

有機系廃棄物の地盤注入を対象とした 室内実験の検討

小松 佑子^{1*}・谷 和夫²・大向 直樹²

¹ 横浜国立大学大学院 工学府（〒240-8501横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5土木工学棟）

² 横浜国立大学大学院 工学研究院（〒240-8501横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5土木工学棟）

*E-mail : d05gc110@ynu.ac.jp

下水汚泥などの有機系廃棄物を含む液体を深層地盤に注入しメタンガスを回収する DBI(Deep Biosolids Injection)の実現には、有機系廃棄物を含む液体の砂層中における流動特性と目詰まり特性の把握が不可欠である。本研究ではこの技術的課題の解決を目的とした室内実験技術を検討した。その結果、室内実験の詳細を次のように決定した。試料には、ふるいで粒度を調整した堆肥(野菜堆肥など)と有機物(キャットフードなど)を乾燥重量比(堆肥/有機物)20 程度で混合したものを使用することとした。また、流動特性と目詰まり特性は、ポリ容器を2つ上下に組み合わせた装置の接合部に所定の径を持つ孔を設け、試料が流下する様子を観察することにより評価することとした。

Key Words : biosolids, organic waste , permeability, clogging, laboratory test method

1. はじめに

下水汚泥などの有機系廃棄物の処理に関する問題として、設備投資や維持管理、焼却コストや二酸化炭素の大気への放出などが挙げられる。そこで、図-1 に示すように下水処理場などから排出される有機系廃棄物を深層地盤(砂層ないし砂岩層)に注入し、嫌気性消化により発生する消化ガスを回収孔より取り出してエネルギー利用しようとする新しいシステム DBI(Deep Biosolids Injection)が提案されている¹⁾。

この DBI システムの実現には、地盤の選定、有機系廃棄物を含む液体を注入する圧力や量、有機系廃棄物を含む液体の消化および流動挙動など、さまざまな技術的課題の解明が必要である²⁾。特に、地盤注入に関する技

術的課題として、深部地盤に安定的に有機系廃棄物を注入するために、有機系廃棄物を含む液体の砂層中の流動特性や目詰まり特性の解明が挙げられる。そこで、有機系廃棄物を含む液体の砂層中における流動特性と目詰まり特性の把握を目的とした室内実験を実施することとした。しかし、このような懸濁液の砂層中の流動や目詰まりを調べる実験の事例は極めて少ないため、実験の方法や条件を検討する必要がある。

2. 室内実験のための予備的な検討

(1)試料選定に関する検討

有機系廃棄物の好気性消化に関する室内実験³⁾を参考

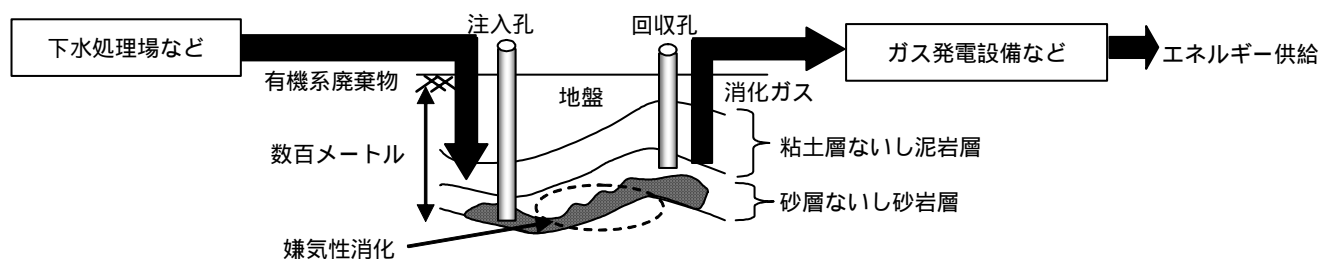


図-1 提案されている DBI システム¹⁾²⁾

に、堆肥 3 種類(野菜堆肥、鶏糞、ピートモス)と有機物 2 種類(キャットフード、野菜・果物片)を原料として、試料(有機系廃棄物を含む液体)を作製した。堆肥と有機物の混合割合を表-1 に示す。流動特性と目詰まり特性を把握するための実験に使用する試料として、表-1 のケースの中から確実に嫌気反応を起こすものを選定する。なお、表中の乾燥重量は、含水比試験(JIS A 1203)に準じた方法で乾燥させた試料の重量である。

容量 500ml のペットボトル(以下、発酵容器と称す)にこれらの試料を破碎・調整して投入し、脱気水で満たした後、嫌気性条件を維持するために密閉した。試料を嫌気性消化反応させる装置を図-2 に示す。表-1 の 8 種類の試料を密閉した発酵容器を 22 日間恒温水槽に浸した。装置の恒温水槽の温度は、効率良く嫌気性反応が生じる温度である 55℃⁴⁾とした。反応により発生する消化ガスは、発酵容器の蓋に取り付けたチューブから試験管に水上置換法で集め、目視にて発生量の経時変化を計測した。

発生する消化ガスの累積発生量と反応日数の関係を図-3 に示す。Case 2 と Case 4 のガスの累積発生量は 22 日後に約 0.45m³/kg であり、他のケースと比較して多い結果となった。なお、Case 2 と Case 4 以外はガスの発生が非常に少なかったため 13~15 日間で計測を中止した。

メタン発酵は有機物の割合が過剰であると栄養過多となり、うまく反応が生じないことが知られている⁵⁾。表-1 に示すように、Case 2 と Case 4 の乾燥重量比はそれぞれ堆肥/有機物=17, 23 で、他のケース(堆肥/有機物 3.5)と比較して堆肥に対する有機物の量が少ないためガスの累積発生量が多かったと判断できる。また、下水汚泥は消化日数が約 1 か月程度で 0.5~0.6m³/kg 程度の消化ガスを発生することから⁶⁾、Case 2 と Case 4 の発生ガス(0.4m³/kg)は妥当な量である。

発生する消化ガスに含まれるメタンの有無を確認するために、ガスの発生量が多かった 3 ケース(Case 2, 3, 4)に対して、質量分析計(日本電子株式会社製, JMS-600Y)を使用してガス分析を実施した。その結果を表-1 に示す。原因は定かではないが、Case 4 についてはメタンが微量もしくは存在しないという結果が得られた。一方、Case 2 と Case 3 については確実にメタンの存在が確認された。これらのことから、堆肥として野菜堆肥もしくは鶏糞、有機物として野菜・果物片もしくはキャットフー

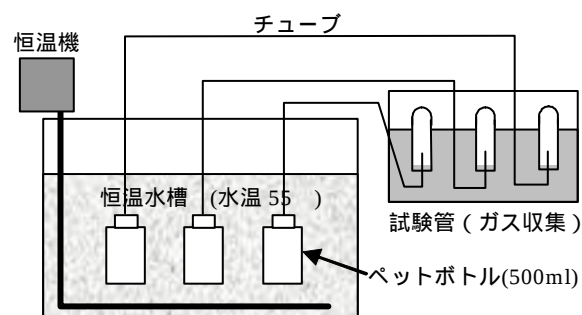


図-2 試料を嫌気性消化反応させる装置

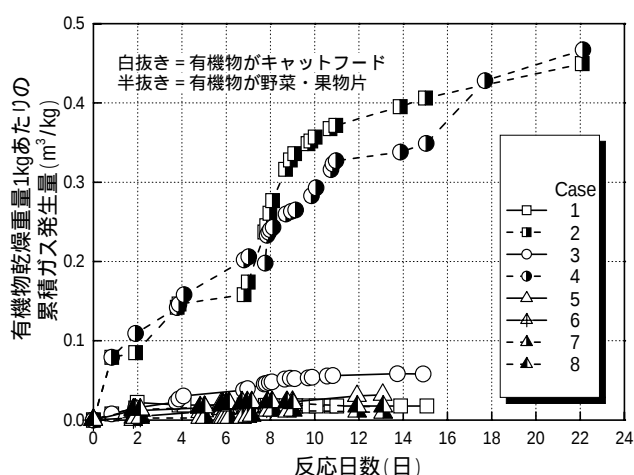


図-3 ガスの累積発生量と反応日数

表-1 堆肥と有機物の混合割合と発生ガス中のメタンの有無

Case	堆肥 (乾燥重量 g)	有機物 (乾燥重量 g)	乾燥重量比 堆肥/有機物	メタンの 有/無
1	野菜堆肥 ¹⁾ (15)	キャットフード ⁴⁾ (9)	1.7	—
2	野菜堆肥(15)	生ゴミ ⁵⁾ (0.88)	17	有
3	鶏糞 ²⁾ (20)	キャットフード(9)	2.2	有
4	鶏糞(20)	生ゴミ(0.88)	23	無 or 微量
5	ピートモス ³⁾ (4.6)	キャットフード(4.6)	1.0	—
6	ピートモス(4.6)	キャットフード(14)	0.34	—
7	ピートモス(4.6)	野菜・果物片(1.3)	3.5	—
8	ピートモス(4.6)	野菜・果物片(2.6)	1.8	—

1 野菜堆肥：レバートルフ株式会社製，野菜の堆肥，含水比 66%

2 鶏糞：株式会社東商製，発酵鶏糞，含水比 26%

3 ピートモス：グリーンメール製，ピートモス，含水比 116%

4 キャットフード：ユニチャーム ペットケア株式会社製，ねこ元気，含水比 9.5%

5 野菜・果物片：白菜(1/4 カット)，人参(5 本)，バナナ(5 本)をみじん切りにして混合したもの，含水比 1041%

ドを試料として用いることにより嫌気性消化反応を生じさせられることを確認した。

さらに、試料の調整方法については次の知見が得られた。鶏糞は羽毛などの不純物が混入しており、除去するのに手間がかかる。野菜・果物片は入手できる材料の品質が一定ではないために試料の不均質性が懸念される。野菜・果物片の含水比が約 1000% で非常に高いため、試料となる液体を同じ含水比に調整すると他の原料を使用する場合に比べて流動性が著しく低くなる。

以上のことから総合的に判断すると、試料として、野菜堆肥とキャットフードを乾燥重量比 20 程度に配合したものが望ましいこと、図-2 に示す装置と条件で効率良く嫌気性消化反応を起こすことが可能であることが分かった。

(2)物理特性に関する検討

a)粘性

下水汚泥などの有機系廃棄物を含む液体は一般に粘性が水より高く⁵⁾、擬似塑性流体の挙動を示すとされている⁷⁾。そこで、試料の粘性を検討するために、回転式粘度計(Thermo Haake 社製、Visco Tester VT6L)を使用して粘性係数を測定した。また、試料を放置すると固形分が沈殿を生ずるため、容器内での粘性の深度方向の均一性と、嫌気性消化反応時の温度である 55 と常温(20)での粘性係数の違いを把握することも目的とした。

試料には、嫌気性消化が効率良く生じた Case 2 の配合で、嫌気性消化反応を約 5 日間行ったものを用いた。十分な量の試料を確保するために、容量 2l のペットボトルを発酵容器とした。容器の上部から 500ml ごとに 3 つのピーカーに試料(上部,中部,底部と称す)を採取し、それぞれの粘性係数を計測した。最初に常温 20 の下での計測した後、ピーカーを恒温水槽に戻し 55 となった試料に対しても計測した。

各試料の粘性係数を比較するために、粘性係数とスピンドルの回転数の関係を図-4 に整理した。今回取り扱った試料の粘性はスピンドルの回転数をあげると粘性係数が大きくなるニュートン流体の挙動を示し、水の 1~2 倍程度の粘性を持つことが分かった。また、粘性係数は容器内で深度方向にほぼ均一であること、温度の影響がほとんどないことが分かった。

b)粒度

有機系廃棄物を含む液体を砂層に安定的に注入するためには、砂層内での目詰まりが生じないように、有機系廃棄物の粒度は砂層の空隙に比べて十分に細かいことが必要である。また、嫌気性消化の過程における粒度を評価するにあたり、発酵以外の何らかの作用(例えば、ふやけるなど)の影響を確認することが必要である。そこで、人為的に粉碎した原料の粒度と、水浸させた後の原

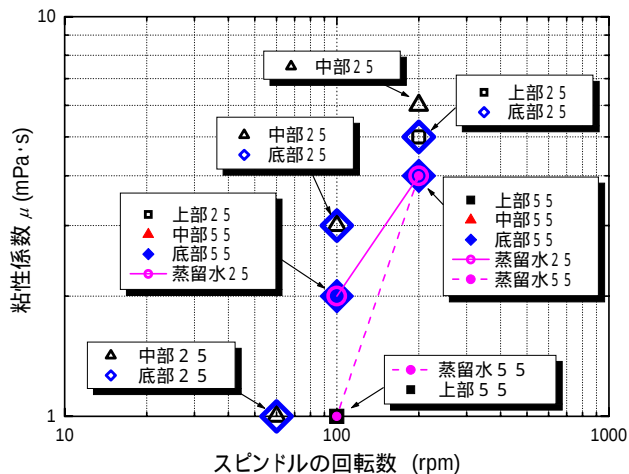


図-4 粘性係数の比較

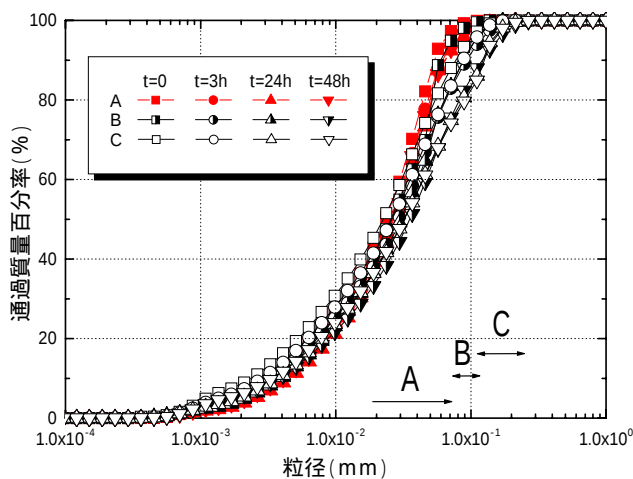


図-5 野菜堆肥の粒径加積曲線

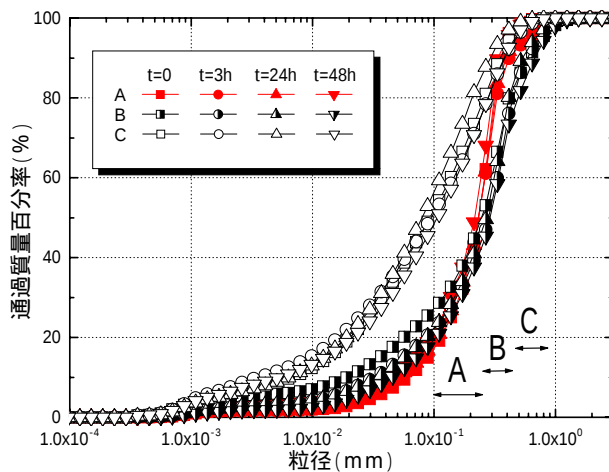
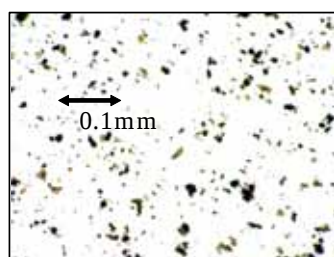


図-6 キャットフードの粒径加積曲線

表-2 粒度調整した原料の粒度分析結果

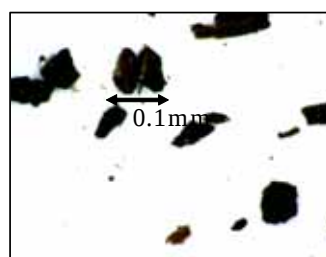
原料	試料		平均粒径 $D_{50}(\mu\text{m})$	85%粒径 $D_{85}(\mu\text{m})$	均等係数 U_c
	区分	ふるいによる調整粒度			
野菜堆肥	A	75 μm 未満	26	53	9
	B	75 μm 以上 106 μm 未満	32	85	12
	C	106 μm 以上 250 μm 未満	29	95	13
キャットフード	A	106 μm 以上 250 μm 未満	230	344	5
	B	250 μm 以上 425 μm 未満	252	466	12
	C	425 μm 以上 850 μm 未満	93	293	27



野菜堆肥 A

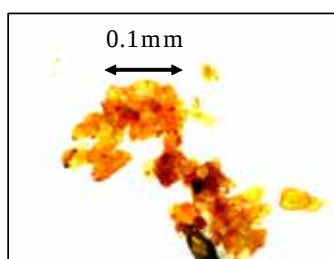


野菜堆肥 B

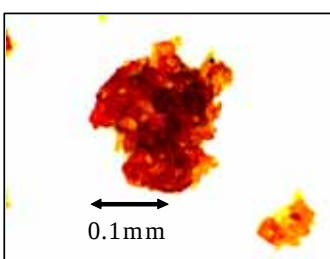


野菜堆肥 C

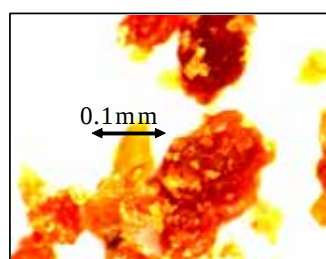
写真-1 野菜堆肥の顕微鏡観察の結果（水浸前）



キャットフード A



キャットフード B



キャットフード C

写真-2 キャットフードの顕微鏡観察の結果（水浸前）

料の粒度の経時的な変化を把握することを目的として粒度分析を実施した。

原料には、すり鉢で粉碎した野菜堆肥とキャットフードを所定のふるいで調整したものを用いた。表-2 に試料の種類と調整に用いたふるいの粒径を示す。キャットフードは、106 μm のふるいを通してものはなかった。粒度分析にはレーザー回折式粒度分析装置(島津製作所製, SALD-3100)を使用し、原料を水浸させてからの経過時間が $t=0, 3, 24, 48(\text{h})$ の時に計測した。

野菜堆肥とキャットフードの粒径加積曲線を図-5、図-6 に示す。両者ともに、粒度の経時的変化はなかった。したがって、表-2 における平均粒径 D_{50} 、85%粒径 D_{85} 、均等係数 U_c の値はそれぞれ、経過時間が $t=0, 3, 24, 48\text{h}$ の時の平均値とした。

野菜堆肥 A~C の粒度は、調整粒度によらず類似した結果が得られた。経過時間が $t=0$ の時の野菜堆肥の粒子を、顕微鏡(KEYENCE 社製、デジタルマイクロスコプ VHX-200)により観察した(写真-1)。本来ならば、ふるいによる調整粒度の異なる野菜堆肥 A~C は、それぞれ図-5 に示した A, B, C の範囲に粒径加積曲線が存在するはずである。しかし、75 μm ないし 106 μm より粗い粒度に調整した野菜堆肥 B と C の粒径加積曲線がともに野

菜堆肥 A と同様な範囲に分布している。写真-1 より、ふるいによって粒度が調整されていることは明らかであるが、水浸により野菜堆肥の粒子はふるいによる調整粒度よりも細粒化したと考えられる。

一方、キャットフード C に関しては、図-6 に示した C の範囲に存在するはずだが、A や B よりも細かい粒度を示した。写真-2 より、キャットフード C の粒子の構造は、大きい粒の周りに非常に小さい粒が付着していることがわかる。このことから、水浸によって付着している小さい粒子が剥離し、粒度が細かく計測されると推察される。キャットフード C が最も水浸による影響が大きかった原因については不明であるが、キャットフード A と B に関しても、ふるいで調整した粒度よりも小さい粒径のものが存在していることから同様に、水浸によって粒度が細かくなると考えられる。

粒度に関して得られた知見を以下にまとめる。

- ・野菜堆肥とキャットフードをすり鉢で粉碎することで得られる最細の調整粒度はそれぞれ 75 μm 未満、106~250 μm である。
- ・粒度調整した野菜堆肥とキャットフードの粒度は、水浸による経時的変化はない。
- ・粒度調整した野菜堆肥とキャットフードは水浸させ

ると、ふるいで調整した粒度よりも細くなる。

薬液注入工法では、懸濁した薬液を地盤に注入可能か否かを判断する手段として、式(1)で定義されているグラウタビリティー比 GR が 24 以上であれば注入可能と判断する⁸⁾。

$$\text{グラウタビリティー比 GR} = \frac{D_{15}}{G_{85}} \quad (1)$$

D_{15} ：注入する地盤の粒径加積曲線の 15% 粒径

G_{85} ：注入材の粒径加積曲線の 85% 粒径

これを有機系廃棄物を含む液体を砂層中に注入することに対応させると、野菜堆肥 とキャットフードの D_{85} が重要となる。今回扱った野菜堆肥 A の $D_{85} = 53\mu\text{m}$ は普通セメントと同程度であり⁸⁾、注入する砂層の D_{15} がおよそ 10mm 以上であれば注入可能と判断できる。しかし、キャットフードの $D_{85} = 300 \sim 500\mu\text{m}$ は非常に大きく、砂層に注入するためにはさらに細くする必要がある。

(3)流動特性・目詰まり特性を評価するための実験方法に関する検討

有機系廃棄物を含む液体を地盤に注入する際の流動特性や目詰まり特性を評価するための室内実験の方法について検討した。この室内実験では、嫌気性環境の保持、消化ガスの採取、消化ガスの洩気防止が可能であることが必要である。

材料の流動性を評価するために実施される試験として、コンクリートの分野では表-3 に示したような試験(JIS A

0203)がある。本研究では、多孔質媒体中の流動特性と目詰まり特性を対象とするため、表-3 の試験の中から、V ロート試験に着目した。また、上記 ～ を満たすには、密閉された空間で試験を実施する必要がある。そこで、密閉した空間で V ロート試験を行う方法について、図-7 に示すように 2 つの容器の接合部に管路を設けた装置を考案した。

この装置の構造は砂時計を参考としており、装置を上下反転させることで発酵容器の試料を流下孔を通じてガス貯蔵容器に流下させる。この装置の流下孔の径 ϕ の大きさを検討するために、予備実験を行った。予備実験では、蓋に流下孔 ($\phi=2, 3, 5, 7, 10, 15\text{mm}$ の 6 ケース)、側面に複数の排気孔を設けたペットボトルを用いた。試料は、ふるいで粒度調整した野菜堆肥 ($250 \sim 425\mu\text{m}$) とキャットフード ($425 \sim 850\mu\text{m}$) それぞれ乾燥重量 5g を蒸留水 200ml に混合した液体である。ペットボトルに試料を入れ、上下反転 (蓋を下にする) させ、試料が流下する様子を観察した。

その結果、 $\phi=2, 3\text{mm}$ のケースでは目詰まりが生じ、そのほかのケースでは試料が全て流下した。また、試料の流下が終了までの時間は、 ϕ が大きいケースほど短い。特に、 $\phi=10, 15\text{mm}$ の両ケースは瞬時 (約 3 秒以内) に流下が終了した。したがって、目詰まりが生じるまでの時間や試料の流下時間を計測するためには、図-7 に示す提案装置の流下孔の径を $\phi=2 \sim 10\text{mm}$ の範囲に設定することが適切と考えられる。

表-3 材料の流動性を評価するための試験 (JIS A 0203)

試験名	試験目的	計測項目
スランプ試験	フレッシュコンクリートの軟らかさの把握	スランプコーンを引き上げた直後に測った頂部からの下がった高さ
フロー試験	フレッシュモルタルの軟らかさと流動性の把握	平面上のフレッシュコンクリートの広がる範囲の最大直径
V ロート試験	フレッシュコンクリート、フレッシュモルタル、フレッシュペーストの軟らかさと流動性の把握	漏斗状の容器から試料が自由落下する時間

< 室内実験開始時 >

< 嫌気性消化中 >

< 計測 >

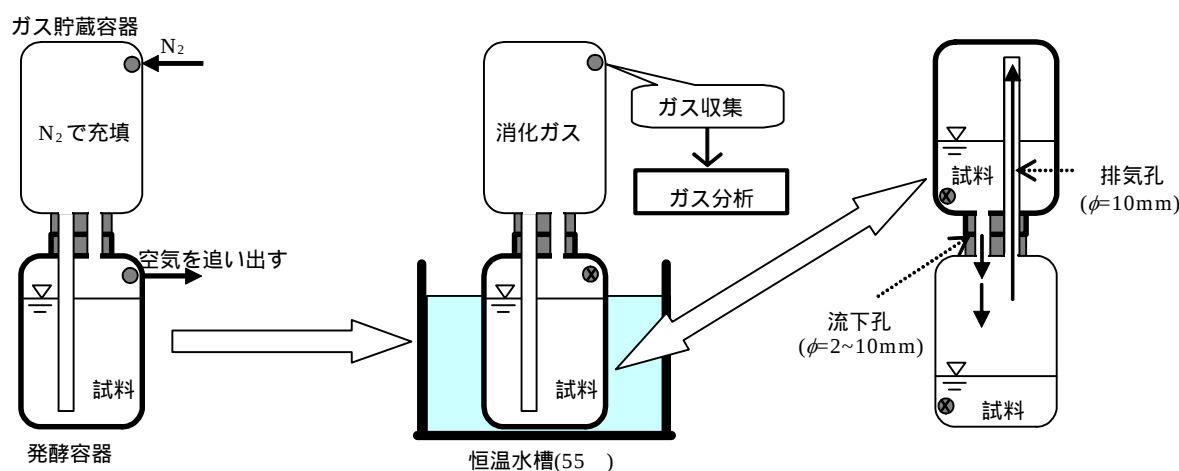


図-7 流動特性・目詰まり特性を評価するための室内実験の概要

3. 有機系廃棄物を含む液体の流動特性や目詰まり特性を把握するための室内実験の提案

前章で述べた予備的な検討をふまえ、図-7 に示す試験方法を提案する。

図-7 に示すように、実験開始時に試料を入れ(発酵容器)、ガス貯蔵容器の側部から窒素を十分に充填し、密閉する。嫌気性発酵中は発酵容器を恒温水槽に浸し、ガス貯蔵容器の側部から消化ガスの収集をする。収集したガスはガスクロマトグラフを用いて分析する。また、ガス収集が終了した後、直ちに容器を反転させ、試料を発酵容器からガス貯蔵容器に流下させる。この様子を観察し、試料が流下する時間あるいは目詰まりするまでの時間を計測する。計測が終了したら、再度装置を上下反転して試料を発酵容器に戻し、それを恒温水槽に浸して次の計測まで嫌気性反応を続行する。

嫌気性反応の終了は、一般的にメタン生成量を指標として判断できる⁹⁾。したがって、本研究ではガス分析の結果により嫌気性反応の終了を判断する。反応が終了するまで、定期的に発生ガスの分析と試料の流下時間の計測を行う。

4. まとめ

DBI システムの実現には、砂層における有機系廃棄物を含む液体の流動特性や目詰まり特性を把握することが重要である。そこで、図-7 に示す室内実験を提案した。提案した実験では、嫌気性消化が可能であり、発生した

ガスの採取・分析、さらに有機系廃棄物を含む液体の流動特性や目詰まり特性を検討することも可能である。

今後は、提案した室内実験により、有機系廃棄物を含む液体の嫌気性消化にともなう流動特性や目詰まり特性の変化を検討する予定である。また、得られた実験結果を用いて、実際の砂層に対する流動特性をどのように評価するかについても検討する。

参考文献

- 1) Dusseault, B. : Deep biosolids injection: Environmental protection with energy recycling and carbon sequestration, *Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS*, pp.49-59, 2004.
- 2) 小松佑子, 谷和夫: 下水汚泥の深層地盤注入による循環型メタン回収システムの提案と検討, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.395-398, 2005.
- 3) Nattakom, B. and Ishida, T. : Development of quantitative analysis system for microaerobic decomposition reaction in composting, 第 15 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, Vol.3, pp.79-81, 2004.
- 4) 木谷収: バイオマス—生物資源と環境—, pp.37, 2005.
- 5) 福留豊: 食品廃棄物を利用したバイオガス発電システムの事業化, 高知工科大学大学院博士学位論文, pp.25-39, 2001.
- 6) (社)日本エネルギー学会: バイオマスハンドブック, pp.152-156, 2002.
- 7) 公害対策技術同好会: 下廃水汚泥の処理技術, pp.11-19, 1976.
- 8) (社)土質工学会: 薬液注入工法の調査・設計から施工まで, pp.128, 1985.
- 9) (社)土木学会衛生工学委員会: 環境微生物工学研究法, pp.161-164, 1993.

STUDY OF LABORATORY TEST METHOD FOR SIMULATION OF DEEP BIOSOLIDS INJECTION

Yuko KOMATSU, Kazuo TANI, and Naoki OHMUKAI

DBI (Deep Biosolids Injection) was proposed for one of the efficient technologies of carbon hydrate recycling, methane production, or carbon dioxide sequestration. Among various technical challenges to realize this system, study of the permeability and clogging characteristics of suspension fluids including organic waste in sand layers is important. To simulate the seepage flow of the suspension fluids in sands, a laboratory test method was proposed as follows. Vegetable-compost and Cat-food of their dry weight ratios about 20 are selected as biosolid materials, and their particle grading were investigated. A new test method similar to the V funnel test was developed to characterize of the suspension fluids; pipe flow can be observed in the airtight container.