【 論 文 】

準好気性埋立構造における生ごみ生物分解過程から
生成する水分量の予測手法に関する研究

真 次 寛*・平 田 修**・田 中 綾 子***・松 藤 康 司***

【要 旨】 最終処分場を計画する上で、浸出水の水量予測は浸出水処理施設計画にとって必須であるが、生ごみの直接埋立が主体である開発途上国では、準好気性埋立構造における生ごみ生物分解過程から生成する水分量は、降水量に比較すると埋立条件によっては、埋立初期には無視できない寄与があることが明らかになっている。本研究では、生ごみ分解生成水量の予測手法を開発するため、2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories で示されている CH_4 発生量推定手法を応用することについて検討し、生ごみを充填して行った準好気性埋立構造の大型埋立実験槽で得られたデータに基づいて、その応用可能性と各パラメーターの設定方法等について考察を行った。その結果、IPCC ガイドラインで提案されている CH_4 発生量推定手法は、生ごみ分解生成水量の予測手法として応用可能性があることが明らかとなった。

キーワード：準好気性埋立構造，浸出水量，生ごみ，予測手法，生物分解

1. 序 論

廃棄物の最終処分場を適切に計画する上で、浸出水の水量予測は浸出水処理施設計画にとって必須であるが、生ごみ[†]の直接埋立を行っている開発途上国においては、高有機物含有率、高含水率の組成の廃棄物を受け入れていることから、準好気性埋立構造とした場合には、嫌気性埋立構造の場合と異なり、生ごみの好気性分解に伴う生成水の影響等で、生ごみ由来の浸出水量は、降水由来の浸出水量に比較すると無視できない寄与があると考えられる。しかしながら、これまでの国内外の知見では、準好気性埋立構造における生ごみ由来の浸出水量に関する定量的な研究例はほとんど見られない。また、開発途上国に対する準好気性埋立構造に関する国際技術協力におい

て、近年、浸出水処理設備についても併せて整備する案件が増加してきていることから、生ごみ由来の浸出水量を計画段階で予測できる手法の開発が必要となっている。

筆者らはこれまで、生ごみを充填した準好気性埋立構造の大型埋立実験槽（以下、「実験槽」と略す）での実験データを再解析し、生ごみ主体の準好気性埋立構造における生ごみ生物分解過程から生成する水分量は、特に降水量の少ない地域では、埋立初期には無視できない寄与があることを明らかにし、その内容を論文「準好気性埋立構造における生ごみ生物分解過程から生成する水分量に関する研究」¹⁾で既に報告している。そこで本研究では、廃棄物最終処分場の有機物分解量を定量的に推計する手法として既に提案されている 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories²⁾で示されている廃棄物処分場からの CH_4 発生量推定手法（以下、「IPCC ガイドライン手法」と略す）を準好気性埋立構造における生ごみ分解生成水量の計画段階での予測手法として応用することについて、実験槽で得られた実験データに基づき検討し、その応用可能性と各パラ

原稿受付 2012. 4. 6 原稿受理 2012. 10. 29
J-STAGE 早期公開論文 (2012. 12. 27 早期公開)

* 福岡市環境局施設部

** 福岡大学環境保全センター

*** 福岡大学大学院工学研究科

連絡先：〒 810-8620 福岡県福岡市中央区天神 1 丁目 8 番 1 号

福岡市環境局施設部 真次 寛

E-mail: matsugu.h01@city.fukuoka.lg.jp

[†] 本研究では、家庭系廃棄物を「ごみ」と呼び、特に分解可能物の含有量 30% 以上のものを「生ごみ」と呼ぶ

メーターの設定方法等について考察を行った。

2. 方 法

2.1 実験槽による実験方法^{1,5-8)}

本解析に用いた実験槽の形状を図1に示す。

実験槽は、直径48.5 cm、高さ500 cmの塩化ビニル製の円筒である。実験槽は大型の重量計に載せられており、連続的に計量できるものである。充填廃棄物は、表1に示すような条件で一般家庭から排出された生ごみを充填した。充填時の廃棄物層厚は454 cmであった。

埋立構造は、実験槽底部に栗石（粒径約50～80 mm）による浸出水集排水層（高さ37 cm）を設けており、さらに廃棄物層表面には真砂土による覆土（厚さ9 cm）

図1 大型埋立実験槽

を施した。実験槽の浸出水取水口は物質収支を求めるために、浸出水量を測定する以外は常時閉じていた。このため、準好気性埋立槽の空気流入機能を確保する目的で図1に示すように、実験槽の浸出水集排水管近傍側面部に直径5 cmの通気孔を設置した。また、埋立廃棄物層内部のガス濃度分布を測定するために、実験槽底部より75 cmの位置から50 cm間隔でガス採取孔を9孔設けている。

実験槽は屋内に設置してあるために、降水を人工散水とし、水道水を原則として福岡市の前年度における各月ごとの降雨強度に基づいて算出し、定期的に散水を行っていた。

散水量は充填後約6ヶ月目までは約10 L/回であった。しかし、これを降雨強度に換算すると非常に大きくなることがわかり、7ヶ月目以降は散水量を約3 L/回で行った。さらに、散水量の多い月では散水間隔が短くなることで、蒸発量やガス発生量の測定に支障を与えることから、11ヶ月目以降においては、散水を1回/1週間と定期的に行うこととし、その量を、月別散水量を週の数で割った値としている。

2.2 浸出水の測定項目および測定方法

実験槽取水口からの浸出水の水質分析を行った。採水についてはガス発生量の測定間隔に合わせ、2週間に1度の頻度で行った。表2に測定項目を示す。

2.3 発生ガスの測定項目および測定方法

実験槽は準好気性埋立構造として上部および下部を開放しているためガスの測定ができない。そこで発生ガスの測定は循環吸引法で行った。循環吸引法は、図2に示すように実験槽上部に蓋をかぶせ、沈下によって生じた空間部の水蒸気 H_2O および発生ガス中の CO_2 を、それぞれ過塩素酸マグネシウムおよびアスカライトに吸収させてその吸収量を求める方法であり、薬剤への吸収効率を良くするため、一過性の吸引ではなく、循環操作を組み入れた吸引法の改変法である。ただしこの方法の場合、 CH_4 の直接測定ができないため、 CH_4 についてはガス組成を調べることで、その濃度比（体積比）によっ

表1 実験槽充填条件

区 分	データ	充填廃棄物組成（乾燥重量ベース %）	
充填年月	1992年10月	厨芥類	27.8
充填廃棄物湿潤重量 (kg)	582.0	紙 類	44.8
充填廃棄物乾燥重量 (kg)	203.9	プラスチック類	14.1
充填密度 (湿潤 ton/m^3)	0.699	剪定廃棄物類	2.4
含水率 (%)	65.0	不燃物	4.8
		その他	6.1

表2 測定項目

測定対象物	測定項目
浸出水	pH, BOD, COD_{Mn} , COD_{Cr} , TOC, IC (無機体炭素), T-N, $NH_4^{+}-N$, $NO_2^{-}-N$, $NO_3^{-}-N$, ER (蒸発残留物), SS, 浸出水量
槽内ガス [*] および発生ガス ^{**}	O_2 濃度, N_2 濃度, CO_2 濃度, CH_4 濃度, 水蒸気量, CO_2 発生量
廃棄物	含水率, ごみ組成, IL (強熱減量), C 含有量, N 含有量
その他	実験槽内温度, 沈下量, 槽重量, 注水量

^{*} 槽内ガス：埋立廃棄物層内部のガス

^{**} 発生ガス：覆土面および通気孔を通して実験槽から発生するガス

図2 CO_2 発生量および水蒸気発生量測定装置

て間接的に求めることにした。底部通気孔においても、ゴム栓で密閉して上部と同様の方法を用いて測定を行った。

準好気性埋立構造の場合、実験槽の底部側面に通気孔を有しており、外気の自由な流入があるため、一般的には埋立層の物質収支を定量的に把握することは困難であるが、今回解析の対象とした実験槽の場合は、立渠がないことから底部通気孔において解析対象期間には槽内から槽外へガスの流出が継続していたこと、また、解析対象期間に、槽内の CO_2 濃度が、大気中の CO_2 濃度よりも高い状態が続いたことから、本研究では、移流、拡散による槽内への CO_2 の流入が無視できるとした。

2.4 化学量論による生ごみ分解生成水量推定方法

準好気性埋立構造においては、埋立層内部で、嫌気性および好気性生物分解が共存している。一般的には、埋立層内のそれらの領域および進捗は経時的に変化する。有機物質 1 mol の化学組成を、化学量論的に $C_aH_bO_cN_d$ と表現する。

もし、嫌気性生物分解期間に α mol の有機性廃棄物が、完全に分解する場合は、以下のような式で表現できる³⁾。

ここで、 $m_1 = (4a - b - 2c + 3d) / 4$, $m_2 = (4a + b -$

$$2c - 3d) / 8, m_3 = (4a - b + 2c + 3d) / 8, m_4 = d$$

一方、好気性生物分解期間に β mol の有機性廃棄物の完全な好気性分解が生じる場合は、以下のような式で表現できる³⁾。

ここで、 $n_1 = (4a + b - 2c - 3d) / 4$, $n_2 = a$,

$$n_3 = (b - 3d) / 2, n_4 = d$$

ただし、生物分解性廃棄物中の硫黄 S の量は、表 3 から炭素 C や水素 H、酸素 O および窒素 N に比べ最も少ないこと、また、水分量に寄与すると考えられる水素 H に比較して最大 1/16 と著しく少ないことから、本研究の検討では、硫黄 S は無視して考える。

上記式(1), (2)の関係から、有機物質の化学式が決定され、 $\alpha m_2 CH_4$ の質量が測定されると、 $\alpha m_1 H_2O$ の質量および $\alpha m_3 CO_2$ の質量が式(3)および(4)から推定できる。

$$\alpha m_1 H_2O \text{ 推定質量} = \alpha m_2 CH_4 \text{ 実測質量} \times (\alpha m_1 \times 18) / (\alpha m_2 \times 16) \quad (3)$$

$$\alpha m_3 CO_2 \text{ 推定質量} = \alpha m_2 CH_4 \text{ 実測質量} \times (\alpha m_3 \times 44) / (\alpha m_2 \times 16) \quad (4)$$

さらに、 CO_2 の全体質量が測定できた場合、 $\beta n_2 CO_2$ の質量は下記のように推定できる。

$$\beta n_2 CO_2 \text{ 推定質量} = CO_2 \text{ 全体質量} - \alpha m_3 CO_2 \text{ 推定質量} \quad (5)$$

上記の結果から、式(6)が得られる。

$$\beta n_3 H_2O \text{ 推定質量} = \beta n_2 CO_2 \text{ 推定質量} \times (\beta n_3 \times 18) / (\beta n_2 \times 44) \quad (6)$$

$\alpha C_aH_bO_cN_d$ および $\beta C_aH_bO_cN_d$ をそれぞれ、ある期間の有機物の嫌気性分解量および好気性分解量と考えると、式(3)および(6)から、その期間に生成する水分量は、式(7)

で求められる。

$$\text{生ごみ生物分解生成水質量} = \beta n_3 H_2O \text{ 推定質量} - \alpha m_1 H_2O \text{ 推定質量} \quad (7)$$

以上のことから、ある期間に生物分解した有機性廃棄物の化学式、分解総量、嫌気性分解量と好気性分解量の割合が推定できれば、ある期間の生ごみ分解生成水量を推定できる。

2.5 実験槽中の生物分解性廃棄物の化学量論式

一般的には有機性廃棄物の分類として、易分解性廃棄物（厨芥類、紙類、剪定廃棄物類）と難分解性廃棄物とに分類されるが、これまでの知見³⁾から、難分解性廃棄物は長期間に徐々に分解することから、分解に伴う浸出水量への寄与は無視できると考えられる。また、易分解性廃棄物の元素組成に関しては、表3に示するようなデータがある^{3,9)}。

表3から厨芥類、紙類、剪定廃棄物類の化学量論式は、炭素C、水素Hおよび酸素Oの組成割合が、ほぼ類似していると考えられること、また、紙類、剪定廃棄物類は、セルロース、リグニンが主成分であり、厨芥類に比較して分解が遅いと考えられることから、厨芥類を主な易分解性廃棄物と考え、生物分解生成水量を推定した。

実験には充填廃棄物として福岡市の生ごみを用いたが、その元素組成は当時分析できなかったため、日本国内のほぼ同年代のデータで同等のごみ質と考えられる、横浜市で1977年度から1986年度の間に厨芥類を分析して得られた表3のデータ例Ⅱに示す値を、充填した有機性廃棄物の元素組成として用いた。ただし、充填した有機性廃棄物の化学量論式として適用した厨芥類の化学量論式の計算にあたっては、硫黄元素Sの量を1として計算した。

その結果、埋立廃棄物層内の易分解性廃棄物の分解は、式(1)および(2)から、化学量論的に式(8)および(9)と表現できる。

[嫌気性分解]

[好気性分解]

2.6 実験槽中の生ごみ分解生成水量推定結果

実験槽で得られたデータを上記の推定式で解析して得られた計算結果を表4に示す。

表3 生ごみ中の易分解性有機物の元素組成データ例

データ例	ごみ成分	重量比 (乾燥重量ベース)					
		炭素 C	水素 H	酸素 O	窒素 N	硫黄 S	灰分等
I *	厨芥類	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
	紙 類	43.5	6.0	44.0	0.3	0.2	6.0
	剪定廃棄物類	47.8	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
II **	厨芥類	43.95	6.07	32.42	2.62	0.05	14.89
	紙 類	43.12	6.20	41.54	0.34	0.04	8.76
	剪定廃棄物類	48.08	6.14	41.59	0.53	0.02	3.64

* Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill, Inc. (1993)⁶⁾のp. 81, Table 4-4

** II : 1977年度から1986年度の間の横浜市混合ごみの平均値⁸⁾

表4 年間生ごみ生物分解生成水発生量

期間 (年)	1	2	3	4	5
浸出水量 (L)	311.20	352.30	353.80	276.10	331.20
注水量 (L)	324.60	355.90	341.10	271.60	352.70
推定蒸発量 (kg)	60.12	40.49	26.99	15.46	27.83
実測嫌気性分解 CH_4 (kg), $\alpha m_2 CH_4$	0.62	6.05	7.48	6.45	1.78
推定嫌気性分解 CO_2 (kg), $\alpha m_3 CO_2$	1.40	13.64	16.86	14.55	4.01
推定好気性分解 CO_2 (kg), $\beta n_2 CO_2$	68.22	21.32	21.55	15.87	8.95
推定好気性分解生成 H_2O (kg), $\beta n_3 H_2O$	21.01	6.57	6.63	4.89	2.76
推定嫌気性分解吸水 H_2O (kg), $\alpha m_1 H_2O$	0.44	4.30	5.32	4.59	1.26
推定年間生ごみ生物分解生成水量 (kg)*	20.57	2.27	1.31	0.30	1.50

* 推定年間生ごみ生物分解生成水量 (kg) = $\beta n_3 H_2O$ 推定量 - $\alpha m_1 H_2O$ 推定量

2.7 IPCC ガイドライン手法の生ごみ分解生成水量推定方法への応用

ある期間の生ごみ分解生成水量を推定するためには、ある期間に生物分解した有機性廃棄物の化学式、分解総量、嫌気性分解量と好気性分解量の割合が推定できることが必要であるが、IPCC ガイドラインには、これらの必要な要素を算出できる手順が示されている。IPCC ガイドラインに基づく嫌気性埋立に関しては、埋め立てられた生物分解性有機物の時間経過に伴う分解量は、下記の一次分解方程式 (FIRST ORDER DECAY EQUATION, 以下「FOD」と略す) (10) で表現できる²⁾。

$$DDOCm = DDOCm_0 \cdot e^{-kt} \quad (10)$$

ここで、 $DDOCm$: ある時刻 t において処分場内で嫌気性条件の下に存在する生物分解性有機炭素量、 $DDOCm_0$: 分解反応がスタートする 0 時における処分場内に存在する生物分解性有機炭素量、 k : 年単位の分解の一次反応定数 (廃棄物組成ごとに設定)、 t : 年単位の時間⁴⁾

さらに、嫌気性埋立構造の場合、 $(t-1)$ と t の間の期間 T に分解される生物分解性有機炭素量 $DDOCm$ から発生する CH_4 の量は、以下の式(11)、(12)および(13)で表現できる。

$$CH_4 \text{ generated}_T = DDOCm \text{ decomp}_T \cdot F(CH_4) \cdot 16/12 \quad (11)$$

$$DDOCm \text{ decomp}_T = DDOCm_0 \cdot [e^{-k(t-1)} - e^{-kt}] \quad (12)$$

$$DDOCm_0 = W \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot MCF \quad (13)$$

ここで、 $CH_4 \text{ generated}_T$: T 年に分解できる物質から発生する CH_4 量、 $DDOCm \text{ decomp}_T$: ある年 (T 年) に分解する $DDOCm$ [Gg]、 $F(CH_4)$: 生成した埋立地ガスの CH_4 体積比、 $16/12$: 分子量比 CH_4/C (ratio)、 $DDOCm_0$: 当初埋め立てられた分解できる DOC の量 [Gg]、 W : 埋め立てられた廃棄物量 [Gg]、 DOC : 埋め立てられた年の廃棄物の生物分解性炭素含有率 (割合) [一, Gg C/Gg waste]、 DOC_f : 分解可能な DOC の割合 (ガス化率)、リグニンなど嫌気条件下では分解せずに埋立地内に残留する有機性炭素を割り引くことを意図したパラメーター、 MCF : 好気性分解補正係数、埋立地内部で嫌気条件下での分解が生ずる割合、埋め立てられた年における好気性分解に対する CH_4 の補正係数⁴⁾

ところで一般的に埋め立てられた廃棄物は、多種の組

成から構成されていることから、 DOC は、下記式(14)で求めることができる。

$$DOC = \sum_i (DOC_i \cdot W_i) \quad (14)$$

ここで、 DOC : 複合 (混合) ごみにおける生物分解性有機炭素の割合 [一, Gg C/Gg waste]、 DOC_i : i タイプの廃棄物中の生物分解性有機炭素の割合、 W_i : 廃棄物分類による i タイプの廃棄物の割合

以上のように IPCC ガイドラインでは、埋立地における CH_4 の発生量を推定することが目的であることから、嫌気性分解による生物分解性炭素量の減衰について FOD を適用している。本研究では、生ごみ生物分解過程から生成する水分量を推定することが目的であることから、嫌気性分解のみでなく好気性分解も合わせた全体の生物分解性炭素量の減衰に対して FOD を適用して、実験槽で得られた生ごみ分解生成水量と比較評価して、生ごみ分解生成水量を推定する手法について検討する。

式(1)、(2)、(4)、(5)から、準好気性埋立構造の埋立地では有機物の分解によって発生した代表的なガス、特にメタンガス CH_4 および二酸化炭素 CO_2 の発生量が与えられれば、下記式(15)および(16)から、嫌気性分解した α mol の有機物量および好気性分解した β mol の有機物量が推定計算でき、下記式(17)で $DDOCm \text{ decomp}_T$ が推定できる。

$$\begin{aligned} \alpha C_a H_b O_c N_d \text{ 推定質量} = \\ \alpha m_2 CH_4 \text{ 実測質量} \\ \times (\alpha \times C_a H_b O_c N_d \text{ の分子量} / \alpha m_2 \times 14) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \beta C_a H_b O_c N_d \text{ 推定質量} = \\ \beta n_2 CO_2 \text{ 推定質量} \\ \times (\beta \times C_a H_b O_c N_d \text{ の分子量} / \beta n_2 \times 44) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} DDOCm \text{ decomp}_T = \\ (\alpha C_a H_b O_c N_d \text{ 推定質量} + \beta C_a H_b O_c N_d \text{ 推定質量}) \\ \times (\alpha \times 12 / C_a H_b O_c N_d \text{ の分子量}) \end{aligned} \quad (17)$$

式(11)に準じて、好気性分解および嫌気性分解で発生する CO_2 の発生量は下記の式で表現することができる。

$$\begin{aligned} Aerobic \ CO_2 \text{ generated}_T = \\ DDOCm \text{ decomp}_T \cdot F(Aerobic \ CO_2) \cdot 44/12 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} Anaerobic \ CO_2 \text{ generated}_T = \\ DDOCm \text{ decomp}_T \cdot F(Anaerobic \ CO_2) \cdot 44/12 \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、 $Aerobic \ CO_2 \text{ generated}_T$: T 年における廃棄物の好気性分解から発生する CO_2 量、 $Anaerobic \ CO_2 \text{ generated}_T$: T 年における廃棄物の

嫌気性分解から発生する CO_2 の量, $F(\text{Aerobic CO}_2)$: 生成した埋立地ガスにおける好気性分解から生ずる CO_2 の体積比, $F(\text{Anaerobic CO}_2)$: 生成した埋立地ガスにおける嫌気性分解から生ずる CO_2 の体積比

さらに, 嫌気性分解で発生するメタンガス CH_4 と分解において吸水される H_2O の量的な関係は, 式(3)から, 次式(20)のように表現できる。

$$\begin{aligned} \text{Anaerobic H}_2\text{O absorbed}_T = \\ \text{CH}_4 \text{ generated}_T \times (\alpha m_1 \times 18 / \alpha m_2 \times 16) \end{aligned} \quad (20)$$

ここで, $\text{Anaerobic H}_2\text{O absorbed}_T$: T 年に廃棄物の嫌気性分解で吸収される H_2O 量

同様に, 好気性分解で発生する二酸化炭素 CO_2 と水分 H_2O の量的な関係は, 式(6)および(18)から, 次式(21)のように表現できる。

$$\begin{aligned} \text{Aerobic H}_2\text{O generated}_T = \\ \text{Aerobic CO}_2 \text{ generated}_T \times (\beta n_3 \times 18 / \beta n_2 \times 44) = \\ \text{DDOCm decomp}_T \cdot F(\text{Aerobic CO}_2) \cdot 44 / 12 \cdot \\ (\beta n_3 \times 18 / \beta n_2 \times 44) \end{aligned} \quad (21)$$

ここで, $\text{Aerobic H}_2\text{O generated}_T$: T 年に廃棄物の好気性分解から発生する H_2O 量

したがって, 準好気性埋立構造の埋立地で生成される水分量は, 式(7)のように次式(22)で表現することができる。

$$\begin{aligned} \text{Semi-aerobic H}_2\text{O generated}_T = \\ \text{Aerobic H}_2\text{O generated}_T - \text{Anaerobic H}_2\text{O absorbed}_T \\ = \text{Aerobic CO}_2 \text{ generated}_T \times (\beta n_3 \times 18 / \beta n_2 \times 44) \\ - \text{CH}_4 \text{ generated}_T \times (\alpha m_1 \times 18 / \alpha m_2 \times 16) \end{aligned} \quad (22)$$

ここで, $\text{Semi-aerobic H}_2\text{O generated}_T$: T 年に準好気性構造の埋立層内で生成する水分量

準好気性埋立構造の埋立地からの生ごみ生物分解に伴う発生ガスは, 嫌気性埋立構造の埋立地からの発生ガスと同様に, ほとんどが CH_4 および CO_2 で構成されている。したがって, 準好気性埋立構造では, $F(\text{CH}_4)$, $F(\text{CO}_2)$, $F(\text{Aerobic CO}_2)$, $F(\text{Anaerobic CO}_2)$ について下記式(23)および(24)のような関係式がおおむね成り立つと考えられる。

$$F(\text{CH}_4) + F(\text{CO}_2) \cong 1 \quad (23)$$

$$F(\text{CH}_4) + F(\text{Aerobic CO}_2) + F(\text{Anaerobic CO}_2) \cong 1 \quad (24)$$

ここで, $F(\text{CO}_2)$: 生成した埋立地ガスの CO_2 体積比

ここで式(1)から,

$$\begin{aligned} F(\text{Anaerobic CO}_2) &= F(\text{CH}_4) \cdot (\alpha m_3 / \alpha m_2) \\ &= F(\text{CH}_4) \cdot (m_3 / m_2) \end{aligned} \quad (25)$$

よって,

$$\begin{aligned} F(\text{Aerobic CO}_2) &\cong 1 - F(\text{CH}_4) \\ &= 1 - F(\text{Anaerobic CO}_2) = 1 - F(\text{CH}_4) \\ &= 1 - F(\text{CH}_4) \cdot (m_3 / m_2) \end{aligned} \quad (26)$$

準好気性埋立構造の埋立地から発生する CO_2 と CH_4 の割合が与えられると, 式(23), (25)および(26)を用いて 1 年ごとの $F(\text{CH}_4)$, $F(\text{Anaerobic CO}_2)$ および $F(\text{Aerobic CO}_2)$ を計算することができる。また, 式(20), (21)および(22)から埋め立てられた生物分解性廃棄物の化学量論的化学式 $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$, DDOCm decomp_T および $F(\text{CH}_4)$ がわかれば, 準好気性埋立構造での生物分解生成水量が計算できる。

2.8 応用可能性評価のための試算方法

IPCC ガイドライン手法の応用可能性評価のため, 各パラメーター等を以下のように設定し, 試算した。

- ① W : 実験槽充填廃棄物量を用いる。
- ② DOC : 嫌気性埋立と好気性埋立で異なる値でなく, IPCC ガイドラインに示された数値を用いて式(14)で求める。
- ③ DOC_f : IPCC ガイドラインでは, 嫌気性条件下を前提としており, $DOC_f = 0.5$ を勧めているが, 準好気性埋立構造の場合は, 具体的な記述がない。準好気性埋立構造の場合の DOC_f 初期値は 0.5 より大きくなると考えられるが, ここでは第一段階として $DOC_f = 0.5$ を初期値として用いる。
- ④ MCF : IPCC ガイドラインでは, 埋め立てられた年において好気性分解して消失し, 以後嫌気性分解に寄与しない生物分解性炭素量を割くための補正係数であり, 準好気性埋立構造の場合の初期値を 0.5 としている。しかし, 本研究では, 生物分解性炭素量が好気性および嫌気性のいずれの分解形態であっても, 生物分解する炭素全体量の減衰について FOD の適用を試みるものであることから, ここでは第一段階として $MCF = 1.0$ を初期値とする。
- ⑤ DDOCm_0 : 式(13)から DOC_f と MCF の積は 0.5 として求める。

表5 CH₄、嫌気性 CO₂ および好気性 CO₂ の発生比率

期間 (年)	1	2	3	4	5
$F(\text{CH}_4)$	0.02	0.32	0.35	0.37	0.27
$F(\text{CO}_2)$	0.98	0.68	0.65	0.63	0.73
$F(\text{嫌気性 CO}_2)$	0.02	0.27	0.29	0.30	0.23
$F(\text{好気性 CO}_2)$	0.96	0.41	0.36	0.33	0.50

⑥ k : IPCC ガイドラインに廃棄物組成ごとに示されている値を用いて下記の2つのケースで試算を行う。

⑦ $F(\text{CH}_4)$, $F(\text{CO}_2)$: 表5に示す実験槽での実測値を用いる。

なお、試算は実験結果と比較するため、本実験が室内で行われ室温を20℃以上に保っていたこと、本実験の注水量が年降水量に換算すると、1,470~1,926 mmで1,000 mm以上であることから、Tropical (MAT>20℃)、Moist and Wet (MAP ≥1,000 mm)である気象条件で行う。ここで、MATはMean Annual Temperatureの略で年平均気温、MAPはMean Annual Precipitationの略で平均年降雨量のことである²⁾。

ケースⅠ: 実験槽での実測値を用いて、 k 値はIPCCガイドラインのTable 3.3 in Chapter 3, Volume 5 (以下、「Table 3.3」と略す)から、表6に示す廃棄物組成ごとの値($k=0.07\sim0.4$)を適用して試算した場合

ケースⅡ: 実験槽での実測値を用いて、IPCCガイド

ラインのTable 3.3に示された厨芥類の値である k 値を $k=0.4$ として試算した場合

以上から、試算におけるパラメーターを表6のように設定する。またこれらの条件で計算すると、 $DDOCm_0$ は、表6に示すような結果となった。

3. 結 果

3.1 準好気性埋立構造での有機炭素分解量のFODの近似性

本実験で実測されたCH₄およびCO₂の発生量から、実験開始から5年間の1年ごとに槽内で嫌気性分解および好気性分解した有機物分解量および $DDOCm_{decomp_T}$ は、表7に示すように推定される。

さらに、 $DDOCm_{decomp_T}$ の推定結果および指数関数で近似した結果を図3に示す。

図3から準好気性埋立構造においては、嫌気性分解および好気性分解でガス化する生物分解性有機炭素量の年間総量の経時変化は、FODに近似していないといえる。

3.2 試算結果

表6に示す値を用いて上記の各ケースごとに各年ごとの生物分解生成水量を計算すると表8に示す結果となった。

表8に示す結果から、 DOC_f とMCFの積を0.5と仮定しその他のパラメーターをIPCCガイドライン手法ど

表6 $DDOCm$ ($DOC_f \times MCF=0.5$ および $k=0.07\sim0.4$ の場合) の計算

生ごみ組成	W		DOC^* (%)		$(DOC_f \times MCF)^{**}$	$DDOCm_0$ (kg)	k^{***}
	乾燥重量 (kg)	割合 (%)	初期設定	幅			
Food waste	56.7	27.8	38	20-50	0.5	10.77	0.4
Paper / cardboard	91.3	44.8	44	40-50	0.5	20.09	0.07
Garden and Park waste	4.9	2.4	49	45-55	0.5	1.20	0.17
Other, organic	12.4	6.1	49	—	0.5	3.04	0.17
Other, non organic	38.6	18.9	—	—	—	—	—
合計	203.9	100	—	—	—	35.10	—

* DOC : TABLE 2.4 in Chapter 2, Volume 5 of IPCC 2006⁸⁾参照

** MCF : TABLE 3.1 in Chapter 3, Volume 5 of IPCC 2006⁸⁾参照

*** k : TABLE 3.3 in Chapter 3, Volume 5 of IPCC 2006⁸⁾参照

表7 $DDOCm_{decomp_T}$ 推定値

期間 (年)	嫌気性分解 (kg)		好気性分解 (kg)		$(\alpha+\beta)C_aH_bO_cN_d$ (kg)	$DDOCm_{decomp_T}^*$ (kg)
	$\alpha m_2 CH_4$	$\alpha C_a H_b O_c N_d$	$\beta m_2 CO_2$	$\beta C_a H_b O_c N_d$		
1	0.62	1.638	68.22	36.013	37.651	19.45
2	6.05	15.984	21.32	11.255	26.238	14.07
3	7.48	19.762	21.55	11.376	31.138	16.09
4	6.45	17.040	15.87	8.378	25.418	13.13
5	1.78	4.703	8.95	4.725	9.427	4.87

* $DDOCm_{decomp_T}$: 式(17) 参照

図3 DDOCm decomp_Tの経年変化

表8 年間生ごみ生物分解生成水量の試算結果

期間 (年)	1	2	3	4	5
推定値 (kg)	20.57	2.27	1.31	0.30	1.50
ケースⅠ試算値 (kg) $k=0.4\sim0.17$	5.88	0.68	0.26	0.06	0.64
ケースⅡ試算値 (kg) $k=0.4$	12.22	1.25	0.42	0.08	0.71

おりに適用すると、各年の生物分解生成水量が実験結果より小さな値となったが、 k 値については、厨芥類の k 値 ($k=0.4$) を用いた場合の方が、1 年目の生ごみ分解生成水量が実験結果により近い値が与えられた。

4. 考 察

4.1 準好気性埋立構造での有機炭素分解量の FOD の近似性について

準好気性埋立構造では、埋立直後は埋立廃棄物層全体が好気性領域で、好気性分解が速やかに開始されるが、埋立廃棄物層内の好気性分解で消費される酸素量と埋立廃棄物層内に供給される酸素量の収支によって、嫌気性領域が生成、拡大し、嫌気性分解が開始する。つまり、準好気性埋立層内では、異なる分解過程が時間差で、その領域を変化させながら進行することから、有機炭素の分解速度を単純な一次反応式で近似できないのは、当然の結果であると考えられる。

既報の研究¹⁾では、年間生ごみ分解生成水量は、1 年目が全体の浸出水量に対して無視できない量であり、2 年目以降は 1 年目に対して著しく少なくなり全体の浸出水量に対して無視できる。よって、有機炭素分解量を一次反応式で必ずしも高い相関で近似できなくとも、1 年目および 2 年目の生物分解性有機炭素分解量が有効な精度で推定できれば IPCC ガイドラインの応用可能性はありと考えられる。

4.2 パラメーターの設定方法について

- ① W は浸出水量の予測段階で把握可能な数値である。
- ② DOC は嫌気性埋立と好気性埋立で異なる値でなく、IPCC ガイドライン手法に示された値を用いても妥当であると考えられる。
- ③ DOC_f は IPCC ガイドライン手法では嫌気性条件下を前提としており、嫌気性条件下ではリグニンなどの分解性有機炭素は分解しないか、もしくは非常に分解が遅いことを踏まえて $DOC_f=0.5$ を勧めている。しかし、準好気性埋立構造の場合には、好気性領域でリグニンなどが分解することを考慮すると、 DOC_f 値は、0.5 以上になると考えられるが、設定について具体的な記述はないため、準好気性埋立構造の場合の数値設定について検討が必要である。
- ④ MCF は IPCC ガイドライン手法では、埋め立てた年において好気性分解し、以後嫌気性分解しない生物分解性炭素量を割り引くための補正係数であるが、本研究の場合、廃棄物の生物分解性炭素量の嫌気性および好気性分解で生物分解する全体量の減衰を FOD で仮定して、推定法として応用することを検討していることから、理論的には $MCF=1.0$ とすることは妥当であると考えられる。
- ⑤ $DDOCm_0$ は式(13)から DOC_f および MCF が適切に設定できなければ求めることができない。
- ⑥ k は IPCC ガイドライン手法に廃棄物組成ごとに示されているが、準好気性埋立構造で生ごみ分解生成水量を推定する場合に適用可能であるか検討する必要がある。既報の研究では、年間生ごみ分解生成水量は、1 年目が全体の浸出水量に対して無視できない量であるが、2 年目以降は 1 年目に対して著しく少なくなるため、全体の浸出水量に対して無視できる。よって、1 年目の生物分解性有機炭素分解量が有効な精度で推定できるように k を設定できればよいと考えられる。試算結果で、厨芥類の k 値 ($k=0.4$) を用いた場合の方が、1 年目の生ごみ分解生成水量が実験結果により近い値が与えられたことは、厨芥類が埋立廃棄物層内で最も速く分解することに整合しているといえる。
- ⑦ $F(CH_4)$ は、浸出水量予測段階での準好気性埋立構造の場合の $F(CH_4)$ の決定方法は検討課題である。

4.3 実験結果に基づく k 値および DOC_f と MCF に関する検討

第1段階では $(DOC_f \times MCF) = 0.5$ と想定し、試算を行ったが、実験結果との整合性が悪かったことから、 $(DOC_f \times MCF)$ を 0.6~1.0 まで変化させて試算を行った。ここでは、実験結果と整合性のある値が得られた $(DOC_f \times MCF) = 0.8, 0.9, 1.0$ の場合について論ずる。なお、準好気性埋立構造での k (=decay rate constant in y^{-1}) 値については、IPCC ガイドライン手法中では示されていない。 k 値については、下記の3ケースの値を用いて試算した。

- (a) IPCC ガイドラインの Table 3.3 の各ごみ組成ごとの k 値 (0.07~0.4) を適用したケース
- (b) 厨芥ごみが主であることから IPCC ガイドラインの Table 3.3 に示された厨芥ごみの $k=0.4$ 値を適用したケース
- (c) 実験結果の近似式の k 値 ($k=0.284$) を適用した

ケース

$(DOC_f \times MCF) = 0.8, 0.9$ および 1.0 の場合の $DDOC_{m_0}$ を表6と同様に求め、試算した結果を表9に示す。また、計算結果をグラフで図4に示す。これらの結果から以下のことがいえる。

- ① IPCC ガイドライン手法を準用して、準好気性埋立構造の埋立槽内で生じる生物分解生成水量の推定を行う場合、Tropical (MAT>20℃), Moist and Wet (MAP≥1,000 mm) である気象条件下では、 DOC_f と MCF の積を 0.8~1.0 とすると、浸出水量に影響を与える可能性がある1年目の浸出水量の試算結果を実験結果に近い値で得ることができた。 MCF については、理論的には $MCF=1$ と考えられることから、 DOC_f 値は 0.8~1.0 と考えられる結果となった。このことは、好気性領域でリグニンなどが分解されることなどで説明できる

表9 $(DOC_f \times MCF)$ および k を変化した場合の生ごみ生物分解生成水量試算結果

$(DOC_f \times MCF)$, $DDOC_{m_0}$ (kg)	k	生ごみ生物分解生成水量試算値 (kg)				
		1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
$(DOC_f \times MCF) = 0.8$ $DDOC_{m_0} = 56.16$ (kg)	0.07-0.4	9.41	1.08	0.42	0.10	1.02
	0.4	19.55	1.99	0.67	0.13	1.14
	0.284	14.66	1.68	0.64	0.14	1.36
$(DOC_f \times MCF) = 0.9$ $DDOC_{m_0} = 63.17$ (kg)	0.07-0.4	10.59	1.22	0.47	0.11	1.14
	0.4	21.99	2.24	0.76	0.15	1.28
	0.284	16.49	1.89	0.72	0.16	1.53
$(DOC_f \times MCF) = 1.0$ $DDOC_{m_0} = 70.20$ (kg)	0.07-0.4	11.77	1.35	0.53	0.12	1.27
	0.4	24.44	2.49	0.84	0.16	1.43
	0.284	18.32	2.10	0.80	0.17	1.70
推定値 (kg)		20.57	2.27	1.31	0.30	1.50

図4 年間生ごみ生物分解生成水量の試算結果比較

と考えられる。また k 値の設定は、廃棄物の種別ごとに IPCC ガイドラインで示された値を用いるより、埋立初期に分解の主体となる厨芥ごみの値 $k=0.4$ を用いた場合の方が、浸出水量に影響を与える可能性がある 1 年目の浸出水量の試算結果は、実験結果と近い値となった。パラメーターの設定方法が確立できれば、IPCC ガイドライン手法の応用が可能になると考えられる。

- ② 準好気性埋立構造の場合の DOC_f の設定方法については今後の検討課題であるが、 DOC_f は埋立廃棄物層内の好気性領域の割合に影響されると考えられる。また、準好気性埋立構造における埋立廃棄物層内の好気性領域は経時的に変化することから、 DOC_f も経時的に変化すると考えられる。しかし、埋立廃棄物層内の好気性領域を定量的に推定できる手法は確立されていないため、設定方法を理論的に確立することは現時点では困難であると考えられる。今後は、実埋立場でのガス発生量等の実測値や、大型実験槽を用いた実験結果を解析して、 DOC_f を推定する必要があると考えられる。

5. 結 論

本研究によって、以下の結論を得ることができた。

IPCC ガイドラインに示された廃棄物処分場からの CH_4 発生量推定手法は、準好気性埋立構造における生ごみ生物分解過程から生成する水分量の予測に適用できる可能性がある。ただし、各パラメーター、 DOC_f 、 k 等の適切な設定方法について確立していく必要がある。

[謝 辞]

本研究は、福岡大学名誉教授 花嶋正孝先生が指導して実施された実験を再検討したものであり、本

実験を実施していただいた福岡大学水理衛生工学実験室の皆様にご感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 真次 寛, 平田 修, 田中綾子, 松藤康司: 準好気性埋立構造における生ごみ生物分解過程から生成する水分量に関する研究, 廃棄物資源循環学会論文誌, 第 23 巻, 第 2 号, pp. 109-116 (2012)
- 2) IPCC: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5, Chapter 2, p. 2.14, pp. 3.8-3.19 (2006)
- 3) G. Tchobanoglous, H. Theisen and S. Vigil: Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill, Inc, pp. 80-82, p. 382, pp. 384-387, p. 389, p. 677, p. 682 (1993)
- 4) 山田正人: 廃棄物処理分野からの温室効果ガス排出量の推計方法——2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories より——, 都市清掃, 第 61 巻, 第 284 号, pp. 335-337 (2008)
- 5) 小林栄己, 田中綾子, 松藤康司, 花嶋正孝: 埋立構造の違いによる温室効果ガスの発生(2), 第 4 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 437-440 (1993)
- 6) H. Matsugu, O. Hirata, A. Tanaka and Y. Matsufuji: Estimation Method of Moisture Quantity Generated by the Biodegradation Process in a Semi-aerobic Landfill, SARDINIA 2007 Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, pp. 243-244 (2007)
- 7) Y. Matsufuji, M. Hanashima, S. Nagano and A. Tanaka: Generation of Greenhouse Effect Gases from Different Landfill Types, Engineering Geology, Vol. 34, No. 3-4, pp. 181-187 (1993)
- 8) Y. Matsufuji, H. Kobayashi, A. Tanaka, S. Ando, T. Kawabata and M. Hanashima: Generation of Greenhouse Effect Gases by Different Landfill Types and Methane Gas Control. Proc. 7th ISWA International Congress and Exhibition, pp. 230-237 (1996)
- 9) 廃棄物学会編: 廃棄物ハンドブック, (株)オーム社, p. 165 (1996)

Method for Predicting the Quantity of Moisture Generated by the Biodegradation Process in Semi-aerobic Landfills

Hiroshi Matsugu*, Osamu Hirata**, Ayako Tanaka*** and Yasushi Matsufuji***

* Facility Department of Environmental Bureau, Fukuoka City

** Environmental Protection Center, Fukuoka University

*** Graduate School of Recycling and Eco-Technology, Fukuoka University

† Correspondence should be addressed to Hiroshi Matsugu :

Facility Department of Environmental Bureau, Fukuoka City
(1-8-1 Tenjin, Chuo-ku, Fukuoka 810-8620 Japan)

Abstract

The prediction of leachate quantity is essential for the planning of leachate treatment facilities when planning MSW landfill sites. It is also thought to be essential in comparison to precipitation to predict the quantity of moisture generated by the MSW biodegradation process in semi-aerobic landfills in developing countries that primarily handle the direct disposal of MSW.

Past research results have clarified that the moisture generated by the biodegradation process in semi-aerobic MSW landfills in their early stages is significant in comparison to precipitation, depending on landfill conditions.

In order to devise a method for predicting the moisture quantity generated by the biodegradation process, the authors investigated the application of the estimation method used for CH₄ emissions from solid waste disposal sites described in the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. This was based on past experimental data collected with a large-scale lysimeter filled with MSW at a semi-aerobic landfill.

The results demonstrate that, with appropriate parameters, this estimation method has potential to be applied to the prediction of the moisture quantity generated by the biodegradation process in semi-aerobic landfills.

Keywords : semi-aerobic, landfill, biodegradation, leachate, IPCC Guidelines