

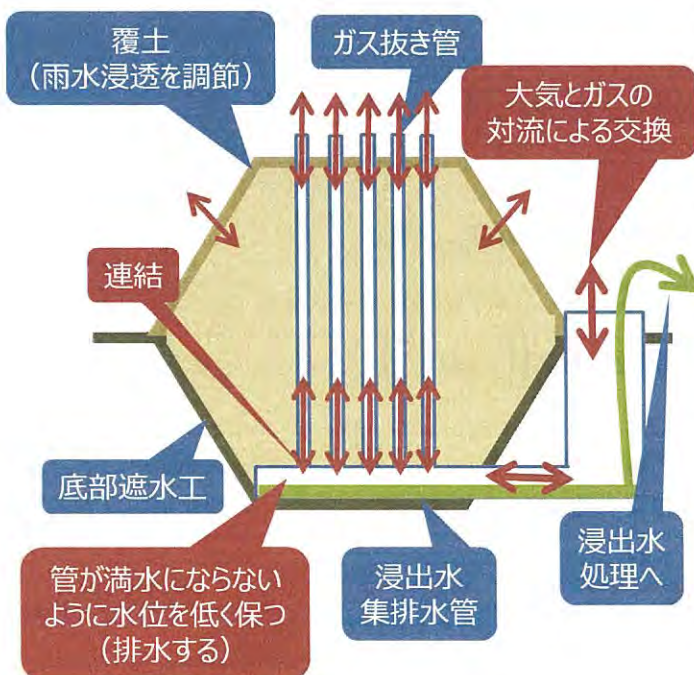
# A-1001 埋立地ガス放出緩和技術のコベネフットの比較検証に関する研究

研究代表者 山田正人  
(独) 国立環境研究所

2010-2012: JPY 43,758,000/3 years

1

## 準好気性埋立 (福岡方式)



- ✓降水量が比較的大きい日本で、浸出水水质を流出前に改善し、浸出水処理コストを削減するために発達した技術。
- ✓1970年代に福岡市と福岡大学が開発し、日本の埋立地構造のスタンダードとなっている。
- ✓JICA/ODAを通じて、途上国（東南アジア、南米、アフリカ等）へ技術移転事例は多い。
- ✓有機物の好気性分解を促すため、メタングスの発生を抑制することができる。
- 2006 IPCC Guidelineで採用

Type of Site	Methane Correction Factor (MCF) Default Values
Managed - anaerobic <sup>1</sup>	1.0
Managed - semi-aerobic <sup>2</sup>	0.5
Unmanaged <sup>3</sup> - deep (>5 m waste) and/or high water table	0.8
Unmanaged <sup>4</sup> - shallow (<5 m waste)	0.4
Uncategorised SWDS <sup>5</sup>	0.6

<sup>1</sup> Unsanitary managed solid waste disposal site. There must be controlled placement of waste (i.e. waste located to meet 2

# 研究の目的と構成

- ✓ 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Co-Benefitにおける優位性をDry-Tomb型等の他の埋立技術と比較して示す。
- ✓ 以上の成果を学術論文として国際誌に発表する。
- サブテーマ1（国環研）：  
ガス発生挙動の定式化
  - ラボ（ビーカー／カラム）実験
  - IPCC Waste Model
- サブテーマ2（福岡大）：  
浸出水水質変動の定式化
  - ライシメータ実験
  - IPCC Waste Model
- サブテーマ3（国環研）：  
準好気性技術仕様提示
  - 野外（熱帯）ライシメータ／テストセル実験
  - 多孔質二相流モデル

3

## IPCC Waste Model (First Order Decay)

$$\text{メタン放出量} \quad CH_4 \text{ Emissions} = \left[ \sum_x CH_4 \text{ generated}_{x,T} - R_T \right] \cdot (1 - OX_T)$$

メタン発生量

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

$$\text{残存有機炭素量} \quad \text{埋立有機炭素量} \quad DDOCma_T = DDOCmd_T + (DDOCma_{T-1} \cdot e^{-k})$$

k: 分解速度定数

$$\text{分解有機炭素量} \quad DDOCm \text{ decomp}_T = DDOCma_{T-1} \cdot (1 - e^{-k})$$

$$\text{有機炭素量} \quad DDOCm = W \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot MCF$$

分解性炭素率                      ガス化率                      好気性補正係数

1. MCFとkの関係を表現する／好気性・嫌気性代謝に分割する。
2.  $DOC_f$ でガス（気相）と液相、固相の分配を表現する。
3. 酸素（と水）の供給量の制御因子（手法）を示す。

# A1001 Model (Revised FOD)

$$CH_4 \text{ Emissions} = \left[ \sum_x CH_4 \text{ generated}_{x,T} - R_T \right] \cdot (1 - OX_T)$$

メタン放出量 ガス回収率 覆土酸化率

メタン発生量

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

残存有機炭素量 埋立有機炭素量

嫌気性 好気性

$$DDOCm \text{ decomp}_T = DDOCma_{T-1} \cdot \left( 1 - e^{-k_n \cdot f_{O_2} \cdot \eta_n} \right)$$

$k_n$   $k_e$

分解有機炭素量

速度定数

$$DDOCma_T = DDOCmd_T + \left\{ DDOCma_{T-1} \cdot \left( e^{-k_n \cdot f_{O_2} \cdot \eta_n} + e^{-k_e \cdot f_{AN} \cdot \eta_e} \right) \right\}$$

有機炭素量

ガス化率

嫌気性 好気性

$$DDOCm = W \cdot DOC \cdot DOC_f$$

好気性補正係数

$\eta_n$   $\eta_e$

酸素混入による  
嫌気分解活性低下

分解性炭素率

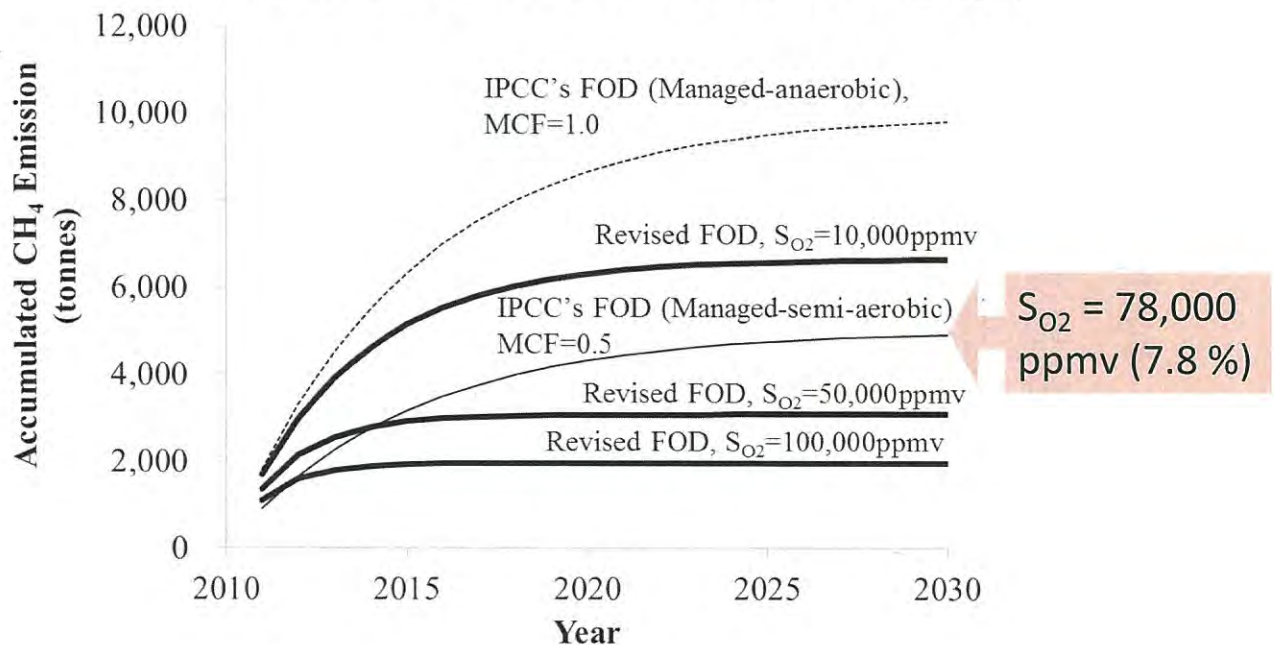
酸素欠乏による  
好気分解活性低下

乾燥による分解活性低下

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

5

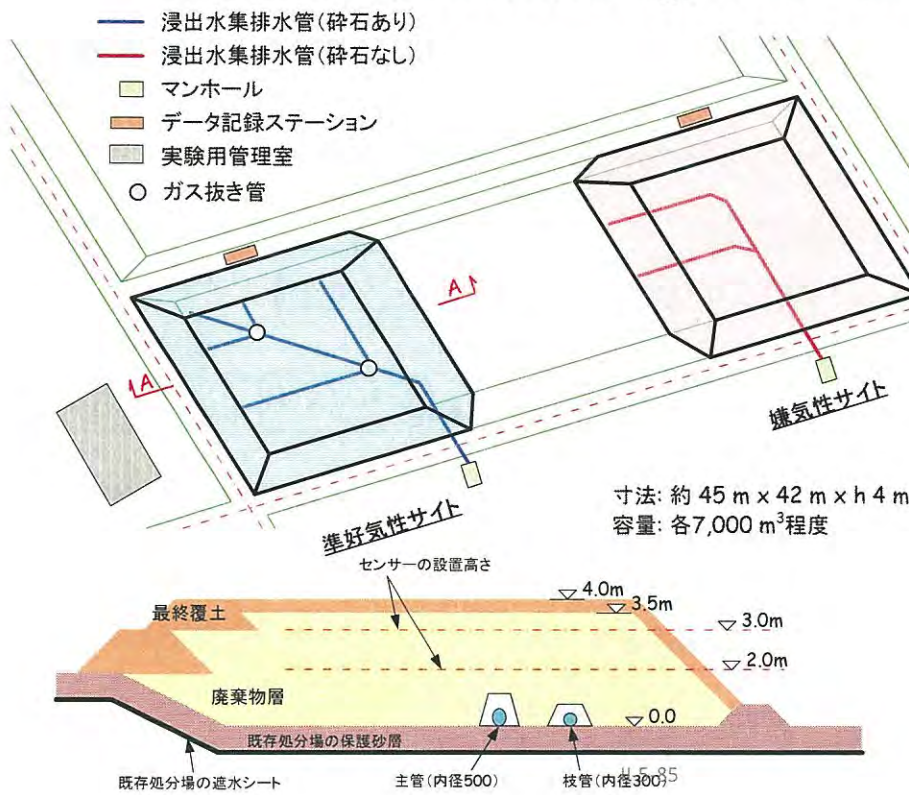
## A1001とIPCC FODの比較



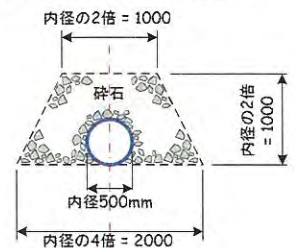
Parameters:  $0.2 \text{ y}^{-1}$  of  $k_n$ ,  $2 \text{ y}^{-1}$  of  $k_e$   
**14,300 ppmv of  $K_I$** , 7,000 ppmv of  $K_{I^*}$   
 1.0 (-) of  $\eta_n$ , 0.45 (-) of  $\eta_e$

6

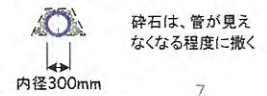
# 準好気性埋立テストセル (Leamchabang, Thailand)



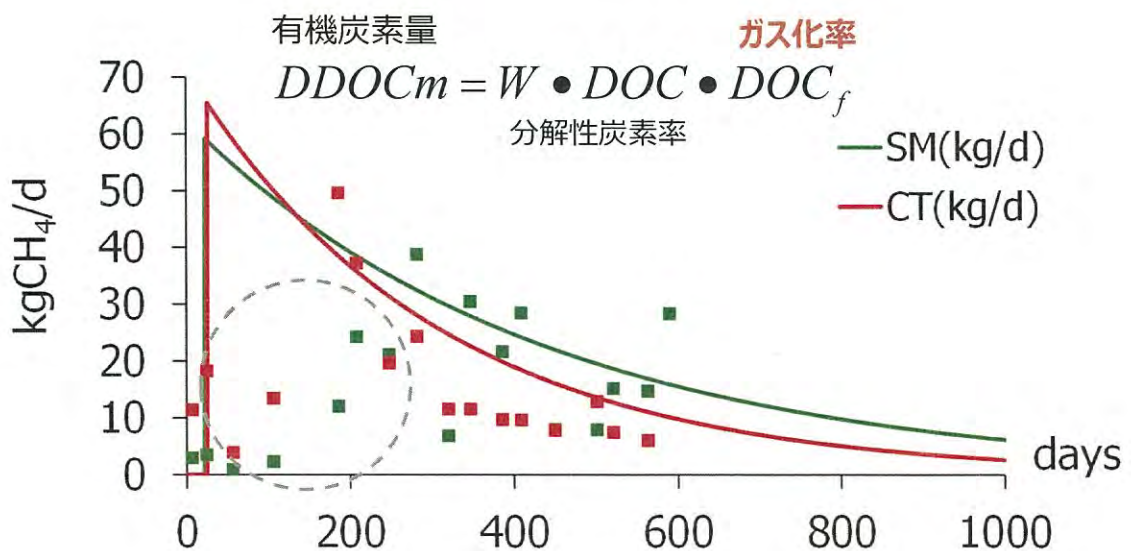
主管の断面図(準好気性サイト)



主管の断面図(嫌気性サイト)



## テストセルデータとの比較



Parameters: 0.55 y<sup>-1</sup> of  $k_n$ , 3.6 y<sup>-1</sup> of  $k_e$   
 14,300 ppmv of  $K_l$ , 16,000 ppmv of  $K_{l*}$   
 1.0 (-) of  $\eta_n$ ,  $\eta_e$  for CT, 0.45 (-) of  $\eta_n$ ,  $\eta_e$  for SM

# 大型ライシメータ

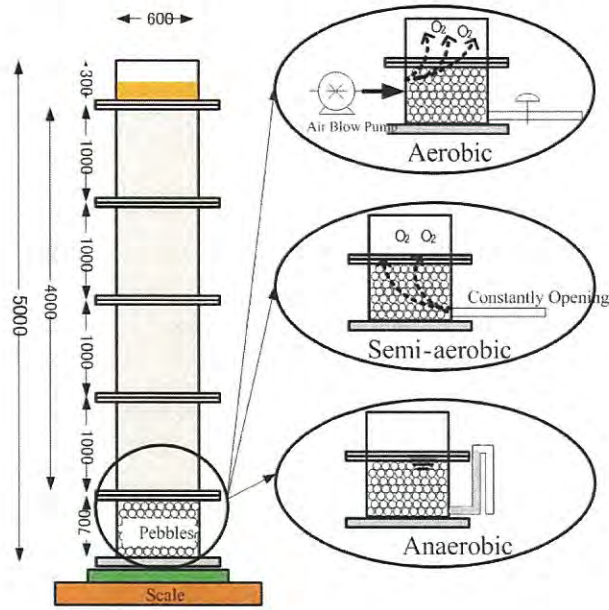


図1、H06号大型ライシメータ概要図

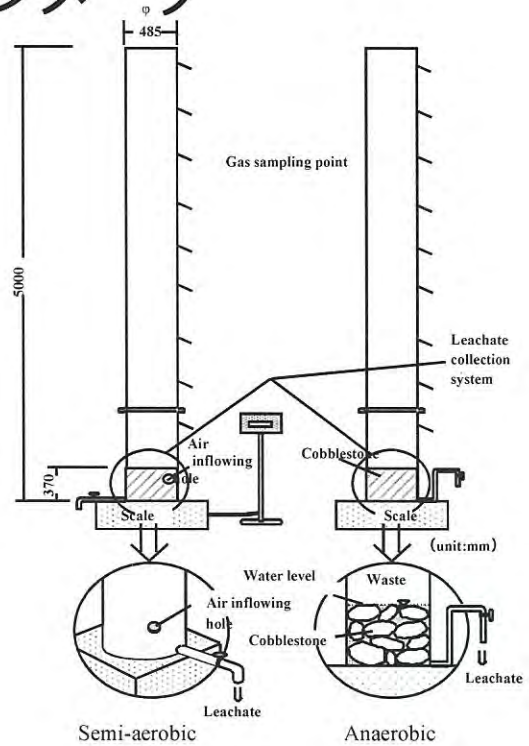
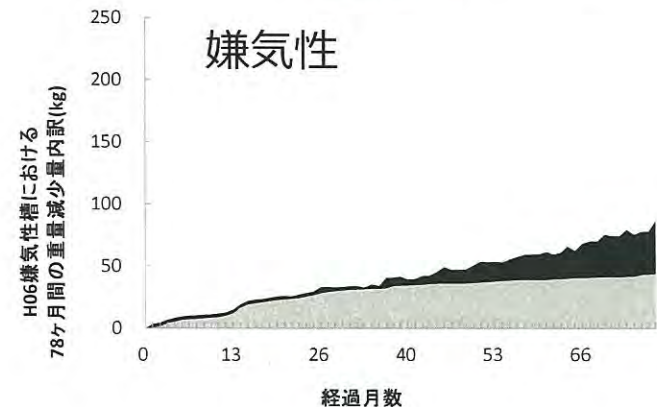
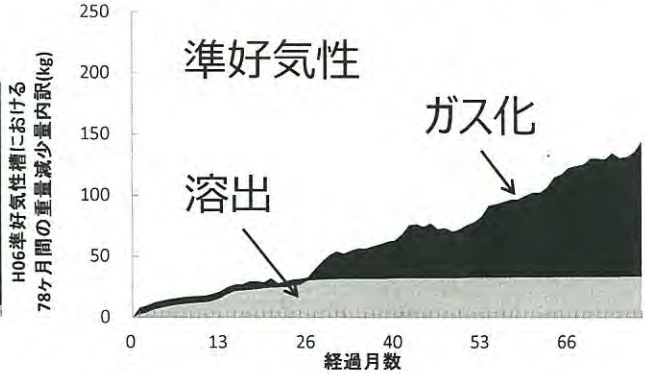
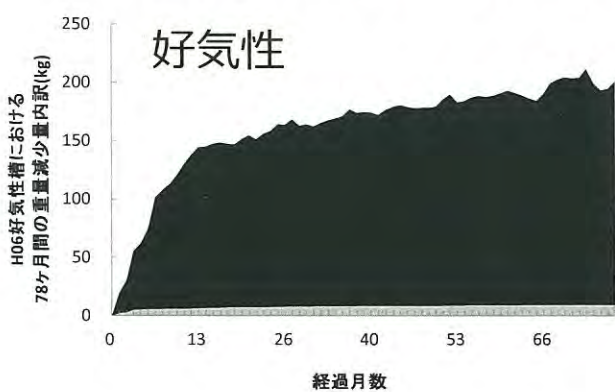


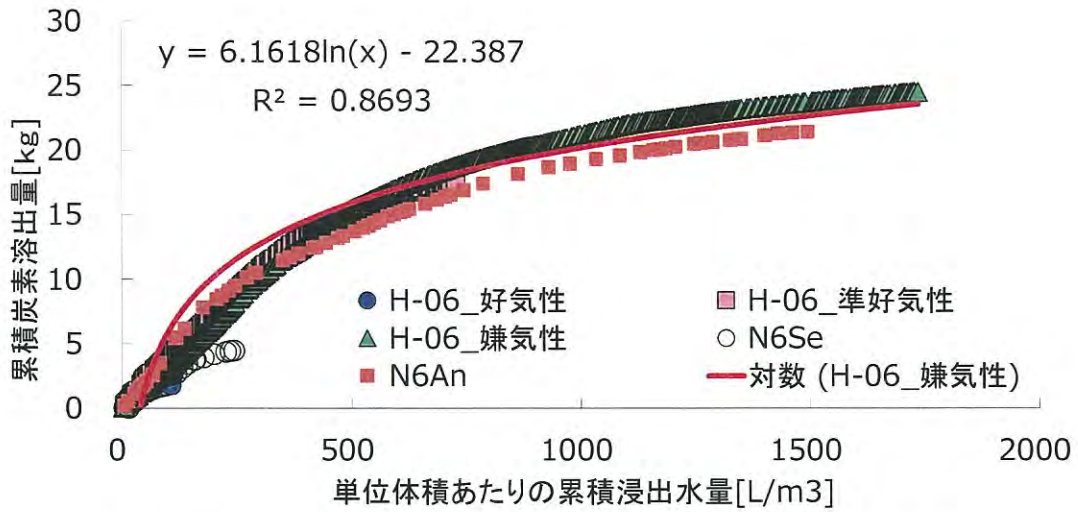
図2、N6号大型ライシメータ概要図

## 大型ライシメータにおける累積炭素分解量



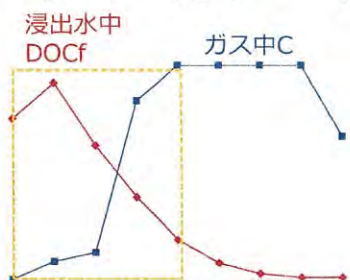
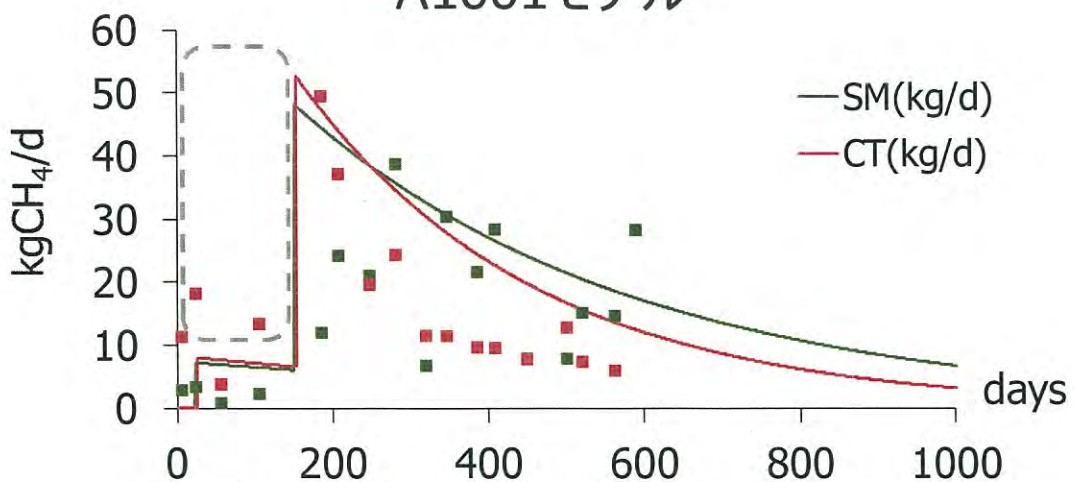
この実験系における  
可溶化→ガス化の時期  
好気性：3ヶ月後  
準好気性：29ヶ月後  
嫌気性：60ヶ月後

# 大型ライシメータにおける浸出水量と 累積溶出炭素量の関係



浸出水経由で流出する炭素量は浸出水量に依存する

## ガス化開始までの期間を考慮した A1001モデル



仮定：浸出水経由での流出：DOC<sub>f</sub>の15%, 150日間、その間の嫌気・好気分解速度は1/10

# 準好気埋立地への酸素供給モデル

- 目的

準好気性埋立地のガス挙動メカニズムを検討し、廃棄物の分解促進に必要な酸素供給量に及ぼす降雨・外気温の影響を検討する。

- 方法

- 一 断面二次元、非定常計算
- 一 気液二相流、
- 一 四成分ガス輸送、
- 一 廃棄物分解モデル

酸素混入による  
嫌気分解活性低下

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

酸素欠乏による  
好気分解活性低下

$$f_{AN} = \left( \frac{S_{O_2}}{K_{I^*} + S_{O_2}} \right)$$

## 計算モデルの概要

- 圧力・流れ場 (疑似二相流方程式)

$$\frac{\partial(\rho_w \theta_w)}{\partial p_w} \frac{\partial p_w}{\partial t} = \nabla \left[ -\rho_w \frac{k_{rw} K}{n_w} (\nabla p_w + \rho_w g \nabla z) \right]$$

$$\frac{\partial(\rho_g \theta_g)}{\partial p_g} \frac{\partial p_g}{\partial t} = \nabla \left[ -\rho_g \frac{k_{rg} K}{n_g} (\nabla p_g + \rho_g g \nabla z) \right] + Q_g$$

ガス発生/消費  
に伴う圧力変化  
 $Q_g$  (kg/m<sup>3</sup>/s)

$$Q_g = M_{CH_4} R_{CH_4} + M_{CO_2} R_{CO_2} + M_{O_2} R_{O_2} + \dots$$

- 濃度 (移流拡散方程式)

$$\frac{\partial(c_{CH_4} \theta_g)}{\partial t} + \nabla(-\theta_g D_e \nabla c_{CH_4} + u_g c_{CH_4}) = R_{CH_4}$$

$$\frac{\partial(c_{CO_2} \theta_g)}{\partial t} + \nabla(-\theta_g D_e \nabla c_{CO_2} + u_g c_{CO_2}) = R_{CO_2}$$

$$\frac{\partial(c_{O_2} \theta_g)}{\partial t} + \nabla(-\theta_g D_e \nabla c_{O_2} + u_g c_{O_2}) = R_{O_2}$$

$$\frac{\partial(c_{N_2} \theta_g)}{\partial t} + \nabla(-\theta_g D_e \nabla c_{N_2} + u_g c_{N_2}) = R_{N_2}$$

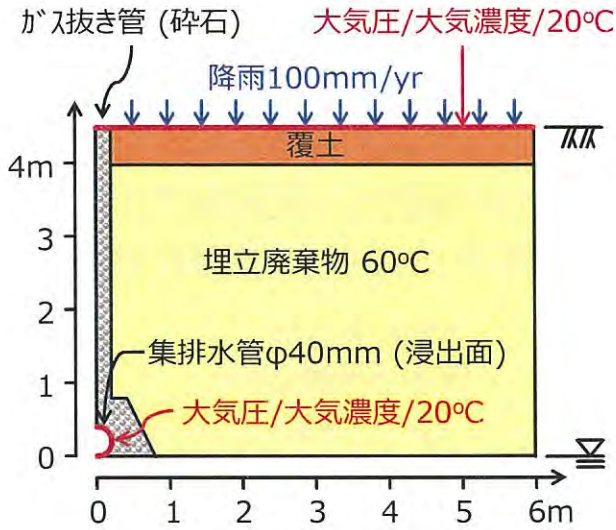
廃棄物分解に伴う  
ガス発生量/消費量  
 $R_i$  (mol/m<sup>3</sup>/s)

- 温度 (対流拡散方程式)

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla(-k_{eq} \nabla T + \rho c_p T) = Q_T$$

廃棄物からの  
分解生成熱  
 $Q_T$  (W/m<sup>3</sup>)

# 計算条件

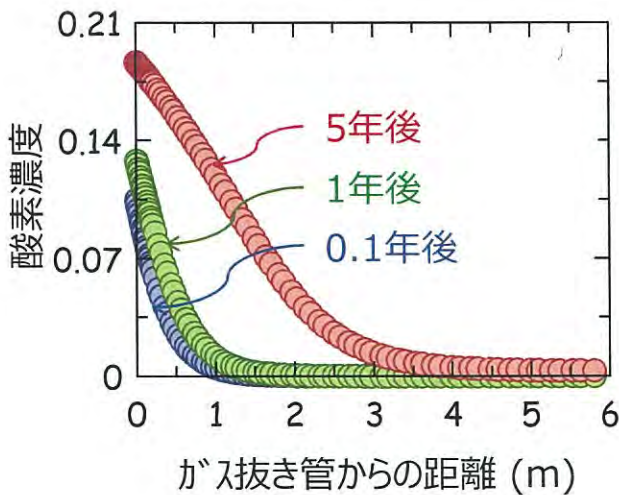


	廃棄物	覆土	砕石
乾燥密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1,200	1,800	1,500
固有透過度 (m <sup>2</sup> )	10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-14</sup>	10 <sup>-10</sup>
間隙率	0.3	0.3	0.5
VGパラメータ a (m <sup>-1</sup> )	3.01	3.01	9.03
VGパラメータ n	1.56	1.56	3.24
残留水飽和度	0.15	0.15	0
残留ガス飽和度	0.15	0.15	0
屈曲率	Millington-Quirk		
比熱 (J/kg/K)	1,000	800	1,200
熱伝導 (W/m/K)	0.95	0.4	0.4

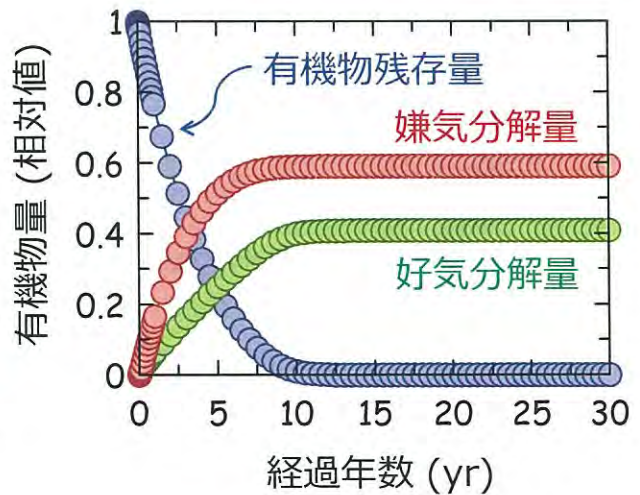
	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	粘性 (Ps*s)	拡散率 (m <sup>2</sup> /s)	比熱 (J/kg/K)	熱伝導率 (W/m/K)
純CH <sub>4</sub>	状態方程式	サッ-ラット	Chap.-Enskog (相互拡散係数を求める)	双曲線近似	多項式近似
純CO <sub>2</sub>	状態方程式	サッ-ラット		双曲線近似	多項式近似
純O <sub>2</sub>	状態方程式	サッ-ラット		双曲線近似	多項式近似
純N <sub>2</sub>	状態方程式	サッ-ラット		双曲線近似	多項式近似
混合	状態方程式	Wilke	(名称不明)	加重平均	(名称不明)

15

## 酸素侵入深さと有機物量の時間変化



酸素濃度の予測結果

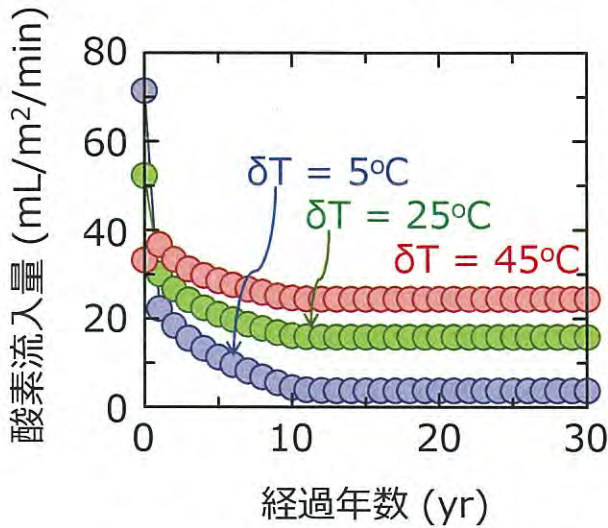


有機物量の予測結果

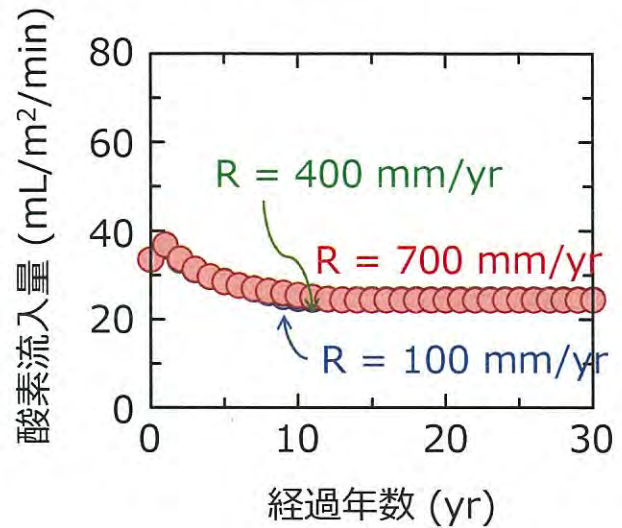
埋立層への酸素供給速度は、埋立地の構造のみならず、  
廃棄物の分解特性にも左右される。



# 集排水管からの酸素流入量



大気と埋立層の温度差の影響

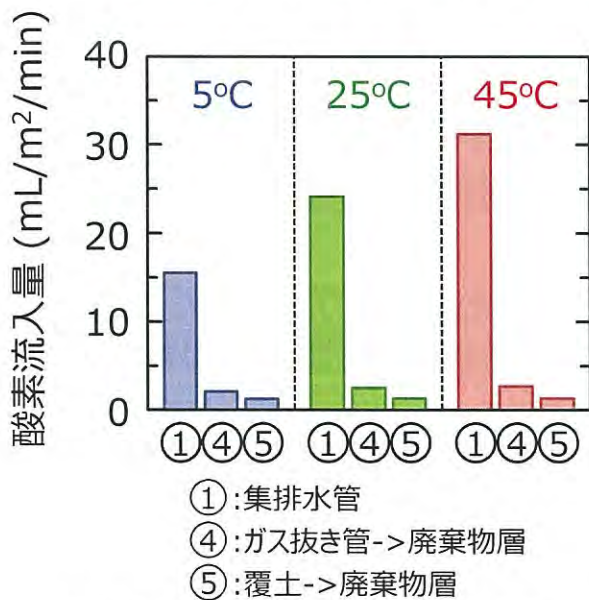


降雨量の影響

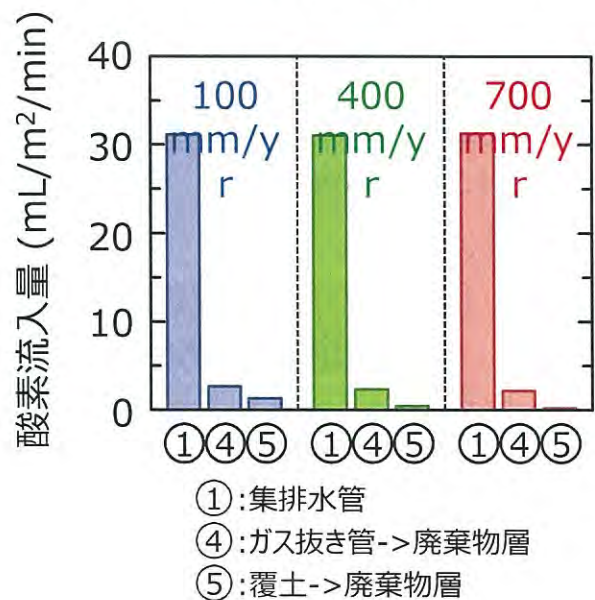
集排水管からの酸素流入量は、温度差とともに大きくなり、廃棄物安定化が進むにつれて小さくなる。降雨の影響は見られない。

17

# 埋立開始から3年目での平均酸素フラックス



大気と埋立層の温度差の影響

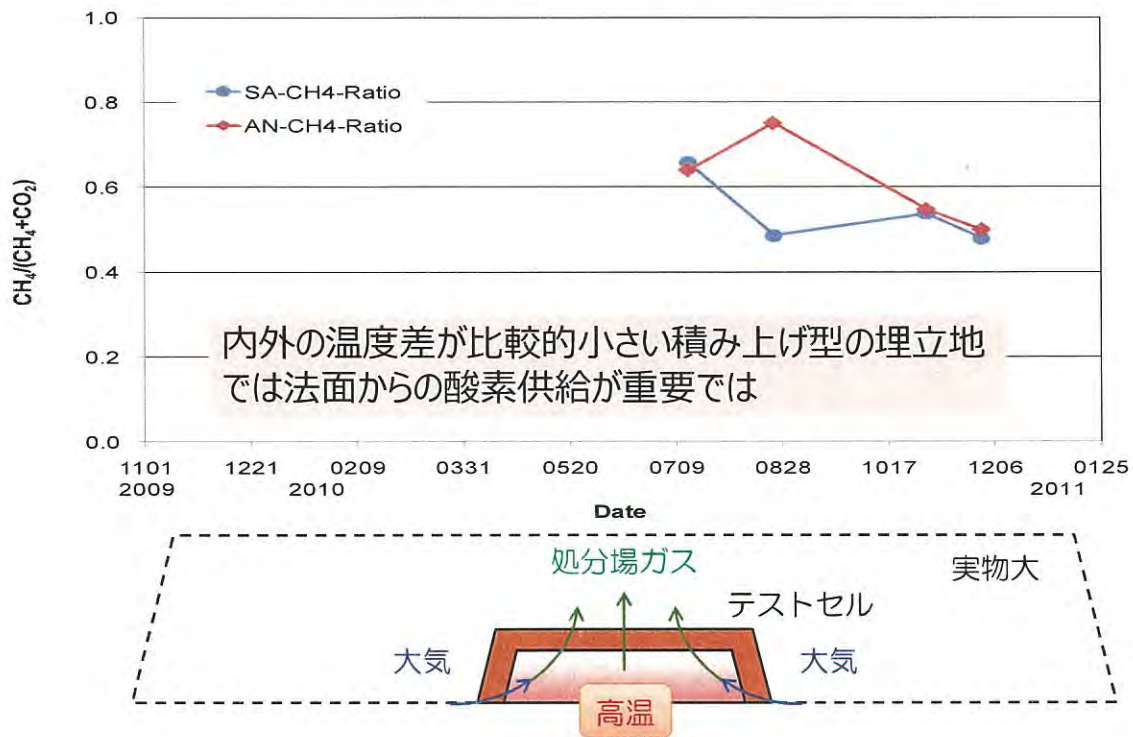


降雨量の影響

ガス抜き管から廃棄物層への酸素流入量は一定 -> 拡散支配  
降雨は覆土からの酸素流入量に影響を及ぼす

18

# テストセルにおける埋立地ガスのメタン比



## 主な成果のまとめ（1）

- 熱帯における準好気性埋立のパフォーマンスを検証するテストセルを設置し、埋立地ガス等の排出挙動をモニタリングした。
  - 埋立地ガス放出量は準好気性セルの対照セルよりも小さい。  
埋立地ガスのメタン比は準好気性セルと対照セルの差が小さい。
  - 排水促進によるごみ層の含水率低下の影響と積み上げ型埋立地の開放された法面からの大気の侵入が推測された。
- 大型ライシメータを用いて埋立地における有機性炭素・窒素の物質収支を求めた。
  - 流出量はガス化開始前に大きいこと、また降水量に依存していた。

## 主な成果のまとめ（2）

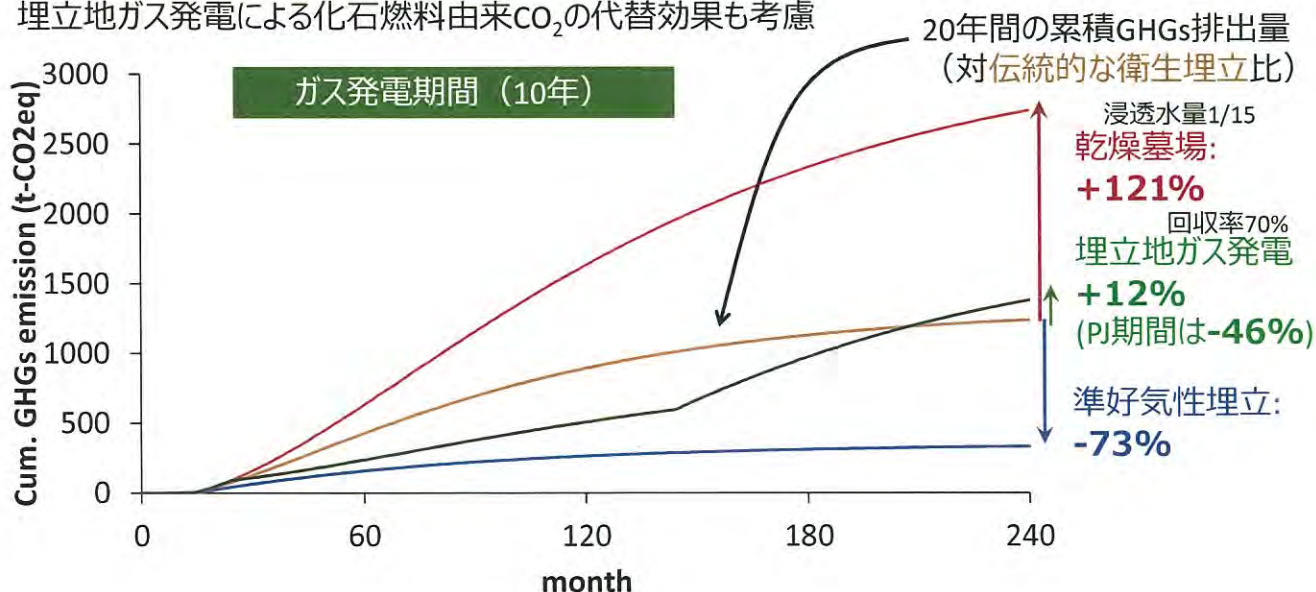
- IPCC Waste Model（FOD）を修正し、好気性／嫌気性分解に対する酸素濃度、水分および初期の流出の影響を表現するA1001 Modelを提案した。
  - 大気導入型の埋立地に対してメタン等の放出挙動を推計するモデルが得られた。
  - 寄与の条件に対して所定の機能発揮に必要な酸素濃度等の目標設定が可能となった。
- 準好気性埋立における大気導入量を評価するモデルを提案した。
  - 大気導入量に対する雨水の影響は小さく、また、ごみへの流入は拡散律速であった。

21

## 準好気性埋立の優位性

埋立炭素量100tからのGHGs排出計月変化

埋立地ガス発電による化石燃料由来CO<sub>2</sub>の代替効果も考慮



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

22

# 成果発信

- 原著・書籍
  - 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
  - Ishigaki T. (2011) Greenhouse Gas Emission from Solid Waste Disposal Sites in Asia. In: Sunil Kumar ed., Intergrated Waste Management volumell, INTECH, 461-472
  - Ishigaki T., Sawamura H., Ikeda K., Yamada M. (2012) Community Shift of Methane-oxidizing Bacteria in Cover Soil of Waste Landfills Due to Methane Emission. Environment and Pollution, 1 (1), 75-84
- 講演 (2) / 口頭・ポスター (24)

**Sardinia 2013 (Oct 2013, Cagliari, Italy): Special Session “Science of Semi-aerobic Landfill -Integration of field monitoring in Asia and model development”**



Waste Management (IF: 2.801)

23

## 年次計画

サブテーマ	2010年度	2011年度	2012年度
(1) 埋立地ガス放出緩和技術の埋立地ガス放出抑制機能の比較評価に関する研究 (国環研)	ビーカー／カラム実験 (文献調査を含む)		
	水分がガス化反応速度に与える影響の定式化	嫌気／好気条件が共存する条件下でのガス化反応の定式化	嫌気／好気共存条件を表現する改良型IPCC Waste Modelの提示
(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)	ライシメータ実験 (過去の実験データの解析を含む)		
	有機成分の気相、固相、液相への分解速度とその揭示変化の定式化	窒素成分の気相、固相、液相への分解速度とその揭示変化の定式化	IPCC Waste Model型の浸出水汚濁負荷流出モデルの提示
(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 (国環研)	ライシメータ／テストセル実験 (現地観測含む)		
	水収支および大気侵入量の観測	カラム実験 多孔質二相流カラムパラメータの取得	(熱帯条件下における) 準好気性埋立設計法の提示

24