

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

平成 26 年 3 月 31 日

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

目次

第1章	はじめに	3
1.1	研究背景	3
1.2	既往の研究	7
1.3	研究目的	8
第2章	調査対象埋立地および調査方法	9
2.1	埋立地概要	9
2.2	埋立状況	9
2.3	調査方法	11
第3章	ガス抜き管の流量	14
3.1	ガス抜き管の出口状況	14
3.2	流量測定	19
3.3	ガス温度とガス流速（流量）の関係	25
3.4	各月ごとのガス温度とガス流速（2010年～2012年）	27
3.5	予想されるガス流れのメカニズム	30
3.6	ガス流速の時間変動	31
第4章	埋立地内ガス流れの直接測定	34
4.1	トレーサー応答試験	34
4.2	埋立地内のガス流れ調査	36
4.2.1	予備実験	36
4.2.2	本実験	38
4.3	温度の連続測定	43
4.4	№2と№3のCO濃度の関係	45
第5章	まとめ	46
5.1	準好気性埋立の歴史 ^{8) 9) 10) 11) 12)} を要約	46
5.1.1	準好気性埋立構造が誕生するまで	46
5.1.2	どのようにしてガス抜き管が導入されたか	49
5.2	本研究のまとめ	50
	参考文献	51

第1章 はじめに

1.1 研究背景

管理型最終処分場の果たすべき役割は、環境に悪影響を及ぼす可能性のある廃棄物を安全に、かつ早期に安定化することである。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ることのない状態になることである。安定化に長い年月を要してしまうとその分だけ環境に対するリスクや維持管理費が莫大なものになってしまう。そのためにも早期安定化は必要不可欠である。

(1) 埋立構造

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種類に分類することができる。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。

「嫌気性埋立構造」は有機物を多く含む廃棄物を埋め立て、メタンなどのガスを回収利用する場合に用いられ、欧米で多く用いられている。埋立地を覆土や人工的なシール工法により内部を嫌気状態にし、メタンバクテリアの繁殖を促す。これらから発生するガスは $\text{CO}_2 : \text{CH}_4 = 1 : 1$ で存在する。嫌気性により発生するメタンガスは地球温暖化の大きな原因になってしまうため、規模の大きな埋立地ではガス中の余分な腐食性物質を取り除くことで発電をするための燃料として利用する。また小規模の埋立地ではメタンガスを燃料とするほど多く回収できないため、燃焼装置をつけて燃やすことで地球温暖化ガスの低減や臭気対策を行っている。また埋立地内の浸出水が排出されないことから、廃棄物が常に水浸しの状態となってしまう、有機物の分解が遅く埋立地の安定化に長い年月が必要になってしまうという欠点がある。図1-1は嫌気性埋立でのメタンガス回収の様子を表している。各ガス抜き管から発生したメタンガスは1箇所を集められ、エネルギーとして利用される。

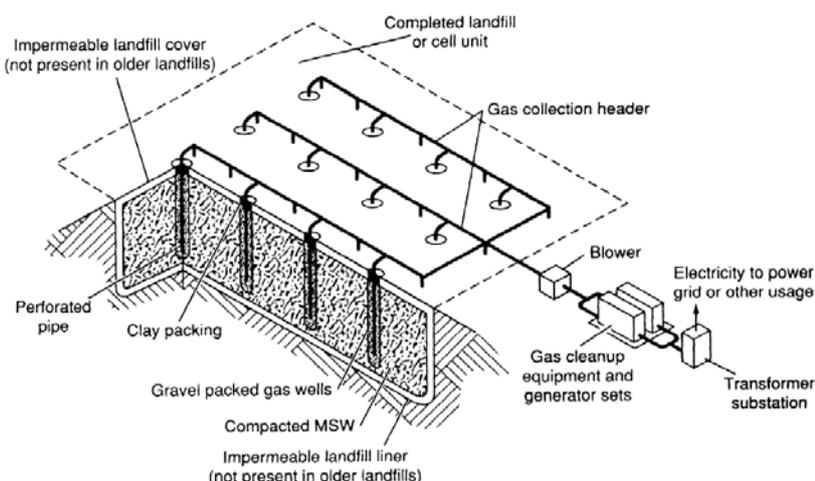


図 1-1 嫌気性埋立におけるメタンガス回収例¹⁾

「好気性埋立構造」では送風機などで空気を強制通気するため、多大なコストがかかってしまう。実埋立地としてはほとんど存在しない。しかしながら、EU などでは古い埋立地を早期安定化するためにガス抜き管を設置し、送気やガスの吸引を行うという好気化の動きもある。「準好気性埋立構造」は日本の福岡で初めて実用化された埋立構造であり、日本の標準的な埋立構造となっている。「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。

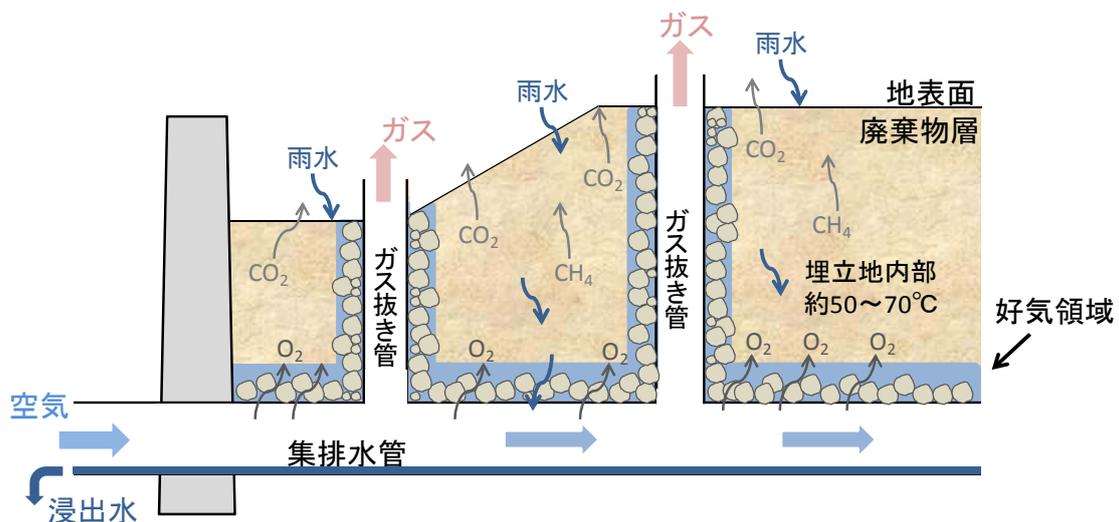


図 1-2 準好気性埋立構造の概念図²⁾をもとに作成

(2) 準好気性埋立地の現状

「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」³⁾では準好気性埋立地の管理状況を明らかにするために調査を行っている。日本全国の供用中の一般廃棄物最終処分場、1232 箇所のうち準好気性埋立地は 68% の 836 箇所ある。その中から埋立面積が 1 ヘクタール以上の 459 箇所をアンケート調査している。有効回答率 52% (238 施設) のアンケート調査によると、日本の標準的な埋立構造である準好気性埋立構造であるが、多くの準好気性埋立地は構造基準や維持管理基準、廃止基準にのみ基づいた管理となっているのが現状である。埋立地の早期安定化へ向けた維持管理になっていないことが明らかとなっている。

埋立地の安定化の進行度を知るためには埋立地内部のデータが必要となる。内部に関するデータとは埋立地から発生するガス組成、ガス流速、温度、浸出水、埋立地内のガス流れなどである。しかしながら、構造基準、維持管理基準、廃止基準ではガス組成、ガス流速は測定の義務がなく、温度に関しても廃止基準だけ測定の義務がある。埋立地から発生するガスを測定している施設は約 2 割であり、ガス発生判断理由は陽炎が見える、手をかざすと流れを感じる、においがすると感覚的なものとなっている。測定しているガスに関しては作業員などの人への健康影響を考慮した硫化水素が約 9 割、メタンガス、可燃性ガスの爆発の危険性を考慮したものが多い。また、ガス抜き管の出口流速 (流量) を測定している埋立地はほとんど存在せず、温度の測定は全体の約 1 割程度しか測定を行っていないのが現状である。

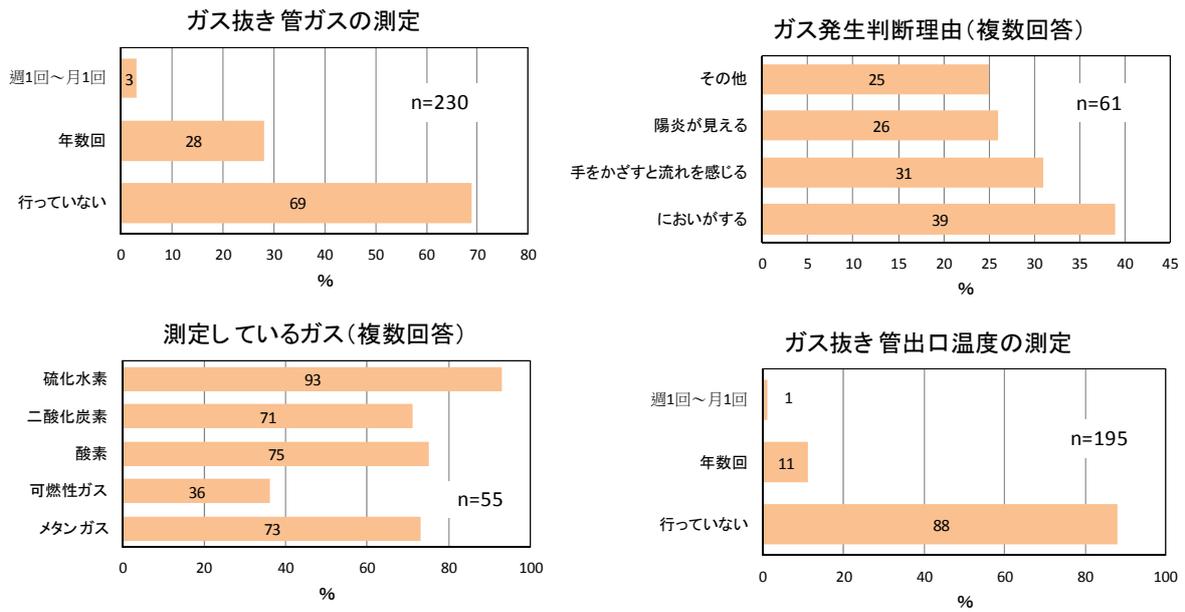


図 1-3 準好気性埋立地の内部データ測定状況³⁾

また、埋立地から排水される浸出水に関しては構造基準、維持管理基準、廃止基準に基づき pH や BOD、COD、SS などの測定を行っている施設が多い。埋立地の安定化の進行度を調査するには浸出水原水と浸出水処理施設から排出される放流水との比較が必要となる。しかしながら、浸出水原水と放流水を比較している施設はほとんど存在しないのが現状である。

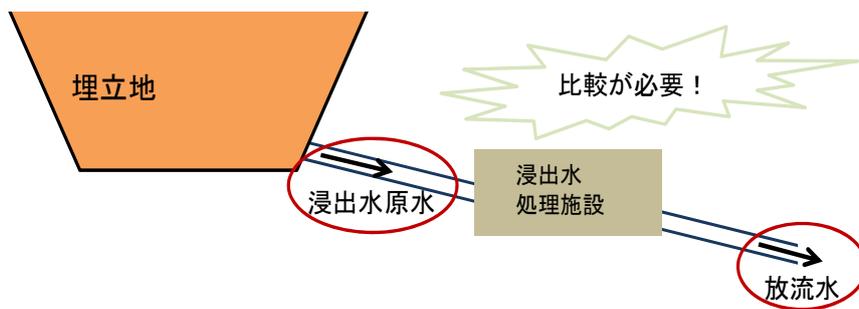
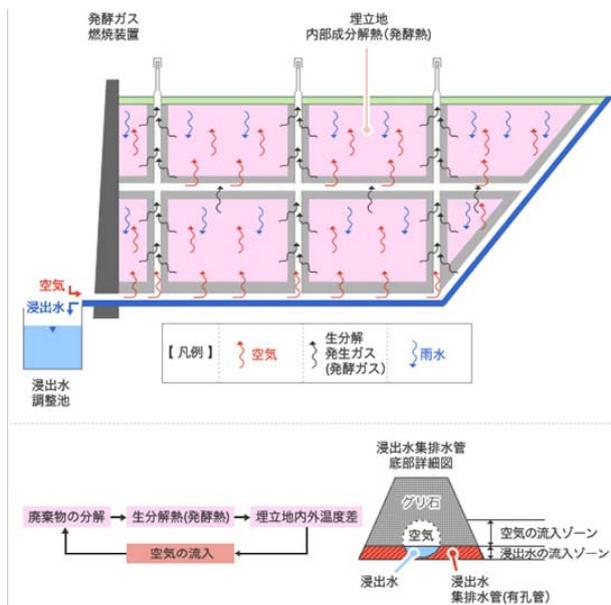
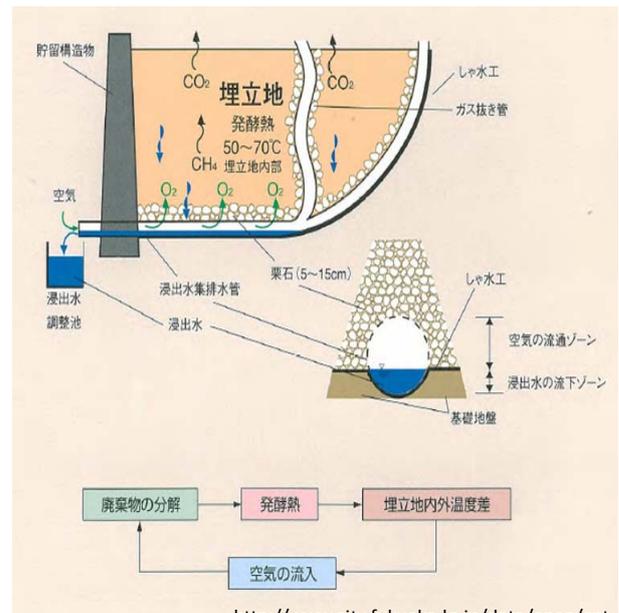


図 1-4 浸出水の測定状況

このように現在の準好気性埋立地は構造基準、維持管理基準、廃止基準に基づいた維持・管理を行っており、これでは埋立地が早期安定化に向けて進行しているかを見ることができない。準好気性埋立地の内部に関するデータは少なく、とくに埋立地内のガス流れは埋立地の安定化がどのように進行しているかを見るための重要なファクターであるが、明らかとはなっていない。図1-5は一般的に代表とされる準好気性埋立地内のガス流れについて書かれている。浸出水集排水管から埋立地内温度と外気温の差によって発生する自然対流によって埋立地内部に空気が流入し、発生するガスはガス抜き管や埋立地表面から排出されるとなっているが、実際のガス流れについては明らかとなっていない。



<http://www.sendaikankyo.co.jp/about/final.html>



<http://www.city.fukuoka.lg.jp/data/open/cnt/3/28853/1/siryo4.pdf>

図 1-5 準好気性埋立地内ガス流れの一般的な考え方

1.2 既往の研究

埋立地内のガス流れに関する研究はいくつか行われてきた。ひとつ、北海道旭川市の一般廃棄物最終処分場を対象とした研究⁴⁾がある。本埋立地は埋立期間が1977年から27年間で約660万 m^3 を埋立し、2003年に埋立が終了した埋立地である。集排水管とガス抜き管が連結した構造ではないが、埋立終了後にガス抜き管を複数本設置した埋立地となっている。本研究では、埋立が終了したあとにガス抜き管を設置したところガス抜き管からガスの流出が確認できた。このことからガス抜き管は埋立ガスの排出の効果があるということが明らかとなった。また積雪のある冬季でもガス抜き管からガスの流出があることから、ガスは廃棄物層をガス抜き管に向かって流れることが明らかとなった。

本研究では構造が準好気性埋立ではないが、ガス抜き管の効果やガス抜き管を設置したときのガスの流れが明らかとなったことが重要であると考えられる。とくにガスが廃棄物層内をガス抜き管に向かって流れていることは埋立地内のガス流れのひとつの要素と言える。

次に福岡大学が行った研究⁵⁾がある。本研究の対象埋立地は福岡県福岡市の山間に位置する伏谷埋立場であり、埋立構造は準好気性埋立構造である。本埋立地の集排水管、ガス抜き管配置は図1-6のようになっている。Gはガス抜き管を表しており、集排水管出口からG17、G24へ向けて標高が高くなっている。集排水管末端はG1の先に位置している。

本研究では集排水管末端からドライアイスの煙を用いて、空気が流入していることを明らかとなった。また、集排水管末端でのガス流速を測定した結果、外気温の低い冬季のほうが流速が大きくなり、外気温の高い夏季は流速が低くなることも明らかとなった。結果を図1-7に示す。



図1-6 伏谷埋立場のガス抜き管位置⁵⁾

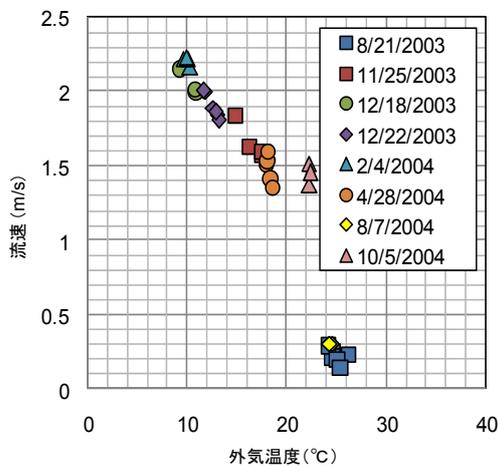


図1-7 集排水管末端の流速と外気温の関係⁶⁾

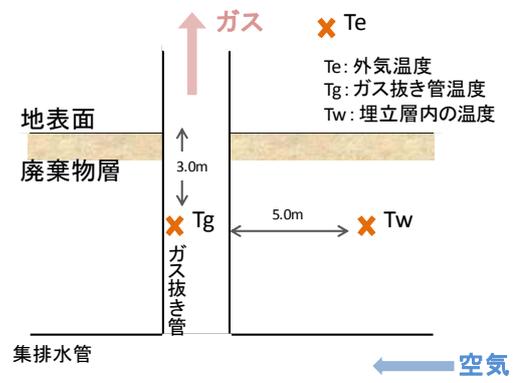


図1-8 温度の測定位置⁶⁾

また、G20 のガス抜き管では深さ 3.0m 地点のガス温度とガス抜き管から真横に 5.0m 離れた廃棄物層温度も測定をしている（図 1-8）。図 1-9 は 2004 年 7 月から 2005 年 11 月までの廃棄物層温度とガス温度、外気温を示している。ガス温度は大きく変動しているが全体として、ガス温度と廃棄物層温度はほぼ同じように動いているように見える。このことから廃棄物層温度 (T_w) とガス抜き管内温度 (T_g) がほぼ等しい温度であるということが明らかとなった。

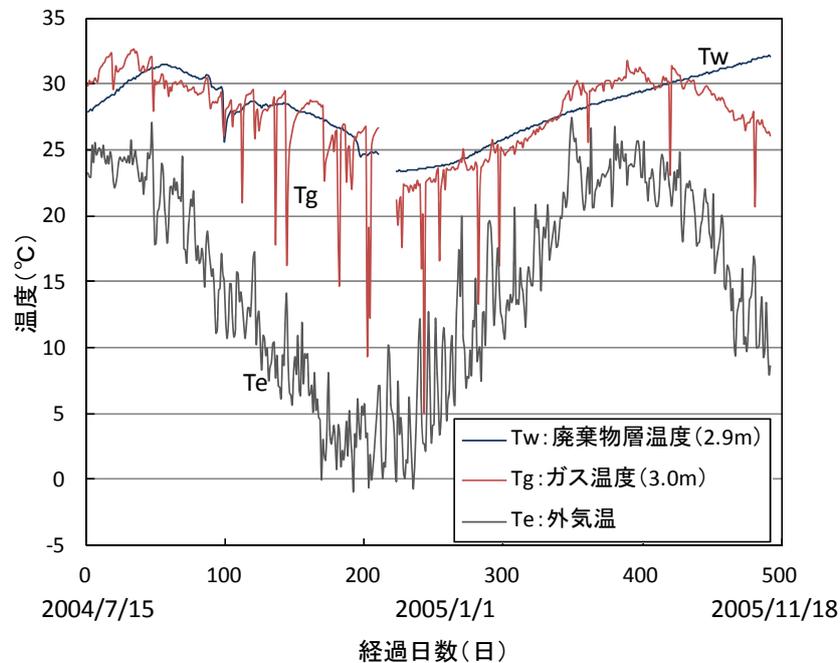


図 1-9 ガス抜き管のガス温度と廃棄物層温度の関係⁶⁾

以上の 2 つの既往の研究から、ガスが廃棄物層をガス抜き管に向かって流れること、廃棄物層温度とガス抜き管内温度がほぼ等しいことから、「集排水管末端から流入した空気が廃棄物層を通過している」ということが予想される。

1.3 研究目的

準好気性埋立地においてガス流速、ガス温度などのデータを取得し、埋立地内ガス流れの経路を明らかにすることを本研究の目的とする。

第2章 調査対象埋立地および調査方法

2.1 埋立地概要

本研究の対象埋立地は宮城県仙台市内にある産業廃棄物処分場である。本埋立地は区分が管理型最終処分場であり、埋立構造は準好気性埋立構造となっている。本埋立地は1期、2期、3期の埋立地からなり（3期は2013年11月現在施工中である）、本研究の対象埋立地は2期埋立地である。2期埋立地は2009年11月から埋立が開始された。2013年11月現在、埋立地の約85～90%が埋立完了となっている。1期と2期の埋立地を合わせた埋立面積は78241m²であり、埋立許可容量は2114576m³である。



<http://www.sendaikankyo.co.jp/about/view.html>

Google Map

図 2-1 調査対象埋立地の上空撮影図

2.2 埋立状況

本埋立地には主に産業廃棄物が搬入されている。本埋立地の最終処分許可品目を表 2-1 に、2010年4月～2013年3月までの各年度月別埋立物重量と埋立物別重量割合を表 2-2 と図 2-2 に示す。表 2-2 では各年度の月ごとの埋立物ごとの埋立重量(トン)を示し、図 2-2 では埋立物ごとの全体の割合を示している。本埋立地は2003年11月から埋立が開始され、2013年12月現在も埋立は進行中である。埋立物の割合としては、廃プラスチック、13号廃棄物、ガラスくず、コンクリートくず及び陶磁器くず、汚泥、金属くず、燃え殻の割合が大きい。汚泥は2011年3月に起こった東日本大震災で発生した家畜の肥料なども含まれている。埋立量としては2010年4月～2013年3月までに78466.4トンの廃棄物が埋め立てられている。

表 2-1 最終処分許可品目

産業廃棄物	燃え殻、汚泥、廃プラスチック類、紙くず、木くず、繊維くず、ゴムくず、金属くず、ガラスくず・コンクリートくず(工作物の新築、改装又は除去に伴って生じたものを除く。)及び陶磁器くず、鋳さい、がれき類、ばいじん、政令第2条第13号の廃棄物(汚泥、燃え殻、ばいじんの固粒化処理廃棄物に限る。)
汚染土壌	※第二溶出量基準未滿に限る埋立
特別管理産業廃棄物	廃石綿等

表 2-2 各年度月別埋立物重量 (2010.4~2013.3)

種類 年度	燃え殻	汚泥	廃プラ	紙くず、 木くず、 繊維くず	金属くず、 ガラスくず、 コンクリートくず、陶磁器くず	鉞さい	がれき類	その他がれき類	ばいじん	13号廃棄物	廃石綿等	混合廃棄物	合計	
														4
2010	4	7.7	59.9	405.9	272.3	13.3	4	2.3	0	533.9	0.6	0	1315.1	
	5	15.4	44.7	289.9	201.4	31.9	14.3	1.9	8.2	383.5	0	0	1010.9	
	6	58.3	58.9	572.5	400	13.4	15.1	0.4	0	397.1	90.6	0	1616.1	
	7	39.7	118.6	292.2	24.1	238.5	0	8.5	35.8	172.5	176.9	0	1106.8	
	8	2021.2	4086	3046.1	73.8	5734.2	146.9	165.2	543.3	643	2046.1	538.7	14.6	19059.1
	9	2214.1	3408.4	1058.7	490.2	2952.4	148.4	529.5	250.1	597.1	3621.8	53.8	0	15324.5
	10	145.3	146.3	522	20.4	398.5	26.1	27.6	1.3	10.2	289.9	29.1	0	1616.7
	11	103.2	62.8	787.1	27.7	732.4	25.1	6	33.1	30.6	146	0	0	1954
	12	77.3	146.6	553.6	107.7	334.9	25.4	115.6	30	52.6	364.7	5.5	0	1813.9
	1	91.4	77.7	512.1	8.4	303	24.6	157.6	90	20.2	355	23	0	1663
	2	156.5	44.3	529.7	12.5	362.2	25.2	19.2	50	52.6	301	16.9	0	1570.1
	3	80.6	46	416.9	2.3	273	0	6.3	50	34	336.5	7.7	0	1253.3
2011	4	29.5	26.9	743.3	12.7	493.9	0	13.6	15.9	217.9	47.9	0	1645.5	
	5	18.1	17.9	936.6	9.9	653.7	456.1	57.4	43.7	110.9	17.4	0	2331.1	
	6	109.4	8.5	926.6	30.1	762.5	212.7	47.2	3.9	192.9	6.9	0	2345.3	
	7	61.6	10.4	1064.5	12.3	744.2	0	12.9	2.2	203.9	0.9	0	2112.9	
	8	73.9	30.5	635.4	23.3	481.4	25	21.7	10.1	209	0.2	0	1510.5	
	9	34.7	8.4	473.8	90.1	442.1	27.4	53.1	0	0	301.5	37.2	0	1468.3
	10	0	17.2	645.2	13.2	564	0	19	4.8	0	163	7	0	1433.4
	11	23.4	47.7	1351.7	46.2	926.9	24.5	11.6	0.2	0	50.8	1	0	2484
	12	103.8	53.8	1199.9	76.9	835.9	26.1	67.5	0.2	0	36.3	0.4	0	2400.8
	1	2.3	30.6	992.4	43.6	696.2	0	41.2	9.5	0	26.7	9.1	0	1851.6
	2	0	79.3	1336.4	12.1	959.8	0	34.8	1.9	0	0	0.6	0	2424.9
	3	0	74.8	405	20.6	361.3	24.9	20.9	1.1	0	52.6	7.5	0	968.7
2012	4	37.4	23.9	293.1	20.3	213.3	24.2	9.1	6	24.9	2.6	0	654.8	
	5	24.1	74.2	266.3	12.1	215.7	25	22.7	1.9	91.5	4.1	0	737.6	
	6	26.4	137.6	273.1	9.3	193.1	24.7	2.8	0.1	139.5	0.8	0	807.4	
	7	58.5	81	195.2	44.7	150.2	24.8	8.1	0.4	120.8	0.4	0	756.2	
	8	10.3	67.4	165.4	26.3	123.3	2.8	9.1	0.9	125.1	2	0	532.6	
	9	14	64.6	178.9	11.2	155	0	0.3	4	1.5	0	0	431.7	
	10	13.3	53.4	221.7	10.6	174.1	24	11.1	4.6	0	0	4.5	0	517.3
	11	0	63.9	115.6	122.2	88.7	0	13.4	3.5	0	49.6	0.5	0	457.4
	12	2.4	65.8	139.1	13.9	109.7	0	6.4	4.7	23.6	0	0	0	365.6
	1	29.8	42.5	103	5.8	75.5	0	4.8	0.8	24	24.6	0	0	310.8
	2	0	67.2	98.1	16.3	81.2	24.5	6.4	1.8	0	0	0	0	295.5
	3	2.5	66.9	118.1	9.4	90.1	0	7.2	0.7	24.1	0	0	0	319
合計	5886.1	9514.6	21865.1	1504.9	21794.6	1427	1571.2	1176.8	1726	11089.5	1096	14.6	78466.4	

単位(トン)

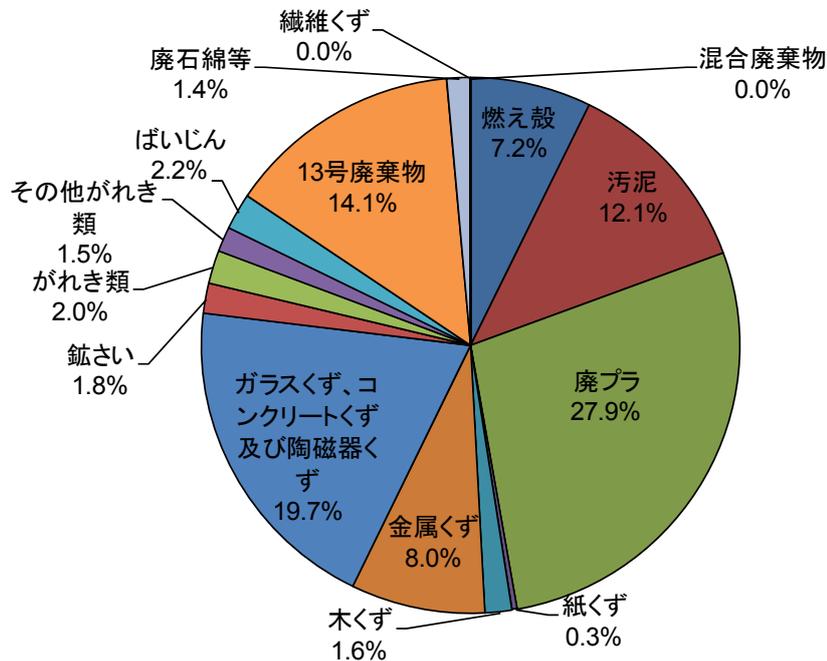


図 2-2 埋立物別重量割合 (2010.4~2013.3)

2.3 調査方法

調査は主に現地調査を行った。現地調査は2013年6月18.19日、10月24.25日、11月15.16日の3回行った。調査内容の日程は表 2-3 にまとめた。

表 2-3 現地調査のスケジュール

日付		測定内容	目的
2013年6月	18~19日	ガス抜き管の位置確認	縦型25本、法面33本のガス抜き管の位置確認
		ガス流れ方向	ガス抜き管のガス流速(流量)、温度の関係の測定
		ガス流速	
		ガス温度、外気温	ガス組成の調査
		ガス組成	
埋立高さ	作業員からの聞き取りと現地状況から調査		
2013年10月	24日	埋立高さ	GPSを用いた正確な埋立高さの調査
		ガス流れ方向	ガス抜き管のガス流速(流量)、温度の関係の測定
		ガス流速	
	ガス温度、外気温	注したガスが他の管から流出するか調査(No.1)	
	トレーサー応答試験(予備実験)		
25日	トレーサー応答試験(予備実験)	注したガスが他の管から流出するか調査(PN1)	
	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	
2013年11月	15~16日	トレーサー応答試験(本実験)	埋立地内のガス流れの直接測定
		ガス流速の時間変動	ガス流速の時間変動調査
		ガス組成	ガス組成の調査
		温度の連続測定	ガス温度と外気温の関係を調査

(1) ガス抜き管のガス流速（流量）と温度の測定

6月18、19日、10月24日調査では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、高度（埋立高さ）、ガス組成の調査を行った。出口状況は各管ごとに番号札を取り付け、写真撮影を行った。ガス流れ方向は煙発生器（ガステック株式会社 GASTEC No.501）を用いて行い、ガス流速を Kanomax 6531 を用いて測定した。また外気温および出口ガス温度を ThermoPORT TP-100mR を用いて測定した。埋立高さに関しては GPS を用いて測定を行った。ガス組成は GA2000 を用いて窒素、酸素、二酸化炭素、メタン、一酸化炭素、水素、硫化水素の測定を行った。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出口で管に測定器を差し込んで測定を行った。測定器と調査状況の写真を図 2-3 に示す。



図 2-3 ガス温度とガス流速の測定状況と測定器

(2) トレーサー応答試験によるガス流れの測定

10月、11月の調査では埋立地内のガス流れを明らかにするためにトレーサー応答試験を行った。10月調査は予備実験とした。トレーサー応答試験は、埋立地内にはほとんど含まれないトレーサーガス（一酸化炭素：CO）を空気の流入管から流すことによって埋立地内をどのようにガスが流れて別の管から流出しているかを濃度の応答から調べる方法である。空気の流入管から CO を流入させ、直近のガス抜き管出口にて GCO2008 を用いて CO 濃度の連続測定を行い、他の CO ガスが流出すると考えられる管については GA2000 および GA5000 で測定を行った。測定器と測定状況を図 2-4 に示す。



CO濃度測定器 (GCO2008)



ガス組成測定器 (GA2000)

(a) ガス濃度測定器



(b) トレーサー応答試験の測定状況

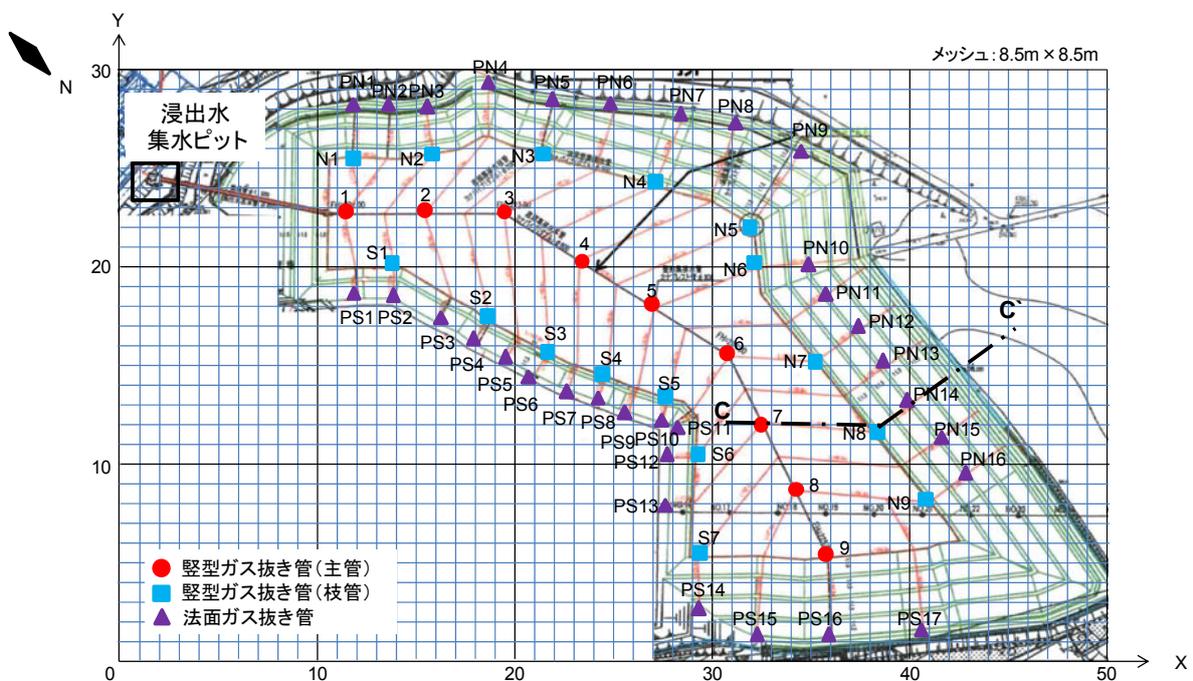
図 2-4 トレーサー応答試験の測定器と測定状況

第3章 ガス抜き管の流量

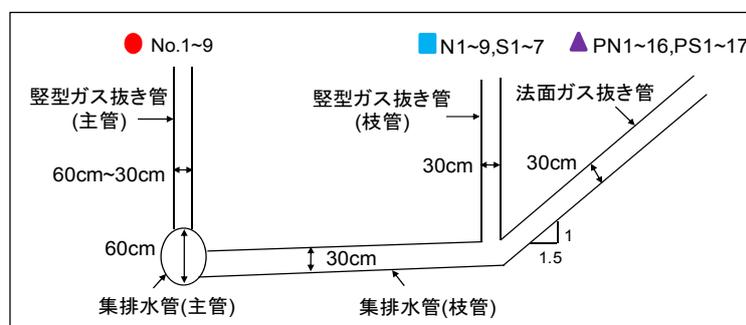
3.1 ガス抜き管の出口状況

(1) ガス抜き管配置図と断面図

本埋立地は図 3-1 (a) に示すようにガス抜き管が多数設置されている。ガス抜き管は堅型ガス抜き管と法面ガス抜き管が設置されており、堅型ガス抜き管には主管と枝管が存在する。ガス抜き管の構造を図 3-1 (b) に示す。堅型ガス抜き管 (主管) は 9 本、堅型ガス抜き管 (枝管) は 16 本、法面ガス抜き管は 33 本存在し、総本数は 58 本である。調査では堅型ガス抜き管 (主管) は №1～№9、堅型ガス抜き管 (枝管) は N1～N9、S1～S7、法面ガス抜き管は PN1～PN16、PS1～PS17 と番号をつけ区別した。№1 から PS17 までは直線距離で約 300m となっている。また、本埋立地は №1 のガス抜き管の管径が 60cm であり、№1 以外の管は管径が 28cm となっている。



(a) ガス抜き管配置図



(b) C-C'における埋立地の断面図 (集排水管とガス抜き管の接続)

図 3-1 ガス抜き管の配置図と断面図

また、ガス抜き管については現地の作業員の聞き取りから PS4.5、PS6.7、PS8.9、PS10.11 の管がそれぞれ1本に結合していることが明らかとなった。PS2の管はPS1かPS3と結合している可能性があるという話しであったが、不確かな情報のためPS2は存在せずということにした。ガス抜き管の数は実際には、堅型（主管）が9本、堅型（枝管）は16本、法面は28本の計53本である。

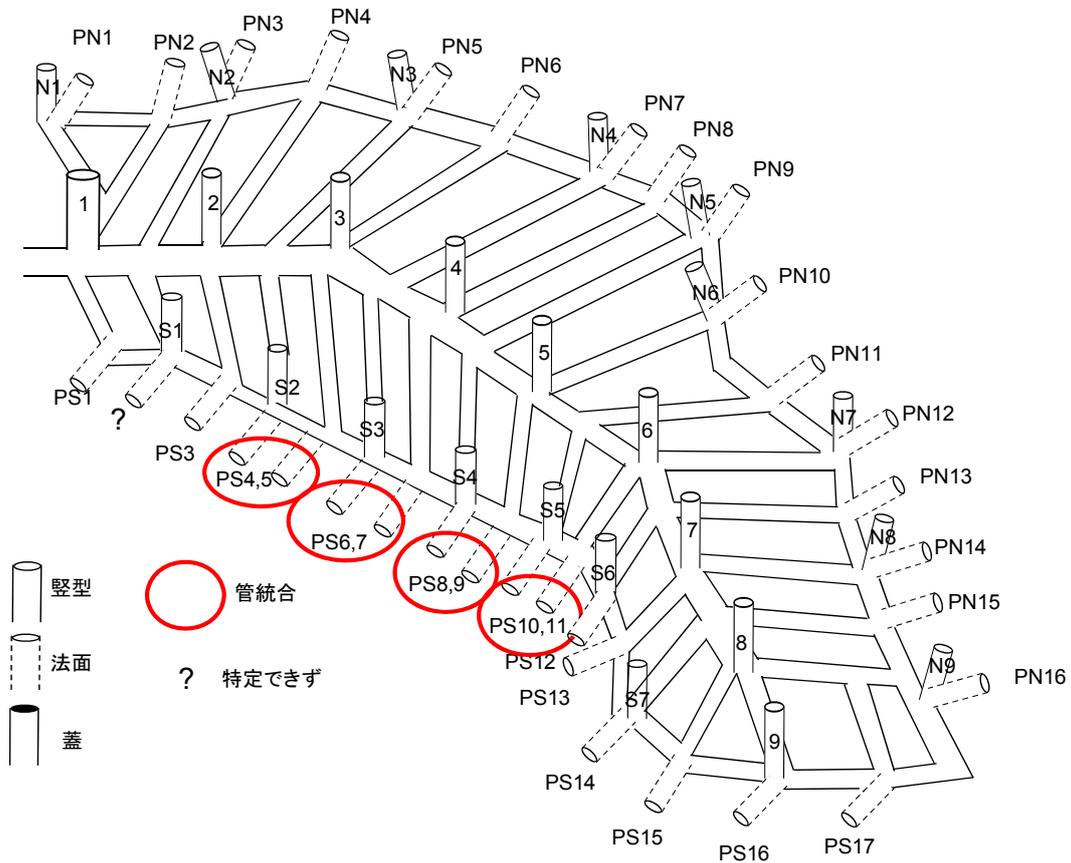
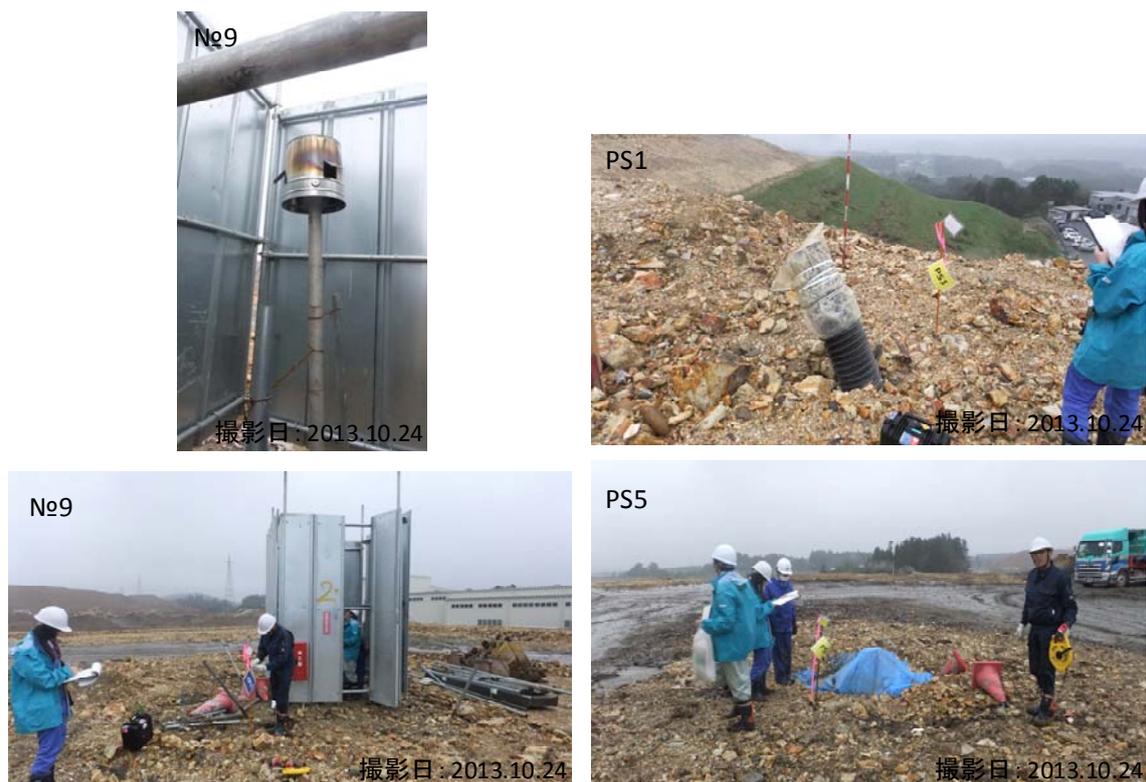


図 3-2 ガス抜き管の接続

(2) ガス抜き管出口状況

ガス抜き管の出口状況について、現地の作業員が臭気対策や作業環境の関係でカバーや燃焼装置を取り付けているガス抜き管が複数あった。カバーに関してはブルーシートで覆っているものとプラシートで覆っているものがあった。ガス抜き管出口状況の写真を図 3-3 に示す。燃焼装置については現地の作業員の考えで埋立地からはメタンガスが発生すると考え、ガス抜き管出口の管径をつぼめる（300mm→50mm）ことで自然発火させ、臭気対策とする考えであった。しかしながらメタンガス濃度が10～15%で存在しない限り、安定して発火しないとされている。



(a) 燃焼装置 (No9)

(b) カバー (PS1、PS5)

図 3-3 ガス抜き管の出口状況

本埋立地ではガス組成を6月、11月で調査している(図3-4)がメタンガスは5%よりも大きいガス抜き管は存在しない。よって、管径をつぼめても安定して自然発火することはない状況である。一般的に大気中のガス組成はN₂が78.1%、O₂が21.0%、Arが0.93%、CO₂が0.035%である。図3-4に示すように埋立地では好気分解、嫌気分解によりCO₂、CH₄の割合が増加しているが、本埋立地のガス組成は大気中のガス組成に近づいている。このことから、本埋立地は埋立地内に空気が十分に供給されている、つまり準好気性埋立がうまく進行していることがわかった。

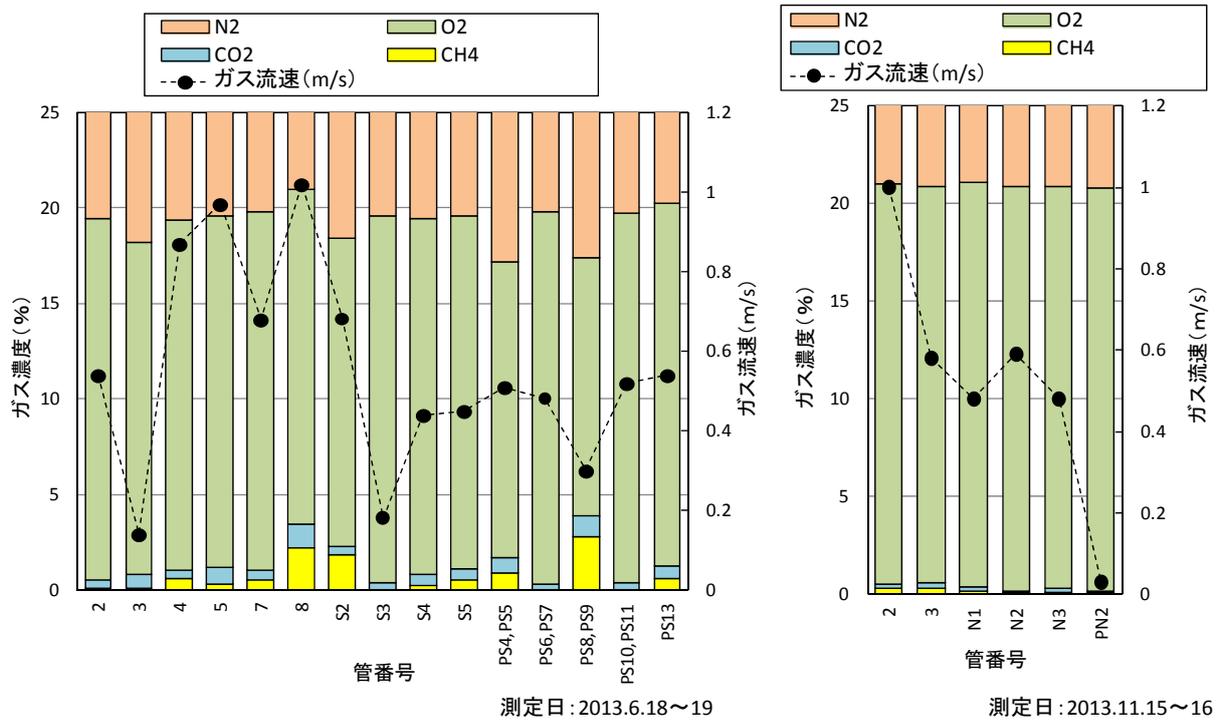


図3-4 ガス抜き管のガス組成

(3) ガス抜き管ごとの埋立高さ

ガス抜き管ごとの埋立高さについて、等高線で表したものを図 3-5 に示す。測定日は 2013 年 10 月 24 日で、埋立高さは埋立地底部からの高さとなっている。等高線の間隔は約 2m となっており、ガス抜き管の番号は上記 (図 3-1) で紹介したものとなっている。測定は GPS で行い、標高から埋立高さを算出した。もっとも低い位置で埋立高さが約 14m であり、S6、PS12 付近は最も高く約 38m となっている。

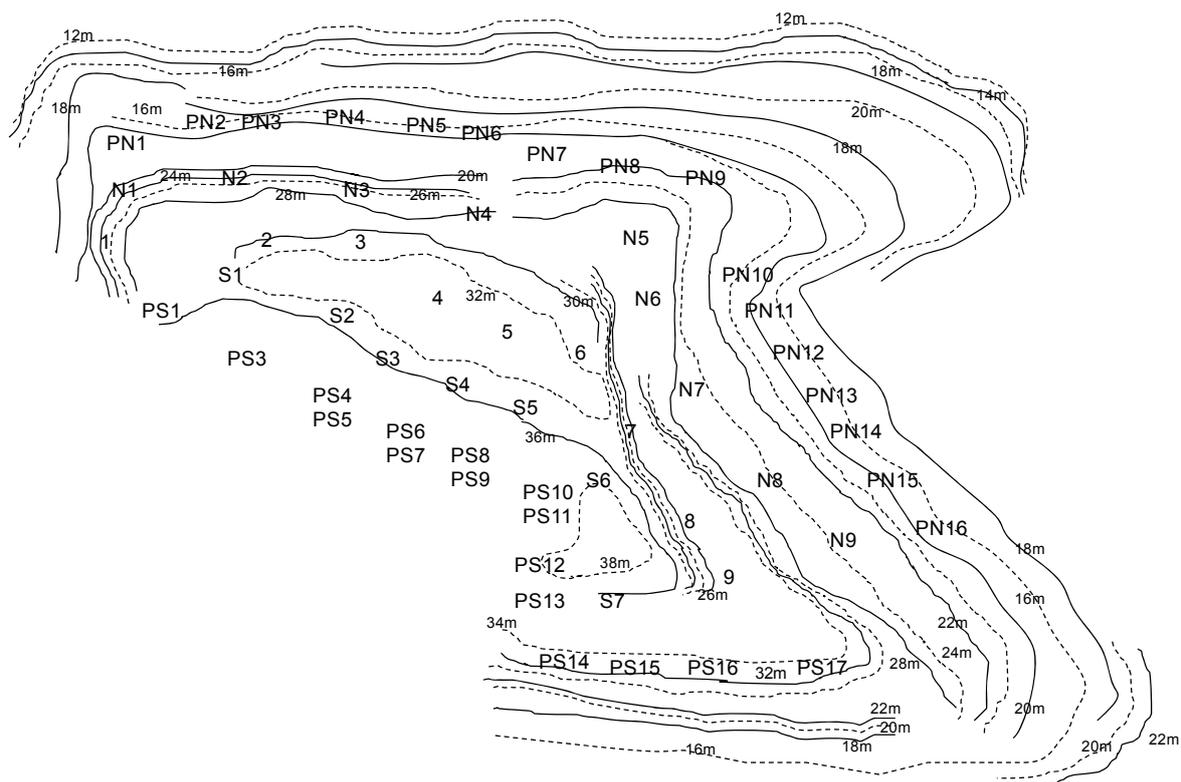


図 3-5 埋立高さ (2013.10.24)

3.2 流量測定

(1) ガス抜き管のガス流れの向き

6月、10月の調査で煙発生器（ガステック株式会社 GASTEC No.501）を用いてガス抜き管のガス流れを調べた。既往の研究で紹介したように、準好気性埋立構造では集排水管末端から空気の流入があることが明らかとなっている⁶⁾。本埋立地でも集排水管末端である集水ピットから、6月調査は集水ピットにされていたカバーをはずし、空気の流入が確認できた。また、図 3-6 に示すように本埋立地のガス抜き管の中には空気が流入しているガス抜き管があるということが明らかとなった。6月では 10 本、11 月では 11 本の空気の流入管の存在が確認された。



(a) 空気が流入しているガス抜き管 (PN1、PN5)



(b) ガスが流出しているガス抜き管 (No3、N1)

図 3-6 ガス抜き管のガス流れの向き

(2) ガス温度とガス流速の測定結果

6月と10月におけるガス抜き管のガス流れ方向、ガス流速、ガス温度、外気温の結果を表3-1に示す。6月では45本の管で測定を行い、10月では40本の管で同様の測定を行った。測定回数が複数回の管については平均値を示した。6月と10月ではカバーや燃焼装置などで測定の有無が異なるが、共通して測定を行うことができた管は37本であった。6月と10月で比較を行うことのできる37本の管で、出口ガスの流入、流出の関係が変化していたものはPS1、PS13、N4、N7、N8、PN2、PN13、PN16の8本であった。6月と10月で流出が流入へと変化していた管は3箇所（N7、N8、PS1）あった。N4の管では10月の調査で1日目と2日目で流入と流出が変化していた。また6月18日の外気温は22.7℃、6月19日は18.2℃、10月24日は13.0℃であった。

ガスの流入と流出が変化していた理由としては、カバーによって埋立地内のガス流れのバランスが変化したということが考えられる。埋立地内は温度が高く、外気温は埋立地に比べて低い。このことにより温度差が生まれ浮力が生じるためにガスが埋立地から排出される。ガスが排出されることで埋立地内が負圧となり、集排水管出口や埋立高さが低いガス抜き管などから空気が流入すると考えられる。6月の調査では№6の管は流入であったが、10月では燃焼装置を設置していたことを考えると、№6に近いN7、N8から空気が流入したのではないかと考えられる。N4が10月の調査で1日目と2日目で流入、流出が変化していた理由としては、1日目の夕方から2日目にかけて降った雨が原因と考えられる。1日目では集排水管末端は約3分の1程度が浸出水で満たされていたのに対して、2日目は半分以上が浸出水で満たされていた。このことから集排水管末端からの空気の流入量が減少したために、N4から空気の流入が起こったのではないかと考えられる。

表 3-1 ガス温度とガス流速の測定のまとめ

(a)測定日:2013.6.18-6.19							(b)測定日:2013.10.24			
管番号	管径[m]	出口温度 [°C]	流速 [m/s]	2日目測定	測定回数	備考	出口温度 [°C]	流速 [m/s]	測定回数	備考
1	0.6	22.7	0.5		n=2		13.4	1.12	n=6	
2	0.28	41.1	0.5		n=2		39.3	0.81	n=1	
3	0.28	44.2	0.2		n=2		46.0	0.56	n=1	
4	0.28	37.6	0.7		n=2		40.3	0.91	n=1	
5	0.28	40.7	0.9		n=2		44.0	1.26	n=1	
6	0.28	23.4	1.2		n=1		-	-	-	燃焼装置
7	0.28	47.7	0.7		n=2	カバーを外して測定	-	-	-	燃焼装置
8	0.28	52.4	1.0		n=2	カバーを外して測定	-	-	-	カバー
9	0.28	-	-		-	カバー	-	-	-	燃焼装置
S1	0.28	-	-		-	カバー	-	-	-	カバー
S2	0.28	47.4	0.8		n=3		-	-	-	カバー
S3	0.28	37.8	0.3		n=2		36.8	0.70	n=1	
S4	0.28	43.0	0.4		n=2		37.3	0.99	n=1	
S5	0.28	43.1	0.5		n=2		-	-	n=1	カバー
S6	0.28	-	-		-	カバー	50.4	0.92	n=1	
S7	0.28	-	-		-		-	-	-	カバー
PS1	0.28	-	-		-	カバー	-	-	-	カバー
PS2	0.28	-	-		-	存在せず	-	-	-	存在せず
PS3	0.28	22.9	0.3		n=1		13.0	0.31	n=1	
PS4.5	0.28	47.9	0.5		n=2		-	-	-	カバー(管統合)
PS6.7	0.28	35.5	0.5		n=2		28.5	0.34	n=1	管統合
PS8.9	0.28	45.5	0.3		n=2		35.4	0.51	n=1	管統合
PS10.11	0.28	38.0	0.5		n=3		34.6	0.98	n=2	管統合
PS12	0.28	-	-		-	カバー	-	-	n=1	カバー
PS13	0.28	45.7	0.5		n=3		12.7	0.27	n=3	
PS14	0.28	23.6	0.1		n=1		16.7	0.03	n=1	
PS15	0.28	22.6	0.0		n=1		15.6	0.03	n=1	
PS16	0.28	23.0	0.1		n=1		14.8	0.02	n=1	
PS17	0.28	21.5	0.0		n=1		15.2	0.02	n=1	
N1	0.28	29.1	0.1		n=1		26.7	0.22	n=1	
N2	0.28	31.7	0.3		n=1		30.4	0.54	n=1	
N3	0.28	32.5	0.2		n=1		39.4	0.40	n=1	
N4	0.28	34.8	0.7	○	n=1		35.0	1.10	n=1	
N5	0.28	-	-	○	-	ゴミつまり	-	-	-	ゴミつまり
N6	0.28	43.5	0.7	○	n=1		45.0	0.52	n=1	
N7	0.28	39.6	0.4	○	n=1		13.2	1.08	n=1	
N8	0.28	42.0	0.2	○	n=1		12.6	1.02	n=1	
N9	0.28	47.5	0.1	○	n=1		44.5	0.14	n=1	
PN1	0.28	18.8	0.5	○	n=1		13.2	0.75	n=5	
PN2	0.28	18.8	0.2	○	n=1		13.2	0.21	n=1	
PN3	0.28	18.6	0.1	○	n=1		13.2	0.31	n=1	
PN4	0.28	18.2	0.8	○	n=1		13.2	0.83	n=1	
PN5	0.28	18.2	0.4	○	n=1		13.2	0.11	n=1	
PN6	0.28	24.1	0.1	○	n=1	カバーを外して測定	-	-	-	カバー
PN7	0.28	17.8	0.1	○	n=1		17.4	0.07	n=1	
PN8	0.28	-	-	○	-	カバー	16.5	0.06	n=1	
PN9	0.28	18.4	0.0	○	n=1		15.9	0.05	n=1	
PN10	0.28	19.6	0.0	○	n=1		16.1	0.27	n=1	
PN11	0.28	-	-	○	-	ゴミつまり	14.0	0.04	n=1	
PN12	0.28	18.4	0.0	○	n=1		15.4	0.04	n=1	
PN13	0.28	18.4	0.1	○	n=1		14.2	0.04	n=1	
PN14	0.28	18.6	0.0	○	n=1		15.0	0.06	n=1	
PN15	0.28	18.8	0.0	○	n=1		15.8	0.07	n=1	
PN16	0.28	19.1	0.1	○	n=1		13.4	0.03	n=1	

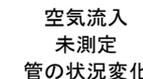
 空気流入
 未測定

(3) ガス抜き管の流量分布

6月と10月のガス温度と温度差（ガス温度－外気温）、ガス流量の結果を表3-2に示す。流量は表3-1の流速に管の断面積をかけた値としている。表ではカバーや燃焼装置のより測定ができなかった管を灰色で表し、6月と10月の調査でカバーの有無や燃焼装置などで管状況が変化していたものを緑の塗りつぶしで表現している。

表3-2 ガス流量と温度のまとめ

(a)測定日:2013.6.18~19					(b)測定日:2013.10.24		
管番号	出口温度[°C]	温度差[°C]	出口流量[m ³ /min]	2日目測定	出口温度[°C]	温度差[°C]	出口流量[m ³ /min]
1	22.7		9.07		13.4		19.00
2	41.1	18.4	1.96		39.3	26.3	2.99
3	44.2	21.5	0.78		46.0	33.0	2.07
4	37.6	14.9	2.44		40.3	27.3	3.36
5	40.7	18.0	3.34		44.0	31.0	4.66
6	23.4		4.43				
7	47.7	25.0	2.64				
8	52.4	29.7	3.69				
9							
S1							
S2	47.4	24.7	2.95				
S3	37.8	15.1	1.22		36.8	23.8	2.59
S4	43.0	20.3	1.62		37.3	24.3	3.66
S5	43.1	20.4	1.70				
S6					50.4	37.4	3.40
S7							
PS1							
PS3	22.9		1.18		13.0		1.15
PS4.5	47.9	25.2	1.94				
PS6.7	35.5	12.8	1.74		28.5	15.5	1.26
PS8.9	45.5	22.8	1.14		35.4	22.4	1.88
PS10.11	38.0	15.3	1.96		34.6	21.6	3.62
PS12							
PS13	45.7	23.0	1.92		12.7		1.00
PS14	23.6	0.9	0.48		16.7	3.7	0.11
PS15	22.6	-0.1	0.07		15.6	2.6	0.11
PS16	23.0	0.3	0.18		14.8	1.8	0.07
PS17	21.5	-1.2	0.15		15.2	2.2	0.07
N1	29.1	6.4	0.18		26.7	13.7	0.81
N2	31.7	9.0	1.11		30.4	17.4	2.00
N3	32.5	9.8	0.74		39.4	26.4	1.48
N4	34.8	17.0	2.73	○	35.0	22.0	4.06
N5							
N6	43.5	25.7	2.44	○	45.0	32.0	1.92
N7	39.6	21.8	1.29	○	13.2		3.99
N8	42.0	24.2	0.70	○	12.6		3.77
N9	47.5	29.7	0.44	○	44.5	31.5	0.52
PN1	18.8		1.88	○	13.2		2.77
PN2	18.8		0.55	○	13.2		0.78
PN3	18.6		0.52	○	13.2		1.18
PN4	18.2		2.99	○	13.2		3.07
PN5	18.2		1.55	○	13.2		0.41
PN6	24.1	6.3	0.18	○			
PN7	17.8	0.0	0.26	○	17.4	4.4	0.26
PN8					16.5	3.5	0.22
PN9	18.4	0.6	0.04	○	15.9	2.9	0.18
PN10	19.6	1.8	0.04	○	16.1	3.1	1.00
PN11					14.0	1.0	0.15
PN12	18.4	0.6	0.04	○	15.4	2.4	0.15
PN13	18.4		0.44	○	14.2	1.2	0.15
PN14	18.6	0.8	0.04	○	15.0	2.0	0.22
PN15	18.8	1.0	0.00	○	15.8	2.8	0.26
PN16	19.1	0.9	0.33	○	13.4		0.11

 空気流入
 未測定
 管の状況変化

6月と10月の埋立高さと同流量を合わせたガス抜き管の流量分布を図3-7に示す。円の大きさが流量の大きさと比例している。図3-7に示されている記号どおり、青は空気の流入量、黄色はガスの流出量を表している。またカバーや水浸し、ごみのつまり、燃焼装置でふさがってしまった管についてはバツの記号で示した。等高線の間隔は2mとなっている。

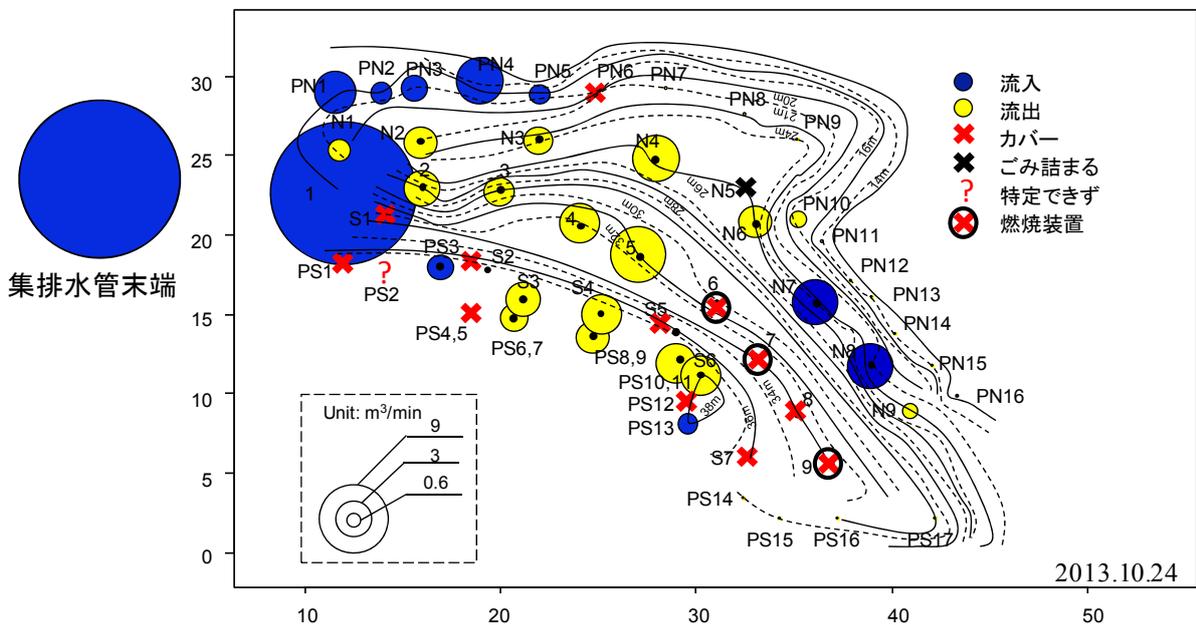
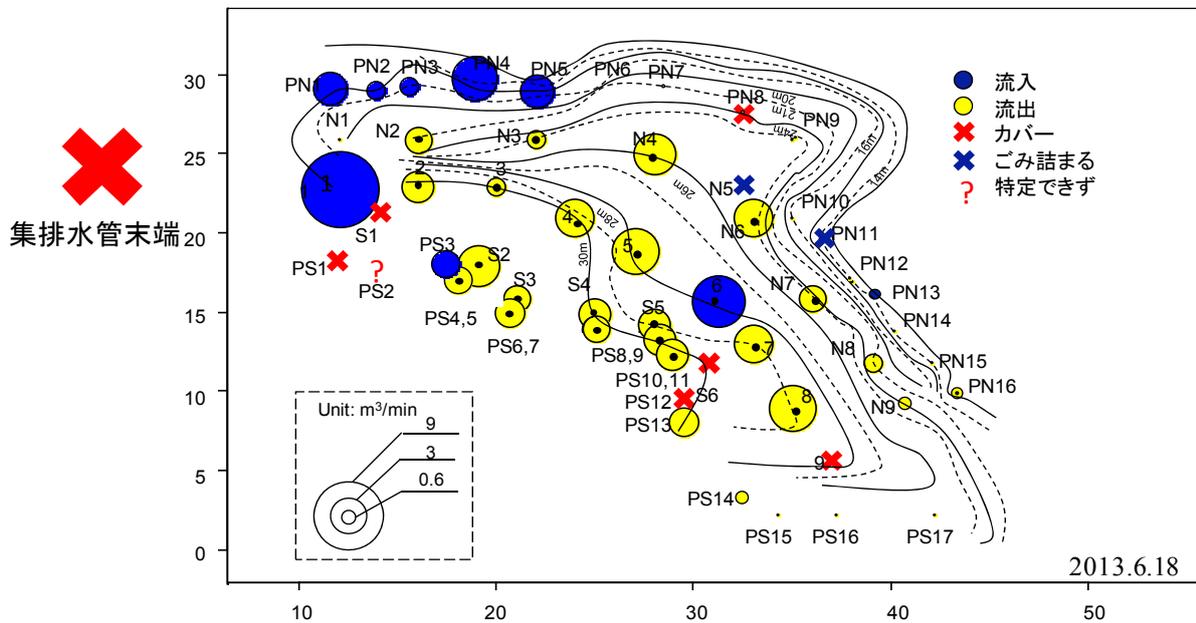


図3-7 ガス抜き管の流量分布

6月調査では集排水管末端が不織布で覆われており、出口からの空気の流入はなかった。しかし、10月調査では集排水管末端が開放されていたため、№1の下部への空気の流入があった。浸出水集水ピットは縦が0.65m、横が3mで流速が0.15m/sとなっていた。ガス流量の収支について表3-3に示す。6月では空気流入量が23.51m³/min、ガス流出量42.48m³/minとなっており、空気流入量がガス流出量の約55%となっている。6月と10月ではガス流出量はほとんど変化していないが、10月では集排水管末端（浸出水集水ピット）が開放されていたため10月の流入量は6月に比べて約30m³/min増加し、空気流入量は53.36m³/min、ガス流出量は43.23m³/minとなり、空気流入量はガス流出量の1.23倍となった。

表 3-3 ガス流量収支

	単位[m ³ /min]	
	2013.6.18	2013.10.24
浸出水集水ピット	0.00	-17.55
ガス抜き管	-22.62	-35.81
	41.59	43.23
合計	18.97	-10.13

浸出水集水ピット流量の算出方法: $0.65\text{m} \times 3\text{m} \times 0.15\text{m/s} \times 60 = 17.55 \text{ m}^3/\text{min}$

また埋立地ではガス抜き管以外の場所からもガスの流出があることや、カバーをしたガス抜き管から漏れているガスがあるということも明らかとなっている。図3-8は№2と№3の間にあるガス流出の様子である。図3-8では少し見にくいだが水蒸気（ガス）が出ていることがわかる。このガス温度は33.5℃であった。また、カバーされているガス抜き管からもすきまから水蒸気が漏れていることが調査で明らかになっている。このようにガス抜き管以外からもガスの流出がある。同様にして空気の流入もガス抜き管以外の場所からも起こっていることが考えられる。



図 3-8 №2 と №3 の間で確認できたガス流出

3.3 ガス温度とガス流速（流量）の関係

準好気性埋立構造では埋立地内部温度と外気温の差によって生じる自然対流を利用して空気を埋立地内に流入させている。6月と10月のガス流出管におけるガス温度と流量の関係を図3-9に示す。6月と10月では外気温と測定しているガス抜き管の本数が異なり、6月が35本、10月が29本となっている。6月と10月ともにガス温度とガス流量には正の相関（ガス温度が高いほどガス流量も大きくなる）があることがわかる。

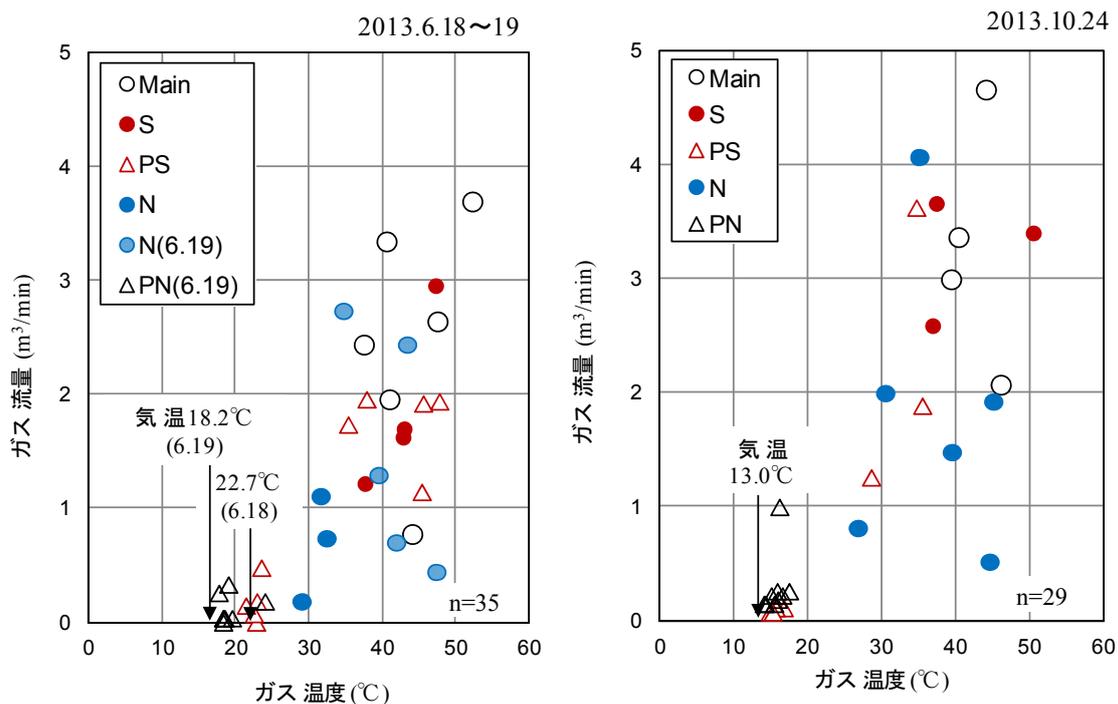


図 3-9 ガス温度とガス流量の相関

また、図 3-10 に 6 月と 10 月におけるガス流速とガス温度と外気温の差の測定結果の比較を示す。下図 (a) (b) に示すように多くのガス抜き管では 6 月に比べて 10 月のガス流速と温度差が大きくなっているということがわかる。N7、N8、PS13 の一部のガス抜き管では 6 月と 10 月でガスの流出と流入が変化していたことが原因でガス流速が小さくなった結果となっている。6 月 18 日の外気温は 22.7℃、6 月 19 日は 18.2℃、10 月 24 日は 13.0℃であったことを考えると、温度差がガス流出の駆動力となっていることが言える。

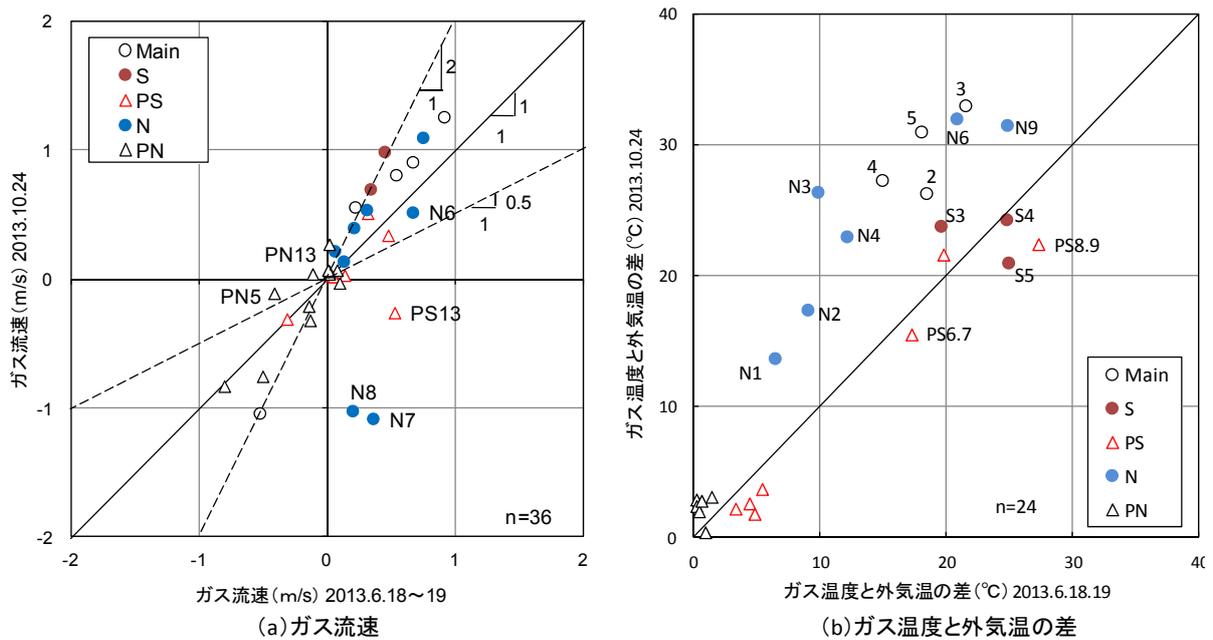


図 3-10 6 月と 10 月における測定結果の比較

3.4 各月ごとのガス温度とガス流速 (2010年～2012年)

本埋立地では臭気監視測定として毎月1回ずつガス抜き管(主管の№1～№9の9本)の出口流速、出口温度を測定している。現地の作業員はすべてのガス抜き管はガスが流出しているとして測定を行っているため、出口流速のデータはあるがいつからいつまでは流入で、いつからいつまでが流出していたかは明らかではない。しかし、№1の管については気象庁による外気温のデータ⁷⁾と出口温度がほぼ同じ動きをしていることから、空気の流入管としてずっと機能していたと考えられる。№1の温度を外気温として、2010年11月～2013年3月までの№2～№9の各月ごとのガス温度とガス流速の変化を図3-11にまとめた。なお、№6～№9は2012年1月～12月まで管径を280mmから50mmに変更していたため、その間の流速、出口温度を白抜きの記号で表した。

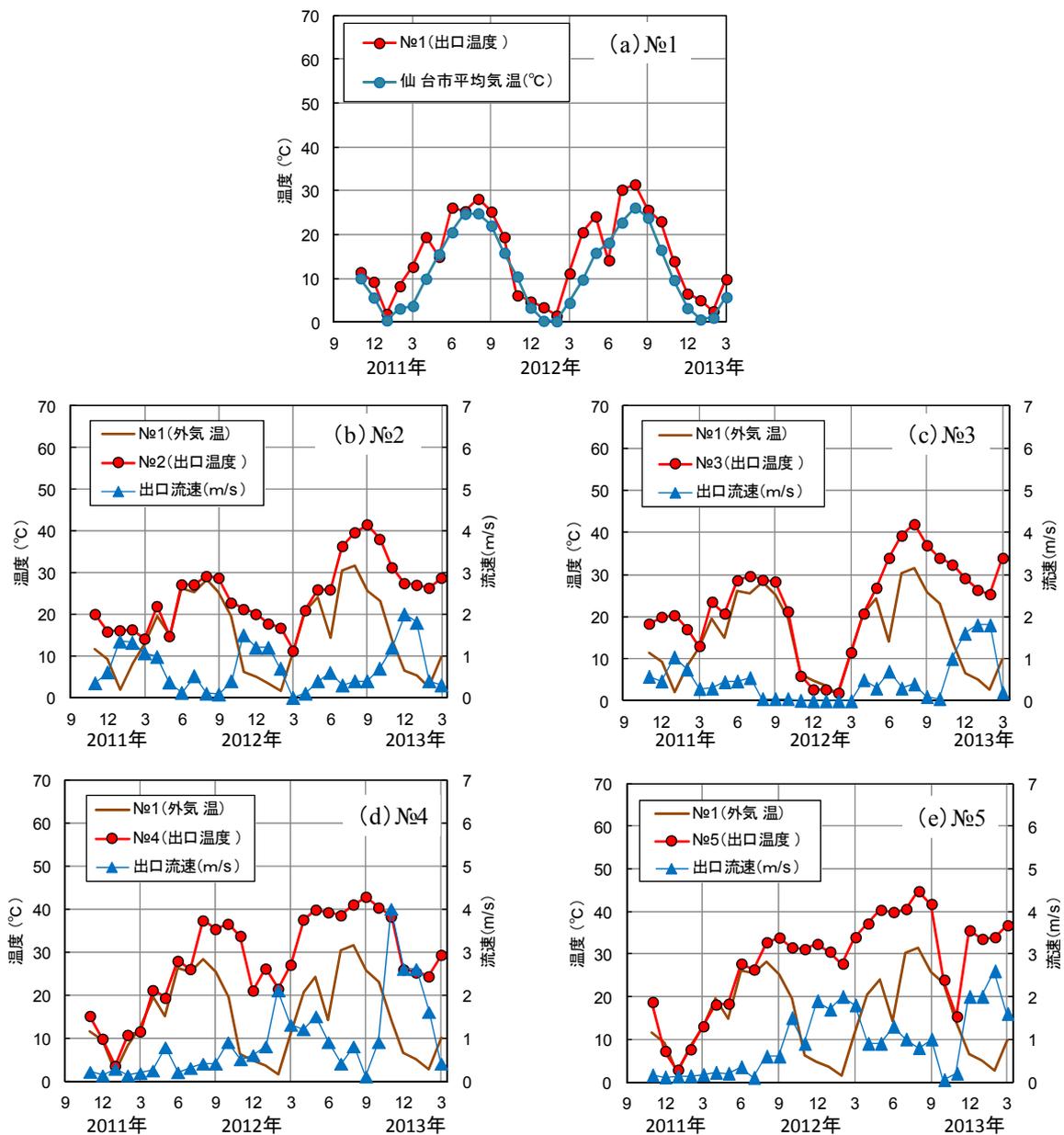


図 3-11 各月ごとのガス温度とガス流速の変化 (2010.11～2013.3)

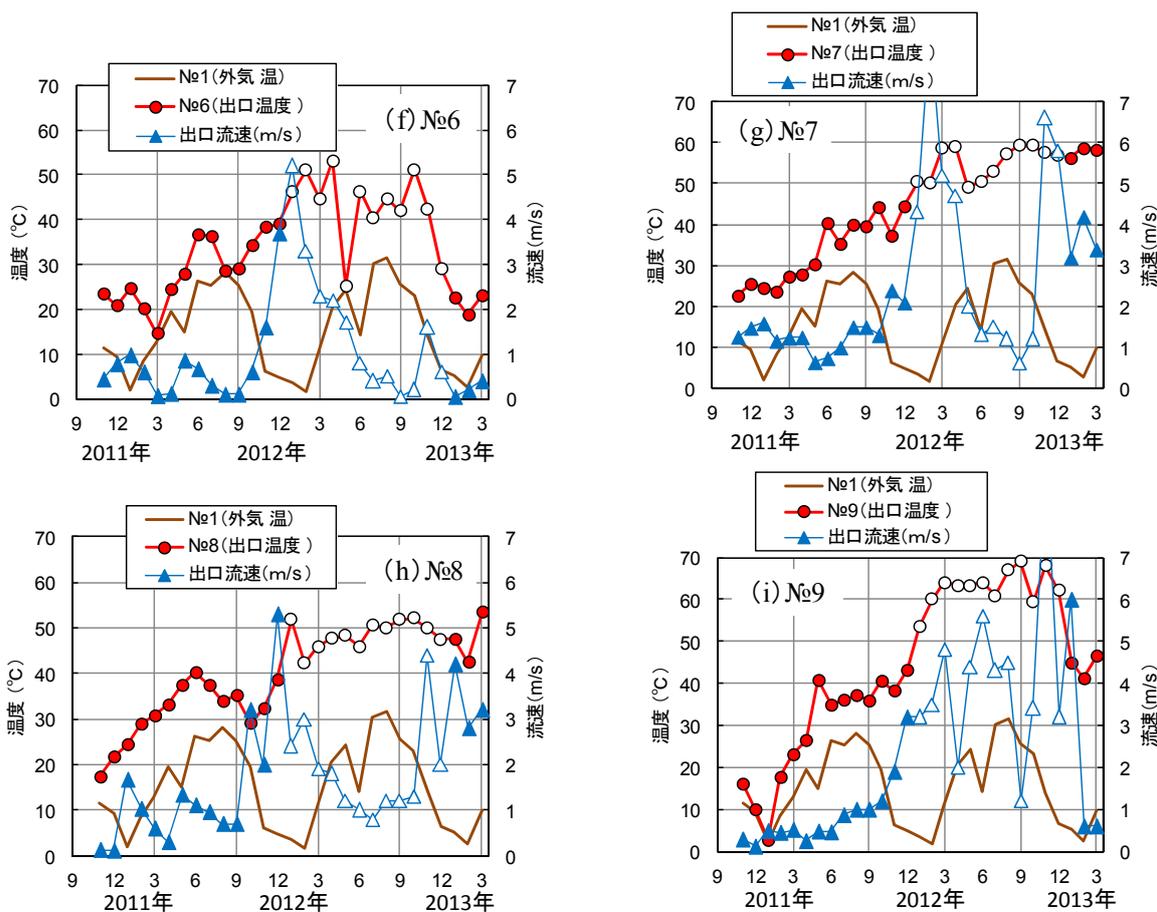


図 3-11 各月ごとのガス温度とガス流速の変化 (2010.11~2013.3) (つづき)

No.2~No.9 の中にはNo.1 の温度と同じ温度を示している月もある。No.2 の 2011 年 3 月~2011 年 10 月、No.3 の 2011 年 3 月~2012 年 4 月、No.4、No.5 の 2010 年 11 月~2011 年 7 月までの出口温度は No.1 の温度と同じ動きをしていることがわかる。No.1 が外気温と考えると同じ温度になっているときはその管も空気の流入管であったということが考えられる。また、No.1 の温度と管の出口温度の差が大きくなると出口流速も大きくなるということも図 3-11 からわかる。とくに外気温の低い 12 月~3 月では温度差が大きくなり、それに伴って出口流速も大きくなっていることもわかる。

図3-11の2011年度の各月ごとの温度、流速を年平均値としてまとめると図3-12のようになる。横軸に温度(°C)、縦軸に流速(m/s)としており、正の相関(温度が高いと流速も大きくなる)があることがわかる。

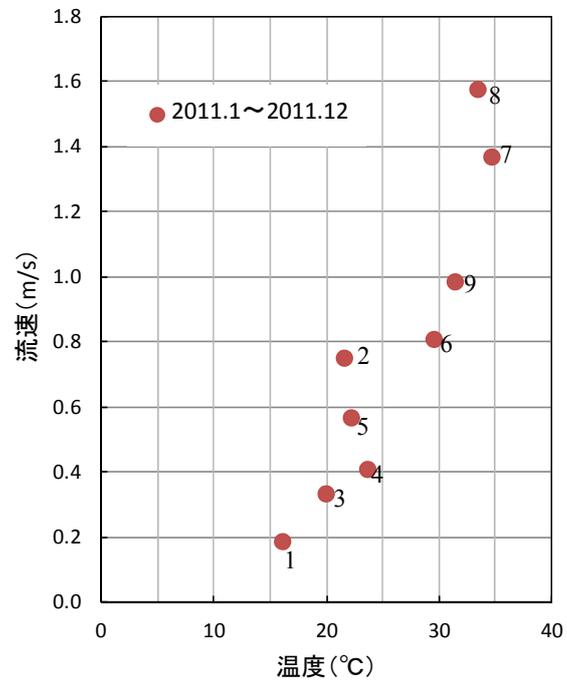


図3-12 年平均値を用いたガス温度とガス流速の関係

3.5 予想されるガス流れのメカニズム

ガス温度が大きいガス抜き管では浮力が働くことで、空気は上へと上昇する。外気温とガス温度の差が大きいほど空気に密度差が生まれ、より大きな浮力となる。つまりガス流出の駆動力は浮力による力であり、埋立地内温度と外気温の差が大きければ浮力も大きくなる。そしてガスが流出することにより埋立地内が負圧になることで周囲（集排水管末端や埋立高さが低い管など）から空気が流入すると考えられる。ガス流れのメカニズムとしては、

- ①微生物により好気分解、嫌気分解が発生し、埋立地内温度（廃棄物層温度）が上昇
- ②温度上昇により浮力がはたらき、廃棄物層内のガスがガス抜き管に向かって流れ、ガスが流出する。
- ③廃棄物層内がガス流出で負圧になり、廃棄物層内に空気が流入する。

という順番で起こっていると考えられる。2013年6月18.19日の調査ではガス抜き管のガス温度が外気温に比べて非常に高いことがわかった。一般的に廃棄物層内は温度が高いため、集排水管末端から流入した空気は廃棄物層内を通過してガス抜き管から流出していると考えられる。

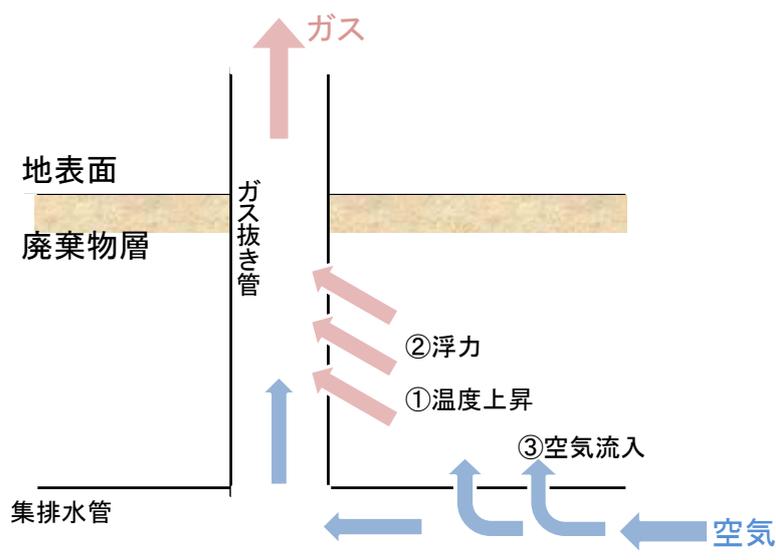
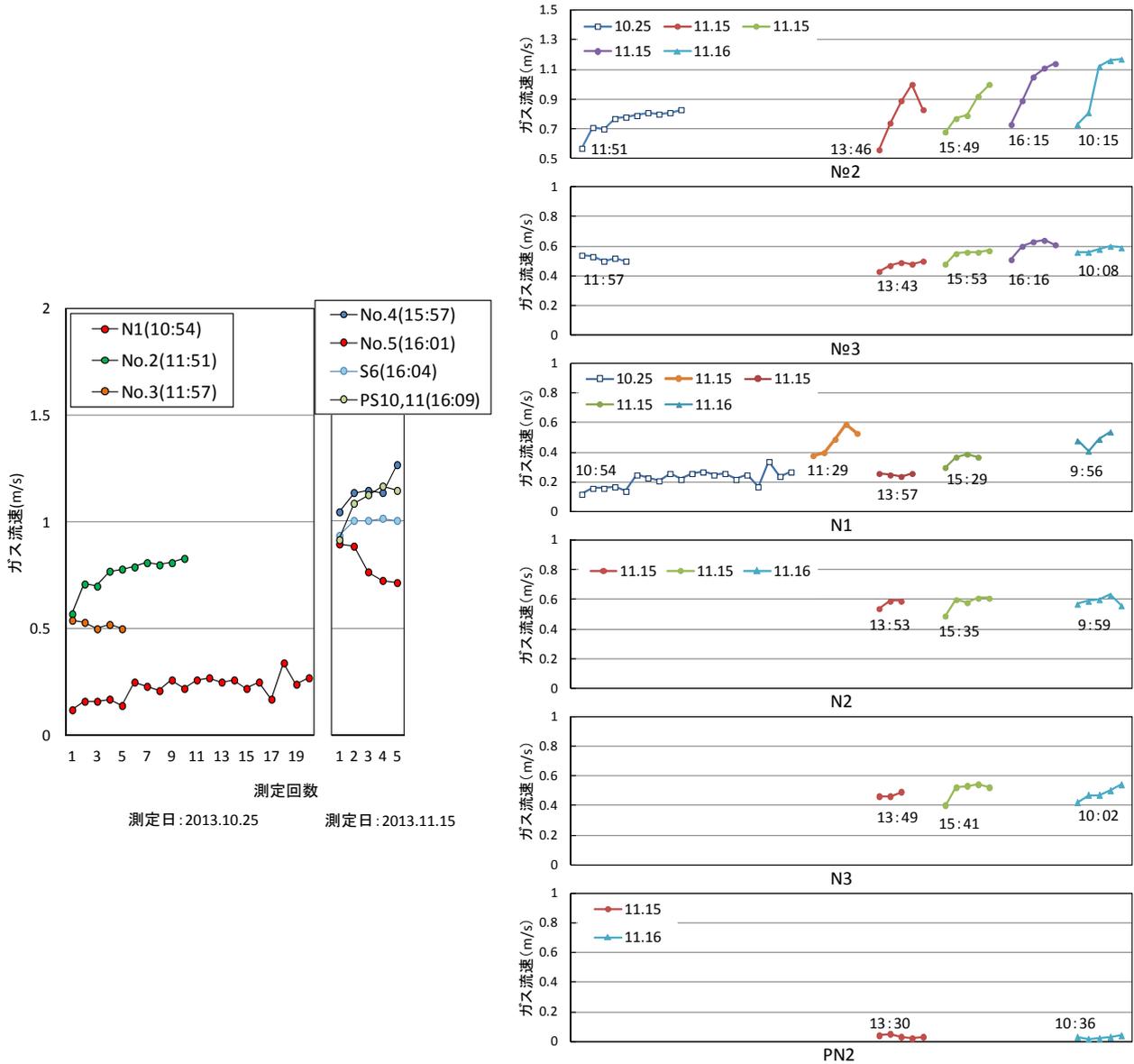


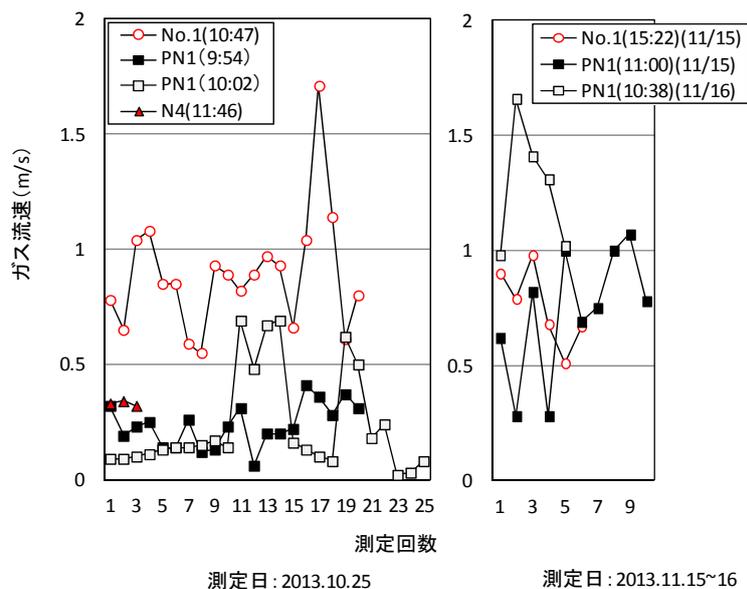
図 3-13 予想されるガス流れメカニズム

3.6 ガス流速の時間変動

6月、10月の調査で煙発生器を用いてガスの流れの向きについて調査していたが、空気の流入管の流れに乱れがあることが判明した。そこで10月、11月の調査ではガス抜き管の流速の連続測定を行った。連続測定を行った管は流入管では№1、PN1、N4であり、流出管では№2、№3、№4、№5、S6、PS10.11、N1、N2、N3、PN2である。測定は10秒平均を連続して5回から多いところでは20回以上行った。図3-14に結果を示す。



(a) ガスが流出しているガス抜き管のガス流速の時間変動



(b) 空気が流入しているガス抜き管のガス流速の時間変動

図 3-14 ガス流速の時間変動

図 3-14 を見てわかるようにガス流出管ではそれほど大きな変動は見られなかった。しかし空気の流入管では大きな変動があることがわかった。そこで煙発生器を用いて流線を調べた(図 3-15)。ガス流出管では流線が管のまっすぐ上に登っているのに対し、空気の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。地上部での空気の流入を防ぐために PN1 のまわりをプラスチックの袋で囲ったが地表下部からの空気の流入が確認できた。したがって空気の流入管の流速測定には誤差があるということが考えられる。また、同じガス抜き管であっても時間や日付が異なることで流速の値が変化することが明らかとなった。

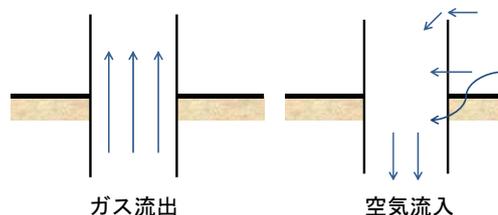
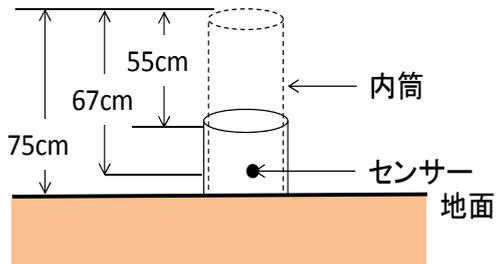


図 3-15 ガス流れの流線

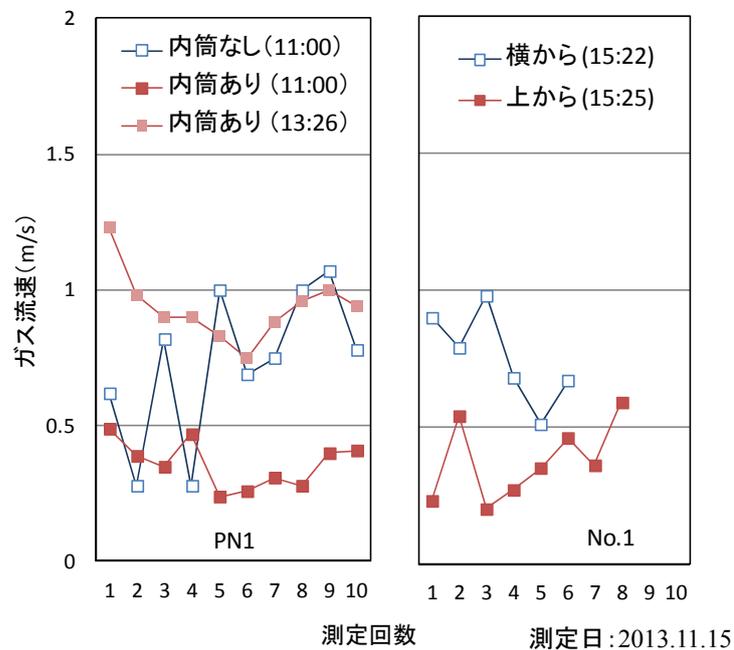
11 月調査では空気の流入管の流速を正確に測定するために PN1 の内部に内筒を入れ、流速の連続測定を行った。№1 の管では管径と地上部に飛び出している部分の高さから内筒を設置することが困難であったため、管中央の内部に流速測定器 (Kanomax 6531) をつるし測定を行った(図 3-16)。№1、PN1 での流速測定の結果を図 3-17 に示す。PN1 では測定を行った時間によって流速に大小の変化はあるが、内筒ありの場合では流速が比較的安定している。№1 では測定時間によって流速の大小の違いはあったが変動の違いは見られなかった。つまり管中央でも管のはじで測定をしても乱れの影響を抑えることはできないということが判明した。



No.1

測定日: 2013.11.15

図 3-16 空気が流入しているガス抜き管の流速測定



測定日: 2013.11.15

図 3-17 PN1、No.1 におけるガス流速の測定

第4章 埋立地内ガス流れの直接測定

4.1 トレーサー応答試験

(1) トレーサー応答試験を行う目的

図3-13に示したように、集排水管末端から流入した空気が廃棄物層を通過しているということが考えられた。この予想をもとに、埋立地内を空気がどのように流れているかを確認するためにトレーサー応答試験を行った。

(2) 測定内容

図4-1に示すように、トレーサーガス注入は№1とPN1から行った。№1は空気の流入量が最も多く、集排水管末端からつながる主管であり、複雑な流れがある。それに対してPN1は管のつながりが単純であり、他の流れの影響を受けない。また、10月、11月調査では集排水管末端が開放されていたために№1へ下部から空気の流入がある。CO濃度測定はGCO2008で連続測定を行い、他のCOガスが流出すると考えられる管についてはGA2000およびGA5000で間欠測定を行った。

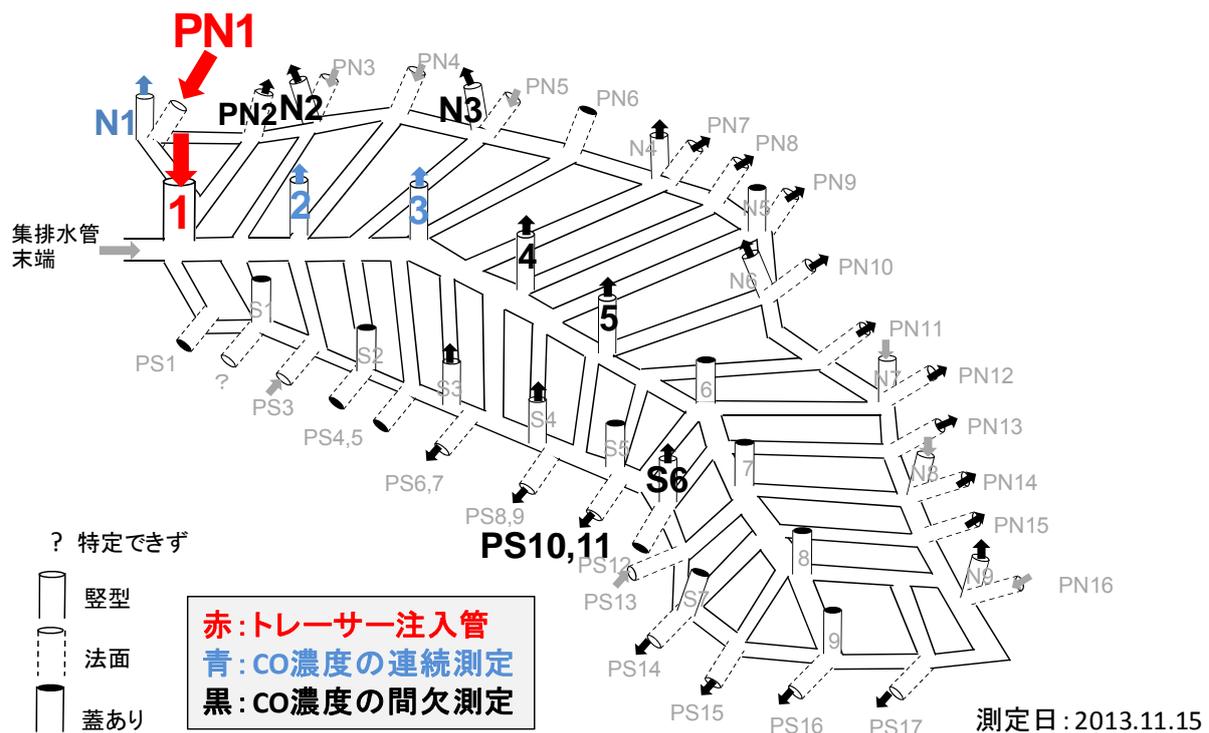


図4-1 トレーサー応答試験のトレーサーガス注入と濃度測定的位置

(3) 滞留時間分布

トレーサー応答試験を行う上で滞留時間分布について知る必要がある。今回、トレーサーガスを空気流入管から連続して注入し、ステップ状に変化を与えた。このとき、図 4-2 に示すように滞留時間分布は以下の 2 つのパターンが考えられる。集排水管、ガス抜き管だけを通してガスが流れる場合、出口ガス濃度は①のように遅れを伴って急激に上昇し、一定の値となる。一方で、②のように滞留時間に分布があるならば、管のみを通して経路だけではなく、他の流れの経路が考えられる。このように滞留時間分布から埋立地内のガス流れについて考えることができる。

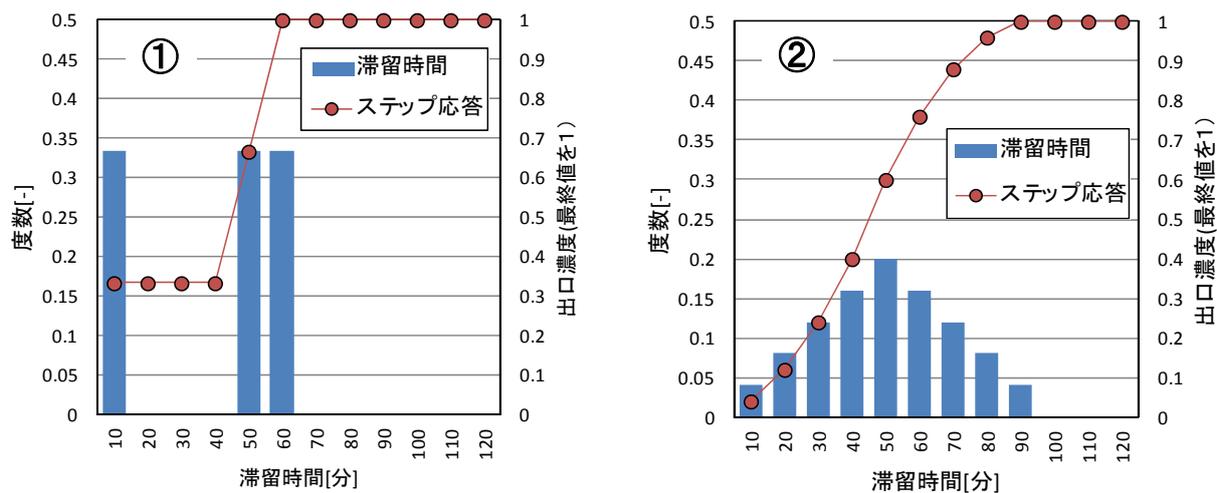


図 4-2 ステップ応答と滞留時間分布の関係

4.2 埋立地内のガス流れ調査

4.2.1 予備実験

(1) №1 におけるトレーサー応答

№1 ではトレーサーガス (CO : 濃度 100%) を流量 10L/min で 16 時 4 分から注入した。図 4-3 に、№1 でのトレーサー応答試験の結果を示す。注入した CO ガスは約 2 分後に№2、№3 から流出し、その後ゆっくりと CO 濃度が上昇した。№4、№5、N1、N2、N3 でも CO 濃度を測定したが、N1 を除くすべてのガス抜き管からは CO ガスが検出された。

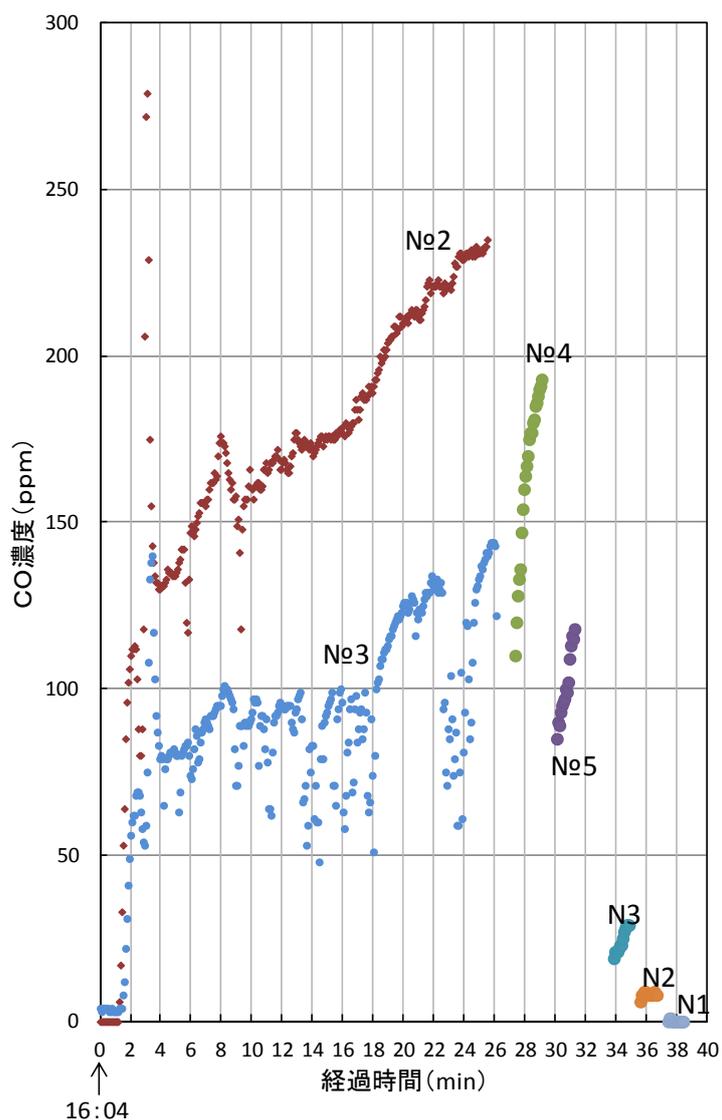


図 4-3 №1 におけるトレーサー応答試験 (2013.10.24)

(2) PN1 におけるトレーサー応答

10時26分からCOガスを流量5L/minで注入を開始したところ急激に濃度が上昇し、CO濃度の連続測定器（GCO2008）の測定範囲（0～1100ppm）を超え、値が振りきれてしまった。注入開始54分後に注入流量を2L/minに変更し測定を行ったが、値は振り切れたままであった。その後、注入開始から80分後にCOガスの注入を停止し、CO濃度の連続測定は注入を停止してから約90分間継続した。

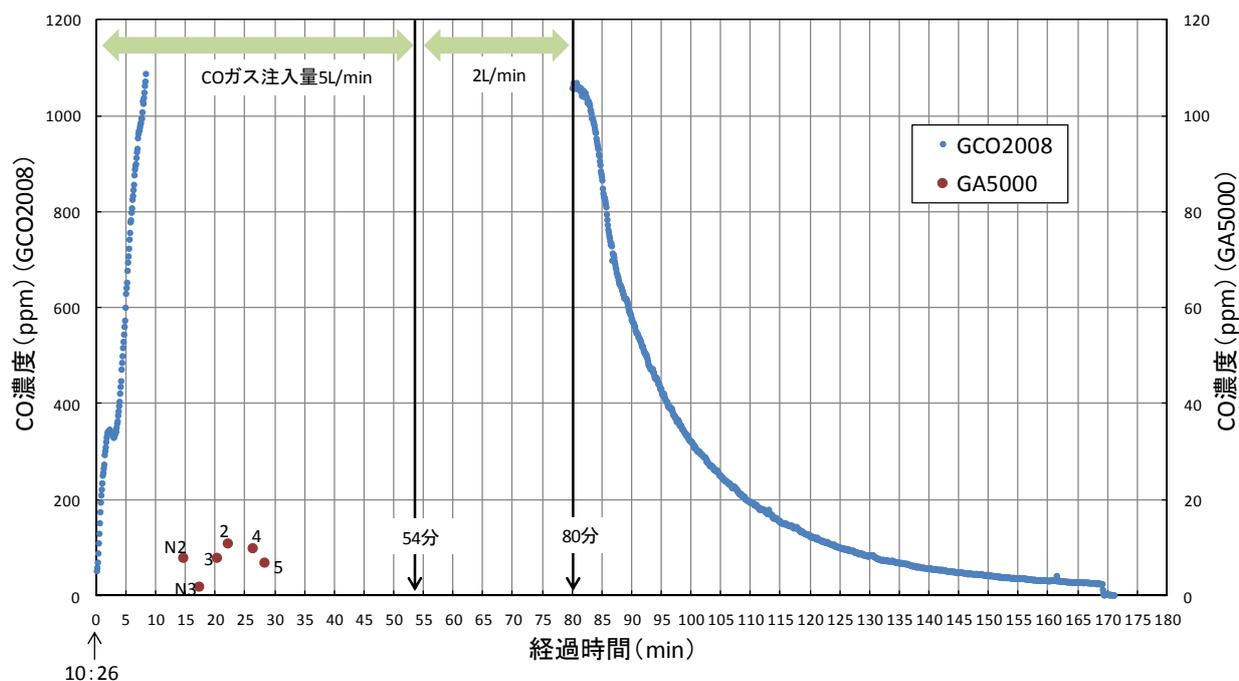


図 4-4 PN1 におけるトレーサー応答試験 (2013.10.25)

COガスの注入の停止は負のステップ応答にあたる。トレーサーガスがガス抜き管のみを通過するならば、トレーサーガスの注入を停止すると出口ガス濃度もすぐにゼロとなるはずである。しかし、図4-4ではCOガスの注入を停止してからも約90分間、COガスの応答があることからガス抜き管以外の経路がある。すなわち埋立地内の廃棄物層を通過してガスが流出していることを示している。曲線の形状はほぼ一次遅れに近似できると思われる。最終値の63.2%に達する時間を時定数とすると約15分である。

以上の調査からガス抜き管から流入した空気が集排水管を通り、別のガス抜き管から流出していること、COガス注入流量の調整を行う必要があること、CO濃度の連続測定は90～120分程度行えばいいということが明らかとなった。

4.2.2 本実験

(1) CO ガスの注入流量の設定

CO ガス注入流量が測定範囲 (0~1100ppm) になるように濃度を設定した。濃度は CO ガス注入量と CO ガス注入を行うガス抜き管の空気の流入量から計算される。CO ガス濃度は $100\% = 10^6 \text{ppm}$ より、

$$\text{CO 注入流量 (m}^3/\text{min)} \times \text{入口濃度 (ppm)} = \text{注入管の空気流入量 (m}^3/\text{min)} \times 10^6 \text{ (ppm)}$$

として計算で求まる。測定日の№1 と PN1 の空気の流入量は図 3-17 の CO 濃度の測定時間に近い値を用いるとそれぞれ $12.8 \text{m}^3/\text{min}$ と $1.33 \text{m}^3/\text{min}$ である。№1 での CO ガス注入量を $10 \text{L}/\text{min}$ として計算から $10000/1.33 = 781 \text{ppm}$ が求まる。同様に PN1 の CO ガス注入量を $1.0 \text{L}/\text{min}$ とすると、 $1000/1.33 = 750 \text{ppm}$ である。

(2) CO 濃度の測定

PN1 は N1 へ単純な接続であることから、N1 で CO 濃度の連続測定を行った。PN1 へ流入したガスの到達範囲を調べるために近傍のガス抜き管でも CO 濃度の測定を行った。また、PN1 では管に内筒を設置した (図 3-16) ことで空気の流入量は安定していたことから、CO ガス注入管の入口濃度の測定も行った。

№1 では直近のガス抜き管である№2 と№3 で CO 濃度の連続測定を行い、同じく集排水管 (主管) とつながっている№4、№5 については時間間隔をおいて GA2000 で CO 濃度を測定し、濃度が増加しているかを確認した。また、№1 に注入した CO ガスの到達範囲を調べるためにその他のガス抜き管で CO 濃度の測定を行った。№1 では入口濃度の測定は管径が他の管に比べて大きく、管の周りからの空気の流入を防ぐことが困難であったため、CO 濃度を正確に測定することができなかった。

(3) 全体の調査スケジュール

本実験の調査スケジュールを表 4-1 に示す。

表 4-1 本実験の調査スケジュール

	測定時間	経過時間 (min)	CO流量 (L/min)	GCO2008		GA2000	詳細
PN1へ注入	11:36:00	0	1.0L/min	N1	-	-	注入開始
	12:06:17	30			-		食事へ
	13:18:54	103			PN1		600ppm
	13:33:59	118			PN2		110ppm
	13:43:30	128			No.3		0ppm
	13:47:09	131			No.2		0ppm
	13:52:00	136			N3		0ppm
	13:55:00	139			N2		70ppm
	13:57:00	141			N1		265ppm
	13:59:20	143			-		注入停止
No.1へ注入	14:29:00	0	10L/min	No.2	No.3	-	注入開始
	14:53:42	25				No.4	160ppm
	15:00:55	32				No.5	117ppm
	15:07:14	38				S6	25ppm
	15:29:57	61				N1	37ppm
	15:31:05	62				N2	85ppm
	15:41:31	73				N3	0ppm
	15:49:39	81				No.2	330ppm
	15:53:40	85				No.3	260ppm
	15:57:33	89				No.4	215ppm
	16:01:06	92				No.5	139ppm
	16:04:40	96				S6	39ppm
	16:09:15	100				PS10,11	75ppm
	16:30:00	121				-	注入停止

2013.11.15

(4) №1 おけるトレーサー応答試験

№1 でのトレーサー応答の結果を図 4-5 に示す。No.1 では CO ガス流量を 10L/min で注入し、CO ガス注入後、約 110 分間連続測定を行った。下図に示すように、CO ガス注入後、約 1~2 分後に CO 濃度が上昇し、その後はゆっくりと濃度が上昇している 2 段階の応答となっている。管だけを通してガスが流れているとすると、トレーサーガス注入を開始してから CO 濃度はすぐに上昇し、一定の値となるはずである。このことから A 集排水管、ガス抜き管のみ経路のガス流れと B 集排水管→廃棄物層→ガス抜き管経路のガス流れがあるといえる。

また、№2、№3 では A と B の濃度比が 1 対 1 となっていることから、A と B の流量は 1 対 1 であるといえる。また、№1 での入口濃度は計算値で 781ppm であったことを考えると№2、№3 はともに約 5 分の 2 に希釈されてガスが流出していることがわかる。CO ガス濃度の希釈が存在することから、埋立地の斜面などから空気が流入する、C 周辺→ガス抜き管経路のガス流れが存在するといえる。

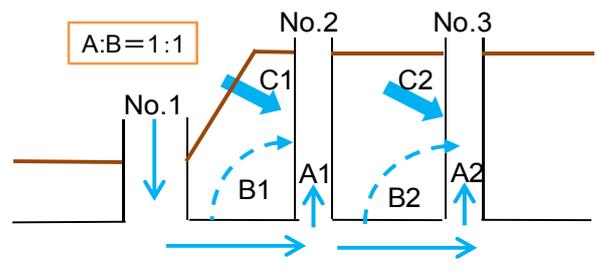
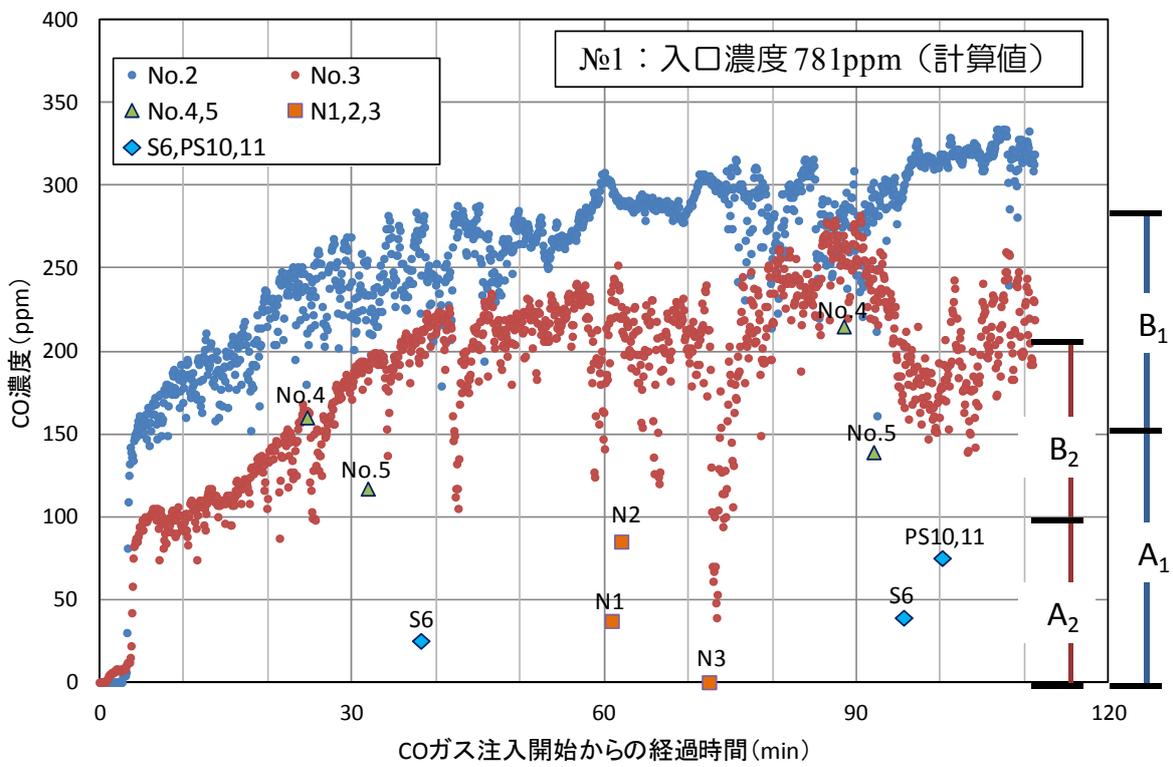


図 4-5 №1 におけるトレーサー応答試験 (2013.11.15)

(5) PN1 おけるトレーサー応答試験

PN1 でのトレーサー応答の結果を図 4-6 に示す。PN1 では CO ガスを流量 1.0L/min で注入した。CO ガス注入後、約 140 分間連続測定を行った。下図に示すように、N1 では CO ガスを注入してから約 5 分後に濃度がゆっくりと上昇し、上下に値は振れているが約 200ppm で安定している。N1 では No.2、No.3 とは異なり 1 段階の応答となっている。管のみを通過した時のように濃度の急激な上昇はないことから A ガス抜き管経由の流れが少ないことがわかる。

また、入口濃度の約 600ppm に対して N1 は約 200ppm と約 3 分の 1 に希釈されていることがわかる。このことから、C 周辺→ガス抜き管という流れが N1 からのガス流出量の約 3 分の 2 あるということが言える。

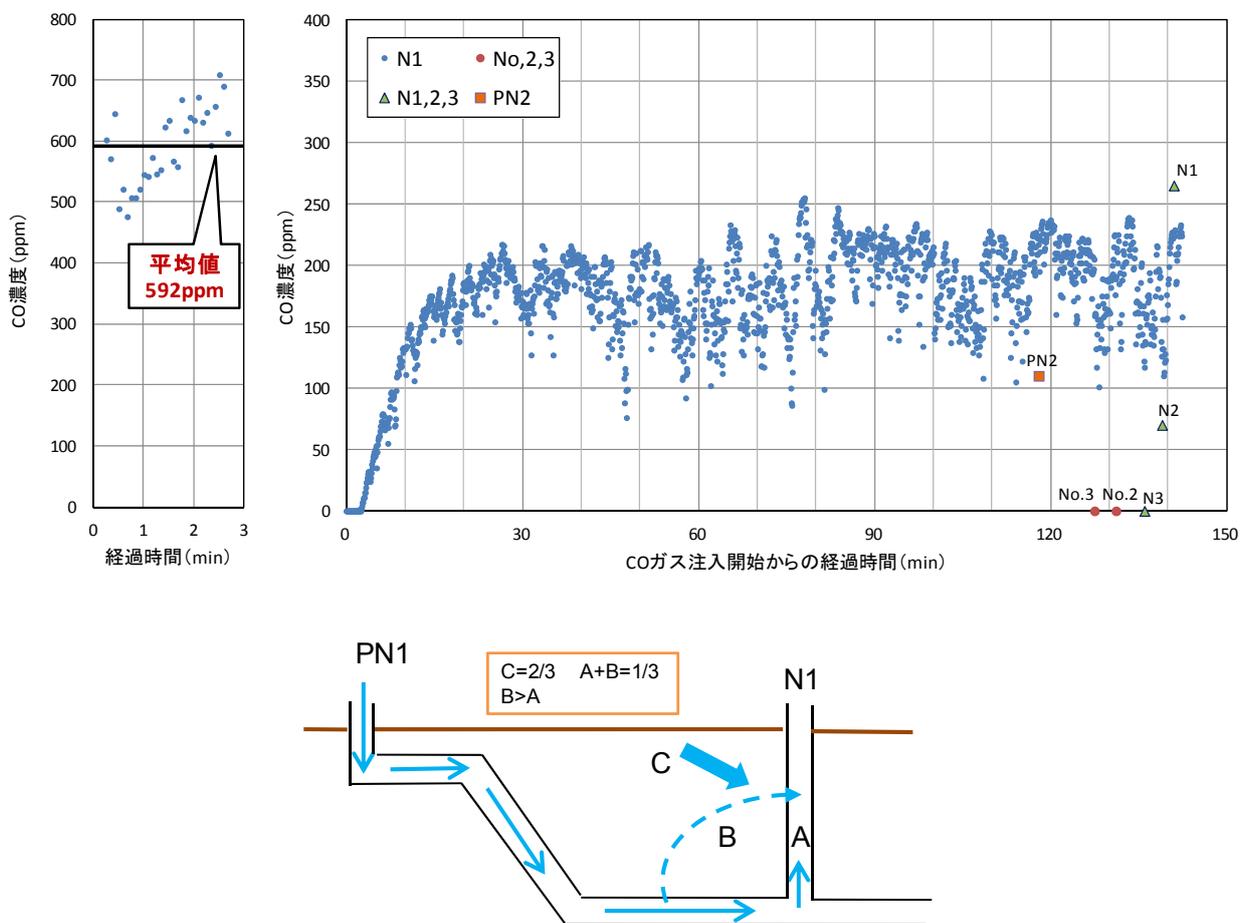


図 4-6 PN1 におけるトレーサー応答試験 (2013.11.15)

(6) №2、№3、N1 における滞留時間分布

№2、№3 と N1 の応答の滞留時間分布を図 4-7 に示す。滞留時間分布は CO ガスを注入してから 1 時間後の CO 濃度を最終値としてまとめたものである。実際の CO 濃度は上下に大きく振れているが上昇していることからグラフ上で 2 分間ごとの中間値を取り、赤線で表した。№2、№3 とともに応答は 2 段階であることから図 4-5、4-6 に示した A 経由の流れでガスが先に流出し、その後、廃棄物層を経由した B の流れのガスが流出していると考えられる。

N1 は№2、№3 とは異なり、1 段階の応答であり、注入後の濃度はゆっくりと時間をかけて上昇している。滞留時間分布は対数正規分布となっている。このことから管のみを通過する流れ以外の流れ、つまり廃棄物層を通過する流れが多く存在することがわかる。

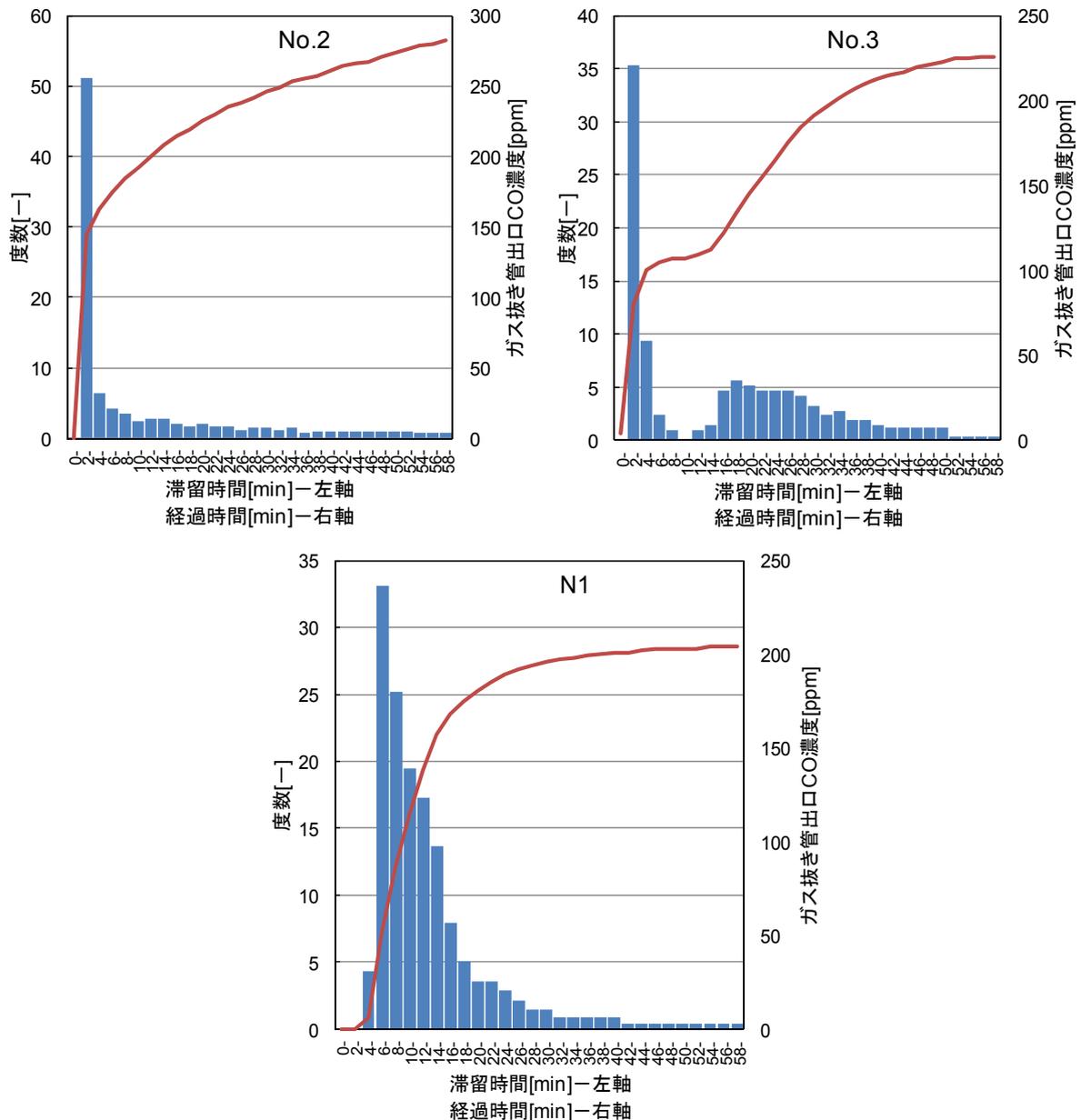


図 4-7 滞留時間分布 (№2、№3、N1)

(7) 流入空気の到達範囲

№1 のトレーサー応答試験では№2、№3 での連続測定のほか、№4、№5、S6、PS10.11、N1、N2、N3 では GA2000 を用いて CO 濃度測定を行った。また PN1 でのトレーサー応答試験は N1 での連続測定のほか、№2、№3、N1、N2、N3、PN2 で GA2000 を用いて CO 濃度測定を行った。これらの図 4-5、図 4-6 の結果から№1、PN1 に流入した空気は図 4-8 のように流れているということが明らかとなった。№1 からもっとも遠くの S6 までは直線距離で約 182.8m である。№1 へ流入した空気はほぼ埋立地全体へ行き渡っているということが明らかとなった。

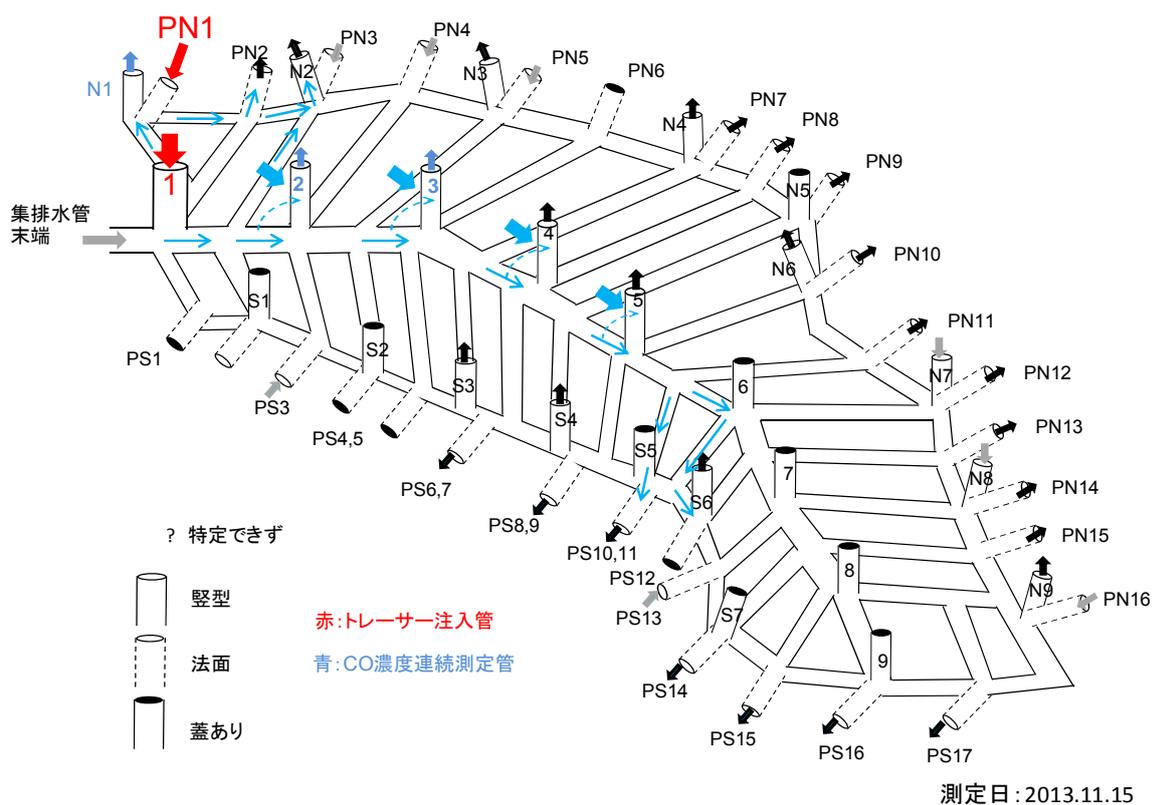


図 4-8 流入空気の到達範囲

4.3 温度の連続測定

トレーサー応答試験により図 4-5、図 4-6 から埋立地ガス流れに A、B、C の 3 つの流れがあると考えられた。3 つの流れの中で外気温の変化に依存するのは A の流れのみである。そこで 11 月の調査では CO 濃度の連続測定を行った管で出口ガス温度と外気温の連続測定を 11 月 15～16 日にかけて行った。測定はデジタル温湿度計 CENTER314 MK Series (図 4-9) で連続測定を行った。図 4-10 に結果を示す。20 時間からその後にかけて外気温が上昇しているのは日射の影響が大きい。とくに 2 日間の外気温は平均して 10℃前後だったことから、最後の温度上昇は日射の影響を受けてしまっているといえる。図 4-10 からは外気温の変化に対してガス温度はほとんど変化していないように見える。しかし、外気温は 0～35℃、ガス温度は 5℃前後しか変動がないことから図 4-11 に示すように尺度を変えると外気温の変化に伴ってガス温度も変化しているということがわかる。

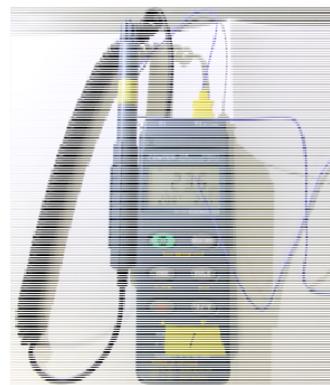


図 4-9 デジタル温湿度計
CENTER314 MK Series

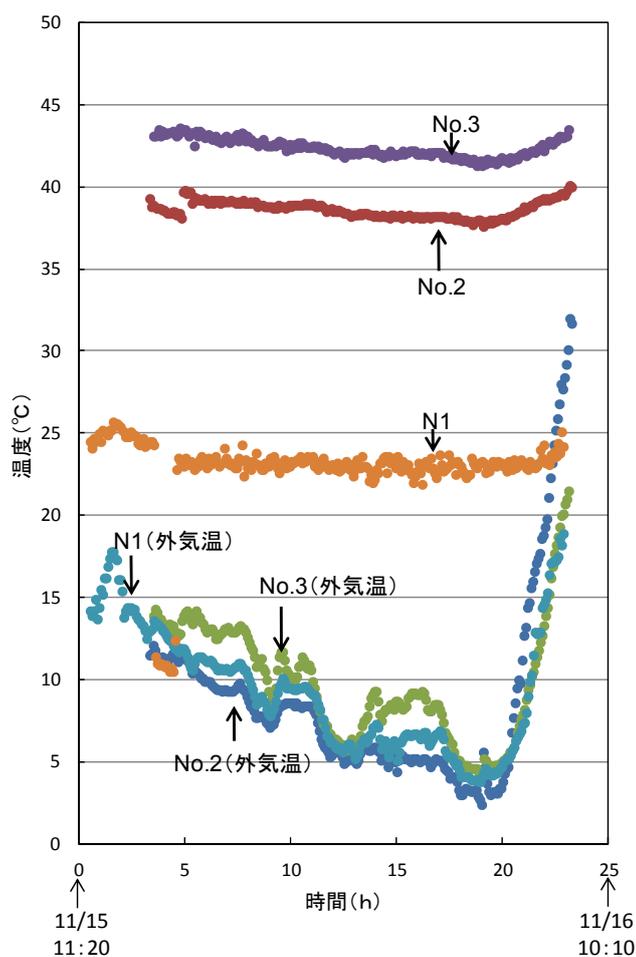


図 4-10 温度の連続測定 (No.2、No.3、N1)

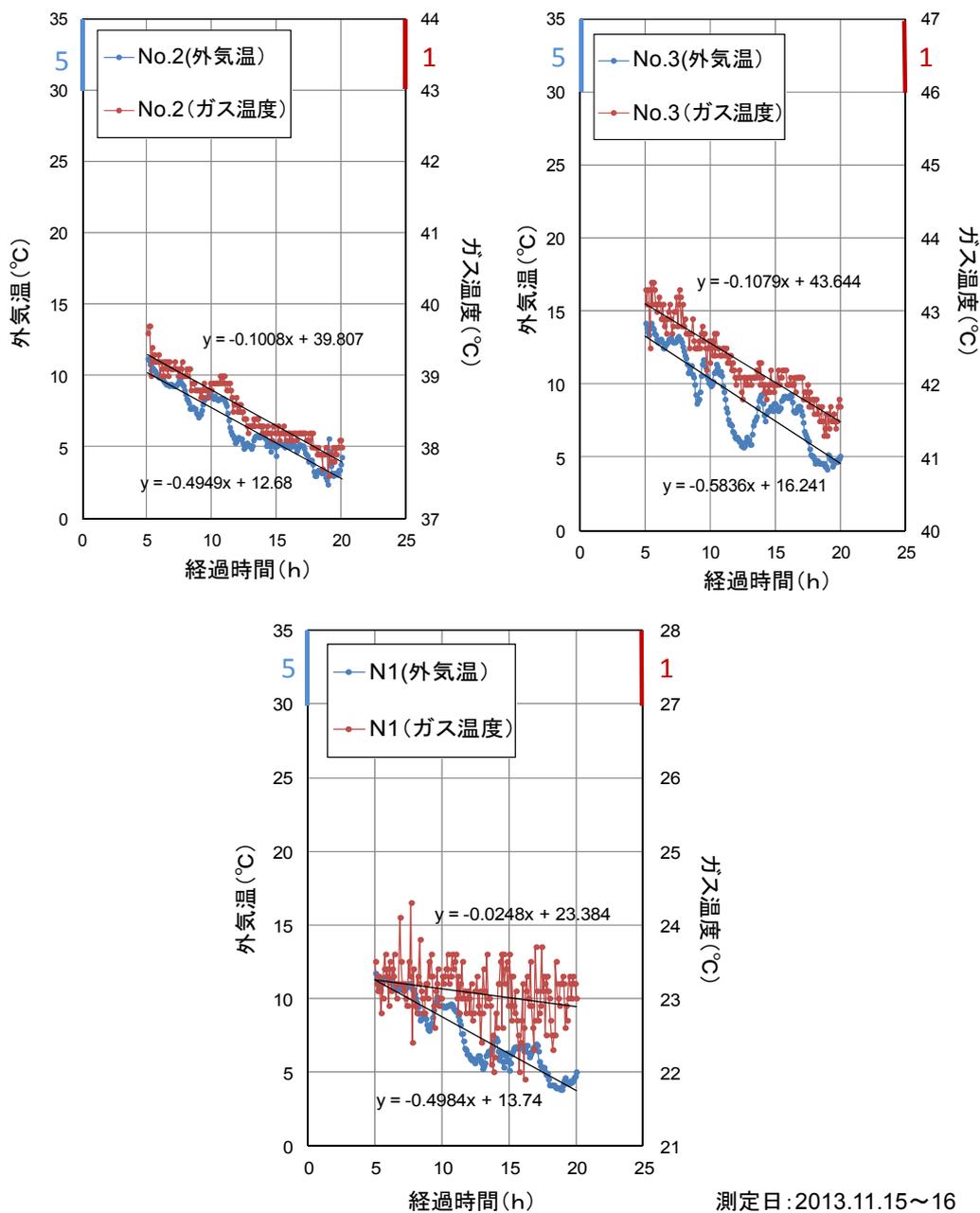


図 4-11 №2、№3、N1 のガス温度と外気温の関係

№2、№3 は外気温が下がるとガス温度も下がるという相関関係がある。図 4-11 から№2 と№3 のそれぞれの外気温とガス温度の傾きの比率を求めると、ともに約 5 分の 1 は A の流れであることがわかる。これに対して、N1 は外気温の変化に対してガス温度の変化は小さく、外気温とガス温度の傾きの比率を求めると約 20 分の 1 とほぼ A の流れがないことがわかる。N1 では B と C の流れの割合が大きいと言える。以上のように外気温とガス温度の関係から埋立地内のガス流れである A、B、C の比率が明らかとなった。

4.4 №2 と №3 の CO 濃度の関係

図 4-5 における №2、 №3 の CO 濃度連続測定の結果より、全体の変動の傾向を読み取るために CO 濃度の上昇がほぼ安定した 56 分からの値で 20 分間の移動平均を求めた (図 4-12)。移動平均とは一定区間における平均を取ることであり、細かい変動を取り除くことで全体の変動を読み取ることができる。下図のように №2 と №3 の間には、 №2 の CO 濃度が上昇すると №3 の CO 濃度が減少するという関係が見られる。 №2 と №3 は隣接するガス抜き管であることから、互いのガス流出の影響が大きいことがわかる。また、変動の周期には規則性がないことも明らかとなった。

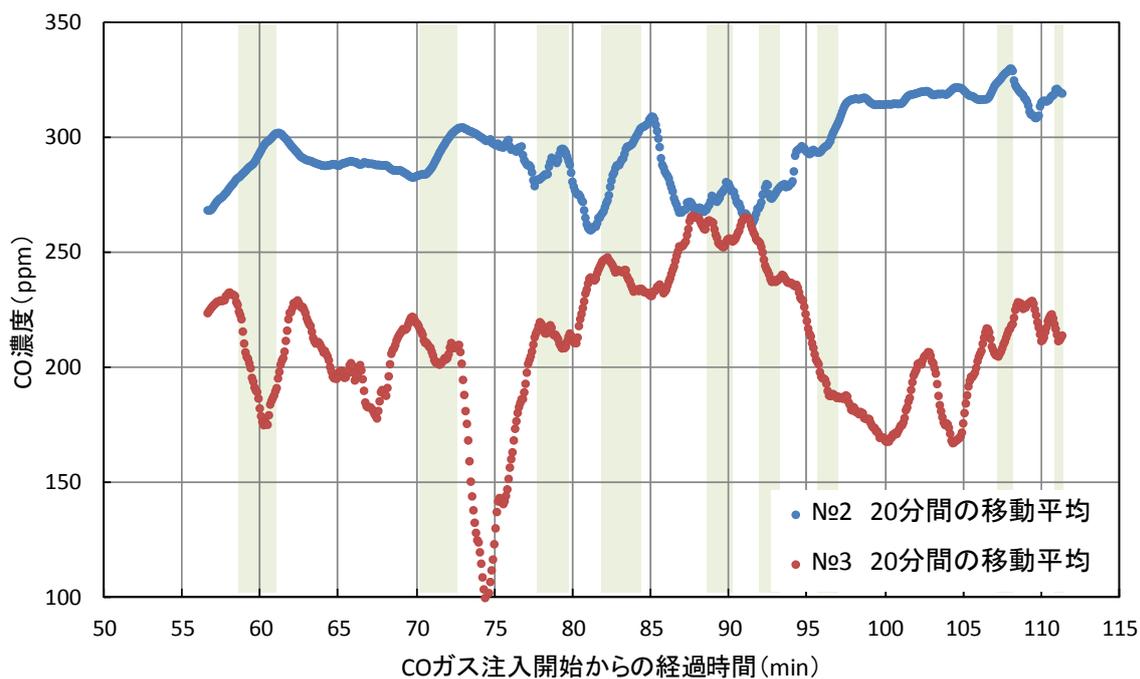


図 4-12 №2 と №3 の CO 濃度変化の関係

第5章 まとめ

5.1 準好気性埋立の歴史^{8) 9) 10) 11) 12)}を要約

5.1.1 準好気性埋立構造が誕生するまで

かつて埋立地は日本の経済成長とともに多く設置されていったが、ハエやカラス、ネズミなど環境汚染の主体であった。また埋立地では火災が常時発生し、作業員は火消し隊員の役割や、周囲の農地への浸出水の対策を行わなければならなかった。これらの対策も対症療法的なものしかなく、埋立地の基礎知識もまだ発展していなかったためどうしようもない状態であった。1966年秋ごろから福岡大学、花嶋正孝らによって好気性埋立に関する研究が行われ、1967年春から福岡大学屋内にて木製の埋立模型槽(1号プラント)を作成し、生ごみを充填した後ごみ層にブロワーで空気を送入し、浸出水の良質化を目的とした好気性埋立のモデル実験を行った。その後、1970年に屋外でかつ鉄筋コンクリートの大型埋立模型槽(2号プラント)が福岡市の八田埋立地の一角に作られた。2号プラントでは浸出水の量や水質を調査するために嫌気性埋立に集排水管を設置した構造であった。1972年7月には小型埋立模型(3号プラント)の実験により好気性埋立と嫌気性埋立の浸出水などの調査を行った。これらの研究から埋立地をひとつの巨大な浄化槽と見立てコントロールする基本概念が少しずつ確立していった。



図5-1 久山埋立場における現場実験(4号プラント)⁸⁾

1973年4月から福岡市の部地区にある久山埋立地で現場スケールの大型埋立模型槽(40m×40m×5m)(4号プラント)で実験を行った。この実験の主目的は現地スケールの実験槽で、生ごみ主体の埋立地に空気をブロワーで強制通気することによる埋立廃棄物の早期分解と浸出水の水質の浄化ならびに浸出水量の把握であった。結果としては、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ものであった。このとき「普通埋立」と称していた嫌気性埋立に集排水管を設置した構造の大型実験槽の浸出水が小型模型槽で確認していた水質よりも遥かに良質で推移していた。本来、小型模型槽に比べて浸出水の水質が良質になることは実験として失敗であった。しかし、このことから集排水管の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のではないかと考えたのである。このことから1974年5月～1975年4月に久山埋立場で現場実験を行った(図5-1)。

これまで行われてきた過去の埋立地のデータを整理したところ、埋立構造と浸出水の水質には関係があることが明らかとなった。埋立構造についての概念が確立されてなかった中で、埋立地の微生物環境に注目して埋立構造を5つに分類した(図5-2)。図5-2からわかるように当初の準好気性埋立構造は改良型嫌氣的衛生埋立の集排水管の末端を常時開放した構造であった。

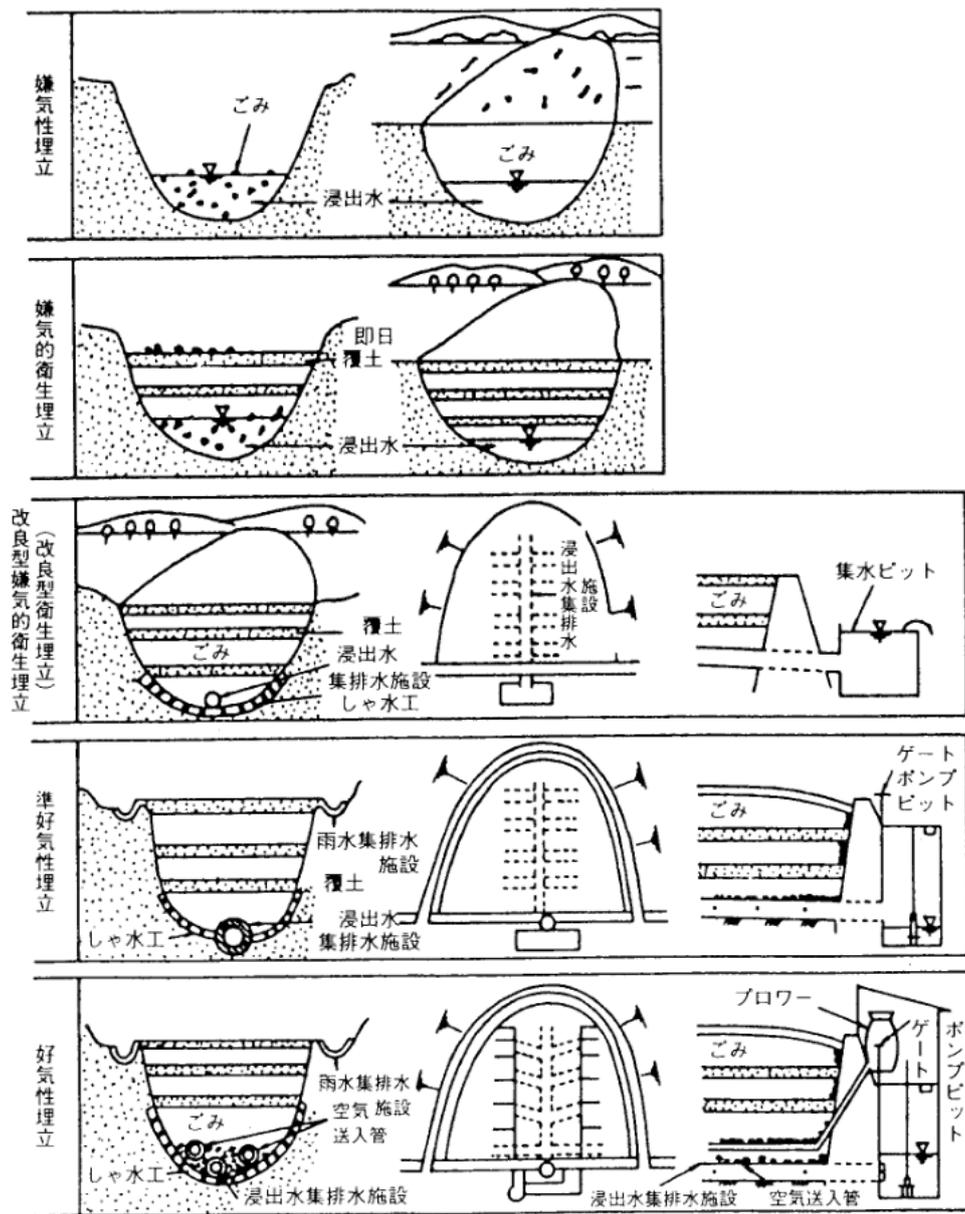


図5-2 埋立構造の分類⁹⁾

また、埋立構造の現場と模型の浸出水の BOD の経時変化をまとめると図 5-3 のようになる。図 5-3 に示すように嫌気性に比べて準好気性埋立は埋立地の早期安定化に効果があることが明らかとなった。

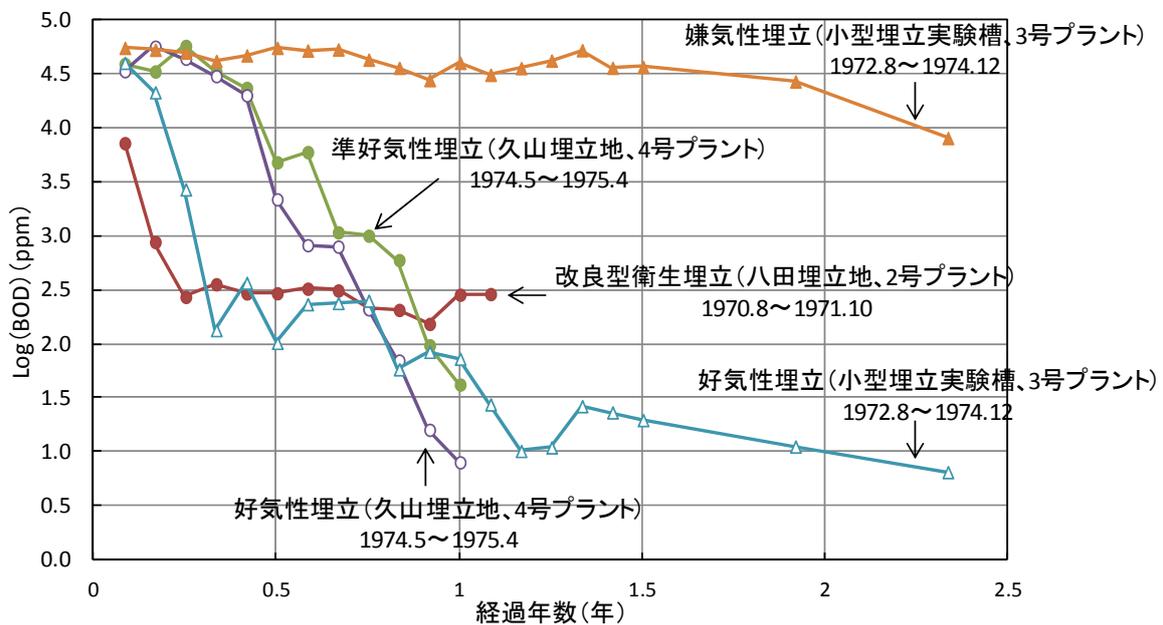


図 5-3 埋立構造の違いによる BOD の変化¹⁰⁾ のデータから作成

以上のことから福岡市では 1975 年に新蒲田埋立場で日本で初となる準好気性埋立地が実用化された (図 5-4)。それ以降、全国で準好気性埋立が採用されるようになり、埋立地は単なる投棄場としての役割だけではなく、早期安定化を図る浄化槽の役割を果たすことが明らかとなり、積極的に廃棄物を分解させるために研究が行われるようになった。



図 5-4 日本初の準好気性埋立 (新蒲田埋立場)⁸⁾

5.1.2 どのようにしてガス抜き管が導入されたか

本来、準好気性埋立は「廃棄物の微生物分解に伴って発生した熱で埋立地内の温度が上昇した結果、内部温度と外気温の差によって生じる熱対流により、空気（酸素）が集排水管を通して埋立地内部へ導入される機能を有する埋立構造のこと」⁹⁾ であり、ガス抜き管を集排水管と連結する構造ではなかった。1975年に初めて準好気性埋立構造が採用された後、更に詳しく準好気性埋立について研究するために福岡大学では7号プラント（1977.8～1978.7）、10号プラント（1978.6～1981.12）の小型埋立模型槽を用いて研究が進められた。この小型埋立実験槽（7号、10号プラント）では集排水管の末端を常時開放し、内部に空気を流入させる構造を準好気性埋立として実験を行ったため、鉛直方向のみの空気の流れしか考えていなかった。これらの研究結果から準好気性埋立の詳しい安定化のメカニズムや安定化促進の効果が得られた。その後、日本の各自治体で準好気性埋立構造が採用されるようになり、埋立地の施設設計面での具体的な技術資料が蓄積するようになってきた。

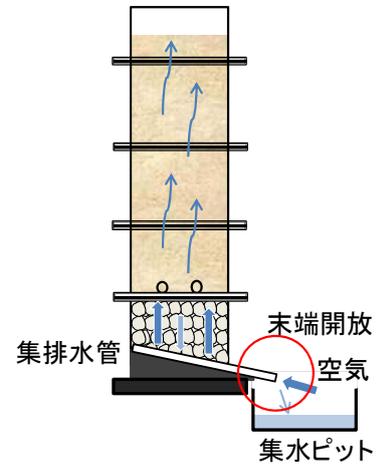


図 5-5 小型埋立実験槽での準好気性埋立構造¹²⁾

その後、日本は経済成長とともにごみの発生量の増加し、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するということが起こった。とくに埋立層が深くなる場合を考え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った。そのため、埋立層が深いときには集排水管だけではなく集排水管に接続する竖みぞやガス抜き管、法面に蛇かごなどを設置して埋立層内の好気領域を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。つまり、ガス抜き管は集排水管の鉛直方向への延長と考えられており、管から廃棄物層内に空気を供給すると考えられていた。このようにして集排水管とガス抜き管を連結する構造へと変化していったのである。

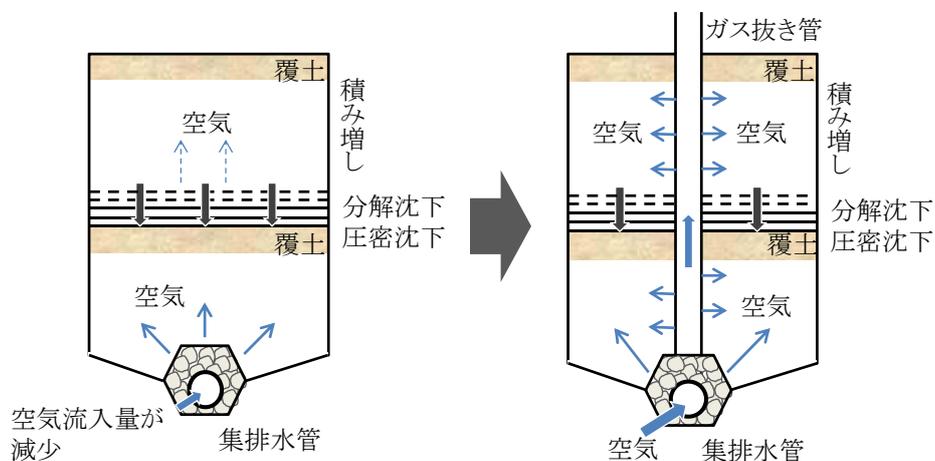
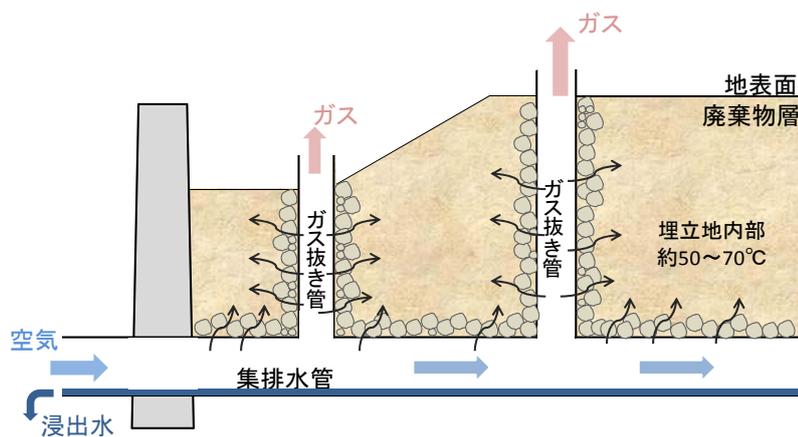


図 5-6 準好気性埋立のガス抜き管導入までの流れ⁹⁾

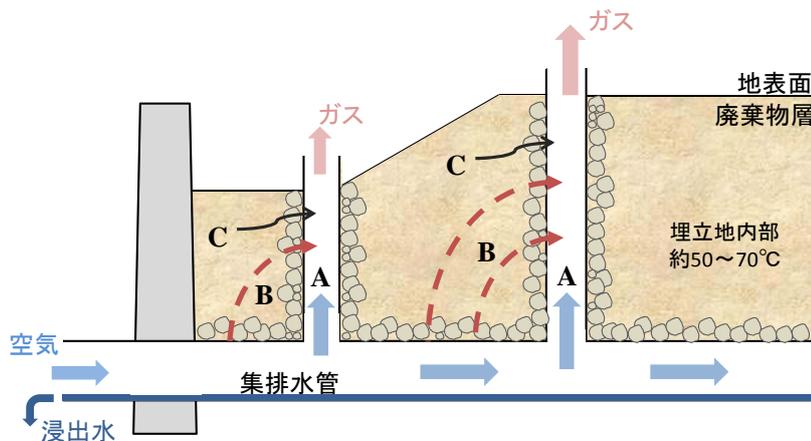
5.2 本研究のまとめ

埋立地を早期に安定化することは環境へのリスクを軽減し、かつ維持管理費の削減にもつながる重要なことである。埋立地を好氣的に保つことは廃棄物を積極的に分解し、早期安定化につながるということから、日本では建設費や維持管理費を考慮して「準好氣性埋立構造」が多く採用されてきた。準好氣性埋立構造は本来、ガス抜き管は存在せず、集排水管の末端の常時開放によって埋立地内部に空気を流入させ、早期安定化を促進する構造であった。しかし、埋立地の大型化や廃棄物の積み上げにより空気の流入量が減少したため、鉛直方向への集排水管の延長としてガス抜き管を連結する構造へと変化していった。そのため、集排水管とガス抜き管から廃棄物層内に空気を供給し、埋立地をより好氣的に保つという考えであった。

本研究により、集排水管末端や一部のガス抜き管から埋立地内に流入した空気は管を通過するだけではなく、廃棄物層内を通過してガス抜き管に集まることが明らかとなった。このことから、集排水管やガス抜き管から空気が供給され、管の周りだけを好氣的にするのではなく、埋立地の全体を好氣的に保つことができるということがいえる。



(a) 従来のガス流れの考え方



(b) 本研究で明らかとなったガス流れ

図 5-7 準好氣性埋立地のガス流れ

参考文献

- 1) McGraw-Hill : Handbook of Solid Waste Management (2002) MCGRAW HILL BOOK CO
- 2) 福岡市環境局: トータルな循環型社会に向けて、福岡方式準好気性埋立構造とは? P1-14 (2005)
<http://www.city.fukuoka.lg.jp/data/open/cnt/3/28853/1/siryu4.pdf>
- 3) 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 (2011)
- 4) Hee-Jong Kim : Estimation of carbon balance, gas and moisture movement in solid waste landfills 北海道大学博士論文、CHAPTER4.5、P51-74 (2010)
- 5) 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研究、廃棄物資源循環学会研究発表会 (2010)
- 6) 福岡大学: 平成 15 年度福岡市環境局委託調査 報告書
- 7) 気象庁 HP : <http://www.jma.go.jp/jp/yoho/312.html>
- 8) 福岡市: 準好気性埋立開発経緯
<http://www.city.fukuoka.lg.jp/data/open/cnt/3/33015/1/fukuokahousiki2.pdf>
- 9) 松藤康司: 準好気性埋立物語、月間「水」、1月号、2月号、P21-75 (1998)
- 10) 松藤康司: 山間埋立における諸問題 (1) (2)、生活と環境 第 20 巻 第 7.8 号抜刷、P37-55 (1975)
- 11) 花嶋正孝、松藤康司: 廃棄物埋立における生物学的アプローチ—埋立構造とその変遷—、土と微生物、第 19 号、P51-63 (1977)
- 12) 花嶋正孝: 廃棄物の好気性埋め立てに関する研究、(1985)