取は、前処理でバッグ中での N₂O の生成防止のため平木ら(1991)の方法を参考にし、塩化カルシウム、ソーダライムを用いて排ガスから H₂O、CO₂ 等を除去して行った。N₂O、CH₄ の分析は、それぞれ GC-ECD、GC-FID で行った。これとは他に同時に前処理なしでガスをテドラバッグに採取し、ガス中の NO_x、O₂、CO、CO₂ 濃度をガス濃度連続測定装置にて採取日に測定した。前処理で CO₂ 除去しているため測定した CO₂ 濃度を用いて元のガスに対する N₂O、CH₄ 濃度を算出した。NH₃ はホウ酸溶液に吸収しイオンクロマトグラフで分析した。一般廃棄物焼却施設の場合、これらの測定ガス濃度、焼却量等から下式によりそれぞれの排出係数を算出した。なお、一般廃棄物焼却施設では、白煙防止として予熱空気等が投入されることが多く、煙突周辺における O₂ 濃度は、燃焼室の O₂ 濃度に対応するものではないことが多い。そのため、下述するように乾きガス量は大気汚染物質排出量総合調査における標準値を使用した。

$$ef = C_M \times \{Go' + (m-1) \times Lo\} \times (N_M / 22.4)$$

ef : M 成分の排出係数(g-M/t)、C_M: 排ガス中の M 成分の濃度(ppm)、Go': 一般廃棄物の理論乾き排ガス量(m³N/kg) ; 大気汚染物質排出量総合調査における標準値より 1.658 と設定、m: 排ガス中の O₂ 濃度より計算される空気比 (-) ; m=21/(21-O₂)、Lo : 一般廃棄物の理論空気量 (m³N/Kg)、大気汚染物質排出量総合調査における標準値より 2.006 と設定、N_M : 成分の分子量

また産業廃棄物焼却施設では、施設によって焼却対象物の種類が非常に異なり標準値を定めにくく、白煙防止がないことなどから、事業者が煙突部で定期的に調査している乾ガス量を用い下式で排出係数を算出した。

$$ef = C_M \times Gd \times N_M / 22.4$$

Gd : 産業廃棄物の実測乾き排ガス量 (m³N/kg)

施設 F5 では、触媒脱硝装置前後で同時に排ガスをテドラバッグに採取し、装置前後の N₂O 濃度の変化を調べた。また、施設 F5 と施設 G4 では、非分散型赤外線吸収式 N₂O 連続測定装置を使用した。この方式による N₂O 測定値は CO₂ 等の影響を受けるため、前述の GC-ECD による N₂O 測定値に基づき N₂O 濃度を算出した。

(10) もみがら、RDF の七輪を用いた燃焼による N₂O 等の排出調査

渡辺ら(1994)の方法を参考にして野焼きを模擬した七輪による燃焼実験を行った。すなわち、七輪の約 10cm 上にステンレス製あるいは蛇腹式のプラスチック製ダクト (径 30cm、プラスチック製の場合、七輪上部のダクト内部はアルミ薄板でカバー) を置き、ファンで吸引した。燃料はもみがらと RDF を用いた。ガスの採取および分析は、一般廃棄物焼却炉での場合に準じて行った。また、熱電対を七輪の底部と上面の中心におき温度を測定した。今回の燃焼実験では燃焼残さが多く、しかも燃焼状態が一様でなかったため、一般廃棄物焼却施設で用いた排出係数の算出法は採用できない。そこで、渡辺の方法³⁾を参考にして下式により排出係数 ef を求めた。

$$ef = (C_n - C_o) \times Rc \times M / 12(C_{CO_2} + C_{CO})$$

C_n: ガス成分濃度、C_o: 大気中の成分濃度、Rc: 試料中炭素濃度、M: ガス成分分子量、C_{CO₂}: ガス中 CO₂ 濃度、C_{CO}: ガス中 CO 濃度

4. 結果・考察

(1) 一般廃棄物処理における窒素ストリームの評価

平成 18 年度においては、日本全国の収集ごみ量約 4900 万 t のうち、含有されている窒素量は約 22 万 t (約 0.45%) であった。焼却施設における処理方式ごとの 1 年間の処理量の割合は、ストーカ式が 85% ならびに流動床式が 15% であった。処理方式ごとの可燃分量の違いを補正した結果、焼却灰中の可燃分は 5.1% になると算出された。また、焼却の前後で可燃分量は減少するが、可燃分中の窒素の相対的な割合は変わらないと仮定し、焼却灰中の窒素含有率を 0.05% と算出した。直接焼却以外にもその他の中間処理を経た残渣が焼却処理され、焼却灰として埋立処分される量は 436 万 t (うち、窒素量は 2200 t) であった。直接埋立と中間処理残渣の埋立により、合計 681 万 t の廃棄物が埋め立てられ、その内の窒素量は 8700 t (約 0.13%) と算出された (図 1-1)。

収集ごみ中に 22 万 t 含有されていた窒素は、中間処理を経ることで減少し、全体で 8700 t となり、そのうち各処理施設から最終処分場へ埋め立てられた窒素量は 2800 t 程であった。同様にごみ中の含有率で見ても、収集時には 0.45% あったのが埋め立て時には 0.13% にまで下がっている。よって多くの窒素は焼却処理等で排出するガスとして窒素酸化物などのかたちで大気中などに放出されていると考えられた。廃棄物の発生時点において、直接搬入ごみ中に占める窒素の割合は全体の収集ごみに対しては 2.7% にも満たなかった。しかし、最終処分場に一年で持ち込まれる廃棄物中の窒素 8700 t のうち、その 68% 近くが直接埋立によって持ち込まれることが明らかにされた。直接埋立される廃棄物は収集ごみそのものであり、物理組成が、地域によって非常に差がある。すなわち、将来的な廃棄物管理の変化に伴い物理組成が変化することで、窒素ストリームも強く影響を受ける可能性が推測された。直接埋立を処分場への窒素負荷という観点で捉え、廃棄物管理の高度化による窒素搬入量の削減と、それに伴う中間処理施設への窒素負荷増加など、長期的な廃棄物管理体系の監視が必要であるといえる。

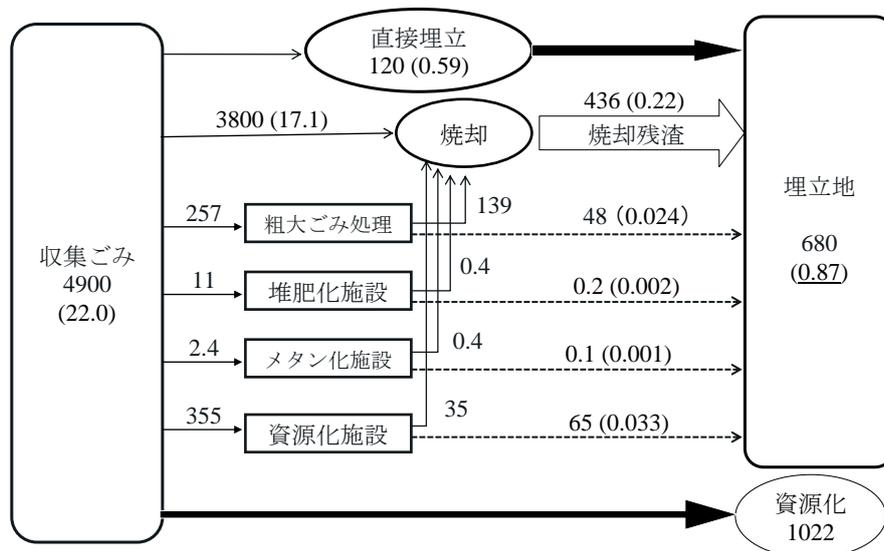


図 1-1 平成 18 年度一般廃棄物処理における窒素ストリーム () 内が窒素量、単位は万 t
(2) 最終処分場における廃棄物中の菌体由来の窒素および炭素の定量結果

窒素については E_N (抽出態窒素量) が 0.58~163(平均 25.6) mg N/ kg 乾土の範囲で、固形物中の全窒素量の 0.03~7.5(平均 1.2%) に相当した。菌体由来の窒素は 1.3~362(平均 57) mg N/ kg 乾土

となり、固形物中の全窒素の 0.06～16.7(平均 2.6)%に相当した。廃棄物中の元々の可溶性成分である非燻蒸サンプルの値と比較すると、燻蒸サンプルでの可溶性窒素量は約 1.5 倍に増えており、菌体由来の窒素量は全可溶性窒素量の 3 割近くを占めた。全地点の平均は測定値が約 57 mgN/kg 乾土、特性値が約 55 mgN/kg 乾土とほぼ同じ値が得られた。菌体由来の窒素量は非菌体由来の窒素量の 66%を占めることから、菌体により蓄積されている窒素については、菌体が死滅することにより浸出水中へ溶け出していくと考えられる。埋立層での移動性を考慮すると、窒素の排出由来として埋立層の菌体は重要な貯蔵源となっていることが推測される。菌体由来窒素の含有量は AM よりも FS の方におよそ 6 倍以上含まれていた。炭素については E_C (抽出態炭素量) が 45～104(平均 69) mg C/ kg 乾土の範囲であり、菌体由来の炭素は 119～276(平均 183) mg C/ kg 乾土となった (表 1-4)。FS のサンプルにおける菌体由来の窒素および炭素量については、採取地点の深さと正の相関が示された。また、菌体由来の窒素/炭素比率は深度とともに高くなる傾向が示された。一方、AM の菌体由来窒素および炭素量については、採取地点の深さとは関係性がみられなかった。(図 1-2)。AM では埋立物や水の移動 (水位) などの影響から、利用可能な有機物量自体が少なく、窒素の過剰な蓄積には至っていないことが示唆された。菌体由来の窒素と炭素の分布状況としては、深度・地点による変動が大きく、窒素蓄積の局所性が示されといえる。

菌体の元素組成の特性値 (Scherer et al. 1982) によると、C と N の元素構成比はそれぞれ 40% と 11%であり、この特性値と B_C の値から理論上の菌体窒素量を算出したところ、AM の菌体由来窒素量は特性値から予測される量に比べて少ないことが示された。FS については特に深度の深い地点において窒素の測定値が理論値より高く、深い地点ほど菌体中に過剰に窒素が蓄積されることが示唆された。3.5 m 地点での菌体由来の窒素量は 1 m 地点の値より 26 倍近くも多く、土質の外見上の色も違っていたことから、埋立物の組成の違いによって、菌体が増殖しやすい環境が生まれ、差が生じる可能性も考えられる。加えて、窒素を過剰に蓄積する菌種の優占などの因子も関わっており、その生育環境も含めた処分場内の環境条件に大きく影響されることが考えられる。炭素成分に比べ窒素成分の残存は、特に埋立管理後半における亜酸化窒素などの含窒素温室効果ガスの排出に大きく影響することが考えられる。

表 1-4 菌体由来 N および C の定量結果 (単位: mg/kg 乾土)

処分場	深さ(m)	地点 No.	E_N	B_N (測定値)	E_C	B_C	B_N (特性値)
AM	1	A	5.8	12.9	104	276	82.8
	1	B	7.8	17.4	92	244	73.2
	1	C-1	0.58	1.3	68	179	53.7
	3.4	C-2	8.1	18.1	69	182	54.6
	4.3	C-3	7.8	17.3	51	135	40.5
FS	1	D-1	2.2	4.8	68	180	54.0
	2	D-2	32.1	71.2	78	206	61.8
	3.5	D-3	57.0	127	63	166	49.8
	0.5	E-1	0.36	0.8	60	158	47.4
	0.5	E-2	14.4	32.1	46	121	36.3
	1.5	E-3	8.5	18.9	45	119	35.7
	5	F	163	362	87	230	69.0
		平均値	25.6	57.0	69	183	54.9

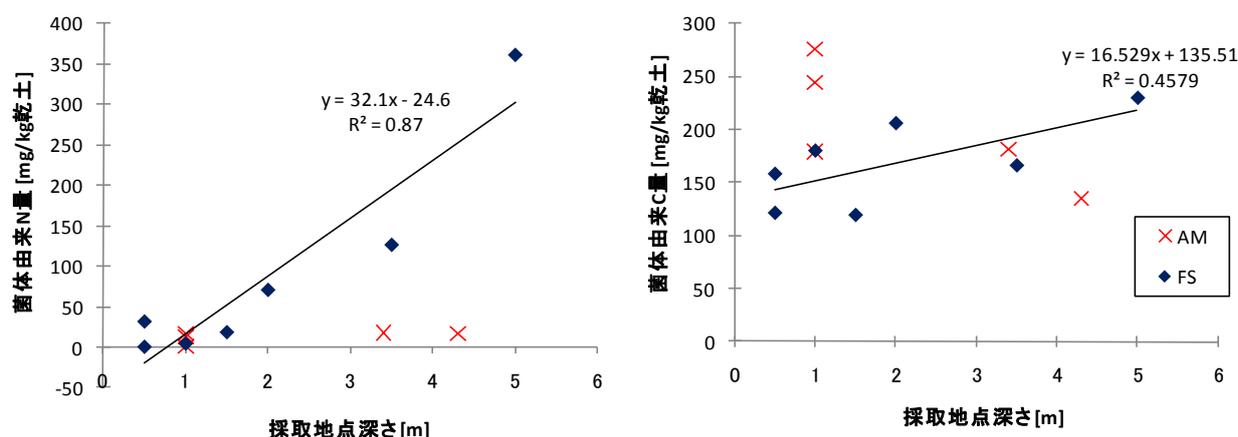


図 1-2 各サンプル採取地点の深さと菌体由来 N 量および菌体由来 C 量の関係

(3) 埋立地からの CH₄ 排出係数の評価

各サイトにおける地表面 CH₄ フラックス測定結果を表 1-5 に示す。FS サイトでは 2005 年 12 月調査時においては 11 地点中 8 地点でフラックスは確認されなかった。廃棄物埋立地からの CH₄ ガス排出量の実態調査の結果として、 2.8×10^{-7} - 2.8×10 mL/m²/min の範囲にあることが報告されている(Borjesson、2000)。本サイトにおけるフラックス測定結果から、CH₄ フラックスが検出された地点でもその値は小さい、もしくは負のフラックスであった。FS サイトの埋立物の大部分は主に焼却灰ならびにスラグ等の無機化処理を行ったものであることがフラックスが小さかった原因であると考えられる。また両調査時の天候が共に雨であったため、覆土空隙が充填され透気性が一時的に低下したことによって、フラックスが減少したことも原因であると考えられる。AN サイトにおけるガスフラックスの測定結果から、32 地点中 9 地点(2006 年調査時)および 60 地点中 19 地点(2007 年調査時) で CH₄ フラックスが確認された。またフラックスが検出されたうち最大で 2006 年 8 月調査時に 4.62 mL/m²/min、2007 年 9 月調査時に 9.1 mL/m²/min、および 2008 年 8 月調査時には 19.7 mL/m²/min のフラックスが得られるなど、一部からは高い CH₄ 排出量が確認された。これは本サイトにおいては、事業系および家庭系一般廃棄物ならびに下水汚泥を含む産業廃棄物などの多くが焼却処理を経ないで直接埋め立てられており、分解性有機物が多量に処分されていることに起因すると考えられる。調査対象であった A 区画および B 区画では B 区画の方が低いフラックス結果であった。B 区画の一部は、部分的に覆土に亀裂が入っている部分が確認されたことから、好気性分解区域であることが推測され、A 区画より CH₄ フラックスが低かった原因であると考えられる。SS サイトの A 区画および B 区画ならびに 2008 年 11 月調査時における CH₄ フラックスはそれぞれ 0.0102 mL/m²/min および 0.0086 mL/m²/min ならびに -0.002 mL/m²/min であった。本サイトは、1982 年の埋立開始後 1-2 年目頃から廃棄物の分解に伴うガスの発生が目立ち始めたため、ガス抜きのための多孔管が集水装置に取り付けられた。また埋立 3 年半後には CH₄ の濃度が 6.1VOL% に達しており、発生ガスによる周辺環境への影響を防止するため、埋立開始後 7 年目からガスの燃焼を始めたとの報告がある(小野ら、1994)。また Ishigaki ら(2005) により、本処分場からの CH₄ ガス排出量の実態調査の結果として、2001 年 6 月、2001 年 11 月および 2002 年 2 月に調査した各調査時における CH₄ フラックスは、それぞれ 13.3 mL/m²/min、1.66 mL/m²/min

および $0.40 \text{ ml/m}^2/\text{min}$ と報告されている。以上の既往研究の結果から、埋立初期における CH_4 排出量は多かったことが確認されている。本サイトは有機汚泥や有機物を含む建設廃棄物を大量に受け入れていたことからガス発生ポテンシャルの高いことが推測された。しかし本研究結果から 2006 年 11 月調査時の A 区画および B 区画では、それぞれ $0.0102 \text{ ml/m}^2/\text{min}$ および $0.0086 \text{ ml/m}^2/\text{min}$ 、2008 年 11 月調査時では $-0.002 \text{ ml/m}^2/\text{min}$ といずれもフラックスは低い値を示した。本サイトは 2000 年に閉鎖されており、時間経過に伴う廃棄物分解ならびに安定化の進行状況を表していることが示唆される。さらに覆土における草木の発達も地表面からのガス排出に影響していることが推測される。NH サイトの CH_4 発生量として $-0.000072 \text{ ml/m}^2/\text{min}$ が得られた。旧処分場、新処分場ともに高い CH_4 フラックスは確認されなかった。これは旧処分場の閉鎖が 1993 年 6 月であり、長期間経過していること、および上部利用に伴い、大地造成時の盛土による覆蓋効果を受けていることが原因として挙げられる。また新処分場においては全体的に覆土に亀裂が入っていること、最終覆土厚が不均一なことなど好気性分解区域と推測されるため CH_4 フラックスが検出されなかったと考えられる。IO サイトの CH_4 フラックスの算術平均値は $0.0013 \text{ ml/m}^2/\text{min}$ と比較的低い値を示した。本サイトは海面処分場であることから陸上処分場とは違い、初期に遮水護岸を設置して外海と隔離した内水を作り、隔離された内水に廃棄物が海中投入という形で埋め立てられている。また浸出水集排水管がなく、廃棄物のほとんどは水没した状態となっているため廃棄物が洗われる状態にあり、廃棄物中の分解性有機物が処分場外へ流出してしまっていると考えられる。これらの要因から多くの地点においてフラックスが確認されなかったと考えられる。

表 1-5 各サイトにおける CH_4 排出量の概要（単位： $\text{ml}/\text{min}/\text{m}^2$ 、*は既往研究の参照値）

	FS* (2005/12)	FS (2007/8)	AN-A* (2006/8)	AN-B* (2006/8)	AN-A (2007/9)	AN-B (2007/9)	AN-B (2008/9)
CH_4 フラックス (算術平均)	1.5×10^{-3} $\pm 660\%$	7.5×10^{-4} $\pm 1200\%$	0.34 $\pm 370\%$	0.13 $\pm 450\%$	0.45 $\pm 420\%$	0.14 $\pm 340\%$	0.99 $\pm 320\%$
CH_4 フラックス (地球統計学平均)	1.1×10^{-4}	4.6×10^{-5}	6.9×10^{-4}	2.7×10^{-4}	5.8×10^{-3}	3.1×10^{-3}	1.5×10^{-3}

SS-A* (2006/11)	SS-B* (2006/11)	SS (2008/11)	NH-O (2008/2)	NH-N (2008/2)	IO (2008/7)
0.010 $\pm 250\%$	0.0086 $\pm 140\%$	-3.4×10^{-3} $\pm 1700\%$	-0.0056 $\pm 580\%$	-0.32 $\pm 260\%$	0.0012 $\pm 530\%$
3.2×10^{-4}	0.00041	-4.3×10^{-5}	7.2×10^{-5}		

各サイトにおける埋立終了からの CH_4 フラックスの平均値の経時変化を図 1-3 に示す。各サイト埋立期間の違いによって CH_4 フラックスは異なるが、全てのサイトにおいて処分場の安定化の進行に伴い、時間経過とともに CH_4 排出量が漸減していることが示された。2004 年 6 月に埋立が終了している AN サイトにおいては、他のサイトに比べ比較的高いフラックスが確認された。他のサイトは埋立終了から 5 年から 15 年経過しており、埋立層内における有機物の分解が進んでいると推測される。また AN サイトにおける処理廃棄物は、事業系および家庭系一般廃棄物、下水汚泥を含む産業廃棄物などの多くが焼却処理を経ないで直接埋め立てられており、分解性有機物が多量に処分されている。これらのことから埋立終了からの経過日数、また埋立物の特徴によって、 CH_4 生成量が大きく影響されると考える。

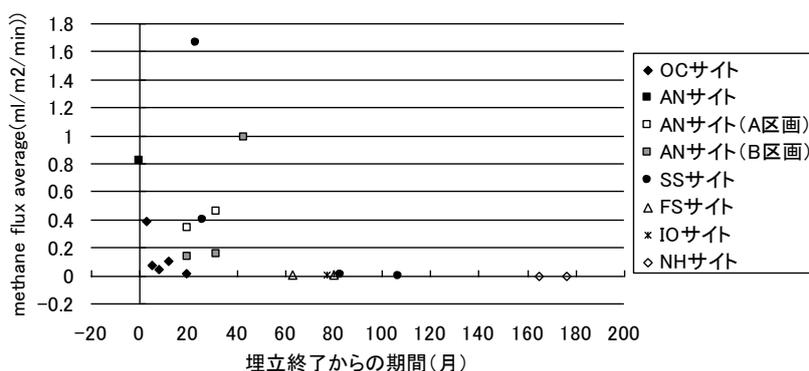


図 1-3 各サイトにおけるメタン発生量の経時変化

表 1-6 実測値より算出した排出係数

サイト名	実測値より算出した排出係数 (/年)
FS	0.11
AN	0.06
SS	0.16
NH	0.12

FS サイト、AN サイト、SS サイトおよび NH サイトにおける CH_4 排出量の排出挙動より、全サイトにおける埋立終了から調査実施日までの期間および CH_4 フラックス測定結果を CH_4 排出量の経時的な減衰が一次反応式に従うと仮定して、一次反応速度定数 (k) の算出を行った。算出結果より、FS サイト、AN サイト、SS サイト、NH サイトおよび OC サイトにおける k の値はそれぞれ 0.11 /年、0.06 /年、0.16 /年、0.12 /年および 0.36 /年であった (表 1-6)。これらの値は、IPCC の定める排出インベントリ算定ガイドライン(2006)によるデフォルト値 $k = 0.03$ /年に比べて高く、日本国内の廃棄物埋立地に対して、0.06-0.16 /年を新たな分類として提案できる可能性が示唆された。また、実測値から一次反応速度 (k) を算出することにより、廃棄物の分解に伴う CH_4 排出量の減衰をより正確に示すことが可能である。

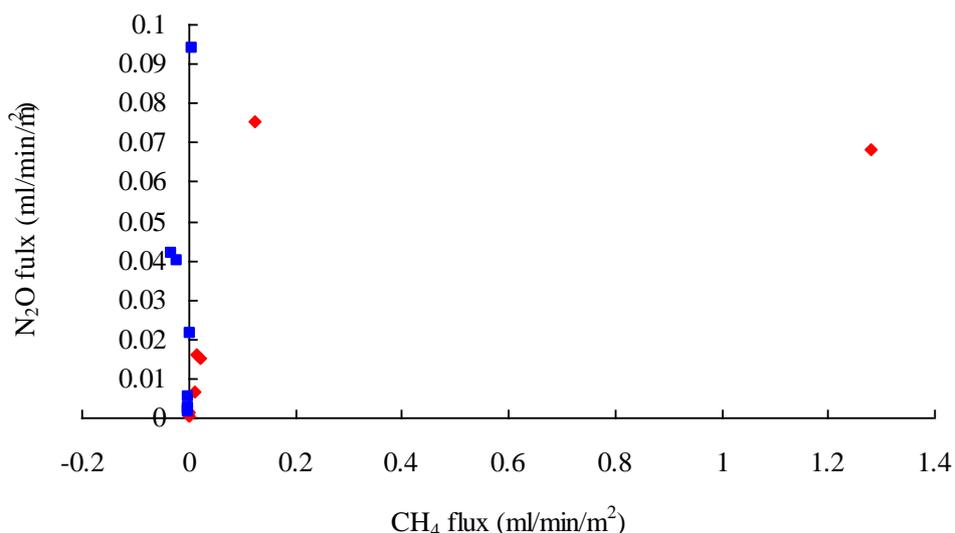
(4) 埋立地からの N_2O 排出量の評価

各調査地における N_2O 排出量のまとめを表 1-7 に示す。埋立地から発生する N_2O は現在のところ温室効果ガスの算出対象となっていないが、しばしばその放出が懸念されている。本調査により埋立地からの N_2O の排出自体は確認されたが、調査地点に対する検出地点は極めて小さく、 CO_2 等量の排出量に換算して CH_4 の 10 分の 1 から 100 分の 1 程度であることが確認された。 N_2O 排出メカニズム評価のため、各調査地点での N_2O と CH_4 フラックスの関係を図 1-4 に示す。 CH_4 と N_2O の両フラックスの関係性には、二つのパターンが確認された。ひとつは CH_4 フラックスの増加とともに Michaelis-Menten 型の飽和曲線を示すもの、もう一つは CH_4 フラックスが非常に小さいあるいは負のフラックスが小さいが N_2O のフラックスが確認されるものである。前者は、当該地点から排出されるガスが、嫌氣的反応に伴って生成したものであり、主に脱窒過程で生成した N_2O であることが示唆される。一方後者は、当該地点から排出されるガスが、強い嫌氣的反応

によるものではない、あるいは当該地点付近が比較的好氣的条件にあることが推測される。すなわちこれらの地点より排出される N_2O は好氣的な硝化反応過程で生成している可能性が示唆される。この分類をサイトごとに評価すると、FS サイトで検出された N_2O は嫌氣的反応由来、IO サイトで検出された N_2O は好氣的反応由来と推測され、AM および AN サイトでは、双方の反応由来の N_2O が検出される結果となった。以上のことから、処分場からの N_2O の排出は CH_4 に比べると低いと判断されるが、埋立層の環境変化に伴う排出挙動の長期的な変動については充分明らかではなく、今後も注目する必要があるといえる。

表 1-7 廃棄物埋立地からの N_2O 排出実態調査のまとめ

気候	サイト名	調査点数	N_2O 検出地点数	N_2O 排出量 (平均値; $\text{ml}/\text{m}^2/\text{min}$)
温帯	OC サイト	9 地点	未検出	ND
	FS サイト-2008	37 地点	未検出	ND
	FS サイト-2009	22 地点	2 地点	0.000076
	AN サイト-2008	87 地点	未検出	ND
	AN サイト-2009	39 地点	6 地点	0.0068
	SS サイト-2008	26 地点	未検出	ND
	SS サイト-2009	13 地点	3 地点	0.0046
	IO サイト-2008	54 地点	未検出	ND
	IO サイト-2009	7 地点	2 地点	0.0013
	AM サイト	34 地点	4 地点	0.0045
	熱帯・亜熱帯	マレーシア PB サイト	88 地点	1 地点
タイ LC サイト		48 地点	未検出	ND
NH 旧処分場		38 地点	2 地点	0.024
NH 新処分場		14 地点	1 地点	0.027

図 1-4 CH_4 および N_2O フラックスの関係

(◆: CH_4 フラックス $0.01\text{ml}/\text{min}/\text{m}^2$ 以上, ■: 同未満)

(5) 処分場表層における CH₄ 酸化率の評価

埋立地ガス中に含まれる CH₄ は温室効果ガスとして注目を集めている一方で、埋立地の安定化進行度を評価する上で重要な指標である。CH₄ は有機物の嫌氣的生物分解で生成する最終産物であるが、実際に処分場で観測可能なガス抜き管および地表面からの CH₄ 排出量と、実際の廃棄物層における CH₄ 発生挙動にはギャップがある。その要因の一つとして挙げられるのが、覆土層における CH₄ 酸化の影響である。欧米では CH₄ 発生量の 10-40% が覆土において削減された上で大気に排出されているという報告があるが、埋立物や埋立地管理方法の異なる我が国においては、知見が浅いのが現状である。既存のモニタリング指標である埋立地ガス中の CH₄ 排出量ではなく、埋立層における正味の CH₄ 発生量を評価することで、埋立地内の廃棄物分解挙動の理解と安定化の将来予測が精緻化されるものと期待される。

各地点における CH₄ 酸化率の実態調査をもとにサイトごとの平均値を算出した結果、国内処分場の CH₄ 酸化率は 9.5% から 22% までの範囲で分布していた。すべてのサイトの結果をまとめると、CH₄ 酸化率は 16% と算出された。また、マレーシアのサイトは 71% と算出された。処分場毎の CH₄ 排出量と CH₄ 酸化率を比較したところ、国内の埋立地において CH₄ 排出量が低いほど CH₄ 酸化率が高くなる傾向にあることが示された (図 1-5)。この結果より覆土内における CH₄ 酸化の活性が高いほど CH₄ 排出量が低くなることが考えられる。しかし PB サイトは CH₄ 排出量が高いにも関わらず CH₄ 酸化率が高いことが示された。この要因として PB サイトの埋立物は有機物量が多く、嫌気性埋立構造であるため、廃棄物層内で CH₄ 生成が起りやすい環境であることから廃棄物層内の CH₄ が高濃度であること、マレーシアは降水量が多いため、覆土の透気性が低下し、廃棄物層内から流入する CH₄ の覆土層における滞留時間が長い、すなわち覆土層内で CH₄ 酸化される時間が長いこと、熱帯地域であるため覆土の温度が高く、CH₄ 酸化細菌の活性が高いことから PB サイトの覆土における CH₄ 酸化活性が高いことが示唆された。また、埋立終了からの期間と CH₄ 酸化率を比較したところ、日本の埋立地である AM サイト、AN サイト、SK サイトにおいて埋立終了からの期間が長ければ CH₄ 酸化率も高いことが示された。日本の埋立地では CH₄ 酸化率が高いほど CH₄ 排出量が低くなることが示されたので、日本の埋立地において埋立終了してから時間が経つにつれて CH₄ 排出量が低くなることが CH₄ 酸化率の増加に影響しているということが考えられる。しかし海外の CH₄ 酸化率と比較すると、PB サイトは埋立終了からの期間が 2 年で 63.5% であり、また Borjesson ら(2006)によると埋立終了からの期間が 6 年であるスウェーデンの嫌気性

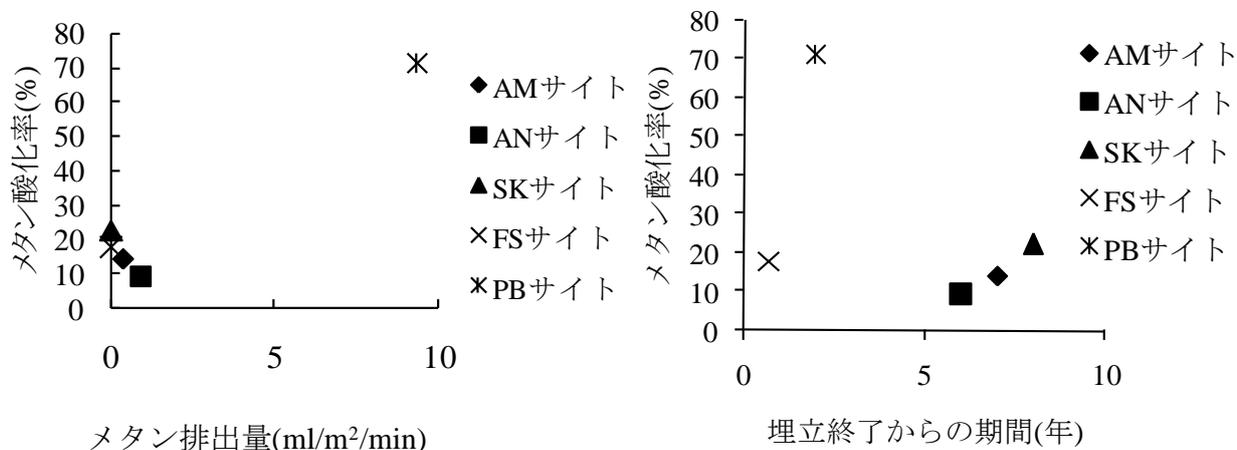


図 1-5 サイト毎の CH₄ 酸化率と安定化挙動との関連性

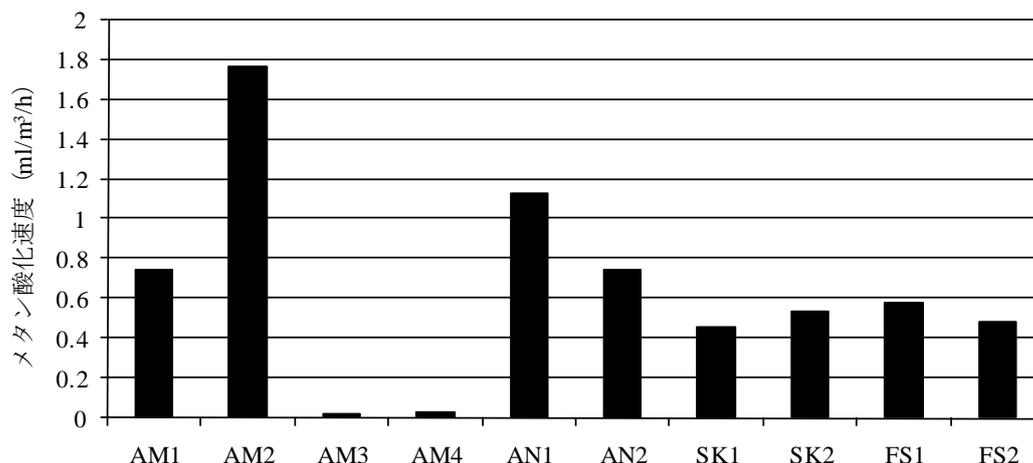


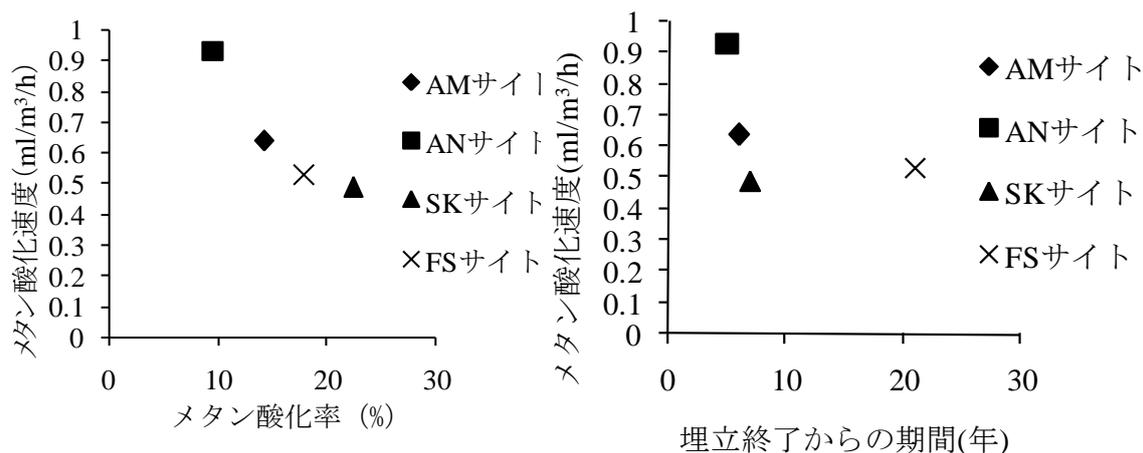
図 1-6 覆土試料を用いた CH₄ 酸化試験結果

構造埋立地の CH₄ 酸化率は 38-42% であると報告されていることから、埋立終了からの期間に関係なく、日本の埋立地覆土における CH₄ 酸化率は低いことが考えられる。日本では埋立られる廃棄物が焼却などで無機化されており、有機物量が少なく、廃棄物層における CH₄ 発生ポテンシャルが低いこと、埋立終了してから時間が経つにつれて CH₄ 排出量の低下により CH₄ 酸化率の増加に影響していることから日本の埋立地における CH₄ 酸化は排出量に依存していることが考えられた。

(6) 覆土中微生物による CH₄ 酸化能力の評価

各処分場より採取した覆土を用いて、CH₄ 酸化活性を評価した結果を図 1-6 に示す。またサイト毎にまとめた上で、CH₄ 酸化率および埋立後経過年数との関係性を評価した結果を図 1-7 に示す。CH₄ 酸化率との関係性においては、CH₄ 酸化率が高くなると CH₄ 酸化速度が低くなることが示された。また、埋立終了からの期間と CH₄ 酸化速度を比較したところ、埋立終了からの期間が長いほど CH₄ 酸化速度が低くなることが示された。この結果より、埋立終了後の覆土設置時点における CH₄ 酸化速度が最も速く、時間経過に伴い活性が低下すると考えられる。SK サイトにおける CH₄ 酸化速度が低い結果となった要因としては、SK サイトは産業廃棄物処分場であり、埋立物が汚泥、鉱さい、廃プラスチック、建設廃材、ガラス、陶磁器および燃え殻であり、廃棄物層内で有害性の高いガスが発生し、そのガスが覆土へ流入するため覆土内に存在する CH₄ 酸化細菌に悪影響を及ぼす可能性が大きいこと、また埋立終了からの期間が長いこと CH₄ 酸化細菌によるメタン酸化活性が低下したことが考えられる。また既往研究より SK サイトにおける CH₄ 排出実態調査の結果として 2001 年 6 月調査時、2002 年 2 月時および 2006 年 11 月時の CH₄ 排出量は 13.3 mL/m²/min、0.40 mL/m²/min および 0.0086 mL/m²/min と報告されている(Ishigaki et al, 2005)。すなわち SK サイトにおいては、廃棄物層内の CH₄ 発生量が時間経過に伴い減少していることから、埋立地覆土における CH₄ 酸化能力が低いにも関わらず CH₄ 酸化率が高くなったと考えられる。

また AN サイトにおいて CH₄ 酸化速度が高くなる要因として、AN サイトは一般廃棄物処分場であり、埋立物が混合ごみ、可燃ごみ、不燃ごみ、直接搬入ごみ、粗大ごみ、破碎ごみ、中間処理残さおよび焼却残さであり、産業廃棄物処分場に比べて廃棄物層内における発生するガスの有害性が低いこと、また埋立終了からの期間が他のサイトに比べて短いため、CH₄ 酸化細菌の活性が高くなったことが原因として考えられる。AN サイトにおける覆土による CH₄ 酸化能が高いにも関わらず CH₄ 酸化率が低くなった要因として、AN サイトは埋立終了からの期間が他のサイト

図 1-7 サイト毎の CH₄ 酸化速度と安定化挙動との関連性

に比べて短く、廃棄物層内における CH₄ 発生が活発であるためと考えられる。

以上より、埋立終了からの期間が長いほど CH₄ 酸化速度が低くなり、CH₄ 酸化率は高くなることが示された。埋立終了からの時間経過に伴い覆土における CH₄ 酸化速度が低下するにも関わらず CH₄ 酸化率が高くなる要因として、廃棄物層内における CH₄ 発生量が少なくなっていることが挙げられる。廃棄物層内における CH₄ 発生量が多く、覆土層への流入量が多くなると、同程度の CH₄ 酸化能力であっても、未酸化のまま大気へ排出される割合が高くなる。CH₄ 酸化率には発生量と CH₄ 酸化細菌の活性だけでなく、覆土の透気性も重要な因子として挙げられるが、それには覆土の材料と水分率が大きく関わるということが報告されている(石垣ら, 2007)。埋立地の安定化が進行するにつれて、メタン酸化によるメタン排出量削減への寄与度が増していくことが考えられる。温室効果ガス排出量算定ガイドライン(IPCC, 2006)においては、CH₄ 酸化率は埋立期間を通じて一定であり、5%というデフォルト値が与えられている。本研究で得られた結果から安定化の進行に伴う CH₄ 酸化率の時間変動とその値の妥当性について一定の成果が得られた。

(7) 一般廃棄物焼却施設における N₂O 等の排出挙動

1) 排出係数の算出

通常運転時での排ガス濃度等の測定結果と排出係数の算出結果を表 1-8 に示す。これによれば、N₂O、CH₄ の濃度および排出係数は安田のストーカ式焼却炉の報告例(1993)に比べて 1 桁以上低いことがわかる。これは、この間実施されたダイオキシン類対策により、燃焼温度の高温化、滞留

表 1-8 一般廃棄物焼却施設での N₂O、CH₄ の排出係数等 (一覧)

施設記号	焼却量 t/h	燃焼温度 °C	O ₂ %	CO ppm	NO _x ppm	N ₂ O		CH ₄		NH ₃	
						濃度 ppm	排出係数 g/t	濃度 ppm	排出係数 g/t	濃度 ppm	排出係数 g/t
						F1	1.1	912	14.5	6.6	0.47
F2	2.8	996	13.5	<5	2.2	23	0.6	2.1	6.3	25	
F3	1.0	902	15.3	95	95	0.45	6.2	2.9	15	6.6	35
F4	3.1	925	14.1	5.5		1.9	22	1.3	5.3	8.5	37
F5	7.4	1015	12.3	19	54	0.44	3.9	0.4	1.3	6.2	21
F6	1.9	891	13.0	<5		1.6	16	0.3	0.9	2.9	11
F7	3.5	810	15.7	236		4.2	63	61	330	3.2	19
F8	7.4	884	11.3	<5	31	0.52	4.1	0.4	1.1	3.4	10
F9	1.1	922	14.2	<5	12	0.40	3.2	1.2	3.5	12	55
F10	1.2	1167	7.5	635		0.40	2.2	13	26	4.2	7.0
F11	2.7	1244	11.3	13.8		0.32	2.3	0.7	1.9	2.3	2.3
F12	4.6	999	18.0	9.8		15.0	400	1.2	12	6.5	68

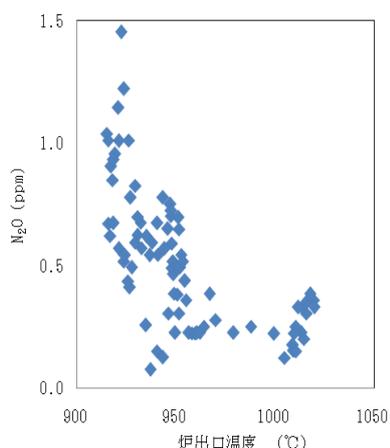


図1-9 N₂Oと炉出口温度との関係 (F5:連続測定値)

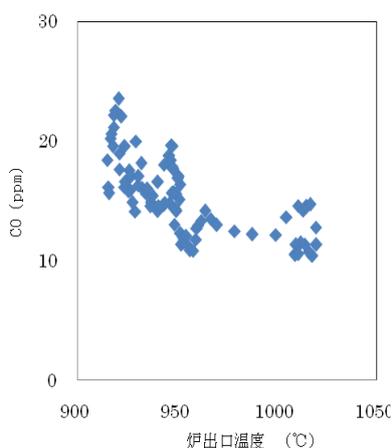


図1-10COと炉出口温度との関係 (F5:連続測定値)

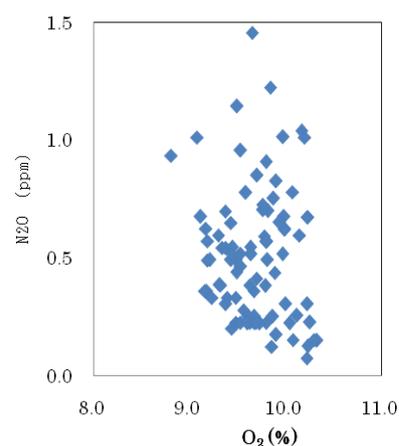


図1-11 N₂OとO₂との関係 (F5:連続測定値)

表1-10 産業廃棄物焼却施設でのN₂O、CH₄の排出係数等(一覧)

施設 号	焼却量 t/h	燃焼温度 ℃	O ₂ %	CO ppm	NOx ppm	N ₂ O		CH ₄		NH ₃	
						濃度 ppm	排出係数 g/t	濃度 ppm	排出係数 g/t	濃度 ppm	排出係数 g/t
						G1	5.4	945	12.0	130	99
G2	2.0	946	12.4	<5	33	0.3	4.0	1.6	7.8	3.3	17
G3	3.3	929	15.0	2	27	3.5	75	0.9	7.0	4.2	35
G4	0.9	820	13.3	130	46	27	280				

度は燃焼温度との間に負相関が、COとの間には正相関がある場合が多い。N₂OとCH₄の間には何らかの関係があるとはいえない。CH₄の相関係数をみると、N₂Oほどの関係はみられない。COの相関係数をみると、燃焼温度と負相関がある場合が多い。O₂と燃焼温度の間には負相関があることが多い。以上のことから、相対的ではあるが、N₂O、CO等に最も関係するのは燃焼温度といえる。しかし、燃焼温度は施設により測定する位置が異なるため、施設相互間で共通項目として単純に使用できないことに注意する必要がある。なお、施設F5におけるN₂O等の連続測定データを用いた項目間の相関図を図1-9～図1-11に示す。データ数が非常に多くなっているが、これらからN₂O、COとも炉出口温度と負相関がみられ、O₂濃度とはほとんど関係のないことがわかる。また、施設F5におけるアンモニア吹き込み式触媒脱硝装置前後のN₂Oの測定結果から、本装置においてN₂O濃度が36%程度減少していることがわかった。

(7) 産業廃棄物焼却施設におけるN₂O等の排出挙動

通常運転時での排ガス濃度等の測定結果と排出係数の算出結果を表1-10に示す。今回調査した施設は大型のものが多かったためか、一般廃棄物焼却施設に比べて特に高いということはない。N₂O濃度は流動床式焼却炉で高く、下水汚泥の焼却施設G4では最も高かった。

(8) もみがら、RDFの七輪を用いた燃焼によるN₂O等の排出挙動

燃焼実験で用いたもみがら、RDF中のCはそれぞれ38.8%、40.4%、Nはそれぞれ0.7%、1.1%

であった。排ガス濃度測定結果と排出係数算出結果を表 1-11 と表 1-12 に示す。ガスはほとんどが空気であり、排出係数はいずれも大気中濃度を差し引いた値である。表 1-11 よりもみがら、くすぶりが RDF ともくすぶり状態で CO、CH₄ などの未燃ガス成分の濃度が高かった。くすぶり状態から小炎燃焼への移行で CO₂ が上昇、CO が下降していることがわかる。RDF の場合小炎燃焼で NO_x が急増している。表 1-12 で RDF を加湿して燃焼させ、くすぶり状態から小炎燃焼への移行で CO₂ の増加がみられた。くすぶり状態でも七輪底部の温度は 600℃ 近くになっている場合があることに注意する必要がある。空気取り入れ口を閉めると、七輪底部温度、ガス濃度も減少した。

表1-11 七輪を利用した燃焼実験結果(1)

燃焼物	空気取入れ口の 開閉	燃焼状況	七輪底部 温度	O ₂	NO _x	N ₂ O		CH ₄		NH ₃		CO ₂		CO		C ₂ H ₄		C ₂ H ₆	
			℃	%	ppm	kg/t	ppm	kg/t	ppm	kg/t	ppm	kg/t	ppm	kg/t	ppm	kg/t	ppm	kg/t	ppm
もみがら (加湿なし、水分 9.1%)	開	くすぶり	285	19.5	0	0.34	0.032	57	21.1	2.2	0.9	1000	690	350	240	3.5	2.4	350	3.7
	開	小炎燃焼	385	19.6	1.0	0.39	0.049	22	4.5	7.2	1.7	2000	1030	300	120	1.8	0.69	300	0.71
RDF (加湿なし、水分 4.2%)	開	くすぶり	—	19.8	0.5	0.43	0.14	39	15.6	3.5	1.5	1000	760	240	75	12	8.9	240	5
	開	小炎燃焼	—	19.7	7.5	0.57	0.12	8	1.0	2.5	0.4	3000	1240	60	18	3.2	0.95	60	0.35
大気中濃度 (ppm)						0.31		1.8		0.0045		340		0.25		0.0021		0.0045	

表1-12 七輪を利用した燃焼実験結果(2)

燃焼物	空気取入れ口の 開閉	燃焼状況	七輪底部 温度	七輪上 部温度	O ₂	CH ₄		CO ₂		CO		
			℃	℃	%	ppm	kg/t	ppm	kg/t	ppm	kg/t	
もみがら (加湿なし、水分 9.1%)	開	くすぶり	515	42	21.8	18	5.8	900	903	220	137	
	閉	くすぶり	414	53	21.9	<5	<1.9	610	1006	68	71	
RDF (加湿なし、水分 2.8%)	開	くすぶり	594	61	21	47	16.4	1400	1056	220	141	
	閉	くすぶり	349	72	21.1	15	5.8	1150	1452	130	104	
RDF (加湿、水分 31%)	開	くすぶり	169	36	21.1	39	10.3	1320	1003	190	94	
	開	小炎燃焼	568	284	21.2	23	1.8	4730	1104	200	30	
	開	くすぶり大	389	192	20.9	8	0.66	3730	1089	210	39	
大気中濃度 (ppm)								1.8		340		0.25

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

廃棄物埋立地からの N₂O 排出に関する報告は世界的に見てきわめて乏しく、排出挙動に関する知見はほとんどない状況である。本研究で得られた成果は、N₂O の排出が我が国の埋立地においては非常に稀であり排出量の寄与としては小さいこと、ならびにその排出メカニズムとしては嫌氣的生成と好氣的生成の双方に由来することが示され、廃棄物埋立地あるいは投棄地の維持管理が排出挙動に大きく影響することが示された。これらの成果は新規性が高く学術的にも意義深いものであるといえる。また、我が国の埋立地表層における CH₄ 酸化挙動は欧米諸国での既報とは異なることを示し、さらに CH₄ 酸化率と細菌の活性および CH₄ 排出挙動との関係性を示すことで、気候帯や廃棄物管理手法の異なる地域での新たな覆土層の機能評価や維持管理につながる知

見が提供されたといえる。ダイオキシン類対策後の廃棄物焼却施設排ガス中における N_2O 、 CH_4 の挙動に関するまとまった知見はほとんどない状況である。 N_2O 、 CH_4 の濃度および排出係数は 1993 年の安田のストーカ式焼却炉の報告例に比べて 1 桁以上低く、 N_2O 、 CH_4 濃度は大気中レベルの低い施設が半分以上を占めることを明らかにした。またこれまで行われることがなかった施設別相関分析を行い、 N_2O 、 CH_4 と運転条件との関係を明らかにした。野焼きを模したもみがら、RDF の燃焼実験を行いこれまで定量的に得られていなかった N_2O 、 CH_4 、 CO の排出挙動を明らかにした。

(2) 地球環境政策への貢献

高度な中間処理が実施されている我が国の廃棄物管理体系は、炭素だけでなく窒素由来の温室効果ガス排出削減にも貢献しており、廃棄物適正管理・公衆衛生と温室効果ガス削減というコベネフィットを達成しているシステムとして、今後の国際協調的な排出削減の取組の中で提案可能になる。IPCC 第四次報告書で言及されたような、日本の埋立地からの N_2O 排出可能性については考慮の必要はなく、緩和技術としての日本型埋立管理の正当性を示す論拠として、本成果が活用されることが期待される。また埋立地表層における CH_4 酸化率について、我が国固有の排出係数を提示するとともに、その長期的な変化についても検討する必要性を示したことで、今後のインベントリ作成の精緻化に貢献可能であると考えられる。ダイオキシン類対策後の廃棄物焼却施設排ガス中 N_2O 、 CH_4 の排出係数が対策前に比べて大幅に減少していることから、燃焼管理の高度化がダイオキシン類のみならず温室効果ガスの大幅な削減にも貢献していることを示した。

6. 引用文献

- 1) Bockreis, A., Muller, W. and Steinberg, I. (2007) Assessment of the biodegradability of waste – a comparison of TEST methods in Germany and in the UK, Sardinia 2007. Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium
- 2) Borjesson, G., Danielsson, A., Svensson, B.H. (2000) Methane fluxes from a Swedish landfill determined by geostatistical treatment of static chamber measurements, *Environmental Science and Technology*, 34, 4044-4050
- 3) Borjesson, G., Samuelsson, J. and Chanton, J. (2006) Methane Oxidation in Swedish Landfills Quantified with the Stable Carbon Isotope technique in Combination with an Optical Method for Emitted Methane, 6684-6690
- 4) 平木隆年、玉置元則 (1991) 亜酸化窒素排出量調査の動向, *公害*, 26, 3, 23-31.
- 5) Houhu Zhang, Pinjing He, Liming Shao (2009) N_2O emission at municipal solid waste landfill sites: Effects of CH_4 emissions and cover soil, *Atmospheric Environment*, 43, 2623-2631.
- 6) Ishigaki, T., Yamada, M., Nagamori, M., Ono, Y., and Inoue, Y. (2005) Estimation of methane emission from whole waste landfill site using correlation between flux and ground temperature, *Environmental Geology*, 48, 7, 845-853.
- 7) IPCC (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5 Waste
- 8) 石垣智基, 佐野準治, 白井啓一, 山田正人, 東南アジア諸国の埋立地覆土層におけるメタン排出量削減に関する研究, 第 18 回廃棄物学会研究発表会
- 9) Kai Sormunen, Juha Einora, Matti Ettala, Jukka Rintala (2008) Leachate and gaseous emissions from

initial phases of landfilling mechanically and mechanically- biologically treated municipal solid waste residuals, *Bioresource Technology*, 99,p2399-2409.

- 10) 国際ジオシンセティックス学会日本支部・ジオメンブレン技術委員会(2000)ごみ埋立地の設計施行ハンドブック-しゃ水工技術 オーム社
- 11) 小野雄策, 長森正尚 (1994) 浸出水の水質経年変化, 埼玉県公害センター報, 21, 49-65
- 12) 立藤綾子(2001) 廃棄物埋立地における亜酸化窒素の発生メカニズムの解明と低減化に関する研究 廃棄物学会論文誌, 12, 6, 241-248
- 13) 武田信夫, 福永勲, 高岡昌輝 (2009) 地球温暖化と廃棄物 中央法規出版
- 14) 渡辺征夫, 孫恵欣, 小林征嗣, 赤石修 (1994) 練炭、木炭などの家庭用固形燃料からの CO などの大気汚染物質の排出、第 35 回大気汚染学会講演要旨集, 580.
- 15) 安田憲二 (1993) 廃棄物の焼却にともなう温暖化ガスの排出状況, 神奈川県環境科学センター研究報告, 16, 49-53.

7. 国際共同研究等の状況

マレーシアおよびタイにおける現場調査においては、現地大学、研究機関に協力を仰ぎ、現場との調整を図るとともに、共同調査を実施した。また、その際協力を依頼した大学関係者を含み、Workshop on Improvement of solid waste management and reduction of GHG emissions in Asia (第 2-4 回) および Workshop on Greenhouse Gas Inventories in Asia (第 6,7 回) に参加し、研究成果の情報提供を行った。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Tomonori Ishigaki, Chu Van Chung, Nguyen Nhu Sang, Michihiko Ike, Koji Otsuka, Masato Yamada, Yuzo Inoue, Estimation and Field Measurement of Methane emission from waste landfill in Hanoi, Vietnam, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 10, 2, 165-172, 2008
- 2) Rahul R. Upadhye, Daisuke Inoue, Tomonori Ishigaki, Kazunari Sei, Michihiko Ike, Microarray Analysis of Eubacterial Community and Bacterial Pathogens in Leachate from Three Different Landfills of Japan, *Environmental Engineering Research*, 45, 195-202, 2008
- 3) 長森正尚, 小野雄策, 河村清史, 山田正人, 石垣智基, 小野芳朗, 最終処分場における埋立地ガス組成の経年変化ー多量成分と脂肪族炭化水素, 廃棄物学会論文誌, 19, 4, 244-254, 2008
- 4) Hiromi Sawamura, Masato Yamada, Kazuto Endo, Satoshi Soda, Tomonori Ishigaki and Michihiko Ike, Characterization of microorganisms at different landfill depths using carbon-utilization patterns and 16S rRNA gene based T-RFLP, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 109, 2, 130-137, 2010

(2) 口頭発表(学会)

- 1) 古田祐介, 占部武生, 石垣智基, 中村義世, 山田正人, 小野芳朗, 廃棄物関連施設からの温室効果ガス排出量算定手法の改善, 第 18 回廃棄物学会研究発表会, 2007

- 2) 石垣智基, 佐野準治, 白井啓一, 山田正人, 東南アジア諸国の埋立地覆土層におけるメタン排出量削減に関する研究, 第 18 回廃棄物学会研究発表会, 2007
- 3) Tomonori Ishigaki, Waste treatment and GHGs emission: How to achieve co-benefit, International Symposium on Current Situation and Technology Aspects of Waste CDM, 2008
- 4) Tomonori Ishigaki, Masato Yamada, Property and reliability of waste data, The 6th workshop on GHG inventories in Asia, 2008
- 5) Masato Yamada, Komslip Wang-Yao, Kazuto Endo, Hiroshi Asakura, Tomonori Ishigaki, Applicability of IPCC waste model to landfills in Asia, 5th Intercontinental Landfill Research Symposium, 2008
- 6) Komslip Wang-Yao, Sirintornthep Towprayoon, Chart Chiemchaisri, Shabbir H. Gheewala, Annop Nopharatana, Masato Yamada, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki, Assessment of methane emissions from solid waste disposal sites in Thailand, 5th Intercontinental Landfill Research Symposium, 2008
- 7) Komslip Wangyao, Masato Yamada, Desell Suanburi, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki, Yugo Isobe, Effect of leachate distribution on methane emissions in tropical landfills, 5th Asian-Pacific Landfill Symposium, 2008
- 8) K. Wangyao, S. Towprayoon, C. Chiemchaisri, M. Yamada, K. Endo, T. Ishigaki, S. H. Gheewala, A. Nopharatana, Seasonal variation of methane emissions in solid waste disposal sites, 第 19 回廃棄物学会研究発表会, 2008
- 9) Nguyen Nhu Sang, Satoshi Soda, Tomonori Ishigaki, Kazunari Sei, Michihiko Ike, Present situation of solid waste landfill sites in Ho Chi Minh City, Viet Nam, 第 19 回廃棄物学会研究発表会, 2008
- 10) 長森正尚, 山田正人, 石垣智基, 小野雄策, 管理型最終処分場の廃止基準に関する考察 (5), 第 19 回廃棄物学会研究発表会, 2008
- 11) 澤村啓美, 山田正人, Komslip Wang-Yao, 宮城俊彦, 池道彦, 石垣智基, 亜熱帯・熱帯地域の埋立地における微生物生態系の特徴, 第 19 回廃棄物学会研究発表会, 2008
- 12) 古田祐介, 石垣智基, 占部武生, 山田正人, 成岡朋弘, Komslip Wang-Yao, 宮城俊彦, 田中宏和, 小野雄策, 埋立地からのメタンおよび亜酸化窒素排出量の評価手法に関する検討, 第 19 回廃棄物学会研究発表会, 2008
- 13) 山田正人, 遠藤和人, Komslip Wang-Yao, 朝倉宏, 石垣智基, 埋立地メタン放出量を推計する IPCC 一次分解モデルパラメータの現場計測法, 第 19 回廃棄物学会研究発表会, 2008
- 14) 山田正人, 大塚康治, 石垣智基, 遠藤和人, アジア諸国における都市ごみの流れ, 第 30 回全国都市清掃研究事例発表会, 2009
- 15) 古田祐介, 石垣智基, Komslip WangYao, 遠藤和人, 山田正人, 埋立地における温室効果ガスの排出挙動: 亜酸化窒素・メタンの排出係数の高度化, 第 30 回全国都市清掃研究事例発表会, 2009
- 16) 澤村啓美, 山田正人, 小野雄策, 遠藤和人, 朝倉宏, 長森正尚, 池道彦, 石垣智基, 埋立物および管理方法が処分場内の真正細菌群集構造に与える影響, 第 30 回全国都市清掃研究事例発表会, 2009
- 17) 惣田訓, 新井崇志, 濱田武志, 井上大介, 石垣智基, 池道彦, 山田正人, 統計データからみた下水処理場の処理水水質と水処理部門からの温室効果ガス排出量の関係, 第 43 回日本水環

境学会年会, 2009

- 18) Ishigaki, T., Furuta, Y., Wang-Yao, K., Endo, K. and Yamada, M., Estimation of emission factors of greenhouse gas emission from waste landfills in Japan, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium, 2009
- 19) Wangyao, K., Yamada, M., Endo, K., Ishigaki, T., Naruoka, T., Towprayoon S. and Chiemchaisri, C., Estimation of methane generation rate constant for tropical landfills, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium, 2009
- 20) Yamada, M., Kawai, K., Ishigaki, T. and Osako, M., Waste stream diagram and transition of waste management in the world, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium, 2009
- 21) 大渡俊典, 山田正人, 石垣智基, 國森雅彦, 高田光康, 宇佐見貞彦, レーザーメタン計を用いた最終処分場内のメタンガス平面濃度分布調査, 第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2009
- 22) 山田正人, 遠藤和人, ワンヤオコムシン, 朝倉宏, 石垣智基, 埋立地現場における IPCC 一次分解モデルにおける好気性分解補正係数 (MCF) の評価, 第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2009
- 23) 長森正尚, 山田正人, 石垣智基, 小野雄策, 管理型最終処分場の廃止基準に関する考察 (6), 第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2009
- 24) 橋詰実佳, 石垣智基, 山田正人, Lee Suk-Hui, 途上国における廃棄物管理改善にかかる環境評価システムの構築に関する研究, 第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2009
- 25) Komsilp W., Yamada, M., Endo, K., Naruoka, T., Ishigaki, T., Estimation of methane generation rate constant for tropical landfills, 第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2009
- 26) Yamada, M., Komsilp, W., Endo, K., Naruoka, T., Ishigaki, T., Investigation of methane oxidation in tropical landfills, 第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2009
- 27) 占部武生, 森田堯之, 石垣智基, 一般廃棄物焼却施設排ガス中 N_2O, CH_4 の排出挙動, 第 20 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2009
- 28) 東川拓司, 石垣智基, 埋立地における廃棄物の分解・ガス化率の評価に関する実験的検討, 第 31 回全国都市清掃研究・事例発表会, 2010

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし

B-071 廃棄物分野における温室効果ガスインベントリの高度化と削減対策の評価に関する研究
(2) 我が国の排水ストリームにおける炭素・窒素フローの評価とCH₄およびN₂Oの削減対策の評価

大阪大学工学部

池道彦

惣田訓

研究協力者

吉見勝治

澤村啓美

平成19～21年度合計予算額 18,201千円
(うち、平成21年度予算額 5,600千円)

※予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 排水処理分野からの温室効果ガス排出挙動は、処理施設の種類および排水性状によって異なることから、それらに基づき、①産業排水の処理に伴う排出、②生活・商業排水の処理に伴う排出(終末処理場)、③生活・商業排水の処理に伴う排出(生活排水処理施設(主に浄化槽))、④生活・商業排水の処理に伴う排出(し尿処理施設)、⑤生活排水の自然界における分解に伴う排出、の5つに大別されている。各処理にはCH₄、N₂O排出特性の異なる多様な処理技術・システムが含まれているが、既存のインベントリデータが十分には整備されておらず、技術・システムごとの排出係数の算定はなされていない。そこで、様々な処理施設における温室効果ガス排出係数を文献調査、ヒアリング調査、実測によって、明らかとすることを試みた。産業排水処理施設のCH₄排出量算定には、排水原水の組成と生物処理槽への流入濃度を明確にする必要があることが明らかとなった。し尿処理施設に関する解析から、反応槽が複数の施設では単一の施設よりもN₂O排出係数が高くなることが示された。コミュニティ・プラントでの調査では、N₂Oが検出されず、近年の運転・管理技術の向上により排出係数が低下している可能性が考えられた。終末下水処理場に関する解析においては、A2O法のような窒素除去プロセスでは、CH₄排出量を抑制することができ、適切に硝化と脱窒が進行すれば、N₂O排出量も小さくなることが示唆された。また、下水道統計等に基づく資料調査の結果、標準活性汚泥法、嫌気好気活性汚泥法などの終末処理場における様々な処理プロセスは、富影響化指標と地球温暖化指標がトレードオフの関係にあることが示唆された。

[キーワード] 排水処理、温室効果ガス、メタン、亜酸化窒素、排出係数

1. はじめに

生活・商業・産業排水中に含まれる有機成分および窒素成分が排水処理施設で生物処理を受けるときに CH_4 および N_2O が排出される。このため、排水処理分野では、これら2種が温室効果ガスとして計上される。我が国では、排水処理施設からの CH_4 、 N_2O の排出量は CO_2 換算でそれぞれ146万t、120万tであり、全排出量のそれぞれ6.0%、4.6%に上っている（温室効果ガスインベントリオフイス編, 2007）。排水処理分野からの温室効果ガス排出挙動は処理施設の種類および排水性状によって異なることから、それらに基づき、①産業排水の処理に伴う排出、②生活・商業排水の処理に伴う排出（終末処理場）、③生活・商業排水の処理に伴う排出（生活排水処理施設（主に浄化槽））、④生活・商業排水の処理に伴う排出（し尿処理施設）、⑤生活排水の自然界における分解に伴う排出、の5つに大別されている（環境省温室効果ガス排出量算定法検討会, 2006a）。各処理には CH_4 、 N_2O 排出特性の異なる多様な処理技術・システムが含まれているが、既存のインベントリデータが十分には整備されておらず、技術・システムごとの排出係数の算定はなされていない。また、既存データのあるものについても取得された時期が古く、現状を正しく把握できるインベントリになっていない。 CH_4 および N_2O は地球温暖化係数が大きいことから、単位削減量に対する効果が大きく、インベントリデータを充実させ、技術ごとの排出特性を適正に評価することができれば、間近に迫った京都議定書による温室効果ガス削減目標の達成に重大に貢献するものと考えられる。特に、排水処理システムが未整備であるアジアを中心とした途上国へ CH_4 ・ N_2O を削減する排水処理技術を導入すれば、大きな削減効果が見込まれる。このような背景から、排水処理分野における温室効果ガスインベントリの高度化・精緻化は急務の課題である。

2. 研究目的

（1）産業排水処理施設に関するインベントリデータ調査

産業排水として、ガス製造業者およびプラスチック製品製造業者のものに着目し、ヒアリング調査を実施することで、温室効果ガス排出量の算出における留意点を明らかとすることを目的とした。

（2）し尿処理施設からの CH_4 、 N_2O 排出量の精緻化

実測値のあるし尿処理施設について、処理プロセスの違いに着目し、温室効果ガスの排出係数の細分化を目的として、文献調査を行った。

（3）コミュニティ・プラントにける温室効果ガス排出量の調査

コミュニティ・プラントからの現在の CH_4 の排出係数は、実測値の下限値と上限値の単純平均値（環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会, 2006b; 山田, 1998; 田中ら, 1994）で定められているが、調査対象とされたコミュニティ・プラントの規模や処理方式が不明である。 N_2O 排出係数は、2回の測定データの平均値（環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会, 2006b）とされているが、このデータは処理人員 1900人、設計処理水量 1100～1200 m^3 /日、長時間曝気方式の同規模の2か所のコミュニティ・プラントにおいて採取されたものであり、排出係数は0.04～0.11 $\text{g-N}_2\text{O}/\text{人}\cdot\text{日}$

とも報告されているが（山田, 1998; 田中ら, 1994）、測定時の検出下限値が排出係数に反映されていない。また、これらのデータは1994年以前に取得されたものであり、その後の追加調査もされていないため、現在稼働しているコミュニティ・プラントの温室効果ガスの排出実態を十分に反映していない可能性もある。そこで、様々な処理規模・処理方式の8か所のコミュニティ・プラントにおける温室効果ガスの排出量を測定し、メタンと亜酸化窒素の新たな排出係数を推定することを目的とした。

（４）終末処理場から排出されるCH₄、N₂Oの調査および排出係数の精緻化

下水道人口が年々増加していることから、終末処理場にて生物処理を行う際に発生するCH₄、N₂O排出量も増加することが予想される。終末処理場の排出係数は、実測データをもとに設定されているが、限られた数のデータの平均値であり、処理方式別に設定されておらず、また実測値を取得した時期も古いことから、現状のCH₄、N₂O排出量を正確に把握できていない可能性がある。そこで、生活・商業排水を終末処理場によって生物処理を施した際に排出されるCH₄、N₂Oの排出係数の最近の調査報告をまとめ、終末処理場の温室効果ガス排出係数の更新を提案することを目的とした。

（５）統計からみた下水処理場の処理水水質と水処理部門からの温室効果ガス排出量の関係

下水道施設は、エネルギー多消費型のインフラストラクチャーとして温室効果ガスの排出量の抑制が求められている一方で、富栄養化に寄与する栄養塩類などの除去を目的とした高度化も従来から求められている。しかし、この両要求は必ずしも同時には成立しえない関係にあるため、地球温暖化対策と水質改善との両側面を考慮したうえで、下水処理システムのあり方を見直す必要がある。特に主処理としての生物処理は、地球温暖化、並びに富栄養化に対し多大な影響を与える。そこで本研究では、多様化・高度化している生物処理プロセスの地球温暖化影響と富栄養化影響を日本全国の下水道統計データをもとに定量化し、両指標の相関関係を明らかにすることを目的とした。

3. 研究方法

（１）産業排水処理施設に関するインベントリデータ調査

産業排水の処理に伴うCH₄・N₂Oの排出量算出法の問題点を明らかにするため、実際の産業排水処理状況をヒアリング調査した。ヒアリング調査は、H県のガス製造業者（A社）及びS県のプラスチック製造業者（B社）に対して実施した。

（２）し尿処理施設からのCH₄、N₂O排出量の精緻化

文献調査によって、標準脱窒素処理方式および高負荷脱窒素処理のし尿処理施設の排出係数の精緻化を試みた。

（３）コミュニティ・プラントにおける温室効果ガス排出量の調査

S県の施設A～Hの8か所のコミュニティ・プラントを対象とし、温室効果ガス排出量を2007

年から 2009 年にかけて測定した。調査対象としたコミュニティ・プラントの概要を表 2-1 に示す。設置年が不明なものもあるが、多くは 1980 年代の団地開発に伴って設置されたものであり、設計処理人員は 30 人から 1345 人まで様々である。

一例として施設 D の処理プロセスの概要を図 2-1 に示す。典型的なコミュニティ・プラントであり、終末処理場の最初沈殿池に相当するものはなく、流入水は沈砂槽を通り、調整槽に貯められる。その後、二つの接触曝気槽で有機物が分解・除去され、処理水は消毒後に河川に放流される。二つの沈殿槽で回収された汚泥は、汚泥濃縮槽に送られ、脱離液は調整槽に戻される。一方、濃縮汚泥は、定期的にバキュームカーで搬送され、2006 年の汚泥引抜量の実績は、218 m³/年であった。施設の点検は 24 回/年、水質検査は 12 回/年の頻度で実施されている。

水面からのガス採取は、浮遊式チャンバー法を用いた。円筒型のチャンバー（容積：1.5 l、底面積 50.2 cm²）を水面に静置し、チャンバー上部のコックにチューブをつなぎ、ミニポンプ（柴田科学 MP-2N、流量範囲 0~2.5 l/min）を用いて、1、5、10 分後にチャンバー内のガスをテドラーバッグに回収した。水面のガスフラックスは、次式により計算した。

$$F_i = \frac{V_c}{S_c} \left(\frac{dC_i}{dt} \right)$$

ここで F_i は、CH₄ または N₂O のフラックス (ml/m²・分)； V_c はチャンバー体積 (m³)； S_c はチャンバー底面積 (m²)； C_i は CH₄ または N₂O の濃度 (ml/m³)； t はチャンバー設置時間 (分) である。

浮遊式チャンバー法により採取したガス中の CH₄ 及び N₂O 濃度は、水素炎イオン化検出器およびパルス放電光イオン化検出器付きガスクロマトグラフィー (Shimadzu GC14B) により測定した。なお検出限界値は、CH₄、N₂O 濃度ともに 500 ppb であった。

コミュニティ・プラントを対象とした CH₄ 及び N₂O 排出係数 EF_i (kg/人) は、ガスフラックス F_i を用いて以下のように算出した。

$$EF_i = F_i S M_i \times 60 \times 24 \times 365 \times \frac{P}{10^6 R T N}$$

EF_i は CH₄ または N₂O の排出係数 (kg/人)、 S はフラックスを測定した反応槽の水面面積 (m²)； M_i は CH₄ または N₂O の分子量、 P は大気圧 (atm)、 R は気体定数 (0.082 l atm/K mol)、 T は大気温度 (298K)、 N は処理人口 (人) である。

水面積 S は、施設の構造上、正確に測定できない場合もあり、コミュニティ・プラントを設置した S 県 O 市の住宅課の保有している設計図面や、一部の施設は他施設のデータから推測した値を用いた。また、処理人口は、施設を利用している実際の人口が不明であるため、表 2-1 に示す設計処理人員で代替した。

表2-1 調査対象としたコミュニティ・プラントの概要

施設	設計処理能力 (m ³ /日)	設計処理人員 (人)	処理方式	汚泥引抜量実績 (m ³ /年)	設置年
A	336	1345	長時間曝気	218	
B	65	216	長時間曝気		
C	24	96	長時間曝気		
D	50.25	201	接触曝気	34	1987年1月
E	82	315	長時間曝気+3次処理	72	1981年3月
F	86.8	434	長時間曝気+3次処理	77	
G	118	471	長時間曝気+3次処理	70	1984年9月
H	8	30	分離接触曝気	8	1988年2月

すべて間欠曝気方式、施設E～Hの3次処理は付着曝気処理を施している。

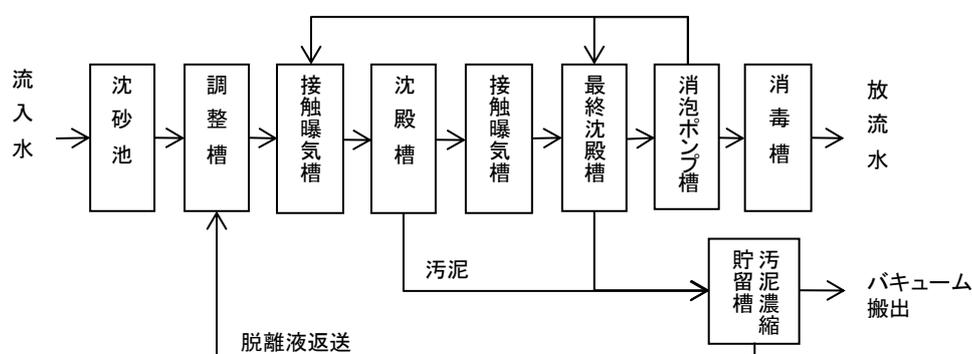


図2-1 コミュニティ・プラント施設Dの処理プロセスの概要。

(4) 終末処理場から排出されるCH₄、N₂Oの調査および排出係数の精緻化

終末処理場の温室効果ガス排出係数の根拠資料となっているこれまでの調査結果の確認、ならびに昨今の調査事例の文献調査を行った。また、2009年に東京都下水道局施設管理部にヒアリング調査を行った。

表2-2 評価対象とした処理プロセスの基礎データ（平成16年度版下水道統計）

	処理場数 ^a			計画放流水質、mg/L ^b (典型的な除去率、%)		
	年間処理量、m ³ /y			BOD	T-N	T-P
	< 10 ⁶	10 ⁶ -10 ⁸	> 10 ⁸			
標準活性汚泥(CAS)法	63	282	145	10-15 (90-95)		
嫌気-好気活性汚泥(AO)法	14	10	15	10-15		< 3 (75-95)
硝化-脱窒循環法	7	6	0	10-15	< 20 (65-75)	
嫌気-無酸素-好気(A2O)法	5	4	2	10-15	< 20 (65-75)	< 3 (75-95)
硝化/内生脱窒法	4	1	0		(75-95)	
ステップ流入式硝化脱窒活性汚泥法	0	3	2		(75-85)	
ステップエアレーション法	0	4	6	10-15 (90-95)		
酸素活性汚泥法	1	3	3	(90-95)		
長時間曝気法	25	1	0	(90-95)		
オキシデーションディッチ (OD) 法	459	30	0	(90-95)		

^a 社団法人日本下水道協会.2004, ^b Japan Sewage Works Association, 2001.

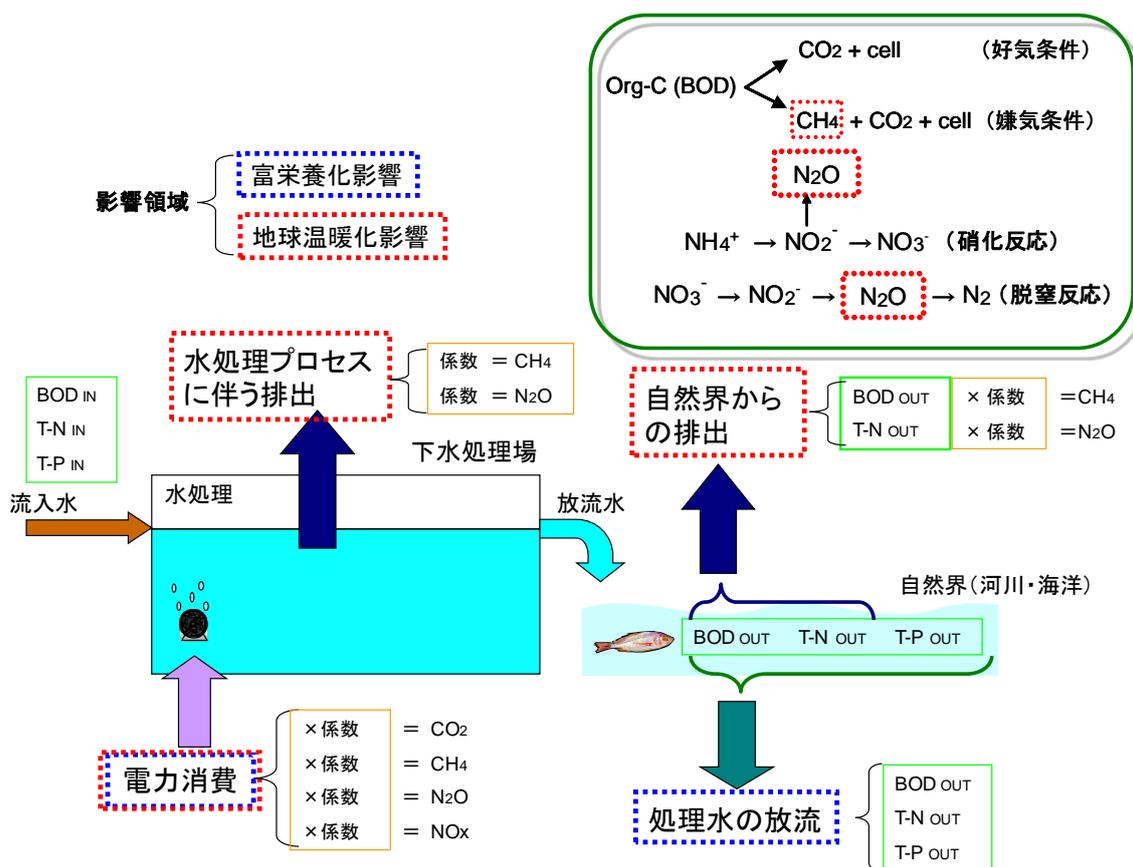


図2-2 評価対象とした環境影響プロセス。

4. 結果・考察

(1) 産業排水処理施設に関するインベントリデータ調査

1) 生物処理以外の方法で処理されているBODの考え方

産業排水処理施設のCH₄排出量算定のベースとなる活動量は、下式に基づき算出されている（環境省温室効果ガス排出量算定法検討会, 2006a）。

$$\text{各業種の産業排水のBOD濃度} \times \text{排水量} \times \text{生物処理の割合}$$

ここで、各業種の産業排水のBOD濃度は、平成3～5年の環境省調査の業種別平均水質より求めた数値（社団法人日本下水道協会, 2008）であり、生物処理の割合は、各年度の「発生負荷量管理等調査（環境省水・大気環境局）」における排水処理方法が「活性汚泥」、「その他生物処理」、「その他高度処理」である届出排水量の割合で計算されているが、実際には生物処理だけでなく、生物処理以前の処理によりBODが除去される場合もあるため、生物処理に供されるBOD濃度は上記産業排水のBOD濃度よりも小さくなるはずである。例えば、ガス製造業者A社の含油排水処理装置に関して調査を行った結果、生物処理の前処理である加圧浮上において95%以上の有機物（DOCベース）が除去されていることが明らかになった（表2-3）。

従って、排水原水の濃度を把握するだけでなく、生物処理槽への流入濃度を明確にする必要がある。そのためには、「発生負荷量管理等調査」などの公的な調査において、放流水の濃度を把握させるだけでなく、生物処理施設への流入水側の濃度を把握・記載させることが有効であると考えられる。また、同様の指摘はN₂Oの排出量算出に関しても該当する。

2) 化石燃料由来のBODについて

化学工業、石油製品・石炭製品製造業、プラスチック製品製造業の排水中に含まれるBODは、化石資源由来の成分が大半を占めるものと考えられる。この場合、CH₄のみならず、CO₂の排出量も排出量としてカウントする必要が生じる。製造工程で発生する排水を活性汚泥法処理しているプラスチック製品製造業B社の排水（活性汚泥処理への流入水）の原水組成を調査したところ、そのCODの値から、排水成分の9割程度は化石資源由来であることが明らかになった（表2-4）。

表2-3 ガス製造業者における含油排水処理データ

	原水	加圧浮上処理	生物処理
pH (—)	7.3	7.6	7.5
TOC (mg/l)	544	17	8
油分 (mg/l)	1800	10	12
TOC除去率 (%)	—	97	99

表2-4 プラスチック製品製造業排水組成例

	濃度 (mg/l)	分子量	化石燃料由来COD _{Cr} (mg/l) *2	化石燃料由来成分の割合
COD _{Cr}	2160		合計 1,918	0.89
成分A *1	89	99.1	86	
成分B	62	62	64	
成分C	56	120.1	60	
成分D	299	32.0	299	
成分E	97	72.1	172	
成分F	419	30.0	447	
成分G	1、136	46.0	790	

※1：成分A～Gは石油由来が明確な化学物質成分（非開示）。分析されていない他の化石燃料由来の成分も存在すると考えられる

※2：COD_{Cr}の出現率が明確でないためThOD=COD_{Cr}（出現率=1）と仮定。

活性汚泥処理における現状のCH₄排出係数は0.00489 kg-CH₄/kg-BODであり、CH₄のGWP（IPCCの100年モデルでは23）を考慮すると、0.112 kg-CO₂eq/kg-BODとなる。一方、生物学的排水処理プロセスで除去されるBODの50%がCO₂に変換されると仮定すると、化石燃料由来のCO₂は0.688 kg-CO₂eq/kg-BODとなる。仮に、現在の化学工業、石油製品・石炭製品製造業、プラスチック製品製造業も同様に排水中のBODの89%が化石資源由来と仮定すると、現状と比較して約4倍の温室効果ガス排出量が算定されることになり、排水処理分野からのCH₄排出量に対する産業排水処理施設の寄与率が非常に大きくなる（表2-5）。

なお、化石燃料由来のCO₂については、製鉄業における活性汚泥処理（コークス由来のフェノール等が含まれる）（公害防止の技術と法規編集委員会, 2009）など、これまで算定対象としなかった業種にも影響を及ぼす可能性があり、今後、化石燃料由来のCO₂の扱いについて明確にする必要がある。また、生物学的排水処理プロセスで除去されたBODの残り50%は余剰汚泥となり、廃棄物部門での温室効果ガス排出量の算定量を増加させることになりうる。

表2-5 化石燃料由来のCO₂を算定した場合の温室効果ガス発生量

	GWP (CH ₄ のみ)	GWP (CH ₄ +CO ₂)
化学工業	13.1	411.5
石油製品・石炭製品製造業	0.0260	1.2480
プラスチック製品製造業	0.731	8.665
他の対象業種を含む合計	102	510

（単位：Gg-CO₂eq/年）

※温室効果ガス排出量算定に関する検討結果2004年のデータを元に試算

3) BOD、T-N濃度原単位について

(1)で記載した通り、現状でのBOD、T-N濃度原単位は、平成3～5年に実施された環境庁調査に基づいた数値であり、既に調査から約15年を経ている。例えば、産業排水分野の大きな排出源として算定されている紙パルプ工場は、1991年（平成3年）と比較し、2002年の時点ではBOD負荷は42%低下し、水原単位についても16%減少しているとの報告もある（紙パルプ技術協会環境技術委員会, 日本製紙連合会環境保全委員会, 2006）。

下水処理以上に技術革新や業界トレンド影響を受けやすい産業排水処理については、「水質汚濁物質排出量総合調査」や「発生負荷量管理等調査」で現状よりも極め細かな実態把握を行うことにより、技術の進展に合わせた温室効果ガス排出量を示していく必要がある。

なお、 CH_4 、 N_2O の排出係数について、産業分類毎に区分けすることは極めて困難であると考えられる。活性汚泥処理そのものの CH_4 、 N_2O 排出係数に及ぼすパラメーターを実験的に明らかにした上で、産業排水についてもその値を適用することが妥当であると考えられる。

(2) し尿処理施設からの CH_4 、 N_2O 排出量の精緻結果

し尿処理施設においては、 CH_4 排出係数に関しては標準脱窒素処理方式および高負荷脱窒素処理方式でいくつか実測値があるが、それぞれ $0.059 \text{ kgCH}_4/\text{m}^3$ 、 $0.05 \text{ kgCH}_4/\text{m}^3$ で処理方式に関係なく同様である（環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会, 2006a）。 N_2O に関しては、高負荷脱窒素処理方式において、1990～1994年と2003年以降の実測値があり、運転・制御技術の向上により近年では排出係数が低く抑えられている（図2-3）（環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会, 2006b; 大村ら, 2004）。また、排出係数に関連する因子について検討した結果、高負荷脱窒素処理方式と膜分離高負荷脱窒素処理方式のいずれにおいても、窒素負荷量などは排出係数と明確な関連性を示さなかったが、高負荷脱窒素処理方式においてのみ、主反応槽が複数の施設では単一の施設より明確に高い排出係数を示した（図2-3、2-4）。主反応槽が複数の場合、全槽を適正に制御・管理することが容易でないため、硝化あるいは脱窒に部分的に障害が生じ、 N_2O 排出量が高くなったものと推察された。以上のことから、し尿処理場での N_2O 排出係数は、表2-6のように設定することが望ましいと考えられた。

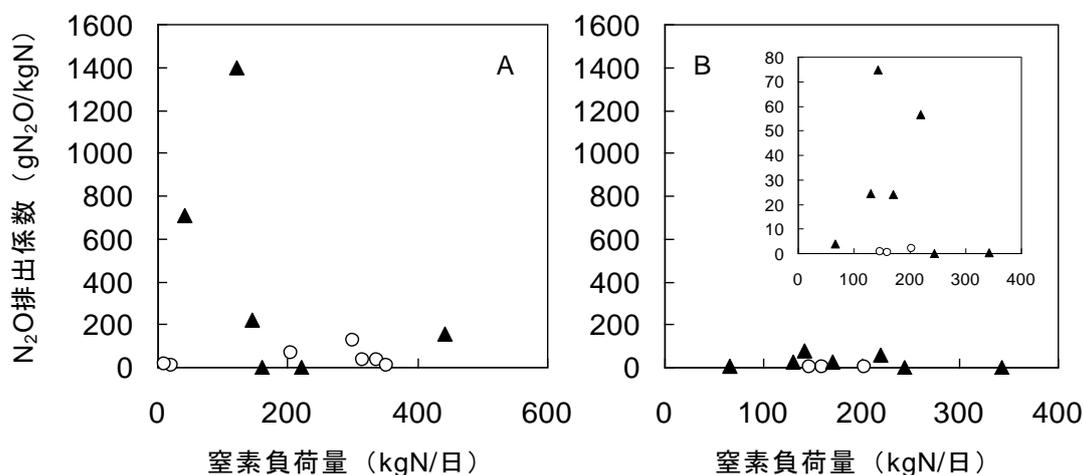
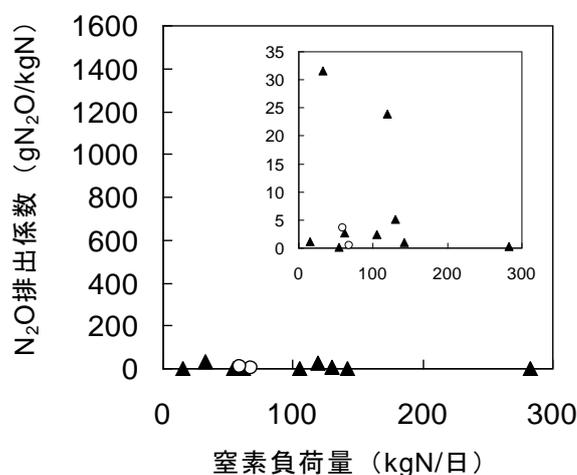


図2-3 高負荷脱窒素処理方式のし尿処理施設における N_2O 排出係数（大村ら, 2004; 水落ら, 1998）。A: 1990～1994年 B: 2003年以降 ○: 主反応槽数1 ▲: 主反応槽数 ≥ 2

表2-6 し尿処理場の方式・主反応槽数別のN₂O排出係数（大村ら, 2004; 水落ら, 1998）

処理技術	排 出 係 数 (kgN ₂ O/kgN)	
	既存の排出係数	新たな排出係数
高負荷脱窒素方式	1990～1994年 0.033	単一 0.030
		複数 0.19
	2003年以降 0.019	単一 0.00075
		複数 0.024
膜分離高負荷脱窒素方式	2003年以降 0.0024	単一・複数 0.0024

図2-4 膜分離高負荷脱窒素処理方式のし尿処理施設におけるN₂O排出係数（大村ら, 2004）。

○：主反応槽数1 ▲：主反応槽数≥2.

(3) コミュニティ・プラントからのCH₄、N₂O排出量の調査結果

各施設における水質調査結果を表 2-7 に示す。施設 A～C では DOC 濃度は測定しなかったが、調査対象としたコミュニティ・プラントの有機物の除去性能には、大きな問題は確認されなかった。どの施設においても、処理によって NH₄-N が減少し、NO₃-N が増加していることから、十分に硝化が進行していたといえる。しかし、冬季（'09. 1. 15）の施設 D においては、NH₄-N が減少せず、NO₃-N も蓄積しておらず、硝化が十分には起こっていなかった。特殊な結果として、冬季（'08.1.26）の施設 B では、曝気槽および沈殿槽の pH が 3.2 と低く、この原因としては、40 mg-N/L を超える高濃度の NO₃-N が蓄積していたことや、酸性排水が一時的に流入したものと考えられた。N₂O の発生に関わる（田中ら, 1994; 社団法人日本下水道協会, 2004）とされる NO₂-N の 1.0 mg/L 以上の蓄積は、施設 B、C、D でみられ、それぞれ最大で 3.9、3.7、1.5 mg-N/L であった。また、春季（'08.3.7）の施設 C の調整槽の T-N 濃度は、約 98 mg-N/L であり、他の施設よりも高濃度の

窒素が流入していた。

各施設における CH_4 排出量を表 2-8 に示す。施設 A～C では測定は行わなかったが、測定をした施設 D、E および H において CH_4 の排出が確認された。施設 H からは、調整槽から CH_4 が検出されていることから、排出源からコミュニティ・プラントまでの管路内において、汚水の有機物の一部がすでに CH_4 に変換され、反応槽で曝気されることによって大気に排出されていることが示唆された。終末処理場でも、流入水由来の CH_4 が曝気槽で大気中に排出されていることが報告されている（水落ら, 1998）。または、本調査では測定できなかったが、嫌気条件となる汚泥濃縮貯留槽において CH_4 が発生し、その脱離液が返送されることも、調整槽から CH_4 が検出された理由に挙げられる。また、終末処理場では、水温が高いと CH_4 の排出量が多いと報告（水落ら, 1998）されているが、夏季と冬季に測定した施設 D や H では、その明確な傾向は確認できなかった。

各施設における N_2O 排出量を表 2-9 に示す。施設 A～H の調整槽、曝気槽、接触曝気槽、沈殿槽のいずれからも、採取したガス中の N_2O 濃度は検出下限である 0.5 ppm 以下であった。田中ら（1994）の報告では、2 か所のコミュニティ・プラントから 1～4 ppm の N_2O が検出されており、流量調整槽に比べると、沈砂・原水槽室と曝気槽からの排出量が多いことが報告されている。終末処理場においては、硝化過程と脱窒過程の両者から N_2O が発生する（Kampschreur et al., 2009; 東京都下水道局施設管理部, 2002）ことが知られており、 N_2O の発生量と $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度には関連があると報告（Kampschreur et al., 2009）されているが、 $\text{NO}_2\text{-N}$ の蓄積が確認された施設 B、C、D（表 2-4）を含む 8 か所すべてにおいて、ガス中の N_2O 濃度の増加は確認できなかった。現在の排出係数は、2 か所の調査データを根拠としており、 N_2O の排出量を代表するにはデータ数が少なく、様々な処理規模の 8 か所の施設を対象とした本調査からは、コミュニティ・プラントからの N_2O 排出量は、極めて小さいことが示唆された。この理由を現時点では明らかにすることはできないが、今回調査したコミュニティ・プラントは、硝化反応がほぼ十分に進んでいた一方、脱窒反応が生じやすい設計・運転条件にはなっていなかった。今後は窒素除去型のコミュニティ・プラントの N_2O 排出量の調査を行い、 N_2O 排出メカニズムを詳細に調査する必要がある。

表 2-7 コミュニティ・プラント施設 A-H における水質調査結果

採取日 施設	場所	pH	DO (mg/L)	水温 (°C)	DOC (mg/L)	NH ₄ -N (mg-N/L)	NO ₂ -N (mg-N/L)	NO ₃ -N (mg-N/L)	T-N (mg-N/L)
施設A									
'07.11.26	調整槽	8.0	2.9	18.7	-	10.9	0.4	0.2	-
	曝気槽①	8.0	4.9	19.8	-	1.2	0.7	13.2	-
	曝気槽②	8.0	5.1	19.8	-	1.3	0.5	15.7	-
	放流水	8.0	3.1	19.4	-	0.8	0.0	23.0	-
'08.1.23	調整槽	6.8	4.7	14.7	-	0.2	0.2	2.8	13.5
	曝気槽①	6.1	3.2	15.8	-	0.2	0.2	7.2	8.4
	曝気槽②	6.0	3.6	15.8	-	0.3	0.3	9.4	9.8
	沈殿池	6.1	1.5	15.7	-	-	-	-	-
	放流水	6.4	3.0	15.5	-	0.1	0.1	12.7	9.6
'08.3.7	調整槽	6.7	2.3	12.9	-	11.3	0.7	3.2	13.1
	曝気槽①	6.6	1.4	13.8	-	2.0	0.1	7.7	9.1
	曝気槽②	6.5	1.2	13.9	-	2.6	0.1	6.5	9.6
	沈殿池	6.5	1.7	14.1	-	-	-	-	-
	放流水	6.6	2.4	14.0	-	1.6	0.1	8.0	7.7
施設B									
'07.11.26	調整槽	7.7	7.5	19.9	-	20.0	0.0	1.4	-
	曝気槽	7.8	2.8	20.9	-	2.9	3.9	33.9	-
	放流水	8.0	0.8	20.8	-	0.7	0.0	34.4	-
'08.1.23	調整槽	7.6	8.1	14.8	-	26.8	0.4	2.3	40.3
	曝気槽	3.2	0.9	16.4	-	4.3	1.1	36.2	46.3
	沈殿池	3.3	0.6	16.2	-	-	-	42.0	-
	放流水	6.1	3.4	16.1	-	2.1	0.2	-	46.5
施設C									
'08.3.7	調整槽	8.0	6.0	10.6	-	58.5	3.7	1.8	97.9
	曝気槽	6.8	2.5	12.7	-	1.2	0.7	2.5	1.6
	放流水	6.9	1.8	11.8	-	3.0	1.2	2.6	5.6
施設D									
'08.9.1	調整槽	-	-	-	130.8	18.1	0.0	7.5	-
	曝気槽	-	-	-	96.6	5.5	0.3	11.9	-
	接触曝気槽	-	-	-	33.9	3.9	0.3	15.0	-
	沈殿槽	-	-	-	25.2	2.3	0.0	16.7	-
'09.1.15	曝気槽	8.0	-	15.2	33.3	22.2	0.2	0.0	25.2
	接触曝気槽	7.2	-	14.9	30.8	22.8	0.2	0.0	30.8
	沈殿槽	8.0	-	14.5	23.1	18.1	1.5	1.3	31.4
施設E									
'08.9.1	調整槽	-	-	-	21.6	2.2	0.0	9.3	-
	曝気槽	-	-	-	20.6	1.8	0.0	11.0	-
'09.1.15	曝気槽	6.6	-	14.7	22.5	0.0	0.0	12.4	14.1
	3次処理槽	5.8	-	14.4	40.5	0.0	0.0	14.3	18.4
	沈殿槽	6.8	-	14.1	24.2	0.0	0.0	6.2	14.5
施設F									
'08.9.1	沈殿槽	-	-	-	26.4	2.2	0.0	10.1	-
	曝気槽	-	-	-	15.1	1.7	0.0	14.1	-
	沈殿槽	-	-	-	20.8	2.7	0.0	16.7	-
施設G									
'08.9.12	調整槽	6.4	1.4	28.1	6.3	0.0	0.0	9.1	27.8
	曝気槽	6.4	1.0	28.2	4.2	0.2	0.0	7.7	24.1
	沈殿槽	6.6	2.2	27.9	7.7	0.1	0.1	8.5	27.4
	接触曝気槽	6.6	1.9	28.1	4.4	0.0	0.0	9.6	27.4
	最終沈殿槽	6.5	5.0	27.9	8.5	0.4	0.0	10.4	27.4
施設H									
'08.9.12	調整槽	7.0	3.8	28.5	11.2	7.4	0.1	2.4	20.9
	曝気槽	7.1	1.5	28.5	8.2	0.6	0.5	6.5	23.2
	沈殿槽	6.8	2.5	28.6	8.4	0.1	0.1	4.8	23.2
'09.1.15	調整槽	6.8	-	11.6	23.2	12.4	0.0	0.0	22.7
	曝気槽	-	-	-	26.3	0.8	1.0	14.7	21.9
	沈殿槽	7.6	-	12.2	38.0	0.2	0.6	17.1	20.7

表 2-8 コミュニティ・プラント施設 D～H における CH₄ 排出係数

		フラックス (ml/m ² ・分)	排出係数 (kg-CH ₄ /人)
施設D			
'08.9.1	接触曝気槽	1.127	0.034
	沈殿槽	0.328	
'09.1.15	接触曝気槽	8.93	0.327
	沈殿槽	7.23	
施設E			
'08.9.1	曝気槽	ND	0.0008
	沈殿槽	0.024	
'09.1.15	曝気槽	ND	0.0008
	沈殿槽	0.022	
施設F			
'08.9.1	曝気槽	ND	< 0.0006
	沈殿槽	ND	
施設G			
'08.9.12	曝気槽	ND	< 0.0003
	沈殿槽	ND	
	接触曝気槽	ND	
	最終沈殿槽	ND	
施設H			
'08.9.12	調整槽	0.183	0.0061
	曝気槽	-	
	沈殿槽	0.017	
'09.1.15	調整槽	0.160	0.0054
	曝気槽	-	
	沈殿槽	ND	

—:未測定. ND:検出下限値以下. 施設A～Cは測定しなかった.

本調査で得られたデータから算定したコミュニティ・プラントの温室効果ガス排出係数を表 2-10に示す。現状のCH₄排出係数は0.195 kg-CH₄/人であるのに対し、接触曝気法（施設D）が0.181 kg-CH₄/人、分離接触曝気法（施設H）が0.0057 kg-CH₄/人、長時間曝気+3次処理法（施設E、F、G）が0.0006 kg-CH₄/人となり、接触材を用いた処理方式（施設D、H）の排出量が多い傾向がみられた。単純平均値は、現在設定されている排出係数の約1/4である0.047 kg-CH₄/人となった。現状のN₂O排出係数は0.039 kg-N₂O/人であるのに対し、検出下限濃度から各処理施設の排出係数を算出した結果、最大で施設Hの0.0023 kg-N₂O/人となった。

2007年の我が国のコミュニティ・プラントの活動量は、処理人口361,000人/年である（環境省廃棄物・リサイクル対策本部, 2009）。従来の排出係数を用い、CH₄とN₂Oの温室効果をCO₂の21倍、310倍とすると、コミュニティ・プラントからのそれぞれの排出量は、1480 t-CO₂eq、4400 t-CO₂eqと算定される。一方、本調査で得られたCH₄（0.047 kg-CH₄/人）とN₂O（0.0023 kg-N₂O/人）の排出係数を用いると、それぞれの排出量は、356 t-CO₂eq、257 t-CO₂eqと算定された。このように排出係数の設定値によって、コミュニティ・プラントの温室効果ガスの排出量の算定値は、大きく異なる結果となる。本調査では、先に述べたように汚泥濃縮貯留槽などを温室効果ガスの測定対象としておらず、より正確な排出係数を求めるには、処理施設のすべての反応槽の再調査が必要である。また、実際の処理人員が不明であるため、表2-8～2-10に示した値の算定には、設計処理人員を用いており、排出係数を過小評価している可能性もある。今後は、CH₄とN₂Oの発生

機構を科学的に解明し、水処理機能を向上させつつ、消費電力に由来する温室効果ガス発生量も含めた、そのコミュニティ・プラントの最適な運転管理方法を確立する必要がある。

表2-9 コミュニティ・プラント施設A～HにおけるN₂O排出係数

		フラックス (ml/m ² ・分)	排出係数 (kg-N ₂ O/人)
施設A			
07.11.26	調整槽	ND	< 0.001
	沈殿槽	ND	
08.01.23	調整槽	ND	< 0.001
	沈殿槽	ND	
08.03.07	曝気槽①	ND	< 0.0016
	曝気槽②	ND	
	沈殿槽	ND	
施設B			
07.11.26	調整槽	ND	< 0.0012
	沈殿槽	ND	
08.01.23	調整槽	ND	< 0.0012
	沈殿槽	ND	
施設C			
08.03.07	調整槽	ND	< 0.0022
	曝気槽	ND	
施設D			
08.09.01	接触曝気槽	ND	< 0.0016
	沈殿槽	ND	
09.01.15	接触曝気槽	ND	< 0.0016
	沈殿槽	ND	
施設E			
08.09.01	曝気槽	ND	< 0.0017
	沈殿槽	ND	
09.01.15	曝気槽	ND	< 0.0017
	沈殿槽	ND	
施設F			
08.09.01	曝気槽	ND	< 0.0017
	沈殿槽	ND	
施設G			
08.09.12	調整槽	ND	< 0.0009
	沈殿槽	ND	
	接触曝気槽	ND	
	最終沈殿槽	ND	
施設H			
08.09.12	調整槽	ND	< 0.0023
	沈殿槽	ND	
09.01.15	調整槽	ND	< 0.0023
	沈殿槽	ND	

ND：検出下限値以下。

表2-10 コミュニティ・プラントのCH₄・N₂Oの排出係数 (kg-CH₄/人、kg-N₂O/人)

現状	本調査結果	
CH ₄	接触曝気式	0.181
0.195	分離接触曝気式	0.0057
	長時間曝気+3次処理式	0.0006
	平均値	0.047
N ₂ O		<0.0023
0.0394		

4.4 終末処理場から排出されるCH₄、N₂Oの調査および排出係数の精緻化

終末処理場では、下水1m³を処理した際に排出されるCH₄、N₂O量を排出係数として定めている。現在の日本の終末処理場の排出係数は、温室効果ガス排出量算定に関する検討結果第4部廃棄物分科会報告書（2006a）において平成18年8月に定められており、国内の調査結果より得られた終末処理場の水処理プロセス及び汚泥処理プロセスにおけるCH₄、N₂O排出係数をそれぞれのプロセスごとに単純平均し、それらを合計して算定されている。ただし汚泥処理プロセスは、濃縮槽および脱水機室のみを対象としている。

現在の終末処理場のCH₄、N₂Oの排出係数の値の根拠となっているデータを表2-11、表2-12にそれぞれ示す。CH₄は主に最初沈殿池、生物反応槽で排出されており、その排出量は水温や運転条件（汚泥滞留時間SRT、水理学的滞留時間HRT）の影響を受けている（佐藤ら、1992；中村ら1997）。CH₄は下水処理場への流入水からも検出されることもあり、下水管中で既に発生していることが指摘されている。また、CH₄は嫌気条件における生物反応で発生するため、曝気槽（生物反応槽）で直接的に発生しているのではなく、すでに下水に含まれているものが、曝気によって大気に放出されている量が多いと思われる。一方、N₂Oは主に生物反応槽で排出されている。N₂Oはアンモニア酸化反応の副産物として発生し、その排出量は硝化の進行の有無、つまり生物反応槽でのNO₂-N濃度と関連があることが明らかになっている（竹石ら、1993；中村ら1997）。また、水温が高い8月に多く排出されており12月1月の冬場でほとんど生成されていないという傾向もある（中村ら1997）。一方、脱窒反応の中間代謝物としてもN₂Oは発生することが知られている。N₂O排出量は、処理方式、季節、流入水質、処理効率といった様々な因子から影響を受けており、最もN₂Oが排出されている生物反応槽でのN₂O排出は硝化、脱窒どちらの寄与率が高いのか、解明することは難しいと考えられる。

終末処理場から排出される温室効果ガス排出係数を更新することを目的として、上記の1998年までに実施された調査報告だけではなく、現在までに報告されている終末処理場を対象とした温室効果ガス測定結果をまとめた。終末処理場で行われたCH₄およびN₂O排出係数を調査した文献を表2-13、表2-14にそれぞれまとめた。CH₄に関しては、CH₄は脱窒反応の水素供与体として消費されるため、水落ら（1999）は、A2O法のCH₄排出係数として標準活性汚泥法より小さい値を報告している。また、曝気槽の流下方向に沿ってメタンの排出量が減少する傾向が認められた（水落ら、1998）。東京都下水道局施設管理部（2002）は、NO₂-N濃度が高くなると排出係数が大きくなり、またNH₄-Nが高く、NO₃-Nが低い場合つまり硝化が進んでいない場合では、N₂O排出係数が小さいと報告しており、処理水質によって排出係数を硝酸型、亜硝酸型I、亜硝酸型II、硝化脱窒型、未硝化型の5つに分類し排出係数の精緻化を行っている。N₂O排出係数を処理水質によって設定する

ことは、排出メカニズムと関連づけて考える上でも、合理的なものと考えられる。N₂O排出係数が最も高い亜硝酸型Ⅱは、プロセス管理が適切にされていれば、窒素除去を目的としているA2O法がこの状況になることはなく、このような処理水質になるのは標準活性汚泥法が多いようである。

しかしながら、終末処理場から排出されるCH₄、N₂Oを定量するには、統計データが得やすく、かつ計算しやすい分類が必要とされることから、処理水質による分類よりも、処理方式別ごとに排出係数を設定することが便宜的と考えられる。従って、近年行われた実測データを処理方式別に平均化し、排出係数の精緻化を行った（各文献で特異値とされているものは除外している）。精緻化は、排水処理プロセスのみを行い、汚泥処理プロセスは既存の排出係数の値を用いた。表2-15に排出係数の精緻結果を示す。CH₄及びN₂O排出係数ともに、標準活性汚泥法、AO法、A2O法の順に値が低くなっている。つまり、栄養塩類の除去を目的とした高度処理を行うことで、処理水の水質の改善だけでなく排水処理に伴うCH₄、N₂O排出量も抑制されているという結果となった。

要約すると、終末処理場から排出される文献を調査し、以下の知見を得た。現状のCH₄の排出係数は、処理方式によらず、一律に880 mg-CH₄/m³とされているが、最近のデータによると、標準活性汚泥法で620 mg-CH₄/m³、A2O法で440 mg-CH₄/m³と設定できる。A2O法のような窒素除去プロセスでは、CH₄が脱窒反応の水素供与体として消費されるため、CH₄排出量を抑制することができると思われる。現状のN₂Oの排出係数は、処理方式によらず、一律に160 mg-N₂O/m³とされているが、最近のデータによると、標準活性汚泥法で91 mg-N₂O/m³、AO法で46 mg-N₂O/m³、A2O法で9.4 mg-N₂O/m³と設定できる。窒素除去型の処理方式では、適切に硝化と脱窒が進行すれば、N₂O排出量は小さくなると考えられる。

表2-11 現在の排出係数の根拠となっている水処理プロセス及び汚泥処理プロセスにおけるCH₄排出量実測値

沈砂池	水処理プロセス(mgCH ₄ /m ³)			合計	汚泥処理プロセス(mgCH ₄ /m ³)			処理方式	処理規模 (m ³ /day)	調査年	文献
	最初沈殿池	生物反応槽	最終沈殿池		濃縮槽	脱水機室	合計				
--	59.0	590.0		649	510.0	--	510.0	標準法	23770	1990	京才と水落, 1900
--	260.0			260	420.0	--	420.0	硝化脱窒法	24581	1990	京才と水落, 1900
--	37.0	240.0	3.0	280	320.0	--	320.0	標準法	-	1991. 1月	佐藤ら, 1992
--	16.0	145.0	0.6	161.6	48.0	54.0	102.0	標準法	-	1992. 2月	佐藤ら, 1992; 竹石ら, 1993
38.0	250.0	89.0	--	377	51.0	190.0	241.0	標準法	-	1992. 2月	佐藤ら, 1992
--	8.0	253.0	0.0	261	194.0	81.0	275.0	標準法	-	1992. 11月	佐藤ら, 1992; 竹石ら, 1993
--	51.0	328.0	0.7	379.7	441.0	80.0	521.0	標準法	-	1992. 8月	佐藤ら, 1992; 竹石ら, 1993
--	2.0	815.0	0.0	817	272.0	123.0	395.0	標準法	-	1993. 9月	竹石ら, 1993
5.0	21.7	430.0	2.0	458.7	--	--	--	標準法	2697	1997. 8月	中村ら, 1997
22.5	4.8	1002.6	0.0	1029.9	--	--	--	標準法	10065	1997. 8月	中村ら, 1997
0.3	127.0	252.5	1.4	381.2	--	--	--	AO法	6365	1997. 8月	中村ら, 1997
2.6	1.8	298.8	0.2	303.4	--	--	--	標準法	2697	1998. 2月	中村ら, 1997
1.5	68.1	1877.3	3.2	1950.1	--	--	--	標準法	10065	1998. 2月	中村ら, 1997
0.3	2.4	89.9	0.5	93.1	--	--	--	AO法	6365	1998. 1月	中村ら, 1997
単純平均値				528.7	単純平均値			348.0			

表2-12 現在の排出係数の根拠となっている水処理プロセス及び汚泥処理プロセスにおけるN₂O排出量実測調査

水処理プロセス(mgN ₂ O/m ³)				汚泥処理プロセス(mgN ₂ O/m ³)			処理方式	処理規模 (m ³ /day)	調査年	文献	
最初沈殿池	生物反応槽	最終沈殿池	合計	濃縮槽	脱水機室	合計					
0	17.9	0.0	17.9	0.6	--	0.6	標準法	-	1992. 11月	佐藤ら, 1992; 竹石ら, 1993	
0	20.3	0.0	20.3	1.2	--	1.2	標準法	-	1993. 9月	竹石ら, 1993	
0	1.3	0.1	1.4	0.0	--	0.0	標準法	-	1992. 8月	佐藤ら, 1992; 竹石ら, 1993	
--	28.3	0.0	28.3	--	--	--	標準法	2697	1997	中村ら, 1997	
--	994.7	0.0	994.7	--	--	--	標準法	10065	1997	中村ら, 1997	
--	60.7	0.0	60.7	--	--	--	AO法	6365	1997	中村ら, 1997	
--	--	--	91.8	--	--	--	標準法	13204	1998. 7月	稲森と水落, 1998	
--	--	--	67.6	--	--	--	標準法	13204	1998.12月	稲森と水落, 1998	
単純平均値				160.3	単純平均値			0.6			

表2-13 終末処理場におけるCH₄排出量の最近の実測値

処理場名	水処理プロセス (mgCH ₄ /m ³)			合計	処理方式	処理規模 (m ³ /day)	調査年	文献	
	最初沈殿池	生物反応槽	最終沈殿池						
A	8.0	253.0	0.0	261.0	標準法	46538*	1992年11月	水落ら, 1999	
A	8.0	85.3	0.0	93.3	A2O法	-			
B	16.0	145.0	0.6	161.6	標準法	30060	1992年2月	水落ら, 1998	
B	51.0	328.0	0.7	379.7	標準法	33986	1992年8月		
A	1.5	815.0	0.0	816.5	標準法	52100	1993年9月		
C (A処理場)	8.0	127.0	-	135.0	標準法	150000	1993年冬	下水道技術開発連絡会議, 1992-1996	
C (A処理場)	5.0	178.0	-	183.0	標準法	150000	1994年夏		
D (B処理場)	1370.0	601.0	-	1971.0	標準法	400000	1993年冬		
E (C処理場)	5.0	9.0	-	14.0	標準法	90000	1993年冬		
F (D処理場)	50.0	90.0	56.0	140.0	標準法	990000	1993年冬		
G (E処理場)	104.0	290.0	-	394.0	標準法	110000	1993年冬		
G (E処理場)	76.0	328.0	-	404.0	標準法	110000	1994年夏		
H (F処理場)	116.0	117.0	-	233.0	標準法	-	1994年夏		
H (F処理場)	22.0	262.0	-	284.0	標準法	-	1994年冬		
I (芝浦)	277	217	-	494.0	標準法	565880**	2001年秋		東京都下水道局施設管理部, 2002
I (芝浦)	50.0	-	-	267.0	標準法	565880**	2001年冬		
J (葛西)	102	322	-	424	標準法	313442**	2000年夏		
J (葛西)	130	-	-	452	標準法	313442**	2000年秋		
J (葛西)	38	-	-	360	標準法	313442**	2000年冬		
K (中川)	87	-	-	87	標準法・AO法・A2O法	181488**	2001年夏		
K (中川)	56	-	-	56		181488**	2001年冬		
L (新河岸)	385	-	-	385	標準法	555242**	2000年夏		
L (新河岸)	428	-	-	428	標準法	555242**	2000年秋		
L (新河岸)	210	-	-	210	標準法	555242**	2000年冬		

*水落ら、1998より抜粋

**下水道統計 行政編 平成16年度より引用

表2-14 終末処理場におけるN₂O排出量の最近の実測値

処理場名	水処理プロセス(mgN ₂ O/m ³)			合計	処理方式	処理規模 (m ³ /day)	調査年	文献
	最初沈殿池	生物反応槽	最終沈殿池					
A	0.00	17.9	0.00	17.9	標準法	46538*	1992年11月	水落ら, 1999
A	0.00	2.2	0.00	2.2	A2O法	-		
B	0.00	1.2	0.01	1.21	標準法	33986	1992年8月	水落ら, 1999
A	0.01	20.3	0.02	20.33	標準法	52100	1993年9月	
C	-	20.3	-	20.34	間欠曝気法	15	-	木持ら, 1998
D (港北処理場)	1.90	17.1	0.05	19.05	標準法	-	2001-2002年	小原と古賀, 2004
D (港北処理場)	1.90	33.3	0.05	35.25	嫌気硝化内生脱窒法	-		
E (栄第二)	1.90	53.7	0.05	55.65	標準法	-		
F (A処理場)	21			21.00	標準法	150000	1993年冬	下水道技術開発連絡会議, 1997
F (A処理場)	52			52.00	標準法	150000	1994年夏	
G (B処理場)	15			15.00	標準法	400000	1993年冬	
H (C処理場)	15			15.00	標準法	90000	1993年冬	
I (D処理場)	104			104.00	標準法	990000	1993年冬	
J (E処理場)	338			338.00	標準法	110000	1994年	
J (E処理場)	3203			3203.00	標準法	110000	1993年冬	
J (E処理場)	25			25.00	標準法	-	1994年夏	
K (F処理場)	294			294.00	標準法	-	1994年夏	
K (F処理場)	1050			1050.00	標準法	-	1994年冬	
K (F処理場)	2679			2679	標準法	-	1995年夏	
K (F処理場)	355			355	標準法	-	1995年冬	
L (G処理場)	12			12	AO法	-	1995年夏	
L (G処理場)	12			12	AO法	-	1995年冬	
M (H処理場)	17			17	標準法	-	1995年夏	
M (H処理場)	195			195	標準法	-	1995年冬	
N (新河岸)	-	41.9	-	41.9	標準法 (60データ)	555242*	2000-2002年	東京都下水道局施設管理部, 2002
O (中野)	-	20.0	-	20.0	AO法 (12データ)	23120*		
P (葛西)	-	72.7	-	72.7	標準法 (95データ)	313442*		
Q (中川)	-	62.3	-	62.3	標準法 (21データ)	181488*		
	-	102.8	-	102.8	AO法 (21データ)			
	-	15.4	-	15.4	A2O法 (19データ)			
R (芝浦)	-	394.3	-	394.3	標準法 (40データ)	565880*		
S (森ヶ崎)	-	3.3	-	3.3	標準法 (9データ)	1240062*		

表2-15 最近の実測値をもとにした終末処理場の温室効果ガス排出係数の提案

現状	最近の調査データからの提案		
CH ₄ 880 mg-CH ₄ /m ³ 8施設14データ	標準活性汚泥法	620 mg-CH ₄ /m ³	11施設22データ
	A2O法	440 mg-CH ₄ /m ³	1施設1データ
N ₂ O 160 mg-N ₂ O/m ³ 5施設8データ	標準活性汚泥法	91 mg-CH ₄ /m ³	16施設241データ
	AO法	46 mg-N ₂ O/m ³	3施設35データ
	A2O法	9.4 mg-N ₂ O/m ³	2施設20データ

4.5 統計 からみた下水処理場の処理水水質と水処理部門からの温室効果ガス排出量の関係

図2-5および図2-6に各生物処理プロセスの富栄養化影響と地球温暖化影響を整理したものを示す。地球温暖化影響は、小さいものではCAS法の0.24 GWP-kg/m³から、大きいもので硝化内生脱窒法の0.67 GWP-kg/m³と約2.8倍の大きな差が確認された。比較的高度な処理プロセスであるA2O法や循環式硝化脱窒法、硝化内生脱窒法、長時間エアレーション法は影響が大きくなる傾向にあった。また未処理のまま放流するケースでも自然界におけるCH₄とN₂Oの排出により、CAS法などで下水処理するケースよりも大きな地球温暖化影響(0.32 GWP-kg/m³)を示すことが定量的にわかった。地球温暖化影響の内訳を見ると、電力消費に由来するCO₂排出の影響が、値にして0.12~0.59 GWP-kg/m³、割合にして約50~90%と大部分を占めた。次に、水処理プロセスにおけるN₂Oの排出が大きな割合を占めた。一方、富栄養化影響の生物処理プロセス間での差異は1.6~7.8 EP-g/m³と大きな幅が確認された。処理プロセスの選定が地域の富栄養化の状況に重大な影響を与え得ると言える。その内訳を見ると、どのプロセスにおいてもT-NとT-Pだけでほぼ全体を占めることがわかった。リン除去が期待できるAO法およびA2O法よりも循環式硝化脱窒法、硝化内生脱窒法のほうが、処理水質・除去率共にその他のプロセスと比較して優れた結果となった。図2-7に各生物処理の地球温暖化影響と富栄養化影響の関係を示す。富栄養化影響を削減しようとする、地球温暖化影響を増大させてしまうことが確認された。比較的簡易なシステムでありながら、窒素除去が期待できるステップ流入式多段硝化脱窒法は、トレードオフの関係に乗らない優秀なプロセスであることが示唆された。

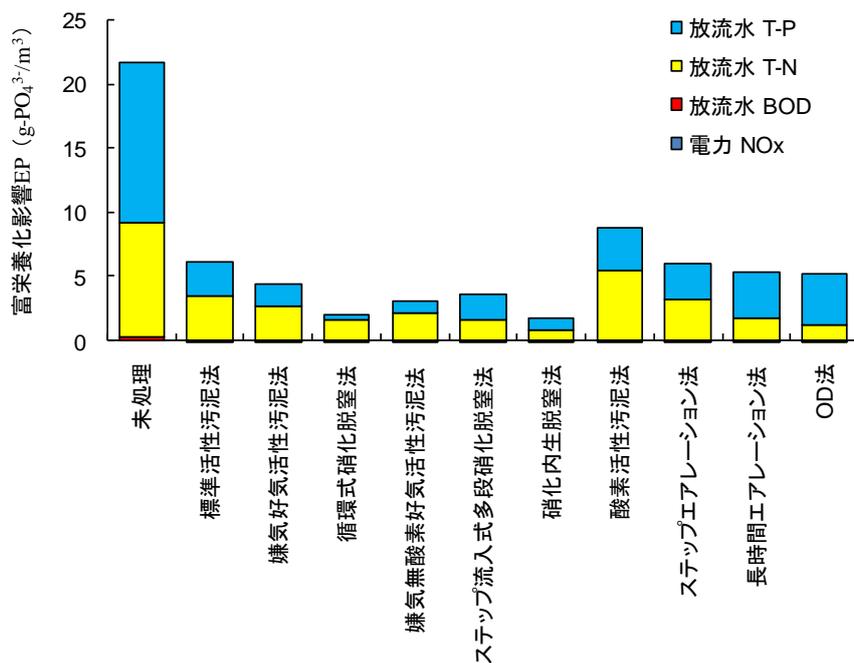


図2-5 終末処理場の生物処理プロセスの富影響化指標.

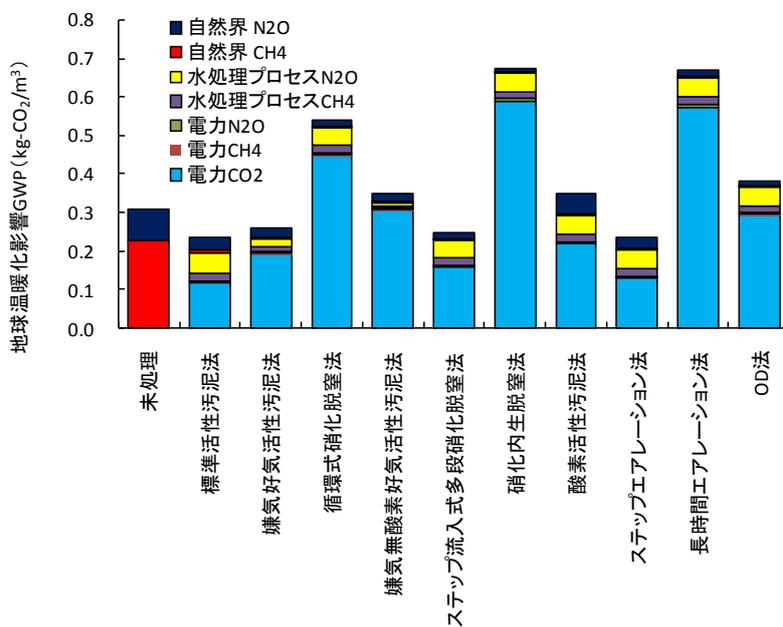


図2-6 終末処理場の生物処理プロセスの地球温暖化指標.

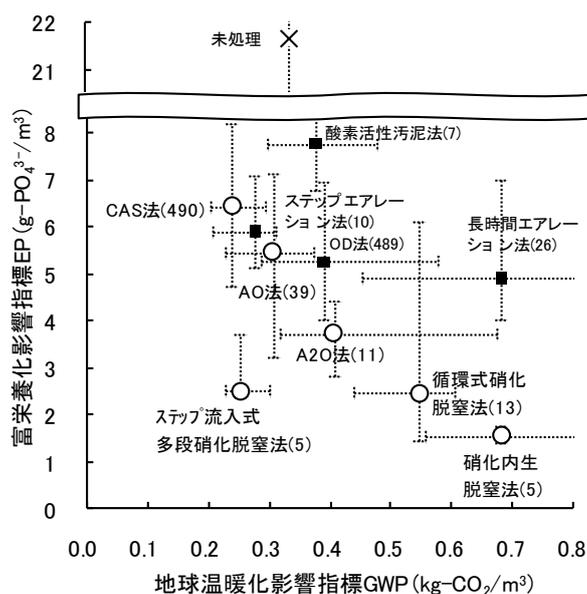


図2-7 終末処理場の生物処理プロセスの地球温暖化影響指標と富栄養化指標。中央値と第1、第3四分位値を示す。凡例の括弧内は標本数を示す。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

排出係数が十分に整備されていない産業排水処理施設をヒアリングすることにより、前処理によって大半の有機物が除去されることで、従来の算定方法では温室効果ガス排出量を過大評価してしまう場合や、化石資源由来の有機物からのCO₂発生量を含めていないため、過小評価してしまう可能性が示唆された。すなわち、排水原水の組成を把握し、生物処理槽への流入濃度を明確にする必要があることが明らかとなった。また、実測値の存在する終末処理場、し尿処理施設に関して、標準的な好気処理と窒素除去対応処理との排出係数の相違、処理システム（反応槽数）による排出係数の相違が明らかになった。特に、好気処理と窒素除去対応処理でのCH₄、N₂O排出特性の相違が終末処理場と浄化槽で異なることは興味深い知見である。また、コミュニティ・プラントでの実測により、運転・制御技術が向上によって排出係数の大幅な低減が図れる可能性が見出された。これらの成果は、CH₄・N₂Oに影響を及ぼす因子の特定など、排水処理分野のCH₄・N₂O排出特性の解明につながる重要な知見である。また、下水道統計等に基づく資料調査の結果、標準活性汚泥法、嫌気好気活性汚泥法、ステップ流入式嫌気好気活性汚泥法などの終末処理場における様々な処理プロセスは、富栄養化指標と地球温暖化指標がトレードオフの関係にあることが示唆され、硝化や脱窒に伴う温室効果ガス発生機構の科学的な精査が必要であることが明らかとなった。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究の検討で得られた好気処理と窒素除去対応処理とのCH₄、N₂O排出特性の相違などの知見は、地球温暖化対応を念頭に置いた国内での排水処理施設の新設・更新、海外への技術導入に有用なものであるといえる。今後の当該分野における研究の力点を定めるための重要な知見であり、それらに重点を置いてデータの蓄積、論理性の向上に努めることにより、温室効果ガス発生量削減目標の達成のための政

策に大きく貢献するものと考えられる。また、本研究の検討で得られた好気処理と窒素除去対応処理との CH_4 、 N_2O 排出特性の相違などの知見は、地球温暖化対応を念頭に置いた国内での排水処理施設の新設・更新、海外への技術導入に有用なものであるといえる。

6. 引用文献

- 1) 稲森悠平, 水落元之 (1998) B-51 温室効果ガスの人為的な排出源・吸収源に関する研究 (2) CH_4 、 N_2O の排出・吸収に関する研究 ①汚水、廃棄物の CH_4 、 N_2O 収支に関する現地調査. 平成10年度地球環境研究総合推進費研究成果報告書,97-107.
- 2) 大村友章, 河窪義男, 山田正人 (2004) 高負荷し尿処理施設における亜酸化窒素排出係数に関する考察. 都市清掃,57,400-406.
- 3) 小原明, 古賀淳一 (2004) 下水道施設における温室効果ガス発生の実態調査. 第41回下水道研究発表会講演集,31-33.
- 4) 温室効果ガスインベントリオフィス編 (2007) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書.
- 5) 紙パルプ技術協会環境技術委員会, 日本製紙連合会環境保全委員会 (2006) 紙パルプ工場排水処理実態調査報告.紙パ技協誌,60,724-739.
- 6) 環境省温室効果ガス排出量算定法検討会 (2006a) 温室効果ガス排出量算定に関する検討結果 第4部 廃棄物分科会報告書,66-138
- 7) 環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会 (2006b) 温室効果ガス排出量算定に関する検討結果 第4部 廃棄物分科会報告書, 91~101.
- 8) 環境省廃棄物・リサイクル対策本部 (2009) 日本の廃棄物処理平成19年度調査結果.
- 9) 木持謙, 稲森悠平, 松村正利 (1998) 間欠ばっ気活性汚泥法における流入窒素負荷の N_2O 放出および窒素除去に及ぼす影響. 水環境学会誌, 21,163-169.
- 10) 京才俊則, 水落元之 (1900) 下水処理場からのメタン・亜酸化窒素の放出量の解明に関する研究. 平成2年度下水道関係調査年次報告書集. 85-90.
- 11) 下水道技術開発連絡会議. (財)下水道新技術推進機構 (1992-1996) 下水道の長期的技術開発に関する基礎調査—下水道施設における地球温暖化原因物質の実態調査—. 下水道機構研究成果年報.
- 12) 下水道技術開発連絡会議 (財) 下水道新技術推進機構 (1997) 下水道の長期的技術開発に関する基礎調査 完了報告書—下水道施設における地球温暖化原因物質の実態調査—.
- 13) 公害防止の技術と法規編集委員会 (2009) 新・五訂・公害防止の技術と法規 (水質編) .
- 14) 佐藤和明, 水落元之, 鈴木穰 (1992) B-2 メタン・亜酸化窒素の放出源及び放出量の解明に関する研究 (7)下水処理場からの放出量の解明に関する研究. 平成4年度地球環境研究総合推進費研究成果報告書. 45-48.
- 15) 社団法人日本下水道協会 (2004) 平成16年度版下水道統計行政編.
- 16) 社団法人日本下水道協会 (2008) 流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説
- 17) 竹石和夫, 鈴木穰, 松原誠 (1993) 下水処理場からのメタン・亜酸化窒素の放出量の解明に関する研究. 平成5年度下水道関係調査研究年次報告書集. 105-110.
- 18) 田中勝, 井上雄三, 松澤裕, 大迫政浩, 渡辺征夫 (1994) B-2 (1) 下水処理場からの放出量の解明に関する研究, 平成6年度地球環境研究総合推進費研究調査報告書.

- 19) 東京都下水道局施設管理部 (2002) 東京都下水道施設における温室効果ガス排出量実態調査報告書.
- 20) 中村栄一, 鈴木穰, 重村浩之, 落修一, 原田一郎 (1997) B-16 地球温暖化抑制のためのCH₄、N₂O等微量ガスの対策技術開発と評価に関する研究 (8)温室効果ガス排出抑制のための下水処理システム対策技術. 平成9年度地球環境研究総合推進費研究成果報告書. 103-116.
- 21) 水落元之, 佐藤和明, 稲森悠平, 松村正利 (1999) 地球温暖化ガスCH₄、N₂Oの標準活性汚泥法および嫌気・無酸素・好気法における放出量の比較解析. 日本水処理生物学会誌, 35,109-119.
- 22) 水落元之, 佐藤和明, 稲森悠平, 松村正利 (1998) メタン、亜酸化窒素の放出量および放出特性と活性汚泥法の処理条件との比較解析. 日本水環境学会誌,21, 37-43.
- 23) 山田正人 (1998) 第8章 廃棄物処理と地球環境問題, 333~346, 田中勝: 廃棄物学概論, 丸善.
- 24) Japan Sewage Works Association (2001) Sewage facilities planning, design guideline and manuals, the sequel, FY2001.
- 25) Kampschreur, M.J, Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M.S.M., and van Loosdrecht, M. C. M. (2009) Nitrous oxide emission during wastewater treatment. Wat. Res., 43, 4093-4103.

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) 濱田武志, 古田祐介, 井上大介, 石垣智基, 惣田訓, 池道彦, 山田正人: 用水と廃水、(2010) “8か所のコミュニティ・プラントの温室効果ガス排出量の調査”, 52, 490-497.

<その他誌上発表 (査読なし)>

なし

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 惣田訓, 新井崇志, 濱田武志, 井上大介, 石垣智基, 池道彦, 山田正人, 統計データからみた下水処理場の処理水水質と水処理部門からの温室効果ガス排出量の関係, 第43回日本水環境学会年会, 2009
- 2) S. Soda, T. Arai, T. Hamada, D. Inoue, T. Ishigaki, M. Ike and M. Yamada, Statistical analysis of global warming potential and eutrophication potential of wastewater treatment plants in Japan, The 3rd IWA-ASPIRE Conference and Exhibition, Taipei. Taiwan (2009)
- 3) 濱田武志, 古田佑介, 井上大介, 石垣智基, 惣田訓, 池道彦, 山田正人, 処理人員が異なる8カ所のコミュニティ・プラントにおける温室効果ガス排出量の実態調査, 日本水処理学会第46回大会, 2009
- 4) 惣田訓, 石垣智基, 池道彦, 濱田武志, 井上大介古田祐介, 山田正人, コミュニティ・プラントの温室効果ガス排出量の実態調査, 第47回日本下水道研究発表会, 2010

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし

B-071 廃棄物分野における温室効果ガスインベントリの高度化と削減対策の評価に関する研究
 (3) アジア途上国の廃棄物ストリームにおける炭素フローの評価とCH₄の削減対策の評価

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

山田正人・遠藤和人

<研究協力者> 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 循環技術システム研究室

河井紘輔 (平成20～21年度)

高畑恒志 (平成21年度)

Korea Marine Environment Management Corporation

李 淑熙 (平成19年度)

King Mongkut's University of Technology Thonburi,

The Joint Graduate School of Energy and Environment

Komsilp Wang-Yao (平成19～21年度)

復建調査設計(株)

朝倉 宏 (平成19年度)

平成19～21年度合計予算額 56,359千円

(うち、平成21年度予算額 18,000千円)

※予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 国内と東南アジアの埋立地について、埋立地ガス排出量の現地調査を行い、IPCCによる埋立地CH₄排出モデルの諸パラメータとその評価手法を示した。熱帯における有機物の一次分解定数(k)を、埋立構造やごみ質が類似する複数の処分場のCH₄放出量を時系列で並べることにより、0.33/年と算出した。廃棄物埋立地表面フラックスと覆土下の埋立地ガス組成の測定により、覆土のCH₄酸化率(OX)と好気性分解補正係数(MCF)を評価する手法を示した。世界の廃棄物ストリームを三角図上で比較検討し、初期の段階では生物処理が主要な埋立前処理であり、より高い直接埋立の削減のために焼却処理が導入されるという一般的な傾向を示した。また、GDPと比較し、埋立前処理の導入は経済成長と関係があることを示した。アンケート調査により東南アジアの主要都市における都市廃棄物、ハノイ市周辺の製造業廃棄物の組成とストリームを示した。2008年実績でベトナム国の都市廃棄物の収集原単位は636 g/人/日で、収集された都市廃棄物の4%はコンポスト処理され、96%は嫌気性埋立されていた。製造業から発生する有機性廃棄物は炭素換算で90%以上は再生利用されており、埋立処分へと向かうフローは5%に過ぎなかった。ハノイ市の廃棄物処理システムを改善した場合の温室効果ガス排出量と環境負荷をLCAにて評価した。中間処理として嫌気性発酵とコンポスト化を併用するシナリオが、多くの側面において環境影響が少なく、望ましい代替シナリオであった。ベトナム国の国家戦略で設定された都市廃棄物に関する将来の管理目標値を達成するため、コンポスト処理型、メタン回収嫌気性埋立型、準好気性埋立型の代替シナリオの温室効果ガス排出量を評価した。2010年から2025年までの積算でベースライン

シナリオのそれぞれ51.3%、77.1%、79.4%であり、準好気性埋立がCDM事業として一般的なメタン回収嫌気性埋立と温室効果ガス削減において競合可能な技術であることを示した。

[キーワード] IPCCモデルパラメータ、現場観測、準好気性埋立、廃棄物ストリーム、排出量予測

1. はじめに

我が国では温室効果ガス排出削減目標の達成を他国からの排出枠の購入に頼っている状況にある。中長期的な削減目標を達成するために、国内においても削減対象とするべき排出源について、温室効果ガスの種別に技術導入効果を最大化する戦略が緊急に求められる。また、途上国等に対するクリーン開発メカニズム（CDM）等を活用する戦略がさらに重要となると考えられる。この際、 CH_4 および N_2O の地球温暖化係数はそれぞれ、21および310であり、単位削減量に対する効果が大きく削減のターゲットとして有利である。よって、廃棄物処理システムが未整備である途上国へ埋立地 CH_4 を削減する技術を導入すれば大きい削減効果が見込まれる。

廃棄物は産業および生活から不可避にかつ定常的に発生するため、活動量はpush型のフローを形成する。よって、廃棄物の種類毎に炭素および窒素フローを特定して制御することにより、全体として温室効果ガスの排出量を最小化させる処理・処分技術へ導くことが重要である。この際、直接埋立処分が主流である途上国においては埋立地メタンの排出をもたらず炭素フローの制御が重要である。また、廃棄物管理の主たる目的は地域における公衆衛生と環境保全であり、温室効果ガス削減技術はこれらと両立させる必要がある。

我が国が都市ごみ管理で採用してきた焼却等の中間処理には、埋め立てられる炭素量を削減することで埋立地 CH_4 の排出を抑制してきた実績がある。また、埋立地における我が国独自の CH_4 排出削減技術として、降雨が多い地域において埋立地を嫌気性で維持すると、浸出水の水質が著しく悪化し、安定化が遅延するという経験から、浸出水を排除しながら埋立地内に大気を送り込み、浸出水の水質を改善する準好気性埋立（福岡方式）を開発した（花嶋 2000）。この埋立技術は、好気性分解を促進することにより CH_4 発生量削減にも寄与するため（松藤ら 2007）、降雨が多い地域において温室効果ガス削減と環境保全を両立させる技術であり、CDMでの採用が多い埋立地 CH_4 回収利用技術に競合する技術となりうる。

ところが、現状では、途上国に焼却等の中間処理や準好気性埋立技術を導入して炭素フローを制御し、その温室効果ガス削減効果を評価しようとしても、必要な活動量（都市廃棄物埋立量）や排出係数（廃棄物組成、分解性炭素含量、一次分解定数、好気性分解補正係数、 CH_4 酸化率等）の不確実性が高いという問題に直面する。

2. 研究目的

本研究では、アジア途上国の廃棄物処理・処分過程における炭素フローを明らかにし、有機物埋立回避と埋立技術の導入による CH_4 削減および環境保全効果を求めることを目的とする。まず、気候変動に関する政府間パネル（IPCC, 2006）によるインベントリ作成ガイドラインの埋立地 CH_4

排出モデルにおいて、一次分解定数（ k ）、好気性分解補正係数（MCF）、および覆土における CH_4 酸化率（OX）を現地にて測定・評価する手法を示すことで、モデルの不確実性を改善し、アジアへ適合化すると共に、準好気埋立技術の効果を評価する。また、世界における都市廃棄物ストリームの形成パターン、すなわち中間処理の導入パターンを示すとともに、東南アジアの主要都市における都市廃棄物の収集・処理フロー及び物理組成を把握して、ベトナムにおいて都市廃棄物管理システムの代替シナリオを提示し、それらを導入した際の温室効果ガス排出量の推移や環境保全効果を評価する。

3. 研究方法

（1）埋立地 CH_4 排出モデルのアジアへの適合化と埋立地メタン削減技術の評価

1) 調査地

東南アジアのタイ、マレーシア、および我が国において生ごみ等の有機性廃棄物を埋め立てた実績のある埋立地において CH_4 放出量等の計測を行った。表3-1に各埋立地の諸元を示す。

表3-1 調査地の諸元

Location	Country	Open year	Landfill configuration	Tipping area (m ²)
Saraburi phase 2	Thailand	2006	Managed - Deep* ¹	10,265
Saraburi phase 1	Thailand	2003	Managed - Deep	13,600
Pattaya	Thailand	2002	Managed - Deep	53,618
Ban Bung	Thailand	2001	Managed - Deep	33,860
Hua-Hin phase 2	Thailand	2001	Managed - Deep	32,136
Cha Am	Thailand	2000	Managed - Shallow* ¹	47,680
Laemchabang	Thailand	1999	Managed - Deep	71,200
Nakhon Sawan	Thailand	1998	Managed - Deep	88,600
Pulua Burung	Malaysia	2001	Managed - Deep	333,000
Hokkaido	Japan	1986	Managed - Deep	258,000
Saitama	Japan	1981	Managed - Deep	37,000

*1 Deep > 5m, Shallow ≤5m

2) 埋立地ガスの計測

埋立地表面に設置した10～100m四方のグリッドの交点および事前スクリーニング(山田ら 2003)した CH_4 放出点において、閉鎖型チャンバー法(八木ら 1991)により地表面の CH_4 および CO_2 フラックスを測定した。事前スクリーニングには、レーザーガス検知器（LMD）（SA3C15A, アンリツ(株)）を用いた。地表面 CH_4 フラックスの計測にはLMD-Chamber法(山田ら 2006)を併用した。

また、同地点において、簡易ボーリングバーを用いて地下50cm削孔した上でガス採取管を設置して、覆蓋した。一定時間経過後、埋立地ガス濃度計 GA2000Plus (Geotechnical Instruments Co.) を用いて孔内のCH₄およびCO₂の濃度を計測した(山田ら 2008)。各埋立地における平面濃度分布よりクリギング法(Ishigaki et al. 2005)で求めた体積値平均によりガスフラックスの代表値を求めて算出した。

(2) 世界における都市廃棄物ストリームの形成パターンの提示

文献(山田ら 2009, Ministry of Environment Korea 2008, Baek 2009)ならびに専門家ワークショップより、アジア諸国の国または都市における廃棄物ストリームと廃棄物フローを把握・整理した。欧州等のデータは文献(Shimura et al. 2001, EC 2003, OECD 2008, Mairie de Paris 2008, Lyon 2008, Berlin 2008, ISPRA 2008)から求めた。多くの国で有価物は公式または非公式に回収され、埋立処分へ向かう流れとは別の流れを形成している。したがって、今回の検討から、有価物(金属、ガラス、紙、プラスチック等)の流れは除いた。データを得た年の各国のGDP(購買力平価: PPP)はIMF(2009)のデータベースより求めた。都市ごみストリームダイアグラムとして、Cossu and Piovesan(2007)を参考にして、三角図(ternary diagram)上に有価物を除いた都市ごみ排出量に対する直接埋立、焼却(熱)処理、(好気性および嫌気性)生物処理の割合をプロットした。

(3) 東南アジアにおける都市廃棄物ストリームの把握

2008年11月より東南アジア8カ国(ベトナム国、インドネシア国、カンボジア国、タイ国、ラオス国、マレーシア国、フィリピン国、シンガポール国)の中央政府及び主要都市(主に首都)に対して調査票を送付し、都市廃棄物の収集・処理フロー、物理組成等の都市廃棄物管理データの提供を依頼した。調査票の回答が得られなかった主要都市の都市廃棄物管理データを補完するため、JICAの廃棄物管理に係る調査報告書等より関連情報を収集した。

また、ベトナム国のVUREIA (Vietnam Urban Environment and Industrial Zone Association)の会員である90の都市環境公社(URENCO: Urban Environment Company)に対して都市廃棄物管理に関する調査票を2009年11月に配布し、12月を回答期限とした。ただし、12月はベトナム国の年度末にあたるため、回答期限までの回答回収率が低かった。回答期限以降、2010年4月までに電話による回答の督促や、未回答・不明瞭回答部分の追加的な電話ヒアリング調査を実施した。調査項目は2008年実績をもとに収集人口、収集量、埋立処分量、コンポスト処理量、トラックスケールの有無等とした。ただし、都市廃棄物とはURENCOが収集する固形廃棄物で、家庭由来及び事業等由来の廃棄物を対象とし、産業廃棄物及び有害廃棄物(医療廃棄物を含む)は対象外とした。また、インフォーマルセクターが回収する有価物に関する情報はURENCOが持ち合わせていないので対象外とした。

2008年度および2009年度にハノイ近郊の15社の工場を有する企業(製造業)に対して、廃棄物の排出量、品目、ならびに排出先(処理技術)についてアンケート調査実施した。対象とした企業の概略は、表3-2である。うち数社については、アンケート回答の確認のためのヒアリングと工場施設の見学、また回答のあった排出先処理業者の視察を行った。

表3-2 排出事業者に対するアンケート対象企業の概略

Sector	Number	Main Products
Beverage	1	Beer
Pulp and Paper	1	Toilet Paper
Plastics	3	Plastics Proceeding
Ceramic and Earth	2	Sanitary Ceramics
Metalware	1	Mold
General Machinery	2	Medical Device, Rubber Roller for Office Machine
Electric Machinery	3	Printer, Scanner, Labeler, Bar Code Reader
Transport Machinery	2	Motorcycle Engine, Parts for Bicycle

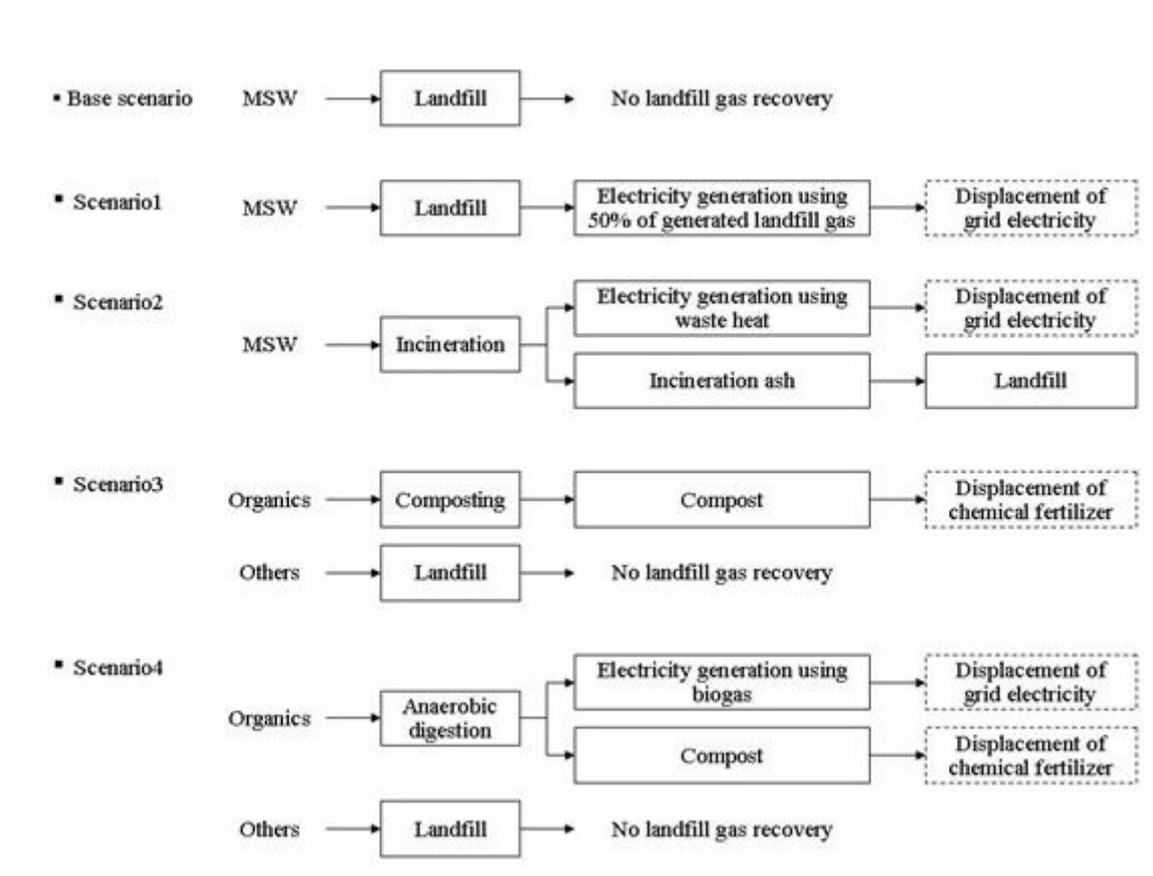


図3-1 ハノイ市における都市ごみ処理のシナリオ

(4) 埋立地CH₄削減によるCDM事業の持続性評価手法の開発

1) ハノイ市における都市廃棄物管理システムの代替シナリオ分析

文献(MoNRE 2005, GSO 2004, MoNRE 2005, Ishigaki et al. 2007, Worldbank 1999)よりハノイ市における都市ごみの埋立処分量を推計し、都市ごみの物理組成(Ishigaki et al. 2007)とIPCCガイドライン(2006)によるDOCより炭素量を求めた。現状シナリオと都市ごみ処理を改善する4つの代替シナリオ(図3-1)を設定した。各シナリオにおける温室効果ガスの発生はIPCCガイドライン(2006)に

従った。その他の発生については化学量論計算あるいはIWMモデル(White et al. 1995, 2001)を用いた。ライフサイクルインベントリー分析をもとに、環境影響、エネルギー消費量、埋立処分量、CERポテンシャルを評価した。それぞれの環境影響の特性化に用いた手法を表3-3に示す。

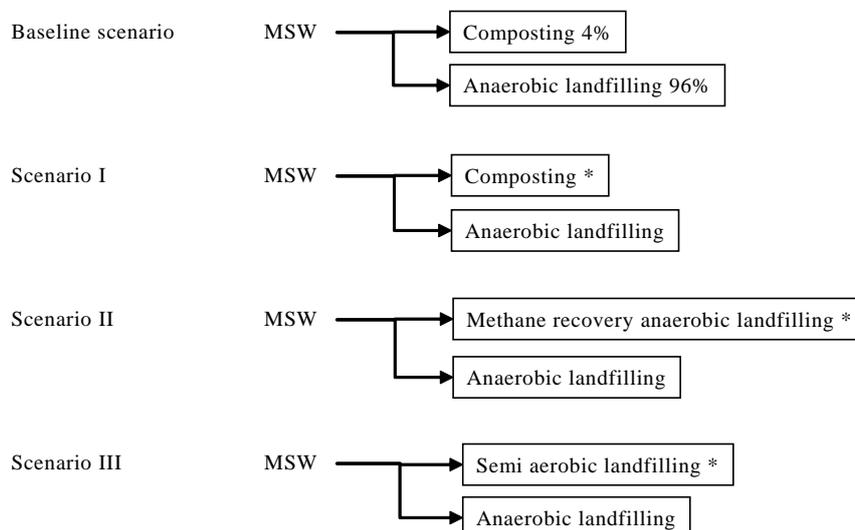
表3-3 環境影響の特性化に用いた手法

Category	Indicator	Equivalent substance
Ozone layer depletion	ODP ^{§, §§}	CFC-11
Abiotic depletion	ADP ^{§§§}	Sb
Global warming	GWP(100) [*]	CO ₂
Human toxicity	HTP(inf) ^{*, **}	1,4-DCB
Fresh water aquatic ecotoxicity	FAETP(inf) ^{*, **}	1,4-DCB
Photochemical oxidation	POCP ^{#, ##, ###}	C ₂ H ₄
Acidification	AP [¥]	SO ₂
Eutrophication	EP [¥]	PO ₄ ³⁻

^{§, §§}: WMO 1992, 1999; ^{§§§}:Guinee 1995, ^{*}, ^{**}:Huijbregts et al. 2000, 2001; ^{#, ##}:Derwent et al.1996, 1998; ^{###}: Jenkin et al.1999, [¥]: Huijbregts et al.1992

2) ベトナム国における都市廃棄物管理システムの代替シナリオ分析

ベトナム国の人口統計(2007)より、1995年から2007年までの64の中央直轄市及び省の都市部における人口推移をもとに各都市ごとに回帰直線を求め、2025年までの人口推移を各都市ごとに予測した。URENCOに対する都市廃棄物管理に関する調査結果をもとに都市部における1人1日当たりの都市廃棄物排出原単位を算出し、排出原単位は変化しないと仮定して2010年から2025年までのベトナム国の都市廃棄物の総排出量を予測した。現状の都市廃棄物管理システム（コンポスト処理、嫌気性埋立）を維持するベースラインシナリオに加え、国家戦略の再資源化目標率を達成するための廃棄物管理システムの代替シナリオを3種類提示し（図3-2）、2010年から2025年までの温室効果ガス排出量の推移を予測した。



* 60% in 2015, 85% in 2020, 90% in 2025 based on the “National strategy of general management of solid waste up to 2025 with a vision to 2050”.

MSW: Municipal solid waste

図3-2 ベトナムにおけるベースラインシナリオ及び代替シナリオ

ベースラインシナリオでは現状の都市廃棄物の収集・処理処分実態に即し、再資源化率を2010年から2025年まで一定とした。ここでは再資源化率を埋立地CH₄発生回避率に読み替えて、シナリオIでは「コンポスト処理」を、シナリオIIでは「CH₄回収嫌気性埋立」を、またシナリオIIIでは「準好気性埋立」を埋立地CH₄回避策として設定した。

再資源化されない都市廃棄物はすべてCH₄回収を伴わない嫌気性埋立により処分されるとした。2009年以前に処理処分された都市廃棄物由来の温室効果ガスは対象外とした。

算出する温室効果ガスは生分解性廃棄物由来のCH₄及びN₂Oのみとし、すべてのシナリオにおいて収集運搬、処理処分に係る燃料消費由来の温室効果ガスは対象外とした。コンポスト処理では、夾雑物及び処理残渣の処分由来の温室効果ガスは対象外とした。コンポスト処理に要する期間は数週間から数カ月とし、温室効果ガスはコンポスト処理される当該年にすべて排出されることとし、排出係数はIPCCガイドライン(2006)のデフォルト値を用いた。各組成の乾燥固形分は厨芥類25%、紙類80%、木くず類55%、繊維類80%とした(GIO 2009)。

埋立では、IPCC (2006)による埋立地CH₄排出モデルを用いて2010年から2025年までのCH₄排出量を算出した。なお、モデル補正係数は0.9、CH₄酸化率(OX)は0、一次分解速度(k)は0.51(Ishigaki et al. 2005)、好気性分解補正係数(MCF)は嫌気性埋立で0.8、CH₄回収嫌気性埋立で1.0、準好気性埋立で0.5、分解性炭素率(DOC)は0.5、CH₄比率(F)は0.5とした。時間遅れ(Delay Time)は半年とした。CH₄回収嫌気性埋立では埋立開始から埋立3年後からCH₄回収を開始するとし、埋立地ガスの回収率を60%(中国電力 2007)とした。また、CH₄の発熱量を55.5 MJ/kg(JHFC総合効率検討特別委員会ら 2006)とし、発電効率を30%(エックス都市研究所 2003)とした。発電量はグリッドへ売電するとし、ベトナム国におけるグリッドの温室効果ガス排出係数を0.705 ton-CO₂/MWh(Tuyen et al. 2004)とした。

4. 結果・考察

(1) 埋立地CH₄排出モデルのアジアへの適合化と埋立地CH₄削減技術の評価

1) 熱帯地域におけるk値の評価

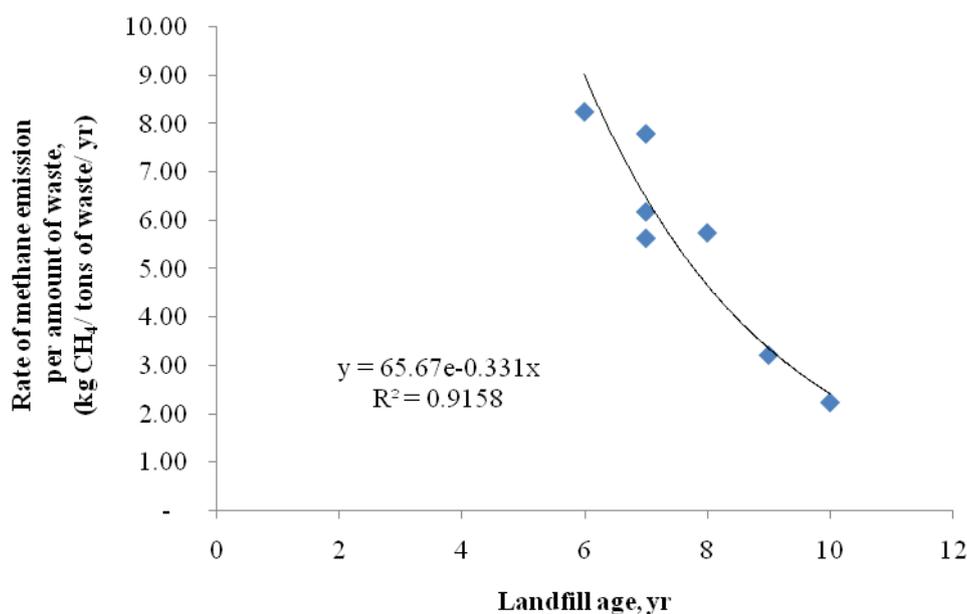
タイの4カ所の埋立地において乾期に求めた廃棄物の単位体積あたりのCH₄放出量を表3-4に示す。これら埋立地は規模・構造(高さ20m程度の積み上げ型、30cm程度の覆土)および埋立廃棄物の組成(厨芥類が64~69%)が同程度であることから、埋立年数(表3-1)が異なる同じ埋立地と仮定し、CH₄放出量の経年変化(図3-3)を下式³⁾にフィッティングさせて、一次分解定数(k, /年)を求めた。

$$C_t = C_0 \cdot k \cdot \exp^{-kt}$$

ここでC₀(kg CH₄/ tons of waste)は埋立廃棄物からのCH₄放出ポテンシャル、C_t(kg CH₄/ tons of waste/yr)はt年におけるCH₄放出量である。以上よりk値として0.33 /年(半減期2.1年)が求められた。

表3-4 タイの埋立地における廃棄物の単位体積あたりのCH₄放出量

Study site	Measurement in 2008		Measurement in 2009	
	Methane emission	Rate of methane emission per amount of waste	Methane emission	Rate of methane emission per amount of waste
	(kg/d)	(kg CH ₄ / tons of waste/ yr)	(kg/d)	(kg CH ₄ / tons of waste/ yr)
Pattaya	10,661	8.26	9,472	6.18
Ban-Bung	2,464	7.80	2,104	5.75
Hua-Hin (Phase 2)	2,249	5.64	928	2.07
Laemchabang	3,904	3.22	3,434	2.24

図3-3 タイの4カ所の処分場におけるCH₄放出量の経年変化

2) 現場計測によるOXの評価

埋立地内で生成されたCH₄は、酸素が浸透している覆土を通過する際に、CH₄酸化細菌による代謝を受けて二酸化炭素に酸化される。二酸化炭素の土壌水への溶解と土壌からのCH₄の発生が無視できる場合、覆土上下のCH₄およびCO₂フラックスの合計値は等しくなる(Christophersen et al. 2001)。したがって、覆土上の埋立地ガスフラックス ($\phi_{CH_4 \text{ top}} + \phi_{CO_2 \text{ top}}$) と覆土下の埋立地ガスの組成 (CH₄比, $[CH_4]/([CO_2]+[CH_4])$) を測定すれば、下式より、CH₄酸化速度 (MO) ならびにOXを求めることができる。

$$MO = (\phi_{CH_4 \text{ top}} + \phi_{CO_2 \text{ top}})([CH_4]/([CO_2]+[CH_4])) - \phi_{CH_4 \text{ top}}$$

$$OX = MO / (\varphi CH_4 \text{ top} + \varphi CO_2 \text{ top})([CH_4]/[CO_2] + [CH_4])$$

表3-5～3-7にタイ、マレーシアならびに日本の埋立地における観測データから評価したOX（フラックスの空間分布を考慮した体積平均値）を示す。東南アジアの処分場では、MOは0.27～12.8 mol/m²/d（体積値平均）であり、日本の処分場に比較して大きく、気候（特に気温）の違いが反映されていると考えられるが、埋立地ガスフラックスが大きく、覆土厚が薄いため、Saraburi埋立地2010年の0.58、Cha Am埋立地（浅い埋立地）2009年の0.76を除いて、OXは0.04～0.45（体積値平均の比）と最大で5割程度である。一方、CH₄フラックスが1～2桁小さい日本の埋立地では、MOは0.05-0.14 mol/m²/d（体積値平均）と小さいが、OXは0.7以上を示した。また、東南アジアの処分場では埋立経過年数が増につれOXが大きくなる傾向があり、覆土へのCH₄栄養細菌の定着によるMOの増加とCH₄フラックスの低下によるものと考えられる。

以上により、日本および東南アジアの埋立地において、OXはIPCCガイドラインのデフォルト値0（非管理埋立地または低透気性の覆土施用）もしくは0.1（透気性覆土施用）よりも大きいこと、また、そもそも覆土におけるCH₄酸化率はCH₄フラックスの大きさや経過年数によって変化するものであり、酸化量の評価はOXのような一定比率ではなく、埋立経過年数や覆土厚の関数としてMOのような単位面積あたりの酸化速度を与えて行うべきであることが示された。

表3-5 東南アジアと日本の埋立地において実測された覆土のCH₄酸化率（斜字体が実測値）

		Study site						
		Hua-Hin		Laem-chabang	Laem-chabang	Laem-chabang (1)	Laem-chabang (2)	
		2008	2009	2008	2009	2010	2010	
Surface CH ₄ Emission	mol/m ² /d	Min	-0.08	0.03	0.01	-0.47	-0.03	-0.09
		Max	12.41	40.64	134.79	91.33	55.67	24.56
		Average	2.45	6.81	17.5	12.35	14.36	6.43
		Spatial	2.89	7.38	14.7	10.9	15.36	8.05
Surface CO ₂ Emission	mol/m ² /d	Min	-0.61	25.98	0.1	-0.58	-1.53	-0.51
		Max	7.29	3009.46	101.89	110.85	63.29	56.07
		Average	2.02	466.76	16.88	15.51	14.77	13.21
		Spatial	1.99	10.21	15.5	13.68	16.74	16.29
Bottom CH ₄ Emission	mol/m ² /d	Min	0	0.5	0.15	-0.37	-0.95	-0.33
		Max	10.63	59.05	135.61	116.12	70	34.5
		Average	2.59	10.11	19.7	16.35	17.69	10.79
		Spatial	2.84	10.29	17.3	14.43	19.67	12.4
CH ₄ Oxidation (MO)	mol/m ² /d	Min	0	0.23	0	0	0	0
		Max	2.33	23.5	33.68	29.58	17.4	14.34
		Average	0.32	3.3	3.09	4.01	3.7	4.38
		Spatial	0.27	2.92	3.22	3.55	4.6	4.35
CH ₄ Oxidation Factor (OX)	-	Spatial	0.10	0.28	0.19	0.25	0.23	0.35

表3-6 東南アジアと日本の埋立地において実測された覆土のCH₄酸化率（斜字体が実測値）

		Study site						
		Pattaya	Pattaya	Pattaya	Saraburi	Saraburi	Saraburi	
		2008	2009	2010	2008	2009	2010	
Surface CH ₄ Emission	mol/m ² /d	Min	<i>0.04</i>	<i>-0.81</i>	<i>-0.17</i>	<i>-0.02</i>	<i>-0.07</i>	<i>-0.33</i>
		Max	<i>35.12</i>	<i>321.86</i>	<i>102.2</i>	<i>121.88</i>	<i>40.93</i>	<i>17.32</i>
		Average	<i>9.45</i>	<i>25.6</i>	<i>17.69</i>	<i>22.41</i>	<i>2.54</i>	<i>2.33</i>
		Spatial	<i>10.63</i>	<i>21.47</i>	<i>17.15</i>	<i>23.17</i>	<i>4.46</i>	<i>1.96</i>
Surface CO ₂ Emission	mol/m ² /d	Min	<i>1.49</i>	<i>-2</i>	<i>-4.64</i>	<i>0.16</i>	<i>0.03</i>	<i>-1.33</i>
		Max	<i>36.88</i>	<i>257.51</i>	<i>493.77</i>	<i>162.72</i>	<i>35.52</i>	<i>23.42</i>
		Average	<i>12.7</i>	<i>38.5</i>	<i>35.61</i>	<i>16.98</i>	<i>3.8</i>	<i>6.41</i>
		Spatial	<i>11.93</i>	<i>37.85</i>	<i>37.8</i>	<i>14.86</i>	<i>7.63</i>	<i>6.61</i>
Bottom CH ₄ Emission	mol/m ² /d	Min	0.63	-1.64	-1.02	0.16	0.03	-0.7
		Max	33.41	338.9	308.71	106.62	45.94	21.43
		Average	13.18	36.2	28.99	21.83	3.8	4.69
		Spatial	13.82	33.01	29.56	21.19	7.25	4.58
CH ₄ Oxidation (MO)	mol/m ² /d	Min	0	0	0	0	0.01	0
		Max	18.59	106.65	206.51	49.59	6.76	6.78
		Average	4.01	10.67	12.11	4.36	1.26	2.41
		Spatial	3.43	11.62	12.82	3.77	2.85	2.68
CH ₄ Oxidation Factor(OX)	-	Spatial	0.25	0.35	0.43	0.18	0.39	0.58

表3-7 東南アジアと日本の埋立地において実測された覆土のCH₄酸化率（斜字体が実測値）

		Study site						
		Ban Bung	Cha-Am	Pulua Burung	Saitama	Hokkaido	Hokkaido	
		2009	2009	2008	2008	2008	2009	
Surface CH ₄ Emission	mol/m ² /d	Min	<i>-0.02</i>	<i>-0.13</i>	<i>-0.06</i>	<i>-0.06</i>	<i>-0.01</i>	<i>-0.01</i>
		Max	<i>47.39</i>	<i>0.82</i>	<i>195.28</i>	<i>0.87</i>	<i>0</i>	<i>0.62</i>
		Average	<i>4.98</i>	<i>0.26</i>	<i>21.91</i>	<i>0.03</i>	<i>0</i>	<i>0.02</i>
		Spatial	<i>4.45</i>	<i>0.24</i>	<i>24.08</i>	<i>0.02</i>	<i>0.01</i>	<i>0.02</i>
Surface CO ₂ Emission	mol/m ² /d	Min	<i>-0.27</i>	<i>16.07</i>	<i>0.11</i>	<i>-0.14</i>	<i>-0.38</i>	<i>-0.03</i>
		Max	<i>71.09</i>	<i>169</i>	<i>148.55</i>	<i>0.15</i>	<i>0.89</i>	<i>2.05</i>
		Average	<i>10.06</i>	<i>70.97</i>	<i>16.23</i>	<i>0.04</i>	<i>0.36</i>	<i>0.34</i>
		Spatial	<i>9.79</i>	<i>1.51</i>	<i>17.87</i>	<i>0.04</i>	<i>0.39</i>	<i>0.28</i>
Bottom CH ₄ Emission	mol/m ² /d	Min	-0.16	0.17	0.05	-0.13	-0.01	-0.03
		Max	66.84	2.2	206.63	0.92	0.48	1.15
		Average	8.53	1.06	22.18	0.08	0.11	0.19
		Spatial	8.1	1	24.61	0.07	0.15	0.14
CH ₄ Oxidation (MO)	mol/m ² /d	Min	0	0.14	0	0	0	0
		Max	19.45	2.05	11.36	0.15	0.48	1.05
		Average	3.56	0.8	0.91	0.05	0.11	0.17
		Spatial	3.66	0.76	1	0.05	0.14	0.12
CH ₄ Oxidation Factor(OX)	-	Spatial	0.45	0.76	0.04	0.71	0.93	0.86

3) 現場観測によるMCFの評価

埋立層内への受動的な大気の導入を促す準好気性埋立技術では、IPCCガイドライン(2006)におけるMCFがパフォーマンスを評価する指標として重要である。埋立地内で有機物の嫌気性分解が起きているとき、CH₄酸化が起きている可能性のある覆土の影響を受けない深さにおいて埋立地ガスの[CH₄]/([CO₂]+[CH₄]) (CH₄比) が0.6~0.5を下回ることは、埋立地内に大気が侵入して部分的に好気性分解が生じていることを示す(松藤ら 2007, 山田ら 2008)。すなわち、覆土下で計測されたCH₄比が0.6~0.5または計測された最大のCH₄比より小さくなる割合が、MCFの実測値となる。

表3-8~3-10にタイ、マレーシアならびに日本の埋立地における観測データから評価したMCF(フラックスの空間分布を考慮した体積平均値)を示す。MCFは埋立地内では0.5以下の領域も存在するが、改修工事により準好気構造に改変しつつある北海道の埋立地以外は、平均(代表的)には1.0に近い値をとり、嫌気性分解が優占していることを意味しており、本評価手法の妥当性が示された。

表3-8 東南アジアと日本の埋立地において実測された好気性分解補正係数(斜字体が実測値)

		Study site						
		Hua-Hin 2008	Hua-Hin 2009	Laem- chabang 2008	Laem- chabang 2009	Laem- chabang (1) Area1 2010	Laem- chabang (2) Area2 2010	
Surface CH ₄ Emission	mol/m ² /d	Min	-0.08	0.03	0.01	-0.47	-0.03	-0.09
		Max	12.41	40.64	134.79	91.33	55.67	24.56
		Average	2.45	6.81	17.5	12.35	14.36	6.43
		Spatial	2.89	7.38	14.7	10.9	15.36	8.05
Surface CO ₂ Emission	mol/m ² /d	Min	-0.61	25.98	0.1	-0.58	-1.53	-0.51
		Max	7.29	3009.46	101.89	110.85	63.29	56.07
		Average	2.02	466.76	16.88	15.51	14.77	13.21
		Spatial	1.99	10.21	15.5	13.68	16.74	16.29
Total CH ₄ and CO ₂ Emission	mol/m ² /d	Min	-0.4	0.86	0.26	-0.64	-1.56	-0.56
		Max	17.69	103.93	236.67	197.39	115.9	76.47
		Average	4.48	17.42	34.37	27.86	29.13	19.63
		Spatial	4.88	17.59	30.2	24.58	32.11	24.35
Bottom CH ₄ Emission	mol/m ² /d	Min	0	0.5	0.15	-0.37	-0.95	-0.33
		Max	10.63	59.05	135.61	116.12	70	34.5
		Average	2.59	10.11	19.7	16.35	17.69	10.79
		Spatial	2.84	10.29	17.3	14.43	19.67	12.4
MCF	-	Spatial	0.97	0.97	0.95	0.98	1.00	0.85

表3-9 東南アジアと日本の埋立地において実測された好気性分解補正係数（斜字体が実測値）

		Study site						
		Pattaya 2008	Pattaya 2009	Pattaya 2010	Saraburi 2008	Saraburi 2009	Saraburi 2010	
Surface CH ₄ Emission	mol/m ² /d	Min	<i>0.04</i>	<i>-0.81</i>	<i>-0.17</i>	<i>-0.02</i>	<i>-0.07</i>	<i>-0.33</i>
		Max	<i>35.12</i>	<i>321.86</i>	<i>102.2</i>	<i>121.88</i>	<i>40.93</i>	<i>17.32</i>
		Average	<i>9.45</i>	<i>25.6</i>	<i>17.69</i>	<i>22.41</i>	<i>2.54</i>	<i>2.33</i>
		Spatial	<i>10.63</i>	<i>21.47</i>	<i>17.15</i>	<i>23.17</i>	<i>4.46</i>	<i>1.96</i>
Surface CO ₂ Emission	mol/m ² /d	Min	<i>1.49</i>	<i>-2</i>	<i>-4.64</i>	<i>0.16</i>	<i>0.03</i>	<i>-1.33</i>
		Max	<i>36.88</i>	<i>257.51</i>	<i>493.77</i>	<i>162.72</i>	<i>35.52</i>	<i>23.42</i>
		Average	<i>12.7</i>	<i>38.5</i>	<i>35.61</i>	<i>16.98</i>	<i>3.8</i>	<i>6.41</i>
		Spatial	<i>11.93</i>	<i>37.85</i>	<i>37.8</i>	<i>14.86</i>	<i>7.63</i>	<i>6.61</i>
Total CH ₄ and CO ₂ Emission	mol/m ² /d	Min	<i>1.54</i>	<i>-2.81</i>	<i>-4.56</i>	<i>0.28</i>	<i>0.05</i>	<i>-1.33</i>
		Max	<i>58.24</i>	<i>579.37</i>	<i>595.97</i>	<i>219.75</i>	<i>76.45</i>	<i>40.74</i>
		Average	<i>22.15</i>	<i>64.1</i>	<i>53.31</i>	<i>39.39</i>	<i>6.34</i>	<i>8.74</i>
		Spatial	<i>22.56</i>	<i>59.32</i>	<i>54.96</i>	<i>38.03</i>	<i>12.09</i>	<i>8.56</i>
Bottom CH ₄ Emission	mol/m ² /d	Min	0.63	-1.64	-1.02	0.16	0.03	-0.7
		Max	33.41	338.9	308.71	106.62	45.94	21.43
		Average	13.18	36.2	28.99	21.83	3.8	4.69
		Spatial	13.82	33.01	29.56	21.19	7.25	4.58
MCF	-	Spatial	1.00	0.93	0.90	0.93	1.00	0.89

表3-10 東南アジアと日本の埋立地において実測された好気性分解補正係数（斜字体が実測値）

		Study site						
		Ban Bung 2009	Cha-Am 2009	Pulua Burung 2008	Saitama 2008	Hokkaido 2008	Hokkaido 2009	
Surface CH ₄ Emission	mol/m ² /d	Min	<i>-0.02</i>	<i>-0.13</i>	<i>-0.06</i>	<i>-0.06</i>	<i>-0.01</i>	<i>-0.01</i>
		Max	<i>47.39</i>	<i>0.82</i>	<i>195.28</i>	<i>0.87</i>	<i>0</i>	<i>0.62</i>
		Average	<i>4.98</i>	<i>0.26</i>	<i>21.91</i>	<i>0.03</i>	<i>0</i>	<i>0.02</i>
		Spatial	<i>4.45</i>	<i>0.24</i>	<i>24.08</i>	<i>0.02</i>	<i>0.01</i>	<i>0.02</i>
Surface CO ₂ Emission	mol/m ² /d	Min	<i>-0.27</i>	<i>16.07</i>	<i>0.11</i>	<i>-0.14</i>	<i>-0.38</i>	<i>-0.03</i>
		Max	<i>71.09</i>	<i>169</i>	<i>148.55</i>	<i>0.15</i>	<i>0.89</i>	<i>2.05</i>
		Average	<i>10.06</i>	<i>70.97</i>	<i>16.23</i>	<i>0.04</i>	<i>0.36</i>	<i>0.34</i>
		Spatial	<i>9.79</i>	<i>1.51</i>	<i>17.87</i>	<i>0.04</i>	<i>0.39</i>	<i>0.28</i>
Total CH ₄ and CO ₂ Emission	mol/m ² /d	Min	<i>-0.28</i>	<i>0.39</i>	<i>0.12</i>	<i>-0.14</i>	<i>-0.38</i>	<i>-0.04</i>
		Max	<i>118.48</i>	<i>3.99</i>	<i>343.82</i>	<i>0.92</i>	<i>0.89</i>	<i>2.15</i>
		Average	<i>15.04</i>	<i>1.87</i>	<i>38.13</i>	<i>0.08</i>	<i>0.36</i>	<i>0.35</i>
		Spatial	<i>14.24</i>	<i>1.75</i>	<i>41.95</i>	<i>0.06</i>	<i>0.4</i>	<i>0.3</i>
Bottom CH ₄ Emission	mol/m ² /d	Min	-0.16	0.17	0.05	-0.13	-0.01	-0.03
		Max	66.84	2.2	206.63	0.92	0.48	1.15
		Average	8.53	1.06	22.18	0.08	0.11	0.19
		Spatial	8.1	1	24.61	0.07	0.15	0.14
MCF	-	Spatial	0.95	0.95	0.98	1.00	0.63	0.79

(2) 世界における都市廃棄物ストリームの形成パターンの提示

アジア諸国の都市ごみストリームを、コンポスト処理、嫌気性発酵等の有機性廃棄物の資源化と焼却処理の導入の度合いによって4つのタイプに分類した。

- [タイプI] 埋立処分が主体である（ウランバートル、プノンペン、マニラ、ビエンチャン）、
- [タイプII] 焼却処理/有機資源化が一部導入されている（タイ、ハノイ、中国）、
- [タイプIII] 焼却処理/有機資源化が導入されている（ソウル、インドネシア都市部）、
- [タイプIV] 焼却処理が主体である（日本、シンガポール、マカオ、台湾）。

各タイプの廃棄物ストリームの例を図3-4に示す。また、これらストリームに示された都市ごみのマテリアルフローを、有価物回収量を除いた廃棄物排出量に対する焼却率と有機資源化率で図3-5に整理した。なお、図3-5で国名はISO 3166-1 alpha-2（インターネットアドレスの国別コード）で示した。これらの図は、アジア諸国において経済成長が進むと、廃棄物ストリームにまず、有機性廃棄物の資源化（ならびに、医療系廃棄物等を対象とした小規模な焼却処理）が導入され、次第に有機資源化（タイプIII）と焼却処理（タイプIV）の2つのストリームへと移行してゆく遷移パターンを示した。なお、タイプIVである我が国は焼却処理主体から有機資源化への道を模索しており、また、韓国、ソウルのようなタイプIIIでも有機資源化と焼却処理の併用への道を模索しつつあることから、両者のストリームの形態は今後近づいてゆくものと考えられる。

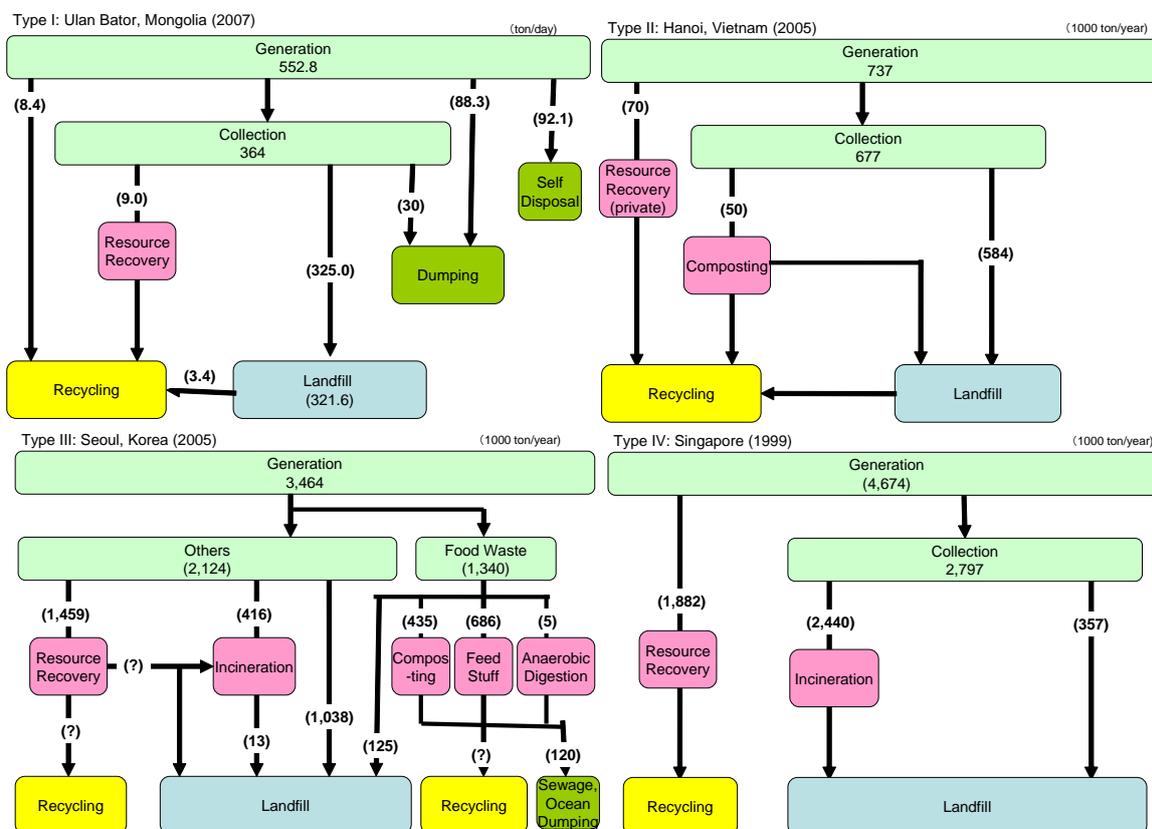


図3-4 アジア諸国の廃棄物（都市ごみ）ストリーム

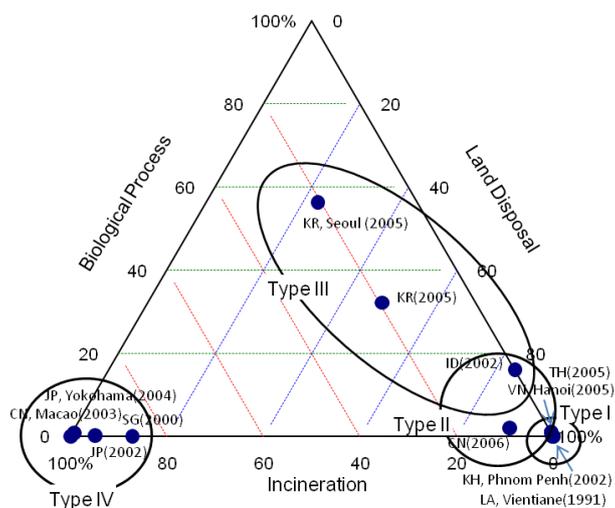


図3-5 東アジアにおける都市ストリームダイアグラム（国名はISO 3166-1 alpha-2で表記）

図3-6は欧州における都市ごみストリームダイアグラムである。直接埋立が主流の国（主に東欧）もあるが、多くの国では、MBT等の生物処理と焼却処理を合わせて都市ごみ処理に導入している。これは、既報1)におけるタイプIIIに相当する。オーストリアを除いて、生物処理の割合は最大4割程度であり、直接埋立が3割以下の国は、3割以上を焼却処理している。

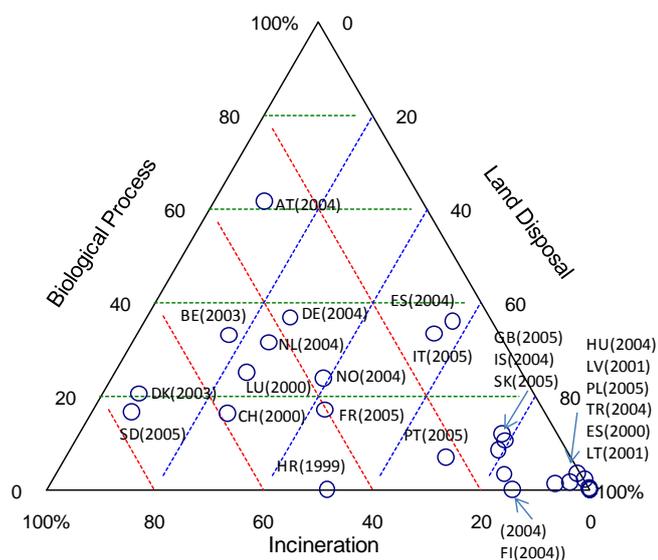


図3-6 欧州各国における都市ごみストリームダイアグラム（国名はISO 3166-1 alpha-2で表記）

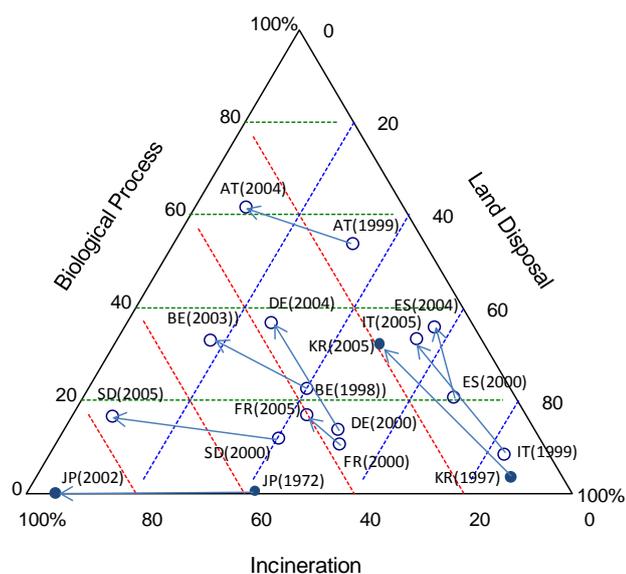


図3-7 欧州とアジアにおける都市ごみストリームの変遷（国名はISO 3166-1 alpha-2で表記）

図3-7にはダイアグラム上に欧州とアジア（日本と韓国）における都市ごみストリームの変遷を示す。図中に示した全ての国で時間経過と共に直接埋立の割合が減じている。過去において直接埋立の割合が4割以上の国はここ数年で生物処理と焼却処理を合わせて導入している傾向にある。一方、直接埋立の割合が4割以下であった国は、生物処理を維持しつつ、主に焼却処理を導入している。この傾向は生物処理の割合が6割と高いオーストリアにおいても同様である。

以上は、少なくとも欧州とアジアにおいて、直接埋立の割合が大きい初期の段階では生物処理が主要な埋立前処理の一つとなっているが、さらに直接埋立を削減するために主に焼却処理が導入されるとい一般的な傾向を示している。

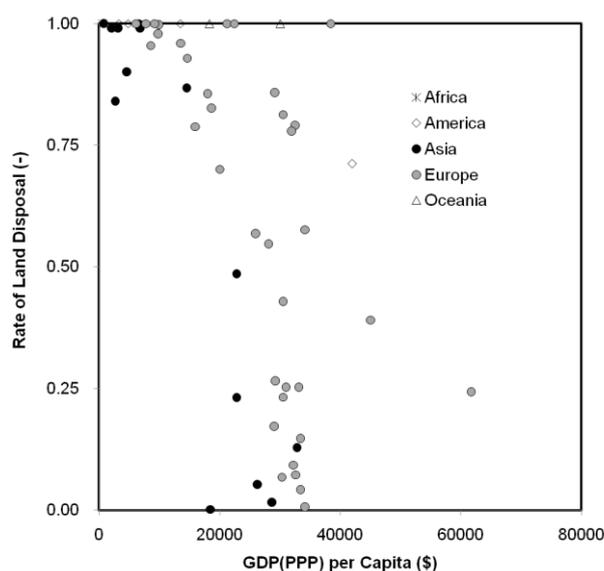


図3-8 世界における直接埋立の割合とGDP（購買力平価）との関係

表3-11 東南アジアの主要都市における都市廃棄物収集・処理フロー

	Bangkok	Jakarta*	Kuala Lumpur**	Phnom Penh***	Hanoi	Ho Chi Minh
Year	2007	2006	2003	2003	2007	2007
Total Population	8,974,510	8,756,000	1,474,300	1,199,414	3,289,300	6,650,942
Incineration (ton/year)	6,868					3,831
Composting (ton/year)	403,266				127,750	
Landfilling (ton/year)	2,680,908	3,214,555	657,000	255,354	959,950	2,176,611

*:JBIC 2007, **:久保倉 2003, Kokusai kogyo 2005

表3-12 東南アジアの主要都市における都市廃棄物物理組成

	Bangkok	Jakarta	Kuala Lumpur ⁴⁹⁾	Phnom Penh ⁴⁸⁾	Hanoi	Ho Chi Minh	Southeast Asia (IPCC default)
Food	42.1	53.4	48.3	63.3	49.0	52.7	43.5
Paper and cardboard	11.7	20.6	23.6	6.4	2.9	8.3	12.9
Garden	7.6	0.0	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0
Wood	0.0	0.1	0.0	6.8	1.0	3.3	9.9
Textile	5.3	0.6	4.0	2.5	2.2	8.1	2.7
Plastics	26.5	13.3	9.4	15.5	8.5	7.4	7.2
Metals	1.8	1.1	5.9	0.6	1.0	1.0	3.3
Glass	2.7	1.9	4.0	1.2	0.8	2.5	4.0
Rubber	1.0	0.1	0.0	0.1	0.0	2.9	0.0
Leather	0.0	0.1	0.0	0.1	1.0	1.8	0.0
Ceramic and stone	0.6	0.8	0.0	0.0	7.4	1.2	0.0
Others	0.8	8.2	0.0	3.6	26.2	10.8	16.3

東南アジア諸国の中央政府へのヒアリング調査及びアンケート調査によると、都市廃棄物の収集・処理フロー及び物理組成といった各都市ごとの廃棄物管理データは国家レベルで整備されていないことが明らかとなった。また、主要都市においては、都市廃棄物の収集・処理フロー及び物理組成データを有する都市もあるが、その信頼性は決して高くはないと言える。さらに、都市廃棄物の収集・処理フロー及び物理組成データを有するといっても、過去10数年前に当該都市において実施されたJICA調査を根拠としている例もあり、自治体自らが自発的、継続的にデータを収集しているという例は把握できた範囲ではバンコク（タイ）、ハノイ（ベトナム）、ホーチミン（ベトナム）の3都市に限られた。さらに、都市廃棄物の収集対象人口の把握は困難だと言える。また、例えばジャカルタ（インドネシア）においてはコミュニティレベルでのコンポスト化が活発であるが、その処理量については公式の統計データがなく、コミュニティによる廃棄物発生抑制効果を正当に評価しづらい。

物理組成データは、分析手法によって大きく結果が変動する。サンプリング地区、サンプリング量、サンプリング方法、縮分の有無、分類項目、測定方法等によって同じ都市においても全く

ことなる物理組成データが得られることも珍しくない。信頼性の高い廃棄物データを得るためにも、今後は東南アジアにおける都市廃棄物の分析手法の標準化が望まれる。

2) ベトナム国都市における廃棄物ストリーム

ベトナム国の90のURENCOのうち、83のURENCOから調査票の回答を得た（表3-13）。回答を得たURENCOの総収集人口は約1,890万人でベトナム国人口約8,621万人の21.9%であった（Worldbank 2008）。また、回答を得たURENCOの都市廃棄物の総収集量は約534万ton/年であった。都市廃棄物の排出原単位は636 g/人/日であった。ただし、ベトナム国で人口が最も多いホーチミン市の5のURENCOからは回答がなかった。4%にあたる約22万ton/年がコンポスト処理され、96%にあたる約520万ton/年が直接埋立処分されていた。ただし、コンポスト処理後に発生する残渣処分量を把握することはできなかった。特にViet Tri URENCOは収集した都市廃棄物の全量をコンポスト処理していた。

表3-13 ベトナム国における各URENCOの都市廃棄物収集・処理処分実態

Organization	Covered Population	Collection		Landfilling		Composting	
		tons /year	g/person /day	Weigh- bridge	ton/year	Weigh- bridge	tons/year
Ha Noi Urban Environment Company Ltd.,	1,200,000	399,675	913	With	385,875	With	13,800
Tu Liem Urban Environment Enterprise	160,000	36,500	625	Without	36,500		0
Dong Anh Urban Environment Enterprise	323,055	10,895	92	Without	10,895		0
Soc Son Urban Environment Company	300,000	36,500	333	Without	36,500		0
Gia Lam Urban Environment Enterprise	390,706	76,650	537	With	76,650		0
Thanh tri Urban Environment Enterprise	147,788	47,217	875	Without	47,217		0
Yen Bai Works and Urban Environment Company	95,892	21,900	626	Without	21,900		0
Lao Cai Urban Environment Company	108,605	28,835	727	Without	28,835		0
Dien Bien Urban Environment and Construction JSC	55,000	25,733	1,282	Without	25,733		0
Ha Giang Public Service and Urban Environment Company	43,000	25,400	1,618	Without	25,400		0
Hoa Binh Urban Environment JSC Company	92,000	12,285	366	Without	12,285		0
Bac Ninh Environment and Urban Works Company	150,000	36,500	667	Without	36,500		0
Bac Giang Urban Works Management JSC	108,000	25,000	634	Without	25,000		0
Viet Tri Urban Service and Environment JSC	183,524	31,463	470		0	With	31,463
Phu Tho Urban Environment JSC	46,500	12,350	728	Without	12,350		0
Nam Dinh Environment Company Ltd.,	191,900	53,942	770	With	21,156	With	32,785
Thai Nguyen Urban Works and Environment JSC	320,000	31,043	266	Without	31,043		0
Tam Diep Urban Environment Company	53,000	10,950	566	Without	10,950		0
Ninh Binh Urban Service and Environment Company	130,517	29,200	613	Without	29,200		0
Ha Nam Urban Works Environment and JSC	121,350	15,330	346	With	3,066	With	12,264
Son Tay Urban Works and Environment JSC	180,000	21,000	320	With	21,000		0
Ha Dong Urban Environment Company	250,000	68,000	745	Without	58,000		10,000
Huy Hoang Limited company	148,000	43,800	811	Without	43,800		0
Cao Bang Urban Environment Company	60,000	14,600	667	Without	14,600		0
Ha Long Urban Environment Company	N/A	105,85	N/A	Without	105,850		0

Organization	Covered Population	Collection		Landfilling		Composting	
		tons /year	g/person /day	Weigh- bridge	ton/year	Weigh- bridge	tons/year
Hai Duong Urban Environment Company	279,291	54,413	534	Without	54,413		0
Hai Phong Urban Environment Company	686,800	378,14 0	1,508	With	305,140	With	73,000
Do Son Tourism Service and Public Works Company	51,417	54,750	2,917	Without	54,750		0
Tuyen Quang Urban Construction Development Management Company	50,000	22,306	1,222	Without	22,306		0
Hung Yen Municipal Administration Company	120,000	16,828	384	Without	16,828		0
Bac Kan Urban Management Company	26,000	10,950	1,154	Without	10,950		0
Phuc Yen Urban Service and Environment Company	153,000	55,600	996	Without	55,600		0
Vinh Yen Urban Service and Environment Company	122,568	35,588	795	Without	35,588		0
Sam Son Urban Environment and Tourism Services JSC	62,000	29,200	1,290	Without	29,200		0
Thanh Hoa Urban Public Works and Environment Company	200,000	40,150	550	With	40,150		0
Vinh Urban Environment Company - Nghe An Province	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cua Lo Urban Environment and Tourism Services Company	51,119	15,000	804	Without	15,000		0
Urban Environment and Construction JSC - Lai Chau Province	210,000	21,900	286	Without	21,900		0
Son La Urban Environment Company Ltd.,	974,988	81,651	229	Without	81,651		0
Bim Son Urban Works and Environment Company	60,000	8,760	400	Without	8,760		0
Thai Binh Urban Works and Environment Company Ltd.,	178,183	30,000	461	With	30,000		0
Ha Tinh Urban Management Company	117,500	19,000	443	With	19,000		0
Quang Binh Urban Development and Environment Company Ltd.,	103,988	34,070	898	With	34,070		0
Hue Companies for Environment and Public Works	331,000	62,072	514	With	37,230	With	24,842
Da Nang Urban Environment Company	846,000	194,18 0	629	With	194,180		0
Dong Ha Urban Works and Environment Company	85,040	43,000	1,385	Without	43,000		0
Quang Ngai Urban Environment Ltd., company	125,995	39,056	849	Without	39,056		0
Quy Nhon Urban Environment Company	280,000	52,365	512	With	34,910	With	17,455
Pleiku urban Works Company	236,982	39,480	456	Without	39,480		0

Organization	Covered Population	Collection		Landfilling		Composting	
		tons /year	g/person /day	Weigh- bridge	ton/year	Weigh- bridge	tons/year
Quang Nam Urban Environment Company	1,212,668	72,084	163	Without	72,084		0
Nha trang Urban Environment Company	345,025	100,10	795	Without	100,106		0
		6					
DakLak Urban management and Environment Company	331,000	50,858	421	With	50,858		0
Hoi An Urban Works Company	85,076	16,425	529	Without	16,425		0
Kon Tum Urban Environment Company	141,662	17,425	337	Without	17,425		0
Tuy Hoa Urban Works and House Development Compnay	150,000	43,800	800	Without	43,800		0
NinhThuan Urban Works Company	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ha Tinh Urban Public Works Management Service Company	36,200	14,000	1,060	Without	14,000		0
Quang Tri Urban Works JSC	22,000	6,400	797	Without	6,400		0
Da Lat Urban Works Management Company	200,189	36,500	500	With	36,500		0
Soc Trang Urban Works Company	126,273	29,200	634	Without	29,200		0
Tan An Urban Company JSC	123,451	16,060	356	Without	16,060		0
Bac Lieu Urban Environment and Sanitation Service Center	147,000	38,325	714	Without	38,325		0
Can Tho Urban Works Company	515,179	164,98	877	Without	164,980		0
		0					
Binh Duong Urban Works Company	211,068	52,925	687	Without	52,925		0
Long Xuyen Urban Works Board	278,748	49,275	484	Without	49,275		0
Vinh Long Public Works Company	127,595	25,954	557	With	25,954		0
Ben Tre Urban Works Company	117,000	46,276	1,084	Without	46,276		0
My Tho Urban Construction Company	204,142	54,000	725	Without	54,000		0
Kien Giang Urban Project Company	193,047	40,150	570	Without	40,150		0
Cau Mau Water Supply Sewerage and Urban Project Company	214,377	29,200	373	Without	29,200		0
Vung Tau Urban Works company	267,529	88,598	907	Without	88,598		0
Bien Hoa urban environment service company	730,000	178,85	671	Without	178,850		0
		0					
Ho Chi Minh City Urban Environment Company	N/A	839,50	N/A	With	839,500		0

Organization	Covered Population	Collection		Landfilling		Composting	
		tons /year	g/person /day	Weigh- bridge	ton/year	Weigh- bridge	tons/year
			0				
Ho Chi Minh Public Works and Service Company of District 1	178,878	95,832	1,468	With	95,832		0
Ho Chi Minh House Development Management Company in District 2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ho Chi Minh Public Service Company of District 3	200,000	62,050	850	With	62,050		0
Ho Chi Minh Public Service Company of District 4	180,392	33,580	510	With	33,580		0
Ho Chi Minh Communication and Public Works Company of District 5	194,000	45,000	636	With	45,000		0
Ho Chi Minh Urban Communication Service Company of TanBinh District	470,000	140,525	819	With	140,525		0
Ho Chi Minh Public Service Company of District 6	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ho Chi Minh Public Service Company of District 8	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ho Chi Minh Urban Development and Management Company of District 9	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ho Chi Minh Urban Service and Housing Management Company of District 10	238,000	76,650	882	With	76,650		0
Ho Chi Minh Public Service Company of District 11	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ho Chi Minh Urban Development and Service Company of District 12	400,000	73,000	500	With	73,000		0
Ho Chi Minh Public Service Company of Go Vap District	550,000	98,550	491	With	98,550		0
Ha Tien Urban Works Management Board	40,932	12,316	824	Without	12,316		0
Tra Vinh Urban Works Company	95,448	22,088	634	With	22,088		0
Bao Loc Urban Works Company	160,000	14,241	244	With	14,241		0
Phan Thiet Urban Works Company	200,000	91,250	1,250	Without	91,250		0

N/A: Not available.

3) ハノイ近郊の製造業廃棄物フローの把握

アンケート調査を実施した15企業から年間に発生する廃棄物とその処理・処分・再利用先を種類別に表3-14に整理した。集計された廃棄物は101,987 tonであり、このうち83,136 ton(81.5%)が再生利用、11,392 ton(11.2%)が直接埋立、7,459 ton(7.3%)が中間処理され、製造工程から排出される有機性廃棄物である有機性汚泥、動植物性残さは全量が再生利用されていた。中間処理の内訳は、焼却処理が1,335 ton、化学処理等が6,104 tonとなっており、本調査結果ではコンポストは無かった。

表3-14 ハノイ近郊の製造業廃棄物のフロー (15企業の集計)

Unit: tons/year

Item	Generation	Recycling (Selling Out)	Direct Land Disposal	Pre-Treatment		
				Total	Incineration	Composting
Organic Sludge	27,947	27,947				
Animal and Plant Residues	168	168				
Garbage (from Canteen)	778		624	154	48	106
Textile	84	18		66	28	38
Wood	294	294				
Paper	4,040	4,031		9	9	
Ash	5,186	5,148	38	0	0	
Inorganic Sludge	19,026	5,403	7,808	5,816	530	5,285
Waste Oil	438	177		261	176	85
Waste Acid and Alkali	110	52		58	2	56
Plastics	4,108	1,706	2,369	33	21	12
Rubber	84	14		70	70	
Metals	31,298	31,292	6			
Glass and Ceramics	6,855	6,684	132	39		39
Slug	101		101			
Fluorescent Bulb	2		1	2		2
Battery	0		0	0		0
Others	1,467	204	314	950	470	480

表3-15に本調査で得られたハノイ近郊における製造業8業種15社から発生する有機性廃棄物、すなわち、汚泥、紙くず、木くず、繊維くず、および動植物性残さについて、廃棄物発生原単位を推計し、日本と比較した。比較には、日本の廃棄物統計における平成19年度の8業種の全国の発生量と活動量の関係(環境省 2009)を用いた。汚泥の発生源単位は統計から有機性と無機性を区別できないので合わせて示している。また、活動量は基本的に業種別の従業者数を用いたが、発生する廃棄物に特徴があるビール製造業と製紙業(日本の原単位において、同一業種であっても製造品又は製造工程で発生原単位が大きく異なるもの)については、活動量としてビール生産量、紙生産量を用いた。汚泥の発生源単位は飲料製造業については両者に大きな差がなかったが、製紙業についてベトナムは30倍程度の大きな値になった。これは主に古紙を用いた製紙を行っている

ためと考えられる。また、窯業・土石で原単位が大きいことは砂利採掘業が含まれるためである。なお、汚泥・動植物性残さについて、排出事業所内で脱水処理されている場合は脱水前の時点を生分量とするため原単位が大きくなる。その他の業種からの紙くず、木くず、繊維くず、動植物性残さについて、日本では産業廃棄物と定義される業種が限定されており、それ以外は産業廃棄物とならないため単純に比較できない。

表3-15 ベトナムと日本の製造業廃棄物の有機性廃棄物発生源単位の比較

Item	Unit	Country	Sector			
			Beverage	Pulp and Paper	Plastics	Ceramics and Earth
Sludge	ton/ton-products	Vietnam	0.23	55.53	1.20	2.29
		Japan	0.28	2.10	0.52	24.57
Paper	ton/ton-products	Vietnam	0.07	0.00	0.01	0.03
		Japan	-	0.04	-	-
Wood	ton/num. of employees	Vietnam	0.00	0.00	0.00	0.01
		Japan	-	0.01	-	-
Textile	ton/num. of employees	Vietnam	0.00	0.00	0.00	0.00
		Japan	-	-	-	-
Animal and plant residues	ton/num. of employees	Vietnam	0.01	0.06	0.15	0.62
		Japan	10.12	-	-	-
Item	Unit	Country	Sector			
			Metalware	General Machinery	Electric Machinery	Transport Machinery
Sludge	ton/ton-products	Vietnam	0.00	0.00	0.08	0.66
		Japan	2.09	0.61	4.34	0.81
Paper	ton/ton-products	Vietnam	0.00	0.03	0.23	0.08
		Japan	-	-	-	-
Wood	ton/num. of employees	Vietnam	0.00	0.02	0.02	0.01
		Japan	-	-	-	-
Textile	ton/num. of employees	Vietnam	0.00	0.00	0.00	0.02
		Japan	-	-	-	-
Animal and Plant Residues	ton/num. of employees	Vietnam	0.00	3.02	0.02	0.20
		Japan	-	-	-	-

収集した15社8業種のデータを用いて、ハノイ市の有機性の産業廃棄物の推計を行った。なお、この8業種がハノイ市全体の製造業工業生産高に占める割合は64%である。各業種のハノイ市全体における調査した標本のカバー率を表3-16に示す。

表3-16 ハノイ市全体における標本のカバー率

Sector	Unit of Activity	Activity of Sample	Activity in Whole Hanoi City	Cover Ratio of Sample
Beverage	Production (ton)	72,000	298,000	24.2%
Pulp and Paper		2,000	7,979	25.1%
Plastics	Number of employees	555	21,361	2.6%
Ceramic and Earth		5,400	48,028	11.2%
Metalware		22	49,086	0.4%
General Machinery		900	22,832	3.9%
Electric Machinery		10,751	25,043	42.9%
Transport Machinery		2,000	9,941	20.1%

推計結果に基づく有機性廃棄物フローをIPCCガイドライン(2006)のデフォルト値を用いて炭素換算で図3-10に示す。製造業から発生する有機性廃棄物の90%以上は再生利用されており、埋立処分へと向かうフローは5%に過ぎない。

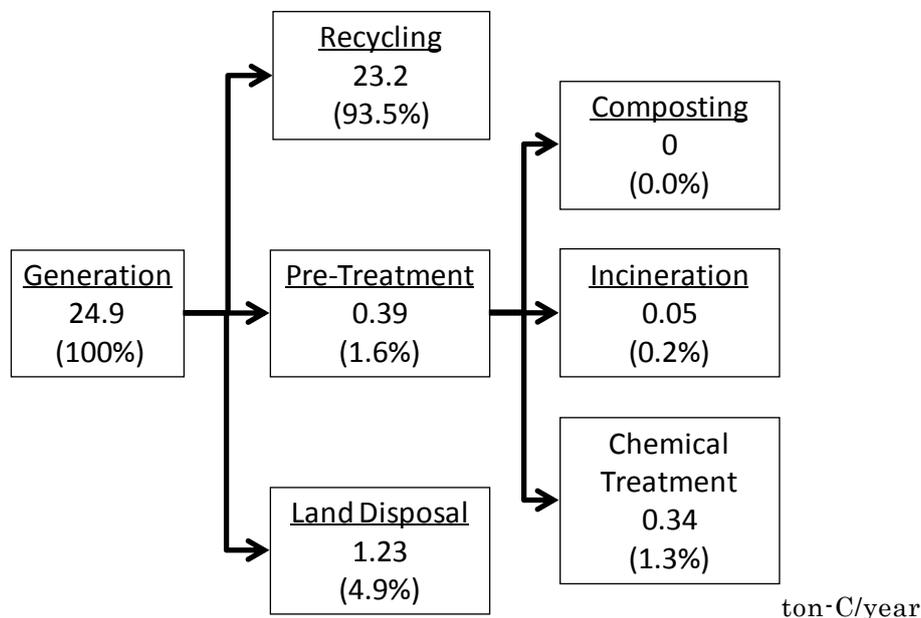


図3-10 ハノイ市における製造業からの有機性炭素フロー

(4) 埋立地CH₄削減によるCDM事業の持続性評価手法の開発

1) ハノイ市における都市廃棄物管理システムの代替シナリオ分析

図3-11に想定期間における温室効果ガスの発生量及びCERを示す。埋立処分された都市ごみ由来の温室効果ガス発生ポテンシャルは520万ton-CO₂ eq.であったのに対し、代替シナリオでは現状シナリオよりも60%から80%の削減率を示した。Scenario 4がCERポテンシャルが最も大きかった。

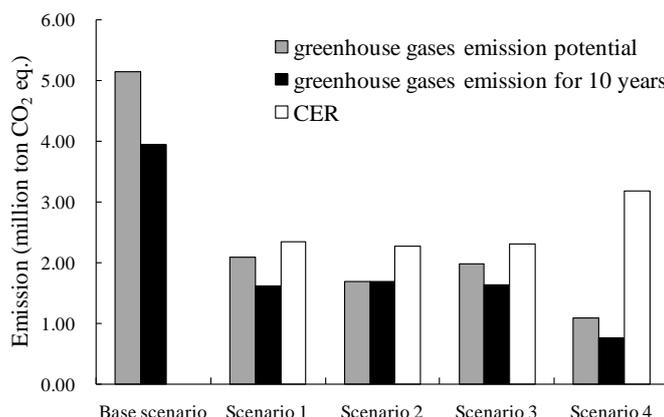
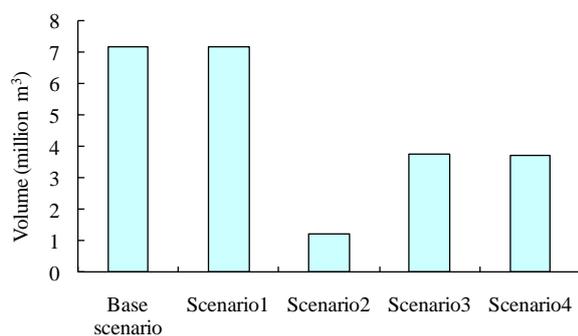


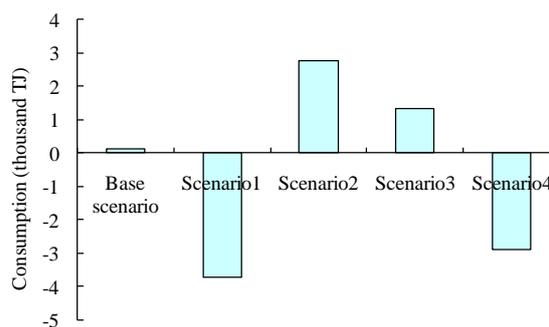
図3-11 シナリオごとの温室効果ガス排出量とCERポテンシャル

ライフサイクルインベントリー分析で算出した環境影響を図3-12に示す。Scenario 2では埋立処分

分量が80%削減される結果となった。エネルギー消費量の項目においては、現状シナリオと比較してScenario 4は2,900 TJの削減効果があった。オゾン層破壊、非生物資源の枯渇、淡水における水生生物の生態毒性はScenario 3を除くすべてのシナリオにおいて負の値（削減効果）を示した。人への毒性ポテンシャルについては、Scenario 1を除いて、現状シナリオよりも70%以上の削減効果があった。光化学的酸化影響については、埋立処分場から発生するガスの方が焼却処理で発生するガスよりも影響を及ぼし、Scenario 1が最も影響が大きかった。Scenario 3が酸性化に最も大きな影響を及ぼし、それは発生する大量のNH₃によるものであった。Scenario 4では浸出水の発生量が少ないために富栄養化への影響が抑制された。

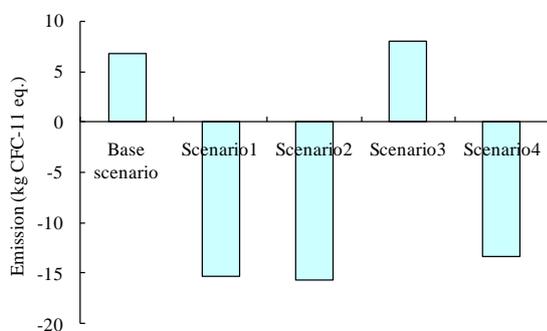


(a) landfill volume

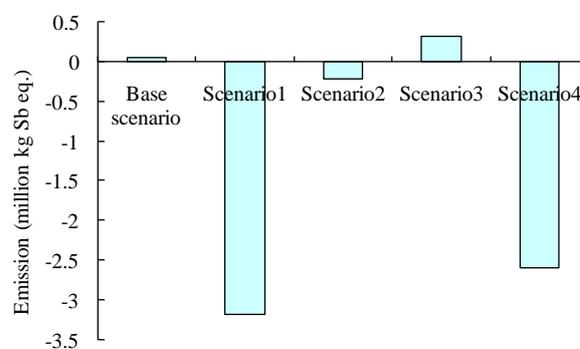


(b) net energy consumption

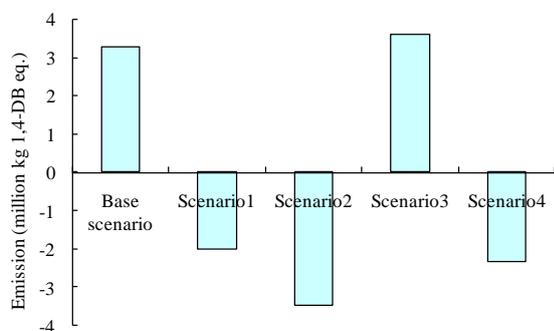
図3-12 シナリオごとの環境影響



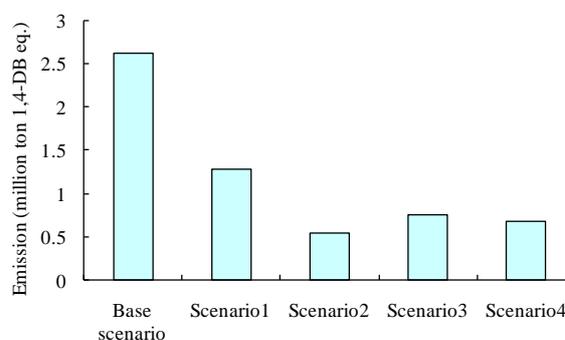
(c) ozone layer depletion



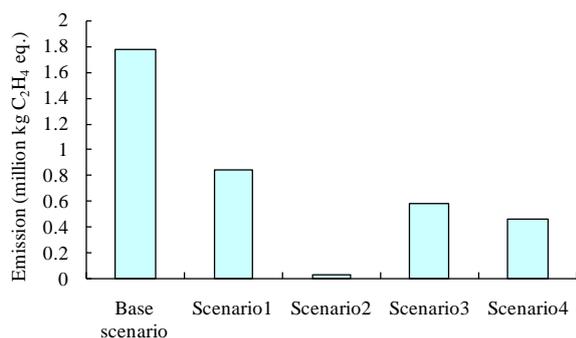
(d) abiotic depletion



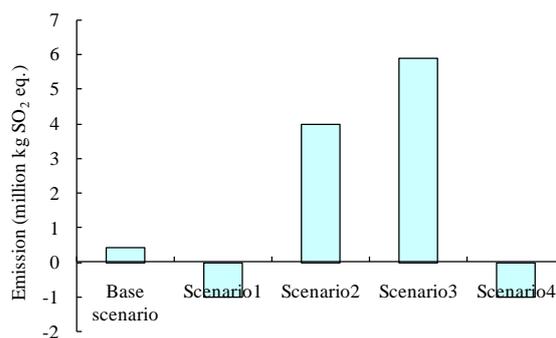
(e) ecotoxicity



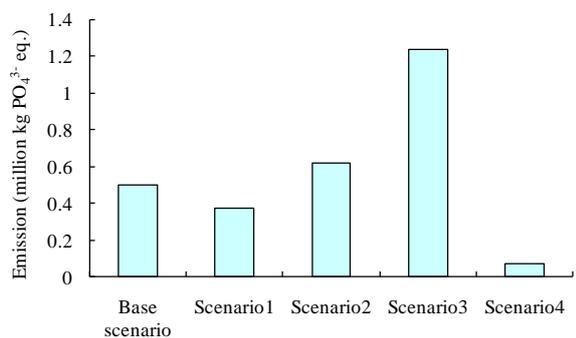
(f) human toxicity



(g) photochemical oxidation



(h) acidification



(i) eutrophication

図3-12 シナリオごとの環境影響 (つづき)

ハノイにおける都市ごみ処理の代替シナリオの中では、Scenario 4が、多くの側面において環境影響が少なく、望ましい代替シナリオであった。一方、Scenario 3はエネルギー消費量が多く、臭気問題だけでなく、酸性化及び富栄養化を引き起こすNH₃が堆肥化工程で発生していた。

2) ベトナム国における都市廃棄物管理システムの代替シナリオ分析

図3-13に過去の人口推移を外挿した2010年から2025年までのベトナム国における人口推移を示す。農村部よりも都市部の人口増加率の方が大きく、農村部の人口は2010年から2025年までに9.3%増加するのに対し、都市部では39.4%増加し、ベトナム国の人口は2021年に1億人を突破する予測となった。

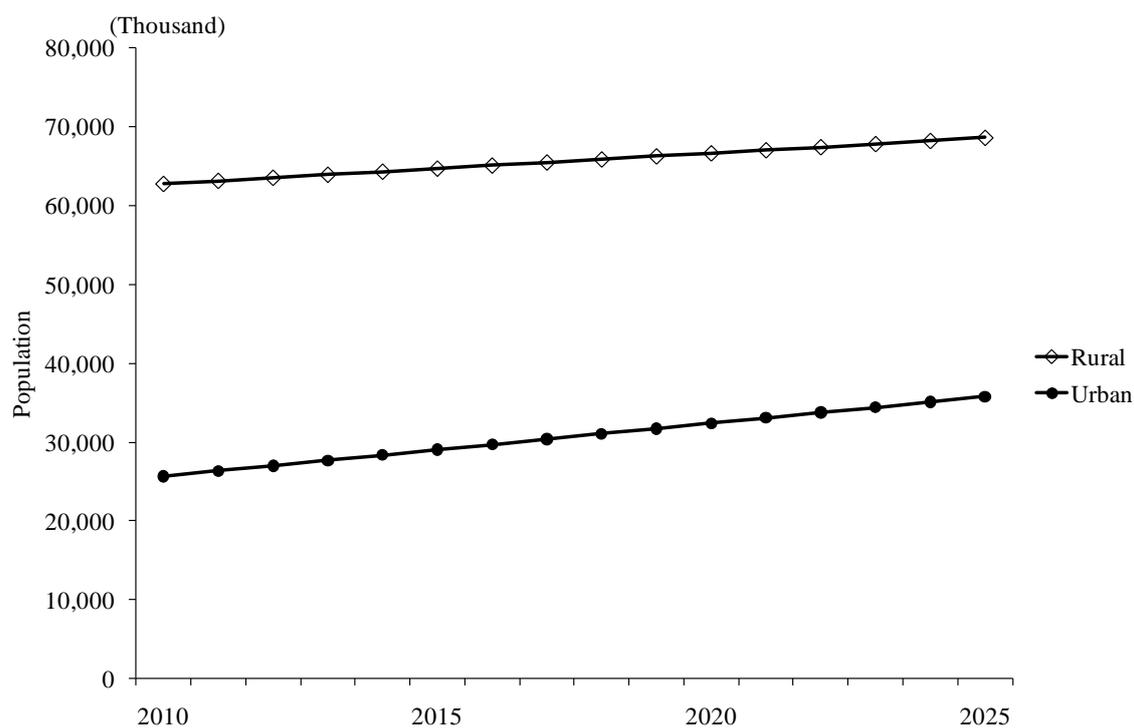


図3-13 ベトナム国における人口推移

図3-14に2010年から2025年までのベトナム国の廃棄物の排出量推移を示す。都市廃棄物の排出原単位を636 g/人/日、農村廃棄物の排出原単位を300 g/人/日(Worldbank et al. 2004)とし、人口推移に乗じた。この推計では、2010年の都市廃棄物の総排出量は農村廃棄物の86.6%であるが、2019年に都市廃棄物の総排出量が農村廃棄物の総排出量を上回る予測となった。

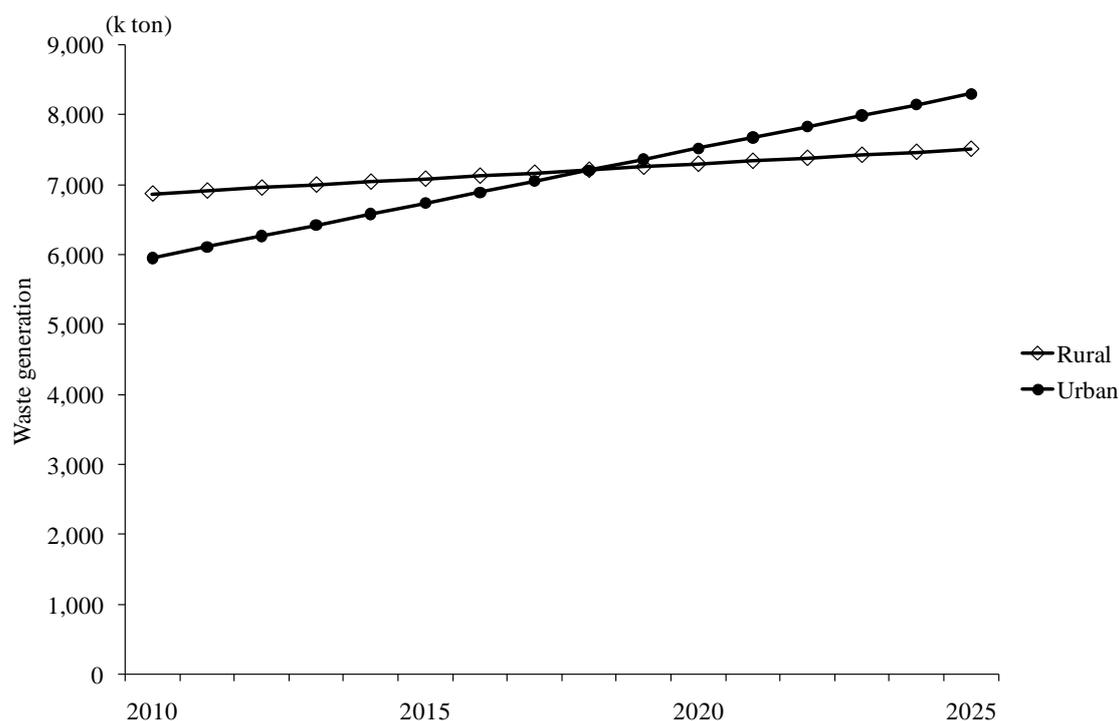


図3-14 ベトナム国における都市廃棄物及び農村廃棄物の排出量推移

ベトナム国の都市廃棄物の排出量推移に国家戦略で目標とされている収集率を乗じた収集（計画）量を表3-17に示す。シナリオIからIIIではこの収集目標率に従うこととした。ただし、ベースラインシナリオでは再資源化（コンポスト処理）4%、嫌気性埋立96%を2010年から2025年まで維持することとした。2010年の収集率は不明なため、2015年及び2020年の収集目標率を外挿し、2010年から2014年までの収集目標率を想定した。また、2016年から2024年までの毎年の収集目標率は2015年、2020年、2025年の収集目標率から内挿した。2011年から2024年までの毎年の再資源化目標率はURENCOを対象とした調査で明らかとなった2010年の再資源化率4%、及び2015年、2020年、2025年の再資源化目標率から内挿した。

図3-15にベースラインシナリオ及び3つの代替シナリオによる温室効果ガス排出量推移を示す。なお、搬入される都市廃棄物の物理組成は表3-13に示したハノイ市のデータを用い、2010年から2025年まで一定とした。2010年から2025年の間を積算すると、最も温室効果ガス排出量が少なかったのがシナリオI（コンポスト処理型）で、ベースラインシナリオの51.3%であり、中間処理の導入による有機性廃棄物の埋立回避の効果が高いことを確認した。続いて温室効果ガス排出量が少なかったのがシナリオII（CH₄回収嫌気性埋立型）で、ベースラインシナリオの77.1%であった。また、シナリオIIでは売電により、2010年から2025年までに16,023 k tonの温室効果ガス排出量削減となった。シナリオIII（準好気性埋立型）はベースラインシナリオの79.4%であり、準好気性埋立がCDM事業として一般的なCH₄回収嫌気性埋立と温室効果ガス削減において競合可能な技術であることを示している。

表3-17 ベトナム国における都市廃棄物の収集量、再資源化率、処分率

Year	Total (k ton)	Collection rate (%)	Collection amount (k ton)	Recycling rate (%)	Landfilling rate (%)
2010	5,954.0	80.0	4,763.2	4.0	96.0
2011	6,110.5	81.0	4,949.5	15.2	84.8
2012	6,267.1	82.0	5,139.0	26.4	73.6
2013	6,423.6	83.0	5,331.6	37.6	62.4
2014	6,580.2	84.0	5,527.4	48.8	51.2
2015	6,736.8	85.0	5,726.2	60.0	40.0
2016	6,893.3	86.0	5,928.3	65.0	35.0
2017	7,049.9	87.0	6,133.4	70.0	30.0
2018	7,206.4	88.0	6,341.7	75.0	25.0
2019	7,363.0	89.0	6,553.1	80.0	20.0
2020	7,519.6	90.0	6,767.6	85.0	15.0
2021	7,676.1	92.0	7,062.0	86.0	14.0
2022	7,832.7	94.0	7,362.7	87.0	13.0
2023	7,989.2	96.0	7,669.7	88.0	12.0
2024	8,145.8	98.0	7,982.9	89.0	11.0
2025	8,302.4	100.0	8,302.4	90.0	10.0

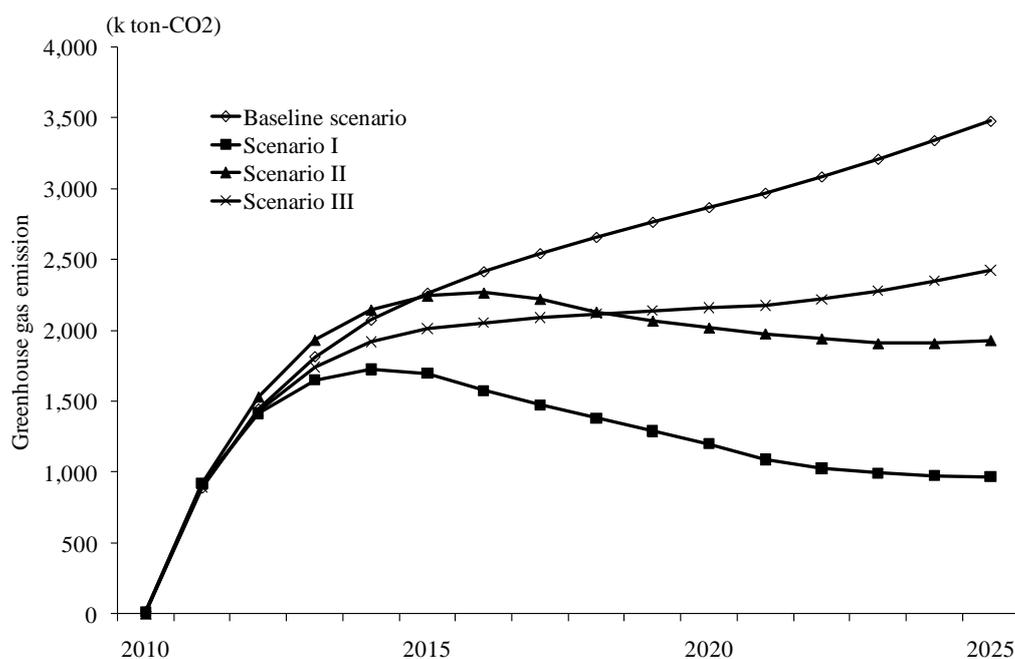


図3-15 シナリオごとの温室効果ガス排出量推移

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究で得られた k 、 MCF および OX の現場計測法ならびに、東南アジアおよび日本の埋立地での実測例は新規性および有用性が高いものである。IPCCモデルにおける OX の問題点と改善点を

実証データと共に指摘した。廃棄物ストリームダイアグラムは廃棄物処理の構造や成因を解析する新たなプラットフォームである。ベトナムにおける都市廃棄物と製造業廃棄物について、実データを取得・解析し、シナリオ分析するという、廃棄物ストリームの炭素フロー制御による温室効果ガス削減効果を定量的に示す全体的な手法を提示することができた。

(2) 地球環境政策への貢献

k、MCFおよびOXの現場計測法ならびにその評価法は、CDM事業等において準好気埋立技術の導入効果を検証する具体的なモニタリング手法を提示するものであり、CH₄ガス回収、有機物埋立回避に続く新たな埋立地CDMの方法論を与え、我が国によるCERの取得に貢献するものである。すでに平成20年度コベネフィットCDMモデル事業の補助対象事業に対して、これらの手法の導入を提案した。また、途上国の廃棄物ストリームの改善を、温室効果ガス削減ならびに環境負荷という多項目で評価する手法は、我が国が提唱する途上国におけるCo-Benefitな温暖化対策の具体的な評価手法を与えるものである。今後、アジアにおける廃棄物管理の改善と温室効果ガス削減に関するワークショップや、IPCC/Emission Factor Database Editorial Board、温室効果ガス排出量算定方法検討会、また具体的なCDM MethodologyやPDD作成への参加を通じて、本研究結果の普及に努める。

6. 引用文献

- 1) Baek, W. (2009). Change of MSW Composition attributed by Ban on Direct Landfill of Foodwaste in Korea, WGIA7, Seoul, 2008.7
- 2) Berlin (2008) Abfallbilanz des Landes Berlin 2007, Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, <http://www.berlin.de/sen/umwelt/>
- 3) Christophersen, M., Kjeldsen, P., Holst, H. and Chanton, J. (2001) Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing emissions and methane oxidation, *Waste Management & Research*, 19, 595 – 612
- 4) 中国電力 (2007) インドネシア・スマラン埋立処分場メタンガス利用調査報告書、平成18年度CDM/JI事業調査
- 5) Cossu, R., Piovesan, E. (2007) Modern role of landfill as geological sink for carbon and other elements, *Proceedings of Sardinia 2007 (CD)*
- 6) Derwent, R.G., Jenkin, M.E., Saunders, S.M. (1996) Photochemical ozone creation potentials for a large number of reactive hydrocarbons under European condition. *Atmospheric Environment*, 30(2), 181-199
- 7) Derwent, R.G., Jenkin, M.E., Saunders, S.M., Pilling, M.J. (1998) Photochemical ozone creation potentials for organic compounds in Northwest Europe calculated with a master chemical mechanism. *Atmospheric Environment*, 32(14-15):2429-2441.
- 8) EC (2003) Waste generated and treated in Europa, KS-55-03-471-EN-N
- 9) エックス都市研究所 (2003) マレーシアパームオイル工場のメタン排出削減対策技術と固形廃棄物利用に関する調査、平成14年度CDM/JI事業調査

- 10) GSO, Average urban population by province Hanoi (1995-2004) <http://www.gso.gov.vn>
- 11) Guinée, J.B. (1995) Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products: with a case study of margarines. Thesis, Leiden University
- 12) 花嶋正孝 (2000) 埋立処理の歴史, 都市清掃, 236, 387-393
- 13) Heijungs, R., Guinée, J.B., Huppes, G., Lankreijer, R.M., Udo de Haes, H.A., Wegener Sleeswijk, A., Ansems, A.M.M., Eggels, P.G., van Duin, R., de Goede, H.P. (1992) Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide and Backgrounds. CML, Leiden University.
- 14) Huijbregts, M.A.J. (2000) Priority Assessment of Toxic Substances in the frame of LCA. Time horizon dependency of toxicity potentials calculated with the multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA. Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics, University of Amsterdam
- 15) Huijbregts, M.A.J., Thissen, U., Guinée, J.B., Jager, T., Van de Meent, D., Ragas, A.M.J., Wegener Sleeswijk, A., Reijnders, L. (2000) Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment, I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA. Chemosphere, 41(4), 541-573
- 16) IMF (2009) World Economic Outlook Database, <http://www.imf.org/>
- 17) IPCC (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan
- 18) Ishigaki, T., Yamada, M., Nagamori, M., Ono, Y., Inoue, Y. (2005) Estimation of methane emission from whole landfill site using correlation between flux and ground temperature, Environ. Geol., 48, 845-853
- 19) Ishigaki, T., Chung, C.V., Sang, N., Ide, M., Otsuka, K., Yamada, M., Inoue, Y. (2007) Estimation and Field Investigation on Methane Emission from Waste Landfills in Hanoi, Vietnam, Journal of Material Cycles and Waste Management, 10 (2), 165-172
- 20) ISPRA (2008) Rapporto rifiuti, <http://www.isprambiente.it/>
- 21) JBIC (2007) Final report of “Special Assistance for Project Formation (SAPROF) for Jakarta Solid Waste Management Project”
- 22) Jenkin, M.E., Hayman, G.D. (1999) Photochemical ozone creation potentials for oxygenated volatile organic compounds: sensitivity to variations in kinetic and mechanistic parameters. Atmospheric Environment, 33(8):1275-1293.
- 23) JHFC総合効率検討特別委員会、財団法人日本自動車研究所 (2006) 「JHFC総合効率検討結果」報告書
- 24) 環境省 (2009) 産業廃棄物の排出及び処理状況等 (平成19年度実績)
- 25) Kokusai Kogyo (2005) The Study on solid waste management in the municipality of Phnom Penh in the Kingdom of Cambodia; Final report, Main report, JICA, Tokyo, Japan
- 26) 久保倉宏一 (2003) マレーシアにおける廃棄物埋立場の現状～ J I C A 開発調査に携わって～、福岡市保健環境研究所報、28号、pp169-176
- 27) Lyon (2008) Rapport annuel sur le prix et la qualité du service public d'élimination des déchets 2007, <http://www.grandlyon.com/>

- 28) Mairie De Paris (2008) Rapport annuel sur la qualité et le prix du service public d'élimination des déchets à Paris en 2007, <http://www.paris.fr/portail/Environnement/>
- 29) 松藤康司, 立藤綾子 (2007) 廃棄物処理と地球温暖化対策 準好気性埋立構造による埋立地からのメタン排出量の削減, 都市清掃, 278, 351-356
- 30) Ministry of Environment, Korea (2008). 2008 Environment Statistics Yearbook, 11-1480000-000081-10
- 31) MoNRE, Worldbank, Cida. (2004) Vietnam Environment Monitor 2004_Solid Waste, Vietnam.
- 32) MoNRE (2005) State of Environment Report of Vietnam
- 33) OECD (2008) OECD Environmental Data Compendium, <http://www.oecd.org/>
- 34) 温室効果ガスインベントリオフィス (GIO)編 (2009) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書
- 35) Shimura, S., Yokota, I., Nitta, Y. (2001) Research for MSW flow analysis in developing nations, J Mater Cycles Waste Manag, 3, 48-59
- 36) Statistics Office of Vietnam, Average urban population by province, <http://www.gso.gov.vn/>
- 37) Tuyen, T.M., Michaelowa, A. (2004) CDM baseline construction for Vietnam national electricity grid, HWWA discussion paper
- 38) White, P.R., Franke, M., Hindle, P. (1995) Integrated solid waste management: a life cycle inventory. Balckie Academic & Professional
- 39) White, P.R., Franke, M., Hindle, P. (2001) Integrated solid waste management: a life cycle inventory 2nd edition. Blackwell Publishing
- 40) WMO (1992) Scientific assessment of ozone depletion: 1991. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report no. 25. Geneva
- 41) WMO (1999) Scientific assessment of ozone depletion: 1998. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report no. 44. Geneva
- 42) Worldbank (1999) What a waste: solid waste management in Asia
- 43) World Bank, Ministry of Natural Resources and Environment, Waste-Econ Project (2004) Vietnam Environment Monitor 2004, World Bank, Hanoi, Vietnam
- 44) World Bank (2008) Population 2008, Data catalog, <http://siteresources.worldbank.org/>
- 45) 八木一行, 鶴田治雄, 陽捷行 (1991) CH₄・N₂Oフラックス測定マニュアル, 資源・生態管理研究, 7, 143-158
- 46) 山田正人, 石垣智基, 井上雄三, 長森正尚, 小野雄策, 高田光康 (2003) レーザーメタン検出器を用いた処分場地表面からのメタン放出地点のスクリーニング, 第14回廃棄物学会研究発表会
- 47) 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 (2006) 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講演論文集II, 1057-1058
- 48) 山田正人, 遠藤和人, 朝倉宏, 阿部誠, 長森正尚, 渡辺洋一, 小野雄策, 小野芳朗 (2008) 無機系廃棄物の混合理立からの初期におけるガスの発生挙動について, 第29回全国都市清掃研

究・事例発表会講演論文集, 239-241

- 49) 山田正人, 遠藤和人, Komsilp Wang-Yao, 朝倉宏, 石垣智基 (2008) 埋立地メタン放出量を推計するIPCC一次分解モデルパラメータの現場計測法, 第19回廃棄物学会研究発表会講演論文集II, 693-695
- 50) 山田正人, 遠藤和人, 石垣智基, 大塚康治(2009) アジア諸国における都市ごみの流れ, 第30回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, 13-15

7. 国際共同研究等の状況

準好気性埋立工法の熱帯地域での効果を実証するために、ラムチャバン市の最終処分場の実証テストセルを設置してモニタリングを実施している。また同じ目的で、Kasetsart Universityにおいてライシメータ実験を行うことを共同研究で進めている。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- 1) Ishigaki, T., Chung, C.V., Sang, N.N., Ike, M., Otsuka, K., Yamada, M., Inoue, Y. (2008) Estimation and Field Measurement of Methane emission from waste landfill in Hanoi, Vietnam, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 10, 2, 165-172
- 2) 長森正尚, 小野雄策, 河村清史, 山田正人, 石垣智基, 小野芳朗 (2008) 最終処分場における埋立地ガス組成の経年変化－多量成分と脂肪族炭化水素, *廃棄物学会論文誌*, 19, 4, 244-254

<査読付論文に準ずる成果発表>

なし

<その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) 山田正人 (2008) 廃棄物処理分野からの温室効果ガス排出量の推計方法－2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventoriesより－, *都市清掃*, 61, 332-338
- 2) 河井紘輔, 山田正人 (2009) 廃棄物分野におけるCDM事業活動－現状と課題－. *廃棄物資源循環学会誌*, 20 (4), 165-170
- 3) 高畑恒志, 山田正人, 寺園淳 (2009) アジア地域における廃棄物処理と日本の国際協力の在り方について. *生活と環境*, 54 (7), 9-14

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 古田祐介, 占部武生, 石垣智基, 中村義世, 山田正人, 小野芳朗 (2007) 廃棄物関連施設からの温室効果ガス排出量算定手法の改善. 第18回廃棄物学会研究発表会講演論文集II, 849-851
- 2) 石垣智基, 佐野準治, 白井啓一, 山田正人 (2007) 東南アジア諸国の埋立地覆土層におけるメタ

- ン排出量削減に関する研究. 第18回廃棄物学会研究発表会講演論文集II, 855-857
- 3) 山田正人, 遠藤和人, Komsilp Wang-Yao, 朝倉宏, 石垣智基 (2008) 埋立地メタン放出量を推計するIPCC一次分解モデルパラメータの現場計測法. 第19回廃棄物学会研究発表会講演論文集II, 693-695
 - 4) Wangyao, K., Towprayoon, S., Chiemchaisai, C., Yamada, M., Endo, K., Ishigaki, T., Gheewala, S.H., Nopharatana, A. (2008) Seasonal variation of methane emissions in solid waste disposal sites: Case study in tropical climate region. 第19回廃棄物学会研究発表会講演論文集III, 97-99
 - 5) Yamada, M., Ishigaki, T., Wang-Yao, K., Endo, K. (2008) Issues on application of the IPCC guideline to CDM projects in Asia. 5th Intercontinental Landfill Res.Symp., Abstracts
 - 6) Yamada, M., Ishigaki, T., Kawai, K., Osako, M. (2008) Design of waste data sheet for Asia. 5th Int.Symp.SWAPI, Abstracts, 243
 - 7) Wang-yao, K., Yamada, M., Suanburi, K., Endo, K., Ishigaki, T., Isobe, Y. (2008) Effect of leachate distribution on methane emission in tropical landfill. 5th Asian-Pac.Landfill Symp.(APLAS Sapporo 2008), Proceedings
 - 8) Wang-yao, K., Towprayoon, S., Chiemchaisri, C., Yamada, M., Endo, K., Ishigaki, T., Gheewala, S.H., Nopharatana, A. (2008) Seasonal variation of methane emissions in solid waste disposal sites: case study in tropical climate region. 19th Annu.Conf.Jpn.Soc.Waste Manage.Experts, Proceedings, 97-99
 - 9) Wang-yao, K., Towprayoon, S., Chiemchaisri, C., Gheewala, S.H., Nopharatana, A., Yamada, M., Endo K., Ishigaki, T. (2008) Assessment of methane emissions from solid waste disposal sites in Thailand. 5th Intercontinental Landfill Res.Symp., Abstracts
 - 10) 古田祐介, 石垣智基, 占部武生, 山田正人, 成岡朋弘, Komsilp Wang-Yao, 宮城俊彦, 田中和宏, 小野雄策 (2008) 埋立地からのメタンおよび亜酸化窒素排出量の評価手法に関する研究. 第19回廃棄物学会研究発表会講演論文集II, 699-701
 - 11) Yamada, M., Wang-yao, K., Endo, K., Naruoka, T., Ishigaki, T. (2009) Investigation of methane oxidation in tropical landfills. 第20回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集II, 609-610
 - 12) Yamada, M., Kawai, K., Ishigaki, T., Osako, M. (2009) Waste stream diagram and transition of waste management in the world. 12th Int.Waste Manage.Landfill Symp.(Sardinia 2009), Proceedings
 - 13) 山田正人, 遠藤和人, Komsilp Wang-Yao, 朝倉宏, 石垣智基 (2009) 埋立地現場におけるIPCC一次分解モデルにおける好気性分解補正係数(MCF)の評価. 第20回廃棄物資源循環学会研究発表講演論文集II, 447-448
 - 14) 山田正人, 遠藤和人, 石垣智基, 大塚康治 (2009) アジア諸国における都市ごみの流れ. 第30回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, 13-15
 - 15) Kawai, K., Osako, M., Yamada, M. (2009) Proposal for the evaluation indicators of municipal solid waste management in Southeast Asia. 12th Int.Waste Manage.Landfill Symp.(Sardinia 2009), Proceedings, 311-312
 - 16) Ishigaki, T., Furuta, K., Wang-yao, K., Endo, K., Yamada, M. (2009) Estimation of emission factors of greenhouse gas emission from waste landfills in Japan. 12th Int.Waste Manage.Landfill Symp.(Sardinia 2009), Proceedings
 - 17) 橋詰実佳, 石垣智基, Lee Suk-Hui, 山田正人 (2009) 途上国における廃棄物管理改善にかかる

環境評価システムの構築に関する研究. 第20回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集I, 99-100

- 18) 古田祐介, 石垣智基, 占部武生, 山田正人, 成岡朋弘, Komsilp Wang-Yao, 小野雄策 (2009) 埋立地における温室効果ガスの排出挙動: 亜酸化窒素・メタンの排出係数の高度化. 第30回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, 240-242
- 19) 山田正人, 河井紘輔, 高畑恒志, 大迫政浩, 石垣智基 (2010) 世界における都市ごみ処理の変遷. 第31回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, 4-6

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) The Symposium on “Improvement of Solid Waste Management and Reduction of GHG Emissions in Asia (SWGA)” (2010年2月22日、Pullman Hotel and Resorts Bangkok King Power, Bangkok、観客50名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし