

最終処分場を考える

Ⅲ 準好気性埋立地における空気流れとモニタリング方法

松 藤 敏 彦*
Toshihiko MATSUTO

1. はじめに

埋立地は大きく、嫌気性と好気性に分類される。生ごみなどの有機物を含むごみを埋め立てると内部は嫌気的となり、メタンガスが発生する。強制的に空気を送り込むのが好気性埋立であり、安定化は嫌気性埋立より早い。しかしエネルギーを必要とすることが欠点であり、過度の温度上昇によって自然発火のリスクもある。これに対して、準好気性埋立は集排水管末端を開放することによって動力を要せずに埋立地内部に空気が供給される、福岡大学花嶋教授によって提案された日本独自の技術である。欧米でも、Semi-aerobic landfillは広く知られており、優れた工法と認められている。

準好気性構造は、埋立地内部に動力なしで空気を送り込むことができる。しかしどのように「エアレーシ

ョン」されるかについて、空気の動きに注目した現場的な報告はなかった。本稿は、実埋立地における調査によって明らかにした準好気性埋立地における空気流れを説明し、最後に安定化進行のモニタリング方法を提案する。

2. 空気の流れ

2. 1 従来の考え方

図1¹⁾は準好気性埋立の構造を表す代表的な図であり、底部集排水管の末端開放と、堅型ガス抜き管を集排水管に連結することが特徴である。当初は底部集排水管のみであったが、のちに堅型集排水管が構造の一部となった。図2に示すように「底部集排水管から空気が埋立地内部に供給されるが、埋立地の廃棄物層厚が増すと空気の供給が不十分となることから、集排水管を縦方向に延長した」というのが堅型ガス抜き管誕生の経緯²⁾ということである。このため廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領³⁾では、堅型ガス抜

*北海道大学大学院

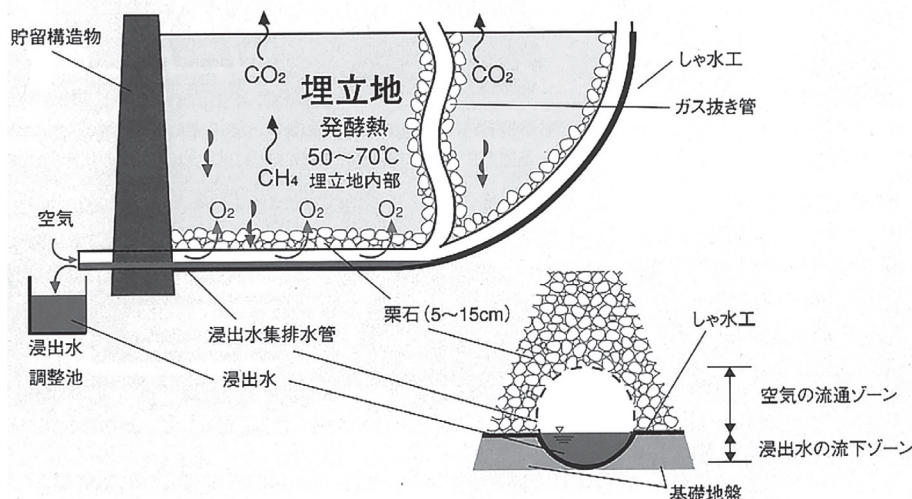
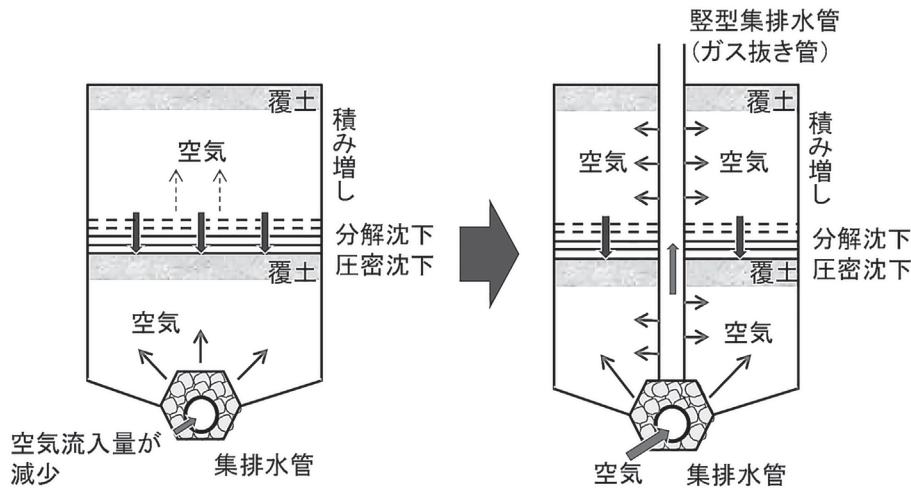


図1 概準好気性埋立の概念図¹⁾



き管はまず「縦型集排水管」として説明され、ガス抜き管も兼用すると説明されている。

底部集排水管から埋立層に酸素が供給されるので、集排水管の周囲に好氣的なゾーンが形成される。したがって、鉛直方向に延長した縦型ガス抜き管のまわりも同様と考えるのが自然であり、そもそもそのことが「縦型集排水管」が生まれた動機であった。しかし底部集排水管と較べてガス抜き管まわりの空気の流れは、はっきりとしたデータと根拠がないまま想像の範囲にとどまっていた。図1はガス抜き管から空気が侵入する矢印がないし、ガス抜き管の上端や埋立地表面から酸素が供給されるよう描かれた図もある。

2. 2 既往研究に見られるヒント

まずガス抜き管まわりの流れを考えると、埋立ガスがガス抜き管に向って集まり、空気がその逆方向にガス抜き管から埋立地に入ることは可能だろうか。これに対して、埋立ガスも空気もガス抜き管に集まることを示唆する研究がある。

福岡大学は、福岡市の処分場における調査を長く行っている。筆者は伏谷埋立場において、集排水管末端でドライアイスの煙が勢いよく流れ込むのを見せていただいたことがある。空気が末端から流入することは明らかであり、この流速は冬は大きく、夏は小さいことが報告されている⁴⁾(図3)。また深さ3mでガス抜き管内と5m離れた廃棄物層温度を連続測定したところ、ガス温度は降雨後の低下を除くと、廃棄物層温度とほぼ同じであった(図4)。廃棄物層温度は気温の変化に伴ってゆるやかな季節変動を示すが変動幅は小さく(埋立地が大きな熱容量をもつため)、気温との差は

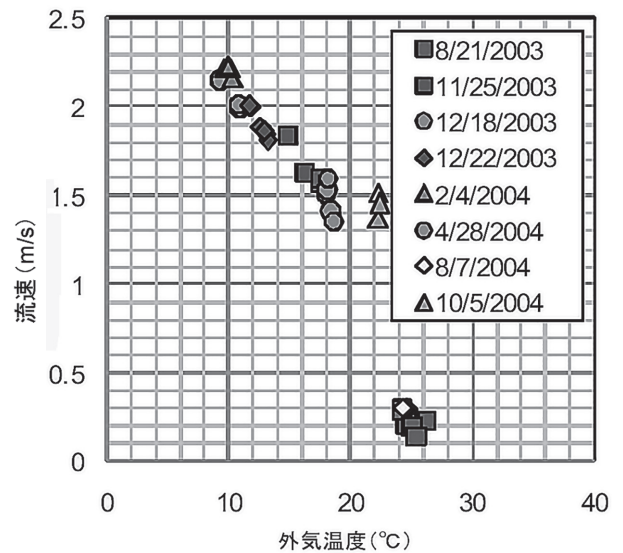


図3 集排水管出口における空気流入流速(文献4)の図の元データより作図)

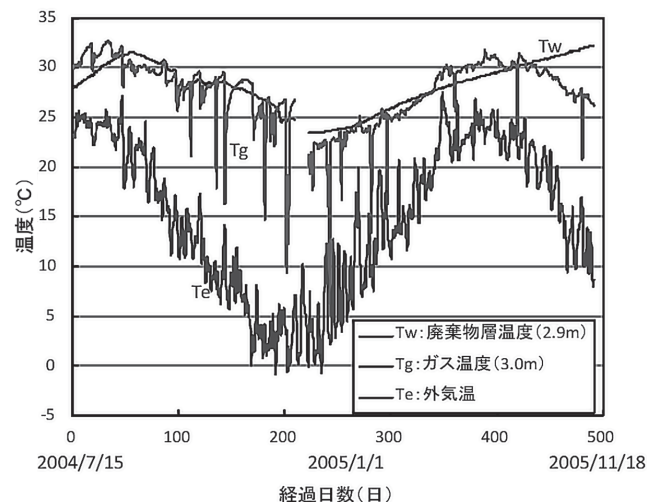


図4 埋立層内およびガス抜き管内温度(文献5)より作図)

夏5℃程度に対し、冬は20℃程度と大きい。この2つの図より、気温との温度差が大きい冬に流入空気量が大きいことは、空気流入の駆動力が浮力であることを、ガス抜き管内と廃棄物層の温度が同じであることは、空気が廃棄物層を通過してガス抜き管に流入していることを示唆している。また、筆者が旭川市中園処分場で行った調査⁶⁾では、埋立終了後に埋設したガス抜き管の最深部における窒素ガス濃度が高かった。集排水管とは接続していないことから、空気が段状となっている埋立地斜面から流入して廃棄物層を通り、ガス抜き管に向かって流れていたと推察した。

以上のことから、埋立地内外の温度差によって浮力が発生し、ガス抜き管が出口となってガスが流出し、内部が負圧となって集排水管から空気を吸い込むという、**図5**の仮説が立てられる。

3. 実埋立地における調査

図5の仮説を、いくつかの調査⁷⁾によって確認した。

3. 1 ガス抜き管からの流出(流入)量

仙台環境開発(株)第Ⅱ期処分場において、2013年6月、10月に現地調査を行った。まず竪型ガス抜き管の位置を確認し、**図6**のように番号を付けた。1～9は集排水管主管上に設置されたガス抜き管、N、Sは枝管から立ち上げられた管、PS、PNは法面ガス抜き管である。これらすべてのガス抜き管においてガス流れ方向、ガス流速、ガス温度、外気温、ガス組成を測定した。まずガスの流出の有無と向きを煙発生器で確認し、温度、

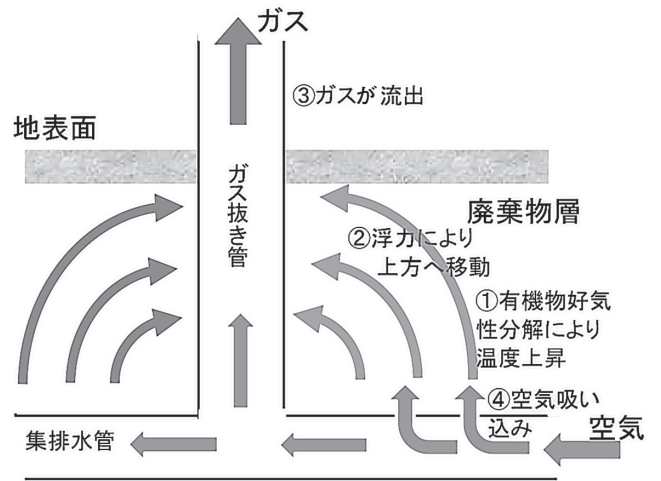


図5 空気流入メカニズムの仮説

流速はガス抜き管の側面にドリルで穴をあけ、測定器を挿入して測定した。これは、管出口では流れが乱されて流速測定に誤差が生じるためである(**図7**)。図では煙が上方に移動しており、ガスが流出していることがわかるが、逆に煙が吸い込まれるガス抜き管もあった。

図6はガス抜き管流量の分布である。円の大きさが流量の大きさを表しており、塗りつぶしが流入管である。このとき集排水管の末端(図の左方向)にある集水ピットにはふたがされていたが、その代わり最下流の管と低い位置にある周辺の管から、空気を吸い込んでいる。つまり、集排水管末端が閉じていても、下流に近い管から空気が供給されている。流入量と流出量は、おおよそ釣り合いが取れていた。

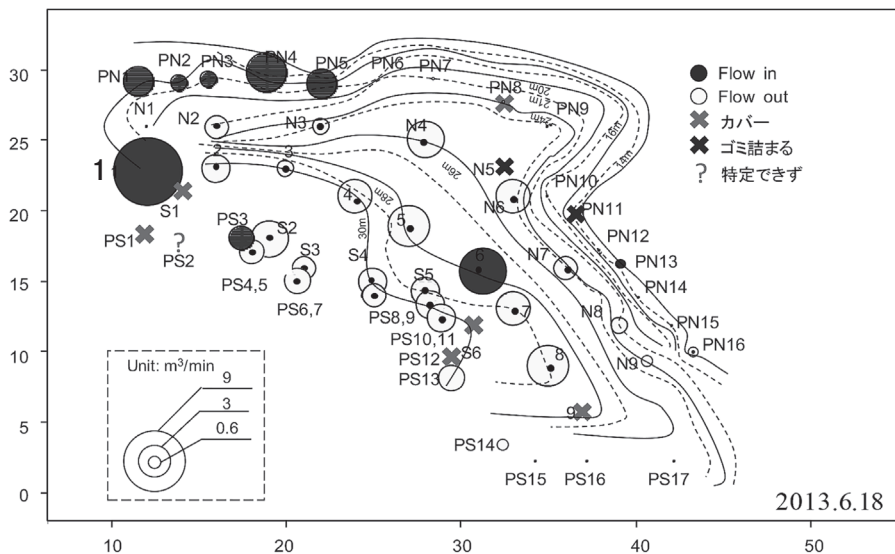


図6 竪型集排水管の流入、流出量



図7 測定方法

3. 2 ガス温度とガス流速の関係

ガスが流出していたガス抜き管について、温度と流速の関係を図8に示す。温度が高いほど流量が多く、「ガス温度と気温の差」が流量にほぼ比例している。これは浮力によってガスが流出していることを示しており、温度が高い→浮力が大きい→ガスが流出する、といえる。逆に言うと、管出口の温度を測定して気温と同じなら、ガス発生がないか、吸い込み管である。

3. 3 ガス(空気)流れの経路

ガス温度と流速の相関だけでは、埋立地の中でどのように空気が流れているかの証明にはならないため、トレーサー試験を行った。トレーサーとは追跡可能な物質のことで、埋立地内に存在しないガスを入れて、いつ、どこから流出するかを調べた。トレーサーとするガスは、測定機器が安価でかつ連続測定可能なCO(一酸化炭素)とした。埋立地内で酸化により減少するが、傾向を調べるには問題がない。

トレーサーガスを最下流のNo.1管(最も流入量の多いガス抜き管)から、ある時刻に流入を開始した。隣接するNo.2, No.3のCO濃度は、図9のようになった。もしもガス抜き管、集排水管のみを流れるならば、一定の流達時間後に急激に増加し、一定値となるはずである。しかし図に示すように、CO濃度は約3~4分後に急激に上昇し、そののちゆっくりと増加した。これは、流出までの時間が異なるさまざまな経路がある、すなわち底部集排水管から埋立地内の多様な経路をたどって壱型ガス抜き管に到達したことを示している。

図における最初の立ち上がり、ゆっくりとした増加の比はおおよそ1:1であることは、No.1から流入した空気が半分は埋立地内を通過しているということを表す。トレーサー応答はNo.1→No.2(または3)の関係のみだが、図5に示すようにガス抜き管には他の集排水管からも流入がある。別の方法でこの割合を

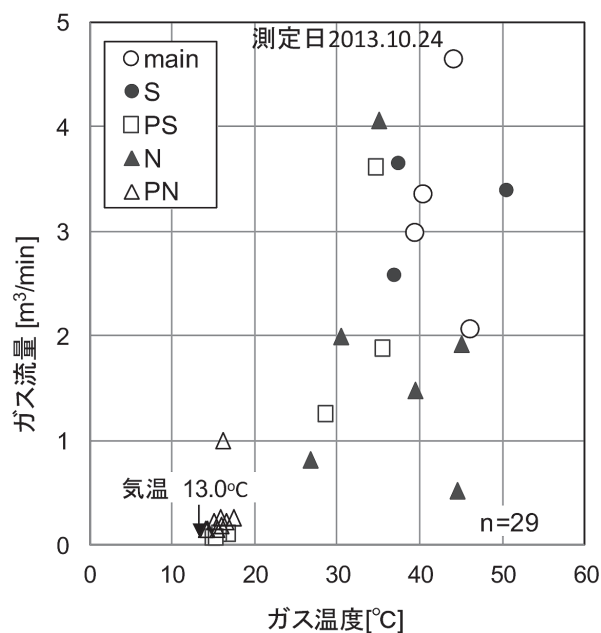


図8 ガス温度とガス流量の関係

推定したところ、ガス抜き管から排出される空気の80%は埋立地内を通過したものと推定した。

なおトレーサー試験の間、他の流出管の濃度をガス濃度計で測定した。図9にその結果を示しているが、埋立地の広い範囲にトレーサーが行き渡っていることがわかった。

3. 4 発煙筒を用いた可視化

別の処分場では、埋立地底部が滞水しているにもかかわらずガス抜き管からの流出があった。図10上のように一部のガス抜き管から空気が流入していたため、空気流入量が最も大きいガス抜き管から発煙筒の煙を入れたところ、流入からおおよそ4分後に十分目視できるほどの流出が認められた。またガス抜き管の流出量合計は空気流入量合計の約4倍であり、ガス抜き管以外に埋立地の斜面などから空気が流入している可能性が高いと考えられた。

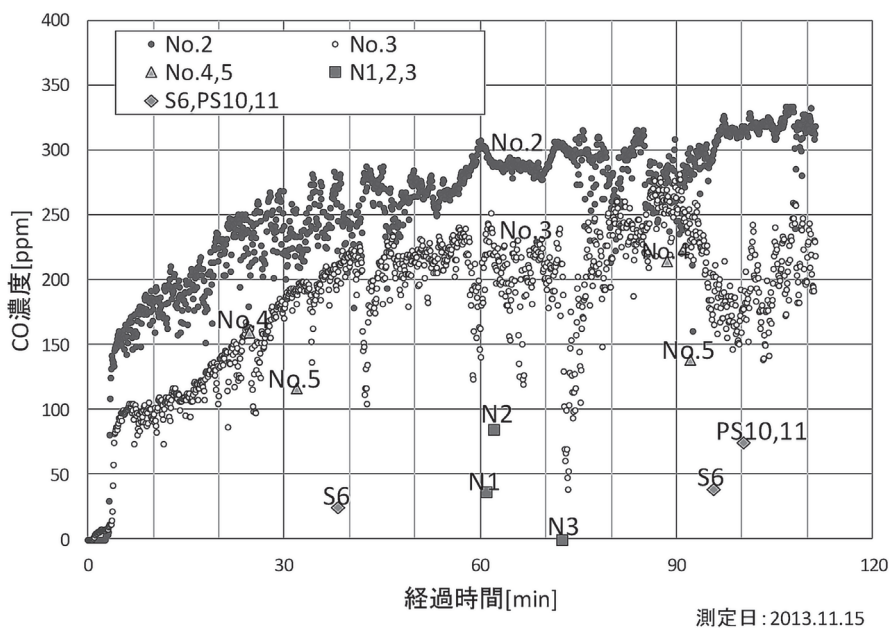


図9 COガストレーサー応答試験

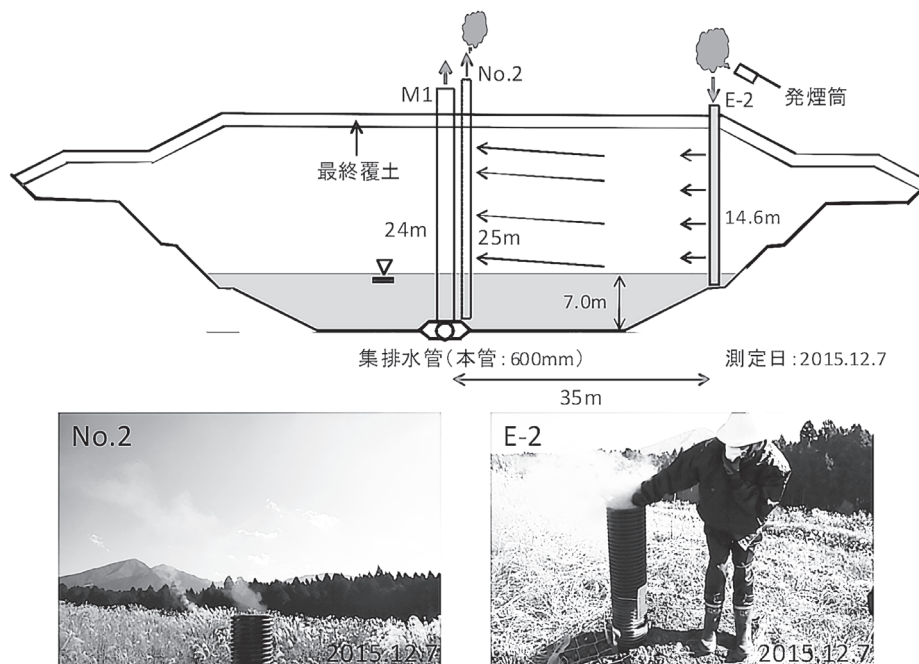


図10 発煙筒の煙によるトレーサー試験

3. 5 空気流れのメカニズム

以上の調査結果より、**図5**の仮説の正しさが証明されたと考えている。すなわち、埋立地内温度が高いと内部の空気に浮力が働き、上方へ移動しようとする。空気はガス抜き管から流出し、埋立地内が負圧になることで底部の集排水管から空気が流入する。これは、建物内に暖められた空気があるとき、ドアを開けると外から冷たい空気が勢いよく流れ込む煙突効果と同じである。外気温と内部温度の差が大きいほど浮力

が大となって、流速も増加する。空気の出口さえあれば、底部集排水管末端が閉じられていても一部のガス抜き管、あるいは埋立地側面から空気を吸い込む。これらのプロセスは、好気性分解による温度上昇から始まり、分解が進むほど温度が上昇して空気をさらに供給し、有機物が分解すると温度が低下して空気の流入も収まっていく。

図5のメカニズムは、準好気性の機能として重要な意味を持っている。集排水管の周りに空気を供給する

のではなく、空気は底部集排水管からさまざまな経路をたどってガス抜き管へと向かう。ひとつのガス抜き管に対しては、複数の集排水管あるいは他の入口から三次元的な空気の流れが生じるので、エアレーションの範囲が廃棄物層の広い範囲にわたるといえる。

4. 準好気性埋立の機能診断

4. 1 現状の把握

以上、**図5**に示す空気流入のメカニズムについて述べてきたが、全国の準好気性処分場でこのような現象が起こっているかどうか、現状がよくわからない。廃止基準にガス発生、温度があるものの維持管理基準の測定項目にないため、ガス抜き管の温度、流量のデータが少ないからである。2010年に筆者らが埋立面積1ha以上の一般廃棄物最終処分場を対象に行った調査(回答数238施設)では、ガス抜き管出口の温度測定は12%に過ぎなかった。約1/3の処分場でガスが発生していると答えたが、流速測定はゼロで、おおいがする、手をかざすと流れを感じる、陽炎が見えるなどで判断していた。ガス組成を測定しているのは約30%であり、測定されるガスは硫化水素、メタンガス、可燃性ガス、酸素など、主として有害性、爆発性に注目しての測定であった。ガス濃度を測定していても流速、温度の測定がないので、流出がほとんどなく溜まっているガスを測定しているだけかもしれない。3節の研究実施にあたっては、ガスが流出している調査対象処分場を見つけること自体が難しかった。

4. 2 想定される埋立地の状況

図5のようなエアレーションがどれだけ起こるか、現実に考えられる埋立地の状況を**図11**に示す。

(a) 埋立地表面覆土の透気係数が小さくガス抜き管がない、もしくはガス抜き管があってもふたがされていると、空気の出口がない。そもそもこの状態では空気が供給できないので、埋立地内での好気性分解も進まず、温度上昇もそれによる浮力発生もない。またガス抜き管はあっても本数が少ないと流出しにくいし、法面ガス抜き管は片側が法面でふさがれているので、周囲からガスを集めるにはタテに伸びた管が必要である。ガス抜き管が閉塞していると、閉塞箇所より下はエアレーションに役立たない。

(b)(c) 底部集排水管は空気供給口との役割をはたし、

集排水管→廃棄物層→ガス抜き管と流れるので、集排水管とガス抜き管の接続は必須ではない。集排水管出口が閉そく、あるいは底部に滞水があったとしても、ガス抜き管の一部が空気供給を行うが、ガス抜き管からの吸い込みは不安定である。3.1の調査において、吸い込み管の流量は変動し、日によって流出管が吸い込み管に変化したこともあった。また底部滞水の場合は水平方向へのガス移動となるので、下部からの場合と比べて浮力は働きにくいと思われる。やはり安定した空気供給経路として、底部集排水管は重要である。

(d) 底部集排水管は「線」であり、枝管を増やすと空気供給能力も高まる。さらにエアレーションの可能性を高めるには、埋立地底部に集排水のため碎石層(前報⁸⁾で紹介したdrainage blanket)を設けて「供給面」とするのが理想的である。出口側も同じで、覆土がなければ、ガスは埋立地表面から流出できる。中間覆土は空気の流れを阻害するので、透気係数の高い代替カバー利用、あるいは覆土なしで一定期間置くことが望ましい(前々報⁹⁾)。

4. 3 埋立中からのモニタリング

準好気性構造としている処分場は、まず好気性化するとの機能が果たされていることの確認が必要である。温度が高くなりガス流出が盛んならば、十分な量の空気が埋立地内に流入し、有機物の好気性分解が進んでいる証拠になる。埋立中からの温度、流量のデータがあれば、それらの低下度合いから安定化の進行度を知ることができる。もし最初から温度上昇がなくガス流出もないならば、ガス抜き管が閉塞して空気が流入できない状態になっている可能性もあり、それでも見かけ上廃止基準を満足していると判断される恐れがある。廃止を検討する段階から温度測定を開始するのではなく、維持管理基準としてガス抜き管の測定を行うべきである。

エアレーション量(空気量)と温度には**図8**のように相関があり、エアレーションの停止は有機物分解の終了(および埋立ガス発生を終了)を意味するので、流出するガス温度と比較対照となる気温を測定すれば十分である。**図12**はある処分場の例だが、気温と較べてガス温度が高い。これは暖められた空気が流出していることを表し、温度が高い場所ほど好気性分解が活発であることを、温度が低いところは有機物の分解が終わりに近づいていることを示す。このように埋立場所ご

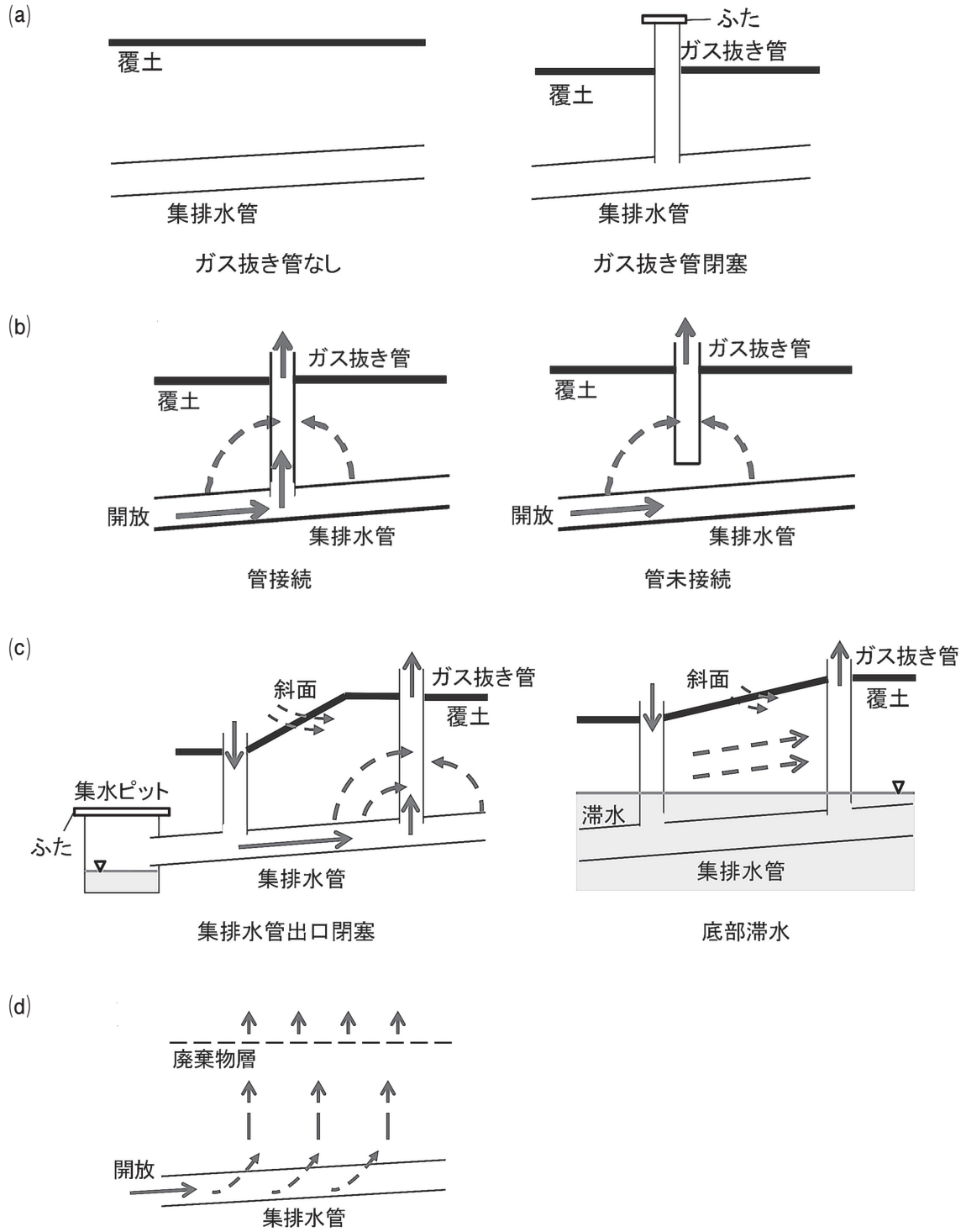


図11 さまざまな状況における空気流入

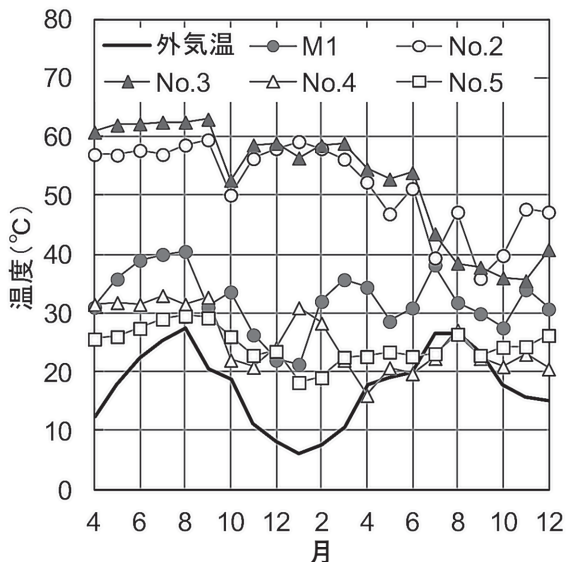


図12 ガス温度の季節変化の例

との安定化の進行を知ることができるし、埋立地全体としての安定度も経年変化によって推定することができる。

4. 4 廃止の判定

最終処分場の廃止基準は、「埋立地からガスの発生がほとんど認められない、又はガスの発生量の増加が二年以上にわたり認められない、埋立地の内部が周辺の地中温度に較べて異常な高温になっていない」としている。ここでの「ガス発生」はメタンガスなどの埋立ガスを想定しているが、準好気性埋立地では浮力に起因するエアレーションが行われており、流れているのは大部分が空気である。「埋立ガスが発生している」と見えるのは、「埋立地内へ供給された空気が、埋立ガスを伴って流出している」とするのが正しい。また、空気は埋立地内を通過するので、その温度は埋立地内部の温度を反映している。埋立初期には有機物が多いので、その分解によって温度が上昇し、浮力の増大によってエアレーション量が大きくなり、分解を促進すると正のフィードバック効果をもつ。有機物量が減少すると温度も、そしてエアレーション量も減少し、埋立ガス発生も減るはずである。したがって廃止基準は、「埋立ガス量減少、または（空気を含む）ガス流出量の減少、温度の低下」と読み替えればよい。

5. おわりに

埋立地の機能は環境への影響を最小化しつつ、廃棄物を安定化することにある。準好気性埋立地は廃棄物層へ空気を導入して、この両者を満たす構造である。浸出水は安定化とともにBOD等の濃度が低下するので安定化の指標となるが、埋立地全体の平均を表すことしかできない。これに対してガス抜き管から流出するガスは、好気性分解の進行と廃棄物の安定化度合いを表すため、埋立中から測定することが必要である。

なお、3で紹介した調査については、北海道大学廃棄物処分工学研究室のホームページに報告¹⁰⁾¹¹⁾を掲載している (<http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/waste/>→研究実績→報告書)。最後に、福岡大学による多くの研究、特に松藤康司先生、柳瀬龍二先生から多くの示唆をいただいた。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 福岡市、準好気性埋立構造とは、www.city.fukuoka.lg.jp/data/open/cnt/3/1196/1/1111.pdf
- 2) 松藤康司：準好気性埋立物語 2、月間「水」、2月号、pp.65-75、1998
- 3) 全国都市清掃会議：廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領(2010改訂版)、2010
- 4) 柳瀬龍二、松藤康司、堺道啓、田代武夫、中富重雄：準好気性埋立地における空気の流れに関する考察、第21回廃棄物資源循環学会研究発表会、2010
- 5) 福岡大学：平成15年度福岡市環境局委託調査報告書
- 6) H-J. Kim, H.Yoshida, T.Matsuto, Y. Tojo, T.Matsuo : Air and landfill gas movement through passive gas vent installed in closed landfills, Waste Management, 30, pp.465-472, 2010.
- 7) T.Matsuto, X.Zhang, T.Matsuo, S.Yamada : Onsite survey on the mechanism of passive aeration and air flow path in a semi-aerobic landfill, Waste Management, 36, pp.204-212, 2015
- 8) 松藤敏彦：最終処分場を考える II 最終処分場におけるシャ水システムのあり方、都市清掃、第72巻第350号、2019.7、pp.388-394
- 9) 松藤敏彦：最終処分場を考える I 最終処分場における覆土のあり方、都市清掃、第72巻第349号、2019.5、pp.295-300
- 10) 北海道大学廃棄物処分工学研究室、準好気性埋立地におけるガス抜き管および廃棄物層内ガス流れ経路の推定、2014年3月
- 11) 北海道大学廃棄物処分工学研究室、実験および現地測定による準好気性埋立地内空気流動メカニズムに関する研究、2016年3月