

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

北海道大学学院
工学研究院環境創生工学部門
廃棄物処分工学研究室

目次

第1章 序章	1
1.1 研究背景	1
1.3 研究目的および方法	5
1.4 論文構成	5
参考文献	5
第2章 充填カラムによる準好気性埋立地内空気流動メカニズムの解明	7
2.1 実験装置	7
2.2 充填物特性	11
2.3 ビーズをヒーターで加熱した場合の流出流量測定	14
2.5 準好気性埋立地におけるガス流速（流量）のモデル式について	20
参考文献	24
第3章 測定データに基づくガス流れ判定	25
3.1 アンケート調査方法	25
3.2 各項目ごとの集計結果	26
3.3 クロス集計	30
3.4 埋立物、供用開始年とガス流出の関係	31
3.5 データ入手施設の選定と分析	33
参考文献	37
第4章 現地測定によるガス流れメカニズムの解明	38
4.1 埋立地概要	38
4.2 埋立物について	38
4.3 調査方法	40
4.4 埋立地の構造およびガス抜き管の出口状況	41
4.5 ガス抜き管の流量	44
4.7 ガス流れ変動	47
参考文献	49
第5章 まとめ	50
5.1 現在の準好気性埋立構造が誕生するまで	50
5.2 集排水管、ガス抜き管、覆土状況による埋立地内空気流動	51
5.3 適切な維持管理方法の提案	53
参考文献	54
付録	

第1章 序章

1.1 研究背景

(1) 埋立地の重要性および役割

資源保全・環境保全の意識が高まり、今日までのゼロ・エミッション型の産業構造や資源循環型社会の実現により廃棄物量は減少し、埋立対象となる廃棄物が減少している。それでも全国の年間埋立処分量は一般廃棄物で約 454 万 t、産業廃棄物で約 1172 万 t に達し、最終処分場の残余容量は一般廃棄物で 1 億 731 万 m³ (残余年数 19.3 年)、産業廃棄物では 1312 万 t (平均残余年数 13.9 年、首都圏 6.3 年) と依然として逼迫した状況にある^{1) 2) 3)} (平成 25 年度)。したがって、現状において新たな埋立地の建設を拒み、必要量を確保することを避ければ、今日の廃棄物処理システムを維持していくことは極めて困難な状況となる。現在の廃棄物対策上の戦略は発生抑制、再利用、再生利用、エネルギー回収、適正処分で成立しているが、最終的には埋立処分しなければならない廃棄物が発生することが前提となっている。よって、どれだけ発生抑制や資源化が進んだとしても埋立地は社会基盤として必要であり、今後も重要な役割を果たし続けなければならない施設であると考えられる。

では、埋立地に求められる機能とは何か。基本的には、①廃棄物を処分する適切な空間を提供すること、②環境汚染を起こさずに土壌に還元すること、③最終的には良好な土地造成地を提供すること、であると考えられる。そのためには①廃棄物を埋立地内に貯留保持でき、廃棄物汚水や悪性ガスを未処理のまま処分場外部に流出・拡散させない、②埋立地内の微生物の働きにより廃棄物を早期に安定化する、③発生する浸出水と埋立ガスを確実に集め、浄化した後環境に排出する、といった機能を持つことが必要である⁴⁾。ここでいう安定化とは埋立地に埋め立てられた廃棄物の分解を終了させ、周辺環境に悪影響を与えない状態になることである。一方、現実の最終処分場管理では浸出水や埋立ガスに対する処理などの日常的な維持管理を行わなくても良い状態になれば、それらの日常的維持管理は停止できると考えられ、この状態は「廃棄物が土中に留まっている限り外部に影響を与えない状態」と定義でき、基準省令にいう「廃止」相当の状態と言える⁵⁾。「埋立地は早期安定化に向けた適切な構造であり、適切な維持管理を行うこと」が重要であり、多くの埋立地が準好気性埋立構造を採用している。

(2) 準好気性埋立構造とは

管理型最終処分場および一般廃棄物最終処分場は埋立構造で主に 3 種類に分類できる。通常、埋立地内は嫌気状態となる「嫌気性埋立構造」であり、これに対して送風機などにより空気の流通を促進し、埋立地内をできるだけ好気状態に保つ「好気性埋立構造」、浸出水集排水管とガス抜き管を設置し、埋立地内温度と外気温の差により生じる自然対流を利用して埋立地内部をできるだけ好気状態に保つ「準好気性埋立構造」の 3 種類がある。「準好気性埋立構造」は 1975 年に日本で初めて実用化された埋立構造であり、「嫌気性埋立構造」よりも安定化を促進することができ、「好気性埋立構造」よりもコストが安いという利点がある。図 1.1 に準好気性埋立構造の概念図を示す。準好気性埋立構造は集排水管とガス抜き管を連結し、埋立地内外の温度差から生じる自

然対流により、埋立地内への空気の侵入を促進させる構造であり、好気領域と嫌気領域が混在するため、有機物分解による埋立地の早期安定、浸出水水質の早期浄化と重金属の不溶性化による埋立地内固定効果が期待できる^{6) 7)}。現在、一般廃棄物最終処分場および管理型最終処分場では約7割が準好気性埋立構造であり、日本の標準的な埋立構造と言える^{8) 9)}。

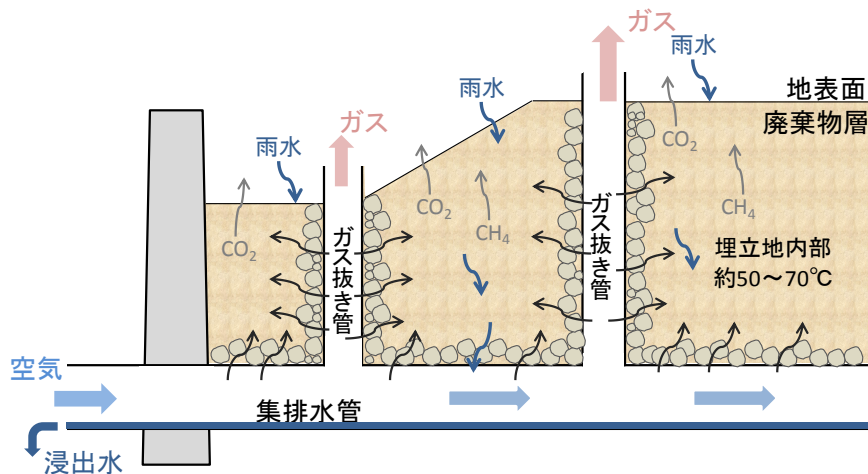


図 1.1 準好気性埋立構造の概念図¹⁰⁾より作成

1.2 既往の研究

一昨年度の卒論¹¹⁾では、宮城県仙台市内の産業廃棄物最終処分場を対象として、ガスを中心とした調査を行った。調査対象埋立地は準好気性埋立構造であり、埋立面積は78241m²、埋立許容量は2114576m³である。調査内容は主にガス抜き管の流量（ガス流速、温度、組成、埋立層の厚さ）、埋立地内のガス流れについてである。本埋立地はガス抜き管が53本存在し、集排水管とガス抜き管がすべて連結しており、埋立地内に滞水がなく、理想的な準好気性埋立構造である。一昨年度の調査により、集排水管末端以外のガス抜き管からも空気が流入しており、空気流入量はガス流出量の1.23倍とほぼ同量であった。また、空気が流入しているガス抜き管では流速の変動が大きく、流入と流出が測定日によって変化していた。

ガス流れに関しては図 1.2 に示すように、ガス温度が外気温よりも高く、ガス流速（流量）とガス温度の関係には正の相関があることから、ガス流れの駆動力は埋立地内外の温度差による浮力であることが明らかとなった。したがって、ガス流れのメカニズムは

- ①好気性微生物による有機物の分解が生じることで埋立地内温度が上昇し、浮力が発生する。
 - ②廃棄物層内のガスがガス抜き管に向かって流れ、ガス抜き管からガスが流出する。
 - ③ガス流出により廃棄物層内が負圧になるため、主に集排水管から空気が流入する。
- であり、準好気性埋立にはエアレーションの効果があると考えられた（図 1.3）。

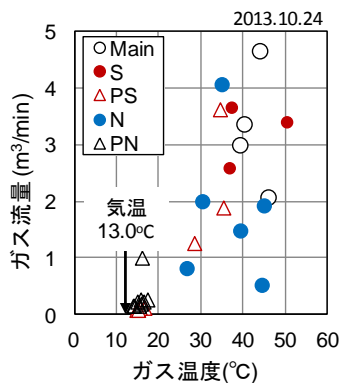


図 1.2 ガス流速（流量）とガス温度の関係

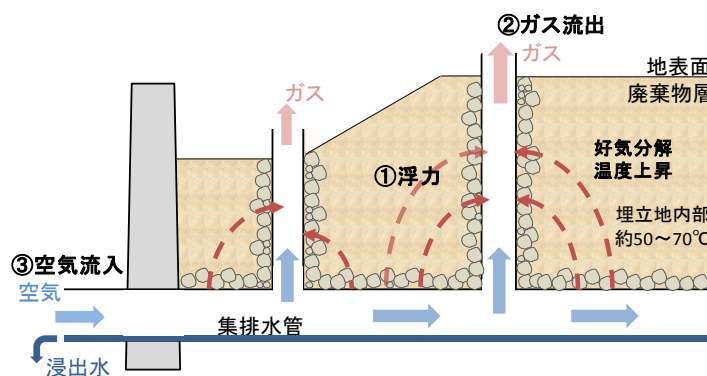


図 1.3 準好気性埋立地内のガス流れメカニズム

昨年度の卒論¹²⁾では、一昨年度の結果をふまえ、ガス抜き管のガス流速とガス温度に注目し、準好気性埋立地のガス流れ判定を行っている。ガス流速（流量）とガス温度の関係に正の相関がある場合、またはガス温度が外気温よりも10°C以上高い場合にガスが流れていると判断している。

（図 1.4）。調査対象は全国の一般廃棄物最終処分場とし、平成 23 年度卒論⁸⁾のアンケート調査結果を用いている。調査の流れを図 1.5 に示す。

平成 20 年時点で、全国の供用中の一般廃棄物最終処分場は 1232 施設あり、そのうち準好気性埋立地は 836 施設あった。このうち埋立面積 1ha (=10000m²) 以上の 459 施設を対象にアンケート調査を行った。有効回答率は 52%の 238 施設であり、そのうちガス抜き管からガスが流出していた 72 施設 (30%) を対象に再度アンケート調査を行っている。アンケートに対する回答が 58 施設から得られ、過去の測定データ提供あるいは測定協力が得られたのは 26 施設 (36%) であり、このうち 12 施設 (46%) で「ガス流れあり」と判定された。

有効回答が得られた施設のみに注目すると、図 1.5 に示すように 1ha 以上の埋立地のうち 30% でガス流出があり、測定結果に基づき 46%で「ガス流れあり」と確認できたため、この両者を乗ずると 1ha 以上の準好気性埋立地のうち、ガスが流れている埋立地は 14%となる。さらに、アンケート調査においては「適切な管理を行っている施設の回答率、協力率は高い」可能性を考えると、実際にはもっと低いことが予想されるため、全国の一般廃棄物最終処分場の準好気性埋立地でガスが流れている埋立地は 10%程度であると考えられる。

また、本研究ではアンケート調査と現地調査により、壱型ガス抜き管の無孔管の利用や集排水管の滞水、集水ピットの閉塞などの準好気性埋立地の構造としての現状の問題が明らかとなっている。集排水管末端が開放していると回答した 109 施設のうち、36% (n=39) の施設で集水ピットが閉塞しており、集水ピットの閉塞は集排水管末端からの空気の流入を妨げてしまうため、準好気性埋立構造を理解していない施設が多いことが明らかとなった（図 1.6）。

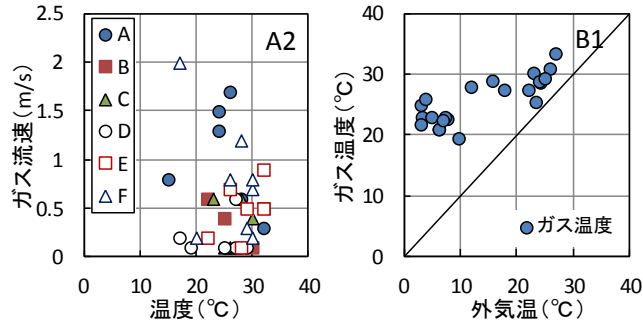


図 1.4 測定データに基づくガス流れ判定

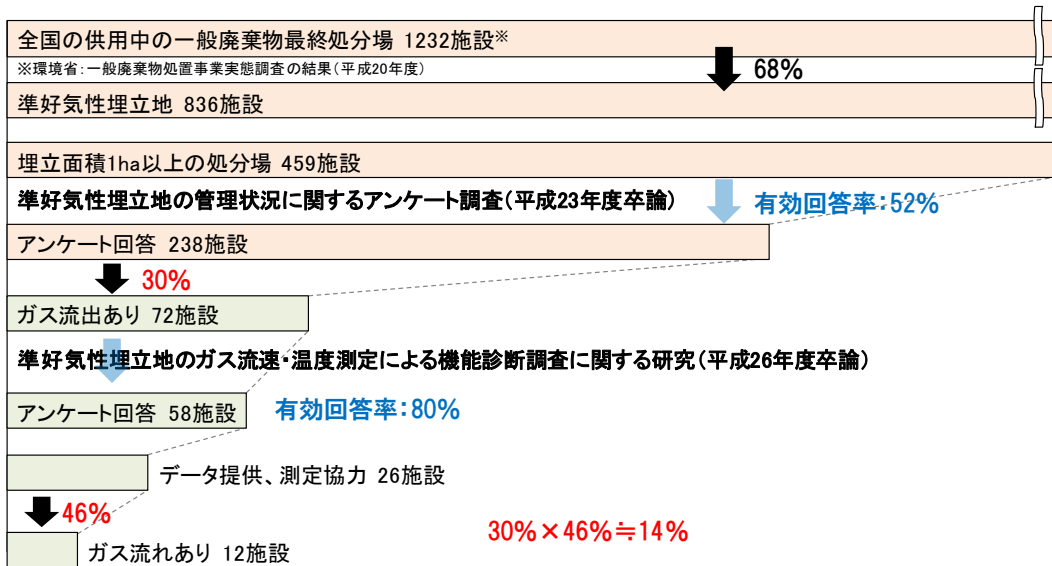
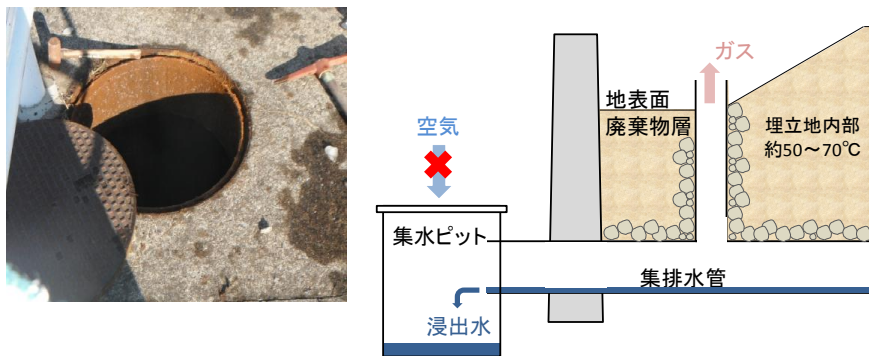


図 1.5 平成 23,26 年度卒論の調査の流れ



(a) ガス抜き管における無孔管



(b) 集水ピットの閉塞

図 1.6 準好気性埋立地の構造としての問題

以上の既往の研究により、準好気性埋立地の浮力がガス流れの駆動力であることを明らかとし、一般廃棄物最終処分場のガス流れ状況を推定した。しかし、これらは状況証拠であり、直接埋立地内の空気流動メカニズムを明らかにしたわけではない。産業廃棄物の準好気性埋立地でも状況を確認する必要があり、埋立地の状況は各々がすべて異なっているため、他の埋立地でも一昨年度と同様の調査結果が得られるかも確認する必要がある。

1.3 研究目的および方法

本研究の目的は大きく3つある。1つは、浮力による埋立地内の空気流動メカニズムを解明することである。充填カラムを用いて、埋立地内空気流動を模擬し、メカニズムを明らかにする。2つ目は、産業廃棄物の準好気性埋立地である管理型最終処分場のガス流れ状況を調査することである。昨年度と同様に埋立地の維持管理に関するアンケート調査を行い、現状を調査し、入手した過去の測定データに基づくガス流れ判定を行い、ガス流れ状況を明らかにする。3つ目は、現地測定で直接的にガス流れを明らかにする。アンケート調査の対象施設のうち、現在アクティブにガスが流出している施設を選定し、一昨年度と同様の調査を行い、埋立地の違いによるガス流れの変化を明らかにする。以上、3つを本研究の目的とする。

1.4 論文構成

第1章では研究背景と目的、方法を述べた。第2章ではカラム実験で得られた結果と考察を記し、第3章ではアンケート調査によって明らかとなった全国の管理型最終処分場のガス流れ状況についてまとめた。第4章では現地測定によるガス流れ調査についてまとめ、考察を記した。第5章はまとめの章とし、本研究によって得られた知見と結論を述べた。

参考文献

- 1) 環境省：一般廃棄物の排出及び処理状況等（平成25年度）について
(<https://www.env.go.jp/press/100241.html>)（閲覧日：平成28年1月21日）
- 2) 環境省：産業廃棄物の排出・処理状況について（平成25年度実績）
(<http://www.env.go.jp/press/files/jp/28771.pdf>)（閲覧日：平成28年1月21日）
- 3) 環境省：産業廃棄物処理施設の設置状況について（平成25年度実績）
(<http://www.env.go.jp/press/files/jp/26659.pdf>)（閲覧日：平成28年1月21日）
- 4) 田中信壽：環境安全な廃棄物埋立処分場の建設と管理、p.19（2004）、技報堂出版
- 5) 廃棄物学会廃棄物埋立処理処分研究部会：廃棄物最終処分場廃止基準の調査評価方法、p. (i)
(平成14年)
- 6) 厚生省：廃棄物最終処分場の性能に関する指針について

- (http://www.jefma.or.jp/download/pdf/gizytu/sisin_haikibutu.pdf) (閲覧日：平成 28 年 1 月 22 日)
- 7) 花嶋正孝、田中信壽、古市徹監修（最終処分場技術システム研究会編）：廃棄物最終処分場技術システムハンドブック、p.157（平成 11 年）、環境産業新聞社
 - 8) 清野和之：準好気性埋立地の管理状況に関する全国アンケート調査 北海道大学卒業論文（平成 23 年度）
 - 9) 環境省：廃棄物分野における算定方法の改善について
(<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/kento/h2403/5.pdf>) (閲覧日：平成 28 年 1 月 22 日)
 - 10) 福岡市環境局：トータルな循環型社会に向けて、福岡式準好気性埋立構造とは？、pp.1-14（2005）
(<http://www.city.fukuoka.lg.jp/data/open/cnt/3/28853/1/siryu4.pdf>)
 - 11) 山田修平：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 北海道大学卒業論文（平成 25 年度）
 - 12) 町田隼也：準好気性埋立構地のガス流速・温度測定による機能診断調査に関する研究 北海道大学卒業論文（平成 26 年度）

第2章 充填カラムによる準好気性埋立地内空気流動メカニズムの解明

2.1 実験装置

(1) 既往の研究

福岡大学では、埋め立てられている廃棄物が集排水管末端からの空気流入に対してどのような影響を与えるか、について研究を行っている¹⁾。図 2.1 に示すように埋立層を模擬したライシメータ内部にヒーター、底部に浸出水集排水管を設置し、埋立廃棄物としてガラスビーズを充填している。ヒーターにより槽内の温度を上昇させ、集排水管末端からの空気の流入を誘因している。その際、集排水管の管径、ガラスビーズ径、ぐり石層の有無、覆土層の有無および厚さの変化が空気流入にどのような影響を与えるかを調べている。表 2.1 に実験条件を示す。

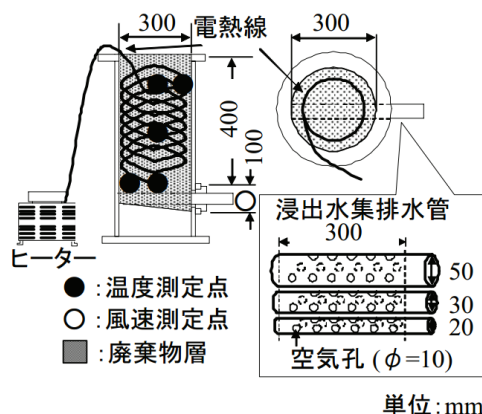


図 2.1 福岡大学の実験装置概要

表 2.1 実験条件

	単位	集排水管管径と埋立充填物の影響									ぐり石層の影響			覆土層の影響		
		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	R1	R2	R3	C1	C2	C3
ガラスビーズ径	mm	20	20	20	10	10	10	5	5	5	20	10	5	20	20	20
集排水管管径	mm	50	30	20	50	30	20	50	30	20	50	50	50	50	50	50
ぐり石層層厚	mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	100	100	-	-	-
覆土層層厚	mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	100	200
空気孔の数	個	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16

図 2.2 に集排水管管径と埋立充填物の違いによる集排水管末端からの空気流入量の関係を示す。ガラスビーズ径は 5,10,20mm、集排水管管径は 20,30,50mm を用いている。横軸に実験槽内外の温度差 (°C)、縦軸に集排水管出口からの空気流入量 (m³/h) を示しており、ガラスビーズ径が 20mm、10mm では集排水管の管径が大きいほど、集排水管末端からの空気流入量が大きくなることを確認された。ガラスビーズ径が 5mm では空気流入量はほぼ 0 であるが、これらの結果はカラム実験装置であっても内外の温度差で浮力が発生し、ガス流出が起こり、空気流入を誘因していることを示している。

次にぐり石層の有無による、集排水管末端からの空気流入量の影響を調べている。図 2.3 に結果を示す。ぐり石層として 5mm のガラスビーズ径を下層部に 100mm の地点まで充填している。ガラスビーズ径が 20mm ではぐり石層の有無で空気流入量に大きな差は見られず、これは集排水管の断面積 ($(\frac{50}{2})^2 \pi = 1963\text{mm}^2$) が集排水管の空気孔の総面積 ($(\frac{16}{2})^2 \pi = 1257\text{mm}^2$) よりも大きいことが影響していると考察している。ガラスビーズ径が 5mm の場合も空気流入量に大きな差は見られず、ビーズ径が小さいため、空気の通り道となる間隙を埋めてしまった可能性を示している。一方、ガラスビーズ径が 10mm ではぐり石層がある場合に空気流入量が増加するという結果を得ており、これはぐり石の存在により、平均間隙径がガラスビーズ径 20mm を用いた場合と同程度に大きくなったためであると考察している。

最後に、覆土層の有無および厚さによる空気流入量の影響を調べている。図 2.4 に結果を示す。ガラスビーズ径は 20mm、集排水管管径は 50mm で固定しており、覆土層厚さを 50,100,200mm と変化させている。結果より、覆土層が 50mm 存在するだけで空気流入量が大きく阻害されることが明らかとなったが、覆土層厚さの変化による空気流入量の変化はあまり見られなかった。埋立地において覆土の存在は空気流入量の大きな妨げとなるが、覆土層厚さにはよらないことが明らかとなった。

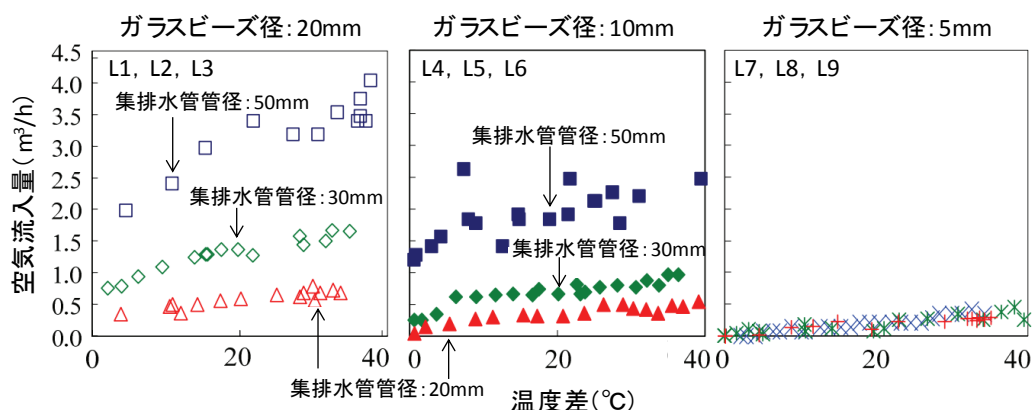


図 2.2 集排水管管径と埋立充填物の違いによる温度差と空気流入量の関係

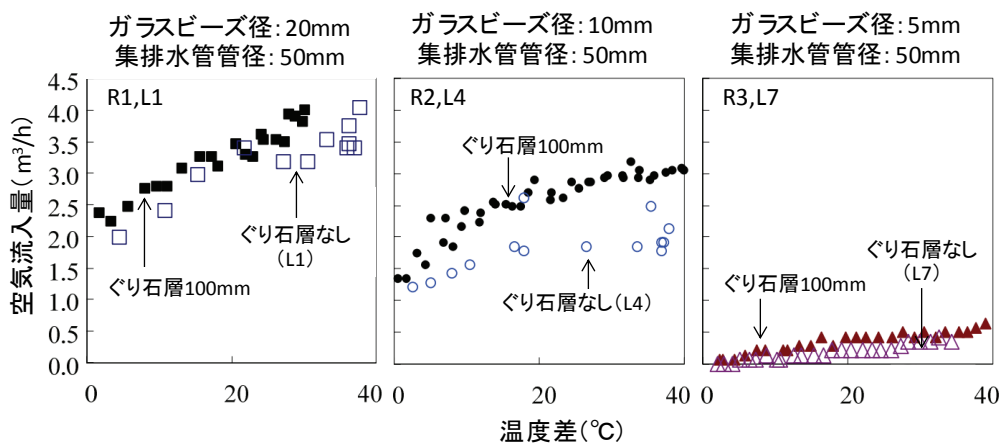


図 2.3 ぐり石層の有無による空気流入の影響

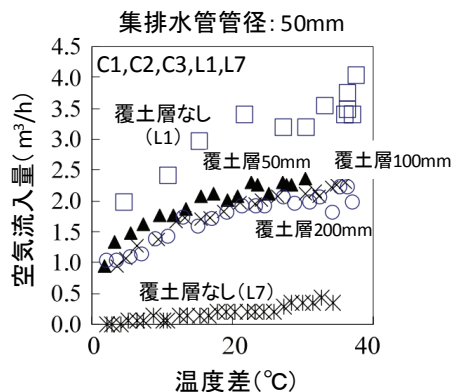


図 2.4 覆土層の有無および厚さによる空気流入の影響

以上のように、集排水管管径と埋立充填物の違いによる集排水管末端からの空気流入量の影響、ぐり石層の有無、覆土層の有無および厚さによる空気流入量の影響を調べている。しかし、これらの結果は定性的であり、重要なガス流れのメカニズムや原理についての言及はない。また、埋立地を正確に模擬するためにぐり石層や覆土層を設置するなど、実験条件が複雑になっているため、影響しているパラメータを定量的に評価することは困難である。本研究では福岡大学の研究を参考としながらも、よりシンプルな構造で温度差および埋立廃棄物などの影響を明らかにすることにした。

(2) 実験装置

図 2.5 に本実験装置の概要を示す。使用したカラムはアクリル製で内径 150mm、高さ 500mm であり、カラムの上部と下部にはゴムパッキンと穴を開けた塩ビ板でふたをし、外部からの空気流入が起こらないようにした。下部と床には空気が自由に出入りできるように隙間を設け、充填物（ビーズ）で空気流入部が塞がらないように下部のゴムパッキンには金網を張っている。空気流入部である下部には均等に穴を開けたふた（以下、均等径）を設置しており、開孔率は 30% である。空気流出部である上部には直径 20mm、あるいは 40mm の穴（以下、オリフィス孔）を開けたふたを用意し、穴の上部で流速測定を行う構造とした。また、カラム中心部に 5ヶ所、端部に 3ヶ所の計 8ヶ所に熱電対を差し込み、温度測定点を設けた。流速測定には Kanomax6531 を、温度測定には CHINO 製 K 型熱電対を使用した。埋立廃棄物を模擬するためにアルミナビーズ ($\phi=20,15,10,8,6\text{mm}$) を高さ 300mm まで充填した。

充填物の初期温度の設定はリボンヒーターをカラム内部に設置し、加熱する方法とあらかじめ乾燥機内で所定温度としたビーズを充填する方法の 2 つとした。

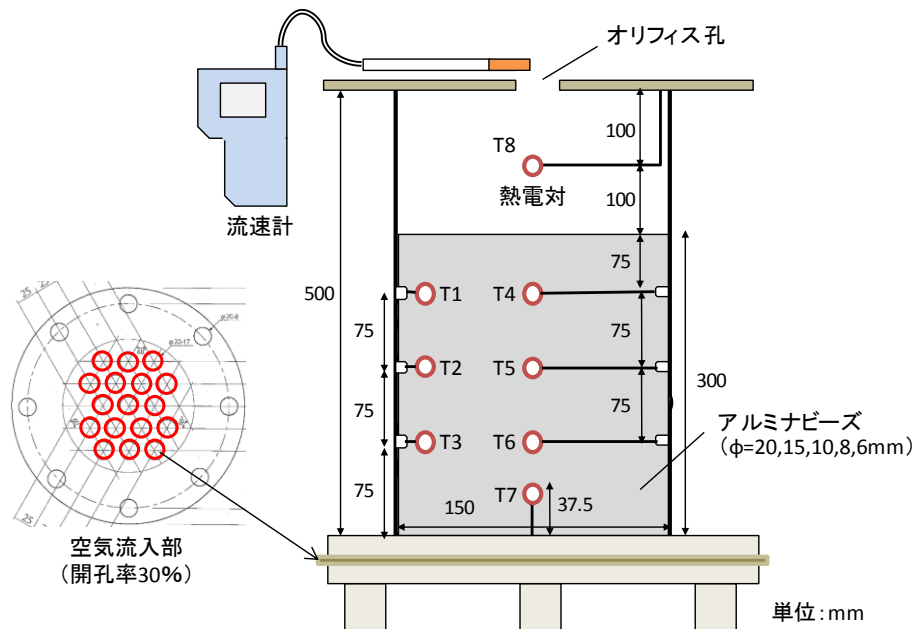


図 2.5 実験装置

(3) オリフィス孔における流速測定

通常、廃棄物層内を通過する際の流速は微小であるため、測定が困難であることを考慮し、上部にオリフィス孔を設け、流速の測定を行った。オリフィス孔のように急激な断面変化を伴う流れをオリフィス流れといい、オリフィス孔通過時に流体に縮流が生じるため、ある程度の損失が発生する。そのため、オリフィス孔を通過する流速を計算する際には、損失分を表した流量係数 C_d (-) を乗ずる必要がある²⁾。 C_d 値はオリフィス孔の形状に依存するが、実験的に求めることができるため³⁾、図 2.6 に示す測定装置を用いて C_d 値を算出した。

Q_{in} (L/min) は注入空気量、 A_0 (m²) はオリフィス孔の断面積を表しており、 v_x (m/s) は流速計 (Kanomax6531) の測定値である。実験では流量計 (MODEL CR-300、MODEL RK1200 Series) を用いて、 Q_{in} を 0.62~28L/min の幅で変動させ、オリフィス孔 20mm と 40mm それぞれで v_x の測定を行い、以下の式から C_d 値を算出した。

$$Q_{in} = C_d A_0 v_x \quad (2-1)$$

図 2.7 にオリフィス径ごとの v_x と C_d 値の関係を示す。本実験の結果、オリフィス径 40mm では v_x が 0.30m/s 以上で C_d 値が約 0.604、オリフィス径 20mm では v_x が 0.25m/s 以上で C_d 値が約 0.663 であった。 v_x がこれらよりも小さくなる場合には、近似式から C_d 値を求めた。

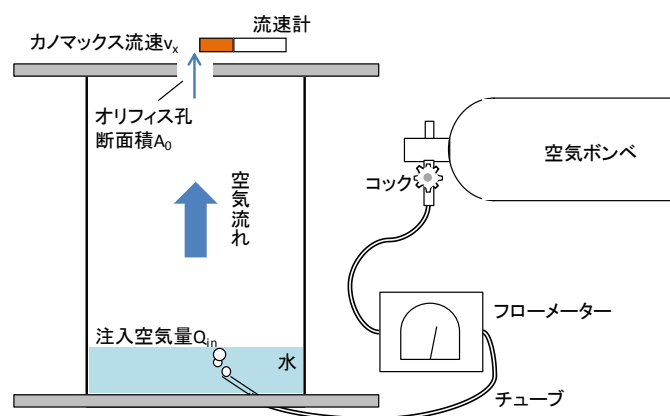


図 2.6 流量係数 C_d の測定装置

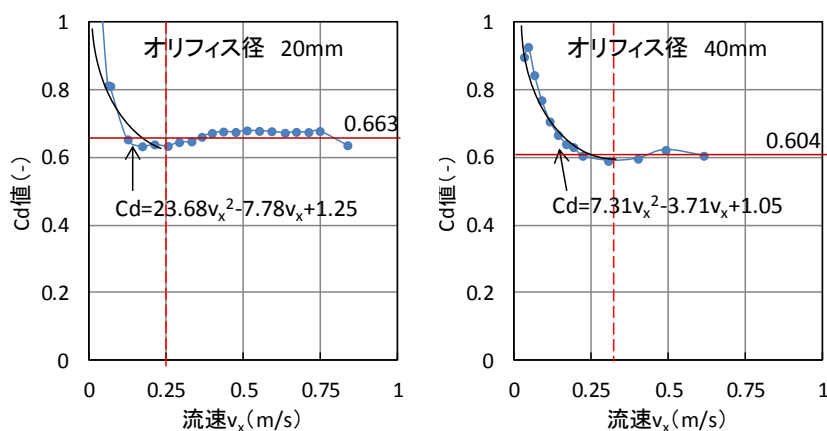


図 2.7 オリフィス径ごとの流速 v_x と C_d 値の関係

2.2 充填物特性

本実験では、充填物として5種類のアリミナビーズ ($\phi = 20, 15, 10, 8, 6\text{mm}$) を用意し、廃棄物層を模倣した。アリミナビーズ (以下、ビーズ) は摩耗性、耐熱性に優れており、球のばらつきが小さく、広い範囲の径を容易に入手できるため採用した。2.1 (1) の図 2.2 より、ガラスビーズ径 5mm では集排水管末端からの空気流入量が微小であることが明らかとなっており、本実験でも流速の測定ができない可能性があったため、6mm を最小径とした。

本実験では、埋立物の違いがカラム内の空気流動にどのような影響を与えるかを明らかにするため、埋立物の物理特性である空隙率 ε と透気係数 k_a をビーズ径ごとに求めた。

(1) 空隙率 ε

空隙率 ε とは一般的に充填物などの単位体積あたりの隙間の割合を表したものであり、充填層の隙間の体積を V_w (m^3)、全体積を V (m^3) とすると、空隙率 ε (-) は以下の式で表すことができる。

$$\varepsilon = \frac{V_w}{V} \quad (2-2)$$

上記の式に基づき、図 2.8 に示す装置を用いて、各ビーズの空隙率 ε を測定した。水の比重は 1.0 であるため、 V_w はシリンダーにビーズと蒸留水を充填したときの重さから、シリンダーにビーズのみを充填したときの重さを差し引いて求めた。ビーズおよび蒸留水を充填する際には、充填のムラをなくすこととシリンダー内の気泡を取り除くために、超音波振動機を使用し、作業を行った。実験は各ビーズ 3 回行い、平均値を空隙率 ε とした。

結果を図 2.9 に示す。ビーズ径 6mm~20mm の範囲では、ビーズ径と空隙率の関係がほぼ直線となった。

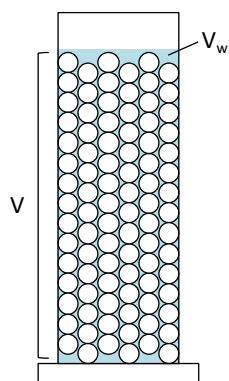


図 2.8 空隙率測定装置

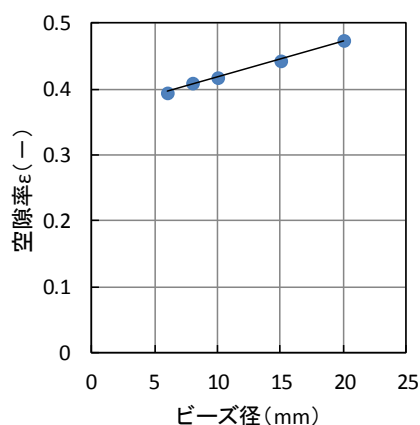


図 2.9 空隙率 ε とビーズ径の関係

(2) 透気係数 k_a

充填層内に連続した間隙が多数存在する物体を多孔体といい、多孔体中の空気の流れは水の流動と同じように、圧力差が大きくない範囲でダルシー則が適用でき⁴⁾、以下の式で表すことができる。

$$Q = -k_a A \frac{dP}{dx} \quad (2-3)$$

Q は空気の流量 (m^3/s)、 k_a は透気係数 ($\text{m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$)、 A はカラム断面積 (m^2)、 dP/dx は圧力勾配 (Pa/m) である。透気係数 k_a は多孔体中の空気の流れやすさを表す指標であり、ダルシー則から実験的に求めることができる⁴⁾。そこで、図 2.10 に示す装置を用いて、 dP は圧力差 ΔP 、 dx はカラム長さ L で表し、圧力差と流量の関係から透気係数 k_a を算出した。

カラムの長さ L は 1025mm、内径 56mm であり、カラムにビーズを充填した後、金網を張ったシリコン栓でふたをし、バルブで調節しながらコンプレッサー (EARTH MAN エアーコンプレッサー AC-250G) から空気を送り、湿式積算流量計と差圧計でそれぞれ通過流量 Q と圧力差 ΔP の測定を行った。測定は差圧が安定したところで行った。図 2.11 に各ビーズの圧力差と流量の関係を示す。

本実験はダルシー則の適用範囲であり、各ビーズの圧力差と流量の関係には線形性が見られ、ビーズ径が大きくなるほど、原点を通る直線の傾き a が大きくなることがわかる。傾き a は

$$a = \frac{k_a A}{L} \quad (2-4)$$

と表され、透気係数 k_a を算出することができる。表 2.2 に各ビーズの傾き a と透気係数 k_a の関係を示す。以上より、各ビーズの透気係数 k_a を算出した。

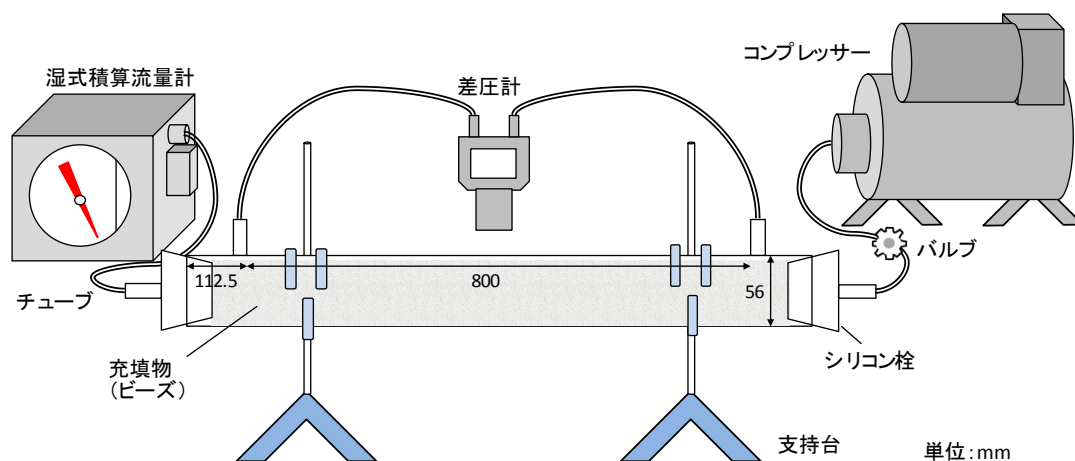


図 2.10 透気係数 k_a の測定装置

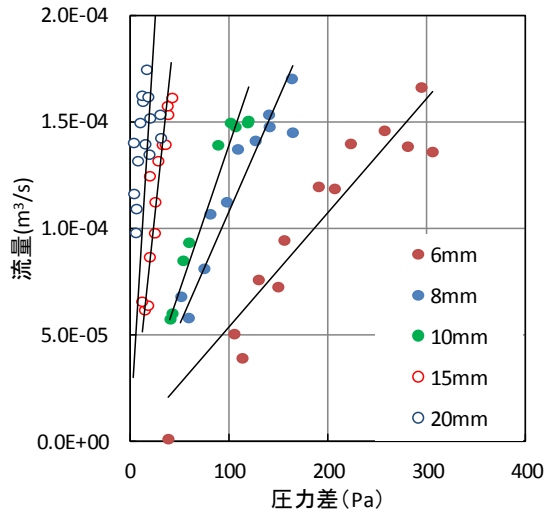


図 2.11 各ビーズの圧力差と流量の関係

表 2.2 各ビーズの傾き a と透気係数 k_a の関係

ビーズ径 (mm)	傾き a ($m^3/Pa/s$)	透気係数 k_a ($m^2/Pa/s$)	空隙率 ϵ (-)
6	5.37E-07	1.7E-04	0.395
8	1.07E-06	3.5E-04	0.409
10	1.39E-06	4.5E-04	0.418
15	4.15E-06	1.3E-03	0.443
20	7.62E-06	2.5E-03	0.474

(3) 透気係数 k_a と空隙率 ϵ の関係

土質力学の研究では、充填物が均等であり、粒子径が比較的大きい場合に透気係数 k_a の対数値と空隙率 ϵ は直線関係となることが報告されている^{5) 6)}。縦軸に透気係数 k_a の対数値、横軸に空隙率 ϵ をとり、結果を図 2.12 に示す。6mm~20mm の範囲では直線関係となっていることが示された。

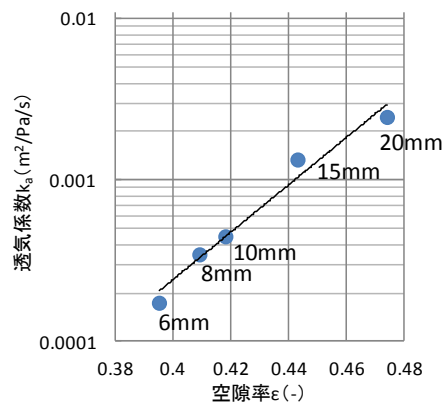


図 2.12 透気係数 k_a と空隙率 ϵ の関係

2.3 ビーズをヒーターで加熱した場合の流出流量測定

(1) 実験方法

図 2.13 に示すようにビーズを充填した後、ヒーターの電圧を変化させ、カラム内を加熱し、実験を行った。実験条件を表 2.3 に示す。本実験にはビーズ径 20mm、オリフィス孔 40mm を用いた。測定はカラム内の温度が定常になってから各熱電対の温度とオリフィス孔での出口流速値を記録し、以下の計算によりオリフィス孔からの流出流量 Q_0 を算出した。

$$v_0 = v_x Cd \quad (2-5)$$

$$Q_0 = v_0 A_0 \quad (2-6)$$

v_0 はオリフィス速度 (m/s)、 v_x はカノマックス速度 (m/s)、 Cd は流量係数 (-)、 A_0 はオリフィス孔断面積 (m^2)、 A はカラム断面積 (m^2) である。

(2) 温度差と流出流量の関係

図 2.14 に温度差と流出流量の関係を示す。流出流量 Q_0 は電圧調整後に温度が定常になってから測定したカノマックス流速 v_x より算出し、温度差は充填層中心上部の熱電対の温度 T_4 から室温 T_a を引いた値を用いた。

結果より、温度差が大きいほど流出流量は増加していることがわかる。本カラム実験でも温度差による浮力により、空気流動が生じることが示された。

表 2.3 ヒーターを用いた場合の実験条件

ID	ビーズ加熱方法	空気流入部形状	開口率 (%)	ビーズ径 (mm)	オリフィス孔 (mm)
H20	ヒーター	均等径	30	20	40

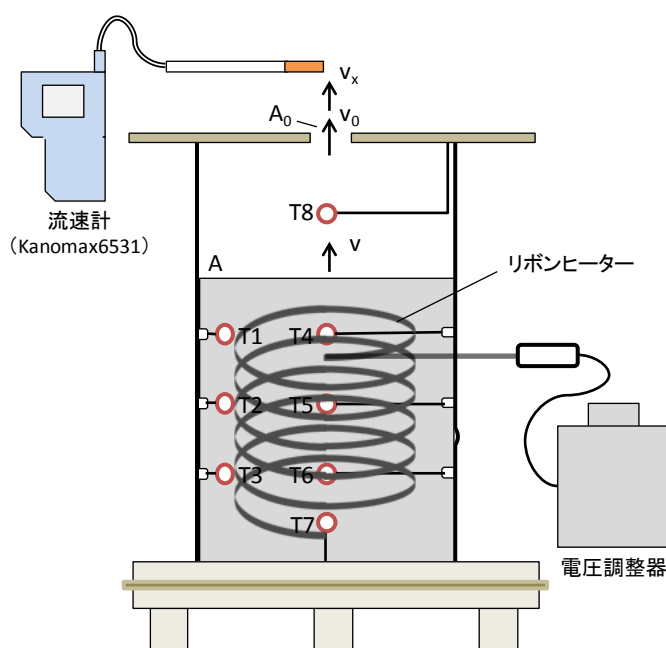


図 2.13 ビーズをヒーターで加熱した場合の装置図

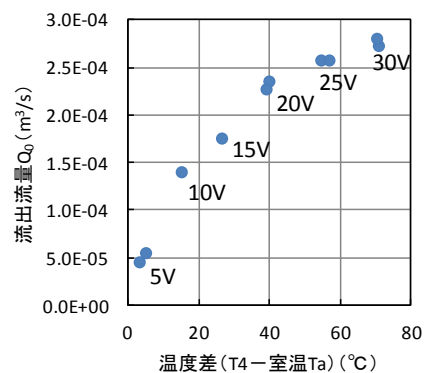


図 2.13 温度差と流出流量の関係

(3) カラム内温度の時間変化

図 2.15 に各電圧のカラム内中心部の温度分布を示す。縦軸はカラムの高さ、横軸は各熱電対温度から室温を引いた温度差を表しており、上から熱電対 T4～T7 の温度を表している。リボンヒーター電圧が 5V の場合、熱電対温度はほとんど変わらないが、電圧が上昇するごとに下部から流入した空気が徐々に暖められていることがわかる。

図 2.15 に示す実験結果は初期の電圧を 30V に設定し、電圧を 5V ずつ下げ、0V になるまで測定を行っている。リボンヒーターを用いた実験では電圧を調整した後、熱電対温度が一定となってから測定を行っているため、

30V から 0V までに 2680 分とかなりの時間を要してしまっただ。そこで、あらかじめ乾燥機内で所定温度としたビーズを充填する方法に切り替えることにした。

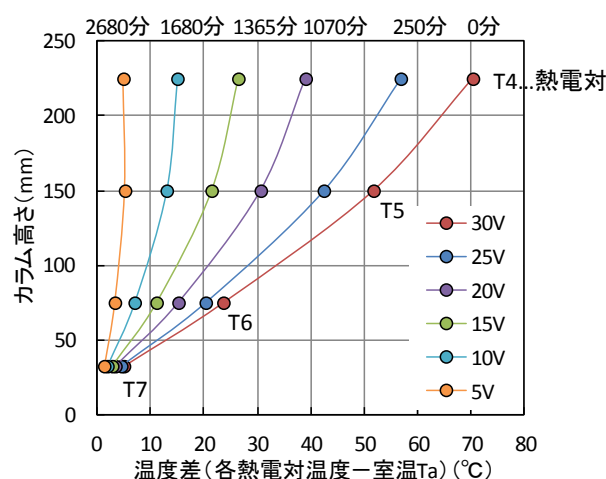


図 2.14 各電圧のカラム内中心部の温度分布

2.4 ビーズを乾燥機で一様の温度にした場合の流出流量測定

(1) 実験方法

実験時間を短縮するため、あらかじめビーズを一定温度に加熱し、カラムに投入して瞬時にふたを閉め、カラム内での温度差がほとんどない状態で測定を行う方法に切り替えることにした。ビーズの加熱は乾燥機で行い、十分な時間をもってビーズ全体が一様な温度になるようにした。

(2) ビーズ投入後 10 分間の流出流量測定 (10 分間測定)

乾燥機の温度を 80、60、40°C に設定し、ビーズ投入後 10 分間のカノマックス流速 v_x の測定を複数回行い、流出流量 Q_0 を算出した。オリフィス孔は 20mm を使い、5 種類のビーズ ($\phi = 20, 15, 10, 8, 6\text{mm}$) で測定を行った。実験条件を表 2.4 に、結果を図 2.16 に示す。縦軸は流出流量 Q_0 、横軸は熱電対 T4 と室温 T_a の温度差を表している。温度差が大きいほど、ビーズ径が大きいほど流出流量 Q_0 が大きくなっていることが明らかとなった。

なお、図 2.13 と比べると流出流量は 1/3 ほどになっていることがわかる。これはリボンヒーターをカラム内部に設置したことにより、空隙が大きくなってしまったためと考えられる。

表 2.4 乾燥機を用いた場合の実験条件（10 分間測定）

ID	ビーズ加熱方法	空気流入部形状	開口率 (%)	ビーズ径 (mm)	乾燥機温度 (°C)	オリフィス孔 (mm)
S20-80	乾燥機	均等径	30	20	80	20
S15-80				15		
S10-80				10		
S8-80				8		
S6-80				6		
S20-60	乾燥機	均等径	30	20	60	20
S15-60				15		
S10-60				10		
S8-60				8		
S6-60				6		
S20-40	乾燥機	均等径	30	20	40	20
S15-40				15		
S10-40				10		
S8-40				8		
S6-40				6		

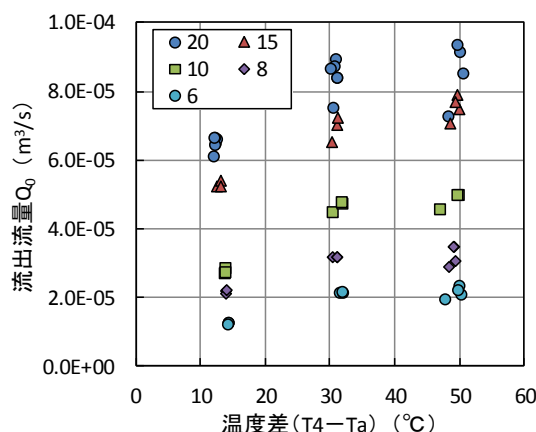


図 2.16 各ビーズの温度差と流出流量の関係（10 分間測定）

(3) 流出流量の連続測定

前項の結果を継続すると、外部への放熱のためビーズ温度は低下する。冷却速度は後述の図 2.20 に示すようにゆっくりであるため、各時点ではビーズ温度と空気流れは定常状態と考えてよい。そこで、乾燥機温度を 80°C に設定し、20mm のビーズで 5 分間ごとの温度と流速 v_x の連続測定を行い、流出流量 Q_0 を算出した。図 2.17 に連続測定と 10 分間測定の比較を示す。連続測定の結果に 10 分間測定の結果が重なることから、10 分間測定は連続測定に含まれることが判明した。

また、図 2.18 に 20mm のビーズを用いて、乾燥機の設定温度を 60、40°C に設定し、5 分間ごとの温度と流速 v_x の連続測定を行った結果を示す。乾燥機温度が 80°C のときの流出流量と 60°C、40°C の場合の流出流量がほぼ一致している。したがって、以降では初期温度を 80°C とし、冷却過程における 5 分ごとの温度と流出流量の関係を調べることにした。

表 2.5 に実験条件を、図 2.19 に温度差と流出流量 Q_0 の関係を示す。すべてのビーズにおいて、温度差が大きいほど、ビーズ径が大きいほど流出流量が大きくなり、温度差と流出流量の関係は直線とはならない。

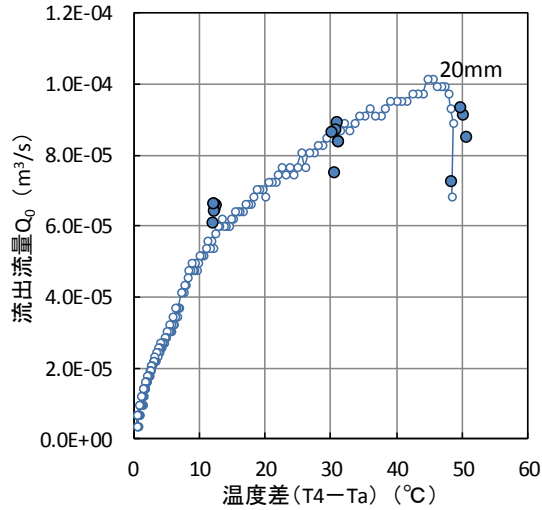


図 2.17 連続測定と 10 分間測定の比較 (ビーズ径 20mm)

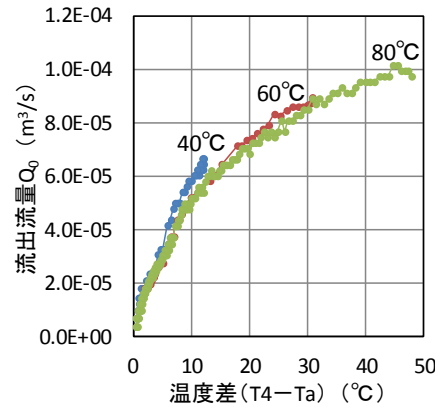


図 2.18 乾燥機温度が異なる場合の温度差と流出流量の関係

表 2.5 乾燥機を用いた場合の実験条件 (連続測定)

ID	ビーズ加熱方法	空気流入部形状	開口率 (%)	ビーズ径 (mm)	乾燥機温度 (°C)	オリフィス孔 (mm)
P20-80	乾燥機	均等径	30	20	80	20
P15-80				15		
P10-80				10		
P8-80				8		
P6-80				6		

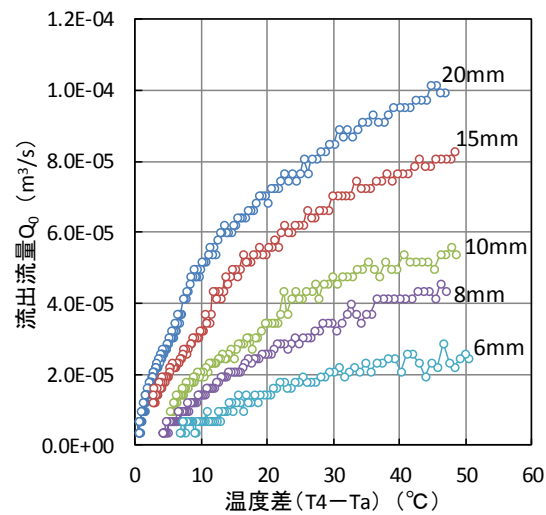


図 2.19 各ビーズの温度差と流出流量の関係

(4) カラム内温度分布の時間変化

図 2.19 の連続測定結果より、20mm のビーズにおける経過時間 100 分、200 分、400 分ごとのカラム内温度分布を調べた。各熱電対温度と室温 T_a の温度差とカラム高さの関係を図 2.20 に示す。中心部温度 (T4~T7) より、下部から流入した空気が徐々に暖められていることがわかる。また、水平方向に温度差が生じており、経過時間が 100 分から 400 分になるにつれて温度差は小さくなっていることが判明した。よって、ヒーターを用いた場合よりは温度差は小さくできるが、乾燥機を用いた場合でもカラム内には温度差が生じることが明らかとなった。

次に、ビーズ径による温度分布の変化を調べた。図 2.21 に 300 分経過時の各ビーズのカラム内温度分布の結果を示す。ビーズ径が異なる場合でもカラム内の温度差が生じ、ビーズ径が大きいほど温度差が大きい。これは同じ経過時間の場合、ビーズ径が大きいほど流出流量 Q_0 が大きいことによって、ビーズの冷却が大きいと考えられる。

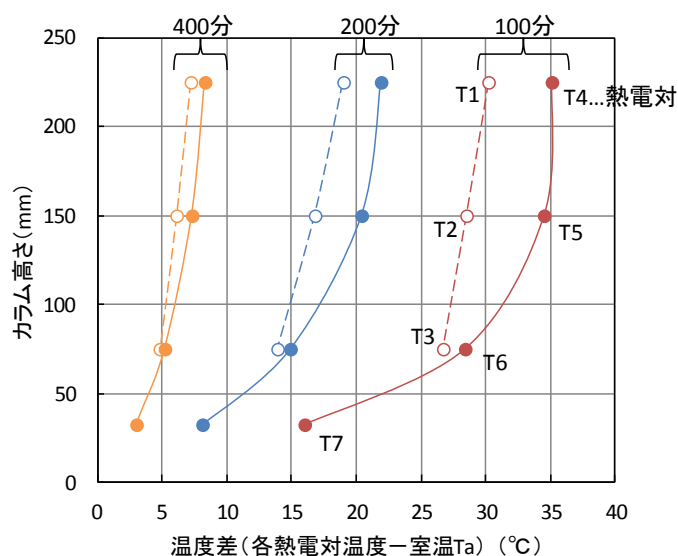


図 2.20 カラム内温度分布の時間変化

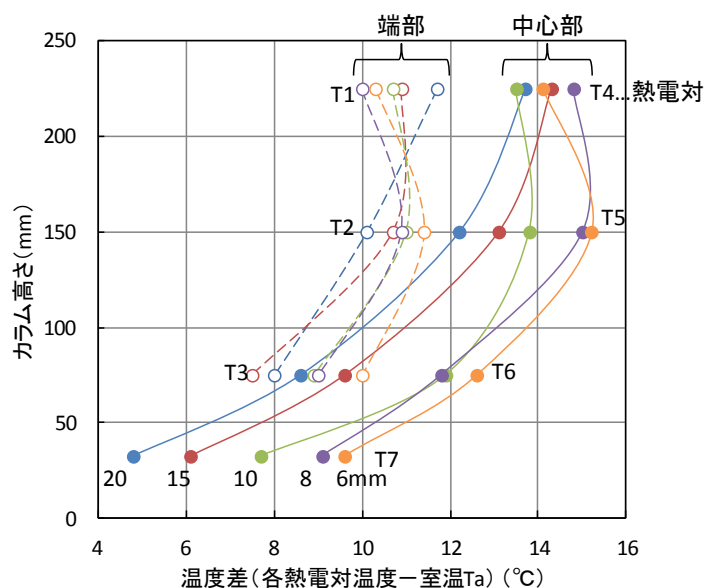


図 2.21 300 分経過時のカラム内温度分布

そこで、ビーズ温度が室温 T_a と同じ値となるまで (0~450 分間) の熱損失量を計算し、流出流量 Q_0 による熱損失割合を以下の式から算出した。ある時点でのビーズ保有熱量 $Q_B(t)$ (kJ)、空気が持ち出す熱量 $q_x(t)$ (kJ/min) はそれぞれ (2-7)、(2-8) 式で表される。

$$Q_B(t) = C_B G_B (T_{ave} - T_a) \quad (2-7)$$

$$q_x(t) = Q_0 \rho_a C_a (T_x - T_a) \times 60 \quad (2-8)$$

ただし、測定は 5 分間隔なので 1 分値として計算した。

ビーズ温度が室温と同じになるのに 450 分かかったため、この間のビーズから失われた熱量 $\Delta Q_B(t)$ (kJ) は、

$$\Delta Q_B(t) = Q_B(0) - Q_B(450) \quad (2-9)$$

一方、空気が持ち出した熱量は $\Delta Q_x(t)$ (kJ) は、

$$\Delta Q_x(t) = \sum_{t=0}^{450} q_x(t) \quad (2-10)$$

と表される。

C_B : ビーズ比熱 0.8 (kJ/K/kg) ^{7) 8) 9)}、 G_B : ビーズ重量 (kg)、 T_{ave} : 全体のビーズ平均温度 (°C)、 T_a : 室温 (°C)、 Q_0 : 流出流量 (m³/s)、 ρ_a : 空気の密度 (kg/m³)、 C_a : 空気の比熱 (kJ/K/kg)、 T_x : 出口温度 (°C)

結果を図 2.22 に示す。流出流量による熱損失量は 6mm で 0.8%、20mm で 5.5% とごくわずかであることが判明し、ビーズの熱損失は主にカラム表面からの放熱が主な原因であると考えられる。

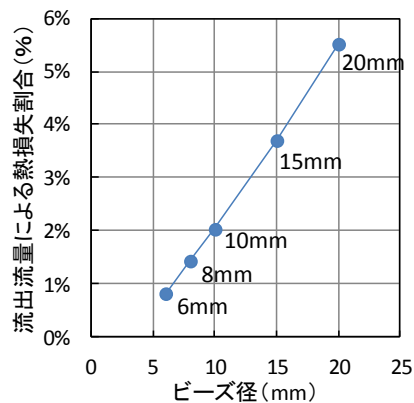


図 2.22 各ビーズの流出流量による熱損失割合

2.5 準好気性埋立地におけるガス流速（流量）のモデル式について

既往の研究¹⁰⁾および本実験より、準好気性埋立地では集排水管あるいは低部のガス抜き管から空気が流入し、埋立地内を通過してガス抜き管から流出し、この駆動力は埋立地内外の温度差による浮力であると考えられた。準好気性埋立地内のガス流速（流量）のモデル式について以下にまとめた。

(1) ダルシー則モデル

既往の研究¹¹⁾では、ダルシー則を用いて準好気性埋立地内のガス流速（流量）を導き出している。簡単のため、埋立地を図 2.23 のように多孔質の 1 つのブロックとして考える。内部温度を T_w 、外気温を T_0 、それぞれの密度を ρ_w 、 ρ_0 とすると、発生する浮力 F (N) は次式で表される。

$$F = \varepsilon(\rho_0 - \rho_w)Ahg \quad (2-11)$$

ここで ε は空隙率 (-)、 A 、 h はそれぞれ埋立層断面積 (m^2)、高さ (m) である。

一方、「多孔質中を流れる流体の流速は圧力勾配に比例する」ダルシー則は、

$$v = k_a \frac{dP}{dz} \quad (2-12)$$

であり (k_a は透気係数 ($m^2/Pa/s$))、

$$v = -k_a \frac{F}{hA} \quad (2-13)$$

と表される。

密度 ρ は理想気体の状態方程式より、下のよう表せる。

$$\rho = M_w \frac{P_0}{TR} \quad (2-14)$$

M_w : 空気モル質量 (kg/mol)、 P_0 : 大気圧 (Pa)、 R : 気体定数 ($J/K/mol$)

以上から、(1) 式に (2)、(3) 式を代入して整理すると

$$\begin{aligned} v &= \varepsilon k_a g (\rho_0 - \rho_w) \\ &= \varepsilon k_a g M_w \frac{P_0}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_w} \right) \\ Q &= A \varepsilon k_a g M_w \frac{P_0}{R} \left(\frac{T_w - T_0}{T_0 T_w} \right) \quad (2-15) \end{aligned}$$

となり、この場合、内部温度 T_w 以外については定数と考えられる。そこで、表 2.2 および図 2.19 の実測値を代入し、結果を図 2.24 に示す。ダルシー則モデルの計算値では、ガス流速（流量）と温度差の関係はほぼ直線になることが明らかとなった。

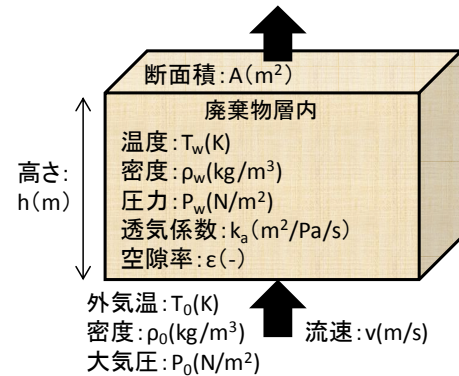


図 2.23 埋立層多孔質モデル

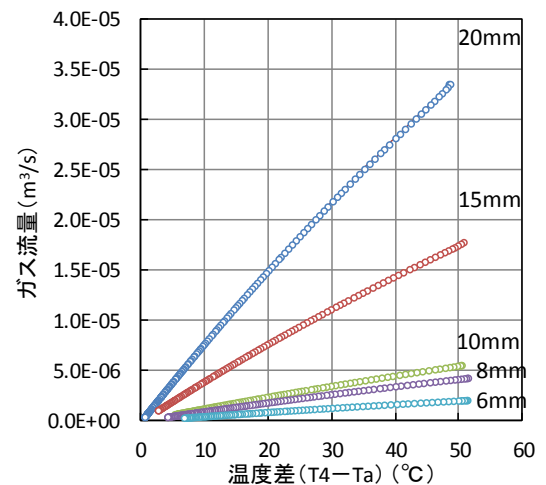


図 2.24 ガス流量と温度差の関係（ダルシー則モデル）

ところが、図 2.19 のカラム実験による流速測定の結果より、各ビーズの温度差と流出流量の関係には線形性は認められず、上記の式は当てはまらない。そこで、別の方法でモデル式を立てることとした。

(2) 自然換気モデル

建築設計において、温度差により生じる流れを利用した自然換気の理論がある。これは煙突効果と同様の理論と考えることができ、建物の中に外気より高温の空気があるときに密度の違いにより建物内で浮力による空気の上昇が生じ、建物下部の空気取り入れ口から外気の空気を引き入れる現象である¹²⁾。

埋立地でのガス流速も浮力が駆動力であると考えられることから、この式が適用できるのではないかと考えられた。自然換気によるガス流速は、以下のように導くことができる。

まず、図 2.25 のような空筒を考え、内部温度が周囲より高いとする。以下のようなメカニズムが考えられる。

- 1) 内部の空気が外部より高温なので、密度が小さく密度差が生じ、浮力が発生する。
- 2) 浮力により空気が上昇すると、内部が負圧になる。
- 3) 円筒下部と圧力差により、下部から空気が流入する。
- 4) 3) の空気移動量の体積を V (m^3)、質量を m (kg)、内外圧力差を ΔP とすると、 $V\Delta P$ が外部への仕事となる。これによって空気の運動エネルギーが生まれるので、エネルギー保存則より、

$$V\Delta P = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

v (m/s) は空気の移動速度である。カラム内外の圧力差 ΔP は、次式で表される。

$$\Delta P = P_0 - P_w = g(\rho_0 - \rho_w)h \quad (2)$$

また、理想気体の状態方程式より、密度 ρ (kg/m^3) は温度 T (K) に反比例するので、

$$\rho \propto \frac{1}{T}$$

$$\rho_w = \rho_0 \frac{T_0}{T_w} \quad (3)$$

以上より、(1) に (2)、(3) を代入して整理すると

$$v = \sqrt{2gh \frac{T_w - T_0}{T_w}} \quad (4)$$

と表される。

しかし、実際には壁面での摩擦損失や充填されたビーズ内を通過する際の抵抗などによるエネルギー損失が生じる。そのため、実際の計算には任意の補正值である流量係数 α (-) をかける必

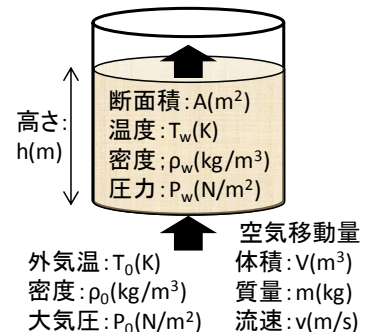


図 2.25 埋立層円筒モデル

要がある。円筒の断面積 A (m^2) をかけた空気移動量 Q (m^3/s) は以下の式で表される。

$$Q = Av = \alpha A \sqrt{2gh \frac{T_w - T_0}{T_w}} \quad (5)$$

本来、流量係数 α は充填物の抵抗、空気流入口・流出口の形状などに依存する値となるため、経験値や実験値により算出される。本実験では、最小二乗法により流量係数 α を決定し、数値を代入して実験結果と比較した(図 2.26)。A はカラム断面積、 T_0 は室温 T_a 、 h はカラム高さ 0.3m、 T_w はカラム内温度である T_4 を用いた。

すべてのビーズで測定値と自然換気モデル値がほぼ一致したことから、準好気性埋立地内のガス流速(流量)のモデル式は自然換気モデルで表現できる。また、式(5)より温度差による駆動力を大きくするためには、なるべく系の内外温度差 ΔT (K) を大きく、系の高さ h (m) を大きくすることが有効である。埋立地の場合では、内外温度差は埋立物の有機物割合に依存し、系の高さは埋立層の厚さに相当すると考えられる。

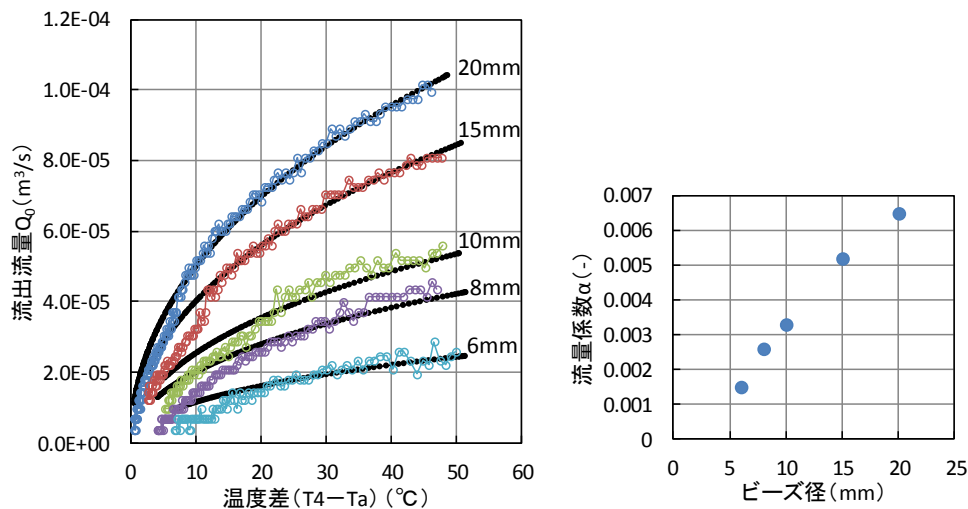


図 2.26 測定値と自然換気モデルの比較

(3) 空気流入部の形状が異なる場合の流量係数の違い

流量係数 α は充填物の抵抗、空気流入口・流出口の形状などに依存する値である。そこで、充填物を 20mm ビーズ、乾燥機温度を 80°C に固定し、空気流入部(下部)のふたの形状の変化によって流量係数 α がどのような影響を受けるかを調べた。図 2.27 に 3 種類の空気流入部のふたの形状を示す。当初から用いていた (a) 均等径と同じ開孔率 30% の中心部のみ穴が開いた (b) 大径のふたと、開口率 7.1% の (c) 小径のふたを用意し、実験を行った。表 2.6 に実験条件を示す。

図 2.28 に空気流入部の形状が異なる場合の温度差と流出流量の関係を示す。均等径、大径、小径の順に温度差が大きいほど、流出流量が大きくなることが明らかとなった。同じ開孔率(開孔面積)でも流量係数 α が異なることから、 α は空気流入部の形状に依存している値であることが示された。

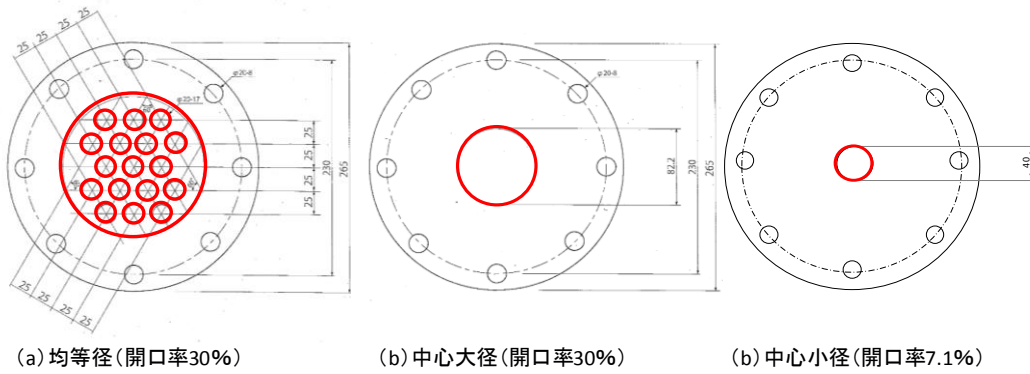


図 2.27 空気流入部（下部）のふたの形状

表 2.6 空気流入部の形状が異なる場合の実験条件

ID	ビーズ加熱方法	空気流入部形状	開口率 (%)	ビーズ径 (mm)	乾燥機温度 (°C)	オリフィス孔 (mm)
P20-80	乾燥機	均等径	30	20	80	20
CL20-80		中心大径	30			
CS20-80		中心小径	7.1			

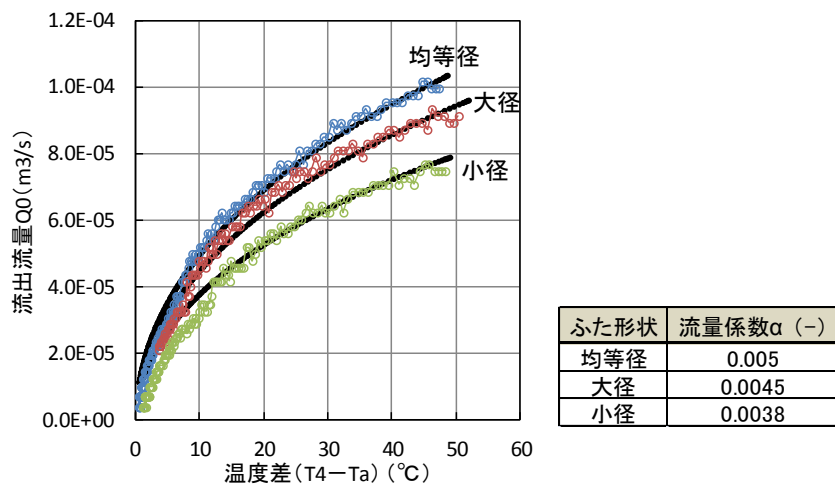


図 2.28 空気流入部の形状が異なる場合の温度差と流出流量の関係

参考文献

- 1) 尾形裕：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講演論文集、pp.443-444 (2011)
- 2) 椿東一郎、荒木正夫：水理学演習上巻、pp.197-206 (2004)、森北出版
- 3) Suzelle Barrington：Compost convective airflow under passive aeration、Bioresources Technology 86、pp.259-266 (2003)
- 4) 北海道大学工学部環境工学科/環境社会工学科衛生環境工学コース：環境工学実験Ⅱ,Ⅲ 実験テキスト、pp.53-56 (平成 23 年)
- 5) 河野俊一：乾燥によるコンクリートの透気係数の変化に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.2 (1999)
- 6) 西田耕之助：廃棄物埋立跡地におけるガス抜きに関する研究－砂層中の透気係数の予測－、環境技術、Vol.15、No.9、pp.727-733 (1986)
- 7) 八光電機 HP：各種物質の性質・非金属固体の性質
(<http://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01010.htm>) (閲覧日：平成 28 年 2 月 1 日)
- 8) 株式会社ニッカトー：アルミナボール商品紹介ページ (閲覧日：平成 28 年 2 月 2 日)
(<http://www.nikkato.co.jp/Cera/product.html>)
- 9) 西川兼康 藤田恭伸共著：機械工学基礎講座 伝熱学、p.451 (1982 年)
- 10) 山田修平：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、北海道大学卒業論文 (平成 25 年度)
- 11) Toshihiko Matsuto, Xin Zhang, Takayuki Matsuo, Shuhei Yamada: Onsite survey on the mechanism of passive aeration and air flow path in a semi-aerobic landfill, Waste Management 36, 204–212, 2015)
- 12) 一般財団法人日本建築学会：実務者のための自然換気設計ハンドブック、pp.4-9 (2013)、技報堂出版)

第3章 測定データに基づくガス流れ判定

3.1 アンケート調査方法

(1) 調査対象施設および項目

平成25年4月1日現在、全国の管理型最終処分場を所有する企業は444企業、753施設である¹⁾。複数の施設を所有している企業が存在するため、企業数と施設数は一致しない。本研究では、公益社団法人全国産業廃棄物連合会（以下、全産連）に加盟しており、稼働中の管理型最終処分場を所有する164企業を対象にアンケート調査を行った。

アンケート調査内容を表3.1に示す。1.処分場の概要では稼働状況、供用期間、立地、埋立面積、埋立容量、埋立層の厚さ、埋立物（埋立実績）を尋ねた。2.浸出水集排水設備については、集排水管の管径、浸出水の集水場所、集排水管の出口は開放か閉塞か、水没はあるか、集排水管末端から空気の流入はあるか、を尋ねた。3.ガス抜き管については、管径、本数、蓋の有無、現在のガス流出の有無、ガス温度、流速、組成の測定の有無とデータ提供の可否を尋ねた。最後に4.実測協力の可否では、実際に施設を訪ね、ガス流量、ガス流れ等の調査が可能かどうかを尋ねた。

付録にアンケート回答用紙および同封した依頼状（今回のアンケート調査の趣旨、一昨年度の研究の詳細と調査結果）を示す。

表 3.1 アンケート調査内容

主な質問項目	詳細
1.処分場の概要	稼働状況、供用期間、立地、埋立面積、埋立容量、埋立層の厚さ、埋立物
2.浸出水集排水設備について	管径、集水場所、集排水管の出口状態、空気流入の有無
3.ガス抜き管について	管径、本数、蓋の有無、ガス流出の有無、測定の有無 測定データ提供の可否
4.実測協力の可否	現地実測協力の可否

(2) 回答状況

アンケート調査は平成27年8月～9月の間に郵送で行った。164企業に送付し、77企業（89施設）から回答を得られた（回答率：47%）。数年前から処分場を所有していない2企業、本研究対象外となる安定型最終処分場のみを所有する2企業あったため、それらを除き、有効回答数は73企業（85施設）となった（有効回答率：46%）。

また、ガス抜き管を持たない施設として、水面埋立地である5施設、ガス発生のない無機物主体のためガス抜き管がない4施設を除き、分析対象施設は表3.2に示す76施設である。施設ごとにNo.を付け、文中の【】は施設番号を表している。14-1、14-2などとあるのは、同一企業が所有する複数の施設であることを示す。

表 3.2 データ分析対象施設

No.	都道府県	No.	都道府県	No.	都道府県	No.	都道府県
1	北海道	26	北海道	58	山形県	124	大阪府
2	北海道	28	北海道	59	山形県	131	島根県
3	北海道	30	北海道	61-1	福島県	133	島根県
4	北海道	31-1	北海道	61-2		135-1	広島県
5	北海道	31-2		62-1		135-2	
7	北海道	32	北海道	62-2	福島県	139-1	山口県
10	北海道	33	北海道	66	茨城県	139-2	
14-1	北海道	35	北海道	74	千葉県	139-3	
14-2		36	北海道	83	東京都	144	香川県
15	北海道	38	北海道	92	新潟県	145	香川県
16	北海道	44	青森県	93	新潟県	150	愛媛県
17	北海道	45	岩手県	94	新潟県	151	高知県
19	北海道	46-1	宮城県	96	富山県	157	佐賀県
20	北海道	46-2		103-1	静岡県	159	熊本県
21-1	北海道	47	秋田県	103-2	静岡県	161	大分県
21-2		48	秋田県	109-1	愛知県	162	宮崎県
22	北海道	51	秋田県	114	愛知県	163	宮崎県
23	北海道	55	山形県	116	愛知県	164	鹿児島県
25	北海道	56	山形県	122	京都府	166	沖縄県

3.2 各項目ごとの集計結果

アンケート調査結果を図 3.1～図 3.4 に示す。一部、「準好気性埋立地の管理状況に関する全国アンケート調査」²⁾ を参考に一般廃棄物最終処分場と比較した。

図 3.1 は処分場の概要を示しており、(a)、(b) より準好気性埋立構造、供用中の施設が約 90% であった。(c) 立地条件では、山間が約 75% と最も多く、平地は 25% であった。(d) 供用開始は、現在の構造・維持管理基準が適用される 2000 年以降の施設が約 60% である。(e) 埋立面積は 30000m²、(f) 埋立許可容量は 300000m³ を超える施設が約 50% であり、一廃では小規模な施設 (埋立面積 10000m² 以下、埋立容量 100000m³ 以下) の割合が高いため、産廃のほうがやや大きい。(g) 現在の埋立層の厚さと (h) 最終計画の埋立層の厚さの中央値はそれぞれ 17.5m、25m であり、これは (j) 埋立面積と埋立容量の関係からもわかる。(i) 年間埋立量では 10000t/年を超える施設が約 60% であり、一廃の約 30% と比較して産廃のほうが大きい。(k) 埋立容量と年間搬入量の間には相関が認められない。

次に図 3.2 に浸出水集水設備について示す。(a) 集排水管 (本管) の直径が 500mm 以上である施設が 50% 以上を占めており、一廃 (8%) と比較して大きい。(c) 浸出水集水場所では集水ピットが 53% と最も多く、(d) そのうち半数の施設が集水ピットに蓋やカバーなどをしており、閉塞している。また、(e) 集排水管の出口の状態がときどき水没、いつも水没の施設が約 40% であり、集排水管末端からの空気の流入を妨げている施設が多いと言える。(f) 集排水管の出口から空気が流入している施設が約 60% あるが、そこで流速測定を行っている施設は約 12% に留まっている。

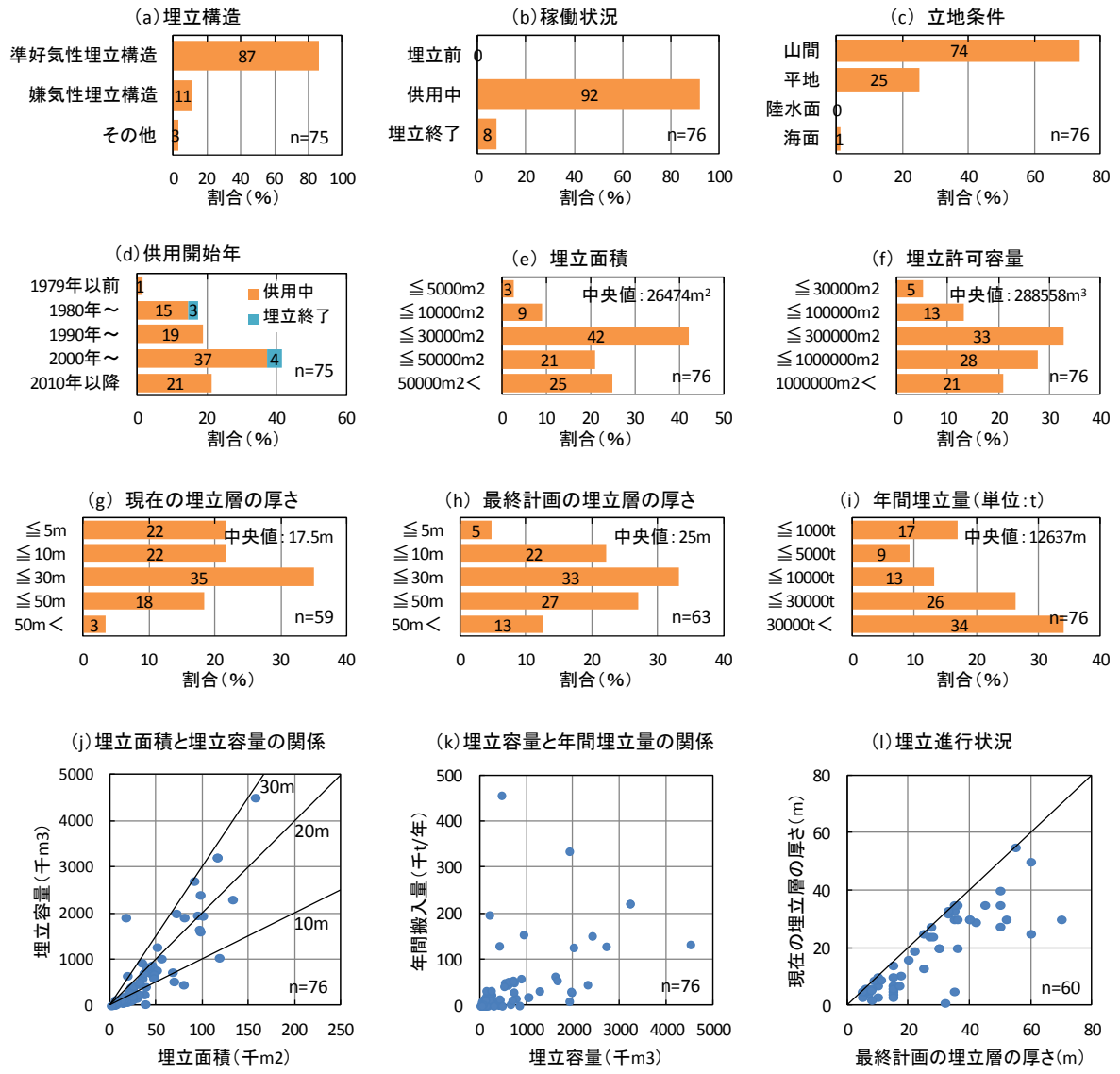


図 3.1 処分場の概要

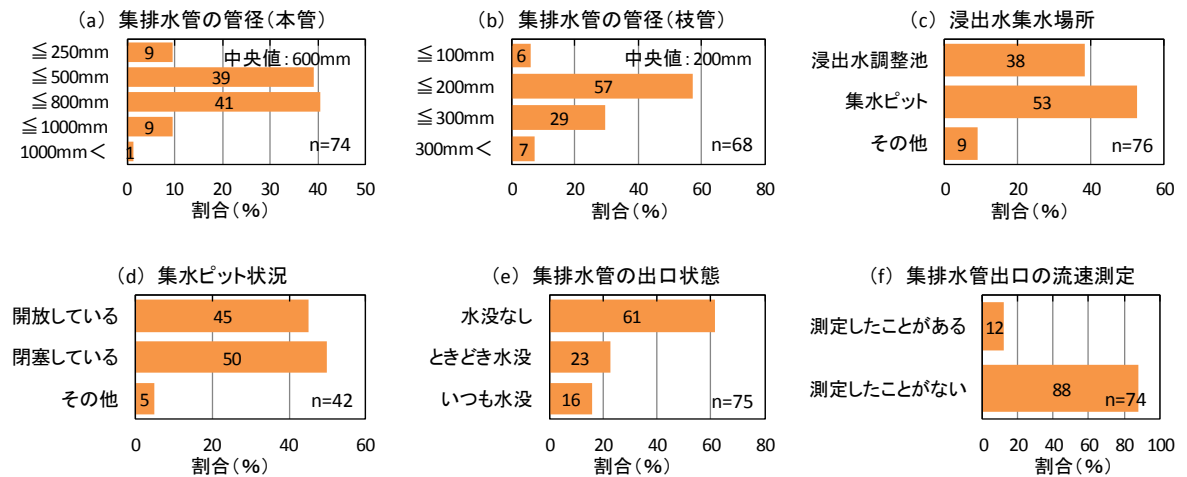


図 3.2 浸出水集水設備について

図 3.3 にガス抜き管について示す。(b) 堅型ガス抜き管と (e) 法面ガス抜き管の管径の中央値はそれぞれ 300mm、200mm であり、堅型ガス抜き管は約 25%の施設が 500mm 以上であった。(h) 全ガス抜き管の 1 本あたりの埋立面積では中央値が約 1800m²/本であるが、2000m²/本よりも大きな施設が約 50%を占めていた。一般廃棄物最終処分場の性能に関する指針³⁾では「堅型ガス抜き管は管径 200mm 以上であり、2000m²に 1 ヶ所以上設置されること」とされ、ほぼ基準に従っているため、産廃に比べて管径は小さく、1 本あたりの埋立面積が小さい(ガス抜き管密度が産廃に比べて大きい)。

(i) 管からのガス流出がある施設は約 70%であり、(j) そのうちの半数が測定を行って、ガス流出の判断としていた。一方、(k) 管の上に蓋やカバーがある施設が 26%あり、(l) そのうちの約 40%が穴なしの蓋を使用していた。これは埋立地からのガス流出を妨げていると言える。

(m) ガス抜き管におけるガス組成を測定している施設が約 50%であり、(n) 硫化水素、メタンガス、酸素、二酸化炭素の順が多い。一方で (o) ガス流速、(p) ガス温度の測定を行っている施設はそれぞれ 19%、27%と少ない。(q) 集排水管とガス抜き管の接続状況に関しては約 80%の施設が全て接続されている。

最後に、図 3.4 の実測協力の可否では 35%の施設が協力的という結果となった。

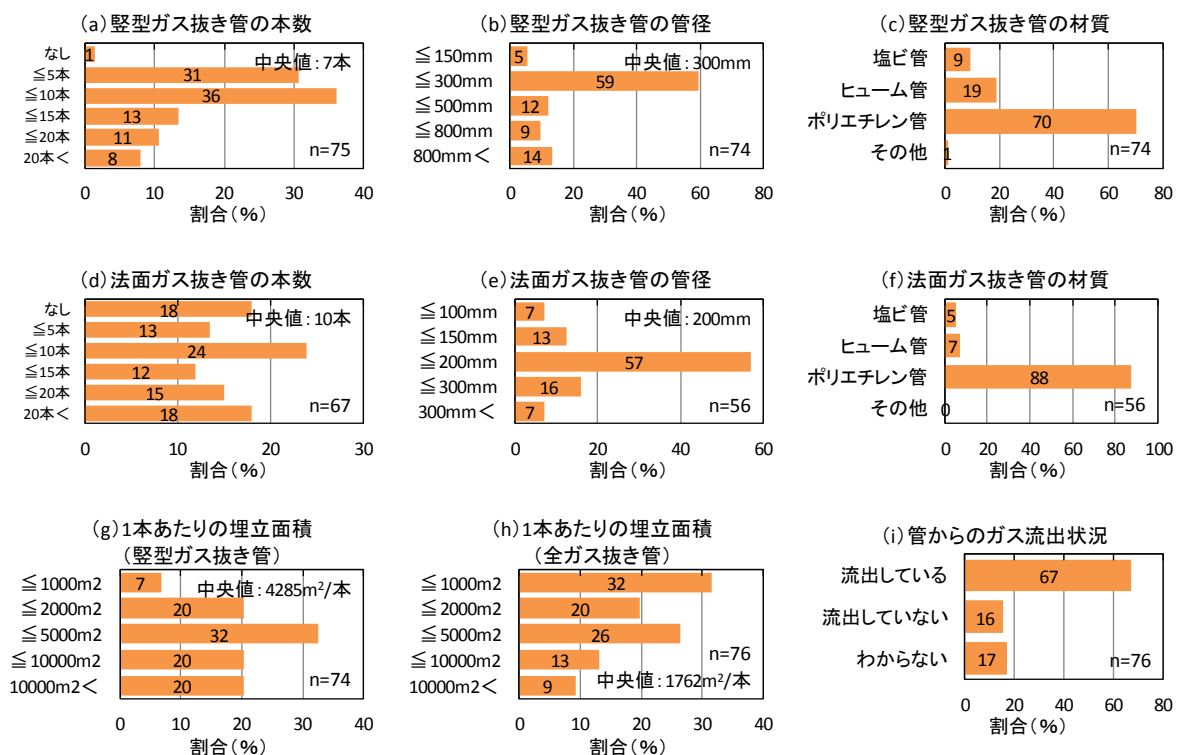


図 3.3 ガス抜き管について

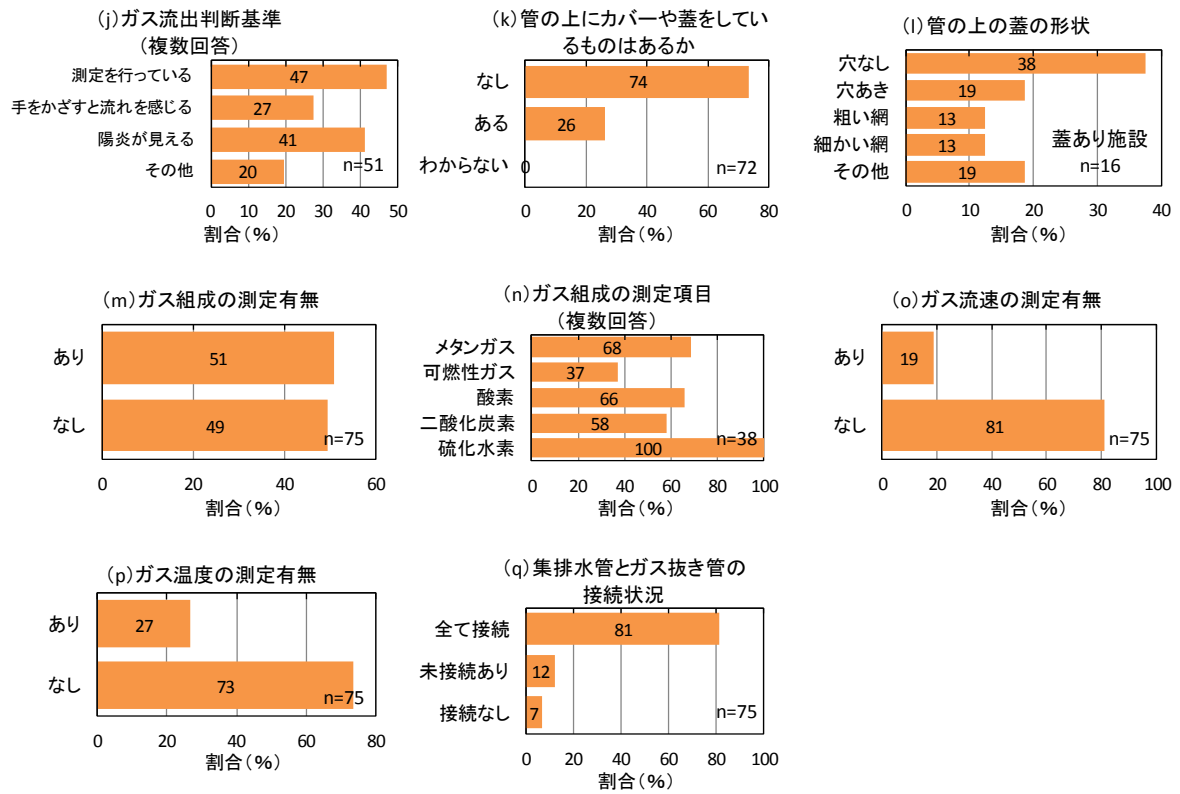


図 3.3 ガス抜き管について (つづき)

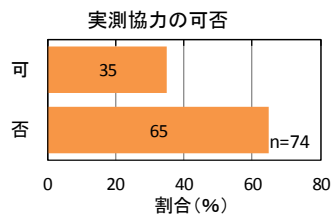


図 3.4 実測協力の可否

3.3 クロス集計

図 3.1～3.4 に示した回答のうち、「集排水管出口状況と空気流入、ガス流出の関係」、「施設稼働状況と空気流入、ガス流出の関係」、「供用開始年と全ガス抜き管の1本あたりの埋立面積の関係」を調べた。

表 3.2 (a) (b) に集排水管出口状況と空気流入、ガス流出の関係を示す。集排水管出口状況が調整池、集水ピット開放の場合は集排水管末端からの空気流入、ガス抜き管からのガス流出が多い。これは管の末端が開放しているほど、ガスが流れていることを示している。一方で、集水ピット閉塞でも集排水管出口から空気が流入している理由については、測定時に集水ピットを開放していることが考えられる。

表 3.2 集排水管出口状況と空気流入、ガス流出の関係

(a)集排水管出口状況と集排水管空気流入				(b)集排水管出口状況とガス抜き管ガス流出			
	流入あり	流入なし	不明		流出あり	流出なし	不明
調整池	17	5	7	調整池	21	3	5
集水ピット開放	14	2	3	集水ピット開放	14	3	2
集水ピット閉塞	10	1	9	集水ピット閉塞	11	4	5
その他	3	2	3	その他	5	2	1

(c)集排水管空気流入とガス抜き管ガス流出			
	流入あり	流入なし	不明
流出あり	33	6	5
流出なし	6	2	2
不明	12	4	6

※単位: 施設数

表 3.3 施設稼働状況と空気流入、ガス流出の関係

(a)施設稼働状況と集排水管空気流入				(b)施設稼働状況とガス抜き管ガス流出			
	流入あり	流入なし	不明		流出あり	流出なし	不明
埋立前	0	0	0	埋立前	0	0	0
供用中	40	8	22	供用中	46	11	13
埋立終了	4	2	0	埋立終了	5	1	0

※単位: 施設数

図 3.5 に供用開始年とガス抜き管1本あたりの埋立面積の関係を示す。2000年以降で0~999、1000~1999m²/本の施設数が増加しており、これは2000年に定められた性能指針の「一般廃棄物の最終処分場では、ガス抜き管等の通気装置が2000m²に1ヶ所以上設置されること」³⁾が影響していると考えられる。また、「管理型処分場は一般廃棄物処分場と同等の機能を有すること」⁴⁾とされており、管理型処分場には一般廃棄物が埋め立てられることは少なくない。よって、補助金対象の要件を満たすために、ガス抜き管1本あたりの埋立面積が小さくなった(ガス抜き管密度が大きくなった)と考えられる。

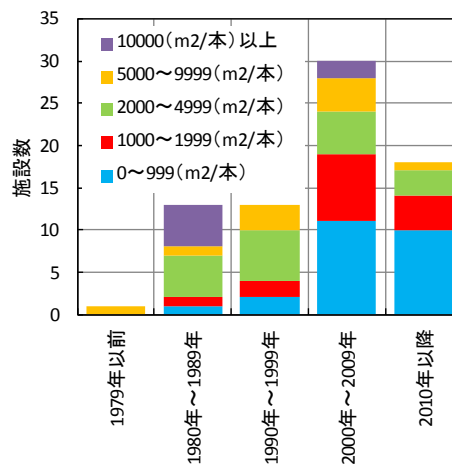


図 3.5 供用開始年とガス抜き管1本あたりの埋立面積の関係

3.4 埋立物、供用開始年とガス流出の関係

準好気性埋立構造では大気中から酸素が供給され、好気性微生物による有機性廃棄物(有機物)の分解が生じ、炭酸ガス、アンモニア、水、熱などが発生する。そのため、有機物が多く埋め立てられているほど埋立地内部は高温になり、ガス抜き管からガスが流出すると考えられる。図 3.6 に年間の埋立量割合とガス流出の関係を示す。

図 3.3 (i) に示したガス流出ありの施設では汚泥の割合が多く、その他では木くず、動植物性残渣の割合が多い。一方、ガス流出なしの施設では汚泥の割合が少なく、その他としては鉱さい、ばいじんが大半である。汚泥、その他(木くず、動植物性残渣)などの割合が大きいほど、埋立地に有機物が多く埋め立てられている可能性がある。

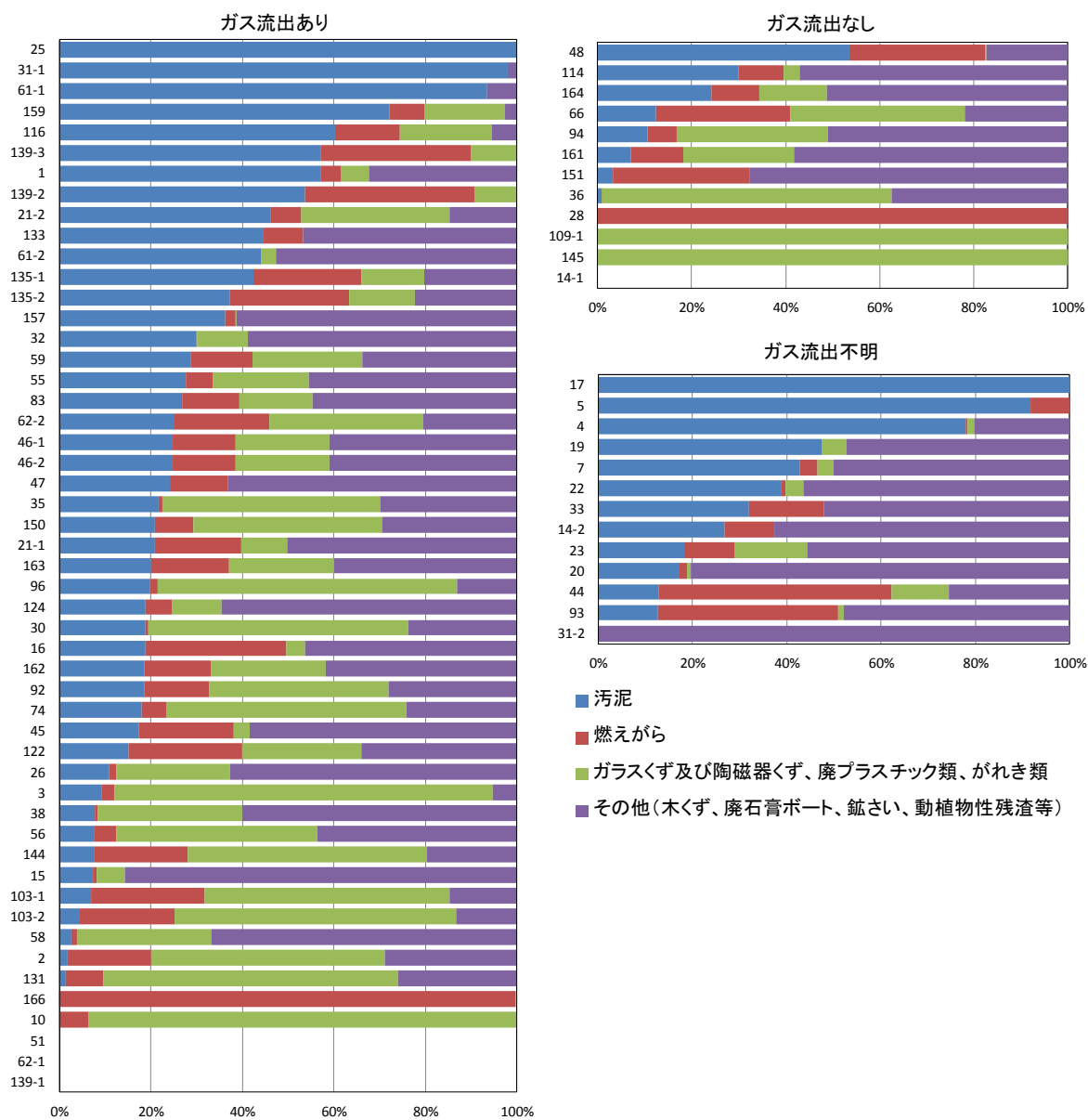


図 3.6 年間の埋立量割合とガス流出の関係

一方で、分解が進行し、埋立地内の有機物量が減少するにつれて、ガス抜き管からのガスの流出は弱まると考えられる。そこで供用開始年とガス流出の関係を調べた(図 3.7)。ガス流出あり、なし、不明ともに目立った特徴はなく、度数分布からも関係性を見ることはできなかった。

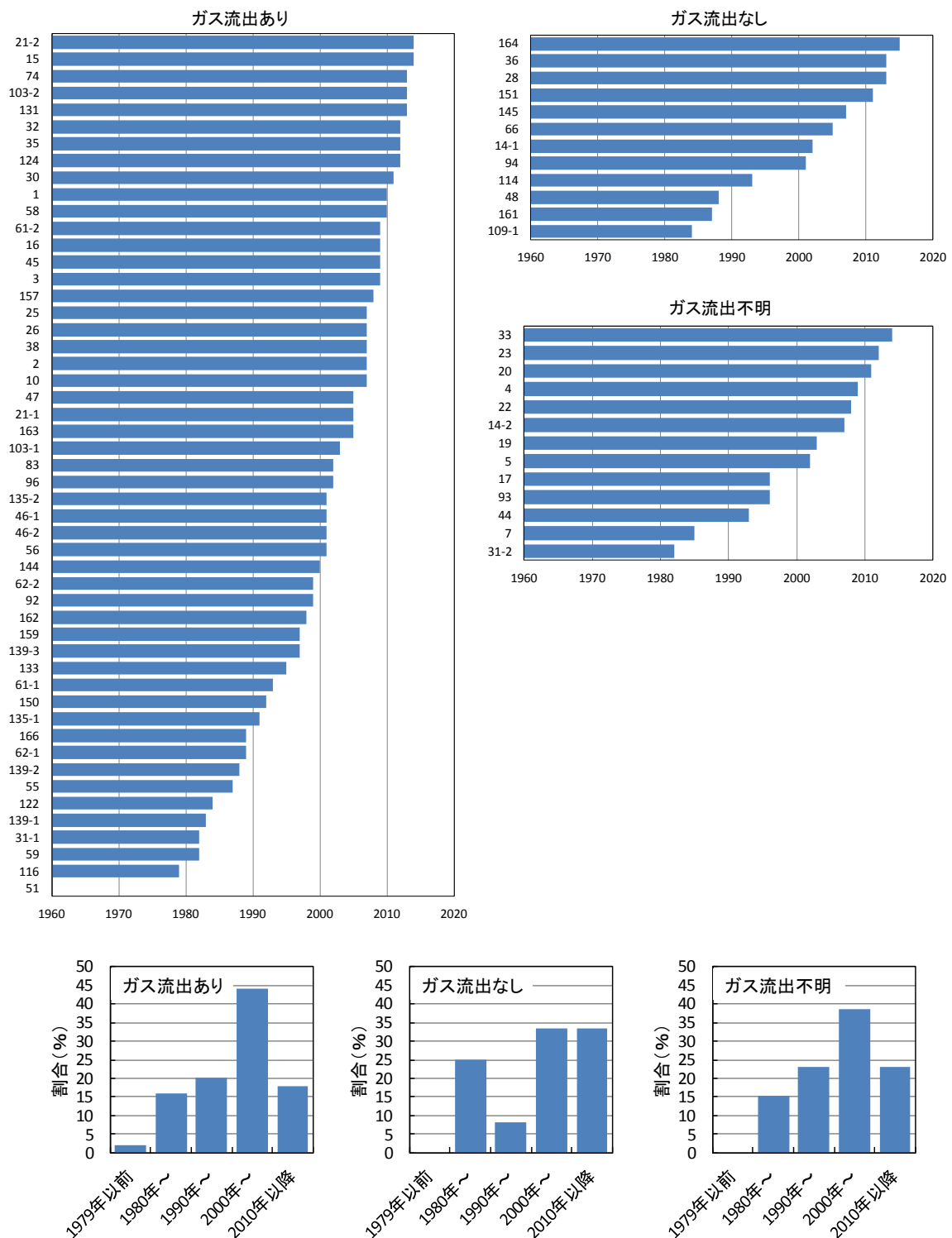


図 3.7 供用開始年とガス流出の関係

3.5 データ入手施設の選定と分析

図 3.1～3.4 のアンケート調査をもとに、ガス抜き管における測定データ提供を依頼する施設を選定した。ガス流出の有無、ガス抜き管の測定項目の有無、データ提供の可否の順にスクリーニングを行い、23 施設に対し、測定データ提供を依頼し、15 施設からデータを入力した。(図 3.8)。

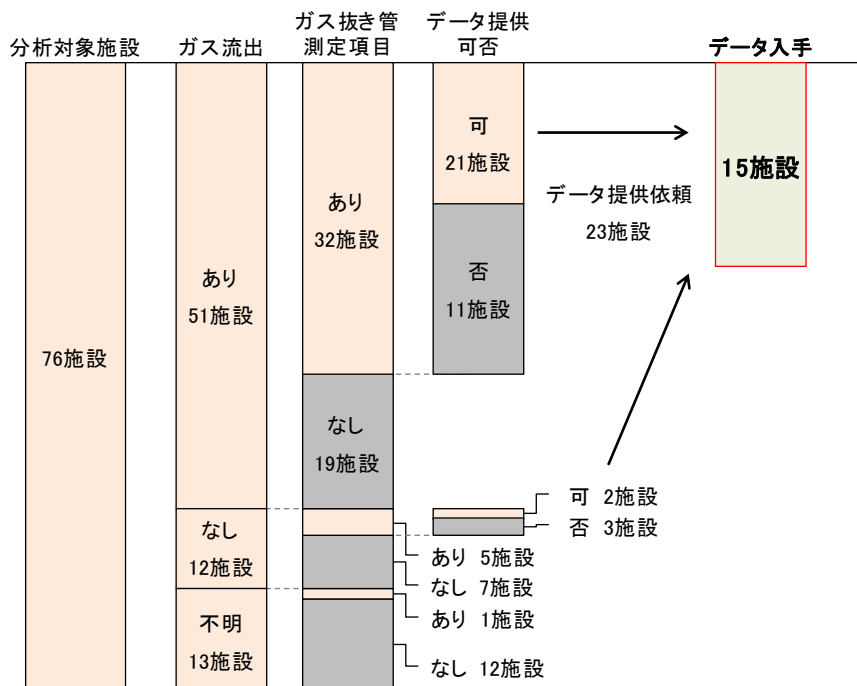


図 3.8 データ入手施設の選定

(1) ガス流れ判定

既往の研究⁵⁾ およびカラム実験(第2章)により、ガス温度が高いほどガスが流出し、埋立地内をガスが流れていると考えられた。そこで、ガス温度に注目し、図 3.9 の手順でガス流れ判定を行った。一昨年度の仙台市の埋立地⁵⁾ ではガス温度と外気温の温度差が 20℃以上の場合にガスが流れていることが確認でき、さらに廃棄物最終処分場廃止基準の温度非異常基準である「埋立地内部と周辺の地中の温度の差が摂氏 20 度未満であること」⁶⁾ を考慮し、温度差 20℃以上を判定基準とした。また、一部の施設では外気温の測定を行っていなかったため、ガス温度 40℃以上を 2 つ目の判定基準とした。

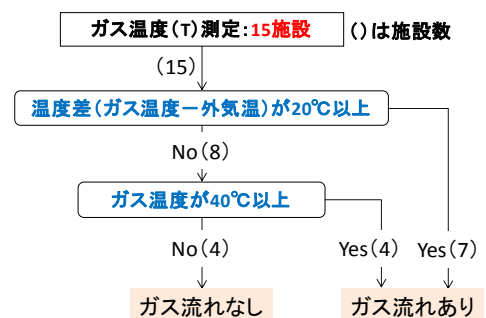


図 3.9 ガス流れ判定の流れ

「ガス流れあり」と判定したのは図 3.10、図 3.11 の 11 施設であるが、図 3.10 (a) はすべてのガス抜き管に穴なしのフタをしており、ガス流量は 0.1mL/s 未満とガスは流れているとは言えない。また、二酸化炭素、メタン濃度がともに高く、埋立地内部が嫌気性となっている可能性が高い。図 3.10 (b) では集排水管からの空気の流入があると回答があり、ばらつきはあるが外気温に比べ、ガス温度が高いガス抜き管がある。図 3.10 (c) はほぼすべてのガス抜き管のガス温度が外

気温と比べ、高い。図 3.11 にガス流速（流量）とガス温度の関係を示すが、すべての施設で正の相関がある。図 3.11 (a) の一部の管が 40℃以上にもかかわらずガス流速が 0m/s となっているのは、管にフタや燃焼装置を設置していたからである。図 3.10 (a) を除いた 10 施設はガス流れありと確認できた。

「ガス流れなし」と判断したのは 4 施設であり、図 3.12 に施設ごとのガス流速、温度測定データを示す。No.28 の施設では不定期で測定は行っているが、データを残していないため、図 3.12 には示していない。2015/9/2 に測定を依頼したところガス温度は外気温と同じ 21℃、ガス流速は 0.01m/s 程度であった。図 3.12 (a) (c) ではガス流速を測定しているがそれぞれ 1mL/min 未満、0.02m/s と流れているとは言えない。

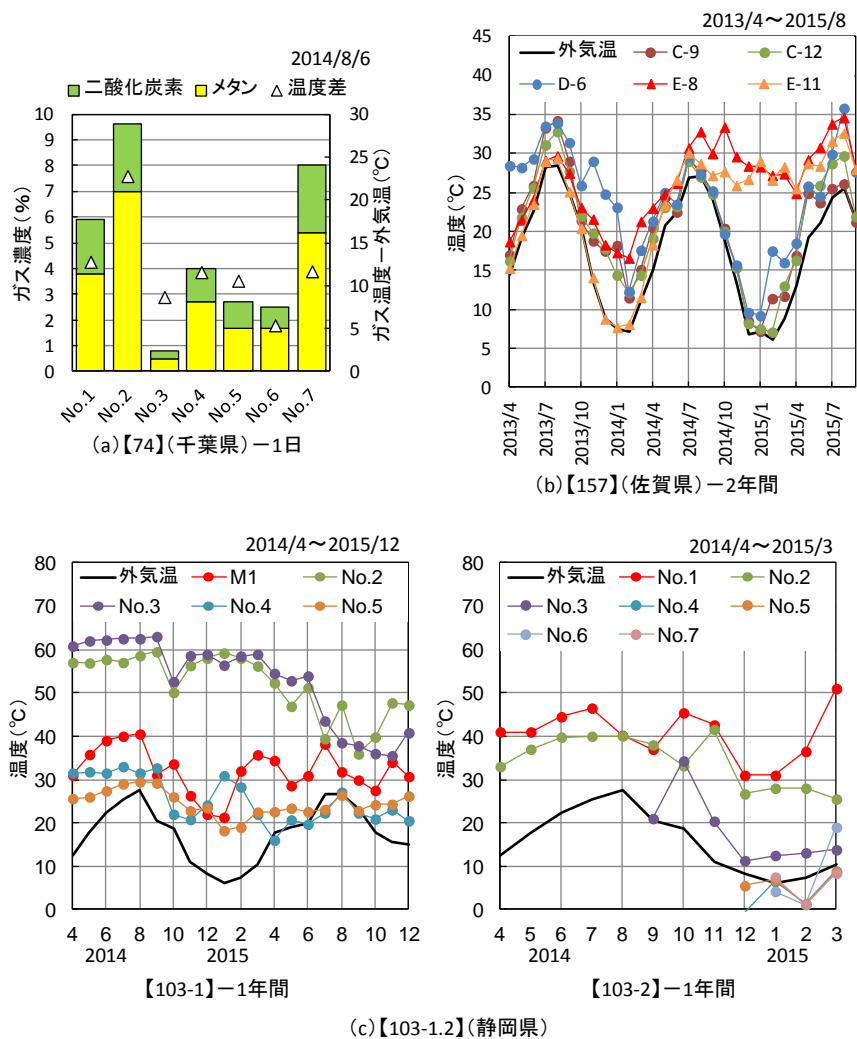
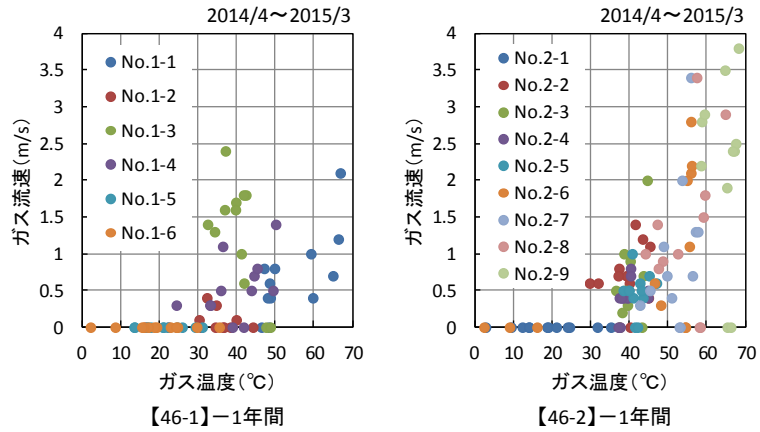
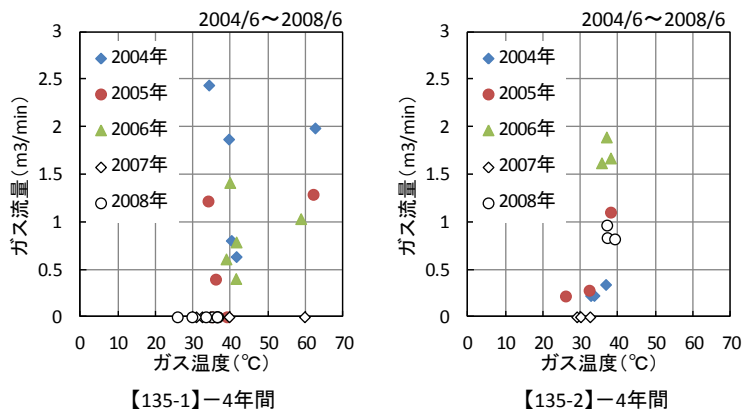


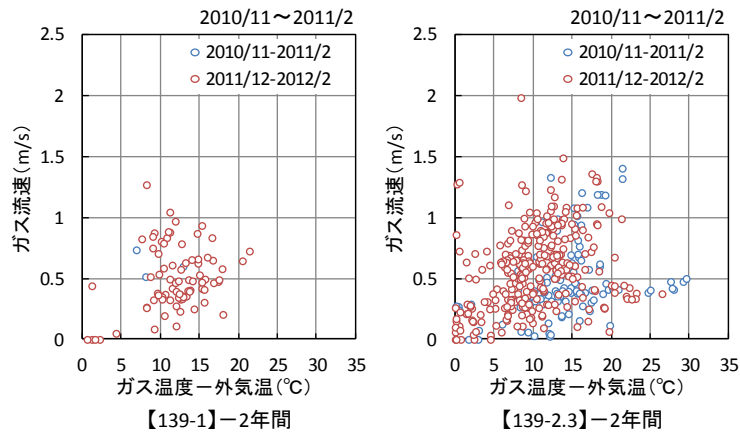
図 3.10 「ガス流れあり」の温度測定データ



(a)【46-1.2】(宮城県)



(b)【135-1.2】(広島県)



(c)【139-1.2.3】(山口県)

図 3.11 「ガス流れあり」のガス流速（流量）、温度測定データ

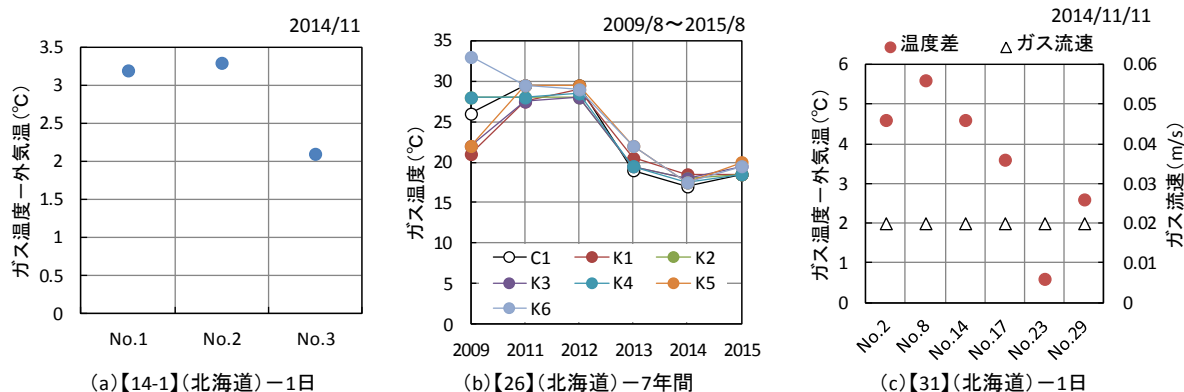


図 3.12 「ガス流れなし」のガス流速（流量）、温度測定データ

(2) 測定項目の時間変化の影響

ガス流れ判定により、10 施設でガスが流れていると判定されたが、図 2.12 (b) の施設におけるガス流量の経年変化（2004 年～2014 年の 10 年分）を調べたところ、【135-1】では 2010 年から、【135-2】では 2009 年からガスが流出していない（図 3.13）。3.4 節で説明したように、ガスの流出は埋立地内の有機物の分解により生じる浮力が駆動力である。温度が高く流出量が多いことは、分解可能な有機物の存在を意味し、ガスの流出が弱まったことは有機物分解が終了（安定化）したことになる。したがって、ガス抜き管の経年的なモニタリングにより、埋立地内の状況を把握することができる。

入手データが数年前の施設に対し、2015 年 11 月現在のガス流出状況を尋ねた。表 3.4 に示すように、不明の施設を除き、5 施設では安定化が進み、現在もガスが流出している施設は【46-1.2】の 2 施設、【103-1.2】の 2 施設の計 4 施設であることが明らかとなった。

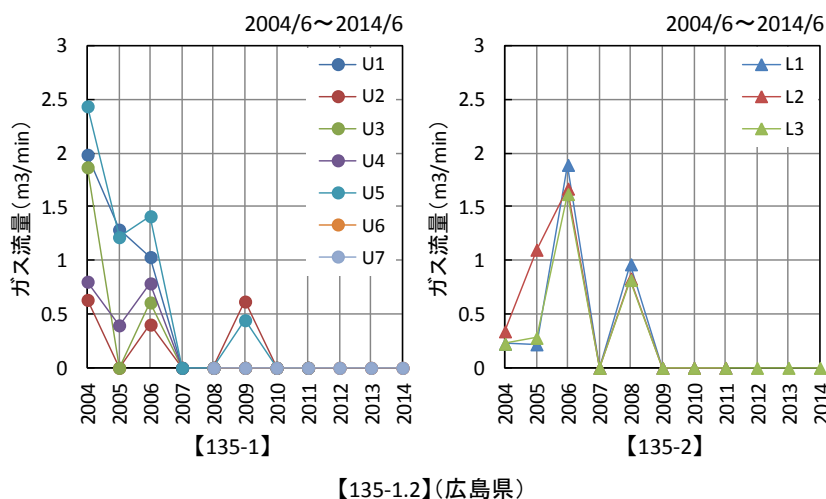


表 3.4 ガス流れ判定と現在のガス流出状況の比較

No.	都道府県	供用期間	入手データ	ガス流れ判定 (図2.11～図2.13)	ガス流出状況 (2015/11現在)
46-1	宮城県	2001～2013	2014/4～2015/3	流出あり	流出あり
46-2	宮城県	2001～2021	2014/4～2015/3	流出あり	流出あり
135-1	広島県	1991～	2004/6.10～ 2014/6.10	流出あり	流出なし
135-2	広島県	2001～	2004/6.10～ 2014/6.10	流出あり	流出なし
103-1	静岡県	2003～2012	2014/4～2015/3	流出あり	流出あり
103-2	静岡県	2013～2025	2014/4～2015/3	流出あり	流出あり
139-1	山口県	1983～1988	2010/11～2011/2 2011/12～2012/2	流出あり	ほぼ流出なし
139-2	山口県	1988～2015	2010/11～2011/2 2011/12～2012/2	流出あり	ほぼ流出なし
139-3	山口県	1997～2015	2010/11～2011/2 2011/12～2012/2	流出あり	ほぼ流出なし
157	佐賀県	2008～	2013/4～2015/9	流出あり	不明
14-1	北海道	2002～2005	2014/11	流出なし	流出なし
26	北海道	2007～2016	2009/5～2015/8	流出なし	流出なし
28	北海道	2013～	2015/9	流出なし	流出なし
31-1	北海道	1982～2003	2014/11	流出なし	流出なし
74	千葉県	2013～2022	2013/8, 2014/8	流出なし	不明

ガス流れあり
ガス流れなし

参考文献

- 1) 環境省：産業廃棄物処理施設の設置、産業廃棄物処理業の許可等に関する状況（平成 24 年度実績）について（<http://www.env.go.jp/press/100485.html>）（閲覧日：平成 28 年 1 月 19 日）
- 2) 清野和之：準好気性埋立地の管理状況に関する全国アンケート調査 北海道大学卒業論文（平成 23 年度）
- 3) 環境省：廃棄物最終処分場の性能に関する指針について（平成 14 年改正）
（http://www.jefma.or.jp/download/pdf/gizytu/sisin_haikibutu.pdf）（閲覧日：平成 28 年 1 月 18 日）
- 4) 田中信壽：環境安全な廃棄物埋立処分場の建設と管理、p.11（2004）、技報堂出版
- 5) 山田修平：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 北海道大学卒業論文（平成 25 年度）
- 6) 廃棄物学会、廃棄物埋立処理処分研究部会：廃棄物最終処分場廃止基準の調査評価方法、pp.32-39（平成 14 年）

第4章 現地測定によるガス流れメカニズムの解明

4.1 埋立地概要

前項の最後に述べたように、【103-1.2】の2施設、【46-1.2】の2施設の4施設のみ、現在もガスが流出している。そこで【103-1.2】においてガスを中心とした、現地実測調査を行った。本施設は1期、2期の埋立地からなり、ともに区分が管理型処分場であり、埋立構造が準好気性埋立構造となっている。本研究の対象埋立地は【103-1】第1期廃棄物最終処分場（以下、1期埋立地）であり、2003年から埋立が開始され、2012年に埋立を終了している。埋立面積は32103m²、埋立容量は511141m³である。



図 4.1 調査対象埋立地の上空撮影図（Google Map より）

4.2 埋立物について

埋め立てられた産業廃棄物の重量割合を図 4.2、図 4.3 に示す。図 4.2 は 2003 年～2012 年までの年度別埋立物量である。埋立物の割合としては、廃プラスチック類、家庭系一般廃棄物、汚泥、燃え殻、ガラスくず・コンクリートくず及び陶磁器くずの割合が大きい。家庭系一般廃棄物の埋立量は 69472t であり、そのうち焼却灰が 66740t、不燃物が 2732t である。汚泥としては有機汚泥が約 6 割、無機汚泥が約 4 割の割合で埋め立てられている。

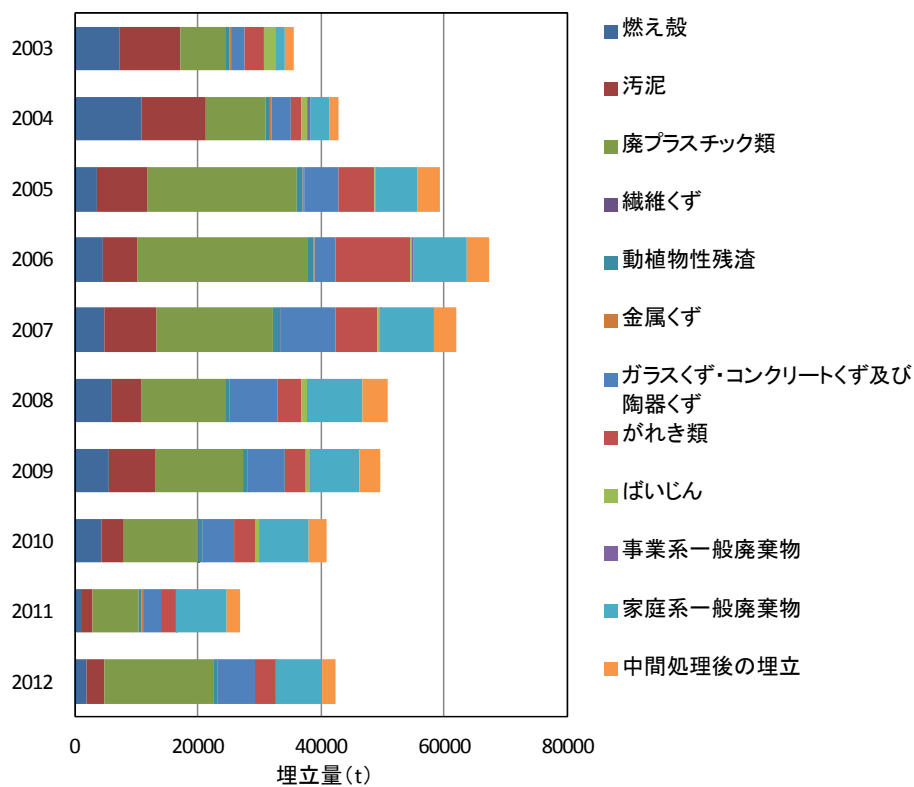


図 4.2 年度別埋立物量 (合計 478138t)

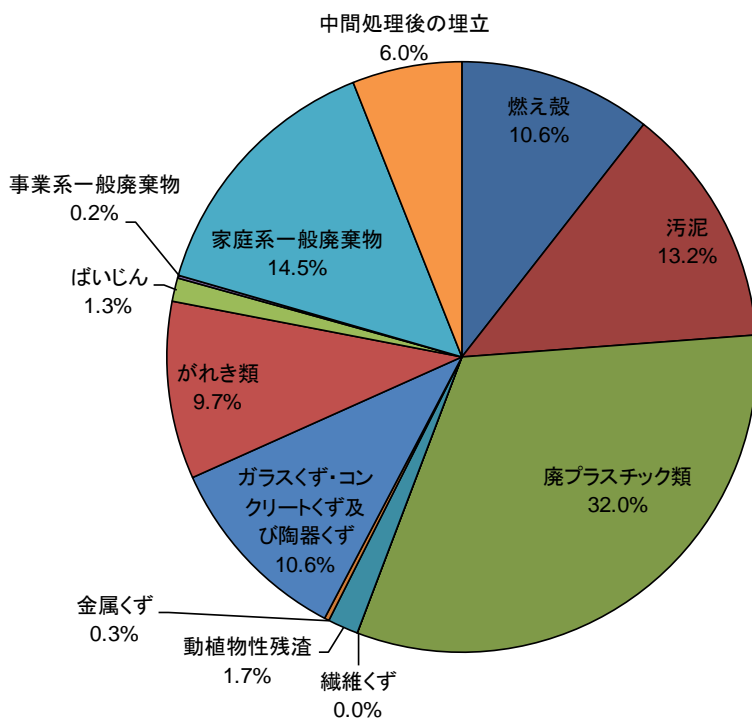


図 4.3 埋立物別重量割合 (2003~2012 年の合計 478138t)

4.3 調査方法

現地調査は2015/12/7~8に行った。調査内容を時間順に表4.1にまとめた。

表 4.1 調査内容

日付	測定内容	目的
2015/12/7~ 2015/12/8	ガス抜き管の位置確認	豎型17本、法面9本のガス抜き管の位置確認
	ガス流れ方向 ガス流速 ガス温度、外気温	流量分布の測定 ガス抜き管のガス流速(流量)、温度の関係の測定
	ガス組成	ガス組成の調査
	埋立深さ	GPS、作業員からのヒアリングから調査
	発煙筒(2回)	埋立地内のガス流れの可視化
	ガス温度と外気温の連続測定	ガス温度と外気温の関係を調査
	トレーサー応答試験	埋立地内ガス流れの推定
	ガス流速の時間変動	ガス流入出の流速の時間変動を調査

(1) ガス抜き管のガス流速、温度とガス組成の測定

すべてのガス抜き管において出口状況、ガス流れ方向、ガス流速、ガス温度、外気温、埋立層厚さ、ガス組成の測定を行った。図4.4に測定器を示す。出口状況は各管ごとに名称を付けた札を取り付け、写真撮影を行った。埋立層厚さに関してはGPSによる測定と公社職員から聞き取りを行った。ガス流れはガス抜き管出口で煙を発生させて流れを調べ、ガス流速、ガス温度はガス抜き管に測定器を差し込んで測定を行った。



図 4.4 測定器

(2) 発煙筒、トレーサー応答によるガス流れの測定

埋立地内のガス流れを明らかにするために、発煙筒による流れの可視化とトレーサー応答試験を行った。発煙筒は空気流入管から煙を流し、トレーサー応答試験はトレーサーガスとして一酸化炭素 (CO) を用い、GCO2008 を用いてガス流出管における CO 濃度の連続測定を行った。測定器と測定状況を図4.5、図4.6に示す。



図 4.5 CO 濃度測定器 (GCO2008)

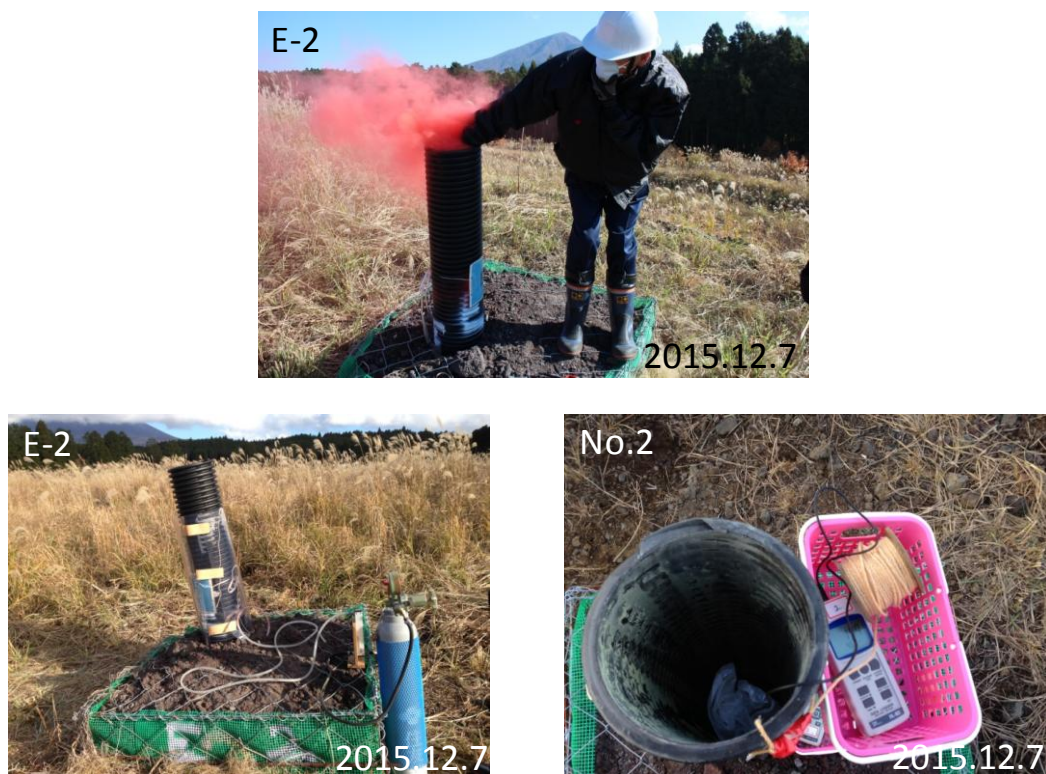


図 4.6 測定状況（発煙筒、トレーサー応答）

4.4 埋立地の構造およびガス抜き管の出口状況

(1) ガス抜き管配置と構造

図 4.7 に本埋立地の平面図と位置を示す。底部集排水管は図 4.7 の右から左に向かって設置され、集水ピットと接続されており、図 4.7 の上下方向に枝管がある。主管、枝管の径はそれぞれ 600mm、300mm である。主管上の堅型ガス抜き管に No.1～No.6、M1、枝管から立ち上げられたガス抜き管に方位を頭文字として W-1～W-5、E-1～E-5 と記号を付けた。M1 の径は 300mm、その他は 200mm である。

図 4.8 に集排水管主管方向 (A)、横方向 (B) の断面図を示す。管の横の数字はガス抜き管ごとの埋立層の厚さを示している。集排水管に直接接続しているのは M1 のみであり、他の管は直接接続されておらず、集排水管との間に割栗石がある。集排水管は埋立地内の集水ピットに接続され、集水ピット縦管からポンプで浸出水を汲み上げ、処理を行っている。集水ピット容量が 300m³、浸出水処理能力が 260m³/day である。降水量によっては埋立地内が滞水することがあり、調査日 (2015/12/7～8) にも滞水していた。

公社職員の聞き取りによると埋立途中に集排水管 (管径 15cm) を No.1～No.6 にかけて設置していたことがわかった。また、ガス抜き管のうち B-1～4、P-1～5 はかつて浸出水調整池が設けられており、嫌気性のメタンガスや硫化水素が常時発生している状態であった。B-1～4、P-1～5 は埋立途中に改善策として設置されたガス抜き管であり、B-1～4、P-1～5 それぞれが底部で連結した構造となっている。

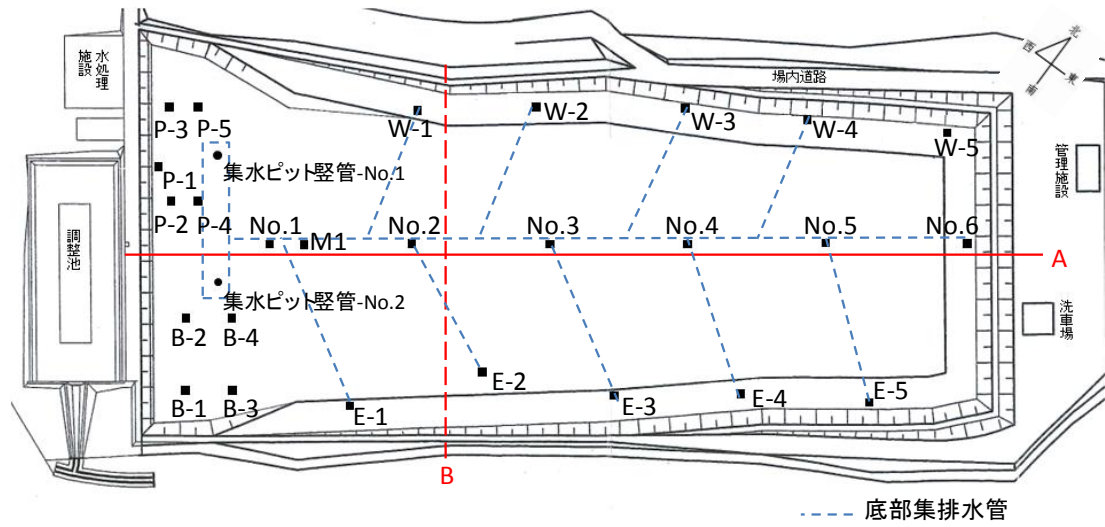


図 4.7 ガス抜き管配置図

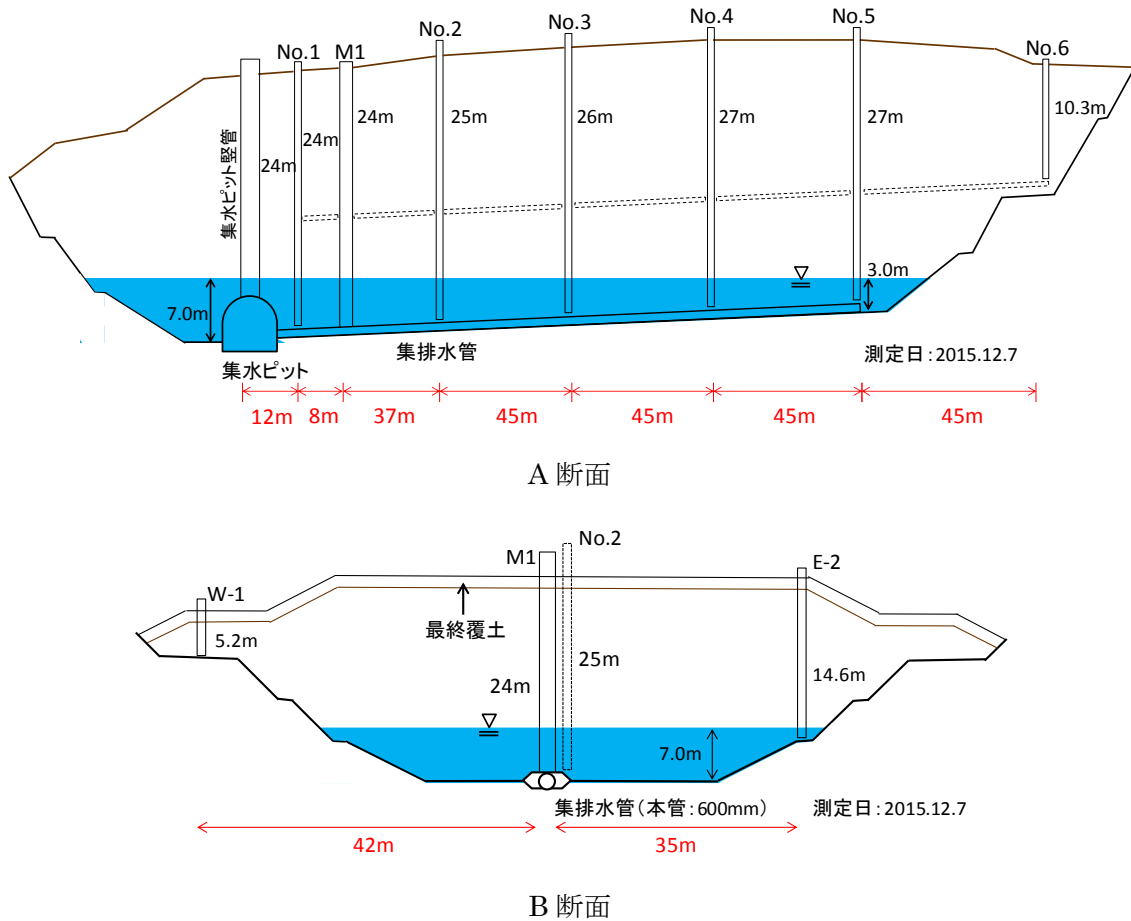


図 4.8 埋立地断面図

(2) ガス抜き管の出口状況

図 4.9 にガス抜き管の出口状況を示す。本埋立地ではすべてのガス抜き管の周りに割栗石が敷き詰められており、蓋やカバーなどはなく、出口は開放していた。M1、No.2、No.3 では水蒸気が流出していた。

次に図 4.10 にガス抜き管のガス組成を示す。一般的な大気中のガス組成は N_2 が 78.1%、 O_2 が 21.0%、Ar が 0.93%、 CO_2 が 0.035% であるが¹⁾、一部のガス抜き管 (No.5,E-5,W-3) では CO_2 および CH_4 濃度が高く、嫌気性分解が起こっていることを示している。

GA2000、GCO2008 の測定により、M1、No.2 では CO 濃度がそれぞれ 200ppm、400ppm であることが確認された。両管ともに、埋立地内で部分的に自然発火が起こり、不完全燃焼している可能性がある。CO は人体への影響も大きいので、作業には注意が必要である。



図 4.9 ガス抜き管の出口状況

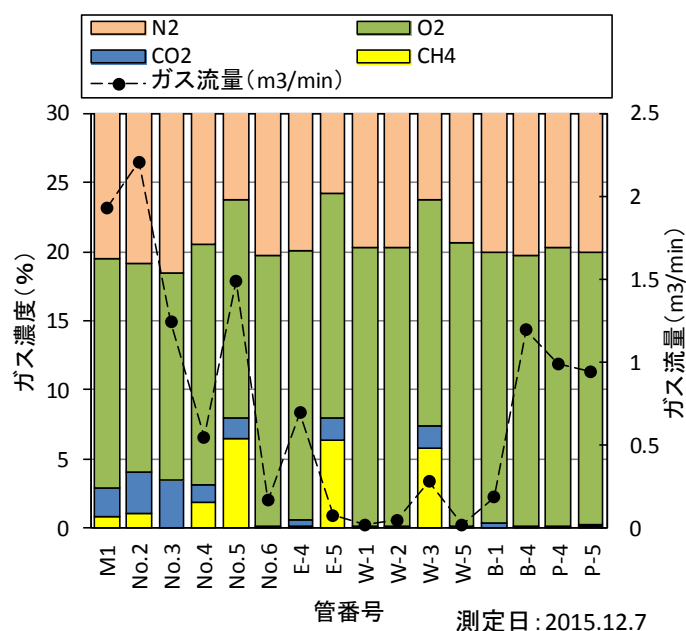


図 4.10 ガス抜き管のガス組成

4.5 ガス抜き管の流量

(1) 流量分布

1日目(2015/12/7)の調査では26本のすべてのガス抜き管で、ガス流れ方向、ガス流速、ガス温度、外気温の測定を行った。図4.11にガス抜き管の流量分布を示すが、11本のガス抜き管から空気が流入していた。4.4(1)に示したように、本埋立地底部は滞水のため、集排水管末端は水封状態にあるが、代わりに埋立地の周辺部から空気が流入し、中心部はガスが流出している。B,Pは互いに底部が連結し、独立したネットワークとなっているが、やはり周辺部から流入している。B,Pを除くとガス流出量は空気流入量の約4倍であり、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。

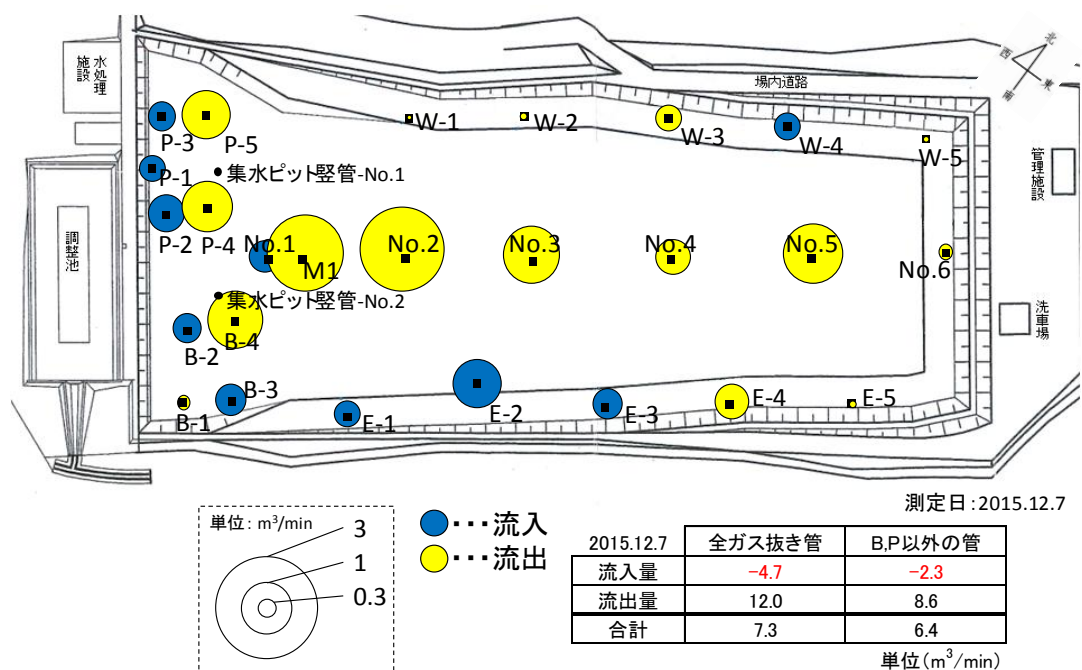


図 4.11 ガス抜き管の流量分布

(2) ガス流速(流量)とガス温度の関係

2日間(2015/12/7~8)のガス流出管におけるガス流量とガス温度の関係を図4.12に示す。測定本数は1日目が26本、2日目が14本と異なるが、ともにガス流量とガス温度には正の相関がある。この結果は、埋立地底部が滞水しており、健全な準好気性埋立ではなくても、ガス抜き管などの出口さえあればガスは流出し、空気流入を誘因することを示している。

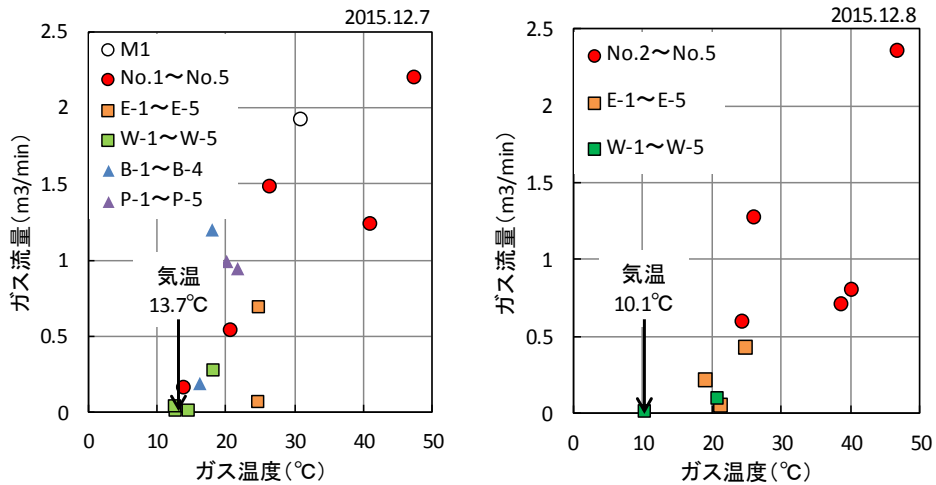


図 4.12 ガス流量とガス温度の関係

4.6 埋立地内のガス流れ測定

4.5 節 (1) に示すように、埋立地底部が滞水しているため集排水管末端からの空気流入の可能性はないが、一部のガス抜き管から空気が流入していることがわかった。そこで、埋立地内のガス流れ状況を知るために (1) 発煙筒による流れの可視化、(2) トレーサー応答実験を行った。図 4.11 に示すように、空気流入量が最も大きい E-2 で煙、トレーサーの注入を行った。

(1) 発煙筒による流れの可視化

図 4.13 に示すように、E-2 で注入した煙が No.2 で流出しており、十分目視できるほどの流出があった。発煙筒による実験は 2 回行い、No.2 で煙が流出するまでの時間はそれぞれ、175 秒、205 秒であった。底部集排水管を経由せず、E-2→廃棄物層→No.2 の経路でガスが流れていることが明らかとなった。

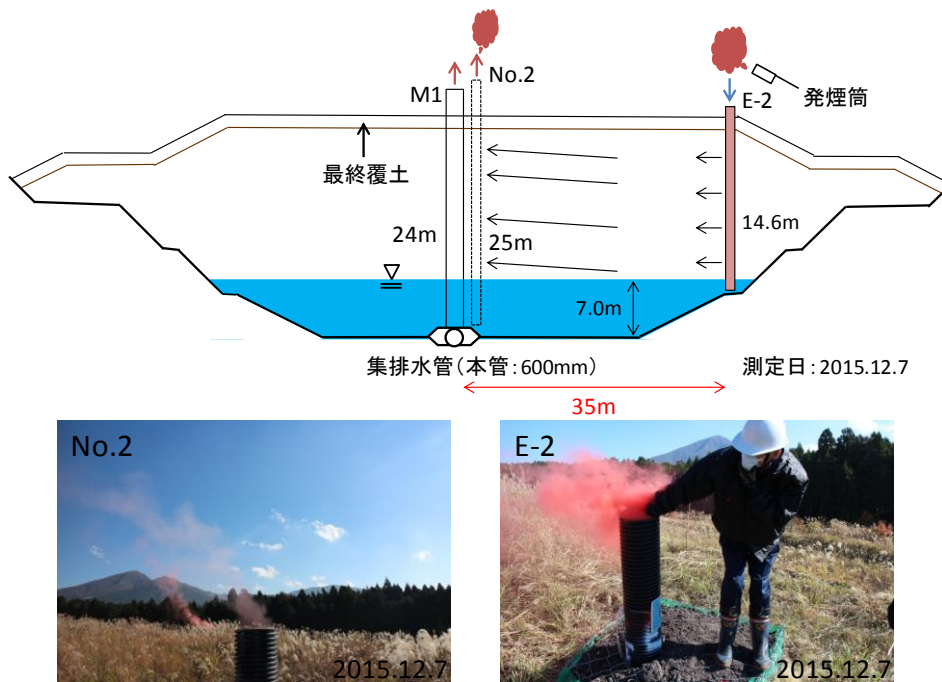


図 4.13 発煙筒による流れの可視化

(2) トレーサー応答

次にトレーサーガスとしてCO（濃度 100%）を用いて、トレーサー応答実験を行った。E-2 よりトレーサーガスを注入し、CO 濃度計を煙が流出した No.2 と E-2 から最も距離が近いガス流出管である No.3 に設置した。結果を図 4.14、図 4.15 に示す。トレーサー注入後、No.2 では約 40 秒で CO 濃度が急上昇し、その後は 200~300ppm 程度で上下に変動しながら推移した。一方、No.3 では CO 濃度の上昇は見られず、900ppm 前後の高い濃度で CO ガスが流出していることがわかった M1 に注入開始から約 32 分後に測定器設置を変更した。M1 では CO 濃度の上下の変動が No.2 よりも大きく、測定範囲（0~1100ppm）を超えることもあった。その後、注入開始 44.7 分後に CO 注入を停止したところ、いずれもすぐに低下しはじめ、No.2 では約 7 分、M1 では約 12 分かけて CO 濃度がもとのレベルに戻った。

他のガス抜き管でも CO 濃度の測定を行ったが、No.2、M1 以外の管で CO の流出は確認できなかった。トレーサーを注入する前の段階で No.2、M1 の CO 濃度はそれぞれ 130ppm、360ppm であった。

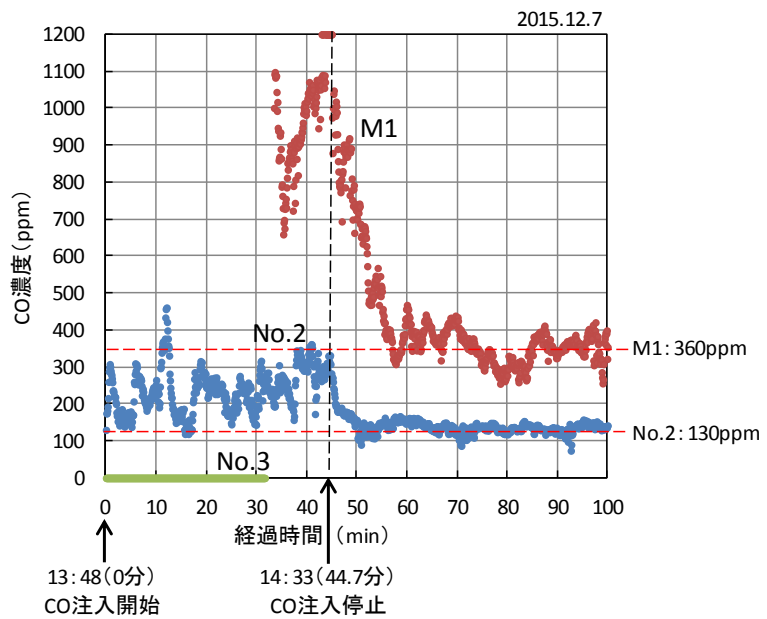


図 4.14 トレーサー応答試験結果

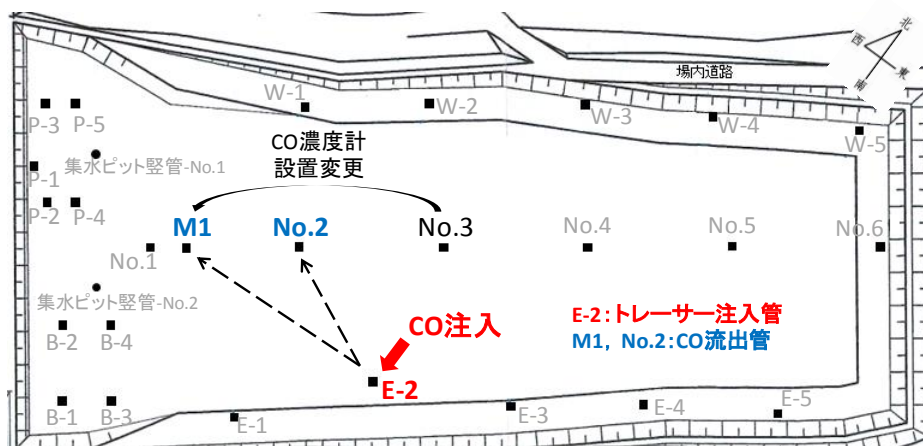


図 4.15 トレーサー注入管と CO 流出管の位置

次に図 4.16 に No.2、M1 における応答の滞留時間分布を示す。滞留時間分布は CO ガス注入を停止してから No.2 では7分後、M1 では12分後の CO 濃度を最終値としてまとめた。実際の CO 濃度は上下に大きく振れているが、減少していることからグラフ上で30秒間ごとの中間値を取り、赤線で表した。No.2、M1 ともに濃度が急激に減少しており、濃度の応答が早いことから廃棄物層内のガス流速は大きく、埋立地内の空隙率が大きいと考えられる。

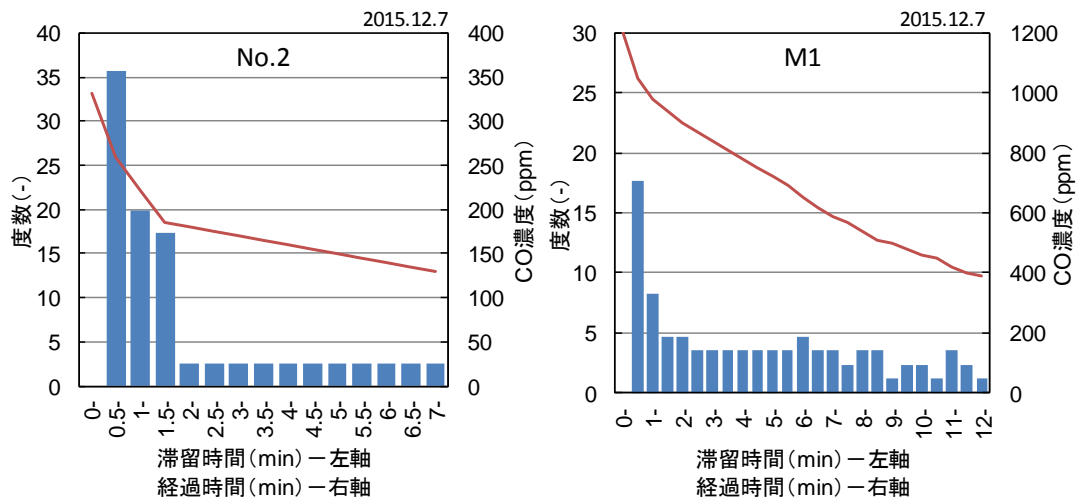


図 4.16 滞留時間分布 (No.2、M1)

4.7 ガス流れ変動

(1) ガス流速の変動

M1、No.2 のガス流出管、E2 の空気流入管で流速の連続測定を行った。結果を図 4.17 に示す。時間変動はガス流出管 (M1、No.2) で小さく、空気流入管 (E-2) で大きい。煙発生器で流線を調べたところ、空気流入管では横穴からの空気の流入があるため、内部で乱れが生じている。そこで地上部での空気の流入を防ぐために E-2 の周囲をカバーしたが、変動は大きいままであった。

一方、W-2 では1日目と2日目で流出→流入に変化していた。これは既往の研究²⁾でも確認されており、ガス抜き管における蓋やカバーの出口状況や雨水などの影響により、ガス流れのバランスが変化することが原因と考えられる。本埋立地では、E-2 では2日目の午前9時頃までは流入管であることを確認していたが、1時間後には流出管に変化していることが確認された(図 4-18)。ガス抜き管からの空気流入は不安定であり、短時間に変化することが明らかとなった。

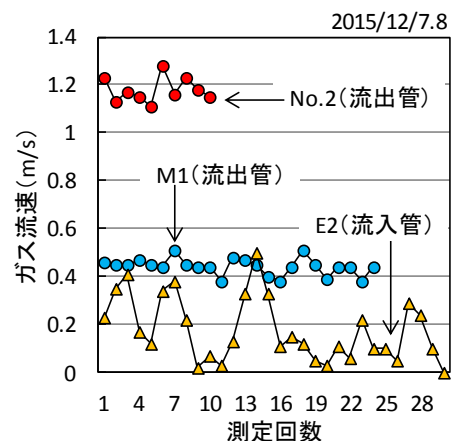


図 4.17 ガス流速の変動

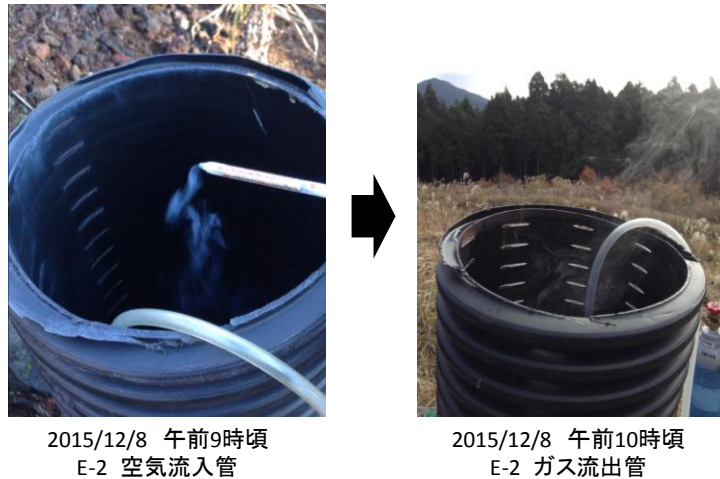


図 4.18 ガス流れの変化

(2) 温度の連続測定

流入した空気が廃棄物層を通過する際、内部温度まで暖められるため、外気温の影響を受けない。そこで、No.2、No.3、M1 でガス温度と外気温の連続測定を 12 月 7～8 日にかけて行った。測定にはデジタル温湿度計 CENTER MK Series (図 4.19) を用いた。結果を図 4.20 に示す。外気温が $-2^{\circ}\text{C}\sim 18^{\circ}\text{C}$ と変動が大きいのに対し、No.2 のガス温度の変動はほぼ一定であり、廃棄物層を通過した空気が流出していると言える。M1 は温度の変動が見られる。これは直近の No.1 が空気流入管であり、空気が完全に暖められずに M1 から流出している可能性がある。一方、No.3 のガス温度は細かく変動している。4.5 (3) に示す 2 日間のガス流速の調査で、No.3 では $0.38\sim 0.66\text{m/s}$ と変動が大きいことがガス温度の変動に影響している可能性がある。



図 4.19 デジタル温湿度計 (CENTER314 MK Series)

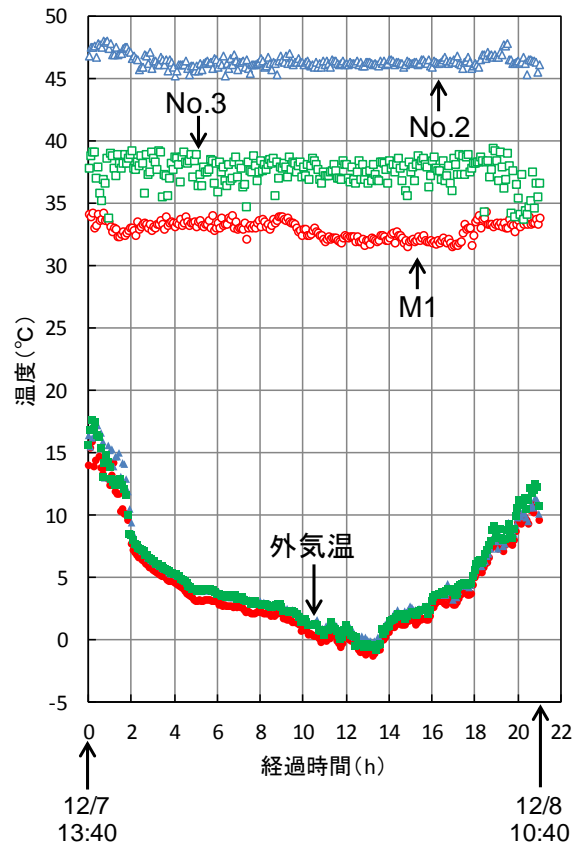


図 4.20 温度の連続測定 (No.2、No.3、M1)

参考文献

- 1) JIS0201 (ISO 2533) : 標準空気、p.4 (1990)
(<http://kikakurui.com/w/W0201-1990-01.html>) (閲覧日：平成 28 年 1 月 22 日)
- 2) 山田修平：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 北海道
大学卒業論文 (平成 25 年度)

第5章 まとめ

5.1 現在の準好気性埋立構造が誕生するまで

1966年頃から福岡大学、花嶋正孝らによって好気性埋立に関する研究が行われるようになった。1973年、福岡市の久山埋立場において現地スケール（40m×40m×5m）の実験槽（図5.1）を用い、空気をブローで強制通気することによる生ごみ主体廃棄物の早期分解と浸出水の水質浄化ならびに浸出水量の把握を目的とした実験が行われた。実験により、「嫌気性埋立と比べて好気性埋立は早期安定化につながるが、建設費や維持管理費を考慮すると実用化は不可能」という結果を得たが、このとき、嫌気性埋立に集排水管を設置した構造の実験槽の浸出水が他の嫌気性埋立実験槽よりも遥かに良質に推移していた。この結果より、集排水管末端が常に開放されていれば、埋立槽内の微生物の発酵熱や対流によって外気が集排水管を通じて埋立槽内に自然流入すると考えられ、準好気性埋立の基本概念が確立し、1975年に新蒲田埋立場で日本初となる準好気性埋立場が実用化された（図5.2）。



図 5.1 久山埋立場における現場実験¹⁾



図 5.2 日本初の準好気性埋立構造（新蒲田埋立場）¹⁾

上記に示すように、当初の準好気性埋立にはガス抜き管は存在していなかった。日本の経済成長とともにごみの発生量が増加し、埋立地の大型化が進行した。その結果、埋立地には廃棄物が連続的に積み上げられることによる圧密沈下によって、埋立地内の透気係数は小さくなり空気の流入量も減少してしまった。とくに埋立層が厚くなると下層部が圧縮されて廃棄物の単位体積重量が増加し、集排水管から空気が流入しにくくなる状況となる。そのため、埋立層が厚いときには集排水管だけではなく法面に蛇かごなどを設置し、埋立層内の好気領域をできる限り増加させることが埋立地内の微生物分解活性を高める工学的な手法と考えられた。結果的に集排水管を鉛直方向へ延長し、壱型集排水管と呼ばれるようになった。これが現在、通気およびガス排除の機能を併せて持つことから壱型ガス抜き管とも呼ばれている。（図5.3）。

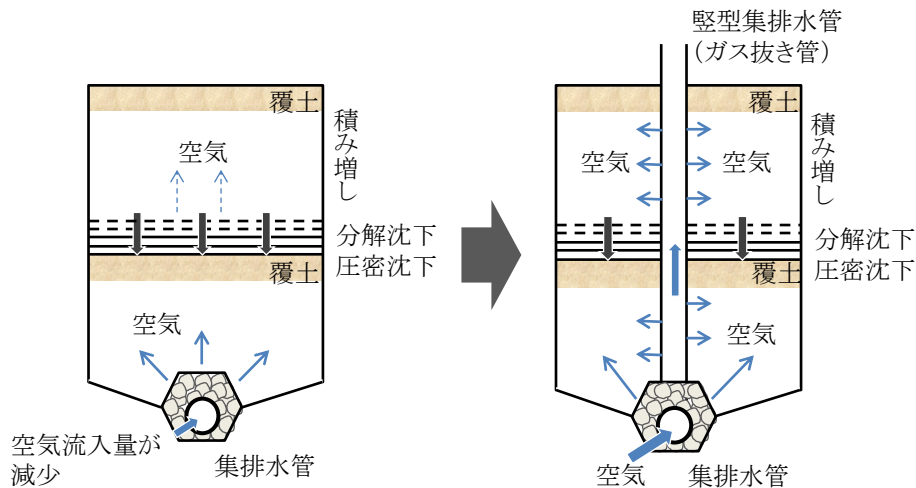


図 5.3 準好気性埋立のガス抜き管導入までの流れ

5.2 集排水管、ガス抜き管、覆土状況による埋立地内空気流動

本研究の結果、準好気性埋立の空気流動は以下のようなと考えられる。

好気性による発熱が浮力を生み、廃棄物層内の空気を上方へ移動させようとする。ガス抜き管はその出口となり、底部集排水管から、あるいは集排水管がなければ他のガス抜き管、埋立地斜面から空気が流入する。この過程で空気は廃棄物層内を通過するため、準好気性埋立は廃棄物層に対してエアレーション効果を持つ。

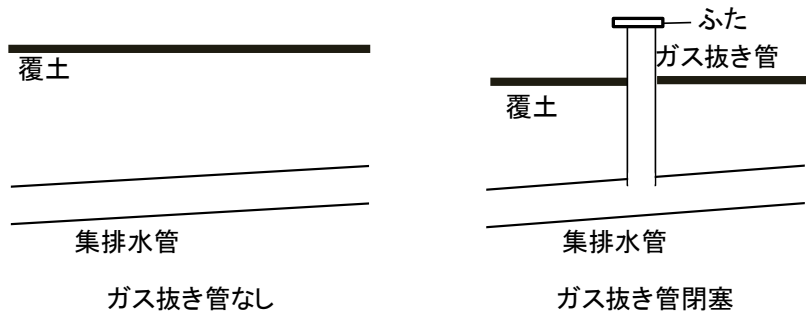
したがって、ガスが流出するための出口の有無が最も重要となる。空気の入口・出口は集排水管、ガス抜き管、覆土の状況により、図 5.4 に示すような場合が考えられる。ただし、埋立地内に分解可能な有機物があり、覆土がある場合を考える。

図 5.4 (a) は出口がない場合である。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暖められた空気の出口がない。

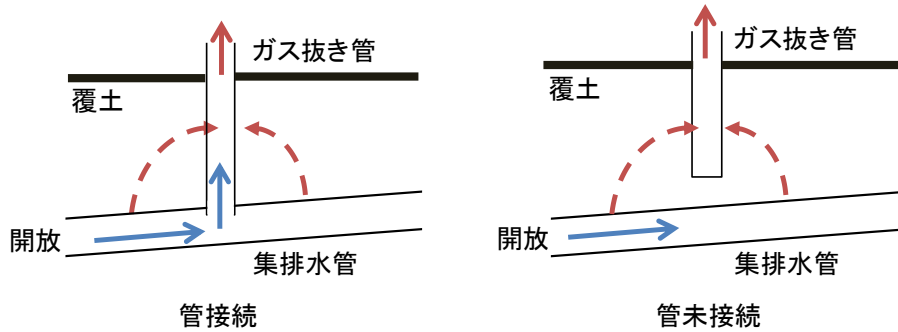
上部を開放したガス抜き管があると、それが出口となる。空気の入口は底部集排水管の状況により、2 つに分けられる。図 5.4 (b) のように、集排水管末端が開放されていると安定的な空気供給口となる。浮力により、空気は上昇するため底部集排水管からの空気供給が最も良く、これは理想的な構造と言える。ガス抜き管との接続の有無は底部への空気供給が集排水管の主たる役割のため、効果に大きな差はない。

一方、図 5.4 (c) のように集排水管出口が閉そくしている場合は、集排水管の代わりにガス抜き管、埋立地斜面から空気が流入する。図 5.4 (b) と同様、底部集排水管を通して空気が供給されるが、ガス抜き管からの吸い込みが不安定となる。滞水していると水平方向へのガス移動となり、下部からの場合と比べて浮力は働きにくいと思われる。以上より、埋立地への空気供給は①底部集排水管で起こり、埋立地底部が滞水または集排水管末端が閉塞している場合は②ガス抜き管、③埋立地斜面から起こると考えられる (図 5.5)。

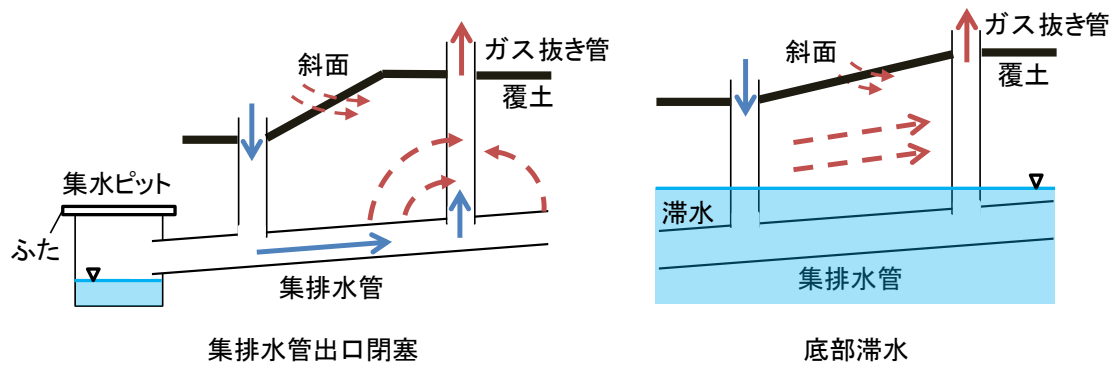
覆土がない場合では堆肥化と同様に表面からガスが流出するためエアレーション効果がある (図 5.6)。そのため、即日覆土をせずに一定期間置いておくことが良いと考えられる。



(a) 出口なし



(b) 底部開放



(c) 底部滞水、集排水管出口閉そく

- 外気
- 暖められた空気
- - - 廃棄物層内を通過する空気

図 5.4 集排水管、ガス抜き管、覆土の状況による空気流動

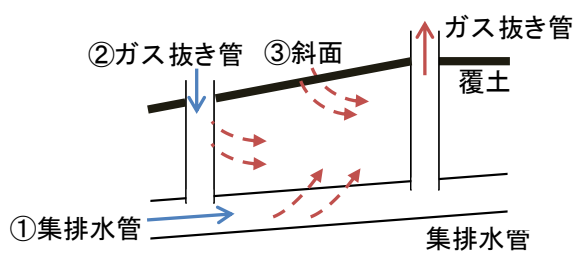


図 5.5 埋立地への空気供給

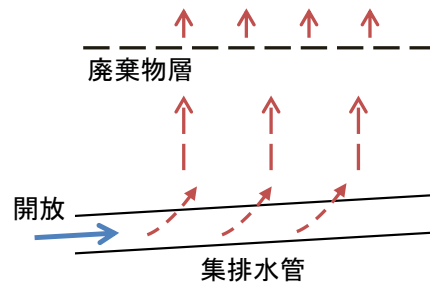


図 5.6 覆土がない場合の空気流動

5.3 適切な維持管理方法の提案

(1) 埋立構造の把握

準好気性埋立は、集排水管の末端が開放されていることによって空気が埋立地内に流入し、後期的領域を増やすために堅型ガス抜き管と接続する構造とされてきた。しかし、空気がどのように流入するかについては定量的な知見がなかった。

本研究によって得られた空気流動メカニズムについては 5.2 節で述べたが、再度要点をまとめると、「空気の出口としてのガス抜き管が必須であり、浮力によって外部から空気が吸引される、また集排水管が効果的だが水没していたとしても周辺のガス抜き管や斜面から空気が流入する」ということである。近年、集排水管末端が水没している埋立地が多いことが環境省の調査などようやく知られるようになったが、ガス抜き管が適正であれば空気がどこからか流入して埋立地内部をエアレーションしてくれるのである。

埋立地は、ほぼすべてが独自の構造となっている。設計時点の図面はあっても、ガス抜き管の設置個所、集排水管とガス抜き管の接続の状況は明示的ではないし、埋め立て後のガス抜き管設置、横引きの集排水管の存在などの埋立途中での変更は、職員が異動してしまうとわからなくなってしまう。さらには、廃棄物の埋め立て状況は埋立地内の安定化進行に大きくかかわるが、廃棄物の埋め立て時期と位置、覆土の状況までを記録しているところは少ない。図 4.7、図 4.8 のガス抜き管配置図および断面図、あるいは三次元的な施設図を埋立地の構造、埋立状況などの総合情報とし、埋立地内でどのような現象が起こっているかを理解し、準好気性ガス温度・流量、浸出水量・濃度などと合わせて、埋立地管理を行う必要がある⁴⁾。

(2) 埋立地内部状況の診断およびモニタリング方法

廃棄物最終処分場廃止基準において、温度に関する基準では「埋立地内部と周辺の地中の温度の差が摂氏 20 度未満であること」、ガス発生に関する基準では「埋立地からガスの発生がほとんど認められないこと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こと」とされている⁵⁾。3.5 節 (2) に示すように、ガス抜き管の経年的なモニタリングは埋立地内の状況を把握することができ、安定化の指標となる。ただし、ガスの出口がなければ埋立地内に空気が流入せず、ガス発生も温度上昇も見られないため、上記(1)の構造が十分であることが前提である。

モニタリングの例を表 5.1、図 5.7 に示す。ガス流速、外気温、ガス温度を測定すればよいが、ガス温度と流速には相関があるので、流速測定は必須ではない。表 5.2 は測定頻度を季節の変化がわかるように最低 1 回/3 ヶ月としているが、気温の低い冬季は温度差、流速とも大きいので、冬季のみの測定でも十分有用なデータとなる。またどのような廃棄物をいつ、どこに、どれだけ埋め立てたかを記録し、ガス抜き管と対応させると、部分的な安定化の進行を把握できる。

表 5.1 ガス流速、外気温、ガス温度 (モニタリング例)

		2010年				2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	
		春	夏	秋	冬	冬	冬	冬	冬	冬	
ガス流速	No.1	1.5	1.5	1.4	1.3	1.2	1	0.8	0.5	0.3	
	No.2	1	1.2	1.2	1.3	1	1	1.1	0.8	0.5	
	No.3	0.05	0.06	0.06	0.08	0.08	0.06	0.05	0.05	0.03	
	No.4	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	
(単位: m/s)											
外気温		10	25	18	5	5	6	3	5	4	
ガス温度	No.1	45	40	42	47	40	25	22	20	10	
	No.2	40	35	30	32	25	15	13	8	5	
	No.3	20	30	25	15	15	12	10	10	6	
	No.4	10	25	18	5	5	6	3	5	4	
(単位: °C)											

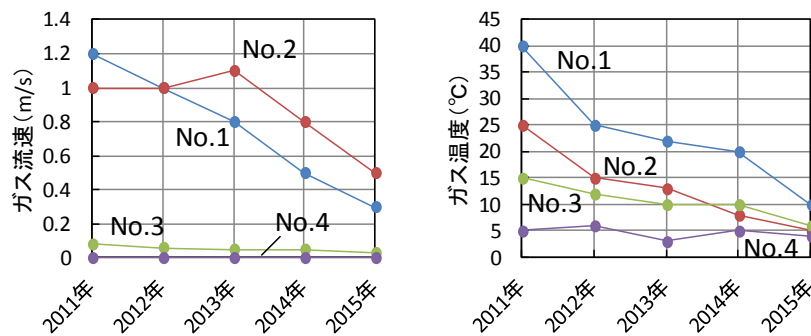


図 5.7 ガス流速およびガス温度の経年変化 (モニタリング例)

参考文献

- 1) 真次 寛：準好気性埋立構造の廃棄物埋立地における生ごみ由来の浸出水量の予測手法に関する研究、福岡大学博士学位論文、pp.152-160 (2014)
- 2) 松藤康司：準好気性埋立物語、月間「水」、1,2月号、pp.21-75 (1998年)
- 3) 社団法人全国産業廃棄物連合会：産業廃棄物最終処分場維持管理マニュアル 環境に安全な最終処分場の運営のために、p.132 (2006)
- 4) 廃棄物学会廃棄物埋立処理処分研究部会：廃棄物最終処分場廃止基準の調査評価方法、pp.28-39 (平成 14年)

謝辞

本研究において、第3章、第4章の調査にあたっては公益社団法人全国産業廃棄物連合会を通じて、多くの方々のご協力を得た。深く感謝いたします。

付録

A. アンケート回答用紙および依頼状.....	ii
B. 分析対象外施設	viii
C. 埋立ガス測定値	ix

管理型埋立地における維持管理に関する アンケート調査についてのお願い

拝啓 平素は格別のご高配を賜り、厚く御礼申し上げます。

当研究室では、かねてより最終処分場に関する研究を行っております。処分場の中でも、準好気性埋立構造は日本において標準的な構造とされ、廃棄物の安定化を促進すると考えられています。空気がどのように埋立地内に供給されるかについては、これまで知見がありませんでしたが、一昨年度ある産業廃棄物埋立地における現地調査（別紙に概要を示しています）により以下のような結論を得ました。

- 1)集排水管末端から流入した空気が、廃棄物層内を通過したのちガス抜き管に集められる。
- 2)空気の流れは浮力によって起こり、温度が高いほど、ガス抜き管から流出するガス流速が大きくなる。

このことから、ガス抜き管出口の温度と流速を測定することで、準好気性埋立地として働いているかどうかを調べることができます。

昨年度は、自治体が保有する一般廃棄物埋立地を対象として調査を行いました。準好気性としての機能を発揮できている処分場は少ないことがわかりました。本年度は対象を産業廃棄物埋立地とし、同様の調査を実施したいと考えております。そこで全国産業廃棄物連合会のご協力をいただき、管理型最終処分業者リストを作成し、本アンケートを送付することになりました。

つきましては調査の趣旨をご理解頂き、アンケートへのご回答をよろしくお願い致します。複数の施設をお持ちの場合は、施設ごとにご回答ください。また、用紙が不足した場合はコピーをお願い致します。ご多用中大変恐縮ですが、アンケート回収期限は**8月31日**と致します。ご不明な点などありましたら、お手数ですが下記のメールアドレスまでご連絡お願い致します。

なお、いただいたデータは研究以外に用いることはいたしません。結果は全国産業廃棄物連合会に報告するとともに、回答をいただいた方へもお知らせします。

敬具

北海道大学大学院工学研究院 環境創生工学部門
廃棄物処分工学研究室 教授 松藤敏彦
(現廃棄物資源循環学会長、埋立処分研究部会長、産廃研究部会長)

問い合わせ先

廃棄物処分工学研究室 山田修平（修論学生）

Tel. 011-706-6829（研究室） E-mail : yamada@wdlms2-sw.eng.hokudai.ac.jp

一昨年度に実施した研究の概要

民間の産業廃棄物埋立地において現地調査を行い、すべてのガス抜き管において、出口の流量と温度を測定しました。その結果、図1のように、「気温を基準とし、ガス温度とガス流量には直線的な相関がある」ことが明らかとなりました。また、別の方法によって、外部から流入した空気が廃棄物層を通過してガス抜き管に集まることが確認されました。

従来、空気はガス抜き管から廃棄物層へ供給されると考えられていました(図2(a))。しかし一昨年度の研究より、集排水管から廃棄物層を通過してガス抜き管に集められる(図2(b))と考えることができます。

したがって、ガス抜き管出口の温度と流速を測定し、図1のような結果が見られるならば、準好気性構造の機能が十分発揮されていると考えられます。また流速が測定されていなくても、ガス温度、ガス濃度の結果からも以下のような推定を行うことができます。

- 1) ガス温度 → 気温と比べて高ければ、浮力が働いている。
 - 2) ガス濃度 → ガス組成が空気に近いならば、大量の空気が埋立地内に供給されている。
- どちらも、埋立地内を空気が流れ、ガス抜き管に集まっていると考えられます。

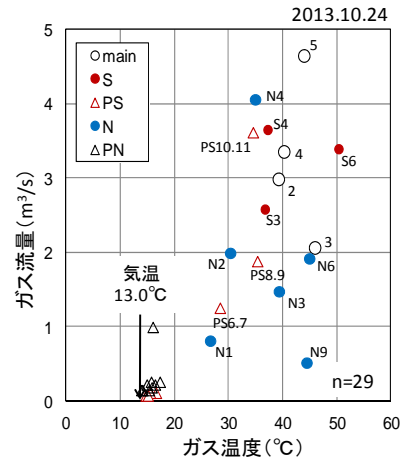


図1 管出口の温度と流量の関係

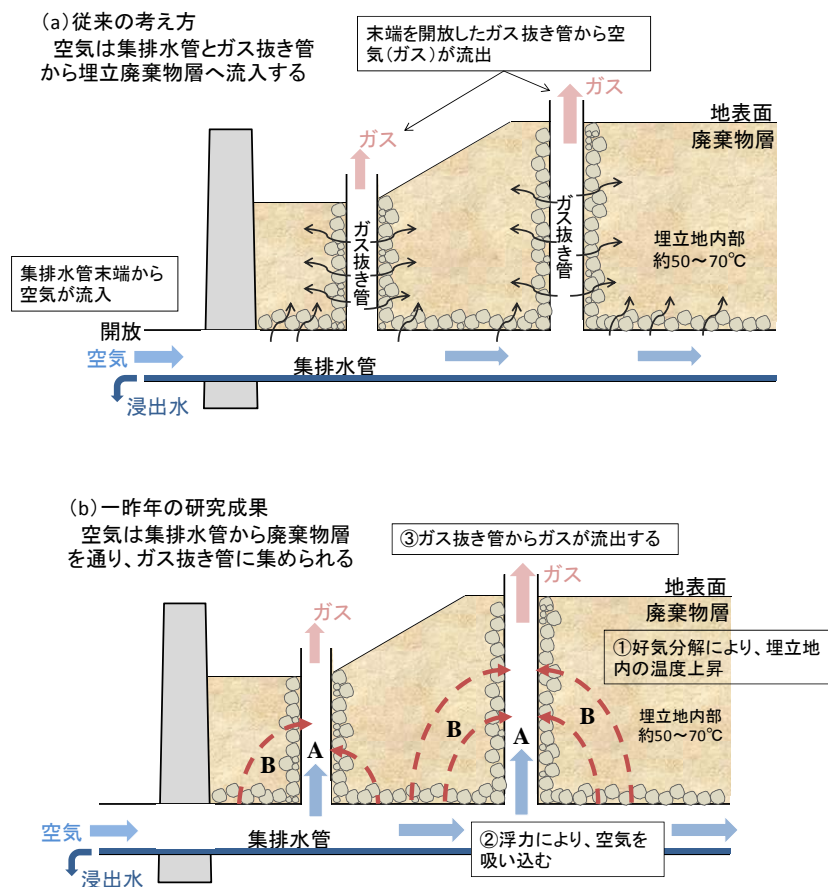


図2 集排水管から供給された空気の流れ

アンケート回答用紙

会社名	
処分場の正式名称	
設置場所（住所）	
埋立構造	1. 準好気性埋立構造※ 2. 嫌気性埋立構造 3. その他（ ）

※浸出水集排水管とガス抜き管の末端が常時開放した構造。

設問1 最終処分場の基礎データについて

(1) 処分場の概要

稼働状況	1. 埋立前	2. 供用中	3. 埋立処分終了
供用期間	S・H	年 ～	S・H 年
立地条件	1. 山間	2. 平地	3. 陸水面 4. 海面
埋立面積	m ² （用地面積ではなく埋立面積を記入）		
埋立容量（計画）	m ³		
埋立層の厚さ	現在：	m	最終計画： m

(2) 埋立物について

平成26年度、1年間の埋立量（実績）を記入してください。

※埋立処分終了の場合は最終年度、1年間の埋立量（実績）を記入してください。

種類	埋立量	種類	埋立量
①燃え殻	t	⑤がれき類	t
②汚泥	t	⑥木くず	t
③ガラスくず及び陶磁器くず	t	⑦廃石膏ボード等	t
④廃プラスチック類	t	⑧その他（ ）	t
		計	t

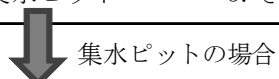
設問2 浸出水集排水設備について

(1) 浸出水集排水管の直径

本管（幹線）	mm	枝管（支線）	mm
--------	----	--------	----

(2) 浸出水はまず、どこに集められますか。

1. 浸出水調整池	2. 集水ピット	3. その他（ ）
-----------	----------	--------------------------------



1. 蓋やカバーなどがなく 開放している。	2. 蓋やカバーなどをして いる（密閉状態）	3. その他（ ）
--------------------------	---------------------------	--------------------------------

(3) 浸出水集排水管（本管）出口の状態

1. 水没なし	2. ときどき水没	3. いつも水没
---------	-----------	----------

(4) 浸出水集排水管出口から空気が流入していますか。

1. 流入している	2. 流入していない	3. わからない
-----------	------------	----------

(5) 浸出水集排水管出口で流速測定を行ったことはありますか。

1. 測定したことがある	→	データ提供可否	ア. 可	イ. 否
2. 測定したことがない				

設問3 ガス抜き管について

(1) 本数、管径等について

	縦型ガス抜き管	法面ガス抜き管
1) 本数	本	本
2) 管径	mm	mm
3) 孔の径	mm	mm
4) 管の材質	1. 塩ビ管 2. ヒューム管 3. ポリエチレン管 4. その他（ ）	1. 塩ビ管 2. ヒューム管 3. ポリエチレン管 4. その他（ ）

(2) 竪型ガス抜き管の状況についてお答えください。

1) 管の上にカバーや蓋をしているものはありますか。

1. なし	2. ある (全ガス抜き管の %程度)	3. わからない
-------	---------------------	----------



以下の質問にお答えください

a.穴なし	b.穴あき	c.粗い網	d.細かい網	e.その他※

※図示してください

2) 現在、管からガスは出ていますか。

1. 出ている (全ガス抜き管の %程度)	2. 出していない	3. わからない
-----------------------	-----------	----------



ガスが出ていると判断した理由に○をつけてください。(複数選択可)

a. 測定を行っている
b. 手をかざすと流れを感じる
c. 陽炎 (かげろう) が見える
d. その他 ()

3) 測定について

①ガス流速の測定を行っていますか。

1. 行っている	→	データ提供可否	ア.可	イ.否
2. 行っていない				

②ガス組成の測定は行っていますか。

1. 行っている	→	測定しているガスに○をつけてください。(複数選択可)		
2. 行っていない		メタンガス(CH ₄)	可燃性ガス	酸素(O ₂)
		二酸化炭素(CO ₂)	硫化水素(H ₂ S)	
		データ提供可否	ア.可	イ.否

③ガス抜き管出口温度の測定は行っていますか。

1. 行っている	→	データ提供可否	ア.可	イ.否
2. 行っていない				

(3) 浸出水集排水管とガス抜き管の接続状況についてお答えください。

1. 全て接続されている	2. 未接続がある (%)	3. 全て接続されていない
--------------	-------------------------	---------------

設問4 実測協力の可否

測定機材(スモークテスター(煙発生器)、風速計)を貴施設に送付し、測定項目(風向、ガス流速、ガス温度)を測定後、機材を返却して頂くという形で行いたいと考えております。

実測協力の可否

ア. 可	イ. 否
------	------

最後にご回答いただいた方のお名前、連絡先等の記入をお願いします。

お名前：	
所属：	
電話番号：	メールアドレス：

2015年8月31日までにご回答ください。

※メールでご回答を頂ける方、ご質問がある方は下記の連絡先まで、ご連絡ください。

お問合せ・返送先

〒060-8628

札幌市北区北13条西8丁目

北海道大学大学院工学院 廃棄物処分工学研究室

山田修平(修論学生)

Tel. 011-706-6829(研究室) 090-9756-1524(携帯)

E-mail: yamada@wdlms2-sw.eng.hokudai.ac.jp

アンケートにご協力いただき、ありがとうございました。

B. 分析対象外施設

No.	備考
68	2015年8月現在、処分場を所有していない
86	2015年8月現在、処分場を所有していない
79	安定型処分場
88	安定型処分場
69	水面埋立地
71	海面処分場
136-1	海面処分場
136-2	海面処分場
138	海面処分場
146	海面処分場
13	無機物主体の埋立地のため、ガス抜き管なし
109-2	無機物主体の埋立地のため、ガス抜き管なし
113	無機物主体の埋立地のため、ガス抜き管なし
137	無機物主体の埋立地のため、ガス抜き管なし

C. 埋立ガス測定値

測定日: 2015.12.7 (9:18~10:53)

管番号	管径 (m)	出口温度 (°C)	平均流速 (m/s)	出口流量 (m3/min)	GA2000							GCO2008		埋立高さ (m)	測定回数
					CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	N2 (%)	CO (ppm)	H2S (ppm)	H2 (ppm)	CO (ppm)			
M1	0.3	30.7	0.46	1.93	0.8	2.1	16.6	80.5	360	370	LOW	380	24	n=2	
No.1	0.2	12.4	0.28	0.53	0	0.1	19.2	80.7	160	0	LOW	150	24	n=1	
No.2	0.2	47.2	1.17	2.21	1.1	3	15	80.7	0	0	LOW	0	25	n=2	
No.3	0.2	40.8	0.66	1.24	0	3.5	15	82	0	0	LOW	0	26	n=1	
No.4	0.2	20.5	0.29	0.55	1.9	1.2	17.4	80.2	0	0	LOW	0	27	n=1	
No.5	0.2	26.2	0.79	1.49	6.5	1.5	15.8	76.6	0	0	LOW	0	27	n=1	
No.6	0.2	13.7	0.09	0.17	0	0.1	19.6	80.3	0	0	LOW	0	10.3	n=1	
E-1	0.2	16.3	0.13	0.25	0.1	0	20	79.9	0	0	LOW	0	4.2	n=3	
E-2	0.2	14.7	0.47	0.89	0	0	20.2	79.7	0	0	LOW	0	14.6	n=3	
E-3	0.2	15	0.18	0.34	0.1	0	20.2	79.7	0	0	LOW	0	7.7	n=3	
E-4	0.2	24.6	0.37	0.70	0.1	0.5	19.5	79.8	0	0	LOW	0	9.4	n=2	
E-5	0.2	24.5	0.04	0.08	6.4	1.6	16.2	76	0	0	LOW	0	9.2	n=1	
W-1	0.2	12.5	0.01	0.02	0.1	0	20.2	79.7	0	0	LOW	0	5.2	n=2	
W-2	0.2	12.4	0.03	0.05	0.1	0	20.2	79.7	0	0	LOW	0	6.7	n=2	
W-3	0.2	18	0.15	0.28	5.8	1.6	16.4	77.5	0	0	LOW	0	5.2	n=2	
W-4	0.2	13.2	0.14	0.26	0.1	0	20.6	79.3	0	0	LOW	0	9.6	n=3	
W-5	0.2	14.4	0.01	0.02	0.1	0	20.6	79.3	0	0	LOW	0	9.5	n=2	
B-1	0.2	16.2	0.1	0.19	0	0.4	19.5	80.1	0	0	LOW	0	10.4	n=1	
B-2	0.2	13.2	0.22	0.41	0	0.1	19.9	80	0	0	LOW	0	11	n=1	
B-3	0.2	9.5	0.32	0.60	0	0.1	19.7	80.2	0	0	LOW	0	13.3	n=2	
B-4	0.2	18	0.64	1.20	0	0.1	19.6	80.3	0	1	LOW	0	12.5	n=2	
P-1	0.2	15.6	0.14	0.26	0	0	19.8	80.2	0	0	LOW	0	6	n=2	
P-2	0.2	12.3	0.42	0.79	0	0.1	20.1	79.8	0	0	LOW	0	7.7	n=3	
P-3	0.2	15.2	0.2	0.37	0	0.1	20.2	79.7	0	0	LOW	0	7.5	n=2	
P-4	0.2	20.1	0.53	0.99	0	0.1	20.2	79.7	0	0	LOW	0	10	n=2	
P-5	0.2	21.7	0.5	0.94	0.1	0.2	19.6	80.1	0	0	LOW	0	9	n=2	

測定日: 2015.12.8 (9:54~10:38)

管番号	管径 (m)	出口温度 (°C)	平均流速 (m/s)
No.2	0.2	46.6	1.26
No.3	0.2	40	0.38
No.4	0.2	24.2	0.32
No.5	0.2	25.9	0.68
E-1	0.2	9.8	0.03
E-2	0.2	18.9	0.27
E-3	0.2	9.8	0.17
E-4	0.2	24.7	0.23
E-5	0.2	21.1	0.03
W-1	0.2		0.04
W-2	0.2	10.8	0.1
W-3	0.2	20.6	0.06
W-4	0.2	11.2	0.17
W-5	0.2	10.1	0.01

測定機器

温度: ThermoPORT TP-100mR

流速: Kanomax6531

組成: GA2000、GCO2008

埋立高さ: GPS

