

埋立が終了した廃棄物処分場内に設置されたガス抜き管近傍の ガス流れシミュレーション

Numerical simulation of landfill gas around a gas flow extraction well in a closed landfill

室蘭工業大学大学院 ○学生員 遊佐みどり (Midori Yusa)
室蘭工業大学 正員 吉田英樹 (Hideki Yoshida)

1.はじめに

埋立が終了した廃棄物処分場の安定化の促進を目的として、処分場内に新たにガス抜き管を設置し、空気の流れ並びに内部で発生した埋立ガス（以下Landfill Gas略してLFGとする）を排出させる方法がある。この方法により、酸素を必要とする好気性反応が活発になり、早期安定化に向かうことが考えられる。しかし、ガス抜き管設置によりどの程度酸素の侵入があり、安定化に効果を挙げているのか具体的に検討している例は少ない¹⁾。筆者らは埋立が終了した廃棄物処分場に設置されたガス抜き管の現場調査を継続的に行ってきたが、このようなガス抜き管を設置することで、廃棄物層内の生成ガスと大気中の酸素がどのような移動現象を伴っているのかを明らかにすることを目的とし、有限要素法に基づいた解析ソフトウェアCOMSOLによりシミュレーションを行った。

2.解析概要

2.1.解析モデルの概要

図1に現場調査に即した解析領域を示した。解析は円筒座標系の軸対象二次元モデルとした。廃棄物層、ガス抜き管は共に高さ $H=20\text{m}$ で下部は原地盤に接し、廃棄物層が半径 $R=10\text{m}$ 、ガス抜き管は半径 $r_0=0.1\text{m}$ とした。ガス抜き管周辺においてLFGがDarcy則で流れているとし、廃棄物層側部・底部境界はガス流れがないとしている。また廃棄物層上部は大気圧 p_0 に等しいとした。ここで、嫌気性微生物反応では CH_4 並びに CO_2 が3:2で発生するものとし、廃棄物層内は一概にLFGで充満しているとし、LFGは圧力勾配、拡散によって流れると仮定した。また解析において、廃棄物層内と大気に温度差がなく、廃棄物層内の温度は常温（ 20°C ）で一様になっていると仮定している。比透水係数は $10^{-12}[\text{m}^2]$ で一定とし、期間は2年とした。

2.2.Darcy 流れ理論によるガス流れ

廃棄物層内を多孔体として解析する際に、次の Darcy 則及び連続の式を用いた。各記号の説明は、末尾に示した。

$$u = -\frac{\kappa}{\eta} \nabla p \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0$$

2.3.Maxwell-Stefan 式による拡散現象

Maxwell-Stefan 式は以下のように表すことができる。

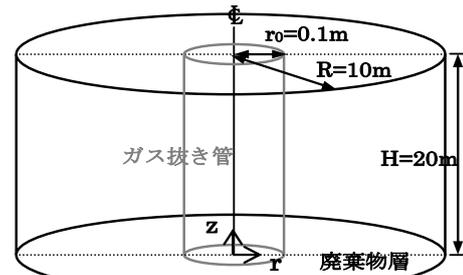


図1.解析モデル

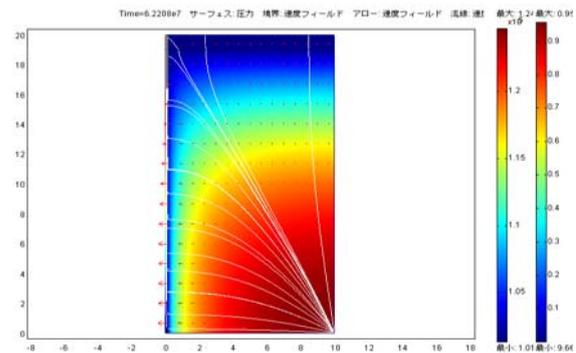


図2. 移流現象のみのガスの流線と圧力分布

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \omega_i + \nabla \cdot \left[-\rho \omega_i \sum_{j=1}^N D_{ij} \left\{ \frac{M_j}{M_i} (\nabla \omega_j + \omega_j \frac{\nabla M}{M}) + (x_j - \omega_j) \frac{\nabla p}{p} \right\} + \omega_i \rho u \right] = R_i$$

相互拡散係数は約 $2 \times 10^{-5}[\text{m}^2/\text{s}]$ とし、廃棄物層内は多孔体内の拡散を考慮するため、修正係数 (ε/ξ) を拡散係数に乗じた。

3.解析結果

3.1. ガス抜き管による LFG の排除効果と管上端の流速

廃棄物層内では様々な現象が複合的に起こっており、それぞれの現象がどの程度影響を与えるか知る必要がある。まず始めに、ガス抜き管設置による廃棄物層内のLFGの排除効果を検証した。ここではDarcy流れ（以下、移流現象とする）のみ起こるとして、Darcy則及び連続の式を用いた。廃棄物層内部は嫌気性条件であるとし、 R_{O_2} は影響しないとした。またガス抜き管上端には大気圧 p_0 が作用している。実処分場における調査結果を基に、ガス抜き管上端の流速は約 $0.1 \sim 1.0[\text{m/s}]$ とした。図2にガスの流れ及び圧力分布を示した。図中の矢印は気体の

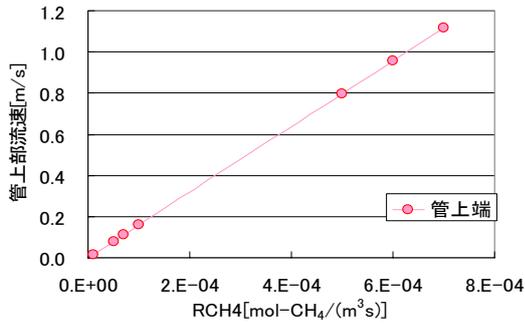


図 3.移流現象における管上端流速と R_{CH_4} の関係

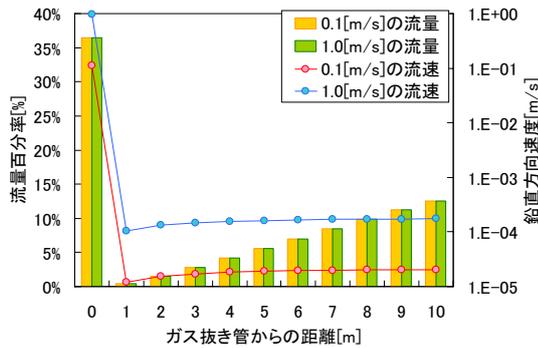


図 4.移流現象における管上端流速と R_{CH_4} の関係
[$R_{CH_4}=7 \times 10^{-5}$ (0.1[m/s])、 6×10^{-4} (1.0[m/s])]

移動方向を、色は値が高いほど赤く、低いほど青くなっている。深い所で発生したLFGはほとんどガス抜き管に流入している。

図 3 に移流現象におけるガス抜き管上端流速と R_{CH_4} の関係を示した。 R_{CH_4} の増加に伴い、ガス抜き管上端の流速が線形に増加していることが分かる。図 4 にガス抜き管からの距離と、地表面の流速と概算した流量の関係を示した。ガス抜き管上端の流速は調査結果を基にしている。これより廃棄物層内から発生するLFGの約 36%はガス抜き管から排出されていることが分かる。

3.2.拡散流れによる酸素侵入

次に拡散に伴う廃棄物層への酸素侵入について検討した。ここでは拡散現象と微生物反応（嫌気性・好気性）現象が起こるとし、Maxwell-Stefan式と連続の式を用いている。 R_{CH_4} は 10^{-8} [mol-CH₄/(m³s)]で一定とし、嫌気性反応での炭酸ガス反応速度 R_{CO_2} は R_{CH_4} の 2/3 とした。 R_{O_2} の変化によって酸素の侵入深さと好気性反応領域がどのように変化するか検証した。図 5 に R_{O_2} が 1.0×10^{-4} [mol-O₂/(m³s)]、図 6 に R_{O_2} が 1.0×10^{-7} [mol-O₂/(m³s)]の場合の解析結果を示した。また図 7 にガス抜き管から 2mの位置での R_{O_2} の変化による酸素の深さ方向の質量分率の変化を示した。ここで横軸は空気中の酸素の存在比(21%)に対する廃棄物層内の酸素存在率を示している。廃棄物層内の酸素の割合が 50%になる地点を見ると、 R_{O_2} が 10^{-4} [mol-O₂/(m³s)]の場合は約 1m、 R_{O_2} が 10^{-7} [mol-O₂/(m³s)]の場合は地表面より 14mの地点であった。

このように酸素消費速度が大きいと酸素侵入深さは浅くなる。したがって、廃棄物層内の有機物が好気性反応によって消滅するまで酸素の侵入深さは浅くなり、反応エリアは拡大しないことが分かる。

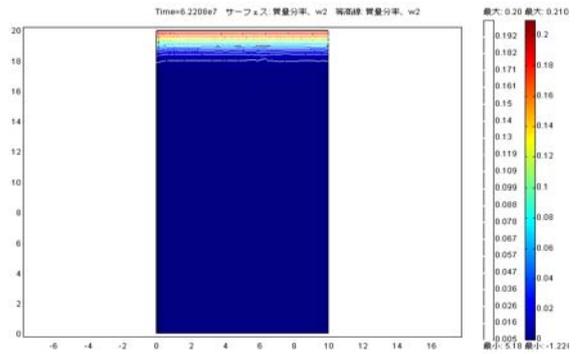


図 5.拡散流れのみの酸素の質量分率結果
 $R_{O_2}:10^{-4}$ [mol-O₂/(m³s)]

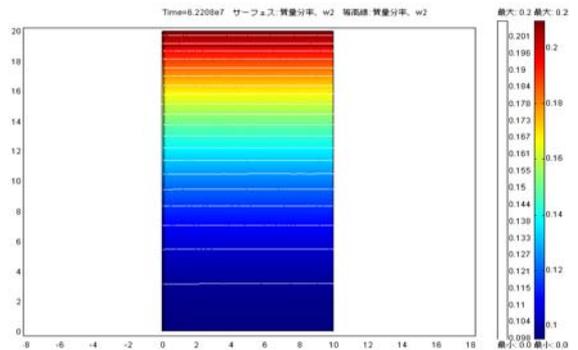


図 6.拡散流れのみの酸素の質量分率結果
 $R_{O_2}:10^{-7}$ [mol-O₂/(m³s)]

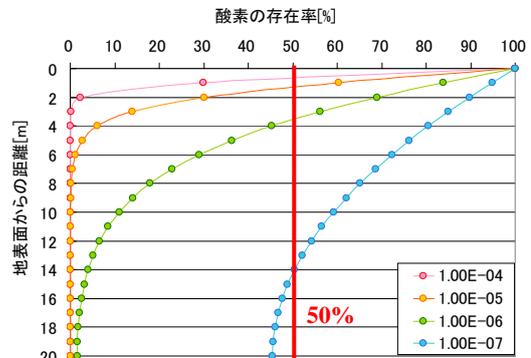


図 7. R_{O_2} が変化した時の酸素の存在率

3.3 廃棄物層内酸素侵入深さへの嫌気性反応の影響

次に、嫌気性反応により発生したCH₄、CO₂からなるLFGが内部で発生し、地表面に向かって流れることにより酸素侵入深さがどのように影響を受けるのかを検討した。ここでは移流・拡散・微生物反応（嫌気性・好気性）現象が起こることとし、Maxwell-Stefan式とDarcy則及び連続の式を用いた。表 1 に示したように好気性・嫌気性反応が様々な速度で起こっていることを仮定した。図 8 に、ガス抜き管中心より 2m離れた地点の酸素の質量分率を示す。横軸は空気組成に対する廃棄物層内の酸素の百分率を示している。

$R_{O_2}=10^{-4}$ [mol-O₂/(m³s)]のケースでは、 R_{CH_4} が大きくなると酸素の侵入深さが浅くなる事が分かる。酸素濃度 50%の深さは、4-a、3-aで約 0.70m、2-aで約 0.69m、1-a

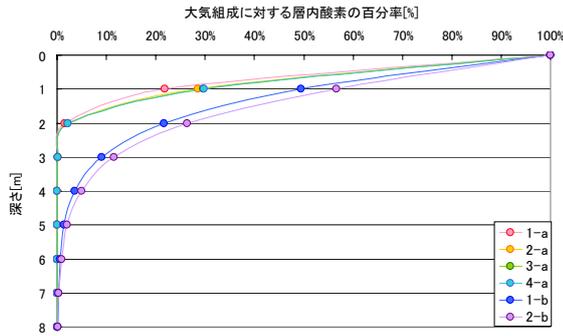


図 8. 微生物反応による質量分率 (酸素)

表 1. 解析条件

| | $R_{CH_4}[\text{mol-CH}_4/(\text{m}^3\text{s})]$ | $R_{O_2}[\text{mol-O}_2/(\text{m}^3\text{s})]$ |
|-----|--|--|
| 1-a | 10^{-5} | 10^{-4} |
| 2-a | 10^{-6} | 10^{-4} |
| 3-a | 10^{-7} | 10^{-4} |
| 4-a | 10^{-8} | 10^{-4} |
| 1-b | 10^{-5} | 10^{-5} |
| 2-b | 10^{-6} | 10^{-5} |

表 2. 解析条件

| | 現象 | | | | 管上部境界面 | |
|-----|----|----|----------------------|----------------------|-----------|-------|
| | 移流 | 拡散 | R_{CH_4} | R_{O_2} | 流速 | 圧力 |
| 1-c | ○ | ○ | 1.0×10^{-8} | 1.0×10^{-4} | -1.0[m/s] | - |
| 2-c | ○ | × | 1.0×10^{-8} | 1.0×10^{-4} | - | p_0 |
| 3-c | ○ | × | - | - | -1.0[m/s] | - |

で約 0.58m であり、3.3 で示した拡散のみのケースに比べて、約 30% 浅くなる。また、 $R_{O_2}=10^{-5}[\text{mol-O}_2/(\text{m}^3\text{s})]$ のケースでも同様に 1-b で約 0.98m、2-b で 1.18m となり、3.3 で示した拡散のみのケース (1.30m) に比べて 10% 浅くなる。酸素侵入深さは R_{CH_4} の増加によって顕著に浅くなるのが分かる。

3.4. ガス抜き管による廃棄物層内への空気引き込み効果

廃棄物処分場における現地調査ではガス抜き管上端の流速が 0.1~1.0[m/s] であることが確認されている。ガス収支を考えるとガス抜き管周辺の地表面から空気が引き込まれている可能性がある。これを基にガス抜き管による地表面からの空気の引き込みによる影響を検証する。表 2 にこの解析ケースの解析条件を示した。1-c は移流・拡散・反応現象を考慮し、かつガス抜き管上端のガス流れを考慮した解析条件である。また、ガス抜き管上端の速度に影響を与える要因として、内部微生物反応で発生した内圧上昇による上向きのガスフラックスによる影響と、ガス抜き管による地表面からの空気の引き込みによる下向きのガスフラックスの影響が考えられる。前者を 2-c、後者を 3-c とし、これらがどのように廃棄物層内のガスの収支に影響を与えているのか検証した。

まず 3-c について述べる。ここでは移流現象のみ起こるとし、Darcy 則及び連続の式を用いた。表 2 よりガス抜き管上端の境界面は上向きに流速が 0.1[m/s] であるとして、微生物反応の影響はないとした。図 9 にガス抜き管上端で上向きに流速が流れている場合の廃棄物層内部の圧力分布を、また図 12 にガス抜き管周辺の流速分布

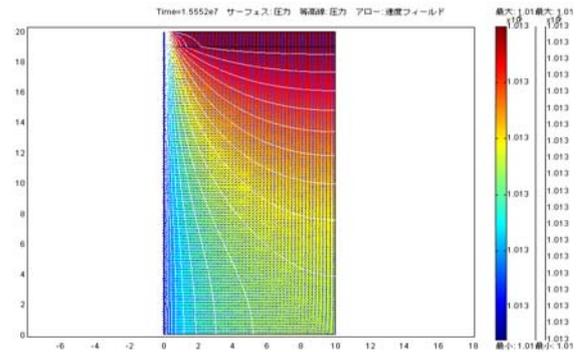


図 9. ガス抜き管上端で上向きに流速がある場合の移流現象による圧力分布

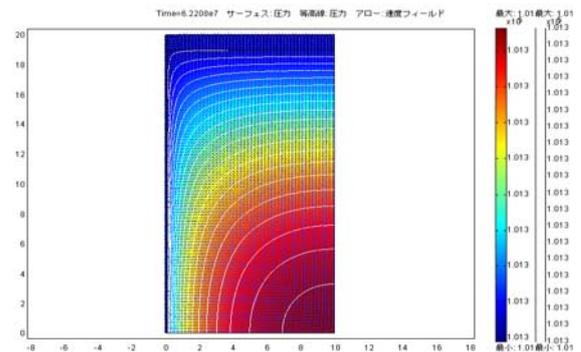


図 10. 移流現象・微生物反応による圧力分布

を示した。図 12 より、ガス抜き管中心から 1m の地点で下向きに $6.3 \times 10^{-10}[\text{m/s}]$ で空気が吸い込まれているが、その速度は極めて小さい。このように管の上端で上向きのガスフラックスがあっても廃棄物層内で内圧の低下が起こっており、地表面からの空気の引き込み効果が小さくなるのが分かった。

次に移流・反応を考慮した 2-c について述べる。微生物反応で発生した CH_4 、 CO_2 によるガス抜き管上部へのガスフラックスによる影響を検証する。表 2 に示したようにここでは移流・微生物反応 (嫌気性・好気性) 現象が起こるとし、Darcy 則及び連続の式を用いた。また CH_4 、 CO_2 の発生による影響が顕著に分かるように、最も酸素侵入効果の大きい R_{CH_4} と R_{O_2} の組み合わせを求め、 $R_{CH_4}=10^{-8}[\text{mol-CH}_4/(\text{m}^3\text{s})]$ 、 $R_{O_2}=10^{-4}[\text{mol-O}_2/(\text{m}^3\text{s})]$ とした。図 10 に移流・微生物反応現象 (好気性・嫌気性反応) による圧力分布を示した。ガス抜き管上端の流速は $1.6 \times 10^{-5}[\text{m/s}]$ となり実測値 0.1~1.0[m/s] に比べて、極めて小さいことが分かる。

最後に 1-c について述べる。表 2 よりガス抜き管上端の流速を 0.1[m/s] とした。ここでは移流・拡散・微生物反応 (嫌気性・好気性) 現象が起こるとし、Maxwell-Stefan 式と Darcy 則及び連続の式を用いた。また $R_{CH_4}=10^{-8}[\text{mol-CH}_4/(\text{m}^3\text{s})]$ 、 $R_{O_2}=10^{-4}[\text{mol-O}_2/(\text{m}^3\text{s})]$ とした。図 11-1 には移流・拡散流れによる酸素の質量分率分布を、図 11-2 には図 11-1 のガス抜き管近傍の拡大図を示した。これよりガス抜き管の周囲約 1m 以内で地表面から廃棄物層内に酸素が流入している。ガス抜き管上端の流速 0.1[m/s] と比較して図 12 の 1-c において、1m 以上離れた

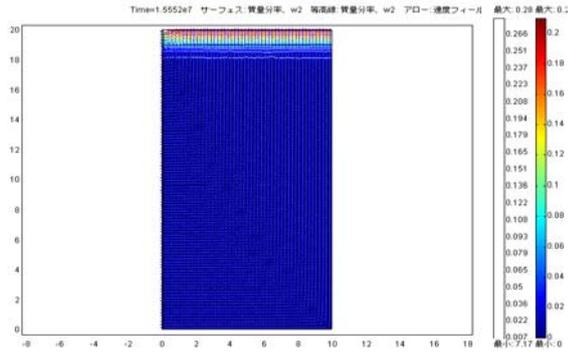


図 11-1. 移流・拡散流れによる質量分率（酸素）結果

位置では上向きに 9.7×10^{-10} [m/s] から 2.7×10^{-9} [m/s] の値を示し、空気の引き込み効果は見られない。このようにガス抜き管上端で生じている上向きのガスフラックスによる廃棄物層内への空気の吸い込み効果はガス抜き管の 1m 以内を除き、見られないことが分かる。

これらの結果をまとめると、処分場の現場で観測されているようなガス抜き管上端の上向き流速 $0.1 \sim 1.0$ [m/s] はガス抜き管内部のガス発生圧力のみで生じるものでないこと、またこのような上向き流速による空気の廃棄物層への吸い込み効果は限定的であることがわかった。ガス抜き管上端の上向き流速 $0.1 \sim 1.0$ [m/s] が生じているメカニズムは十分明らかでないが、廃棄物層内と外気との温度差によって生じる浮力が大きな影響を与えていることが予測されるが、これはさらに検討が必要である。

4. 結論

本研究の解析条件下におけるシミュレーションの結果として、

- 1) 調査結果を基にガス抜き管上端の流速を約 $0.1 \sim 1.0$ [m/s] とし、ガス抜き管設置による廃棄物層内の LFG の排除効果を検証したが、廃棄物層内から発生するガスの約 36% はガス抜き管から排出されていることが分かった。
- 2) 拡散現象下における酸素消費速度の変化による廃棄物層への酸素侵入深さを検討した。廃棄物層内の酸素の割合が 50% になる地点を見ると、 R_{O_2} が 10^{-4} [mol- O_2 /(m^3s)] の場合は約 1m、 R_{O_2} が 10^{-7} [mol- O_2 /(m^3s)] の場合は地表面より 14m の地点であった。酸素消費速度の増加に伴って、地表面からの酸素侵入深さは浅くなった。廃棄物層内の有機物が好気性反応によって消滅するまで酸素の侵入深さは浅く、反応エリアは拡大しないことが分かった。
- 3) 移流・拡散・微生物反応（嫌気性・好気性）現象下における廃棄物層内の酸素侵入深さへの嫌気性反応の影響を検討した。 R_{CH_4} 、 R_{O_2} の減少に伴って酸素侵入深さが深くなった。嫌気性反応が活発で好気性反応が乏しい場合、酸素の侵入が困難であり、埋め立て初期に空気の侵入が少ないと廃棄物層内が嫌気性領域で満たされ、安定化まで時間がかかると考えられる。
- 4) 調査結果を基にガス抜き管上端の流速が約 $0.1 \sim 1.0$ [m/s] として、ガス抜き管による地表面からの空気が引き込み効果を検討した。1-c、3-c より、ガス抜き

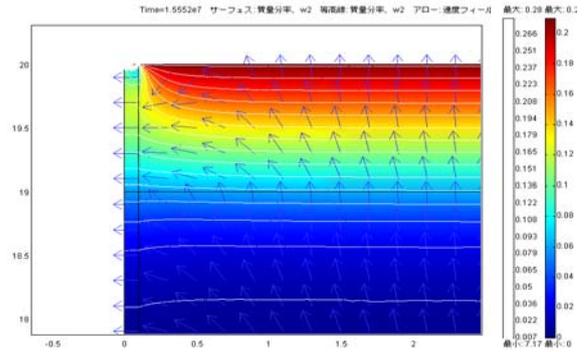


図 11-2. ガス抜き管近傍の質量分率（酸素）結果

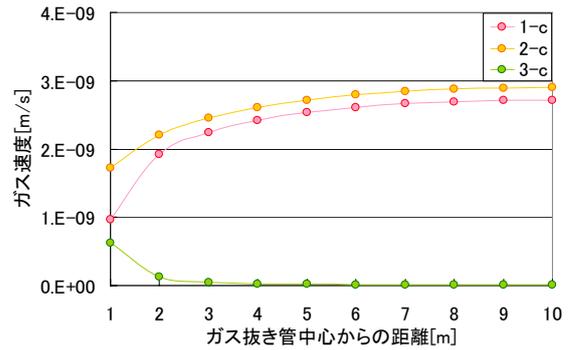


図 12. ガス抜き管周辺の流速分布

管上端の流速が約 0.1 [m/s] とした時、地表面から空気が侵入しうるのは約 1m であった。

これらよりガス抜き管上端からの排出量と地表面から引き込まれる空気の侵入量の収支が合わず、地表面からの侵入の不足分を補うために廃棄物層内で内圧の低下が起きていると見られる。内圧の低下により地表面からの空気の引き込み効果が小さくなることが分かった。

- κ : 比透水係数 [m^2]
- η : 流体粘性 [$kg/(m \cdot s)$]
- u : ダルシー流速 [m/s]
- p : 圧力 [$kg/(m \cdot s^2)$]
- ρ : 密度 [kg/m^3]
- D_{ij} : Maxwell-Stepfan 拡散係数
- ω : 質量分率
- M : 混合物のモル合計量 [m^2/s]
- M_j : モル質量 j [-]
- x_j : j のモル分率
- ε : 空隙率 [kg/m^3]
- ξ : 屈曲係数 [kg/m^3]
- R_i : j の反応速度 [$mol/(m^3s)$]
- R_{CH_4} : 埋立層内でのメタン発生速度 [$mol-CH_4/(m^3s)$]
- R_{O_2} : 埋立層単位体積あたりの酸素消費速度 [$mol-O_2/(m^3s)$]

参考文献

- 1) 田中信寿・神山桂一：廃棄物埋立処分地におけるガス及びガス成分の移動について、廃棄物学会誌 VoL2, No1, pp46-58, 1991.