

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25281035

研究課題名(和文) 廃棄物埋立地の現状診断・適正化手法提案および埋立地管理者の知識啓発に関する研究

研究課題名(英文) Inspection methodology of solid waste landfill for knowledge develop of landfill operators

研究代表者

松藤 敏彦 (Matsuto, Toshihiko)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00165838

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,400,000円

研究成果の概要(和文)：ガストレーサー試験により、準好気性処分場においては底部集排水管から流入した空気が、廃棄物層を通過してガス抜き管から流出することを明らかにした。カラム実験の結果より、そのメカニズムは自然換気モデルが適合する。ガス抜き管出口のガス温度と流速が、埋立地内エアレーションの大きさの指標となることから、全国の廃棄物処分場の現状を調査した。しかし集排水管が水没していたとしても周辺のガス抜き管などから空気が流入し、出口としてのガス抜き管の存在がもっとも重要である。

研究成果の概要(英文)：The main finding of this study is the air pathway in landfill and its mechanism. By use of gas tracer test in full size landfill, air is induced from leachate collection pipe, and it moves through solid waste layer, then discharged to passive gas vent. This mechanism was well matched with natural ventilation model. Because temperature and gas velocity can be index to know the magnitude of aeration around gas vent, extensive survey was conducted to know the degree of aeration in municipal and industrial solid waste landfill. Since gas flow was detected in a landfill in which leachate is accumulated at the bottom, gas vent is primarily important to provide exit and air can be induced from peripheral gas vents instead of leachate collection pipe.

研究分野：廃棄物処理工学

キーワード：廃棄物処分場 準好気性構造 適正管理 早期安定化 エアレーション

## 1. 研究開始当初の背景

日本の標準的な埋立構造である準好気性埋立（図1）は、ガス抜き管と集排水管を連結し、集排水管の末端を開放することで埋立地内に空気を流入させ、早期安定化を目指す構造である。集排水管から空気が供給され、集排水管およびガス抜き管から空気が廃棄物層へ流れるとされるのが一般的解釈である。しかし、埋立地内をどのように空気やガスが流れているかを実証するデータはこれまでに存在しなかった。またガス流れのメカニズムについての科学的な説明もなく、経験に基づいて施設が建設、運営されていた。しなかった。そこで、実埋立地で調査を行い、埋立地内のガス流れとそのメカニズムを明らかにすること、さらには埋立地改善のための知見を与えることが、本研究の目的である。

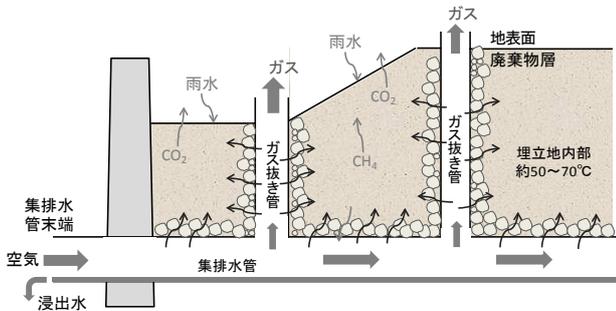


図1 準好気性埋立構造の概念図

## 2. 研究の目的

### (1) 準好気性埋立地の現状・問題点把握

埋立地は覆土（カバー）をしてしまえば外部からは問題なく見えるのが特徴である。施設の現場測定、およびアンケート調査によって現状と問題を把握する。

### (2) 空気・ガス流れのメカニズム解明

実施設の調査、および室内実験によって準好気性埋立地のガス流れメカニズムを明らかにする。

### (3) 埋立地管者への知識啓発

報告書を作成・公開し、自治体管理者および産廃処分業者に対する知識啓蒙を図る。

## 3. 研究の方法

上記の目的のため、以下の調査を行う。

### (1) 現地調査

複数の処分場において、ガス流れメカニズムのカギとなるガス抜き管出口における流速、温度の測定、およびトレーサー試験によって空気流入流出経路を明らかにする。

### (2) 室内実験

空気流れのメカニズムを明らかにするため、温度および充填物粒径を主なパラメータとする室内実験を行う。

### (3) アンケート調査

全国の処分場を対象として、準好気性機能が健全に機能しているかどうかを調査する。

## 4. 研究成果

### (1) 実埋立地現地調査

#### ① 調査方法

仙台市内の産業廃棄物処分場を調査対象とした。調査はすべてのガス抜き管のガス流れ方向、ガス流速、ガス温度、埋立高さの測定を行った。また、埋立地内にほとんど含まれないCOを空気の流入管から流し、ガス流出管での応答を測定するトレーサー応答試験を行い、埋立地内ガス流れ経路を推定した。

#### ② ガス抜き管の流量分布とガス温度の関係

本埋立地にガス抜き管が全部で58本ある。図2に、埋立地の埋立高さとガス抜き管の流量分布を示す。円の大きさは流量と比例しており、本埋立地では集排水管末端での空気の流入が確認できた。そのほか、比較的埋立高さの低い一部のガス抜き管からも空気が流入していた。

図3にガス流出管の流量とガス温度の関係を示すが、正の相関がある。ガス流出管の多くは外気温に対してガス温度が高い。一般的に廃棄物層内の温度は高いことから、埋立地内に流入した空気は廃棄物層内を通過して流出していると考えられた。

#### ③ トレーサー応答試験

空気流入のガス抜き管であるNo.1 にトレーサーガスとしてCOを注入し、直近のNo.2でCO濃度

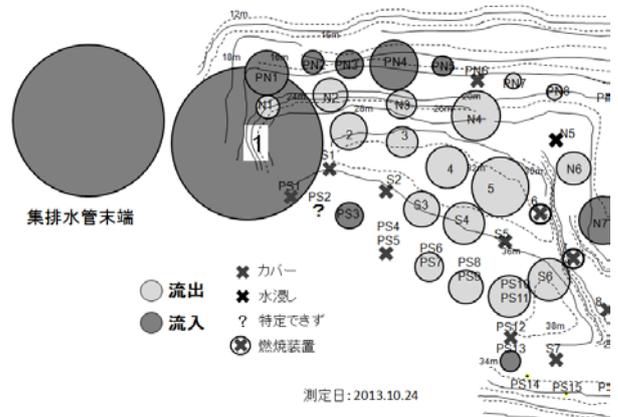


図2 ガス抜き管の流量分布

の連続測定を行った。結果を図4に示すが、CO濃度の応答は2段階となっている。集排水管、ガス抜き管のみを通過したガスはCO濃度ガス注入後、約1~2分で流出する。その後、廃棄物層内を通過するガスはゆっくりと時間をかけて流出するため2段階の応答となる。

また、応答の濃度比から流量はA:B=1:1であることがわかる。さらにNo.1の入口濃度は750ppm程度であり、No.2のガス濃度が約5分の2に希釈されている。このことから、第三の流れ(C)があり、埋立地の斜面などから流入していると考えられる。全体の割合はA:B:C=2:2:6であり、BとCの廃棄物層内を通過する割合が全体の8割も

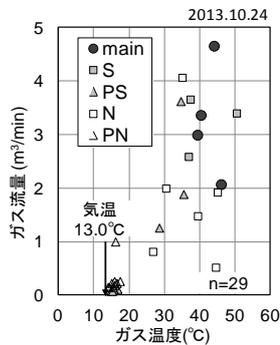


図3 ガス温度とガス流量の関係

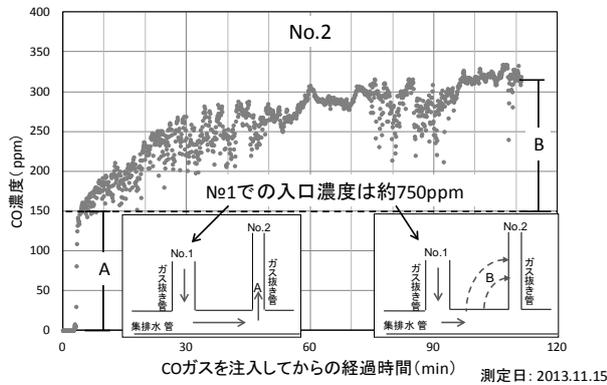


図4 No.2におけるトレーサー応答試験の結果

あることが明らかとなった。

以上のことから、ガス抜き管から流出するガスは管を通過する流れだけではなく、廃棄物層内を通過する流れが存在し、その割合が大きい。このことからガス抜き管から空気が廃棄物層内に流れるのではなく、廃棄物層内を通過してガス抜き管に集まることで埋立地の広い範囲をエアレーションしていることが明らかとなった。

## (2) 模擬カラム実験

### ① 実験装置

空気入乳メカニズムを明らかにするため、カラム実験を行った。使用した実験装置を図5に示す。直径150mm、高さ500mmの亚克力製カラムであり、下部は開孔率30%の空気流入部を設け、上部に空気流出孔(オリフィス孔)を開けた塩ビ板でふたをした。オリフィス孔で流速を測定し、流出流量を算出した。カラム内部にはアルミナビーズ( $\phi=20,15,10,8,6$ )を高さ300mmまで充填し、側面から熱電対を挿入してカラム中心部と端部の8点で温度を測定した。ビーズは乾燥機で一様に加熱し、充填後、5分毎に温度と流出流量の測定を行った。

### ② 空気流れのメカニズム

カラム内温度は時間とともに低下し、端部の温度は中心部より低く、縦方向(T4~T7)には温度差が生じることが判明した。そこで、流入空気およびカラム表面からの冷却の影響が最も小さいT4を代表温度とし、図6に温度差と流出流量の関係を示す。温度差が大きいほど、ビーズ径が大きいほど流出流量が増加し、浮力による空気流動を再現できた。

廃棄物層を多孔質媒体と考えた場合、流体の流

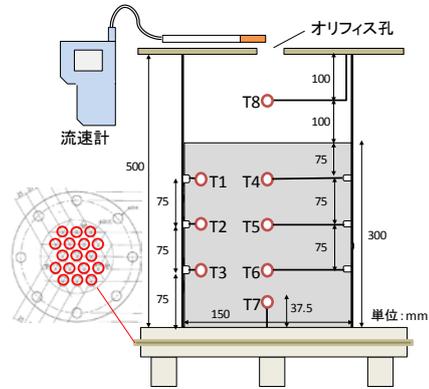


図5 実験装置図

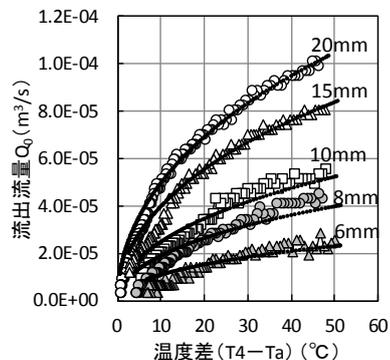


図6 温度差と流出流量の関係

これはダルシー則で表現できる。温度差とガス流量は直線関係となるが、図6とは一致しない。

$$v = k_a \frac{dP}{dz} = k_a \frac{F}{hA} \quad , \quad F = \varepsilon(\rho_0 - \rho_w)A * h * g$$

$$Q = A * \varepsilon * k_a * g * M_w * \frac{P_0}{R} * \left( \frac{T_w - T_0}{T_0 T_w} \right) \quad (1)$$

そこで、温度差により生じる流れを利用した自然換気の理論が適合できるのではないかと考えた。図7のような円筒を考え、内部温度が周囲より高い場合、密度差により浮力が生じ、空気が上昇するため、内部が負圧となり、圧力差によって下部から空気が流入する。エネルギー保存則より、空気移動量  $Q$  ( $m^3/s$ ) は、

$$\sqrt{2\Delta P} = \frac{1}{2}mv^2 \quad , \quad \Delta P = P_0 - P_w = g(\rho_0 - \rho_w)h$$

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

と表現できる。流量係数  $\alpha$  は充填層の抵抗に関わる値である。最小二乗法により  $\alpha$  を求めたところ、計算値は実測値とほぼ一致した(図6)。よって、準好気性埋立地の空気流動メカニズムは(2)式で表すことができる。

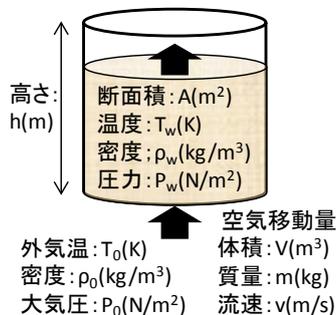


図7 自然換気モデル

### (3) 底部滞水のある処分場調査

#### ① 調査方法

静岡県富士市内の産業廃棄物最終処分場の協力を得て、2015/12/7~8 にガスを中心とした調査を行った。すべてのガス抜き管で流速、温度、組成、埋立高さを測定し、発煙筒およびトレーサー応答により、埋立地内のガス流れを調査した。

#### ② 空気流れの状況

本埋立地は埋立地内が滞水しているため、底部での管の接続はなく、集排水管末端からの空気流入の可能性はない。図8に全ガス抜き管(26本)の流量分布を示す。円の大きさが流量と比例して

いる。埋立高さが低い、埋立地の周辺部から空気が流入しており、中心部からガスが流出していた。ガス流出量は空気流入量の約4倍であり、埋立地の法面などから空気が流入している可能性がある。

図9に示すように、ガス温度とガス流出量には正の相関がある。埋立地内に滞水があり、健全な準好気性構造ではない施設でも相関があることが明らかとなった。

発煙筒の煙を空気流入量が最も大きい E-2 に注入したところ、No.2 から流出が確認された。そこで、E-2 にトレーサーガスとして CO を注入し、No.2,M1 で CO 濃度の連続測定を行った。結果を図10に示す。CO を注入する前の段階で

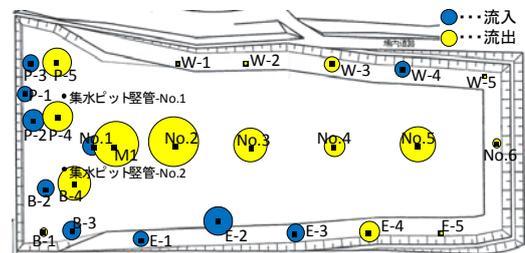


図8 ガス抜き管の流量分布

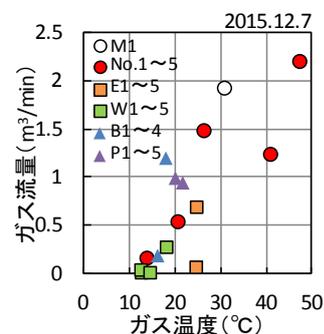


図9 ガス温度とガス流出量の関係

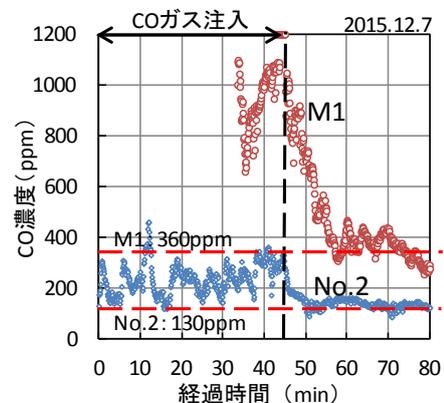


図10 No.2,M1におけるトレーサー応答結果

No.2,M1 の CO 濃度はそれぞれ 130ppm、360ppm であるが、注入後、濃度が急上昇し、停止後は濃度が低下していることがわかる。以上より、ガス抜き管→廃棄物層→ガス抜き管でガスが流れること、また廃棄物層を通過する速度が大きいことから、空隙率の高い廃棄物が多く埋まっている可能性があることが明らかとなった。

#### (4) アンケート調査および過去測定データ分析

一般廃棄物最終処分場、産業廃棄物処分場ともに調査を実施したが、ここでは後者の、全国の稼働中の管理型最終処分場を所有する 164 企業を対象としたアンケート調査を示す。有効回答率は 46%、分析対象施設は 76 施設である。調査内容は主に処分場の概要、浸出水集排水設備、ガス抜き管についてである。過去測定データはガス抜き管で測定を行っている施設に依頼し、ガス温度のデータを入手できた 15 施設に注目してガス流れ判定を行った (図 11)。

図 11 に示す (A) の 10 施設はガス温度と外気温の温度差が大きい、またはガス温度と流速に相関があることからガスが流れていると判定された。一般廃棄物処分場の結果を含め、表 1 に結果を示す。一廃では 14%、産廃では 45%の施設でガスが流れていると判定された。ところが、滞水していても他のガス抜き管あるいは法面から空気が流入し、ガスが流れていたことから、構造の健全性までをガス流れ判定で評価することは困難であることが判明した。すなわち、浮力が働き、流出する出口があれば集排水管末端以外からの空気の供給が起こる。

#### (5) 埋立地の現状診断・適正化手法提案

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要点は、以下の通りである。「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、ガス抜き管の設置箇所、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。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。

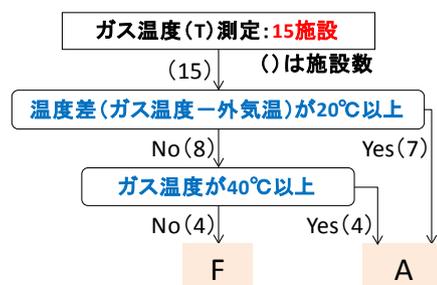


図 11 ガス流れ判定の流れ

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。季節ごとに測定すればよいが、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。

## 5. 発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① 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 (査読あり) DOI 016/j.wasman.2014.11.007

[学会発表] (計 5 件)

① Junya Machida, Toshihiko Matsuto, Takayuki Matsuo: Study on function of

natural aeration at semi-aerobic landfill by measuring gas velocity and temperature, The 2nd 3R International Scientific Conference, Daejeon, Korea, 21-23 May, 2015.

②町田隼也, 松藤敏彦, 松尾孝之: 準好気性埋立地のガス流速, 温度測定による機能診断調査に関する研究, 第23回衛生工学シンポジウム, 北海道大学, 2015.11.12.

③Shuhei Yamada, Xin Zhang, Toshihiko Matsuto, Takayuki Matsuo: Estimate of air and gas flow path through waste mass and gas vents in semi-aerobic landfill. 18th Korea-Japan Joint International Session, The 2014 Spring Conference of the Korea Society of Waste Management, Dong-Eui University, Busan, Korea, May 15-17, 2014.

④Toshihiko Matsuto, Xin Zhang, Takayuki Matsuo, Shuhei Yamada: Driving Force and Mechanism of Air and Gas Flow Through Gas Vents in a Semi-aerobic Landfill, pp.39-42, The 5th China-Japan Joint Conference, Noboribetsu (Hokkaido), July 14-16, 2014.

⑤山田修平, 張鑫, 松藤敏彦, 松尾孝之: 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年度廃棄物資源循環学会春の研究発表会, 川崎, 2014.5.29

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松藤 敏彦 (MATSUTO, Toshihiko)  
北海道大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号 00165838

### (2) 研究分担者

東條 安匡 (TOJO, Yasumasa)  
北海道大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号 70250470