

課題名 A-1001 埋立地ガス放出緩和技術のコペネフィットの比較検証に関する研究

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)

研究実施期間 平成22～24年度

累計予算額 43,758千円(うち24年度13,338千円)  
 予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード(5～10個) 温室効果ガス排出量算定モデル、埋立地ガス、亜酸化窒素、好気性生物分解、準好気性埋立、浸出水制御機能、FOD Waste model、熱帯地域、テストセル、数値解析(以下程度)

研究体制

- (1)埋立地ガス放出緩和技術の温室効果ガス排出抑制機能の比較評価に関する研究(独立行政法人国立環境研究所)
- (2)埋立地ガス放出緩和技術の浸出水制御機能の比較評価に関する研究(福岡大学)
- (3)準好気性埋立技術の東アジア地域への適応化に関する研究(独立行政法人国立環境研究所)

研究協力機関

龍谷大学、キングモンクット工科大学、カセサート大学

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

廃棄物処理は本来公衆衛生向上と環境保全という2つの目的を有しており、途上国の廃棄物分野における温室効果ガス排出量削減事業は、本来の目的も同時に改善させなければならない。持続可能な開発と地球温暖化対策の両立はコペネフィット・アプローチとして、我が国の国際環境政策の柱として位置づけられている。廃棄物の埋立地はメタンの排出源である。欧米発の緩和策である埋立地メタン回収利用技術は、途上国でのCDM事業において、初期コストが大きい、回収効率が低い、メタン発生や浸出水汚濁が長期化する等の問題が顕在化している。一方、我が国固有の緩和策である準好気性埋立技術は、安価であり、メタン発生と浸出水汚濁を同時に防止し、無動力で長期的に機能する点で、途上国への適用性が高い技術である。これら競合する緩和技術のコペネフィット(温室効果ガス放出防止と水質汚濁防止)の評価手法を確立し、相互に比較検証し、準好気性埋立技術の優位性を証明することは、我が国が排出削減の約束を果たし、アジアにおける環境政策を主導するために必須かつ危急の課題である。

埋立地で環境保全上、最も重要なことは浸出水に起因する環境汚染の防止である。降水量が比較的小さい欧米では、埋立地表面に遮水を施して浸出水量を削減し、発生するメタンを回収・利用するDry Tomb(乾いた墓場)型埋立の技術が開発された。これは発生ガスをエネルギーに転換できるため、ほとんどの埋立地CDM事業の方法論となっている。しかし、当該事業における認証排出削減の取得率は30%に満たない。また、浸出水がひどく汚濁し、ガス発生が長期化して埋立地の管理を30年以上続けなければならない。後年雨水が浸入すると、浸出水の汚濁やガスの発生が再開する、などの問題が顕在化している。このような技術を降水量が大きい途上

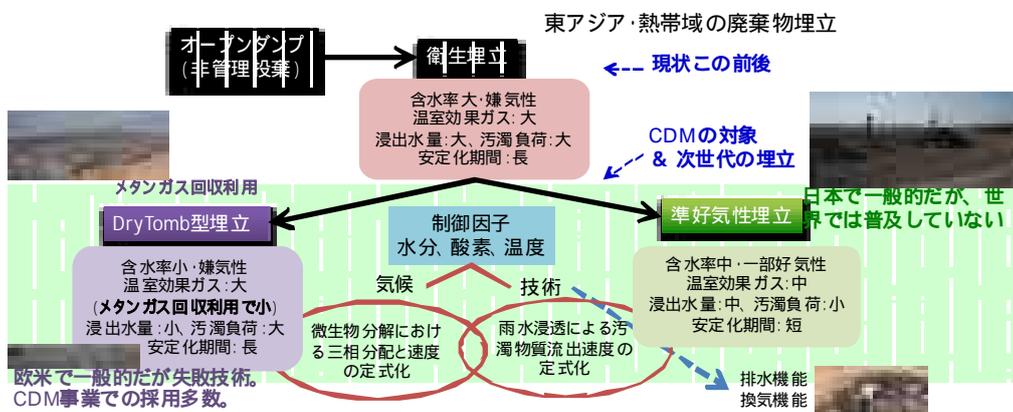


図1 アジア地域における埋立地管理技術の変遷と適用可能

国に適用することはきわめてリスクが大きい。降水量が比較的大きい我が国では、浸出水集排水(水平)管とガス抜き(鉛直)管を連結して埋立地内に設置し、浸入する雨水で汚濁を洗い流すとともに、埋立地内外の温度差を利用して無動力で大気を送り込み、有機物の好気性分解を促す準好気性埋立技術が1970年代に開発され、標準仕様となっている。好気性分解の促進は、浸出水の汚濁を低減し、メタンガスの発生を抑え、これらが発生する期間を短縮する、まさにコベネフィットな技術であるといえる。しかし、この技術の開発後に我が国では都市ごみの焼却が進んだため、途上国のような生ごみ主体の埋立地における性能評価や、地域の気候に合わせた技術仕様に関する学術研究が進まなかった。結果として、技術の存在が海外でほとんど認知されず、IPCC第4次報告書で緩和技術として採用されず、近隣のアジア諸国のCDM事業においても失敗技術であるDry Tomb型埋立技術が席卷している。

## 2. 研究開発目的

各種埋立技術のコベネフィット性能を評価するため、技術情報を集積する。比較対象とする埋立地ガス放出緩和技術としては、Dry Tomb型埋立技術(メタンガス回収利用)、準好気性埋立技術に加え、デフォルトとして衛生埋立技術、また最近の技術として浸出水を埋立地に返送するパイオリアクタ型埋立技術、動力を用いて大気を導入する好気性埋立技術を取り上げる。これらの技術において、埋立地内外における温室効果ガス(メタン、亜酸化窒素)と浸出水の汚濁負荷(有機炭素、窒素)の生成と消費を制御する因子は、微生物による有機物分解を律する温度、酸素と水分である。これらパラメータとした長期的な炭素と窒素の三相における分配と移動を、現場観測とともに、テストセル、ライシメータ、カラム等の様々なスケールでの実験で把握し、冷帯・温帯に位置する先進国とは条件が著しく異なり、途上国が集中する東アジアの熱帯域における気候条件下において、IPCC Waste Modelの改善と拡張を意識して定式化する。

## 3. 研究開発の方法

### (1)埋立地ガス放出緩和技術の温室効果ガス排出抑制機能の比較評価に関する研究

廃棄物埋立地からの温室効果ガス排出に関する現行の算定モデルは、廃棄物の嫌氣的分解速度が一次反応式に従って減衰することを根拠とした上で、分解性有機物のガス転換率や構造や管理方法に依存する補正係数などが与えられている。ここでは、現行モデルをできるだけ活かしながら、準好気性埋立における排出モデルを策定することを指向して、モデルの詳細を検討した。得られたモデルで用いるパラメータについて、実験室での小規模培養実験を元に数値を得るとともに、モデルに投入しその妥当性について検証した。

また、廃棄物埋立地排水管の水没状態を評価することを目的として、埋立層最深部に設置した水圧モニタリングを実施し、準好氣的な機能を担保する排水管の開放に関する管理実態を評価した。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、閉鎖型チャンバー法による地表面ガスフラックス調査を行った。

### (2)埋立地ガス放出緩和技術の浸出水制御機能の比較評価に関する研究

好気性、準好気性及び嫌氣的の構造を有する大型ライシメータ実験(以下H06号)3基の浸出水水質及びガス質データを既存の大型ライシメータ実験(以下新6号)の結果と比較することによって、充填廃棄物の分解に伴う廃棄物中有機物の分解量と、その液相(浸出水への溶出量)および気相(ガス化量)への分配量の定式化について検討した。また、液相への分配量の定式化に関して検討を行った。

### (3)準好気性埋立技術の東アジア地域への適応化に関する研究

タイ王国ラムチャパン市の廃棄物埋立地内に建設された容量7000 m<sup>3</sup>(45x42x4m)の埋立実験施設(テストセル)二基について、準好氣的管理および一般的なタイの埋立地としての管理(ここでは便宜上それぞれ準好気(SM)セルおよび対照(CT)セルと呼ぶ)を行い、その水質およびガス化挙動を元に熱帯地域での廃棄物分解挙動と準好気性管理の効果を評価するための観測を行った。また、現場調査で得られたパラメータおよび観測データを元に、準好気性埋立工法における埋立層への酸素浸透挙動について数値計算による解析を行った。

## 4. 結果及び考察 4.のうち、結果についてはサブテーマごとに記載すること。

### (1)埋立地ガス放出緩和技術の温室効果ガス排出抑制機能の比較評価に関する研究

昨年度までの成果から、埋立地内におけるT年度に生分解性有機物iの嫌氣的および好氣的な分解が同時に起こる条件下での廃棄物分解モデルについて下式のように得られた。

$$A_{i,T} = W_{i,T} \cdot \left[ (1 - e^{-k_i \cdot f_{O_2}}) + (1 - e^{-k_i^* \cdot f_{AN} \cdot \eta}) \right] \quad f_{O_2} = \left( 1 - \frac{S_{O_2}}{K_I + S_{O_2}} \right) \quad f_{AN} = \left( \frac{S_{O_2}}{K_I^* + S_{O_2}} \right)$$

ただし、 $k_i$ : 嫌氣性分解速度定数、 $K_I$ : 酸素による嫌氣分解阻害定数、 $S_{O_2}$ : 埋立層内酸素濃度、 $k_i^*$ :

好気性分解定数,  $K_1$ :酸素不足による好気分解阻害定数、 $\eta$ :乾燥による阻害定数である。室内実験等で与えられたパラメータを元に、アジア多雨地域における各種埋立工法・管理手法からの20年間のメタン排出挙動を比較した結果を図2に示す。本図ではメタン排出量を累積二酸化炭素当量(CO<sub>2</sub>eq)既存の嫌気的な埋立地管理(AN)に対して、欧米の乾燥墓場式管理(DT)のメタン排出量はきわめて多くなった。これは、有機成分の溶出による浸出水としての系外放出がないため、炭素の損失が少なく結果的にガス化される炭素量が増加することに起因する。また、アジア多雨地域においては欧米と異なり、浸透水排除が充分でなく、降雨強度に応じて一定量の水浸透を想定していることも一因として挙げられる。DT方式に埋立地ガス発電を10年間(30ヶ月目から150ヶ月目)実施する方式(LFGTE)においては、回収分だけ大気放出等は削減されたが、プロジェクト期間後の排出によりANよりも排出量が上回ることが示された。ただしこの評価には回収された埋立地ガスのエネルギー利用による、化石燃料由来の二酸化炭素放出の代替・緩和効果などは含まれていない。今回の結果にはより総合的な視点からの考察を付け加える必要があるが、実際の埋立地管理が20年で終了することは考えられず、長期的な影響を考慮すると、気候変動に与える影響はさらに大きいものと推測される。準好気的管理(SM)のメタン排出量はANに比べて20年間の累計で75%程度削減できることが示された。

廃棄物埋立地において亜酸化窒素排出が検出される地点数はきわめて少なく、調査地点全体の7%程度であり、メタン排出の検出地点と比べて6分の1程度であった。アジア地域の熱帯地域の埋立地に限ると、亜酸化窒素フラックスはメタンフラックスの1%程度であり、単純に検出地点率と合わせて評価すると亜酸化窒素排出量はメタン排出量の5%程度と見積もられた。埋立地の構造別で評価すると準好気性埋立地に比較して、嫌気的な管理の埋立地(海面埋立、国内の基準省令以前の旧型埋立地、アジア埋立地)の方が亜酸化窒素フラックスが高い傾向が示された。

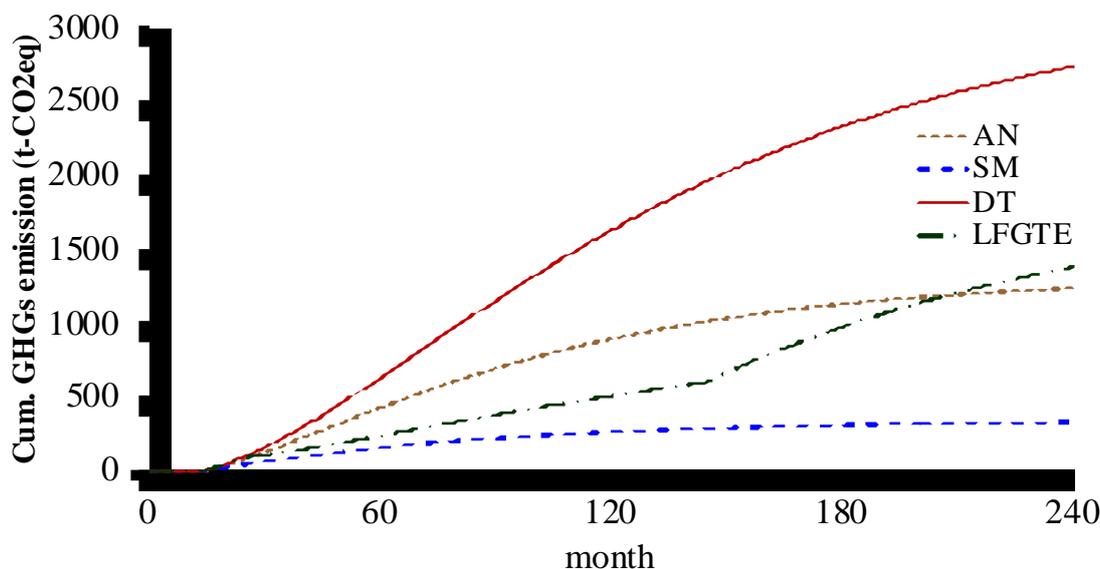


図2 埋立地メタン排出モデルを用いた  
各埋立工法からのメタン排出挙動の比較(二酸化炭素当量換算)

## (2) 埋立地ガス放出緩和技術の浸出水制御機能の比較評価に関する研究

準好気性埋立構造におけるガス化プロセスにおいては、嫌気性と分解プロセスが異なるためpH上昇に係る要因も異なる。最大要因として、酸素の侵入による酸分解による影響が考えられ、次に有機系廃棄物からの酸生成速度の減衰や、降水による浸出水の希釈等、が挙げられる。すなわち、準好気性では埋立地内部の好気的な割合が重要となる。ここで、本実験における準好気性槽のガス化プロセス移行時期における溶出炭素率(厨芥ベース)を見ると、H06号が58%に対し新6号では27%で頭打ちとなり両槽において異なる値を示した。これは、両槽における集排水管の径の違いが内部への流入空気量に影響を与えた事が要因であると考えられる。そこで、両準好気性槽のガス化プロセスが開始し発生ガスの組成が安定化した時期におけるメタン炭酸比(CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>)の比較を行った(表2)。吉田\*の報告ではこの値が1より大きくなればなるほど埋立地内部での好気性反応が活発である事を示している。その結果、新6号においてより好気性反応が活発である事が解った。以上の検討から、分配量の定式化を検討する際に最大溶出率及び、埋立構造の違いによる埋立地内部のメタン炭酸比を考慮する必要があると考えた。

表2 準好気性槽におけるメタン炭酸比の比較

	検討実験期間	CO <sub>2</sub> (% -Ave)	CH <sub>4</sub> (% -Ave)	メタン炭酸比
				CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>
H06号準好気	1200日～1500日	55	35	1.6
新6号準好気	300日～600日	25	10	2.5

前述した要因を考慮し、大型埋立実験槽からの累積炭素溶出量の定式化を検討した(図3)。まず、液相への炭素分配量は固相からの溶出係数によって決まり、その値は実験値の近似値から算出した。また、散水量の違いが与える影響についても単位体積当たりの累積浸出量として考慮した。さらに、可溶化期間の決定には嫌気性埋立構造での最大溶出率(厨芥ベース)になるまでの期間を実験値から算出した。準好気性埋立構造においては、埋立構造の違いが与える埋立地内の好気係数をメタン炭酸比で代用し嫌気の最大溶出量に用いた。以下に本モデルで用いたパラメータの詳細を表3に示す。これらのパラメータを両実験槽で変化させ予測した液相への分配予測挙動と実測値との比較を図4に示し、さらに算出した最大溶出量の予測値と、実測値との比較を表4に示す。その結果、液相への分配挙動において両実験槽においてほぼ類似する結果を得られた。また、可溶期間についても実測値と予測値において概ね類似する結果となった。以上の事から、本実験槽を用いた固相から液相への配分挙動は降水量とガス化プロセスへの移行時期を考慮する事で定式化する事が出来た。

- 全有機炭素分解量の算出式

$$D_{ALL-C} = D_{L-C} + D_{G-C} \quad (\ast D_{ALL-C} \text{はFOMモデルで算出するFOM値})$$

- 気相への分配量の算出式

$$D_{G-C} = D_{ALL-C} - D_{L-C}$$

- 液相への分配量の算出式

$$D_{L-C} = S_{dis} \times \rho \times \ln(QI) \quad QI = \frac{P \times A \times C}{Q_{LA}} \times T_L$$

$D_{ALL-C}$  (kg) : 全有機炭素分解量,  $D_{L-C}$  (kg) : 液相炭素分配量,  $D_{G-C}$  (kg) : 気相炭素分配量,  
 $S_{dis}$  : 固相からの溶出係数,  $\rho$  (%) : 有効間隙率,  $QI$  (L/m<sup>3</sup>) : 単位体積当たり累積浸出水量,  
 $P$  (mm/年) : 年間降水量,  $A$  (m<sup>2</sup>) : 埋立地面積,  $C$  (-) : 浸出水率,  $Q_{LA}$  : 埋立地容積 (m<sup>3</sup>),  
 $T_L$  (年) : 可溶化期間

- 可溶化期間の算出式

$$T_L : DL_{Cmax} = W_{kw} \times \frac{k_{An}}{K_{Ac}}$$

$T_L$  (DL<sub>Cmax</sub>に達するまでの期間 (年)),  $DL_{Cmax}$  (kg) : 可溶化期間で溶出される最大溶出量,  
 $W_{kw}$  (kg) : 埋立廃棄物中に含まれる厨芥中の炭素量,  
 $k_{An}$  (-) : 嫌気性埋立構造での最大可能性炭素溶出率,  $K_{Ac}$  (-) : 埋立構造別の好気係数(メタン炭酸比)

$K_{Ac}$  (-) : 埋立構造別の好気係数(メタン炭酸比)  
 ・ 嫌気性埋立: CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>: 0.505~1.0  
 ・ 準好気性埋立: CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>: 0.2~0.6(0.1~0.5年 (1.0<))

図3 埋立構造別の実測値及びモデル計算値の比較

表3 本モデルで用いたパラメータの詳細

パラメーター	H06号	新6号	補足
S <sub>dis</sub> :固相からの溶出係数		30.81	実測値からの近似値
? (%):有効間隙率		0.2	サブテーマ3の計算値
QI (L/m <sup>3</sup> ):単位体積当たり累積浸出水量	-	-	実測値から計算
P (mm/年):年間降水量	1600	1200	実験条件
A (m <sup>2</sup> ):埋立地面積	0.28	0.19	実験条件
C (-):浸出水率		0.85	実測値から計算
Q <sub>LA</sub> (m <sup>3</sup> ):埋立地容積	1.13	0.83	実験条件
T <sub>L</sub> (年):可溶化期間	An:5, Se:2.2	An:3, Se:0.9	実測値
DL <sub>Cmax</sub> (kg):可溶化期間で溶出される最大溶出量	An:24.4, Se:18.4	An:21.4, Se:4.4	計算値
W <sub>kw</sub> (kg):埋立廃棄物中に含まれる厨芥中の炭素量	31.4	25.9	実験条件
k <sub>An</sub> (-):嫌気性埋立構造での最大可能性炭素溶出率		0.8	実測値から計算
K <sub>Ac</sub> (-):埋立構造別の好気係数(メタン炭酸比)	1.6	2.5	実測値から計算

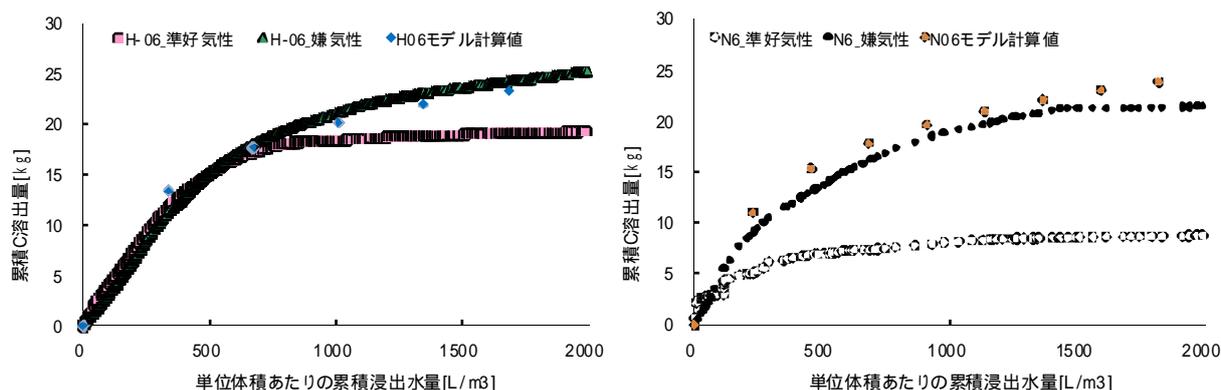


図4 モデルを用いて算出した予測結果と実測値との比較（左H06号、右新6号）

表4 最大溶出量の予測値と、実測値との比較

実験名	埋立構造	予測量(kg)	実測量(kg)
H06号	嫌気性槽	25.1	24.4
	準好気性槽	15.7	18.4
新6号	嫌気性槽	20.7	21.4
	準好気性槽	8.3	4.4

### (3) 準好気性埋立技術の東アジア地域への適応化に関する研究

タイの埋立地に設置したテストセルにおけるメタンガス排出量を比較した結果、両セルから排出されるメタンガス量は観測初期に比べて大きく減少していることが示された。両セルから排出されるメタン排出総量については降雨に伴う季節変動があるが、ほぼ同程度であり、季節的にも同様のパターンを示していることが示唆された。当該地域の降水量情報を元にすると、埋立セルでは浸透量が増加する時期にメタン発生量も増加して大きなピークを示すが、昨年以降は降水量の増加する雨期であってもメタン発生量の増加は確認されなかった。また、排出ガス中の二酸化炭素メタン比についても両セルの差が少なくなってきており、廃棄物の分解・ガス化としては収束に向かっている安定化フェーズであることが推測された。

テストセルから排出される浸出水質については、両セルのBOD濃度は10,000-20,000mg/l前後で推移し、有意な差はみられなかった。しかし内部保有水のBODについては、準好気セルは対照セルより比べて1/3から1/5程度と低いことが示された。対照セルでは内部に湛水している保有水がそのまま排水されるが、準好気セルでは可溶化した有機成分のガス化が活発であることならびに浸透から排水までの転換が早いことから、水質形成がより複雑であるといえる。特に、準好気セルの有機性炭素濃度が対照セルの倍程度高いことは、浸出水中に含有される有機性の水質構成成分に特徴があることを示していると考えられる。

累積の温室効果ガス排出量を比較した結果を図5に示す。対照セルからの温室効果ガス排出量は、準好気セルと比較して3倍程度であった。一方で、埋立地ガス自身の排出量についても対照セルの方が多く、準好気セルの2倍程度であった。すなわち、メタン発生だけでなくガス化反応自体が対照セルの方が活発であったことが示唆された。これはサブテーマ(1)でも示されたとおり、雨水浸透による分解性炭素の系外排除の影響が大きいことが要因としてあげられる。また、対照セルでは湛水により水分が豊富に存在したが、排水を実施する準好気セルでは生物分解に必要な水分の供給が充分でなかったことなども、原因として考えられる。可溶化炭素の系外排除は水系への汚濁負荷が懸念される事項であり、温室効果ガス排出削減のみならず地域の環境負荷と埋立地内の生物分解の促進を考慮した上で、処分場への降雨浸透、内部の水分、浸出水などを総合的に管理する必要があることが示された。

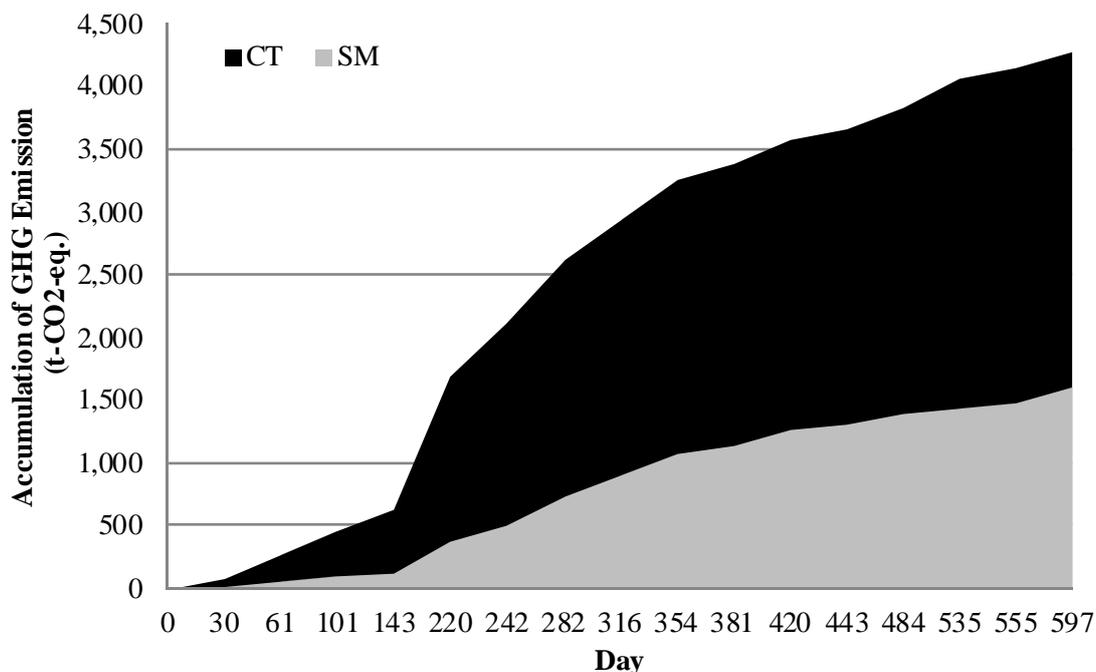


図5 埋立地テストセルからの累積メタン排出量（二酸化炭素当量換算）

準好気性埋立における酸素浸透挙動について数値解析による評価を行った一例を図6に示す。この解析には、埋立物中の生物分解性有機物量その他、不均質な間隙構造などの物理的性質、降雨浸透量および大気温度などの気象条件なども入力値として解析可能であるため、アジア地域を中心とした多様な埋立地の状況を再現可能である。安定化の進行に伴う埋立物中の生物分解性有機物の残存量の減少に応じて、酸素浸透の深さは徐々に増加し、好氣的または通性嫌氣的な雰囲気範囲が拡大することが示された。有機物埋立量が少なく、大気温度が低い日本の埋立地とは異なる酸素浸透挙動を示すことが示唆され、こうした現況にあった工法や維持管理手法の適用が肝要であると考えられた。具体的には、ガス抜き管の間隔、排水管の管径、被覆の状態などのパラメータを現地化した上で、中小規模の埋立地への適用可能性を検討することが望ましいと考えられる。

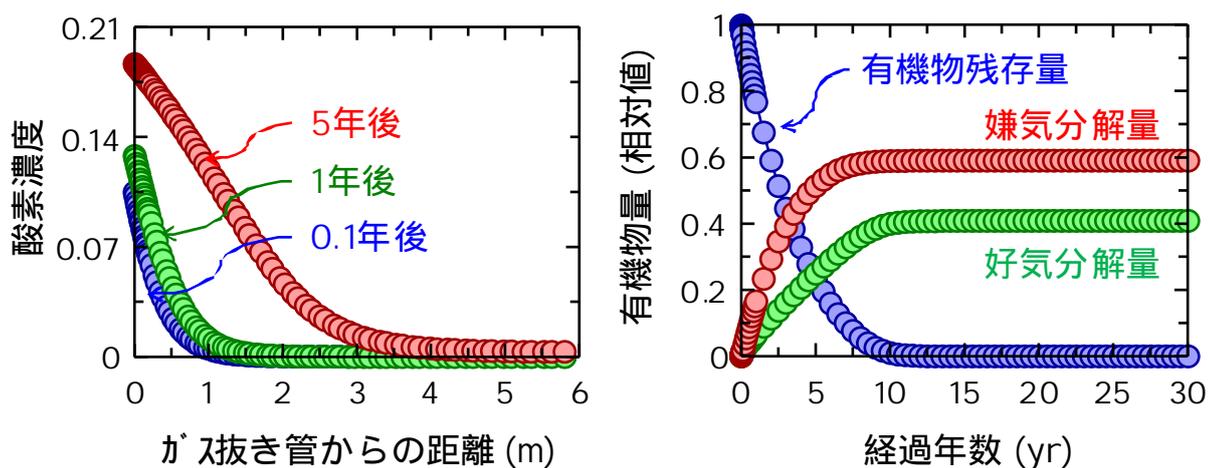


図6 準好気性埋立工法における酸素浸透挙動

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

嫌氣的雰囲気と好氣的雰囲気が共存する埋立地内での生物反応由来の環境負荷を、温室効果ガスおよび水系への負荷の両面から評価可能なモデルが提示された。これまで欧米や日本の環境条件における特定の埋立工法の評価モデルは存在したが、他地域や他技術に対しては拡張して適用されていたことで、実際の現象を表現する上では限界があった。本研究で提示されたモデルでは、複数の異なる埋

立地管理手法を比較可能であること、ならびにこれまであまり評価地域として対象にされなかったアジア地域への技術導入の効果が可能であること、などの点で高い新規性を有している。

廃棄物埋立地からの亜酸化窒素排出に関する報告は世界的に見てきわめて乏しく、埋立層における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、亜酸化窒素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た。廃棄物埋立地あるいは投棄地の維持管理手法が亜酸化窒素排出挙動に大きく影響することが示され、埋立地の緩和効果を検証する上で貴重な知見が提供されたと考えられる。

熱帯地域の条件下で実験を行うことにより、同地域において準好気性埋立を機能させる第一の因子が降水浸透量と浸出水排水量の制御であることを実証的に示した。

## (2) 環境政策への貢献

### < 行政が既に活用した成果 >

環境省の開催する温室効果ガス排出量算定法検討会において、廃棄物分野における排出量算定に用いられるモデルの更新やパラメータについての情報提供を行った。環境省および国立環境研究所の主催する「アジアにおける温室効果ガスインベントリ整備に関するワークショップ」を通じて、廃棄物分野の温室効果ガス排出量算定の高度化に関する情報提供を行った。特に、算定モデルの選定、排出係数の地域特異性、ならびに活動量データの精緻化による信頼性の向上について本研究成果の実例を交えて紹介し、アジア各国に向けた情報発信を行った。

環境省の「CDMを利用したコベネフィット実現促進・支援事業委託業務におけるコベネフィットCDM事業検討会」において、温室効果ガス削減技術をアジア地域に移転する際における留意点について、専門的見地からの意見の具申を行った。環境省および国立環境研究所の主催する「アジアにおける温室効果ガスインベントリ整備に関するワークショップ」を通じて、廃棄物分野の温室効果ガス排出量算定の高度化に関する情報提供を行った。特に、算定モデルの選定、排出係数の地域特異性、ならびに活動量データの精緻化による信頼性の向上について本研究成果の実例を交えて紹介し、アジア各国に向けた情報発信を行った。

本研究により、「準好気性埋立構造」の地球温暖化効果ガスの削減効果と浸出水による周辺環境への汚濁負荷低減効果が定量化されたことで、本埋立構造がCDM事業としてUNFCCCに認可されるための重要な情報源となった。これにより、廃棄物処理処分、特に埋立処分のための財源がない国々へ、埋立処分に特化した資金が投入され、埋立地の改善による周辺環境負荷の低減が可能となり、延いては、地球全体の環境保全に寄与した。

### < 行政が活用することが見込まれる成果 >

IPCCの次期排出量算定ガイドラインの改訂、およびIPCC第五次評価報告書における緩和効果の記載に向けた情報提供を行う。

## 6. 研究成果の主な発表状況(別添.作成要領参照)

### (1) 主な誌上発表

#### < 査読付き論文 >

- 1) Wangyao K., Yamada M., Endo K., Ishigaki T., Naruoka T., Towprayoon S., Chiemchaisri C., Sutthasil N. (2010) Methane generation rate constant in tropical landfill, *J.Sustainable Energy Environ.*, 1 (4), 181-184
- 2) 澤村啓美, 石垣智基, 遠藤和人, 小野雄策, 原雄, 香村一夫, 惣田訓, 山田正人, 池道彦 (2010) 微生物の基質利用性・系統分類に基づく最終処分場の安定度評価, *環境技術*, 39 (6) 355-364.
- 3) 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 (2010) 8箇所のコミュニティ・プラントの温室効果ガス排出量の調査. *用水と廃水*, 52 (6) 58-65
- 4) Osamu Hirata, Yasushi Matsufuji, Ayako Tanaka, Ryuji Yanase (2011) Waste stabilization mechanism by a recirculatory semi-aerobic landfill with the aeration system, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, DOI 10.1007/s10163-011-0036-7.
- 5) 石森洋行, 遠藤和人, 石垣智基, 山田正人 (2011) ジオシンセティックレイライナーの透水係数に及ぼす1,4-ジオキサンおよびビスフェノールAの影響評価, *ジオシンセティックス論文集*, 26, 169-174
- 6) 宇野慎一、除蘇士、澤村啓美、立藤綾子、松藤康司 (2012) 循環浸出水のリン添加が循環式準好気

性埋立構造の廃棄物分解及び浸出水浄化機能に及ぼす影響, 都市清掃, 65, 280-284.

- 7) 真次寛、平田修、田中綾子、松藤康司 (2012) 準好気性埋立構造における生ごみ生分解過程から生成する水分量の予測手法に関する研究, 廃棄物資源循環学会論文誌, 23 (6) 291-301.
- 8) Nguyen Nhu Sang, Satoshi Soda, Tomonori Ishigaki, Michihiko Ike (2012) Microorganisms in landfill bioreactors for accelerated stabilization of solid wastes, Journal of Bioscience and Bioengineering, 114 (3), 243-250.
- 9) Tomonori Ishigaki, Hiromi Sawamura, Masato Yamada, Masanao Nagamori, Yusaku Ono, Yuzo Inoue (2012) Community Shift of Methane-Oxidizing Bacteria in Cover Soil of Waste Landfills due to Methane Emission, Environment and Pollution, 1, 1, 75-84.
- 10) Tomonori Ishigaki, Mikako Nakagawa, Masato Yamada (2013) Anaerobic generation of nitrous oxide in waste landfills, Waste Management

## ( 2 ) 主な口頭発表 ( 学会等 )

- 1) Ishigaki T., Ikeda K., Yamada M., Wang-yao K., Naruoka T., Endo K. (2010) Assessment of methane oxidation in landfill top cover in Japan, 6th Intercontinental Landfill Res. Symp., Abstracts, 170-171
- 2) Wang-yao K., Yamada M., Endo K., Chiemchaisri C., Sutthasil N., Ishimori H. (2010) Greenhouse Gas reduction benefits derived from Semi-aerobic test cell, 6th Intercontinental Landfill Res. Symp., Proceedings, 56-57
- 3) Ishimori H., Endo K., Yamada M. (2010) Measurement accuracy of static chamber method for landfill gas emission monitoring. 6th Intercontinental Landfill Res. Symp., Abstracts, 153-
- 4) 惣田訓, 石垣智基, 池道彦 (2010) コミュニティ・プラントからの温室効果ガス排出量の実態調査. 第47回下水道研究発表会, 同予稿集, 218-220
- 5) Wangyao K., Yamada M., Endo K., Ishigaki T., Chiemchaisri C., Sutthasil N., Towprayoon S. (2010) Study of greenhouse Gas Reduction potential from Semi-Aerobic test cell. 6th Asian-Pac. Landfill Symp., Abstracts, 339-347
- 6) Komsilp Wangyao, Sirintornthep Towprayoon, Masato Yamada, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki (2011) Methane Oxidation in Landfill Cover Soil: Case Study in Thailand, 2nd International Conference on Environmental Science and Technology
- 7) Komsilp Wangyao, Masato Yamada, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki, Chart Chiemchaisri, Nopparit Sutthasil, Sirintornthep Towprayoon (2011) Mitigation of GHG emissions thorough semi-aerobic landfill method, The International Conference of Solid Waste 2011 Moving Towards Sustainable Resource Management
- 8) Komsilp Wangyao, Masato Yamada, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki, Chart Chiemchaisri, Nopparit Sutthasil, Sirintornthep Towprayoon (2011) Mitigation of greenhouse gas emission in waste sector by using semi-aerobic landfill method, 6th National Convention on Civil Engineering
- 9) H. Matsunaga, Y. Matsufuji, A. Tachifuji, O. Hirata (2011) Calculation Method of Evaporation for Estimation of Gas Emission from Landfills, 15th Korea-Japan Special Symposium at KSWME, The 2011 Korea-Japan International Session
- 10) Yu Ogata, Shinya Suzuki, Osamu Hirata, Ayako Tachifuji, Yasushi Matsufuji (2011) Relation between Diameter of Leachate Collection Pipe and Air Flow Rate in Semi-Aerobic Landfill, the 15th Korea-Japan Special Symposium at KSWME, The 2011 Korea-Japan International Session
- 11) Tomonori Ishigaki (2011) Landfill Gas and Leachate in Asia: Co-beneficial approach on management of waste landfills, 13th International Waste Management and Landfill Symposium
- 12) Masato Yamada, Osamu. Hirata, Tomonori Ishigaki, Kazuto Endo, Ayako Tanaka, Yasushi Matsufuji (2011) Evaluation of semi-aerobic landfill system as a co-benefit GHG mitigation technology, 13th International Waste Management and Landfill Symposium
- 13) Osamu Hirata, Yasushi Matsufuji, Ayako Tachifuji, Ryuji Yanase, Hitoshi Matsunaga (2011) Biodegradation process and mass balance of different landfill types using large scale simulator- Study on estimation of GHGs Emission by the Mass Balance with semi-aerobic and anaerobic landfill, 13th International Waste Management and Landfill Symposium
- 14) Ayako Tachifuji, Yasushi Matsufuji, Noriyuki Nakamura (2011) Simple leachate treatment by

- using on site materials and wastes, 13th International Waste Management and Landfill Symposium
- 15) Ayako Tachifuji, Yasushi Matsufuji, Takashi Fukushige, Noriyuki Nakamura (2011) Biological leachate treatment technology by simple and low-cost method, 13th International Waste Management and Landfill Symposium
  - 16) Hiroyuki Ishimori, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki, Hiroshi Sakanakura, and Masato Yamada (2011) Coupled fluid flow and thermal and reactive transport in porous media for simulating waste stabilization phenomena in semi-aerobic landfill, Comsol Conference 2011
  - 17) Hiroyuki Ishimori, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki, Masato Yamada (2011) In-situ Estimation Method of Gas Permeability using Gas Emission Measurement for Landfill Cover Soil, ISWA World Congress
  - 18) Tomonori Ishigaki, Hiroyuki Ishimori, Hee Jong, Kim, Tomohiro Naruoka, Kazuto Endo, Masato Yamada (2011) Anaerobic generation of nitrous oxide in waste landfills, ISWA World Congress.
  - 19) Chart Chiemchaisri, Chiemchaisri W., Komsilp Wangyao, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki, Masato Yamada (2012) Semi-aerobic landfill for reducing greenhouse gas emission from solid wastes (A test cell experiment), 1st International Conference on Environmental Science, Engineering and Management
  - 20) 石森洋行, 遠藤和人, 石垣智基, 山田正人 (2012) 廃棄物埋立地における温室効果ガスの発生とその放出挙動解明のためのマルチフィジックス解析, 第17回計算工学講演会, 同論文集, 17
  - 21) Osamu Hirata, Yasushi Matsufuji, Ayako Tachifuji, Ryuji Yanase (2012) Relative Comparison of Different Landfill Types by Environmental and Economical Aspect for Suitable Technology Transfer, Korea-Japan Special Symposium, 16th Korea-Japan Joint International Session
  - 22) Nagamori M., Koide T., Wijewardane N.K., Watanabe Y., Isobe Y., Mowjood M.I.M., Ishigaki T., Kawamoto K. (2012) Flux measurements of greenhouse gases from an abandoned open dumping site in Sri Lanka, International Conference on Sustainable Built Environment
  - 23) Tomonori Ishigaki, Mikako Nakagawa, Masato Yamada (2013) Anaerobic Generation of Nitrous Oxide in Waste Landfills, The 1st Symposium of International Waste Working Group of Asian Regional Branch
  - 24) K. Wangyao, K. Endo, T. Ishigaki, C. Chiemchaisri, N. Sutthasil, S. Towprayoon, M. Yamada, Behavior of Methane Emissions from Passive Aeration and Conventional Landfilling Methods in Tropical Environment, The 1st Symposium of International Waste Working Group of Asian Regional Branch
  - 25) M. Yamada, T. Ishigaki, K. Endo, H-J. Kim, H. Ishimori (2013) Desirable Structure and Operation of Semi-aerobic Landfill under Several Climate Conditions, The 1st Symposium of International Waste Working Group of Asian Regional Branch
  - 26) Osamu Hirata, Yasushi Matsufuji, Ayako Tachifuji, Ryuji Yanase (2013) Comparison of Estimated Methane Emission from Landfill under Asian Weather between FOD Waste Model and Fukuoka 2007 Model, The 1st Symposium of International Waste Working Group of Asian Regional Branch
  - 27) Ayako Tachifuji, Yasushi Matsufuji, Yoshinori Yoshimura (2013) Case Study of Leachate Treatment by "TORNADO" and "ECO-FAN" Aeration Device at Semi-aerobic Landfill Site in Vietnam, The 1st Symposium of International Waste Working Group of Asian Regional Branch

## 7. 研究者略歴

課題代表者：山田正人

1965生まれ、北海道大学工学部卒業、博士(工学)、現在国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター廃棄物適正処理処分研究室室長

研究参画者

(1) 1) : 山田正人(同上)

2) : 石垣智基

1974生まれ、大阪大学工学部卒業、博士(工学)、現在国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター廃棄物適正処理処分研究室主任研究員

(2) 1) : 松藤康司

1948生まれ、福岡大学薬学部卒業、博士（工学）、現在福岡大学工学部教授、  
同大学環境保全センターセンター長

2) : 田中綾子

1956生まれ、福岡大学薬学部卒業、博士（薬学）、現在福岡大学大学院工学研究科教授

(3) 1) : 山田正人（同上）

2) : 石垣智基（同上）

3) : 遠藤和人

1971生まれ、関東学院大学工学部卒業、博士（工学）、現在国立環境研究所資源循環・  
廃棄物研究センター廃棄物適正処理処分研究室主任研究員

**A-1001 埋立地ガス放出緩和技術のコベネフィットの比較検証に関する研究****(1) 埋立地ガス放出緩和技術の温室効果ガス排出抑制機能の比較評価に関する研究**

(独) 国立環境研究所

資源循環・廃棄物研究センター 廃棄物適正処理処分研究室 山田正人・石垣智基  
研究協力者

(独) 国立環境研究所

資源循環・廃棄物研究センター 成岡朋宏(平成22~23年度)・石森洋行・金喜鍾  
龍谷大学 理工学部 占部武生

平成22~24年度累計予算額：11,382千円

(うち、平成24年度予算額：3,842千円)

予算額は、間接経費を含む。

**【要旨】**

東南アジア地域への技術導入効果を表現可能な、廃棄物埋立地からの温室効果ガス排出量算定モデルを開発し、技術評価に供した。モデルの特徴としては、準好気性埋立や不十分な表層管理による埋立層への空気浸入特性、降雨浸透量に代表される気象特性に応じて、嫌気・好気両反応による廃棄物分解を表現可能な点にある。現行のIPCC算定法とメタン排出量が同程度となるのは埋立層酸素濃度が7%程度の場合であり、それ以下の濃度では現行算定法による排出量よりも多くなることが示された。アジア多雨地域への各種埋立工法の導入効果を評価した結果、表層を被覆した乾燥墓場型では、浸出水経路での炭素の損失が少なく分解性炭素が多く残存するため、メタンが長期間多量に発生することが示された。表層での浸透水排除が充分でなく一定の降雨浸透が起こることも、高いガス排出量を示す要因と考えられた。伝統的な衛生埋立では、不十分な表層施工や降雨流出によって表面からの大気浸透の影響を受けること、および浸出水中経路で放出される炭素が多いことからガス化される炭素量が少なく、メタン排出量は乾燥墓場方式の半分以下に留まった。埋立地ガス発電方式では、発電期間後にも残存する炭素由来のメタンの継続的な排出の影響で、長期的には衛生埋立よりも排出量が上回ることが示された。準好気性管理のメタン排出量は衛生埋立に比べて高い排出削減効果(75%)が示された。埋立地での亜酸化窒素排出地点数はメタン排出地点の3割程度に留まった。一方で、熱帯・亜熱帯に位置する埋立地や海面処分場においては、比較的高い亜酸化窒素放出が認められ、飽和条件下での嫌気的な亜酸化窒素生成および溶存態亜酸化窒素の気化による放出量増加が示唆された。メタンと亜酸化窒素のフラックスの間には有意な正の相関が確認され、埋立地から排出される亜酸化窒素の温室効果は単純計算でメタンの5%以下と見積もられた。埋立地からの亜酸化窒素の排出は嫌気的なメタン生成と強く関連しており、特に多雨地域における排出挙動についてさらなる調査検討が必要であると結論づけられた。

## [ キーワード ]

温室効果ガス排出量算定モデル、メタン、亜酸化窒素、好気性生物分解、準好気性埋立

### 1. はじめに

廃棄物処理は本来公衆衛生向上と環境保全という2つの目的を有しており、途上国の廃棄物分野における温室効果ガス排出量削減事業は、これら2つの目的も同時に改善させなければならない。持続可能な開発と地球温暖化対策の両立はコベネフィット・アプローチとして、我が国の国際環境政策の柱として位置づけられている。欧米発の緩和策である埋立地メタン回収利用技術は、途上国でのCDM事業において、初期コストが大きい、回収効率が低い、メタン発生や浸出水汚濁が長期化する等の問題が顕在化している。一方、我が国固有の緩和策である準好気性埋立技術は、安価であり、メタン発生と浸出水汚濁を同時に防止し、無動力で長期的に機能する点で、途上国への適用性が高い技術である。

これら競合する緩和技術のコベネフィット（温室効果ガス放出防止と水質汚濁防止）を相互に比較検証し、準好気性埋立技術の優位性を証明することは、我が国が排出削減の約束を果たし、アジアにおける環境政策を主導するために必須かつ危急の課題である。埋立地で環境保全上、最も重要なことは浸出水に起因する環境汚染の防止である。廃棄物埋立地の環境安全性を向上させるための技術的な取り組みは世界中で実施されており、地域の廃棄物管理および気候特性に応じた技術が提案されている。降水量が比較的小さい欧米では、埋立地表層の遮蔽により廃棄物層への水分浸透を排除するとともに、発生するメタンを回収・利用するDry Tomb（乾燥墓場）型埋立の技術が開発された。これは発生ガスをエネルギーに転換できるため、ほとんどの埋立地CDM事業の方法論として採用されてきた。しかし、当該事業における認証排出削減の取得率は30%に満たない。これは、汚濁した浸出水の発生量を低減することができる一方で、水分が不足するため廃棄物の分解が遅れることが懸念されるためである。

理論的には、埋立地内で廃棄物が変成しないまま乾燥し「ミイラ」化されるまでの長い期間、埋立地ガスおよび浸出水が微量ではあるが継続的に排出される。これまでも、浸出水がひどく汚濁し、ガス発生が長期化して埋立地の管理を30年以上続けなければならない、後年雨水が浸入すると、浸出水の汚濁やガスの発生が再開する、などの問題が顕在化している。このような技術を降水量が大きい途上国に適用することはきわめてリスクが大きい。米国では、浸出水を循環させることで、水分の供給による分解促進と浸出水処理のコスト削減の試みがされている。これは「バイオリクター型」埋立と呼ばれ、埋立地ガス回収・発電の予測がたてやすく設計および維持管理が容易となるという利点があるが、循環にかかるエネルギーや維持管理項目の増加との兼ね合いが検討項目としてあげられる。

降水量が比較的大きい我が国では、浸出水集排水（水平）管とガス抜き（鉛直）管を連結して埋立地内に設置し、表層からの降水浸透により廃棄物の洗浄・安定化を図るとともに、集排水管を通じて速やかに埋立地外へ排出すること、およびガス抜き管と集排水管の接続により、集排水管出口からガス抜き管出口までの経路でのガス交換が促進されることを目的とした「準好気型埋立」技術が1970年代に開発され、標準仕様となっている。この埋立技術では、埋立地内外の温度差を利用して無動力で大気を送り込み、有機物の好気性分解を促すことが利点としてあげられる

が、その理論上の効果が発揮されるためには、埋立地内の水位を常に低く制御することが求められるほか、ガスの発生量に応じて大気の浸入の程度が影響を受けることや、浸出水処理に一定の水量負荷がかかることなどに注意する必要がある。好気性分解の促進は、浸出水の汚濁を低減し、メタンガスの発生期間と量を削減する、まさにコベネフィットな技術であるといえる。しかし、この技術の開発後に我が国では都市ごみの焼却が進んだため、途上国のような生ごみ主体の埋立地における性能評価や、地域の気候に合わせた技術仕様に関する学術研究が進まなかった。結果として、技術の存在が海外でほとんど認知されておらず、IPCC第4次報告書で緩和技術として採用されず、近隣のアジア諸国のCDM事業においてもこの気候では失敗技術といえるDry Tomb型埋立技術が席卷してしまっている。

以上のように、埋立技術には一長一短があるが、こと温室効果ガスの放出緩和という機能で評価する場合、もっとも排出機構の理論的裏付けが少なく、排出量算定上の不確実性が高いのは準好気型埋立である。従って、準好気型埋立における温室効果ガスの排出挙動に関する知見の集積と、排出量算定に関する方法論の精緻化が必要である。

## 2. 研究開発目的

準好気型埋立技術は従来型の廃棄物埋立技術と比較して、温室効果ガス(メタン:  $\text{CH}_4$ )の排出量削減に寄与すると考えられており、IPCCの排出量算定ガイドラインにおいても、補正係数として0.5( $\text{CH}_4$ 排出が最大となる場合の半分の排出量)という係数が与えられている<sup>1)</sup>。その一方で、準好気性埋立においては微好気領域と嫌気領域が混在していることから、実際の廃棄物の分解機作はより複雑であると考えられる。すなわち、嫌気性埋立にもとづく現行の算定方法では、準好気性埋立由来の温室効果ガス排出挙動を正しく表現していない可能性が高く、独特の廃棄物分解およびガス化を表現する新たなモデルの開発が求められる。また、そのような特徴的な環境条件下における、亜酸化窒素( $\text{N}_2\text{O}$ )の排出の可能性が指摘されており、準好気型埋立を排出量緩和技術と位置づけていくためには、その発生・排出機構ならびに排出量の程度についても評価することが肝要であるといえる<sup>2)</sup>。

以上のことから本サブテーマでは、準好気性埋立における温室効果ガス排出算定モデルの開発を最終的な目標として、嫌気および好氣的雰囲気の下における廃棄物分解挙動の定式化およびパラメータの取得を試みた。また、同一モデルでの評価を可能とするため、各種埋立技術のコベネフィット性能を評価するため、技術情報を集積した。比較対象とする埋立地ガス放出緩和技術としては、Dry Tomb型埋立技術(メタンガス回収利用)、準好気性埋立技術に加え、デフォルトとして衛生埋立技術を取り上げた。これらの技術において、埋立地内外における温室効果ガス(メタン、亜酸化窒素)と浸出水の汚濁負荷(有機炭素、窒素)の生成と消費を制御する因子は、微生物による有機物分解を律する温度、酸素と水分である。これらパラメータとした長期的な炭素と窒素の三相における分配と移動を、現場観測とともに、テストセル、ライシメータ、カラム等の様々なスケールでの実験で把握し、冷帯・温帯に位置する先進国とは条件が著しく異なり、途上国が集中する東アジアの熱帯域における気候条件下において、IPCC Waste Modelの改善と拡張を意識して定式化した。

### 3. 研究開発方法

#### (1) 嫌気・好気混在環境下における温室効果ガス排出モデルの構築

廃棄物埋立地からの温室効果ガス排出に関する現行の算定モデルは、廃棄物の嫌氣的分解速度が一次反応式に従って減衰することを根拠とした上で、分解性有機物のガス転換率や構造や管理方法に依存する補正係数などが与えられている。ここでは、現行モデルをできるだけ活かしながら、準好気性埋立における排出モデルを策定することを指向して、以下のような観点でフレームを構築したうえで、既往研究を参考としてモデルの詳細を検討した。

- ・嫌気性と好気性の分解はそれぞれ一次分解反応と仮定するが反応速度は個別に設定する。
  - ・微少酸素の存在下において、嫌気性分解は酸素による非拮抗阻害、好気性分解は低濃度阻害を受けるものとし、それぞれの阻害定数を設定する。
  - ・低水位管理およびガス交換に伴う乾燥を考慮した阻害定数を分解速度に対して与える
- さらに、得られたモデル案において必要なパラメータについて、実験室での小規模培養実験を元に暫定的な数値を得るとともに、モデルに投入しその妥当性について検証した。

#### (2) 廃棄物最終処分場集排水管の大気開放状況調査

廃棄物最終処分場から埋立地ガスを排除し受動的に大気を導入する準好気性埋立工法においては、底部の集排水管の開口部からガス抜き管までの管渠が大気開放されていることが肝要である。しかし、高い降雨強度の発生時ならびに保護材の目詰まり等により、集排水管が水没した場合には期待されている大気導入の効果が得られない。廃棄物最終処分場集排水管の開放・水没状態を評価することを目的として、埋立層最深部での水圧モニタリングを実施し、準好気的な機能を担保する排水管の開放に関する管理実態を評価した。実処分場埋立層内の排水管最深部（保護土・砕石層下）付近において水圧センサーを設置するとともに計測を行い、準好気の状態の管理実態について評価した

#### (3) 亜酸化窒素ガスの排出挙動解明

##### 1) 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、以下の地点におい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。各埋立地の詳細は以下の通りである。

- a) A1サイト：本処分場の調査対象は、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。なお、本区画は海面処分場であり、処理対象廃棄物は一般廃棄物焼却灰、産業廃棄物・災害廃棄物、陸上残土および浚渫土砂である。
- b) A2サイト：埋立期間は1979-2004年であり、敷地面積は258,400m<sup>2</sup>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、一般廃棄物のうち、混合ごみ、可燃ごみ、不燃ごみ、直接搬入ごみ、破碎ごみ、中間処理残渣および焼却残渣である。
- c) Bサイト：本処分場は2001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、汚泥、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。

- d) C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1982-1988年、第2区画が1988-1990年、第3区画が1990-1995年、第4区画が1995-2000年および第5区画は2001-2009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、鋳さい、ばいじんである。
- e) Dサイト：本サイトはマレーシア国中部に位置する生活系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、浸出水の集水および処理は不十分である。
- f) Eサイト：本処分場の調査対象は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。
- g) Fサイト：亜熱帯に位置する混合ごみおよび焼却残さを含む一般廃棄物処分場であり、旧区画(1969-2003)と新区画(1993-2006)に分けられる。
- h) Gサイト：本サイトはタイ王国南東部に位置する生活系廃棄物の埋立地であり、2004年から埋立てられている。積み上げ式の嫌気性埋立構造であり、遮水工を有しているため一定量の浸出水は貯留池に排出されているが、その回収は不十分であり、地盤および周辺表層水系への漏洩が懸念されている。
- i) Hサイト：スリランカ中部に位置する都市ごみの開放投棄地（オープンダンピング）であり、埋立期間は1995年から2011年である。
- j) Iサイト：スリランカ南東部に位置する都市ごみの埋立地である。掘り込み型であるが、覆土は不十分で、オープンダンピングに近い管理がなされていた。埋立期間は2007年から現在も運用中である。

## 2) 閉鎖型チャンバー法によるガス排出量評価

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の亚克力製円筒状のものをを用いた。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。採取したガス中のメタンおよびN<sub>2</sub>O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）により測定した。

## 4. 結果及び考察

### (1) 嫌気・好気混在環境下における温室効果ガス排出モデルの構築

昨年度までの成果から、埋立地内においてT年度に生分解性有機物 $i$ の嫌気的および好気的な分解が同時に起こる条件下での廃棄物分解モデルについて下式のように得られた。

$$A_{i,T} = W_{i,T} \cdot \left[ (1 - e^{-k_i \cdot f_{O_2}}) + (1 - e^{-k_i^* \cdot f_{AN} \cdot \eta}) \right]$$

$$f_{O_2} = \left(1 - \frac{S_{O_2}}{K_I + S_{O_2}}\right) \quad f_{AN} = \left(\frac{S_{O_2}}{K_I^* + S_{O_2}}\right)$$

ただし、 $k_i$ : 嫌気性分解速度定数、 $K_I$ : 酸素による嫌気分解阻害定数、 $S_{O_2}$ : 埋立層内酸素濃度、 $k_i^*$ : 好気性分解定数、 $K_I^*$ : 酸素不足による好気分解阻害定数、 $\eta$ : 乾燥による阻害定数である。

また、 $T$ 年度に溶存態として埋立地外に排出される生分解性有機物 $i$ の挙動について、下式のように得られた。

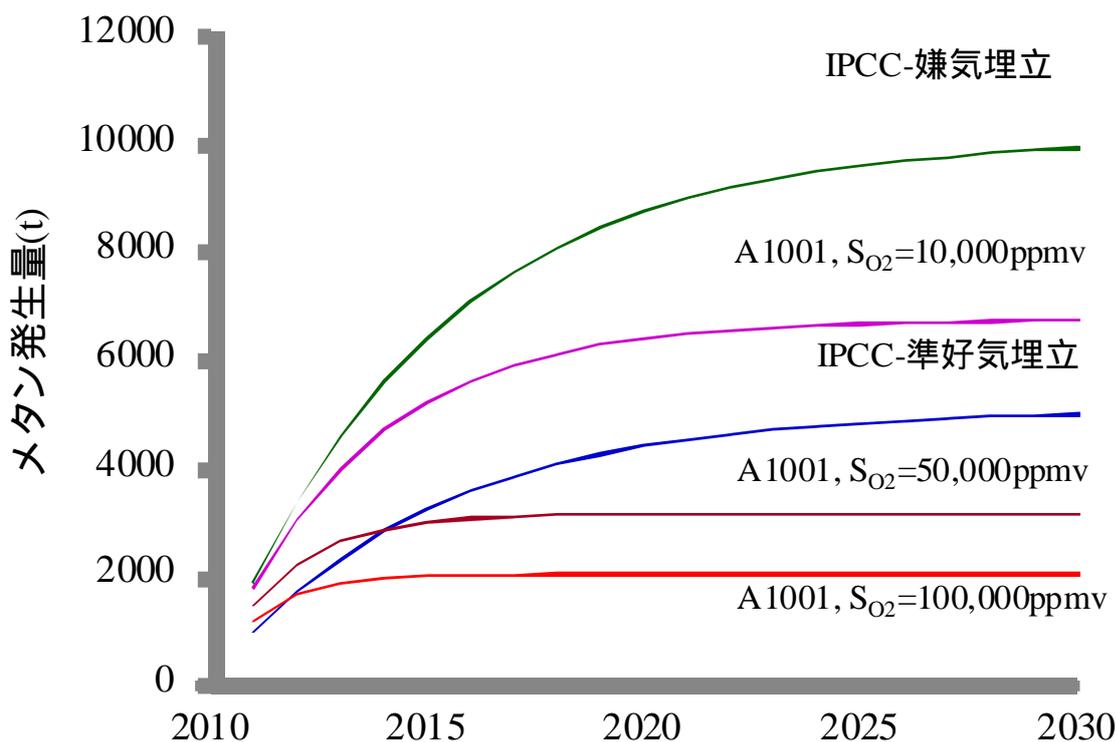
$$L_{i,T} = W_{i,T} \cdot \left[ \left(1 - e^{-k^{dis}}\right) \cdot \left(1 - e^{-k^{hyd}}\right) \right] \cdot \theta$$

$$C_{i,T} = C_{i,T-1} + L_{i,T} - F_{i,T}$$

$$F_{i,T} = (L_{i,T} + C_{i,T-1}) \cdot \left( \frac{\theta}{\theta + I} \right) \cdot I$$

ただし $L_{i,T}$ :  $T$ 年度に固形物から溶出される分解性成分 $i$ 、 $k_{dis}$ : 高分子混合体の嫌気的な解合速度定数、 $k_{hyd}$ : 嫌気的加水分解速度定数、 $C_{i,T}$ :  $T$ 年度に間隙水中に存在する成分 $i$ 、 $F_{i,T}$ :  $T$ 年度に埋立地外へ排出される成分 $i$ 、 $\theta$ : 有効間隙率、 $I$ : 埋立層への浸透強度、である。

このうち、特に情報が不足しているパラメータである $K_I$ について培養試験を経て実験的に算出した結果、 $K_I=143,000\text{ppmv}$ が得られた。 $\eta$ については、本研究サブテーマ3の結果を踏まえて0.85（乾燥により15%速度低下）を与えた。以上のパラメータを元に、仮想条件（埋立量70,000 tからのメタン発生経年累積）でのメタン排出量を算定した結果を図(1)-1に示す。既存のIPCCによる算定法に比較して、本研究で示されたモデル(A1001モデル)では、埋立層内の酸素浸入状況によってメタン発生量が大きく変動するのが特徴である。本算定法では、埋立層酸素濃度が5%の場合で20年間の累積排出量は既存の方法に比べて37%減、10%の場合で60%減となることが示された。また、既存の方法と20年間のメタン排出量が同程度となるのは埋立層酸素濃度が2.2%程度の場合であり、それ以下の濃度では現行の算定法（嫌気性埋立の半分）による排出量よりも多く算定されることが示された。



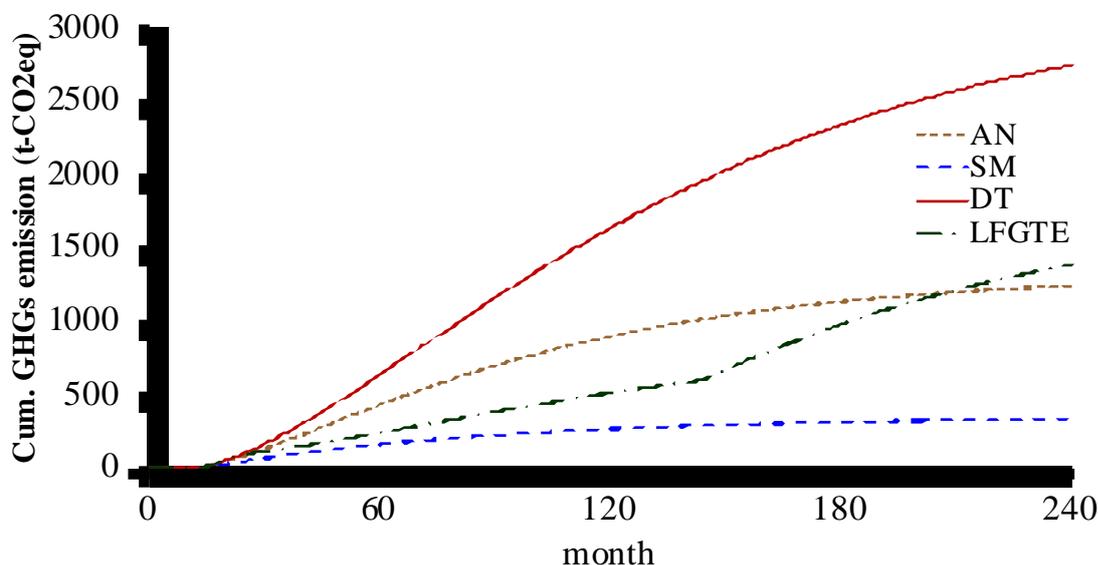
図(1)-1 提案された埋立地ガス排出量算定モデルを用いた排出挙動の比較

アジア多雨地域における各種埋立工法・管理手法における、維持管理期間での累積メタン排出量を図(1)-2に示す。維持管理期間は20年とし、メタン排出量は二酸化炭素当量(CO<sub>2</sub> eq)で表現した。表層を被覆した乾燥墓場(DT)型埋立地は、本研究で比較対象とした埋立地管理手法の中で最も高いメタン排出量を示した。これは、有機成分の溶出による浸出水としての系外放出がないため、炭素の損失が少なく、結果的に嫌気的な生物反応によってガス化される炭素量が埋立地内に多く残存することに起因する。また、アジア多雨地域においては欧米と異なり、表層の被覆による浸透水排除が充分でなく、降雨強度に応じて埋立層への一定量の水浸透が想定されることも一因として挙げられる。このことが欧米における不活性の乾燥墓場型埋立とは異なるガス排出挙動を示す要因であると考えられる。

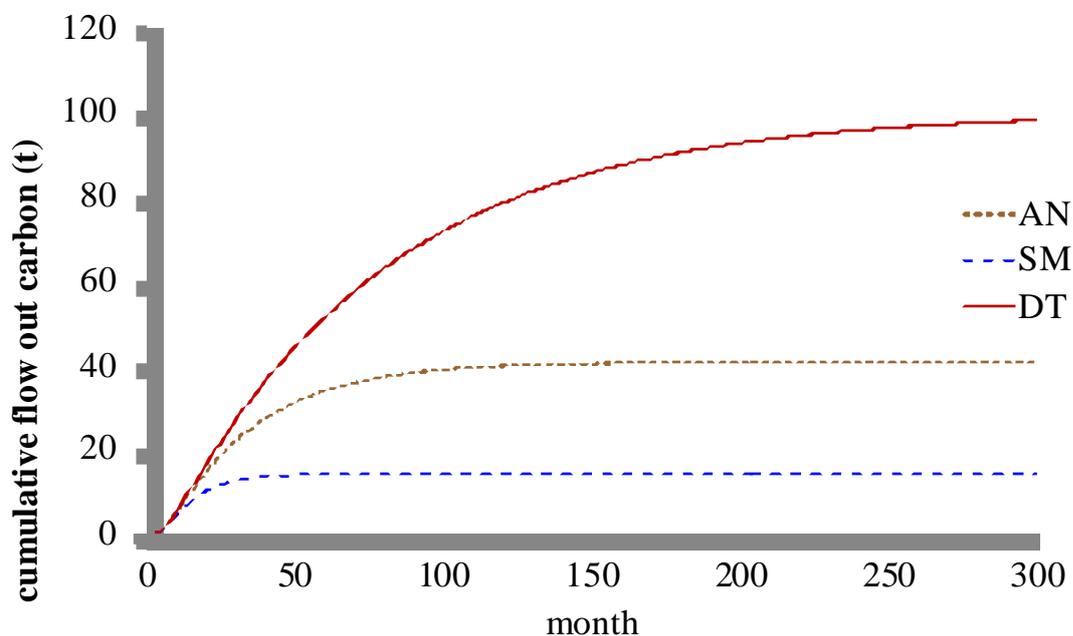
伝統的な衛生埋立(AN)工法においては、埋立層内は嫌気的な環境下にあると一般的には考えられてきたが、本研究での調査により、不十分な表層覆土の施工や降雨流出によって、大気浸透の影響を受けることが確認されている(サブテーマ3の報告参照)。すなわち生物分解性炭素の一定量が好気的な転換によりガス化されることが想定される。また、図(1)-3にも示したように、浸出水中に溶存する形態で埋立地外に放出される炭素が多いこともあり、ガス化される炭素量が少ないため、メタン排出量はDT方式に比較して半分以下に留まった。

DT方式に埋立地ガス発電を10年間(30ヶ月目からから150ヶ月目)実施する方式(LFGTE)においては、回収分だけ大気放出量は削減されたが、プロジェクト期間後の排出により既存の嫌気的な埋立地管理(AN)よりも排出量が上回ることが示された。ただしこの評価には回収された埋立地ガスのエネルギー利用による、化石燃料由来の二酸化炭素放出の代替・緩和効果などは含まれていない。今回の結果にはより総合的な視点からの考察を付け加える必要があるが、実際の埋立地管理

が20年で終了することは考えられない。長期的な影響を考慮すると、特にDTおよびLFGTE方式の埋立地が気候変動に与える影響はさらに大きいものと推測される。準好氣的管理(SM)のメタン排出量はANに比べて20年間の累計で75%程度削減できることが示された。



図(1)-2 埋立地メタン排出モデルを用いた  
各埋立工法からのメタン排出挙動の比較 (二酸化炭素当量換算: CO2eq)

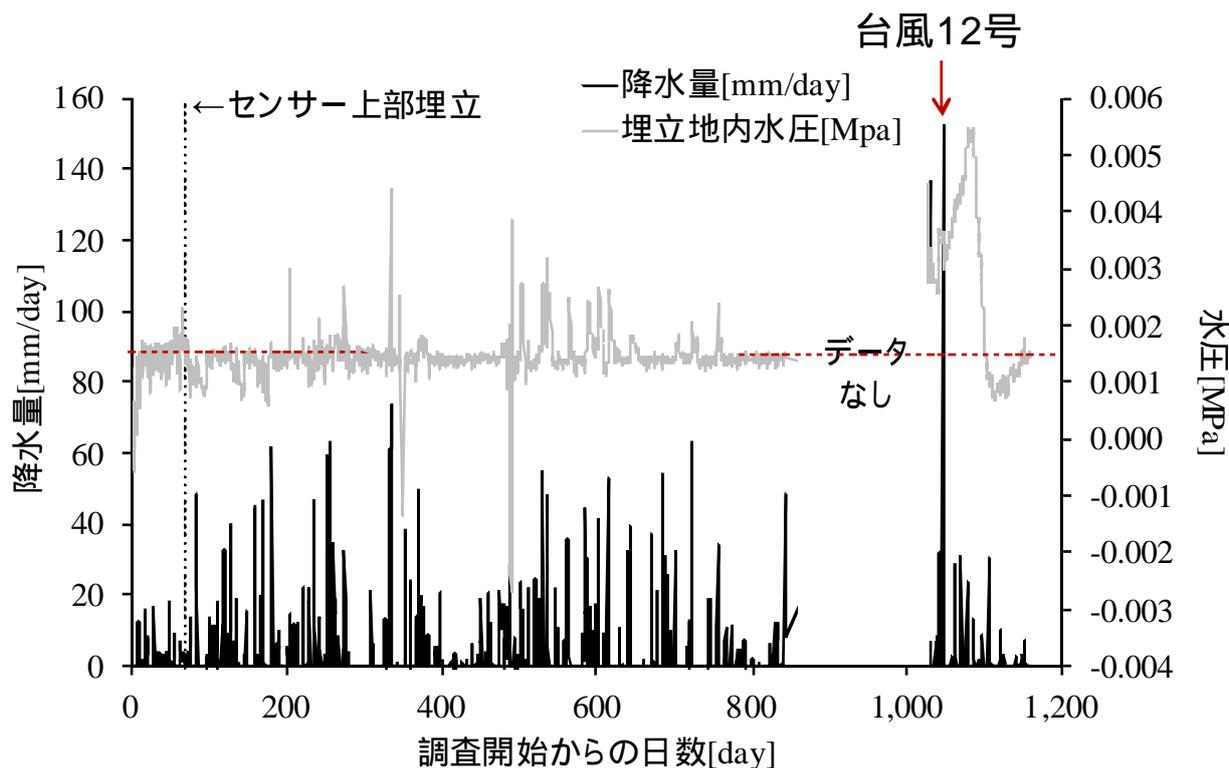


図(1)-3 埋立地から浸出水中に含有されて排出される溶存態炭素の累積量

## (2) 廃棄物最終処分場集排水管の大気開放状況調査

実処分場埋立層内の排水管最深部(保護土・砕石層下)付近において設置した水圧計による計測を行い、準好氣的状態の管理実態について評価した(図(1)-4)。埋立開始時からの継続的なモ

モニタリングの結果より、降雨時の雨水浸透に伴う水圧の一時的な上昇に対する低下および回復までに要する時間は、埋立層厚の増加によって延びることが示された。水圧が上がった状態を水位が上がっている状態として、管末端が水没していると仮定すると、モニタリング期間のうち40%程度が水没していることが推測された。これは連続して襲来した台風（台風12号および15号）による豪雨被害を受けたことも影響しているが、降雨後の排水管末端の水没状態の再開放までには一定の時間を要することは明らかであり、準好気性埋立地における、実際の大気導入効果について管理実態が及ぼす影響についての検討が必要であることが示された。



図(1)-4 埋立地内水圧と降水量の経時変化

### (3) 亜酸化窒素ガスの排出挙動解明

廃棄物埋立地における亜酸化窒素排出量調査の結果を表(1)-1に示す。廃棄物埋立地において亜酸化窒素排出が検出される地点数はきわめて少なく、調査地点全体（626地点）の6.7%であり、メタン排出の検出地点と比べて3割程度であった。日本国内の埋立地ごとの平均亜酸化窒素フラックスは、既往研究の報告例(Sormunen et al., 2008; Watzinger et al., 2005, Zhang et al., 2009)と同程度であった。一方で、熱帯・亜熱帯に位置する埋立地や海面処分場においては、比較的高い亜酸化窒素放出挙動が見られた。これは既報の中で最も高い排出量である、25年に渡り年間35万トンの都市ごみを直接埋立してきたフィンランドの埋立地からの亜酸化窒素放出 (Rinne et al. 2005)と同程度であった。アジア地域の埋立地において高い亜酸化窒素放出量を示した要因としては、生ごみを含む高い窒素含有量の都市ごみを受け入れていることが考えられるが、同様に都市ごみが直接埋め立てられたA2サイトでは必ずしも亜酸化窒素排出量は高くない。また、海面処分場（A1サイトおよびEサイト）においても高い亜酸化窒素排出量が示されたことから、埋立層内の高い水分含

有量が、亜酸化窒素への転換を促進している可能性が示唆された。このことから、飽和条件下での嫌氣的な亜酸化窒素生成および溶存態亜酸化窒素からのガス転換などによる放出量増加が推測された。Tsumimoto ら(1994)も 海面処分場からの亜酸化窒素の排出を報告しており、海面処分場は亜酸化窒素の排出源であるという位置づけがされている。A2サイトでは、安定化促進工事の実施以降、好気化に伴って亜酸化窒素の排出量が漸減する傾向が確認された。

測定地点ごとの亜酸化窒素フラックスとメタンフラックスの関係を図(1)-5に示す。メタンフラックスは一部の例外を除き $1.0 \text{ ml/m}^2/\text{min}$ 以下のレベルに留まっていた。また、メタン酸化が示唆される負のフラックスについてもA1 サイトおよびA2サイトの数地点で確認された。正のメタンフラックスの範囲では、メタンフラックスの増加に伴って亜酸化窒素フラックスも増加する傾向が確認された。一方、負のフラックスを示した地点では、その他の低いメタンフラックスを示した地点に比べるとやや高い亜酸化窒素フラックスを示した。Zhang ら (2009) は、埋立地表層においてはメタン酸化細菌がアンモニウム塩を代理基質として亜酸化窒素を生成することを報告している。本調査においても、活発なメタン酸化が確認された地点で亜酸化窒素の排出が確認されたことから、両者の関係性が推測される。ただし、覆土での亜酸化窒素生成が報告された既往の調査では、コンポストやMBT残さなど窒素化合物を含む覆土材が用いられているが、本調査ではこうした材料が使われておらず、表層での窒素源が不明である。

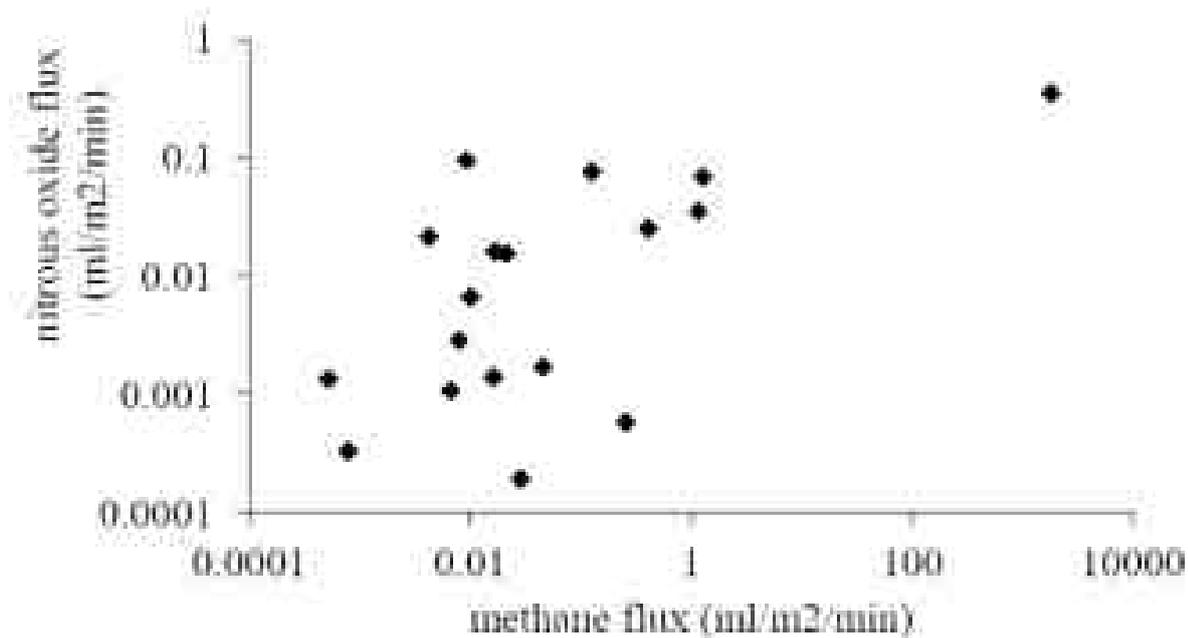
正のフラックスを示した地点では、メタンフラックスと亜酸化窒素のフラックスの間には有意な相関( $r = 0.89, P < 0.0001$ )が確認された。埋立地の表面から排出されるガスは、埋立層内の様々な廃棄物を生成源としたガスが埋立層内を移動する過程で混合された上で排出されているものである。従って表層で検出された埋立地ガスは特定の廃棄物を発生源としたものではないが、移動の過程で混合されたガスの経路に通じる複数の排出地点を代表していると考えられる。以上のことから、亜酸化窒素の排出源は埋立層内でのメタン排出源と一定の関係性を有しており、亜酸化窒素とメタンのフラックスの相関にもガスの生成源そのものではないが一定の代表性が示されていることと考えられた。また、この相関から、亜酸化窒素の生成はメタンと同様に嫌氣的な雰囲気下での生成プロセスに依存していることが示唆された。

埋立地ごとの平均亜酸化窒素フラックスと平均メタンフラックスの関係を図(1)-6に示す。なお、Gサイトにおいては亜酸化窒素フラックスが検出されなかったためここでは除外している。埋立地ごとの平均メタンフラックスと平均亜酸化窒素のフラックスの間には有意な相関( $r = 0.66, P < 0.001$ )が確認された。この相関においては、亜酸化窒素の平均フラックスはメタンの平均フラックスの1%以下にあることが示された。この関係を元にとると、埋立地から排出される亜酸化窒素の温室効果は、メタンのおよそ15%程度であると評価される。ただし、ここで示した相関には、亜酸化窒素が検出されなかった地点などを含んでいないため、亜酸化窒素排出量は過大に評価されていると考えられる。単純に検出地点率で換算すると、亜酸化窒素はメタンの5%以下のインパクトと見積もられた。いずれにせよ、埋立地からの亜酸化窒素の排出は嫌氣的なメタン生成と強く関連しており、特に多雨地域における排出挙動について、さらなる調査検討が必要であると結論づけられる。嫌氣的な亜酸化窒素生成においては、低いpHにおいて亜硝酸還元酵素が阻害されることで亜酸化窒素の排出に繋がることが報告(Okabe et al., 2011)されており、有機性廃棄物を多く含む途上国の埋立地での嫌氣的な脂肪酸生成に伴うpHの低下が高い亜酸化窒素の排出を導いたことが推測される。

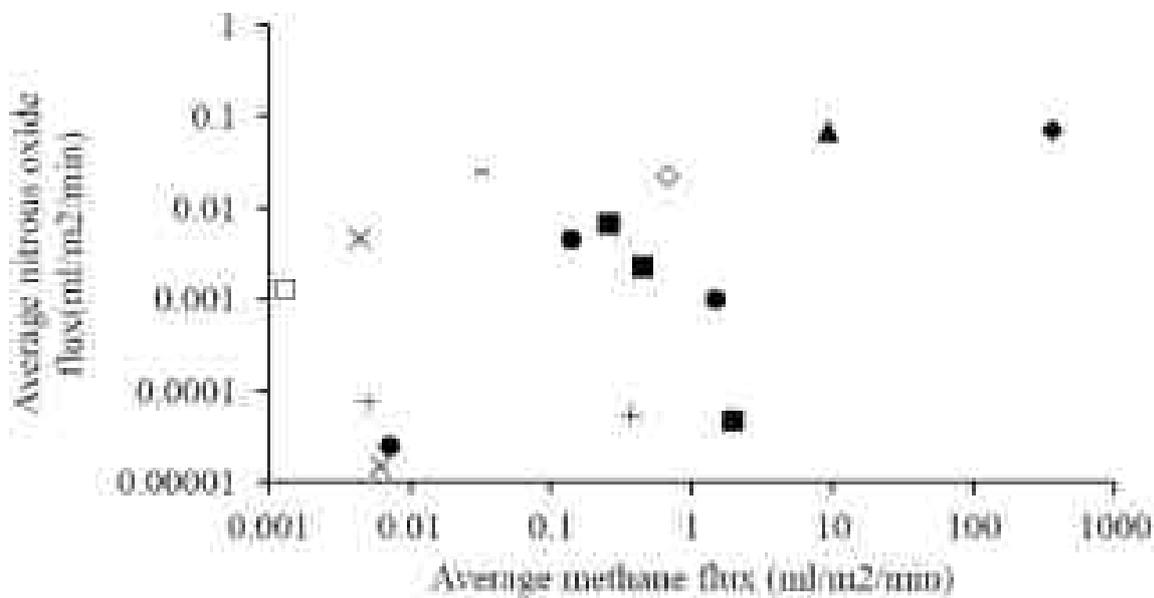
今回の調査においては、準好気性埋立（A2サイトの2010および2011）における亜酸化窒素排出について特定の傾向は確認されなかった。Louら（2009）は好氣的に管理されたパイオリアクター型埋立からの高い亜酸化窒素排出を確認しているが、この要因として高濃度の窒素化合物を含む浸出水の再循環にあるとしている。既往研究においては、埋立層への強制的な空気の導入、掘削切断面、および覆土層から排出されるガスについて、メタンと亜酸化窒素が排出量や濃度で逆相関を示すことがしばしば報告されている(Zhang et al., 2009; Borjesson and Svensson, 1997; Harborth et al., 2013)。しかし本研究の成果から、埋立層内に部分的に酸素を導入する準好気性埋立工法においては、好氣的な反応で亜酸化窒素を生成していることは明確にはされなかった。ただし、準好気性埋立工法に限らず、不十分な覆土施工による表面からの酸素の浸透など、部分的な好気環境への転換により生成される亜硝酸が、従属栄養的な脱窒反応の基質として使われることで、嫌氣的な亜酸化窒素の排出源となっている可能性は充分考えられる。

表(1)-1 廃棄物埋立地における亜酸化窒素排出量調査結果の概要

Climate zone	Landfill		Sampling	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Mean N <sub>2</sub> O flux
			points	detection	detection	( ml/m <sup>2</sup> /min)
temperate	A1	2008	87	10	0	ND
		2009	34	8	4	0.0045
		2010	23	7	2	0.001
		2011	13	3	1	0.000025
		2012	6	3	3	0.00021
	A2	2009	39	26	6	0.0068
		2010	17	13	3	0.0023
		2011	12	6	1	0.000048
	B	2008	26	5	0	ND
		2009	13	3	3	0.0046
		2010	14	3	1	0.000015
	C	2008	37	5	0	ND
		2009	22	3	2	0.000076
		2010	7	3	2	0.000055
	E	2008	54	7	0	ND
2009		7	2	2	0.0013	
2010		13	4	0	ND	
tropical	D	2009	88	41	1	0.068
	G	2010	48	25	0	ND
	F_old	2008	38	6	2	0.024
	F_new	2008	14	4	1	0.027
	H	2012	8	5	4	0.070
	I	2012	6	4	4	0.022



図(1)-5 各排出地点におけるメタンおよび亜酸化窒素フラックスの関係



図(1)-6 各埋立地におけるメタンおよび亜酸化窒素フラックスの関係

●:A1, ■:A2, x:B, +: C, ▲:D, □:E, -:F, ○:H, ○: I

## 5．本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

嫌氣的雰囲気と好氣的雰囲気が共存する埋立地内での生物反応由来の環境負荷を、温室効果ガスおよび水系への負荷の両面から評価可能なモデルが提示された。これまで欧米や日本の環境条件における特定の埋立工法の評価モデルは存在したが、他地域や他技術に対しては拡張して適用されていたことで、実際の現象を表現する上では限界があった。本研究で提示されたモデルでは、複数の異なる埋立地管理手法を比較可能であること、ならびにこれまであまり評価地域として対象にされてこなかったアジア地域への技術導入の効果が可能であること、などの点で高い新規性を有している。

また、廃棄物埋立地からの亜酸化窒素排出に関する報告は世界的に見てきわめて乏しく、埋立層における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、亜酸化窒素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た。廃棄物埋立地あるいは投棄地の維持管理手法が亜酸化窒素排出挙動に大きく影響することが示され、埋立地の緩和効果を検証する上で貴重な知見が提供されたと考えられる。

### (2) 環境政策への貢献

#### < 行政が既に活用した成果 >

環境省の開催する温室効果ガス排出量算定法検討会において、廃棄物分野における排出量算定に用いられるモデルの更新やパラメータについての情報提供を行った。環境省および国立環境研究所の主催する「アジアにおける温室効果ガスインベントリ整備に関するワークショップ」を通じて、廃棄物分野の温室効果ガス排出量算定の高度化に関する情報提供を行った。特に、算定モデルの選定、排出係数の地域特異性、ならびに活動量データの精緻化による信頼性の向上について本研究成果の実例を交えて紹介し、アジア各国に向けた情報発信を行った。

#### < 行政が活用することが見込まれる成果 >

IPCCの次期排出量算定ガイドラインの改訂、およびIPCC第五次評価報告書における緩和効果の記載に向けた情報提供を行う。

## 6．国際共同研究等の状況

国立環境研究所の主催する「アジアにおける廃棄物管理の高度化および温室効果ガス排出削減に関するワークショップ」の運営主体として活動している。このワークショップは2010年10月に第四回が開催され、韓国（ソウル市立大学李教授）、中国（国立廃棄物研究センター）、タイ（カセサート大学Chart教授、キングモンクット工科大学Komsilp研究員）、モンゴル（放牧地管理協会Bulgamaa部長）、マレーシア（環境省Zanariah補佐）、インドネシア（環境省Upik課長、スラバヤ州立大学Winamo講師）、ベトナム（ベトナム国立大学Ha教授、Quang講師）、フィリピン（フィリピン大学ディリマン校Ballesteros教授）など、地域における廃棄物管理および温室効果ガス削減の実務担当者及び専門家が出席している。当該研究の進捗状況を公表し、アジア地域の専門家と

最新の成果を共有するとともに、各地域での実態調査事例の収集ならびに排出量算定の高度化に向けた提言などを取りまとめ、地域特異性の高い排出係数の取得に向けた活動を実施している。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### < 論文 (査読あり) >

- 1) Wangyao K., Yamada M., Endo K., Ishigaki T., Naruoka T., Towprayoon S., Chiemchaisri C., Sutthasil N. (2010) Methane generation rate constant in tropical landfill. *J. Sustainable Energy Environ.*, 1 (4), 181-184
- 2) 澤村啓美, 石垣智基, 遠藤和人, 小野雄策, 原雄, 香村一夫, 惣田訓, 山田正人, 池道彦 (2010) 微生物の基質利用性・系統分類に基づく最終処分場の安定度評価, *環境技術*, 39, 6, 355-364.
- 3) 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 (2010) 8個所のコミュニティ・プラントの温室効果ガス排出量の調査. *用水と廃水*, 52 (6), 58-65
- 4) Nguyen Nhu Sang, Satoshi Soda, Tomonori Ishigaki, Michihiko Ike (2012) Microorganisms in landfill bioreactors for accelerated stabilization of solid wastes, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 114 (3), 243-250.
- 5) Tomonori Ishigaki, Hiromi Sawamura, Masato Yamada, Masanao Nagamori, Yusaku Ono, Yuzo Inoue (2012) Community Shift of Methane-Oxidizing Bacteria in Cover Soil of Waste Landfills due to Methane Emission, *Environment and Pollution*, 1, 1, 75-84.
- 6) Tomonori Ishigaki, Mikako Nakagawa, Masato Yamada (2013) Anaerobic generation of nitrous oxide in waste landfills, *Waste Management*

#### < その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) Tomonori Ishigaki, Osamu Hirata, Takefumi Oda, Komsilp Wangyao, Sirintornthep Towprayoon, Chart Chiemchaisri, Dong-Hoon Lee and Masato Yamada (2011) *Integrated Waste Management / Book 2: Greenhouse Gas Emission from Solid Waste Disposal Site in Asia*, Sunil Kumar (Ed.), Intech.

### (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) Ishigaki T., Ikeda K., Yamada M., Wang-yao K., Naruoka T. and Endo K. (2010) Assessment of methane oxidation in landfill top cover in Japan. 6th Intercontinental Landfill Res. Symp., Abstracts, 170-171
- 2) Wangyao K., Yamada M., Endo K., Ishigaki T., Chiemchaisri C., Sutthasil N. and Towprayoon S. (2010) Study of Greenhouse Gas Reduction Potential from Semi-Aerobic Test Cell. 6th Asian-Pacific Landfill Symposium, Abstracts, 339-347
- 3) 田中宏和, 森陰早也香, 長谷川耕治, 吉田耕一郎, 山田正人, 遠藤和人, 石垣智基, 藤井直幸, 大家清紀 (2010) 管理型最終処分場における電気伝導率の深度分布とイオン類の評価. 第

- 21回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 531-532
- 4) 長森正尚, 山田正人, 石垣智基, 小野雄策 (2010) 管理型最終処分場の廃止基準に関する考察(7). 第21回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 537-538
  - 5) 東川拓司, 占部武生, 石垣智基, 遠藤和人, 山田正人, 成宮等 (2010) 廃棄物埋立地からのメタンガス排出量算定に用いられる排出係数の検討. 第21回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 521-522
  - 6) 石垣智基, 古田祐介, 伊賀友亮, 山田正人 (2010) 廃棄物埋立地における亜酸化窒素ガスの排出実態に関する調査. 第21回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 525-526
  - 7) 濱田真樹, 小林泰士, 石田明希, 占部武生, 澤村啓美, 清和成, 井上大介, 石垣智基 (2010) 廃棄物最終処分場の微生物機能評価用DNAマイクロアレイを用いた安定化特性因子の抽出. 第21回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 533-534
  - 8) 惣田訓, 石垣智基, 池道彦 (2010) コミュニティ・プラントからの温室効果ガス排出量の実態調査. 第47回下水道研究発表会, 同予稿集, 218-220
  - 9) 濱田真樹, 占部武生, 小林泰士, 石田明希, 石垣智基, 池道彦, 清和成, 井上大介, 澤村啓美, 樋口進, 八木美雄, 東海林俊吉 (2011) 廃棄物埋立地浄化技術の微生物学的評価. 第32回全国都市清掃研究・事例発表会, 同講演論文集, 101-103
  - 10) 石垣智基, 富永幸, 田中宏和 (2011) 廃棄物埋立地における金属の可溶化促進に関する研究. 第32回全国都市清掃研究・事例発表会, 同講演論文集, 270-272
  - 11) 東川拓司, 占部武生, 石垣智基, 遠藤和人, 山田正人, 成宮等 (2011) 廃棄物埋立地からのメタンガス排出量算定式中の降水量および埋立工法に適した排出係数の検討. 第32回全国都市清掃研究・事例発表会, 同講演論文集, 273-275
  - 12) 山田正人, 遠藤和人, 石垣智基, Wang-Yao Komsilp (2011) 熱帯地域における準好気性埋立テストセル実験について. 第32回全国都市清掃研究・事例発表会, 同講演論文集, 255-257.
  - 13) Komsilp Wangyao, Sirintornthep Towprayoon, Masato Yamada, Kazuto Endo, and Tomonori Ishigaki (2011) Methane Oxidation in Landfill Cover Soil: Case Study in Thailand, 2nd International Conference on Environmental Science and Technology
  - 14) Tomonori Ishigaki (2011) Landfill Gas and Leachate in Asia: Co-beneficial approach on management of waste landfills, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium
  - 15) Masato Yamada, Osamu Hirata, Tomonori Ishigaki, Kazuto Endo, Ayako Tanaka, and Yasushi Matsufuji (2011) Evaluation of semi-aerobic landfill system as a co-benefit GHG mitigation technology, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium
  - 16) Tomonori Ishigaki, Hiroyuki Ishimori, Hee Jong, Kim, Tomohiro Naruoka, Kazuto Endo, and Masato Yamada (2011) Anaerobic generation of nitrous oxide in waste landfills, ISWA World Congress.
  - 17) 石垣智基, 濱田真樹, 占部武生, 池道彦, 井上大介, 澤村啓美, 樋口進, 八木美雄 (2011) 東海林俊吉, 山田正人, 微生物機能分布による廃棄物処分場の安定化進行度評価, 第22回廃棄物資源循環学会研究発表会
  - 18) 東川拓司, 占部武生, 石垣智基 (2011) 廃棄物埋立地からの温室効果ガス算出に用いられる

- ガス化率の地域性に関する実験的検討， 第22回廃棄物資源循環学会研究発表会
- 19) 濱田真樹， 占部武生， 石垣智基， 澤村啓美， 清和成， 井上大介 (2011) 安定化促進工に伴う最終処分場の微生物機能分布の変化， 第22回廃棄物資源循環学会研究発表会
  - 20) 長森正尚， 渡辺洋一， 山田正人， 石垣智基 (2011) 廃棄物埋立地における亜酸化窒素ガス調査， 第22回廃棄物資源循環学会研究発表会
  - 21) 田中宏和， 山崎慶子， 青木保憲， 山田正人， 遠藤和人， 石垣智基， 藤井直幸， 大家清紀 (2011) 管理型産業廃棄物処分場における塩類および重金属類の溶出挙動， 第22回廃棄物資源循環学会研究発表会
  - 22) 濱田真樹， 占部武生， 石垣智基， 池道彦， 井上大介， 澤村啓美 (2011) 廃棄物最終処分場の中間覆土層が微生物生態系に与える影響， 第33回全国都市清掃研究・事例発表会
  - 23) 東川拓司， 占部武生， 石垣智基， 山田正人 (2012) 酸素共存下における埋立地内での廃棄物分解挙動の評価， 第33回全国都市清掃研究・事例発表会
  - 24) 石垣智基， 石森洋行， 山田正人， 東川拓司 (2012) 埋立地ガス放出緩和技術の温室効果ガス排出抑制機能評価モデルの開発， 第22回廃棄物資源循環学会研究発表会
  - 25) 田中宏和， 藤井直幸， 大家清紀， 石垣智基， 遠藤和人， 山田正人 (2012) 管理型産業廃棄物処分場の埋立層内に賦存するイオン類に関する一考察， 第22回廃棄物資源循環学会研究発表会
  - 26) Nagamori Masanao, Koide T., Wijewardane N.K., Watanabe Y., Isobe Y., Mowjood M.I.M., Ishigaki Tomonori, Kawamoto K. (2012) Flux measurements of greenhouse gases from an abandoned open dumping site in Sri Lanka, International Conference on Sustainable Built Environment
  - 27) Tomonori Ishigaki, Mikako Nakagawa, Masato Yamada (2013) Anaerobic Generation of Nitrous Oxide in Waste Landfills, The 1st Symposium of International Waste Working Group of Asian Regional Branch

### ( 3 ) 出願特許

特に記載すべき事項はない

### ( 4 ) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) 第四回アジアにおける廃棄物管理の高度化および温室効果ガス排出削減に関するワークショップ（2010年9月、国立環境研究所、参加者40名）

### ( 5 ) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

### ( 6 ) その他

- 1) Award for Excellent Poster Presentation, Korea Society of Waste Management, Nitrous oxide emission from waste landfills in Japan, 2011 Spring conference of the Korea Society of Waste Management, Abstracts, 105-106, 2011

- 2) 第13回環境技術学会論文賞, 微生物の基質利用性・系統分類に基づく最終処分場の安定度評価, *Journal of Environmental Conservation Engineering*, 39 (6), 355-364, 2010

## 8 . 引用文献

- 1) Bogner, J., M. Abdelrafie Ahmed, C. Diaz, A. Faaij, Q. Gao, S. Hashimoto, K. Mareckova, R. Pipatti, and T. Zhang, *Waste Management*, In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 2007
- 2) Borjesson, G., Svensson, B.H., 1997. Nitrous oxide emissions from landfill cover soils in Sweden, *Tellus* 49B, 357–363.
- 3) Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K. 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Institute for Global Environmental Strategies
- 4) Harborth, P., Fuß, R., Munnich, K., Flessa, H., and Fricke, K., 2013, Spatial variability of nitrous oxide and methane emissions from an MBT landfill in operation: Strong N<sub>2</sub>O hotspots at the working face, *Waste Management*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.028>
- 5) Lou, X.F., and Nair, 2009, The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions - A review, *J. Bioresource Technol.* 100, 3792–3798.
- 6) Okabe, S., Oshiki, M., Takahashi, Y., and Satoh, H., 2011, N<sub>2</sub>O emission from a partial nitrification-anammox process, and identification of a key biological process of N<sub>2</sub>O emission from anammox granules, *Water Research*. 45, 6461-6470
- 7) Rinne, J., Pihlatie, M., Lohila, A., Thum, T., Aurela, M., Tuovinen, J.P., Laurila, T., and Vesala, T., 2005. Nitrous oxide emissions from a municipal landfill, *Environmental Science and Technology*, 39, 7790-7793.
- 8) Sormunen, K., Einola, J., Ettala M. and Rintala, J., 2008. Leachate and gaseous emissions from initial phases of landfilling mechanically and mechanically-biologically treated municipal solid waste residuals, *Bioresource Technology* 99, 2399-2409.
- 9) Tsujimoto, Y., Masuda, J., Fukuyama J., and Ito, H., 1994. N<sub>2</sub>O emissions at solid waste disposal sites in Osaka city, *Journal of Air and Waste Management Association*, 44, 1313–1314.
- 10) Watzinger, A., Reichenauer, T.G., Blum, W.E.H., Gerzabek, M.H., and Zechmeister-Boltenstern, S., 2005. The effect of landfill leachate irrigation on soil gas composition: Methane oxidation and nitrous oxide formation, *Water, Air, and Soil Pollution*, 164, 295-313.
- 11) Zhang H., He P., Shao L., 2009, N<sub>2</sub>O emissions at municipal solid waste landfill sites: Effects of CH<sub>4</sub> emissions and cover soil, *Atmospheric Environment*, 43, 2623-2631.

## (2) 埋立地ガス放出緩和技術の浸出水制御機能の比較評価に関する研究

福岡大学

工学部 社会デザイン工学科  
大学院工学研究科 資源循環・環境工学専攻

松藤 康司  
田中 綾子

平成22～24年度累計予算額：10,816千円  
(うち、平成24年度予算額：3,276千円)

予算額は、間接経費を含む。

### 【要旨】

本研究では埋立構造の違いによる埋立地ガス放出緩和機能及び浸出水制御機能の違いを解明するために、大型埋立実験槽によって得られた発生ガス質及び浸出水質の長期モニタリングデータを用いて検討を行った。また、国内外の文献調査や既往の長期埋立実験のデータを解析し、有機物の液相への分配量とその時間変化の定式化を試みた。本研究において、上記の機能を制御する要因である温度については大型埋立実験槽を恒温室に入れる事でその影響を最小化した。酸素の影響については埋立構造の異なる好気性槽、準好気性槽、嫌気性槽を比較する事によってその要因について検討を行った。浸透水量（降水量）の影響に関しては、降雨条件の異なる時期を比較する事で検討を行った。その結果、廃棄物分解に伴う有機炭素の液相への分配量は降水量の増加に伴って増加することが確認され、各大型埋立実験槽からの浸出水量当たりの溶出速度は全て類似する事がわかった。また、埋立地の酸素供給量の違いがガス化プロセスへの移行時期に影響を与え、溶出量の決定因子となる事も確認された。これらの結果は過去の大型埋立実験結果とも一致しており再現性が確認された。以上の実験結果から、埋立構造(酸素供給量)、及び降水量の影響を反映した“液相分配量予測モデル”を検討した。初めに、実験結果とFOD Waste modelの予測値を比較し、定式化への影響要因を検討した。その結果、本モデルで算出した可溶化期間における準好気性埋立の溶出量削減効果は嫌気性埋立に比べ約40～50%の削減効果を示した。今回提唱したモデルを用いる事でアジア地域における埋立地ガス放出緩和技術を、気象条件及び埋立構造の違いから評価する事ができ、埋立地からの温室効果ガスの発生量を精度良く把握する事が出来る。このことから、本研究結果は途上国への埋立地ガス放出緩和技術支援、さらには地球温暖化の防止に繋がると考えられる。

【キーワード】 準好気性埋立構造、浸出水制御機能、埋立構造、FOD Waste model

### 1. はじめに

埋立地ガス放出緩和技術として、嫌気性埋立によるメタン回収技術と2011年7月に「Co-benefit CDM技術」としてIPCCより認定された準好気性埋立によるメタン発生量削減技術がある。この嫌気性埋立によるメタン回収は温室効果ガスの大気放出を削減するだけでなく、エネルギーを回収

できる事から、欧米を中心として実用化され、近年では、中国及びインドネシア等の東南アジア諸国でCDMプロジェクトとして導入され広く普及している。しかし、メタン回収後において廃棄物層に残存する有機物の分解に伴うガスや汚濁物を高濃度に含有する浸出水の発生が続いており、この技術が適用され数十年が経過した欧米諸国において、メタン回収後の埋立地の早期安定化、及び浸出水の負荷低減が課題となっている。この課題に対応するため、ドイツを中心としてメタン回収後の埋立地の廃棄物層にエアープンプ等を用いて空気を供給する好気性埋立技術が実用化されるなど、廃棄物埋立地の構造は嫌気性埋立から好気性埋立へ移行する傾向がある。また、ヨーロッパでは、降雨が少なく、浸出水による汚染問題が比較的少ないことから、嫌気性埋立によるメタン回収が採用されてきた経緯を考えると、降雨量が多い東南アジア諸国におけるメタン回収技術の適用・普及は上記問題をさらに深刻化させると予想され、そのリスクの定量的評価が必要である。

一方、準好気性埋立は廃棄物の早期安定化や浸出水汚濁負荷の低減を目的として開発された技術であり、上記問題による環境汚染リスクは嫌気性埋立に比べて小さい。しかし、この準好気性埋立構造の機能は埋立地内部の好气的環境を拡大する事、すなわち、好気性分解を促進することによって達成されるため、メタンの発生量は削減されるものの、エネルギーへの転換はできない。一般に、エネルギー転換に比べて、環境汚染負荷低減はコスト評価しにくいいため、経済成長を優先する発展途上国においては、準好気性を適用したCDMプロジェクトの採用はメタン回収に比べて少ない状況である。これは、東南アジアの気候を考慮した嫌気性埋立及び準好気性埋立の両埋立構造における浸出水汚濁負荷量に関しての定量的なデータがないことも一因であり、準好気性埋立の浸出水制御機能を定量化し、嫌気性埋立との比較検討が急務である。

## 2. 研究開発目的

一般に、FOD Waste modelに代表されるように、廃棄物の分解に伴う物質フローは、一定条件下で実施された基礎実験によって得られた値を廃棄物の分解基本式に代入することによって求められる。しかし、それらデフォルト値はこれまでの多くの研究者によって研究がなされてきた嫌気性、又は、好気性条件下で求められた値であり、本研究が対象とする準好気性条件に適用した例は無い。また、埋立地の廃棄物層は不均一で、様々な要因の相互作用が起きており、これら埋立地の廃棄物層内の諸現象を考慮する必要がある。

そこで、筆者らは廃棄物埋立地を模擬した大型埋立実験槽に実埋立廃棄物、又は、それら組成に調整した廃棄物を充填し、埋立槽内から発生するガス及び浸出水の質及び量を計測し、得られたデータに基づいて物質収支の定量化を試みている。本研究では、準好気性埋立の浸出水制御機能に影響を与える要因として、有機物を分解する微生物の生育環境を決定する埋立層内の酸素供給量、溶出量を決定する降雨の浸透水量に注目し、特に、酸素は嫌気性埋立との違いを定量化する上で重要な因子であると考え、各要因と浸出水への汚濁物溶出量の関係について検討し、廃棄物の分解に伴う有機汚濁物の液相への分配量の定式化を試みた。

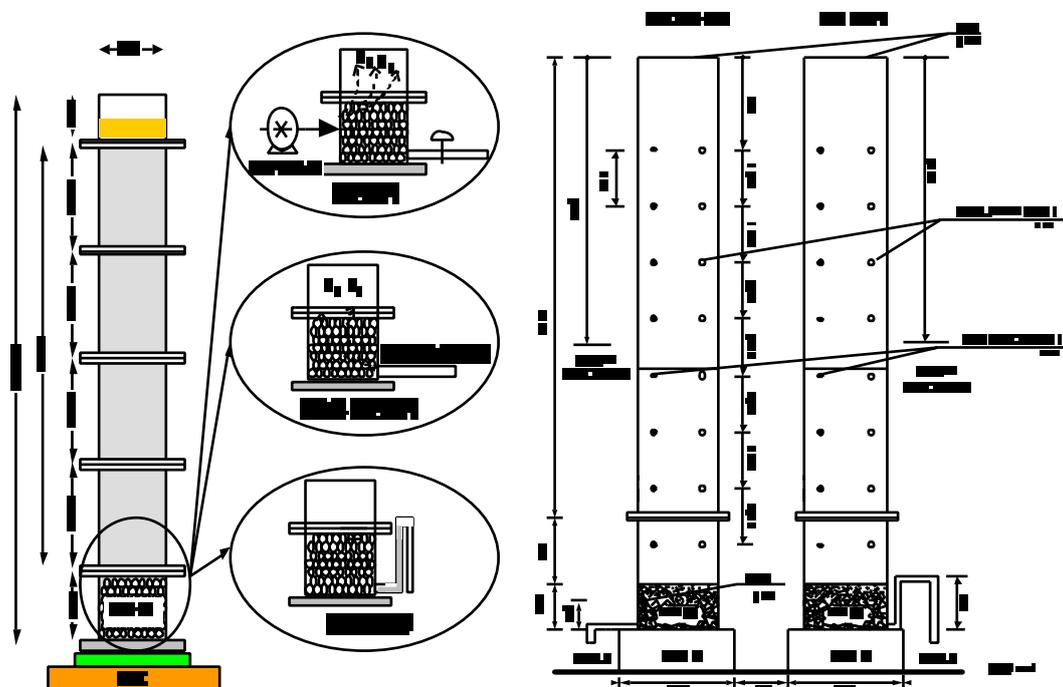
また、液相への分配量の定式化については、筆者らが1997年に提案したガス発生量の予測モデル同様に、液相への分配量を決定する要因として分解性有機物量を無次元化した累積溶出率を適用すると共に、その溶出率を降雨量の式として定式化するなど、各要因の相互作用を表現できる

有機汚濁物の“液相分配量予測モデル”の構築を目指した。

### 3. 研究開発方法

#### (1) 浸出水制御機能に与える影響因子の検討

本研究では、液相への分配量の影響因子のうち酸素、降水量及び分解性有機物量について検討することから、酸素供給量(埋立構造)の異なる大型埋立実験槽を研究対象とした。また、降雨量の影響を評価するために、自然降雨を採用した埋立実験で、かつ、長期データを有するH06号大型埋立実験槽のデータを基に解析を行った。さらに、比較検討のため分解性有機物量や降雨量が異なる新6号大型埋立実験槽のデータを用いてH06号大型埋立実験槽から得られた解析結果の妥当性を評価した(図(2)-1)。各実験槽に充填された廃棄物の種類及びそれらの重量や降雨量等の違いを表(2)-1に示す。



図(2)-1 大型埋立実験槽の模式図、(左：H06号、右：新6号)

表(2)-1 大型埋立実験槽の実験条件

実験条件等		H06号	新6号	
埋立構造		好気、準好気、嫌気	準好気、嫌気	
廃棄物層厚 (m)		4.0	4.5	
実験槽表面積 (m <sup>2</sup> )		0.28	0.18	
実験槽容量 (m <sup>3</sup> )		1.13	0.83	
充填廃棄物重量 (kg)		864	582	
易分解性有機物量* (kg)		56	46	
生物分解性有機物量** (kg)		314	130	
単位体積重量 (t/m <sup>3</sup> )		0.76	0.70	
乾燥組成 割合 (%)	厨芥	15.1 (35.0) ***	27.8	
	紙類	古紙	31.1 (20.0)	44.8
		パルプ	25.4 (20.0)	-
	草木類	10.0 (10.0)	2.5	
	プラスチック類	14.4 (13.0)	14.1	
	不燃物	3.6 (2.0)	4.8	
屋内設定温度 ( )		25	20	
降水量 (mm/年)		1996～2006年の福岡市 平均降水量、1610	前年度の福岡市降水量 1400～2000	

\*：厨芥量、\*\*：厨芥、紙類、草木類、\*\*\*：カッコ内は湿潤状態の組成割合

H06号大型埋立実験槽に充填した廃棄物は焼却やMBP等の中間処理を行っていない、厨芥等の有機性廃棄物を多く含んだ高含水率の調整廃棄物であり、温室効果ガスの放出が大きいと予測されている開発途上国のごみ組成を模擬したものである。この実験槽は温度調整（室温25℃）した屋内に設置しているため、外気温の変動はなく、廃棄物の分解に与える外気温の影響は少ない。また、降水の代わりとして、過去10年間（1995～2005年）の福岡市の平均月間降水量で散水を行っているため、年間の降水量は一定であるが月間の変動は大きい。H06号の各埋立構造は、好気性槽では底部よりポンプを用いて強制的に空気を流入（5L/min/m<sup>3</sup>）しており、準好気性槽では底部の浸出水集排水管を大気に開放することにより空気が自然流入する構造である。ただし、H06号の準好気性槽では、実験開始から約26ヶ月目に新たに空気孔（Φ7.8cm）を増設した。嫌気性槽は底部に滞水層を設け、下部からの空気流入を防いだ。全ての実験槽は重量計（測定範囲：0.1～2000kg）上に設置し重量変化を常時計測し、図(2)-2に示す収支式よりガス発生量を求めた。また、可溶性物質の溶出量は浸出水の蒸発残留物の濃度と浸出水量より算出し、蒸発水量はPenman法を基に算出した。

新6号は準好気性と嫌気性の2種の埋立構造を有する大型埋立実験槽で、H06号と同規模の高さ、容量を持つ実験槽である。準好気性槽は集排水管を有するがその上部に空気孔を併設する構造となっている。嫌気性槽はH06号同様に、底部に滞水層を設け、下部からの空気流入を防いだ。これら実験槽にはH06号同様、中間処理を施していない有機物中心の廃棄物が充填されているが、その組成は表(2)-1、表(2)-2に示すとおり、厨芥量はH06号の80%、これに草木や紙類を加えたDOC量は約50%と分解性有機物量がH06号に比べて少ない。また、新6号の降水量は前年度の福岡市の降水量を模擬して散水しているため、年間降水量は1400～2000mm/年と年によって異なり、月間降水量、及び年間降水量も変動している。これらの実験槽も重量計上に設置しておりその重量変化を

常時計測してH06号同様、図(2)-2に示す収支式よりガス発生量を求めた。

表(2)-2 各実験槽の充填廃棄物組成

H06号		組成割合		重量		有機物重量	炭素割合	炭素含有量	窒素割合	窒素含有量
充填廃棄物	(% -wet)	(% -dry)	(kg -wet)	(kg -dry)	(kg -dry)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	
	厨芥	35	15.1	302.4	68.6	56.0	45.8	31.4	4.6	3.2
古紙	20	31.2	172.8	141.4	102.5	51.2	72.4	1.6	2.3	
木材	10	10.0	86.4	45.4	44.0	46.4	21.1	1.8	0.8	
廃バルブ	20	25.5	172.8	115.4	111.9	73.2	43.2	1.1	1.3	
廃プラスチック	13	14.4	112.3	65.4	61.4	73.2	47.9	1.1	0.7	
カン・ビン	2	3.6	17.2	16.1	-	-	-	-	-	
合計	100.0	-	863.9	452.3	375.8	-	216.0	10.2	8.3	
DOC 厨芥+古紙	55.0	-	475.2	210.0	158.5	-	103.8	6.2	5.5	
DOC 厨芥+古紙+草木	65.0	-	561.6	255.4	202.5	-	124.9	8.0	6.3	
DOC 厨+紙+木+バ	78.0	-	734.4	370.8	314.4	-	168.1	-	7.6	

新6号		組成割合		重量		有機物重量	炭素割合 <sup>2</sup>	炭素含有量	窒素割合 <sup>2</sup>	窒素含有量
充填廃棄物	(% -dry)	(kg -wet) <sup>1</sup>	(kg -dry)	(kg -dry)	(kg -dry)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	
	厨芥	27.8	161.9	56.7	46.4	45.8	26.0	4.6	2.6	
古紙	44.8	260.6	91.3	79.9	51.2	46.7	1.6	1.5		
草木	2.5	14.6	5.1	4.5	46.4	2.4	1.8	0.1		
廃プラスチック	14.1	81.9	28.7	26.6	73.2	21.0	1.1	0.3		
不燃	4.6	27.1	9.5	-	-	-	-	-		
その他	6.2	36.0	12.6	9.2	-	-	-	-		
合計	-	582.0	203.9	166.6	-	96.1	-	4.5		
DOC 厨芥+古紙	-	422.5	148.0	126.3	-	72.7	-	4.1		
DOC 厨芥+古紙+草木	-	437.1	153.1	130.8	-	75.1	-	4.2		

1、全体の含水率(64.7%)を元に逆算 2、H06号における炭素・窒素含有割合を適用



好気性・嫌気性槽 
$$S_t = S_0 + \sum_{t=0}^n W_{i,t} - \sum_{t=0}^n (C_{e1,t} + W_{e1,t}) - \sum_{t=0}^n (C_{f,t} + W_{f,t})$$

準好気性槽 
$$S_t = S_0 + \sum_{t=0}^n W_{i,t} - \sum_{t=0}^n [(C_{e1,t} + W_{e1,t}) + (C_{e2,t} + W_{e2,t})] - \sum_{t=0}^n (C_{f,t} + W_{f,t})$$

$S_t$ : 廃棄物重量(kg)	$S_0$ : 実験開始時における充填廃棄物重量(kg)
$W_{i,t}$ : 人工降雨量(kg)	$C_{ft}$ : 浸出水中の可溶性物質の溶出量(kg)
$W_{f,t}$ : 浸出水量(kg)	$C_{e1,t}$ : 覆土表面からのガス化量(kg)
$C_{e2,t}$ : 浸出水集排水管及び空気孔からのガス化量(kg)	$W_{e1,t}$ : 覆土表面からの蒸発水量(kg)
$W_{e2,t}$ : 浸出水集排水管及び空気孔からの蒸発水量(kg)	

図(2)-2 大型埋立実験槽で用いた物質収支式

## (2) 廃棄物の分解に伴う有機汚濁物の液相への炭素分配量の定式化に関する検討

本研究の目的である有機汚濁物の液相への炭素分配量の定式化を検討するに当り、本実験データを基に物質収支式から算出された有機物分解量（炭素換算）、すなわちガス化量と溶出量の合計をFOD Waste Modelにより算出した分解性有機物量（DOC量：炭素量換算量）と比較し、有機汚濁物の溶出期間における分解された廃棄物の種類について検討した。

FOD Waste ModelはIPCCによる温室効果ガス排出インベントリガイドライン2006年版に記載されており、嫌気性埋立地からの $CH_4$ 発生量を推定する際に用いられ、廃棄物中炭素が嫌気性分解によって分解される速度がベースとなり計算されている。以下に基本式の一部を示す。

$$CH_4Emission_T = (DDOC_T \times EF) \dots (1)$$

$$DDOC_T = (W_{i,T} \times DOC_i \times (1 - e^{-k_i \cdot T})) \dots (2)$$

$$EF = DOC_f \times MCF \times F \times 16/12 \dots (3)$$

$DDOC_T$  = T年に分解される炭素量,  $W_i$  = 埋め立てられた廃棄物の種類別の量(kg),  $DOC_i$  = 埋め立てられた廃棄物の種類別の炭素含有率,  $k_i$  = 廃棄物の種類別の一時反応定数,  $EF$  = 排出係数,  $DOC_f$  = ガス化率,  $MCF$  = 好気性分解補正係数,  $F$  = 発生ガス中の $CH_4$ 比

本検討では、FOD Waste Modelの各パラメータのうち、 $DOC_f$ ：ガス化率、 $MCF$ ：好気性分解補正係数、 $F$ ：生成した埋立地ガスの $CH_4$ 比等のパラメータに関してはデフォルト値を、それ以外のパラメータに本実験の実測値を用いてDOC量を算出した（表(2)-3）。また、このモデルには廃棄物の種類ごとに分解される炭素量を試算できることから、本検討では易分解性有機物である厨芥が分解された場合の分解炭素量を $DDOC_{Food}$ とし、すべての廃棄物が分解された場合の分解炭素量を $DDOC_{All}$ として算出した。H06号大型埋立実験槽における分解炭素量（実験値）は、浸出水中に溶出された炭素量（TC溶出量）と、ガス化した炭素量（ $CO_2$ 、 $CH_4$ 中の炭素量）の合計値とした。

表(2)-3 H-06号大型埋立実験槽における各廃棄物の炭素含有量と

FOD Waste Modelデフォルト値

廃棄物の種類 i	廃棄物重量 W (kg)	DOC		炭素含有量(kg)	半減期 $t_{1/2}$ (年)	一時反応定数 k default
	H06号	H06号	default	H06号		
Food waste	302.4	0.10	0.15(0.08-0.20)	31.4	1.7	0.40(0.17-0.70)
Paper	172.8	0.42	0.40(0.36-0.45)	72.4	9.9	0.07(0.06-0.085)
Disposable nappies	172.8	0.25	0.24(0.18-0.32)	43.2	4.1	0.17(0.15-0.20)
Garden waste	86.4	0.24	0.20(0.18-0.22)	21.1	4.1	0.17(0.15-0.20)

次に、前節において検討した有機汚濁物の液相への炭素分配量に影響を及ぼす因子の結果を基に分配量のモデル化を行った。前節において廃棄物体積あたりの累積浸出水量と累積炭素溶出率の関係曲線は、埋立構造に関係なく分解された有機物が浸出水へ溶出する可溶化期間において、同一の傾きを持った直線を示すことが明らかになった。そこで、可溶化期間における有機汚濁物の液相への分配量のモデルは廃棄物体積当りの累積浸出水量を変数とする基本式で表す事とした（図(2)-3）。この基本式の $S_{dis}$ ：固相からの溶出係数は、前節の検討において得られた累積浸出水量と累積炭素溶出量の対数近似曲線の係数（30.81）を用いた。ここで、固相から溶出した炭素は廃棄物層内を通るみず道を通り系外へ排出される事から、浸出水量は廃棄物中の有効間隙率（30%：サブテーマ3）に寄与する量だけ排出されると考え、浸出水量の予測モデルにより求められた浸出水

量に有効間隙率を考慮する式とした (Eq(1))。また、散水により排出される炭素量は降水量の変化により影響を受けるため、その影響を廃棄物の単位体積当たりの累積浸出水量として考慮した。さらに、可溶化期間における累積浸出水量は浸出水量の算出式と可溶化期間を考慮して作成した (Eq(2))。

また、可溶化期間は埋立構造 (酸素供給量) によって異なるため、廃棄物の分解に伴う有機汚濁物の液相への分配量を求めるには、可溶化期間の算出式を構築する必要がある。本研究で用いた二つの大型埋立実験槽 (新6号及びH06号) の嫌気性槽では、浸出水中への有機物汚濁物 (炭素成分) の液相分配率 (溶出率: 厨芥ベース) が80%に達すると、可溶化からガス化プロセスへ移行する事が明らかとなったため、嫌気槽における可溶化期間はその溶出率になるまでの期間とし、実験値から算出した。準好気性槽の可溶化期間は、埋立構造の違いが与える埋立層内の好気割合を炭酸ガスメタン比 ( $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ ) で代用し、その値で嫌気の溶出率から計算した期間を可溶化期間とした (Eq(3))。本モデルで用いた各パラメータを表(2)-4に示す。年間降水量や、埋立槽容積、埋立槽表面積、浸出率等は実験条件値、実験の実測値及びそれらの値からの算出値を用いた。



図(2)-3 液相への炭素分配量を考慮した廃棄物中の有機炭素分解量予測モデル

表(2)-4 本モデルで用いた各パラメータ

パラメーター	H06号	新6号	補足
$S_{dis}$ : 固相からの溶出係数	30.81		実測値からの近似値
$p$ : 有効間隙率	0.3		サブテーマ3の計算値
$QI$ ( $L/m^3$ ): 単位体積当たり累積浸出水量	-	-	実測値から計算
$P$ (mm/年): 年間降水量	1600	1200	実験条件
$A$ ( $m^2$ ): 埋立地表面積	0.28	0.19	実験条件
$C$ (-): 浸出水率	0.85		実測値から計算
$Q_{LA}$ ( $m^3$ ): 埋立地容積	1.13	0.83	実験条件
$T_L$ (年): 可溶化期間	An:5.8 Se:2.2	An:2.6 Se:0.9	実測値
$DL_{Cmax}$ (kg): 可溶化期間で溶出される溶出量	An:24.4 Se:18.4	An:21.2 Se:4.4	実測値
$W_{kw}$ (kg): 埋立廃棄物中に含まれる厨芥中の炭素量	31.4	25.9	実験条件
$k_{An}$ (-): 可溶化期間の炭素溶出率(嫌気性)	0.8		実測値から計算
$K_{Ac}$ (-): 炭酸ガスメタン比( $CO_2/CH_4$ )	1.6	2.5	実測値から計算

#### 4. 結果及び考察

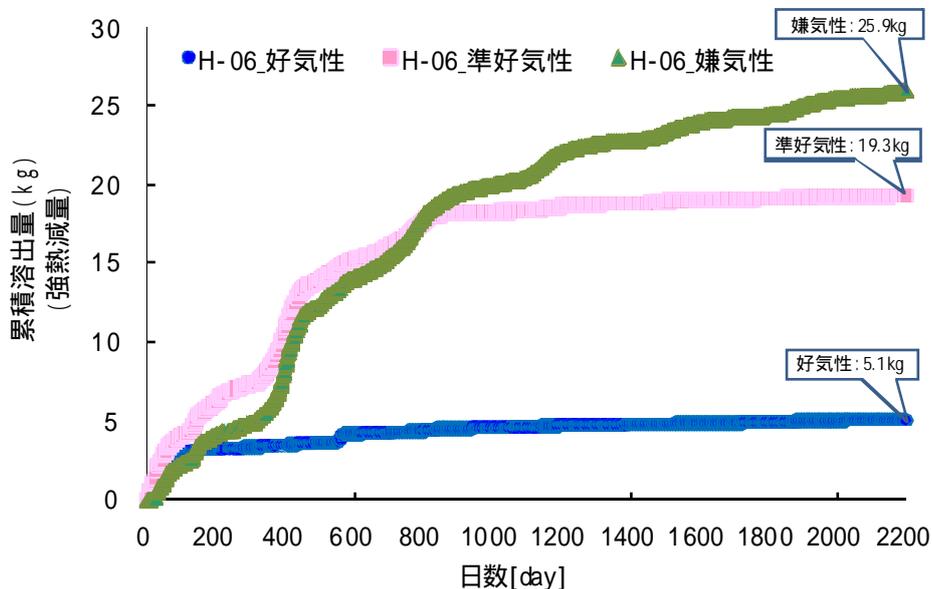
##### (1) 浸出水制御機能に与える影響因子の検討

###### 1) 埋立構造(酸素供給量)の違いによる有機物の溶出傾向

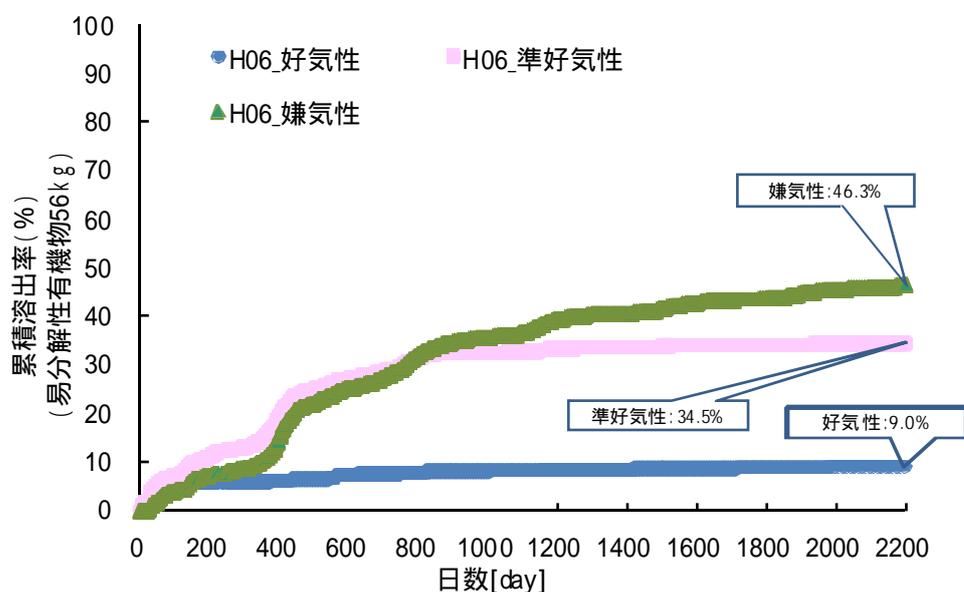
H06号大型埋立実験槽における浸出水中の有機物(強熱減量)の累積溶出量、及び溶出率の経時変化を図(2)-4、図(2)-5に示す。実験開始後70日間における有機物の浸出水への溶出は、好気性槽、準好気性槽及び嫌気性槽のいずれにおいても1kg/月前後でほぼ一定で、埋立構造の差は小さかった。しかし、好気性槽は70日目を境に急速に溶出量は減少し、それ以前の1/10の0.3kg/月以下で推移した。一方、準好気性槽および嫌気性槽では、70日目以降もそれ以前の溶出速度とほぼ等しい速度で有機物の溶出が生じ、準好気性槽では新たに空気孔が設置された約780日目までその溶出は続いた。780日目以降における準好気性槽の溶出速度は好気性槽の70日目以降の速度に等しかった。これに対して、嫌気性槽では1200日目以降、溶出速度は若干緩慢になるが、それ以降も2200日の現時点まで溶出は続いており、2200日経過時点における累積有機物溶出量は好気性が5.1kg、準好気性が19.3kg、および嫌気性が26.4kgであった。好気性槽及び準好気性槽では、浸出水への有機物の溶出速度が急激に低下した時期に、浸出水のpHが中性に達したことから、廃棄物の分解によって可溶化された有機物のガスへの転換が促進されたために、浸出水への溶出が低下したものと推察される。すなわち、酸素供給量が少ないと、溶解性有機物のガスへの転換が遅れるために、浸出水への有機物溶出量が大きくなるものと考えられ、酸素供給量が液相への分配量に与える影響は大きいことがわかった。

更に、この浸出水への溶出量を充填廃棄物中の易分解性有機物(厨芥量)当りの割合(溶出率)で見ると、好気性槽で9.0%、準好気性槽34.5%、嫌気性槽46.5%であり、好気性槽の液相への分配率が非常に小さいことが確認された。また、準好気性槽においても空気孔を新たに設置した780日

目以降の溶出率は4.5%と、70日目以降の好気性の溶出率(4.4%)とほぼ等しい値であったことから、浸出水集排水管から十分な空気の流入が確保されれば、好気性と同等の浸出水制御機能が得られる事がわかった。



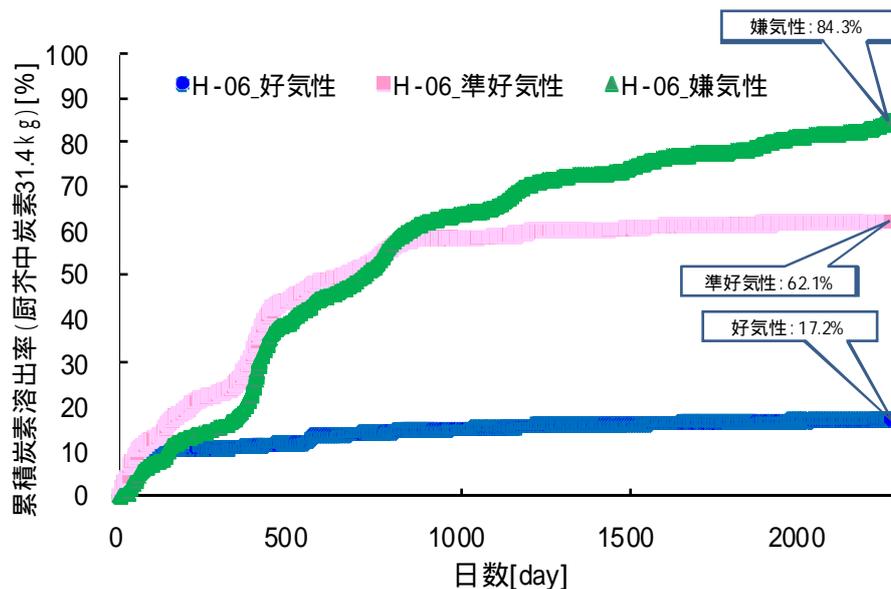
図(2)-4 浸出水中の累積有機物溶出量(強熱減量)の経時変化(H06号)



図(2)-5 浸出水中の累積有機物溶出率(易分解性有機物中)の経時変化(H06号)

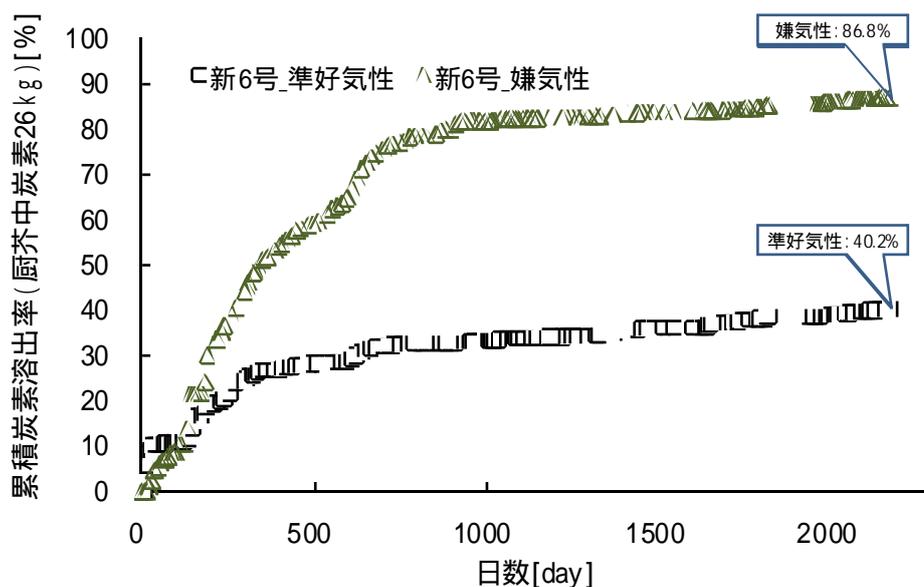
以上の有機物溶出率を炭素溶出率(充填易分解性有機物中の炭素量31.4kg当りの全炭素溶出量の割合)で見ると(図(2)-6)、嫌気性槽の累積炭素溶出率は検討期間(2200日)において80%以上が溶出しており、実験槽に充填された厨芥の炭素成分のほとんどが液相へ移行していることがわかった。2200日時点においてもガスの発生が少ないことから、H06号嫌気性槽のように可溶化期間が長い場合、易分解性有機物のほとんどが浸出水負荷となり槽外へ流出することがわかった。この時

点での累積炭素溶出率は嫌気性槽で84.3%、準好気性槽で62.1%、好気性槽で17.2%であった。



図(2)-6 易分解性有機物(厨芥)中の炭素溶出率の経時変化 (H06号)

ここで既存大型埋立実験槽の新6号における累積炭素溶出率(厨芥中炭素26.0kg当たり)の経時変化(図(2)-7)を見ると、同検討期間(2200日)における嫌気性槽での溶出率は86.8%を示しており、溶出傾向は異なるがH06号の嫌気性槽の溶出率と類似する値を示した。しかし、準好気性槽においては溶出傾向だけでなく溶出率も新6号(40.2%)とH06号(62.1%)で異なる結果を示した。その理由として、H06号準好気性槽では浸出水集排水管の管径を780日目で改良しており、それ以前の実験槽内部はより嫌氣的雰囲気であった。しかし、新6号では実験開始時においてH06号準好気性の改良後と同様の空気孔が設置されていたため、実験槽への酸素供給量が多く溶出率が小さくなったものと考えられる。すなわち、準好気性構造は空気自然流入により酸素を供給する構造であり、浸出水集排水管の設置条件によって酸素の供給量が異なりそれが溶出率に影響を与える事がわかった。

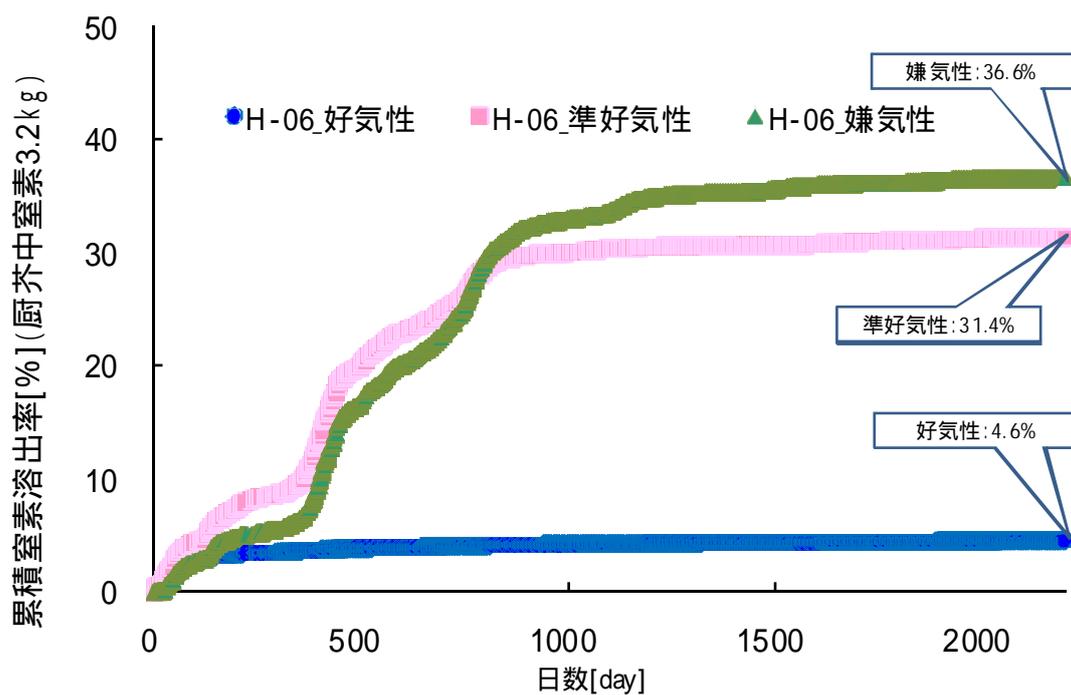


図(2)-7 易分解性有機物(厨芥)中の炭素溶出率の経時変化 (新6号)

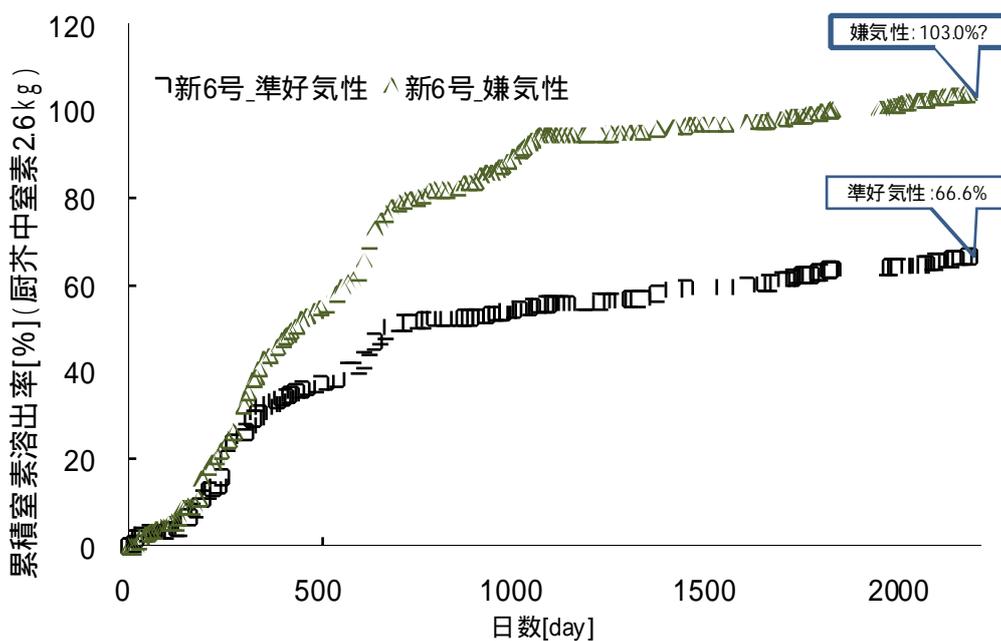
次に、窒素成分の浸出水への溶出率について埋立構造別の比較を行った。廃棄物中に含まれる有機性窒素は、まず可溶化により有機態窒素やアンモニア態窒素に分解されるが、その後は、酸素供給量の違いによって硝化反応が優先するのか、硝化に続き脱窒反応まで進行するのかが決まる。過去の研究によって、好気性領域及び嫌気性領域が共存する準好気性埋立構造の場合、硝化・脱窒反応が進行するため、浸出水への窒素成分の溶出が嫌気性埋立に比べて少ないことが明らかになっている。

そこで、累積炭素溶出率同様、各埋立構造について充填した易分解性有機物に含まれている全窒素量 (3.2kg) に対し浸出水として溶出する累積窒素溶出率を比較した (図(2)-8、図(2)-9)。その結果、H06号では検討期間(2200日目)の溶出率は、いずれの実験槽においても累積炭素溶出率に比べて低かった。検討期間においては好気性槽で4.6%、準好気性槽で31.4%、嫌気性槽で36.6%となり、酸素供給量が少ないほど溶出率大きい傾向を示した。次に新6号からの累積窒素溶出率を比較すると同様に酸素供給量の少ない嫌気性槽において溶出率が増加したが、その溶出率はH06号とは異なる値を示した。

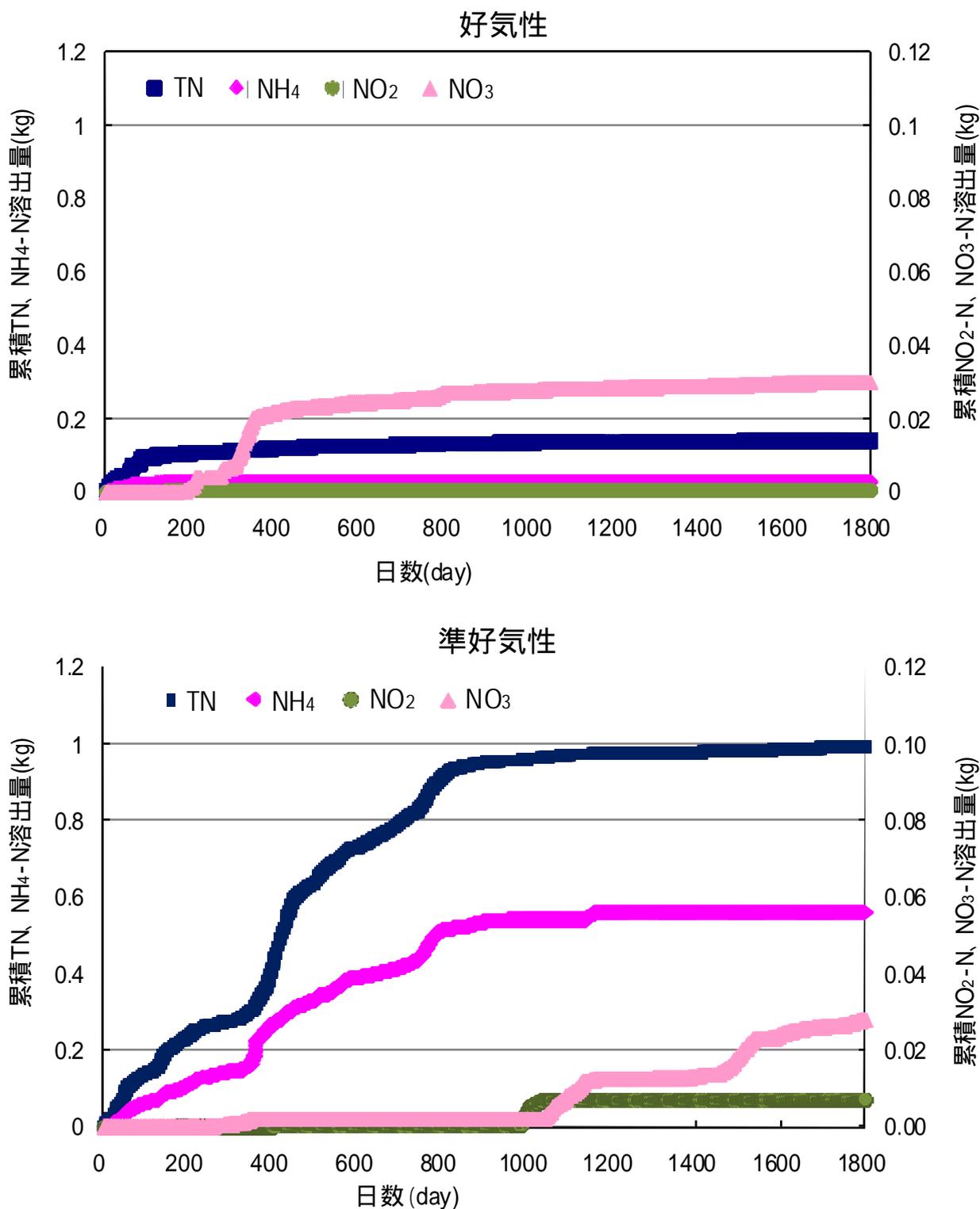
酸素供給量の違いが窒素溶出に影響を与える理由として、好気性及び準好気性構造では好気性微生物の活性が高いために、可溶化した窒素の一部が微生物内へ取り込まれたことや、硝化・脱窒反応による大気への放出、空気供給によるアンモニアストリッピングなどが考えられる。このことは、好気性及び準好気性槽では、窒素の溶出量が減衰する時期においてアンモニア濃度が急激に低下し、その後亜硝酸及び硝酸が検出されることやpHが8~9の弱アルカリ性であることから予想される(図(2)-10)。



図(2)-8 易分解性有機物(厨芥)中の窒素溶出率の経時変化 (H06号)



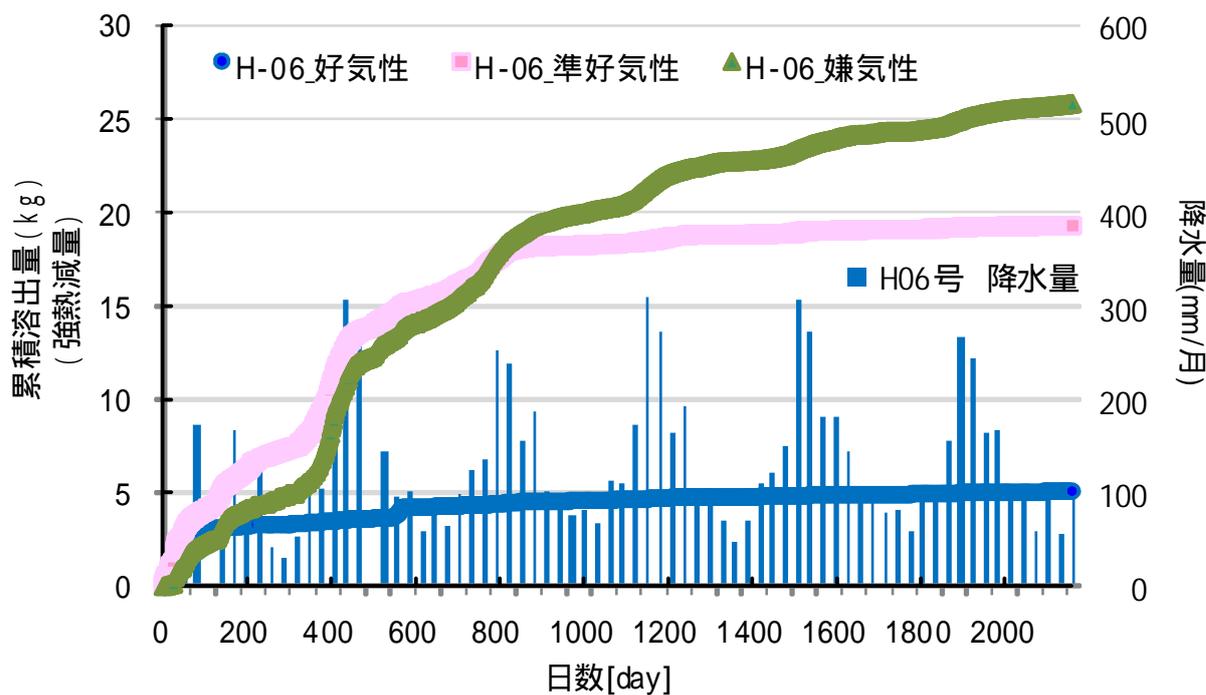
図(2)-9 易分解性有機物(厨芥)中の窒素溶出率の経時変化 (新6号)



図(2)-10 好気性及び準好気性の可溶化期間における窒素形態別の累積溶出量 (H06号)

## 2) 浸透水量(降水量)が有機物の溶出傾向に与える影響

一般に、廃棄物の分解により可溶化された有機物は、降雨によって発生した浸出水、つまり液相に溶解し、その一部がガスへと変換される。しかし、降水量が埋立地の貯留水量を超えると、溶解された汚濁物は系外へ放出される。また、降水量によって廃棄物層内の気相間隙量が変化するため、好気性及び準好気性埋立構造等の好気性分解を促進する埋立構造の場合、降水量の影響は大きいと予想される。このため、降水量は廃棄物の分解速度及び浸出水中の汚濁物の溶出速度にも影響を与えられとされる。そこで、H06号の溶出量と降水量の関係(図(2)-11)をみると、降水量が多い期間において溶出量が増加する傾向を示した。特に、可溶化が主体で進行した期間(嫌気性槽：2100日間、準好気性槽：780日間、好気性槽：90日間)においてその傾向は顕著であった。ここで、嫌気性槽及び準好気性槽において可溶化の進行段階である400日から800日目の期間について、最も降水量の多い6月(75.8L)と、降水量の少ない12月(16.6L)における各埋立構造の溶出量を比較すると(表(2)-5)、嫌気性槽の6月の溶出量は2月の溶出量の13倍、準好気性槽では23倍と、降水量に比べ溶出量の増加割合は大きく、特に準好気性槽における増加が大きかった。このことから、準好気性槽では降雨によって廃棄物層内の気相間隙が浸出水によって飽和され、酸素が浸入できない状況になったものと予想され、これによってガス化が抑制され、浸出水への汚濁負荷が上昇したと考えられる。

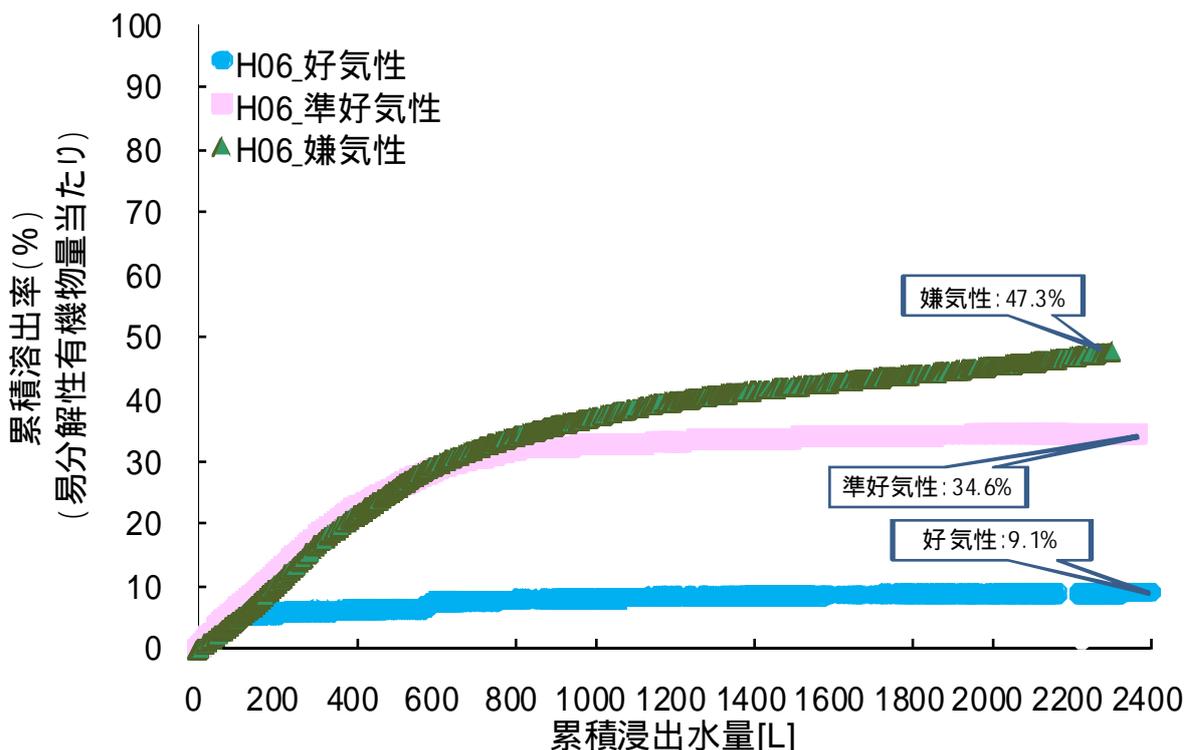


図(2)-11 H06号大型埋立実験槽における降水量(月毎)の変化

表(2)-5 降水量の異なる時期における溶出量の変化

検討期間	降水量 (L/月)	累積炭素溶出量(kg)		
		嫌気性	準好気性	好気性
2007年6月:(382~411日)	75.8	2.13	1.81	0.02
2008年2月:(627~655日)	16.6	0.16	0.08	0.01

以上の検討から、降水量が浸出水への汚濁物の溶解を促進すること、及び廃棄物のガス化を抑制することの2つの要因によって浸出水の汚濁負荷を上昇させていることが明らかとなった。そこで、累積浸出水量と累積有機物溶出率との関係図を作成し、降水量と溶出量の無次元化を行い、この両要因の影響について検討した(図(2)-12)。その結果、溶出率の時間変化と異なり、可溶化期間における浸出水への有機物の溶出率は、全ての埋立構造で等しく、いずれも一定の割合であった。このことから、可溶化期間における浸出水への溶出は酸素よりも降水量の影響の方が大きいこと、酸素の影響は可溶化期間の長さに影響していることがわかった。また、溶出期間において、全ての実験槽で浸出水量に対する溶出量が一定であることから、液相への分配量の定式化において埋立構造によらず一つの式で表現する事が出来ると考えられる。ただし、可溶化期間の終了時期については、酸素の影響を考慮した式の作成が必要である。

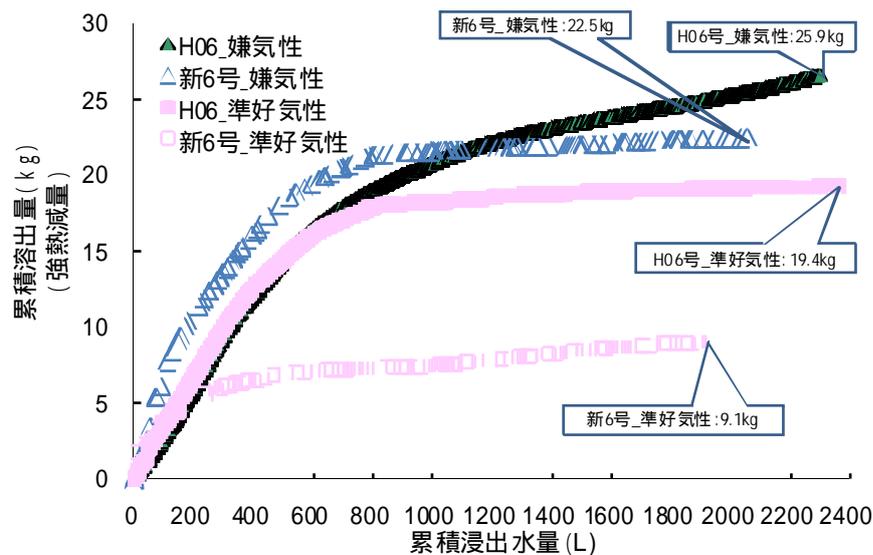


図(2)-12 累積浸出水量と(易分解性有機物量当たり)累積有機物溶出率との関係

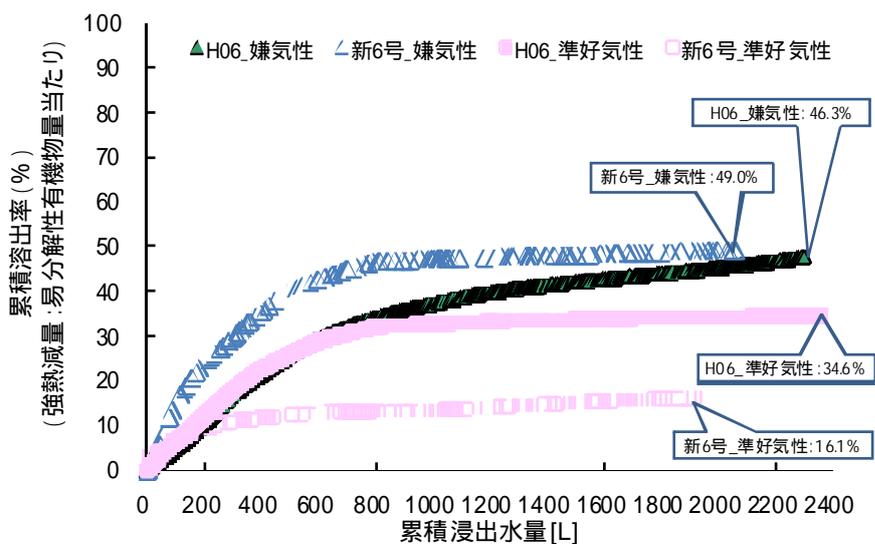
次に、年間降水量の違いが有機物溶出量に与える影響を、H06号(1600mm/年)と新6号(1400~2000mm/年)を比較し、その再現性を確認した(図(2)-13、図(2)-14)。その結果、新6号もH06号同様に、埋立構造に関係なく累積有機物溶出量は浸出水量の増加とともに直線的に増加した。また、準好気性槽は嫌気性槽に比べて、浸出水への溶出期間は短かった。これらのことから、可溶

化した有機物の溶出への降水量の影響が大きいことは確認された。しかし、新6号では、嫌気性槽及び準好気性槽ともに、H06号に比べて浸出水量当りの溶出率の増加率は高く、浸出水への有機物の溶出期間は短かった。この傾向は、易分解性有機物量を無次元化した溶出率においても同様な傾向であった。これらのことから、有機物の浸出水への溶出に易分解性有機物量や降水量以外の要因も影響しているものと考えられるため、その要因を検討した。

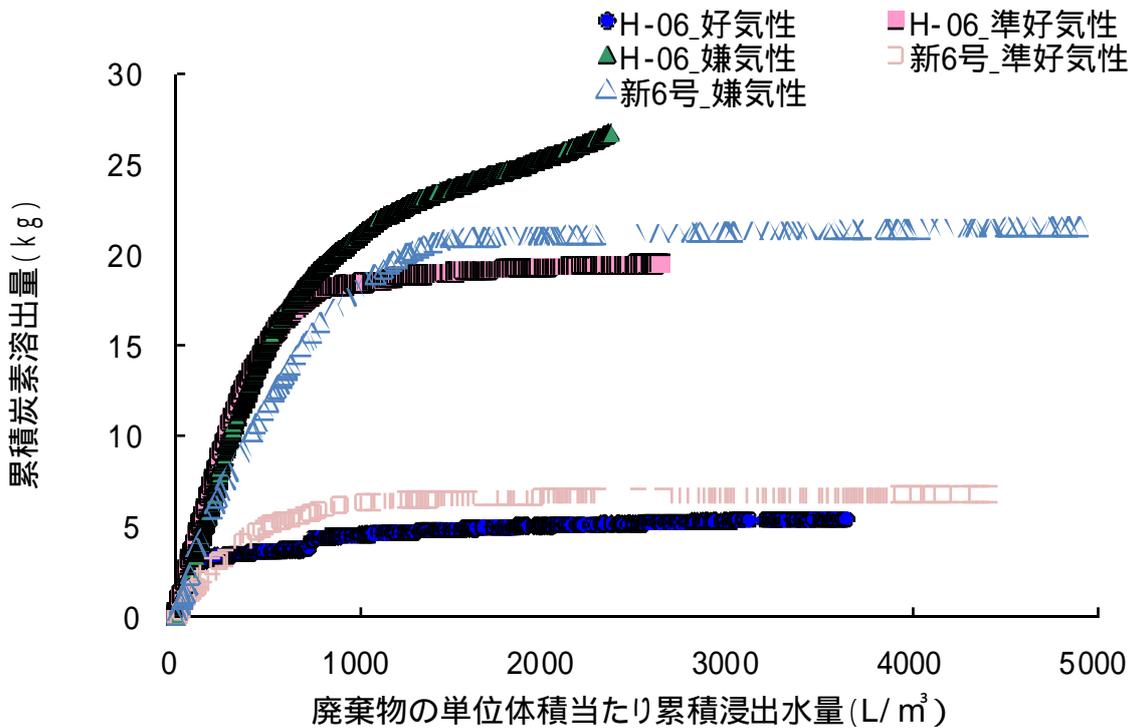
新6号とH06号の実験条件のうち、有機物の分解や溶出に影響及ぼす上記影響要因以外の要因として充填密度が挙げられる。充填密度は大気や降雨の浸入量に影響与える重要な要因である。表(2)-1に示すように、新6号の充填密度は0.70、H06号は0.76t/m<sup>3</sup>と、新6号はH06号に比べて間隙率が高く、新6号はH06号に比べて大気や降雨が浸入し易い状況にある。この影響によって、新6号準好気性槽の有機物の溶出期間はH06号準好気性槽に比べて短かったものと推察される。そこで、降雨の浸入量の影響について、廃棄物の体積当たりの浸出水量を算出し、その値と累積炭素溶出量の関係について検討した(図(2)-15)。その結果、可溶化期間(実験開始初期)での、単位体積当たりの累積浸出水量に対する炭素溶出量は、埋立構造や実験条件の違いに依存しない事が確認された。このことは、廃棄物体積当たりの降水量が有機物の溶出量に影響を及ぼすことを示しており、液相への分配量を決定する影響因子は槽当たりの降水量ではなく、槽に充填された廃棄物の体積当たりの降水量であることがわかった。

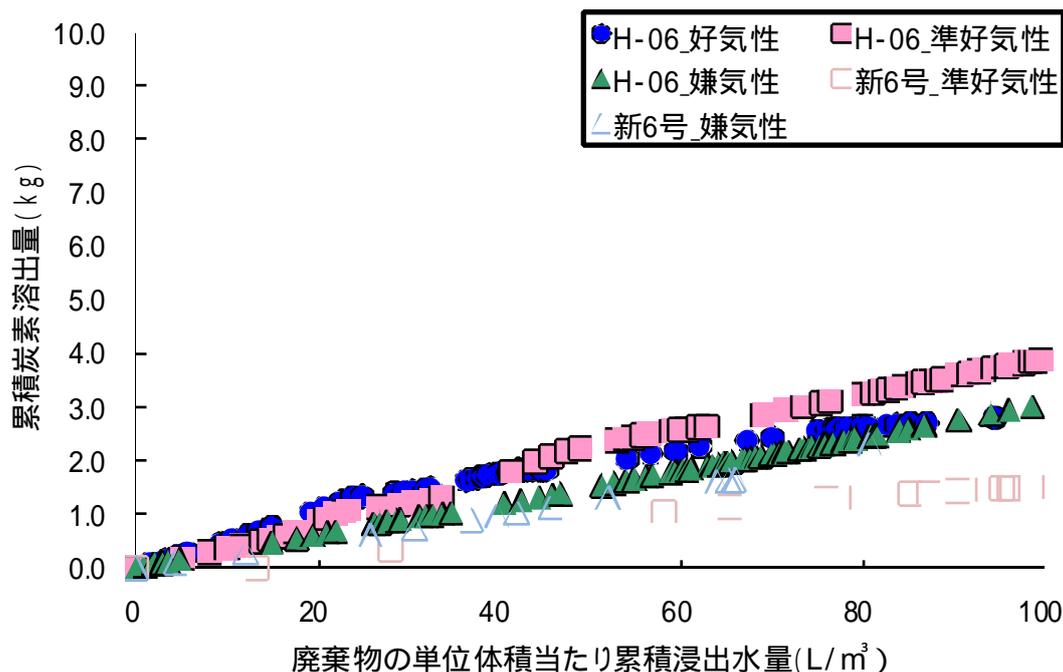


図(2)-13 各嫌気性槽からの累積有機物溶出量と累積浸出水量



図(2)-14 各嫌気性槽からの累積有機物溶出率と累積浸出水量





図(2)-15 単位体積量当り累積浸出水量に対する累積炭素溶出量（下拡大図：0～100L/m<sup>3</sup>）

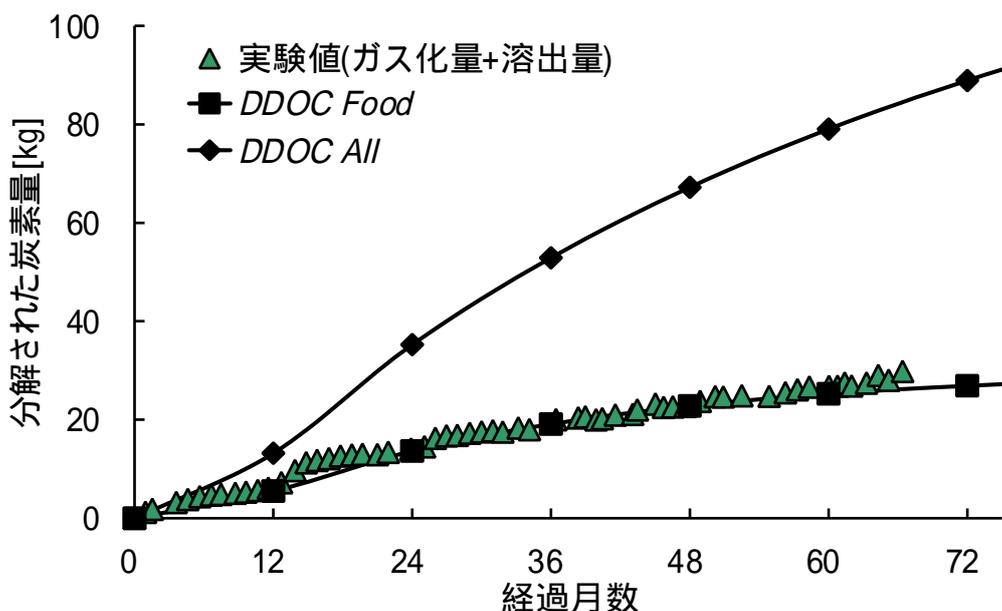
## （2）廃棄物の分解に伴う有機汚濁物の液相への炭素分配量の定式化に関する検討

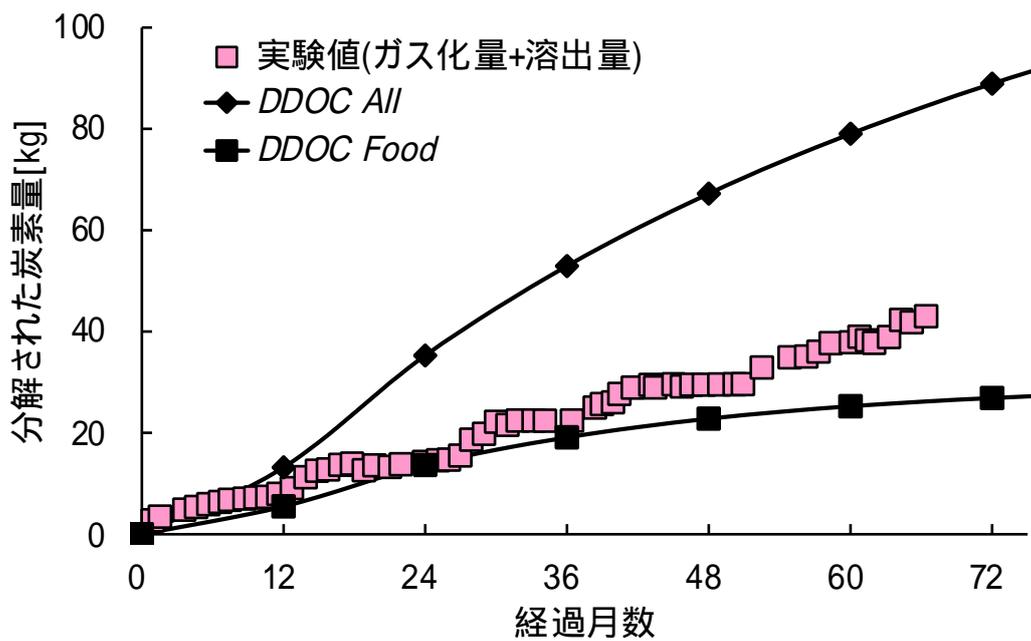
### 1) FOD Waste Modelと実測値の比較による可溶化期間における分解有機物の種類の検討

図(2)-16に嫌気、及び準好気性槽における分解炭素量とFOD Waste Modelにより予測された $DDOC_{Food}$ と $DDOC_{All}$ を示す。まず、嫌気性槽においては、実験期間（2200日間）を通して実験値がモデルによって予測された $DDOC_{All}$ の値を下回ったが、その値は $DDOC_{Food}$ と一致した。また、準好気性槽においても、1000日間（36ヶ月間）では嫌気性槽とほぼ同様の傾向を示した。一般に、半減期が最も短い厨芥等の分解が最初に進行することを考えると、本実験値と $DDOC_{Food}$ が一致した事は理論的に問題なく、可溶化期間における分解廃棄物は厨芥が主体であると言える。本実験値と予測値の $DDOC_{All}$ に差が生じた理由として、FOD Waste Modelではすべての廃棄物種が埋立処分直後から分解が始まるとし、廃棄物種の分解速度の違いを半減期によって表す式となっているためであると考えられる。ただし、準好気性槽では、ガス化が進行した1100日目（36ヶ月目）以降では実験値と $DDOC_{Food}$ の値（厨芥が分解された量）に差が生じ、厨芥以外の廃棄物の分解が進行したことが予想された。これは、準好気性槽において好気性分解が活発化した時期と一致しており、好気性微生物による有機物の分解速度が上昇し、厨芥が消失したことによって他の廃棄物の分解が開始されたためと考えられる。以上のように、嫌気性、準好気性の両埋立構造においては、可溶化期間における炭素の分解量は厨芥のみを用いたFOD Waste Modelの予測値と実験値が一致しており、本研究で提案する液相への有機汚濁物の分配量の算出式に用いる各種実験値や係数が妥当で

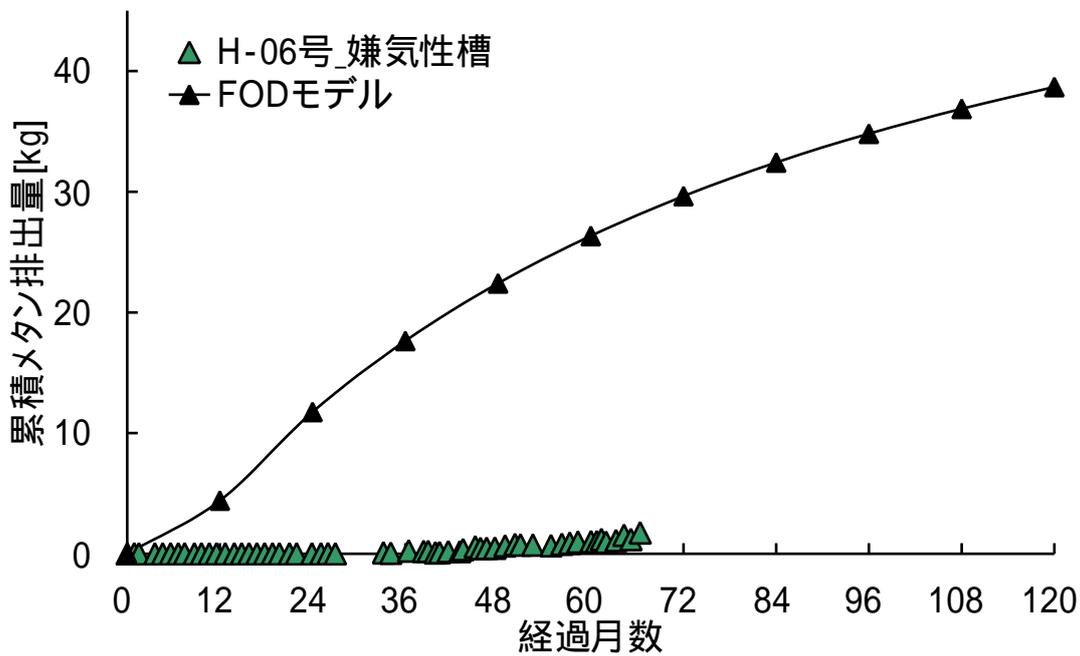
あることが示唆された。また、半減期が長い廃棄物が埋立処分されている場合や準好気性槽のように好気性分解が主体で進行した場合、嫌気性分解をベースとしているFOD Waste Modelでの予測は難しい事が示唆された。

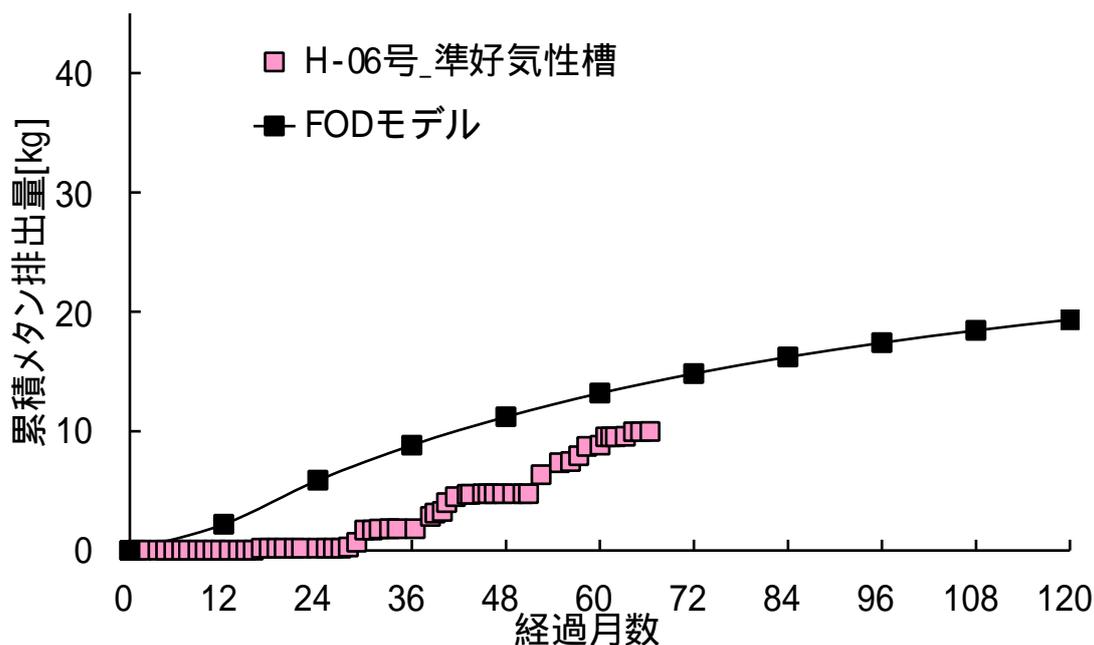
更に、嫌気性槽、及び準好気性槽におけるFOD Waste Modelを用いた累積メタン排出量の予測値と本実験の実測値を比較する(図(2)-17)。実測値は物質収支により算出したガス発生量を基に、発生ガスのメタン濃度を乗じて算出した。嫌気性槽の実測値では、メタン排出量は45ヶ月(1350日目)以降徐々に上昇したが、FOD Waste Modelの予測値では、実験開始45ヶ月目(360日目)におけるメタン排出量は約20kgであり、本実験の実測値と一致しないことが明らかとなった。また、準好気性槽においてもFOD Waste Modelの予測値と実測値は一致しなかった。しかし、準好気性槽では実験開始から26ヶ月目(780日目)に新たに空気孔を設置し、準好気性本来の機能の回復を図った直後からメタンの発生が確認され、その発生量(メタン排出量)の推移はFOD Waste Modelの推移と類似した。このことから、可溶化期間がほとんどなく、埋立直後からガス化が進行する場合、FOD Waste Modelによるメタン排出量の予測は可能であると考えられる。しかし、降水量が多い地域においては可溶化期間が存在することから、液相への分配量は無視できると仮定したFOD Waste Modelでは液相への分配量のみならず、気相への分配量(ガス化量)を予測することは難しいと考えられる。これは、本モデルが年間降水量が少なく、かつ雨水浸透を極力排除する欧米型の埋立地「Dry Tomb」型の埋立構造を想定しており、廃棄物中の炭素成分の溶出に伴う埋立地系外への排水を無視できると仮定したモデルであるためである。しかしながら、本実験結果から推測すると、降水量の多いアジア・モンスーン地域を想定した埋立地の場合、浸出水と共に排除される炭素成分が多く、その量は廃棄物中分解炭素量の約10~30%となり、その量は無視することはできない。また、FOD Waste ModelではDelay Timeとして最大2年間の分解遅延時間を設定できるが、その遅延期間において分解された有機物量については考慮されていない。H06号大型埋立実験では嫌気性槽の加水分解期が5.8年(2100日)にも及んでおり、この実験結果から判断すると、遅延期間において分解された有機物量(充填厨芥中46.3%)について考慮されていないことがFOD Waste Modelの予測値と実測値に差が生じた原因であると考えられる。





図(2)-16 嫌気性(上)、準好気性(下)における分解炭素量と分解物毎のDDOCの比較





図(2)-17 嫌気性槽（上）、準好気性槽（下）における  
累積CH<sub>4</sub>発生量とFOD Waste Model予測結果

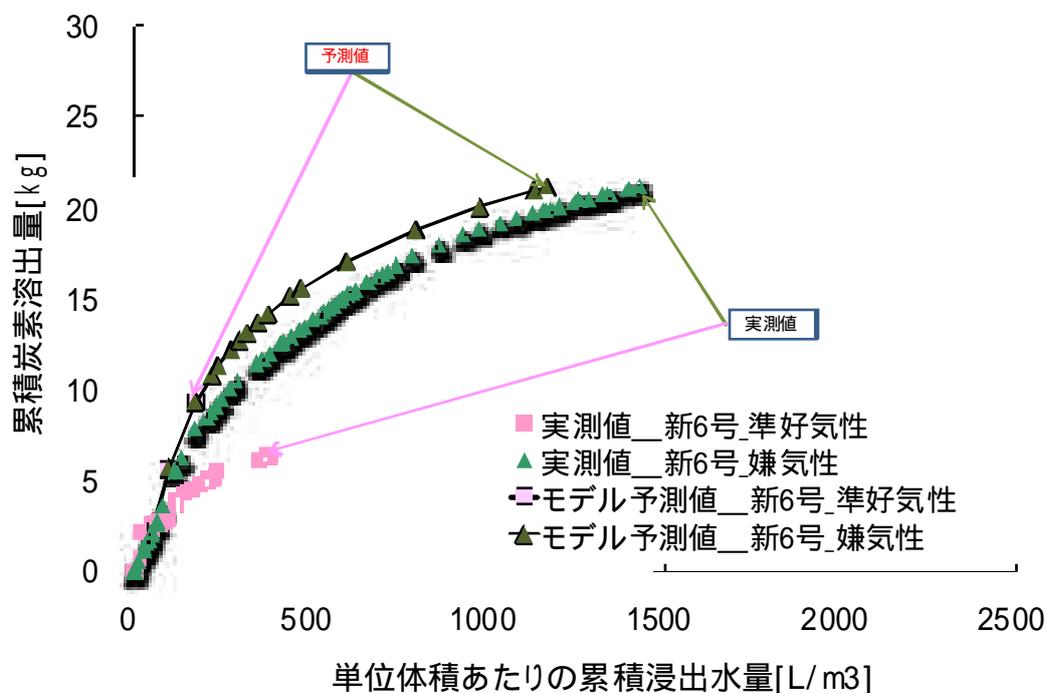
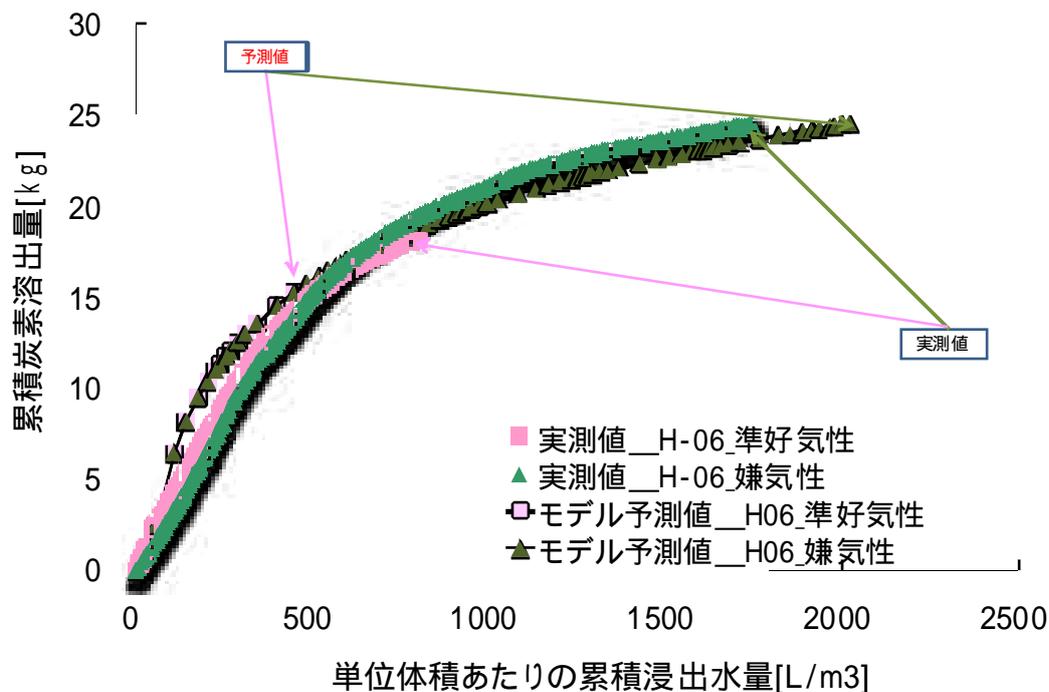
## 2) 本研究において構築した予測モデルの妥当性の検討

本予測モデル（図(2)-3）による液相への炭素成分の分配量が予測可能かについて、H06号、新6号の両実験において可溶化期間の溶出量の予測値と実測値を比較することによって検討した（表(2)-6、図(2)-18）。その結果、嫌気性槽においては両実験とも炭素成分の液相への分配量の予測値と実測値はほぼ一致した。一方、準好気性槽においてもH06号では実測値が予測値に比べて若干低い値であるもの、その溶出傾向は一致する事が確認された。しかし、新6号の準好気性槽では溶出量、及び溶出傾向ともに予測値と実測値は一致しなかった。これは、本予測モデルに用いた埋立地内部の好気状態を表す炭酸ガスメタン比が、新6号の場合、変動が大きかった事が原因であると考える。

以上のように、廃棄物から排出される有機炭素の液相への分配傾向、及び可溶化期間について実測値と予測値は概ね一致する結果となった。このことから、降水量と炭酸ガスメタン比によって好気性の影響を考慮したガス化プロセスへの移行時期を基に構築した固相から液相への炭素分配量の算出式は有用であることがわかった。

表(2)-6 可溶化期間における液相への炭素分配量の予測値と実測値

実験名	埋立構造	予測値(kg)	実測値(kg)
H06号	嫌気性	25.1	24.4
	準好気性	15.7	18.4
新6号	嫌気性	20.7	21.2
	準好気性	9.4	6.4



図(2)-18 可溶化期間での溶出量予測と実測値の比較 (上: H06号、下: 新6号)

### 3) 本予測モデルを用いた各大型埋立実験槽からの浸出水への分配量、及び削減効果

本研究で提案した予測モデルを用いて、H06号及び新6号の埋立構造別の可溶化期間において浸出水中に溶出される炭素量を算出し比較・検討した(表(2)-7)。その結果、新6号において嫌気性槽では充填廃棄物中全炭素の21.5%、準好気性槽においては9.8%が溶出している。また、分解性有機炭素量でみると、嫌気性槽では30%近く準好気性槽では13%近くが浸出水として溶出している事がわかった。ここで両埋立構造の溶出量を比較すると、準好気性槽では嫌気性槽に比べ可溶化期間における浸出水中への炭素溶出量が54%削減する事がわかった。次に、H06号の結果では、同様に嫌気性槽において廃棄物中全炭素の11.6%、準好気性槽では7.2%の溶出率、分解性有機炭素量では嫌気性槽で14.9~24.2%、準好気性槽で9.3~15.1%の溶出率を示し、その削減効果は38%であった。以上の結果から、廃棄物分解に伴う準好気性埋立の浸出水への炭素溶出量は嫌気性埋立に比べ約40%から約50%の削減効果がある事が確認された。

表(2)-7 可溶化期間における埋立構造別の充填炭素量に対する溶出率、及び削減効果

	新6号				H06号				
	炭素含有量	溶出率			炭素含有量	溶出率			
		嫌気	準好気	削減効果		嫌気	準好気	削減効果	
充填廃棄物	(kg)	(%)	(%)		(kg)	(%)	(%)		
厨芥	26.0	-	-	-	31.4	-	-	-	
古紙	46.7	-	-	-	72.4	-	-	-	
木材	2.4	-	-	-	21.1	-	-	-	
廃パルプ	-	-	-	-	43.2	-	-	-	
廃プラスチック	21.0	-	-	-	47.9	-	-	-	
カン・ビン	-	-	-	-	-	-	-	-	
充填廃棄物中全炭素	96.1	21.5	9.8		216.0	11.6	7.2		
DOC	厨芥+古紙	72.7	28.4	12.9	嫌気 準好気 54%削減	103.8	24.2	15.1	嫌気 準好気 38%削減
	厨芥+古紙+草木	75.1	27.5	12.5		124.9	20.1	12.5	
	厨+紙+木+パ	-	-	-		168.1	14.9	9.3	

### (3) 総合考察

本研究では、各埋立地ガス放出緩和技術が、浸出水中への有機物溶出量に与える影響を、長期大型埋立実験槽の実験結果を用いて比較検討した。その結果、埋立地内への酸素供給量(埋立構造)と降水量が液相への分配量に影響を与えている事がわかった。そこで、それらの影響を考慮した“液相分配量予測モデル”を構築した。

$$D_{L-C} = S_{dis} \times \rho \times \ln(Ql) \quad Ql = \frac{P \times A \times C}{Q_{LA}} \times T_L$$

$D_{L-C}$  (kg) : 液相炭素分配量、 $S_{dis}$ : 固相からの溶出係数、 $\rho$  (-) : 有効間隙率、 $Ql$  ( $L/m^3$ ) : 単位体積当たり累積浸出水量、 $P$  (mm/年) : 年間降水量、 $A$  ( $m^2$ ) : 埋立地面積、 $C$  (-) : 浸出水率、 $Q_{LA}$  : 埋立地容積 ( $m^3$ )、 $T_L$  (年) : 可溶化期間

また、これらの分配量は可溶化期間に影響を受ける事が解り、その可溶化期間の予測モデルとして以下に示す式を構築した。

$$T_L : DL_{C_{max}} = W_{kw} \times \frac{k_{An}}{K_{Ae}}$$

$T_L$ :  $DL_{C_{max}}$  に達するまでの期間 (年)、 $DL_{C_{max}}$  (kg) : 可溶化期間の溶出量、 $W_{kw}$  (kg) : 埋立廃棄物中に含まれる厨芥中の炭素量、 $k_{An}$  (-) : 可溶化期間の炭素溶出率 (嫌気性)、 $K_{Ae}$  (-) : 埋立構造別の好気係数 (炭酸ガスメタン比)

これらのモデルを用いて、各埋立地ガス放出緩和技術における浸出水への有機汚濁物質の分配量を算出すると、アジア地域の降水量、及びごみ組成を模擬した本実験の大型埋立実験槽では、準好気性埋立の分配量が嫌気性埋立に比べ約40%から50%の削減効果がある事が定量的に確認された。本予測モデルでは埋立構造の違い、および降水量の違いによる影響が反映されており、その汎用性が高い事が考えられる。また、これまで浸出水への炭素溶出による系外への排出量を無視していた欧米に比べ、年間降水量が2~3倍あるアジア地域では、浸出水量の増加に伴う有機物の溶出が危惧される (表(2)-8)。今回提唱した液相への分配量予測モデルを用いる事でアジア地域における埋立地ガス放出の緩和技術の浸出水制御機能を、気象条件及び埋立構造の違いから評価する事ができると共に、埋立地からの温室効果ガスの発生量を精度良く把握する事が出来る。このことから、本研究結果は途上国への埋立地ガス放出緩和技術支援、さらには地球温暖化の防止に繋がると考えられる。

表(2)-8 主要な都市の年間降水量

国 (地域)	都 市	年間降水量 (mm)
<b>アジア</b>		
日本	東京	1,467
インドネシア	ジャカルタ	1,903
韓国	ソウル	1,343
タイ	バンコク	1,530
中国	上海 (シャンハイ)	1,155
	北京 (ペキン)	575
	香港	2,360
フィリピン	マニラ	1,715
マレーシア	クアラルンプール	2,390
<b>北アメリカ</b>		
アメリカ合衆国	サンフランシスコ	501
	ニューヨーク	1,123
カナダ	モントリオール	990
<b>ヨーロッパ</b>		
イギリス	ロンドン	751
イタリア	ローマ	717
オーストリア	ウィーン	620
スペイン	マドリード	440
デンマーク	コペンハーゲン	615
ドイツ	ベルリン	571
フランス	パリ	648

(出典：2009年度版理科年表)

## 5．本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

これまで、埋立地からの温室効果ガスの発生量は嫌気性埋立を基準に、一定の降水量を用いて算出されていたため、埋立構造(酸素供給量)、気候帯(降水量)、及び廃棄物の種類等の地域特性があまり考慮されていなかった。本研究により、これらの要因が温室効果ガスの発生に及ぼす影響が明確になり、それらを考慮した廃棄物分解に伴う、浸出水への汚濁負荷量の予測モデルが提唱された事で、地域の特性に即したより精度の高い発生ガス量の予測が行えるようになる。この事は様々な気象状況や、廃棄物組成の異なる途上国において、その地域に合ったCDM技術の選択を可能とするものである。

### (2) 環境政策への貢献

#### < 行政が既に活用した成果 >

本研究により、「準好気性埋立構造」の地球温暖化効果ガスの削減効果と浸出水による周辺環境への汚濁負荷低減効果が定量化されたことで、本埋立構造がCDM事業としてUNFCCCに認可されるにあたって重要な情報源となった。これにより、廃棄物処理処分、特に埋立処分のための財源がない国々へ、埋立処分に特化した資金が投入され、埋立地の改善による周辺環境負荷の低減が可能となり、延いては、地球全体の環境保全に寄与出来る。

#### < 行政が活用することが見込まれる成果 >

特に記載すべき事項はない。

## 6．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

## 7．研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### < 論文(査読あり) >

- 1) Osamu Hirata, Yasushi Matsufuji, Ayako Tanaka, Ryuji Yanase (2011) Waste stabilization mechanism by a recirculatory semi-aerobic landfill with the aeration system, Journal of Material Cycles and Waste Management, DOI 10.1007/s10163-011-0036-7.
- 2) 宇野慎一、除蘇士、澤村啓美、立藤綾子、松藤康司 (2012) 循環浸出水のリン添加が循環式準好気性埋立構造の廃棄物分解及び浸出水浄化機能に及ぼす影響, 都市清掃, Vol.65, No.307, pp.280-284.
- 3) 真次寛、平田修、田中綾子、松藤康司 (2012) 準好気性埋立構造における生ごみ生分解過程から生成する水分量の予測手法に関する研究, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol23, No.6, pp.291-301.

## &lt;その他誌上発表（査読なし）&gt;

特に記載すべき事項はない

## （２）口頭発表（学会等）

- 1) 平田修、松藤康司、立藤綾子、柳瀬龍二、増田良太（2010）大型埋立実験槽を用いたガス化率予測モデル式の妥当性に関する研究、第21回廃棄物資源循環学会研究発表会
- 2) H. Matsunaga, Y. Matsufuji, A. Tachifuji, O. Hirata (2011) Calculation Method of Evaporation for Estimation of Gas Emission from Landfills, the 15th Korea-Japan Special Symposium at KSWME, The 2011 Korea-Japan International Session
- 3) Yu Ogata, Shinya Suzuki, Osamu Hirata, Ayako Tachifuji, Yasushi Matsufuji (2011) Relation between Diameter of Leachate Collection Pipe and Air Flow Rate in Semi-Aerobic Landfill, the 15th Korea-Japan Special Symposium at KSWME, The 2011 Korea-Japan International Session
- 4) Osamu Hirata, Yasushi Matsufuji, Ayako Tachifuji, Ryuji Yanase, Hitoshi Matsunaga (2011) Biodegradation process and mass balance of different landfill types using large scale simulator- Study on estimation of GHGs Emission by the Mass Balance with semi-aerobic and anaerobic landfill, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium
- 5) Ayako Tachifuji, Yasushi Matsufuji, Noriyuki Nakamura (2011) Simple leachate treatment by using on site materials and wastes, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium
- 6) Ayako Tachifuji, Yasushi Matsufuji, Takashi Fukushige, Noriyuki Nakamura (2011) Biological leachate treatment technology by simple and low-cost method, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium
- 7) 松永仁史、平田修、立藤綾子、松藤康司（2011）物質収支を用いた埋立構造の違いによる廃棄物のガス化量及び溶出量に関する検討、第22回廃棄物資源循環学会研究発表会
- 8) 尾形裕、鈴木慎也、平田修、立藤綾子、松藤康司、廃棄物埋立槽内の空気流入に及ぼす浸出水集排水管の影響、第22回廃棄物資源循環学会研究発表会
- 9) 宇野慎一、坂本大地、澤村啓美、平田修、立藤綾子、松藤康司（2012）循環式準好気性埋立構造における循環浸出水の性状に関する研究、第33回全国都市清掃研究・事例発表会
- 10) 澤村啓美、宇野慎一、平田修、坂本大地、立藤綾子、松藤康司（2012）微生物機能評価指標としての Biolog 試験の検討、第33回全国都市清掃研究・事例発表会
- 11) Osamu Hirata, Yasushi Matsufuji, Ayako Tachifuji, Ryuji Yanase (2012) Relative Comparison of Different Landfill Types by Environmental and Economical Aspect for Suitable Technology Transfer, Korea-Japan Special Symposium, 16th Korea-Japan Joint International Session
- 12) 平田修、松藤康司、立藤綾子、柳瀬龍二、松永仁史（2012）大型実験槽を用いた埋立地からのメタン発生量予測手法に関する検討、第23回廃棄物資源循環学会研究発表会
- 13) 坂田 明光、立藤 綾子、松藤 康司、澤村 啓美（2012）循環式準好気性埋立における循環浸出水の曝気効果に関する研究(その2)、第23回廃棄物資源循環学会研究発表会
- 14) 小林亮、立藤綾子、松藤康司、柳瀬龍二、小山田謙二、村上哲哉（2012）環式準好気性埋立システムを用いた浸出水の簡易浄化法に関する研究、第23回廃棄物資源循環学会研究発表会

- 15) 松藤康司、柳瀬龍二、立藤綾子 (2012) 簡易なガス抜き管による埋立地メタンガスの削減効果 —マレーシアにおける事例研究—, 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会
- 16) 吉村之仁、荻本晃弘、立藤綾子、松藤康司 (2012) エコファン(ECO-FAN)等による浸出水簡易浄化システムに関する研究(その1), 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会
- 17) 平田修、松藤康司、立藤綾子、柳瀬龍二、真次寛、吉田伸隆 (2013) ベトナム・ハイフオンのDinhVu最終処分場の現状及び問題点 - 軟弱地盤の河口デルタ地帯における海面埋立の技術提案 -, 第34回全国都市清掃研究・事例発表会
- 18) 澤村啓美、坂田明光、江口絵里、立藤綾子、松藤康司 (2013) 循環式準好気性埋立における循環浸出水の曝気効果に関する基礎研究(その3), 第34回全国都市清掃研究・事例発表会
- 19) 立藤綾子、松藤康司 (2013) 焼却残渣の土壌還元化への有機資材の適用方法に関する研究(その5) - 覆土利用における堆肥のBOD成分量が土壌還元化に与える影響 -, 第34回全国都市清掃研究・事例発表会
- 20) 吉村之仁、立藤綾子、荻本晃弘、松藤康司 (2013) エコファン(ECO-FAN)等による浸出水簡易浄化システムに関する研究(その2) - ベトナム、ハイフオン市における事例研究 -, 第34回全国都市清掃研究・事例発表会
- 21) Osamu Hirata, Yasushi Matsufuji, Ayako Tachifuji, Ryuji Yanase (2013) Comparison of Estimated Methane Emission from Landfill under Asian Weather between FOD Waste Model and Fukuoka 2007 Model, The 1st International Waste Working Group of Asian Regional Branch
- 22) Ayako Tachifuji, Yasushi Matsufuji, Yoshinori Yoshimura (2013) Case Study of Leachate Treatment by "TORNADO" and "ECO-FAN" Aeration Device at Semi-aerobic Landfill Site in Vietnam, The 1st International Waste Working Group of Asian Regional Branch

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

### (4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

特に記載すべき事項はない

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

### (6) その他

The Award for Excellent Poster presentation, Relative Comparison of Different Landfill Types by Environmental and Economical Aspect for Suitable Technology Transfer, Korea-Japan Special Symposium, 16th Korea-Japan Joint International Session 2012

## 8. 引用文献

- 1) Osamu Hirata, Yasushi Matsufuji, Ayako Tanaka, Ryuji Yanase (2011) Waste stabilization

- mechanism by a recirculatory semi-aerobic landfill with the aeration system, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, DOI 10.1007/s10163-011-0036-7.
- 2) 宇野慎一、除蘇土、澤村啓美、立藤綾子、松藤康司 (2012) 循環浸出水のリン添加が循環式準好気性埋立構造の廃棄物分解及び浸出水浄化機能に及ぼす影響, *都市清掃*, Vol.65, No.307, pp.280-284.
  - 3) 真次寛、平田修、田中綾子、松藤康司 (2012) 準好気性埋立構造における生ごみ生分解過程から生成する水分量の予測手法に関する研究, *廃棄物資源循環学会論文誌*, Vol23, No.6, pp.291-301.
  - 4) Osamu Hirata, Yasushi Matsufuji, Ayako Tachifuji, Ryuji Yanase, Hitoshi Matsunaga (2011) Biodegradation process and mass balance of different landfill types using large scale simulator- Study on estimation of GHGs Emission by the Mass Balance with semi-aerobic and anaerobic landfill, *Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium*
  - 5) Ayako Tachifuji, Yasushi Matsufuji, Noriyuki Nakamura (2011) Simple leachate treatment by using on site materials and wastes, *Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium*
  - 6) Ayako Tachifuji, Yasushi Matsufuji, Takashi Fukushige, Noriyuki Nakamura (2011) Biological leachate treatment technology by simple and low-cost method, *Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium*

### (3) 準好気性埋立技術の東アジア地域への適応化に関する研究

(独) 国立環境研究所

資源循環・廃棄物研究センター 廃棄物適正処理処分研究室 山田正人・遠藤和人・石垣智基

研究協力者

(独) 国立環境研究所

資源循環・廃棄物研究センター 成岡朋宏(平成22~23年度)・石森洋行・金喜鍾  
キングモンクット工科大学 Sirintornthep Towprayoon・Komsilp Wangyao  
カセサート大学 Chart Chiemchaisri

平成22~24年度累計予算額：21,560千円

(うち、平成24年度予算額：6,220千円)

予算額は、間接経費を含む。

#### 【要旨】

高温多湿である熱帯地域は、埋立地内外の温度差が比較的小さく、また、浸透した雨水の滞留が起こりやすいことが予想され、自然対流と拡散を駆動力として大気を導入する準好気性埋立技術にとっては能力を発揮するには過酷な環境と考えられている。熱帯地域であるタイ国で埋立実験区画(テストセル)の設置を行い、本技術の効果の検証を行った。準好気性のテストセルからのガス排出量は対照セルと比較して有意な差は認められず、ガス転換の促進効果は確認されなかった。また、雨期には浸透水の排除能力の違いにより対照セルの方が嫌気化しやすいが、期間全体を通しては両セルの差の有意な差は確認されなかった。テストセルの浸出水質のうち、窒素成分については準好気性において好氣的な生物反応によるケルダール性窒素(有機態窒素・アンモニア態窒素)の転換がすすんでいることが推測された。炭素のガス転換率については、準好気セルに比べて対照セルの方が高いことが示されたが、これには浸透水排除による分解性炭素の排出の影響が大きいこと、および気温が高いために熱対流を起動力とする埋立層内への受動的な空気導入量が少ないことなどが要因としてあげられた。また、対照セルでは湛水により水分が豊富に存在したが、排水を実施する準好気セルでは生物分解に必要な水分の供給が充分でなかったことなども、原因として考えられた。すなわち、乾期のある地域では埋立地内部の含水率のコントロールが準好気性埋立を機能させるために重要であることが示唆された。準好気性埋立における酸素浸透挙動についての数値解析による評価を行い、埋立層と気温の温度差が酸素浸入量に与える影響は、年数が経過し埋立物の分解が進行することで大きくなることが示された。一方で、降雨浸透による空隙の減少が酸素浸入量に与える影響は認められなかった。埋立層への空気導入は集排水管経由が支配的であることが示された。安定化の進行に伴う埋立物中の分解性有機物の減少に応じて、酸素浸透深さは徐々に増加し、好氣的または通性嫌氣的な雰囲気範囲が拡大することが示され、こうしたアジア多雨地域の現況にあった工法や維持管理手法の適用が肝要であると考えられた。具体的には、ごみ質、ガス抜き管の間隔、集排水管の管径、被覆の状態などのパラ

メータを現地化した上で、中小規模の埋立地への適用可能性を検討することが望ましいと考えられる。

【キーワード】 準好気性埋立、熱帯地域、テストセル、埋立地ガス、数値解析

## 1. はじめに

国際的な温室効果ガス排出量削減の枠組みの中で、我が国でも京都議定書の約束期間においては、削減目標達成のためにクリーン開発メカニズム（CDM）等の京都メカニズムを活用した地球温暖化の緩和策と適応策の実施を推進してきた。延長期間に入り新たな枠組みを各国が模索する中、長期的な国内排出量の抜本的な削減を目指しつつ、途上国の自主的な削減行動（NAMAs）を支援しながらクレジットの獲得を目指すなど、当面は国際的な排出枠の移動を補完的に活用することが引き続き推進されている。

廃棄物分野では埋立地がメタンガスの排出源であり、現在は、有機性廃棄物の埋立回避と埋立地メタン回収利用が、途上国に対するCDM事業での主要な緩和策である。廃棄物処理は公衆衛生向上や環境保全という本来の目的を有しており、廃棄物分野における温室効果ガス排出量削減はこれらに反してはならない。持続可能な開発と地球温暖化対策の両立はコベネフィット・アプローチとして、我が国の国際環境政策の柱として位置づけられている。埋立地において環境保全上、最も重要なことは浸出水に起因する環境汚染の防止である。

降水が少ない欧米では、埋立地表面にも遮水を施して浸出水量を削減し、発生するメタンを回収・利用するDry Tomb（乾いた墓場）型埋立の技術が主である（Leeら、1996）。発生ガスをエネルギーに転換できるため、ほとんどの埋立地CDM事業の方法論となっている。しかし、当該事業における認証排出削減量（CER）の取得率は30%に満たない（河井ら、2009）。またこの方法では有機物を嫌気性分解させるため、欧米では自国の埋立地で、浸出水の汚濁やガス発生が長期化して、埋立地の管理を30年以上続けなければならない、後年雨水が浸入して浸出水の汚濁やガスの発生が再開するなどの問題が顕在化している。このような技術を降水量が大きい途上国に適用することはきわめてリスクが大きい。

降水量が比較的大きい我が国では、浸出水集排水（水平）管とガス抜き（鉛直）管を連結して埋立地内に設置し、浸入する雨水で汚濁を洗い流すとともに、埋立地内外の温度差を利用して無動力で大気を送り込み、有機物の好気性分解を促す準好気性埋立技術（Hanashimaら、1981）が1970年代に開発され、標準仕様となっている。好気性分解の促進は、浸出水の汚濁を低減し、メタンガスの発生を抑え、これらが発生する期間を短縮する、まさにコベネフィットな技術である。

しかし、この技術の開発後に都市ごみの焼却が進んだため、途上国のような生ごみ主体の埋立地における性能評価や、地域の気候に合わせた技術仕様を決めるための研究が進まなかった。結果として、技術の存在が海外でほとんど認知されず、IPCC第4次報告書（Bongnerら、2007）で緩和技術として採用されず、近隣のアジア諸国のCDM事業においても、その気候条件にとって失敗技術であるDry Tomb型埋立技術が席卷している。

## 2．研究開発目的

国産技術である準好気性埋立技術を国際社会に認めさせるためには、温室効果ガス放出防止および水質汚濁防止に対する優位性を理論的かつ実証的に証明する必要がある。特に、高温多湿である熱帯地域は、埋立地内外の温度差が比較的小さく、また、浸透した雨水の滞留が起こりやすいことが予想され、自然対流と拡散を駆動力として大気を導入する準好気性埋立技術にとっては過酷な条件と考えられる。本研究は、熱帯地域であるタイ国の都市ごみ埋立地に設置した準好気性埋立実験区画（テストセル）と、タイ国の都市廃棄物を充填し、熱帯の気候条件下で行ったライシメータ実験により、熱帯地域における本技術の効果を検証することを目的とする。

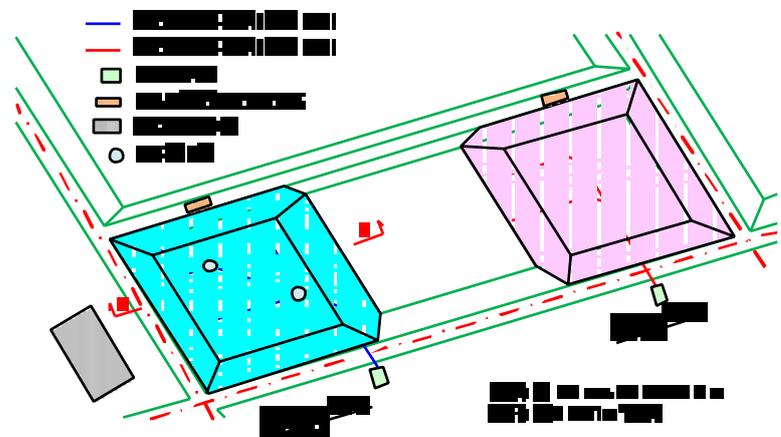
## 3．研究開発方法

### (1) テストセルの建設及び管理概要

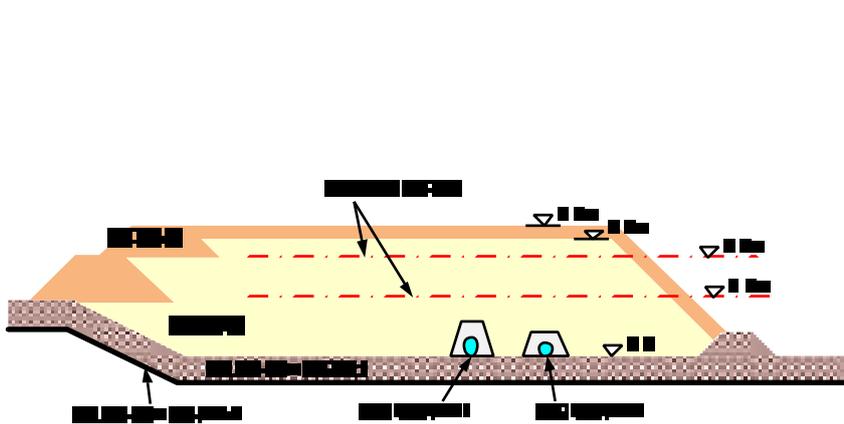
テストセルは、Leam Chabang市とKastesart大学と共同で、2009年にタイ国東部のChonburi県Leam Chabang市の都市ごみ埋立地（図(3)-1）の一角に設置した。45 m×42 m×高さ4 m、容積約7,000 m<sup>3</sup>のセルを2基設置し、一方を砕石・枝管有りの底部集排水管とそれに連結したガス抜き管2本を敷設した準好気性セル、もう一方を、タイ国の埋立地で標準的な構造である、砕石無しの底部集排水管のみを敷設した嫌気性セルとした（図(3)-2～4）。両セルからの集排水管はそれぞれ集水枡に接続し、マンホールより流量計測と採水ができるようにした。なお、両セルとも、底部遮水は元々埋立地に敷設されていたものを利用した。



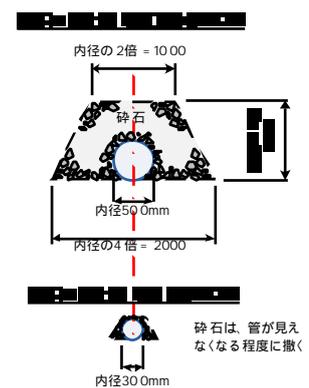
図(3)-1 Leam Chabang市都市ごみ埋立地



図(3)-2 テストセルの平面図



の断面図



図(3)-4 集排水管

図(3)-3 準好気性テストセル

2009年の8月より築堤および集排水管等の建設を開始し、同年10月から11月にかけて、埋立地に搬入されるLeam Chabang市からの都市ごみで埋め立てた。埋立量は準好気性セルと対照セルで、それぞれ、3,942 tonと4,098 ton（埋立地の計量所で計測）である。なお、対照セルについては当初嫌気性環境下におくことを志向したが、地盤沈下や覆土の降雨流出などで埋立物の露出が起るなどの大気との境界面での条件の変化がセル全体に強く影響を及ぼしたことから、準好気セルとの比較対象としての現地での一般的な（成り行きの）管理手法としての対照セルと位置付けた。埋立の途中で、埋立高さ2 mおよび3 mの位置に、それぞれ、温度センサーを9、水分センサーを4、ライシメータパンを2、内部ガス採取管を2ずつ設置した。温度センサーと水分センサーはロガーに接続し、自動連続計測できるようにした（図(3)-5）。埋立終了後に現地発生土を用いて、最上部および法面に約0.5 mの覆土を施した。また、各セル内に沈下板を約30 cm深さに5枚設置し、沈下量を測定できるようにした。

テストセルが竣工した2009年12月より、温度と水分の自動計測と、1～2ヶ月毎の埋立地ガスと浸出水のモニタリングを開始した。温度、水分および沈下量のモニタリング手法は前述の通りである。地表面より放出される埋立地ガスフラックスは、セル上部表面および法面の5 mグリッド地点にて、レーザーメタン検出器（SA3C15A, アンリツ(株)）とSenseAirCO<sub>2</sub>（SenseAir AB.）を用いた静置式チャンバー法（山田ら, 2006）で、ガス抜き管からの放出量は、ランドフィルガスアナライザー（GA2000PLUS, Geotechnical Instruments, Ltd.）を用いた静置式チャンバー法で測定した。また、地表面フラックスの測点をボーリングバーにより約0.8 m穿孔してガス採取管を設置し、内部ガス採取管と共に、ガス濃度をランドフィルガスアナライザーで測定した。ライシメータパンから採取した保有水およびマンホールより採取した浸出水については、pH, BOD, COD, TKN, 全リン（TP）等を測定した。また、テストセル内部の比抵抗断面を48電極、電極間隔1 mのダイポール-ダイポール法（香村ら, 1999）にて測定した。



図(3)-5 センサー類の設置

## (2) ライシメータ実験の概要

直径0.9 m、高さ2.7 m鉄管のライシメータ4基を実験に用いた。底部には礫を高さ0.4 m敷いて排水管を設置した。廃棄物はその上に1.8 m充填し、上部0.3 mを砂で覆土した。うち2基については底部に設けた排水口を解放し、湛水させない準好気性管理下におき、1基を廃棄物の充填時に強く転圧したもの、もう1基を弱く転圧したものとした。残りの2基は内部水位を高さの50%および100%に維持して嫌気性条件下におき、廃棄物の充填時に中程度に転圧した。各ライシメータの設定条件を表(3)-1に、ライシメータの外観を図(3)-6に示す。

表(3)-1 ライシメータの設定条件

	SmI	SmII	AnI	AnII
運転条件	準好気性	準好気性	嫌気性	嫌気性
廃棄物の転圧	弱	強	中	中
廃棄物の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	638	770	728	716
内部の湛水	無し	無し	高さの50%	高さの100%

充填廃棄物にはバンコク市の都市廃棄物を用いた。物理組成(湿重基準)は厨芥20%、紙19%、スポンジ3%、木6%、プラスチック16%、PVC 17%、ガラス19%であり、化学組成(乾重基準)は熱しやく減量が79%、炭素が44%、窒素が2%であった。雨水をライシメータ面積70%の容器に受けた後に上部より与えた。また、ライシメータ底部から0.55 m、1.05m、1.55 m、2.55 mの位置に温度センサー、水分センサーならびにガス採取管を側部より挿入した。ライシメータの設置後、沈下量、内部の温度と水分、浸出水水量と水質(pH, BOD, TOC, SS, TDS,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TKN,  $\text{PO}_4^{3-}$ , EC)、内部のガス組成( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ )、上部からのガスフラックス( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ )をモニタリングした。



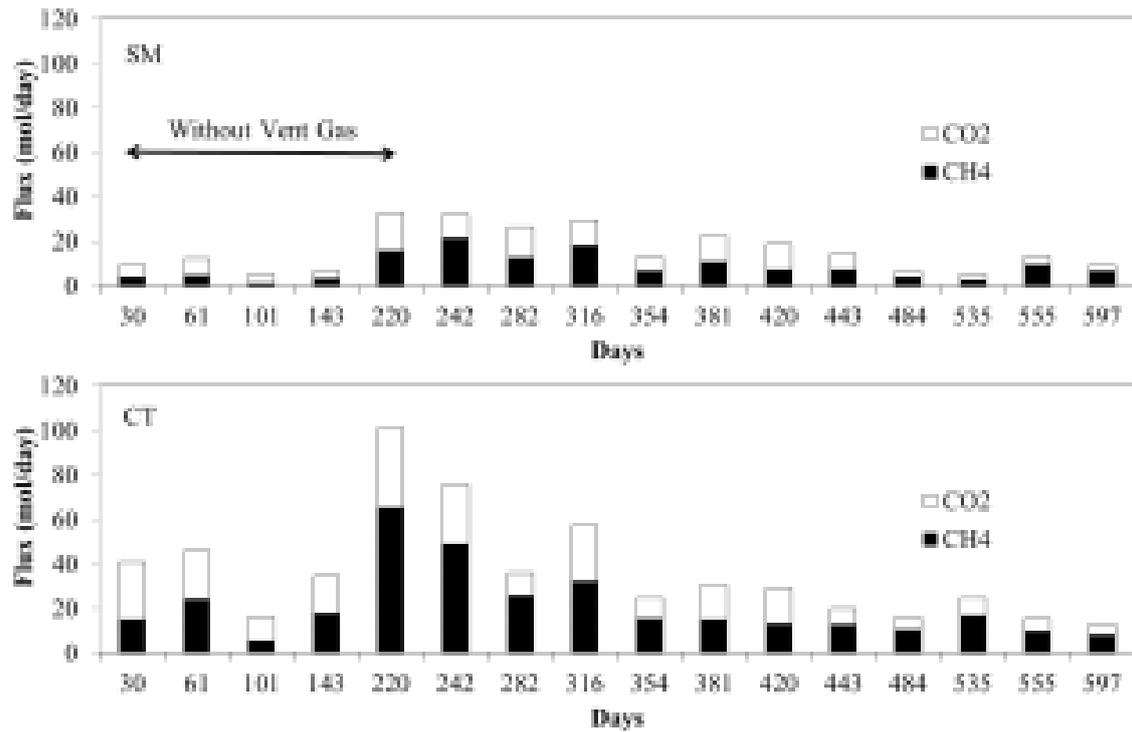
図(3)-6 ライシメータの外観

#### 4．結果及び考察

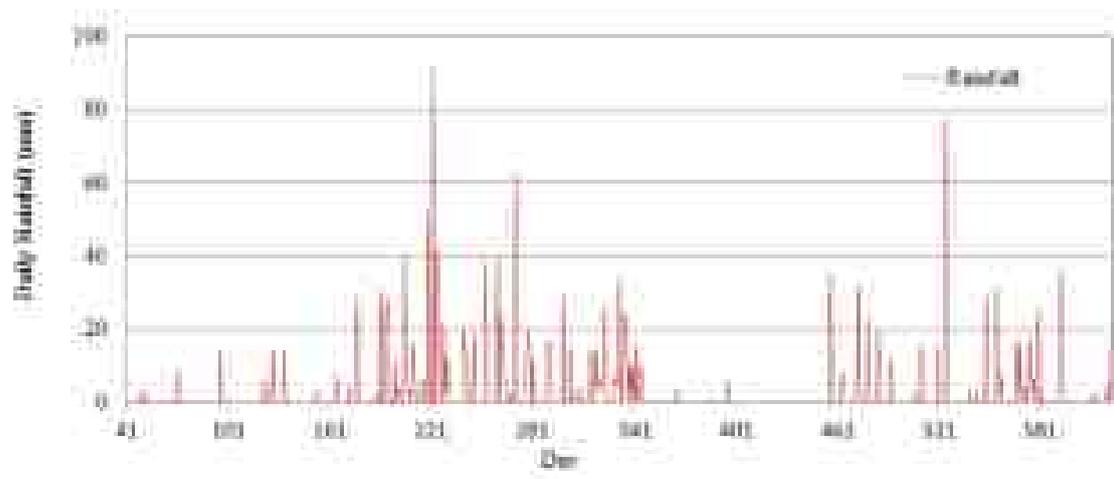
##### (1) テストセルにおける準好気性埋立管理の安定化挙動評価

両セル内部における平均温度は埋立初期には対照セルで80℃以上、準好気性セルで50℃程度まで温度が上昇したが、その後漸減し、約一年後で両セル共に38℃前後で推移するようになった。両セルからの埋立地ガス排出量の変化を図(3)-7に示す。なお、CO<sub>2</sub>排出量の測定は2010年7月から、準好気性セルにおけるガス抜き管からの放出量の測定は2010年6月から開始した。両セルから排出されるガス量は時期的な変動はあるものの、観測初期から比べると徐々に減少する傾向が示された。排出量自体は少なくなってきており、廃棄物の分解・ガス化としては収束に向かっている安定化フェーズであることが推測された。両セルから排出されるガス排出総量については降雨に伴う季節変動があるが、ほぼ同程度であり、季節的にも同様のパターンを示していることが示唆された。当該地域の降水量情報(図(3)-8)を元にとると、埋立セルでは浸透量が増加する時期にメタン発生量も増加して大きなピークを示すが、2年目以降は降水量の増加する雨期であってもメタン発生量の増加は確認されなかった。

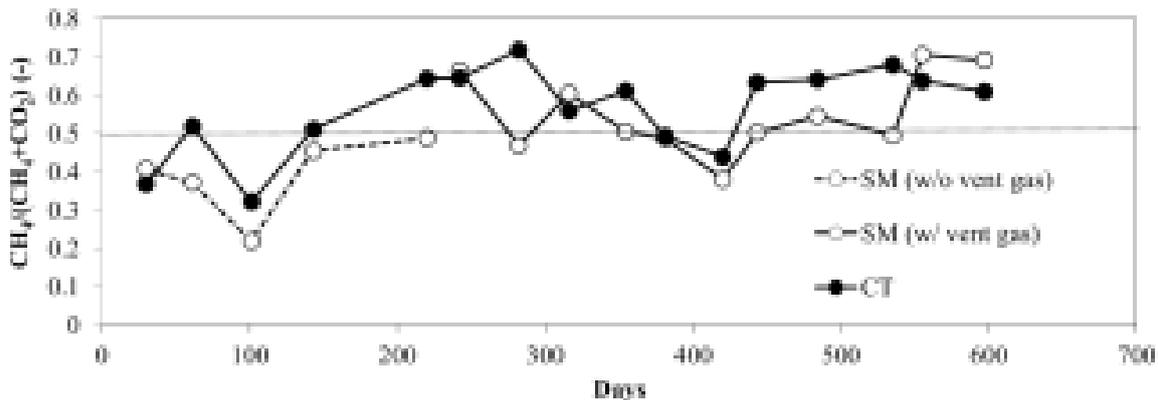
準好気性セルからのガス排出量は対照セルと比較して有意な差は認められず、ガス転換の促進効果は確認されなかった。また、準好気性の状態を表す埋立地ガス中のメタンモル比(山田ら, 2008)(メタン/{メタン+二酸化炭素})の経時変化を図(3)-9に示す。雨期には準好気セルのメタン比の方が低くなる傾向が認められ、両セルの浸透水の排除能力の差が示された。期間全体を通しては変動が大きく、両セルの差の有意な差は確認されなかった。



図(3-7) タイに設置したテストセルからの埋立地ガス排出量の経時変化  
(SM: 準好気セル, CT: 対照セル)

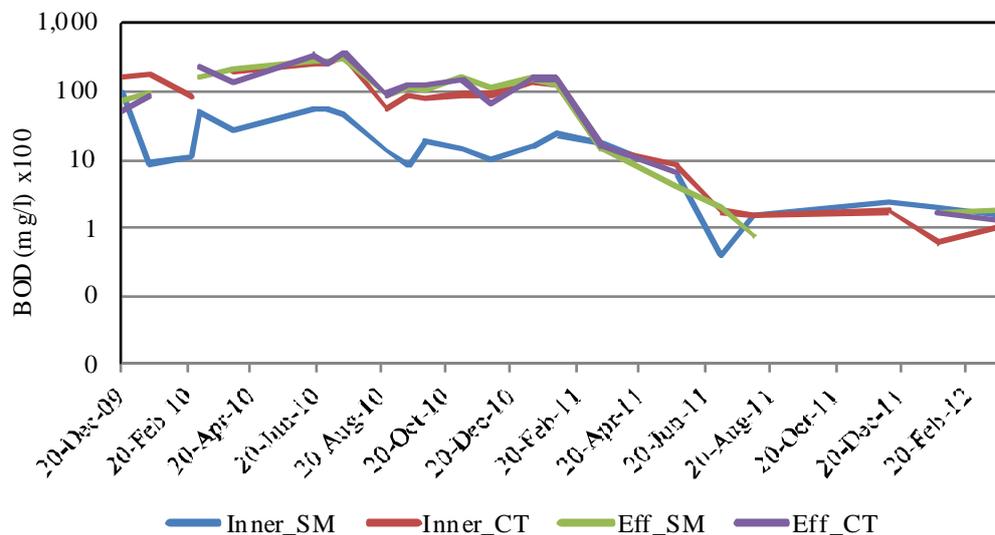


図(3-8) テストセル設置地域における降水量

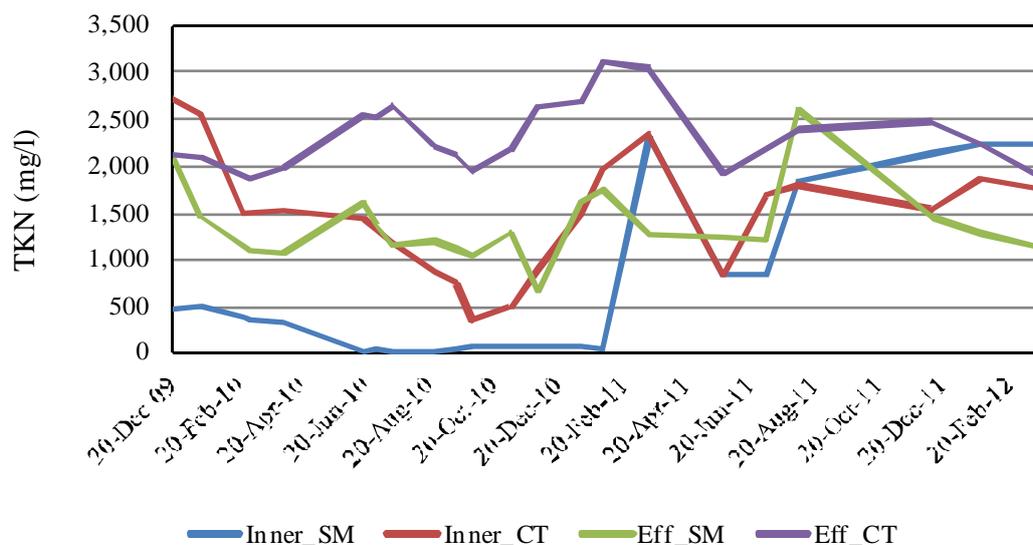


図(3)-9 タイに設置したテストセルからの埋立地ガス中のメタンモル比の経時変化 (SM: 準好気セル, CT: 対照セル)

テストセルから排出される浸出水質のうち、BOD濃度は両セルとも10,000-20,000 mg/l前後で推移し、有意な差はみられなかった(図(3)-10)。しかし内部保有水のBODについては、準好気セルは対照セルに比べて1/3から1/5程度と低いことが示された。対照セルでは内部に湛水している保有水がそのまま排水されるが、準好気セルでは可溶化した有機成分のガス化が活発であることならびに浸透から排水までの転換が早いことから、水質形成がより複雑であるといえる。特に、準好気セルの全有機性炭素(TOC)濃度が対照セルの倍程度高いこと(データ不掲載)からも、浸出水中に含有される有機性の水質構成成分に特徴があることを示していると考えられる。また、窒素濃度(TKN)については、内部保有水、浸出水それぞれ準好気セルの方が低い傾向が認められた(図(3)-11)。準好気性セルにおいては好氣的な生物反応によるケルダール性窒素の転換がすすんでいることが推測された。

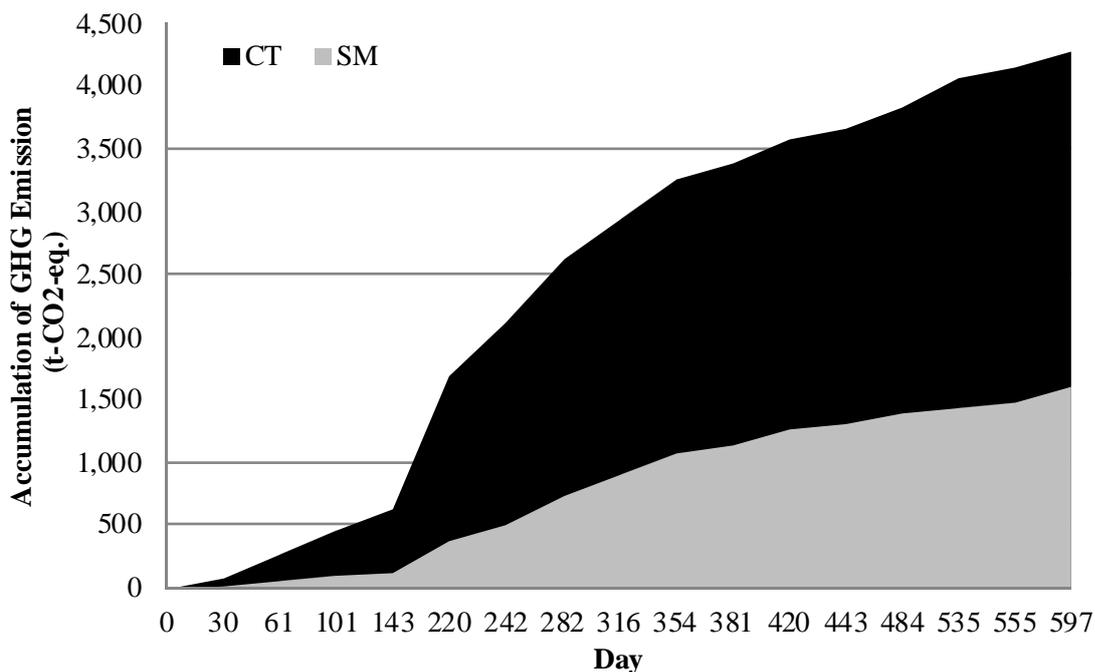


図(3)-10 テストセルにおける浸出水BOD濃度の変化 (SA: 準好気性セル, CT: 対照セル)

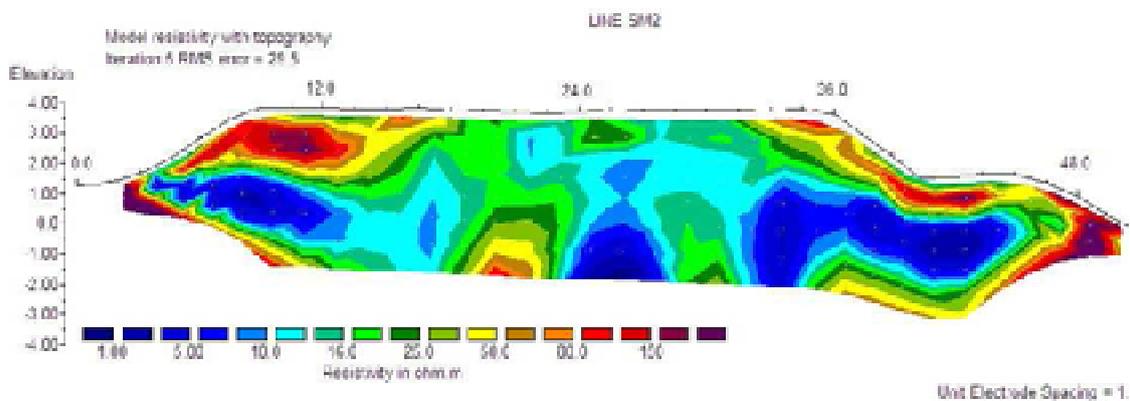


図(3)-11 テストセルにおける浸出水TKN濃度の変化 (SA: 準好気性セル, CT: 対照セル)

累積の温室効果ガス排出量を比較した結果を図(3)-12に示す。対照セルからの温室効果ガス排出量は、準好気セルと比較して3倍程度であった。一方で、埋立地ガス自身の排出量についても対照セルの方が多く、準好気セルの2倍程度であった。すなわち、メタン発生だけでなくガス化反応自体が対照セルの方が活発であったことが示唆された。これはサブテーマ(1)でも示されたとおり、雨水浸透による分解性炭素の系外排除の影響が大きいこと、および気温が高いために埋立層内との温度差が小さく、熱対流を起動力とする埋立層内への受動的な空気導入量が少ないことなどが要因としてあげられる。また、対照セルでは湛水により水分が豊富に存在したが、排水を実施する準好気セルでは生物分解に必要な水分の供給が充分でなかったことなども、原因として考えられる。準好気性セルにおける比抵抗分布の解析断面図(図(3)-13)より、低比抵抗領域を含水率が高い領域であるとする、準好気性セルでは集排水管を通じた排水により、端部を除いて湛水がほとんど見られないことが推測された。埋立地内部の乾燥により生物分解活性が低下した可能性があることから、熱帯地域では埋立地内部の含水率のコントロールが準好気性埋立を機能させるために重要であることが示唆された。可溶化炭素の系外排除は水系への汚濁負荷が懸念される事項であり、温室効果ガス排出削減のみならず地域の環境負荷と埋立地内の生物分解の促進を考慮した上で、処分場への降雨浸透、内部の水分、浸出水などを総合的に管理する必要があることが示された。



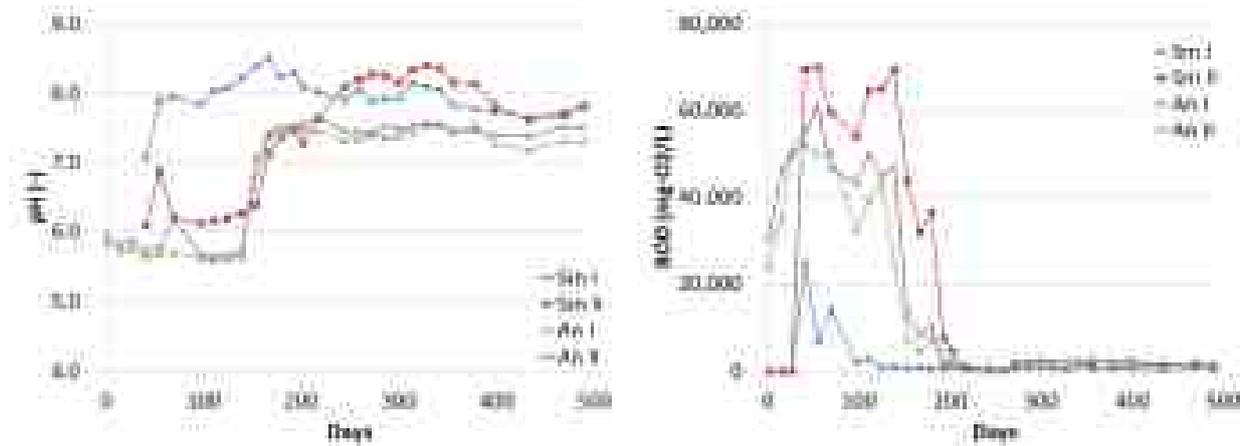
図(3)-12 テストセルにおける温室効果ガスの累積排出量 (SA: 準好気性セル, CT: 対照セル)



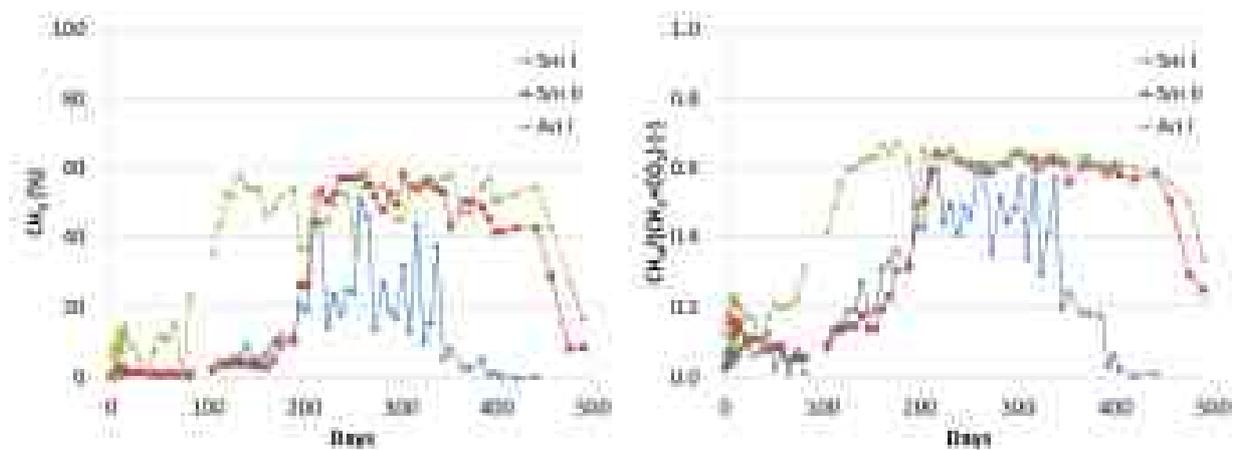
図(3)-13 準好気性セルにおける比抵抗分布

## (2) ライシメータ実験による準好気性埋立の安定化挙動評価

実験開始から490日目までの累積降水量は1010 mmであり、うち約3割が浸出水として排水された。ライシメータから排出された浸出水のpHとBOD濃度の変化を図(3)-14に示す。低密度充填のSmIでは実験開始55日目以降よりpH8付近で推移した。高密度充填のSmIIならびに嫌気性のAnI、AnIIでは実験開始139日目まではpH6付近で推移していたが、153日目から上昇し、167日目以降、SmIIでpH8、AnIとAnIIでpH7.5付近で推移した。また、pHの上昇に呼応してBOD濃度が低下していることから、この時期に有機物分解が酸発酵期からメタン発酵期に移行したものと考えられる。



図(3)-14 ライシメータにおける浸出水水質の変化



図(3)-15 ライシメータ底部から1.55m高さにおけるメタン濃度とメタン比の変化

図(3)-15にライシメータ底部から1.55m高さにおける廃棄物層空隙ガスのメタン濃度とメタン比の変化を示す。なお、AnIIは最上部まで湛水していたため測定していない。AnIでは82日目から、SmIとSmIIでは196日目からメタン濃度の上昇がみられた。AnIでは126日目以降にメタン比が嫌気性分解による埋立地ガス組成を表す0.6付近で推移した。SmIとSmIIではそれまで0.1程度で推移したメタン比が、126日目から上昇を始め、SmIIでは203日目に約0.6に達した。SmIでは203日目から338日目まで0.6から0.3の間で上下し、その後漸減した。SmIIとAnIでは441日目以降にメタン比が

漸減した。以上より、SmIでは203日目から338日目まで、SmIIでは203日目から441日目まで、AnIでは126日目から441日目までが活発に埋立地ガスが発生した時期であると考えられた。この期間のSmI、SmIIおよびAnIのメタン比の平均はそれぞれ0.48、0.60、0.62であった。0.62をメタン比の上限値とした場合のIPCCガイドライン(IPCC, 2006; 山田ら, 2008)における嫌気性分解係数(MCF)はそれぞれ0.77、0.98、1.00となり、高密度充填SmIIは準好気性埋立としてほとんど機能していないといえる。すなわち、埋立地内の廃棄物の密度をコントロールすることが準好気性埋立を機能させるために重要であることが示された。

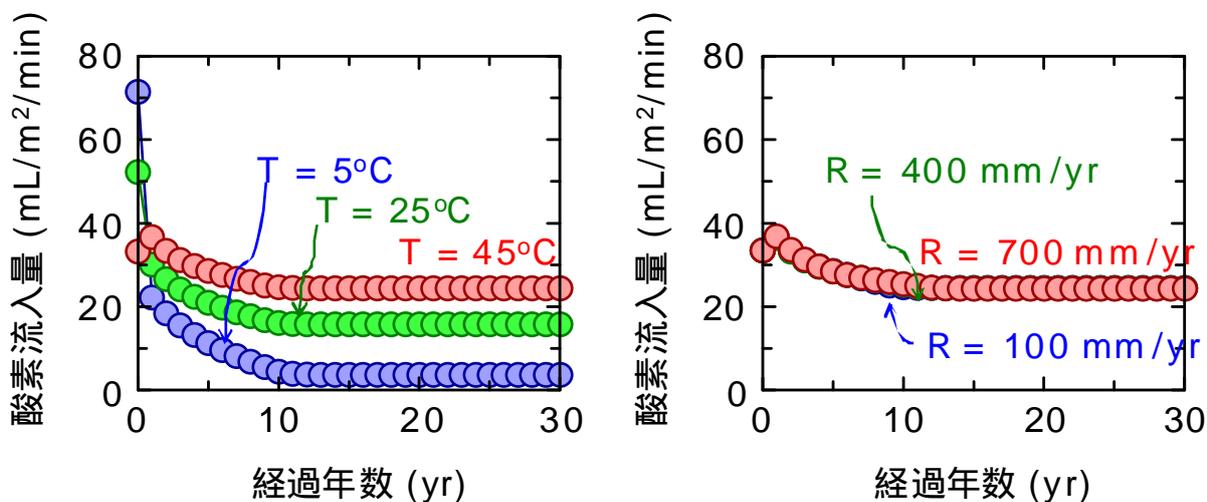
### (3) 埋立層における水分・ガス・空気流動に関する数値解析

不均質な間隙構造をもつ埋立地では、地表面からの浸透した雨水はある限られた間隙経路のみ(みず道)を移動するため、浸出水水質や埋立地ガスの濃度とその時間変化はみず道の影響を強く受ける。埋立廃棄物中のみず道を定量的に評価した事例は少なく、そのモデル化は浸出水水質や埋立地ガスの予測・制御に不可欠な課題であるため、みず道を廃棄物中の全間隙体積に対する透水に寄与する間隙の割合(有効間隙率)として表現し、過去のライシメータ試験からその値を推定した。その結果、直径900 mm、長さ1,800 mmに充填した廃棄物層内に存在するみず道は、有効間隙率として約30%と推算され、廃棄物の全間隙率46%と比較すると透水に寄与する間隙はそのうち6割程度であった。このようなみず道のある埋立地では、廃棄物層内を流れる間隙内実流速は見かけの浸透速度よりも大きいため汚濁物質は浸出水に早く移行し、また浸透水と廃棄物の接触がみず道により制限されることから浸出水の濃度は廃棄物等の溶出試験値よりも小さくなることが示唆された。

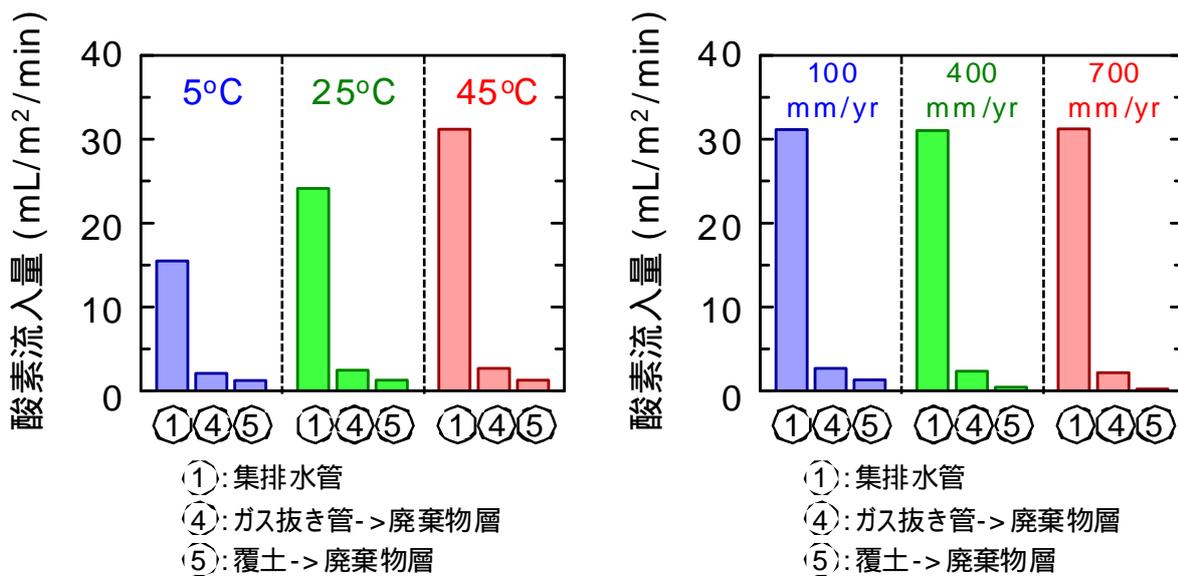
準好気性埋立管理における埋立層への酸素浸入量について、温度および降雨浸透量の影響を評価した結果を図(3)-16に示す。埋立層と気温の温度差が酸素浸入量に与える影響は、埋立開始直後にはあまり大きくないが、年数が経過し埋立物の分解が進行することで差が大きくなることが示された。一方で、降雨浸透による空隙の減少が酸素浸入量に与える影響は認められなかった。これは、みずみちの存在により、一定の空気導入経路は確保されていることや、内部水の排除能力の高さが前提になっている結果である。埋立開始後3年目における平均酸素フラックスの解析結果を図(3)-17に示す。埋立層への空気導入は集排水管経由が支配的であることが示された。覆土およびガス抜き管経由での空気導入は温度差にかかわらず一定であり、濃度拡散による流動現象であることが示された。一方、覆土からの空気導入は降雨浸透量の影響を受けることが確認され、表層の飽和に応じた被覆効果が生じることが示唆された。

準好気性埋立における酸素浸透挙動について数値解析による評価を行った一例を図(3)-18に示す。この解析には、埋立物中の生物分解性有機物量その他、不均質な間隙構造などの物理的性質、降雨浸透量および大気温度などの気象条件なども入力値として解析可能であり、アジア地域を中心とした多様な埋立地の状況を再現可能である。本解析により、安定化の進行に伴う埋立物中の生物分解性有機物の残存量の減少に応じて、酸素浸透深さは徐々に増加し、好氣的または通性嫌氣的な雰囲気範囲が拡大することが示された。有機物埋立量が少なく、大気温度が低い日本の埋立地とは異なる酸素浸透挙動を示すことが示唆され、こうした現況にあった工法や維持管理手法の適用が肝要であると考えられた。具体的には、ガス抜き管の間隔、排水管の管径、被覆の状態などのパラメータを現地化した上で、中小規模の埋立地への適用可能性を検討することが望ま

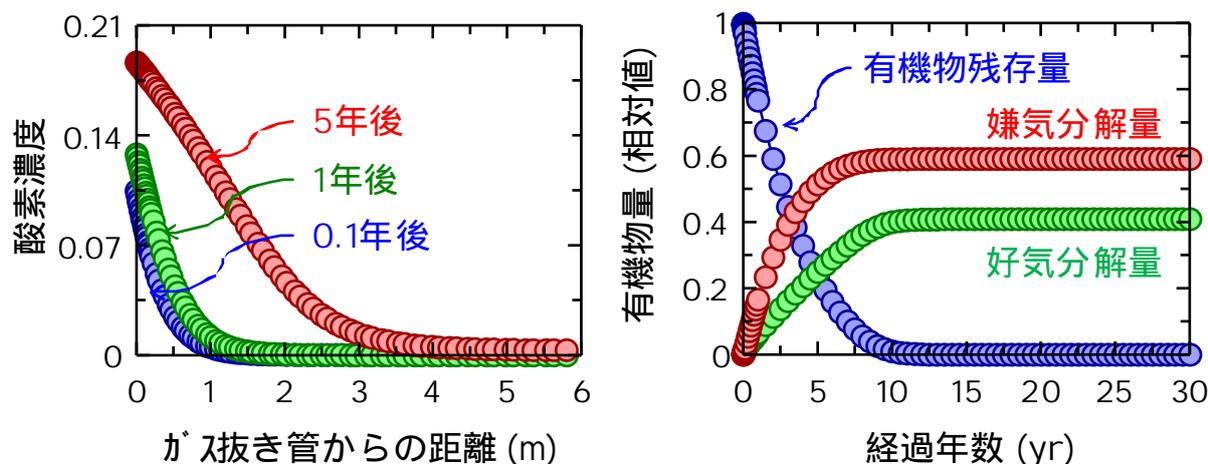
しいと考えられる。



図(3)-16 準好気性埋立管理における埋立層への酸素流入フラックスの解析



図(3)-17 準好気性埋立管理の開始3年目における経路ごとの酸素流入フラックスの解析



図(3)-18 準好気性埋立管理における酸素浸透挙動の解析

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

熱帯地域の条件下で実験を行うことにより、同地域において準好気性埋立を機能させる第一の因子が降水浸透量と浸出水排水量の制御であることを実証的に示した。

### (2) 環境政策への貢献

#### < 行政が既に活用した成果 >

環境省の「CDMを利用したコベネフィット実現促進・支援事業委託業務におけるコベネフィットCDM事業検討会」において、温室効果ガス削減技術をアジア地域に移転する際における留意点について、専門的見地からの意見の具申を行った。環境省および国立環境研究所の主催する「アジアにおける温室効果ガスインベントリ整備に関するワークショップ」を通じて、廃棄物分野の温室効果ガス排出量算定の高度化に関する情報提供を行った。特に、算定モデルの選定、排出係数の地域特異性、ならびに活動量データの精緻化による信頼性の向上について本研究成果の実例を交えて紹介し、アジア各国に向けた情報発信を行った。

#### < 行政が活用することが見込まれる成果 >

IPCCの次期排出量算定ガイドラインの改訂、およびIPCC第五次評価報告書における緩和効果の記載に向けた情報提供を行う。

## 6. 国際共同研究等の状況

Dr. Chart Chiemchaisri ( Department of Environmental Engineering ,Kasetsart University, Thailand ) と国立環境研究所は”MEMORANDUM OF UNDERSTANDING ON RESEARCH ON APPROPRIATE LANDFILL OPERATIONS IN THAILAND”を交わし、本研究におけるタイ国におけるライシメータ実験ならびにテストセル実験に関する共同研究を進めている。また、Dr.

Sirintornthep Towprayoon ( King Mongkut's University of Technology Thonburi ) と国立環境研究所は”MEMORANDUM OF UNDERSTANDING ON RESEARCH ON GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM SOLID WASTE DISPOSAL SITES AND WASTE MANAGEMENT”を交わし、本研究における温室効果ガス計測技術開発に関する共同研究を進めている。

## 7 . 研究成果の発表状況

### ( 1 ) 誌上発表

#### < 論文 ( 査読あり ) >

- 1) Wangyao K., Yamada M., Endo K., Ishigaki T., Naruoka T., Towprayoon S., Chiemchaisri C., Sutthasil N. (2010) Methane generation rate constant in tropical landfill , J. Sustainable Energy Environ., 1 (4), 181-184
- 2) 石森洋行, 遠藤和人, 石垣智基, 山田正人, (2011) ジオシンセティッククレイライナーの透水係数に及ぼす1,4-ジオキサンおよびビスフェノールAの影響評価, ジオシンセティックス論文集, 26, 169-174,

#### < その他誌上発表 ( 査読なし ) >

- 1) 遠藤和人, 山田正人 (2010) 廃棄物処分場からの温室効果ガスの測定と維持管理への応用 , 環境システム計測制御学会誌, 15 (1), 24-27

### ( 2 ) 口頭発表 ( 学会等 )

- 1) 石森洋行, 遠藤和人, 山田正人 (2010) 埋立地ガスフラックス計測のための閉鎖式チャンバー法の信頼性評価, 平成22年度廃棄物資源循環学会研究討論会, 同講演論文集, 113
- 2) Ishimori H., Endo K., Yamada M. (2010) Measurement accuracy of static chamber method for landfill gas emission monitoring. 6th Intercontinental Landfill Research Symposium, Abstracts, 153-154
- 3) Wang-yao K., Yamada M., Endo K., Chiemchaisri C., Sutthasil N., Ishimori H. (2010) Greenhouse Gas reduction benefits derived from Semi-aerobic test cell. 6th Intercontinental Landfill Research Symposium, Proceedings, 56-57
- 4) 石森洋行, 遠藤和人, 山田正人 (2010) 鉛直ガス抜き管と水平ガス回収層のガス回収効果の違い. 第21回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 21, 459-460
- 5) Wangyao K., Yamada M., Endo K., Ishigaki T., Chiemchaisri C., Sutthasil N., Towprayoon S. (2010) Study of greenhouse Gas Reduction potential from Semi-Aerobic Test Cell, 6th Asian-Pacific Landfill Symposium, Abstracts, 339-347
- 6) 山田正人, 遠藤和人, 石垣智基, Wang-Yao K. (2011) 熱帯地域における準好気性埋立テストセル実験について. 第32回全国都市清掃研究・事例発表会, 同講演論文集, 255-257
- 7) Komsilp Wangyao, Masato Yamada, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki, Chart Chiemchaisri, Nopparit Sutthasil, Sirintornthep Towprayoon (2011) Mitigation of GHG emissions thorough semi-aerobic landfill method, The International Conference of Solid Waste 2011 Moving Towards Sustainable Resource Management

- 8) Komsilp Wangyao, Masato Yamada, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki, Chart Chiemchaisri, Nopparit Sutthasil, Sirintornthep Towprayoon (2011) Mitigation of greenhouse gas emission in waste sector by using semi-aerobic landfill method, 6th National Convention on Civil Engineering
- 9) Masato Yamada, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki, Komsilp Wangyao, Nopparit Sutthasil, Chart Chiemchaisri, (2011) Test cell experiment on semi-aerobic landfill system for tropical countries, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium
- 10) Hiroyuki Ishimori, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki, Hiroshi Sakanakura, and Masato Yamada (2011) Coupled fluid flow and thermal and reactive transport in porous media for simulating waste stabilization phenomena in semi-aerobic Landfill, Comsol Conference 2011
- 11) Hiroyuki Ishimori, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki, Masato Yamada (2011) In-situ Estimation Method of Gas Permeability using Gas Emission Measurement for Landfill Cover Soil, ISWA World Congress 2011
- 12) 石森洋行, 遠藤和人, 石垣智基, 山田正人 (2011) 廃棄物海面埋立処分場内のガス挙動解析と酸素供給量の評価, 第22回廃棄物資源循環学会研究発表会
- 13) 山田正人, 遠藤和人, 石垣智基, Chart Chiemchaisri, Nopparit Sutthasil, Komsilp Wang Yao (2011) 熱帯地域における準好気性埋立の機能向上に関する研究, 第22回廃棄物資源循環学会研究発表会
- 14) 石森洋行, 遠藤和人, 石垣智基, 山田正人 (2011) ジオシンセティッククレイライナーの透水係数に及ぼす1,4-ジオキサンおよびビスフェノールAの影響評価, 第26回ジオシンセティックシンポジウム
- 15) Chart Chiemchaisri, Chiemchaisri W., Komsilp Wangyao, Kazuto Endo, Tomonori Ishigaki, Masato Yamada (2012) Semi-aerobic landfill for reducing greenhouse gas emission from solid wastes (A test cell experiment), 1st International Conference on Environmental Science, Engineering and Management
- 16) 石森洋行, 遠藤和人, 石垣智基, 山田正人 (2012) 廃棄物埋立地における温室効果ガスの発生とその放出挙動解明のためのマルチフィジックス解析, 第17回計算工学講演会, 計算工学講演会論文集, 17
- 17) K. Wangyao, K. Endo, T. Ishigaki, C. Chiemchaisri, N. Sutthasil, S. Towprayoon, M. Yamada (2013) Behavior of Methane Emissions from Passive Aeration and Conventional Landfilling Methods in Tropical Environment, The 1st Symposium of International Waste Working Group of Asian Regional Branch
- 18) M. Yamada, T. Ishigaki, K. Endo, H-J. Kim, H. Ishimori (2013) Desirable Structure and Operation of Semi-aerobic Landfill under Several Climate Conditions, The 1st Symposium of International Waste Working Group of Asian Regional Branch

### ( 3 ) 出願特許

特に記載すべき事項はない

### ( 4 ) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

特に記載すべき事項はない

#### ( 5 ) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 化学工業日報( 2010年8月10日、朝刊、10面、「準好気性埋立 タイで実証実験 アジア普及目指す」)
- 2) アジア経済情報誌 The Daily NNA Thailand Edition 第03838号( 2010年8月11日、朝刊、4面「日本の廃棄物埋立方式、タイで実証実験」)

#### ( 6 ) その他

特に記載すべき事項はない

### 8 . 引用文献

- 1) Bogner, J., M. Abdelrafie Ahmed, C. Diaz, A. Faaij, Q. Gao, S. Hashimoto, K. Mareckova, R. Pipatti, T. Zhang (2007) Waste Management, In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 2) Hanashima, M., Yamasaki, K., Kuroki, T. and Onishi, K. (1981) Heat and Gas Flow Analysis in Semiaerobic Landfill. Journal of the Environmental engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 107 EE1, 1-9.
- 3) 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.
- 4) 香村一夫, 楡井久 (1999) 地層の比抵抗からみた廃棄物層の特性. 地質学雑誌 105(10): 687-698.
- 5) 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.
- 6) Lee G.F. and Jones-Lee A. (1996) Dry Tomb Landfills, MSW Management, 6 (1), 82-89.
- 7) 山田正人, 遠藤和人, 阿部誠, 坂内修, 朝倉宏, 井上雄三, 相沢智之, 梅宮知佐, 中根英昭, 石垣智基他 (2006) 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, 同講演論文集
- 8) 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, 同講演論文集, 693-695.

## **Study on Comparative Evaluation of Mitigation Technology on Greenhouse Gas Emission from Waste Landfills**

Principal Investigator: Masato YAMADA

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)  
16-2, Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506, Japan

Cooperated by: Fukuoka University

[Abstract]

**Key Words:** Waste landfill, GHG emission estimation model, Mitigation, Semi-aerobic landfill

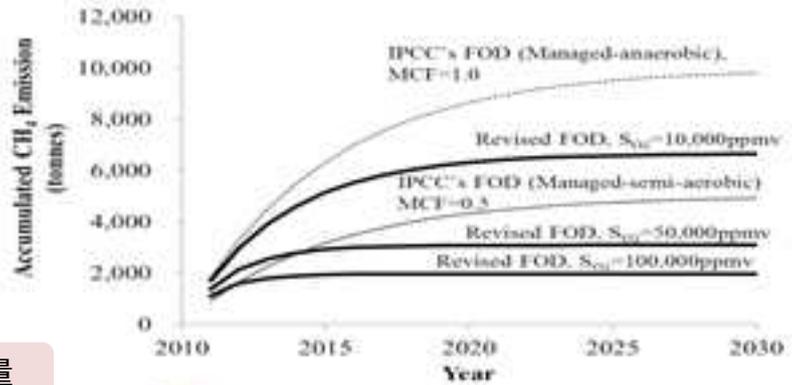
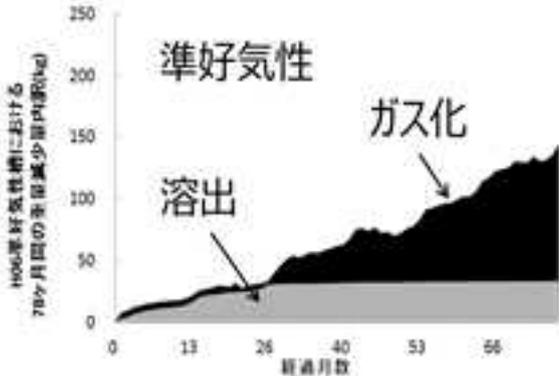
Solid waste disposal site (SWDS), which is one of major methane emission source, is also requisite to reduce both impacts on global and local environment. This study tried to validate several manners of SWDS management including semi-aerobic landfill that was originated in Japan, and co-benefit of semi-aerobic management on GHG reduction and prevention of aquatic pollution must be disseminated internationally. Methodological model for estimating GHGs emission from SWDS was developed to express simultaneous waste degradations under anaerobic and aerobic conditions. The model could also include the flow-out carbon dissolving in leachate to express the precipitation intensity at pluvial climate zone. Dry Tomb and Landfill Gas-to-Energy types exhibited higher GHG emission compared to traditional sanitary management, though semi-aerobic management showed 75% reduction of GHG compared to traditional one. Nitrous oxide emission was rarely observed in SWDS and the impact of nitrous oxide was less than 5% of methane. Nitrous oxide was considered to be generated thorough anaerobic heterotrophic denitrification. SWDS that possesses large inner water such as sites located in pluvial region or offshore exhibited high emission of nitrous oxide. Lysimeter experiments revealed that large portion of organics was solubilized thorough the anaerobic acid-fermentation process. Precipitation intensity and oxygen availability affected to phase transition to anaerobic gasification, which decreased the organic solubilization. Semi-aerobic management could reduce 40-50% of flow-out carbon compared to anaerobic management. Test-cell experiments conducted in Thailand landfill exhibited that there was no significant difference of GHGs emission from semi-aerobic and traditional management. It was attribute to surface oxygen penetration with poor surface management in traditional cell, effective flow out of organics, low driver of convective

gas exchange because of high ambient temperature, and moisture deficiency by drainage promotion. Drainage system in semi-aerobic cell made a difference of anaerobic condition in rainy season. Effect of semi-aerobic management was also observed in the conversion of nitrogen compounds. Numerical analysis gave the information that effect of temperature difference between waste layer and ambient on oxygen penetration will enlarged over operation time, i.e. waste degradation. It also revealed that dominative route of oxygen penetration was drainage systems. These results suggested that structure and management of landfilling must be developed adapting to the condition of pluvial Asian region. Control of input/output of water, design of drainage piping, surface management, was composition would be a critical parameter to operate semi-aerobic management appropriately in this region.

# A-1001 埋立地ガス放出緩和技術のコベネフットの比較検証に関する研究

(独) 国立環境研究所

- 準好気性埋立は浸出水改善と温室効果ガス排出抑制を同時に果たす国産のコベネフィット緩和技術である
- しかし、西欧における認知度が低く、理論化と様々な環境下における性能評価が必要
- 準好気性埋立技術を構成する好気性/嫌気性代謝と水・ガスの廃棄物層内移動を定式化することにより、準好気性埋立の設計・制御法と効果を理論的に示す。
- 準好気性埋立のコベネフィットにおける優位性を乾燥墓場型等の他の埋立技術と比較して示す。



大型ライシメータにおける累積炭素分解量

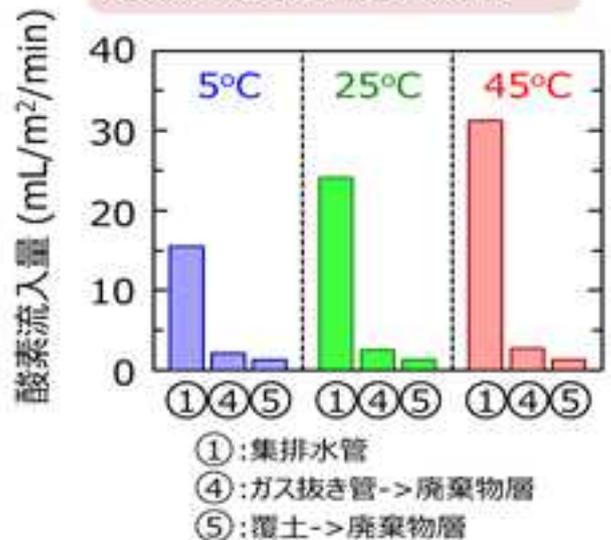
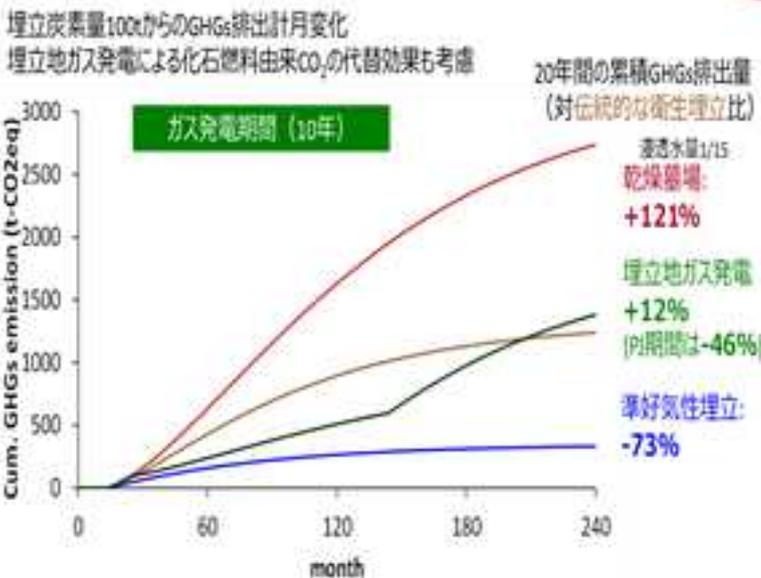
分解された炭素の気液分配とその時間変化を評価 (サブテーマ2)

埋立地への大気導入量を数値モデルにより表現 (サブテーマ3)

A1001とIPCC FODの比較

酸素濃度と乾燥の影響を加えた新しい温室効果ガス排出モデルを開発 (サブテーマ1)

埋立開始から3年目での平均酸素フラックス (内外温度差の影響)



各種埋立技術における温室効果ガス排出量の比較

アジア熱帯域条件下では、欧米型の乾燥墓場や埋立地ガス発電よりも準好気性埋立の方が緩和効果が高い