

◆特集：下水道「循環のみち」への新たな展開◆

液体コンポスの製造とその利用

庄司 仁* 落 修一** 尾崎正明***

1. はじめに

活性汚泥法による下水処理では、余剰汚泥や嫌気性消化汚泥といった液状のバイオマスが大量に発生する。循環型社会の構築が求められる昨今の社会情勢において、このようなバイオマス資源を利活用することは重要である。

下水汚泥を有機質肥料として農地や緑地に施用することは、以前から実施されている利活用手法の一つである。平成15年度には、乾燥重量に換算して約30万トンの下水汚泥が、各種の形態で緑農地利用されている（図-1）。特に脱水した下水汚泥のコンポスは、①有機物に加えて栄養塩類や無機分の活用、②農産物経由で汚泥に集まった土壌成分の循環利用、③他のバイオマス（畜産廃棄物など）との集約処理が可能、といった利点を有する。したがって、利用先が確保できる地域においては、下水汚泥コンポスの普及を促すことで、農業と下水道によるバイオマスの「循環のみち」が実現できる。

下水汚泥コンポスの利用拡大には、品質の向上と安定化、製造費用の低減などによって、他の有機質・化学肥料に対して競争力を持たせる必要がある。本稿では、そのような要求を踏まえた技術として、液状の有機質肥料である「液体コンポス」の製造および利用技術を紹介する。

2. 液体コンポスの製造

2.1 液体コンポスの製造原理

通常の下水汚泥コンポスでは、液状の汚泥を脱水した後に、有機物の好気的な分解（安定化）を行う。安定化工程を経ることで、肥料としての品質向上だけでなく、衛生上の安全性といった利点が生まれる。ただし、好気状態を実現するためには、投入汚泥の含水率を40～60%にすることが望ましいとされる²⁾。そのため、脱水工程だけ

でなく副資材の添加、製品コンポスの返送といった前調整を行うことが一般的である。

しかしながら、十分な溶存酸素濃度が確保されれば、脱水なしでも液状汚泥を安定化させることは可能である。たとえば汚泥の減溶化を目的とする好気性消化法（酸素を供給して汚泥を生物分解させる手法）は、汚泥の安定化工程としても機能している。本稿で紹介する液体コンポスの製造方法は、反応の原理としては好気性消化と同様である。ただし目的は汚泥の減溶化ではなく、易分解性有機物の安定化である。

このような目的の変更に応じて、好気性消化法に改良を加えた装置を製作した（図-2）。本装置

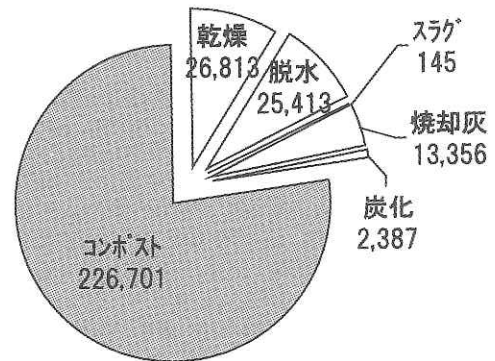


図-1 平成15年度 下水汚泥の緑農地利用量 (単位 DS-t、データ出典：下水道協会 Web¹⁾)

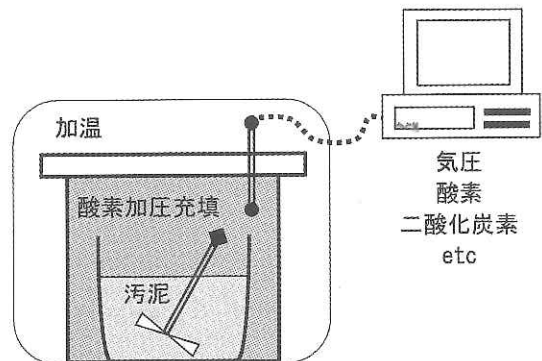


図-2 液体コンポス製造装置の概略

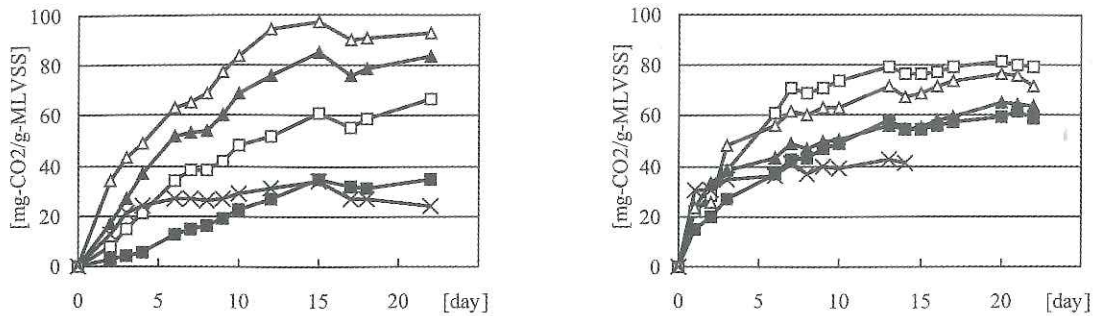


図-3 余剰汚泥 (左) と嫌気性消化汚泥 (右) の液体コンポスト化過程における二酸化炭素発生量
(凡例 ■: 20℃, □: 35℃, ▲: 50℃, △: 60℃, ×: 70℃)

の大きな特徴は、酸素活性汚泥法のように、高濃度酸素の充填によって液面から酸素供給を行うことである。その際、下水処理よりも有機物負荷が高いため、酸素は加圧充填とする。この装置において完全混合となるように攪拌すれば、液中の溶解酸素が十分に維持できる。曝気を行わないことは、運転費用の低減だけでなく、スカムや泡の発生防止にも効果がある。また、高濃度の酸素を加圧充填すれば、反応装置の大きさを抑えることにもなる。以上のように、好気性消化法と酸素活性汚泥法を組み合わせ、液状汚泥を効率よく安定化させる技術が「液体コンポスト」である。

2.2 液体コンポストにおける汚泥の安定化

汚泥の安定化過程は、有機物の分解にともなう二酸化炭素の発生量で評価できる。図-3に、余剰汚泥（濃縮汚泥：MLVSS = 26g/L）、嫌気性消化汚泥（MLVSS = 6.8g/L）を原料とした場合の、二酸化炭素発生量の推移を示した。なお、この実験における製造条件は以下のとおりである。

- ・液相（汚泥）0.8L - 気相（酸素）2.1L
- ・酸素の充填圧力：2気圧

- ・再充填で酸素30%以上を維持

温度条件や原料となる汚泥によって発生量に差は見られるが、いずれの場合も2週間ほどで増加が頭打ちとなる傾向を示している。十分な酸素濃度が維持されている状態では、二酸化炭素の急激な発生が易分解性有機物の分解（安定化）に対応している。したがって、液体コンポストの製造過程では、約2週間で汚泥の安定化が達成される。

2.3 液体コンポストの特性～製造温度の影響～

液体コンポスト化の過程を経ることで、汚泥の性状は大きく変わる。常温～高温条件で生産した液体コンポストについて、外見的特徴の変化を表-1に、窒素やリンといった主要成分の理化学分析結果を表-2に示した。

全体的な外見の変化としては、フロックを確認することが難しくなったり、粘性の低下が見られたりした。臭気については、温度条件に応じて異なる傾向を示した。一部の条件では、熟成したコンポストの指標といわれる「湿った土の臭い」がわずかに感じられるだけであった。

表-2に示した分析結果からは、温度ごとの汚

表-1 液体コンポストの外見的特徴

製造温度	原料：余剰汚泥	原料：嫌気性消化汚泥
20℃	外見：あまり変化せず 臭気：汚泥臭	外見：黒色→茶褐色 臭気：わずかな土壌臭
35℃	外見：上澄み褐色化 臭気：コンポスト臭、汚泥臭も残る	外見：黒色→茶褐色 臭気：わずかな土壌臭
50℃	外見：上澄み褐色化 臭気：コンポスト臭、汚泥臭もやや残る	外見：黒色→茶褐色 臭気：わずかなコンポスト臭
60℃	外見：上澄み褐色化 臭気：コンポスト臭	外見：黒色→茶褐色 臭気：コンポスト臭
70℃	外見：やや脱色 臭気：揮発性脂肪酸のような刺激臭	外見：黒色→茶褐色、さらに脱色 臭気：揮発性脂肪酸のような刺激臭

表-2 液体コンポスの理化学分析結果

製造温度	pH [-]	EC [mS/cm]	MLSS [g/L]	溶解成分 [mg/L]		
				TOC	NH ₄ -N	PO ₄ -P
原料：余剰汚泥						
20℃	6.7	6.3	18.1	1900	870	220
35℃	7.1	9.9	16.1	1710	1270	220
50℃	7.0	12.7	13.7	2390	1470	190
60℃	7.1	11.4	12.8	3410	1230	180
70℃	6.1	5.3	9.8	7200	550	200
原料：嫌気性消化汚泥						
20℃	7.1	7.3	9.6	1280	930	150
35℃	6.9	9.6	8.8	880	950	130
50℃	7.2	10.1	7.9	1150	880	100
60℃	7.1	10.5	5.7	1690	890	110
70℃	7.6	6.9	5.3	3130	700	90

泥の分解挙動の特徴が読み取れる。有機物については、高温ほど可溶化が進み（MLSSの減少）、溶解成分で残存している（TOCの増加）。可溶化と無機化の差引きから、35℃のTOCが最も低濃度となっている。窒素については、高温ほど可溶化による供給量が増えるものの、アンモニアの揮発も盛んになると予想される。実際、アンモニア性窒素が最高濃度となるのは、余剰汚泥で50℃、嫌気性消化汚泥で35℃である。リンの場合は、pHなどの影響因子が多いため、温度とオルトリン酸濃度との関係は不明確であった。

2.4 植物への影響

液体コンポスを評価する観点として最も重要なのは、植物に対する影響である。具体的な評価手法としては、主に幼少期の植物に対する阻害効果を見るための発芽試験・幼植物試験、収穫量や生育状況を実際の環境条件で確認する圃場試験などが挙げられる。本稿では、コマツナを供試植物とした、液体コンポスによる幼植物試験の結果について述べる。

生育状況の一例を図-4に示す。余剰汚泥の液体コンポスについては、70℃で製造したものに著しい生育阻害があり（図-4上段）、60℃で製造したものにも阻害効果が観察された。嫌気性消化汚泥の液体コンポスについては、高温で製造したものを与えた場合に、やや生育阻害が見られたが（図-4中段）、余剰汚泥に比べて影響は小さかった。50℃以下では阻害が確認されなかった。

これらの高温条件で製造された液体コンポスには、高濃度（>3g/L）の溶解性TOCを含むという共通点がある（表-2）。土壌において易分解

性有機物が大量に存在すると、その分解にともなう酸素消費が植物に悪影響を及ぼす。したがって高温で製造した液体コンポスには、高温では分解されないものの、常温付近では「易分解性」となる溶解性有機物が残存していると考えられる。この仮説を確認するため、70℃で製造した液体コンポスを35℃に移動したところ、2週間で溶解性TOCがほぼ半減して、植物への悪影響は解消された（図-4下段）。

以上の結果から、液体コンポス製造の最終段階は、常温～中温付近に設定する必要がある。一方、可溶化が進行する高温条件は、有機物や栄養塩類などが植物に利用されやすい溶存態へと変化している、とも考えられる（表-2）。肥料成分の存在形態の影響は、幼植物試験よりも長い期間の試験（圃場試験など）で確認できる。その結果に応じて、可溶化（高温）と安定化（常温～中温）との最適な組み合わせを検討する必要がある。

2.5 液体コンポス反応を担う微生物

近年、微生物の遺伝子を対象とした分子生物学的手法による解析が盛んになっている³⁾。この手法は、培養が困難な微生物であっても、遺伝子の塩基配列にもとづいて分類・定量などを行うために開発されたものである。ここでは、分子生物学

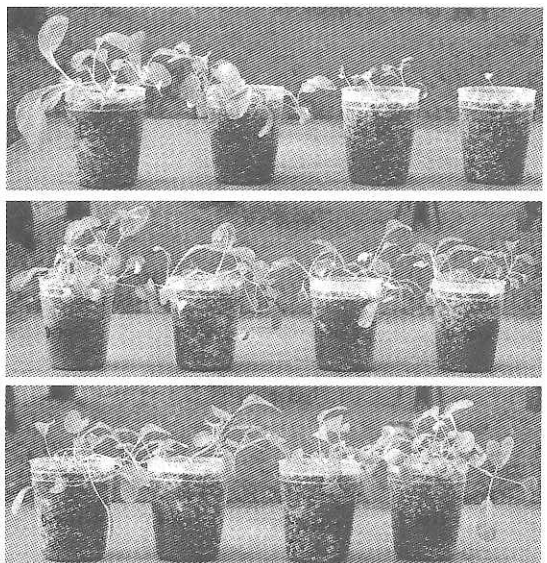


図-4 幼植物試験（32日目）の結果
 上段：余剰汚泥、70℃系列
 中段：嫌気性消化汚泥、70℃系列
 下段：嫌気性消化汚泥、70℃⇒35℃系列
 左から10、20、30、40mL ずつ添加

的手法による解析結果から、液体コンポストの特徴を説明するような知見を抜粋して紹介する。

まず図-5に、電気泳動によって異なる遺伝子を分離したDGGE法の結果例を示す。図中で、各バンドは特定の細菌に由来するものであり、縦方向に同位置のバンドは、同一の細菌の存在を反映している。そのため、試料ごとにバンドのパターンを比較すれば、細菌群集の類似性や経時変化などを評価できる。たとえば①=余剰汚泥、②=嫌気性消化汚泥、③=余剰汚泥の液体コンポスト、⑥=嫌気性消化汚泥の液体コンポストを比べても、縦方向に位置の共通するバンド（共通の細菌）はほとんど見られない。

また④~⑥の経時変化を詳しく見ると、細菌群集は反応開始から1週間で大きく変化していることが分かる。たとえば矢印で示した位置のバンドは、原料の嫌気性消化汚泥で極めて濃かったものの、時間とともに急激に薄くなっている。反応開始から1週間で、条件に適応した細菌群集が形成される傾向は、温度によらず観察された。したがって、生物学的な根拠に基づいて、液体コンポストの製造には特殊な植種源や長い馴致期間が不要である、と考えられる。

次に、液体コンポストにおいて優占している細菌種について述べる。詳細は専門的となるので参考文献⁴⁾にゆずるが、優占菌種として推定されたクロストリジウム目およびフレキシバクター属に近縁な細菌群は、他の有機性原料（生ごみや家畜糞尿）のコンポストなどからも、検出例が報告されている。すなわち、液体コンポストに存在する細菌は、他のコンポストと類似したものだった。

3. 液体コンポストの利用

3.1 液体コンポストの特徴

3.1.1 下水汚泥に由来する特徴

液体コンポストは液状の余剰（濃縮）汚泥や嫌気性消化汚泥を、通常のコンポストは脱水後の汚泥を原料としている。とはいえ、脱水の前後で汚泥の成分に大きな変化が生じるわけではない。したがって、これらのコンポストは、濃度を除いてほぼ同等な有機質肥料である。

下水汚泥を原料とする肥料の利点は、窒素・リン酸や、各種の微量栄養素を豊富に含むことである。過剰だと有害となる物質についても、濃度と

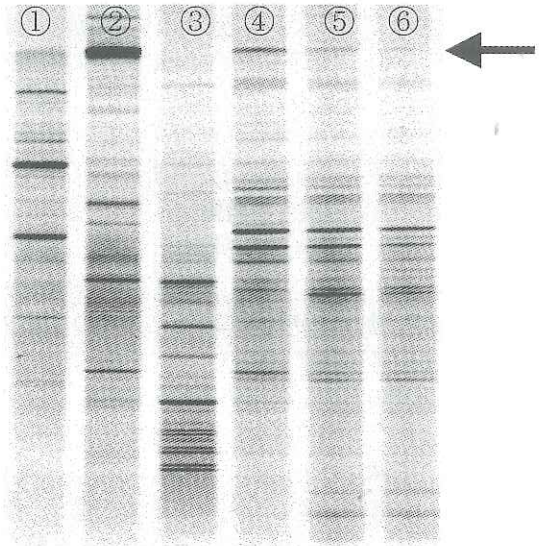


図-5 DGGE法の結果（60℃製造コンポスト）
 ①：余剰汚泥、②：嫌気性消化汚泥
 ③：①の液体コンポスト（3週間目）
 ④~⑥：②の液体コンポスト（1~3週間目）

影響を把握するとともに、緑農地へ適切に施用する方法が数多く検討されている²⁾。このような知見を背景に、肥料取締法の「普通肥料」の規格に裏付けられた、豊富な利用実績を有している。そのため、下水汚泥コンポストに準じた取り扱いによって、液体コンポストについての適切な利用方法を容易に見出すことができると考えられる。

3.1.2 性状に由来する特徴

液体コンポストでは、汚泥の固形分が完全に溶解しているわけではない。しかしながら、場合によっては遠心分離ができなくなるほど、液相との良好な混合状態が実現されるため、液体肥料として扱うことになる。液体肥料という性状は、均一に散布しやすいという利点をもたらす。

その一方で、単位量あたりの肥料効果は、固体肥料である通常の下水汚泥コンポストなどに比べ

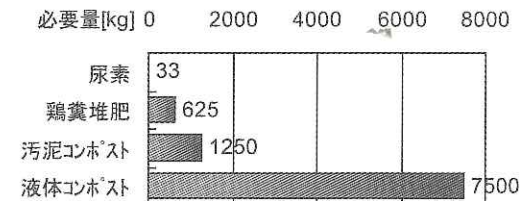


図-6 窒素基肥（15kg/10a）を想定した必要量目安
 鶏糞と汚泥コンポストは文献²⁾のTN・含水率、液体コンポストは余剰汚泥-35℃製造の測定値より計算。

て著しく劣ることになる(図-6)。この点は、輸送や保管のように量に応じた費用が必要となる過程が多いほど、大きな欠点となってくる。したがって液体コンポストの製造は、利用先の近郊において、需要期を中心に行うことが望ましい。

3.1.3 製造方法に由来する特徴

液体コンポストを製造する際には、汚泥の脱水を必要としない。そのため、脱水工程に関わる費用(凝集剤、動力)が不要になり、返流水も発生しなくなる。特に後者については、窒素・リン・難分解性有機物といった水処理に悪影響を及ぼす溶存物質が、コンポストでは逆に肥料効果をもたらすという意味で一石二鳥と言える。

さらに、液体を対象としたコンポスト化は、攪拌しやすいことも利点である。十分な混合と酸素濃度の維持だけで、肥料の品質として重要な「均質さ」「有機物の安定化」が実現されるので、運転管理が極めて容易である。酸素が汚泥全体に供給されることは、迅速な安定化にもつながる。今回の実験でも、通常の下水汚泥コンポストの一次発酵に相当する2週間程度で、汚泥の安定化が達成されていた(図-3)。

なお、液体コンポストの製造方法としては、植種源が不要であること、管理が容易になることから、回分式の運転が望ましい。そのため、既存の下水汚泥コンポストのように、装置一台あたりの規模拡大を追求することは現実的でない。むしろ、小型の装置を並列で配置する形で、製造量・時期の柔軟性を高めることが重要である。つまり液体コンポストは、既存の下水汚泥コンポストを代替する技術ではなく、緑農地利用手法を多様かつ柔軟にする新たな技術として位置付けられる。

3.2 液体コンポストの適用可能性

3.2.1 農村部の小規模処理施設への適用

液体コンポストの特徴の一つは、小型の装置が作りやすく、運転管理が容易なことである。このことから、農村地域の小規模処理施設では、集約せずに効率よくコンポスト化できるという、緑農地利用の新たな方向性が生まれる。技術的な観点だけから見れば、集約型と分散型処理の優劣を決めることは難しい。しかしながら、農作物の地産地消と同様に、下水汚泥の地域内循環は、広域循環に比べて受け入れられやすい可能性がある。下水汚泥を地域の身近な資源として循環利用するた

めには、液体コンポストのように効率的な分散型処理技術の役割が大きいと考えられる。

3.2.2 家畜糞尿との混合処理

下水汚泥と家畜糞尿を混合してコンポスト化すると、牛糞との融合コンポスト⁵⁾に代表されるように、高い肥料効果が得られるとされている。液体コンポストについても、特に液状の家畜糞尿を受け入れることは容易であり、カリ分の増加といった肥料効果の向上も見込まれる。下水汚泥と家畜糞尿を集約して処理できれば、地域におけるバイオマス利活用を効率化することにもなる。ただし、肥料としての品質を確保するためには、信頼性のある原料を用いることが重要である。家畜糞尿に関して言えば、医薬品や重金属などの濃度を確認しておく必要がある。

3.2.3 需要変動・小規模需要への対応

下水汚泥コンポストの需要は季節変動が大きく、月毎の払出量として3~4倍の差が報告されている⁶⁾。液体コンポストでは、このような需要の変動に製造量の調整で対応しやすい。ただし汚泥の発生量は大きく変化しないので、液体コンポスト以外の再利用・処分方法と組み合わせた汚泥の管理が必要とされる。小規模施設などでは、需要の少ない時期の液体コンポストを、汚泥の減溶化工程と位置付けることもあり得るだろう。

また、極めて小規模な需要に対して、液体コンポストを供給することも検討の価値がある。たとえば都市近郊の狭い農地では、堆肥などを自家生産することが難しい。一方で、有機質肥料によって生産性を高めることは、そのような場所でこそ強く求められる。液体コンポストならば、小型の装置を需要期のみ運転することで、小規模な需要にも対応しやすい。たとえ現在の利用量が多くないとしても、これまでの下水汚泥コンポストが対応できなかった需要を喚起することで、将来的な利用促進につながる事が期待される。

3.3 今後の検討課題

3.3.1 液体・有機質肥料の普及促進

液体の有機質肥料は、量に応じて必要となる運搬・保管費用が問題となりやすい。液体コンポストの場合、利用者が引取りに来ることは現実的でない。おそらく、散布機能を有する運搬車が利用場所に出向く形となるだろう。このことは、一見すると液体コンポストの大きな欠点に見える。し

しかし、通常の下水汚泥コンポストでも、無料の運搬によって需要が拡大すると報告されている⁶⁾。また、散布の手間や散布方法に関する知見は、利用者が懸念する点でもある。したがって、発想を転換して、製造から散布までを一貫して請け負う仕組みを整えることで、液体コンポストの競争力を高めることが可能ではないだろうか。既存の下水汚泥コンポストも含めて、循環型社会の形成という理念だけでなく、利用者の要請に応える実用的な普及促進策が望まれる。

3.3.2 製造過程における省エネルギー

製造に要するエネルギーを削減することは、環境への配慮というだけでなく、製造費用に対しても大きな意味がある。そのため、曝気ではなく加圧充填による酸素供給を採用することで、省エネルギーに配慮した構造となっている。それでも、加圧の動力源や加温の熱源については、さらなる消費エネルギーの低減を検討する余地がある。

たとえば汚泥の嫌気性消化でメタン回収を行えば、カーボンニュートラルな熱源が利用できる。また、汚泥の燃焼装置を改良して、熱や圧縮空気を回収する手法の開発も進められている⁷⁾。これらの手法は、豊富なバイオマス資源(汚泥)が安定的に集まるといふ、下水処理施設の特性を活用したものである。このように、エネルギー回収と緑農地利用(物質循環)の最適化を目標に設定した上で、要素技術の一つである液体コンポスト技術を改良していくことが重要となるだろう。

4. まとめ

本稿の前半では、下水汚泥を原料とする液体コンポストの製造実験についてまとめた。投入した下水汚泥は2週間程度で安定化すること、最終工

程として常温～中温での反応が必要なこと、通常の下水汚泥コンポストと類似した細菌が存在していること、などの知見が得られた。

これらの実験結果を元に、後半では、液体コンポストの特徴や利用に向けた課題を整理した。小型の装置で簡易に生産できることから、小規模施設や小規模な需要、生産量の季節変動などへの対応が利点と考えられた。今後は、液体・有機質肥料という肥料の特性を生かすように、製造～利用体制を最適化することが課題となる。

参考文献

- 1) 日本下水道協会 Web、汚泥処理の現状データページ：
http://www.jswa.jp/05_arekore/06_use/riyou/data.html
- 2) 日本下水道協会：下水汚泥の農地・緑地利用マニュアル2005年版
- 3) 金川貴博：分子生物学的手法による微生物相解析の現状と問題点、用水と廃水、48 (1), pp48-52, 2006
- 4) 庄司 仁、落 修一、春日郁朗、尾崎正明：下水汚泥の液体コンポスト化における汚泥の分解に関わる細菌群集構造の解析、水環境学会誌、投稿中
- 5) 平山孝浩、渡部春樹、落 修一、木村龍介、川崎晃：下水汚泥と牛糞の融合コンポスト化について、再生と利用、19 (72), pp48-51, 1996
- 6) 今田 博：下水汚泥の肥料化技術～愛知県の下水汚泥肥料の実情～、下水汚泥の緑農地利用促進に関する講演会講義資料、pp28-58、日本下水道協会、2006
- 7) 土木研究所、クボタ、月島機械、石川島播磨重工業、産業技術総合研究所：有機性排出物保有熱量の高度電力変換技術に関する調査・研究 共同研究報告書、2005

庄司 仁*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所材料地盤研究グループ
プリアイクルチーム専門研究員、工博
Dr. Tadashi SHOJI

落 修一**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所材料地盤研究グループ
プリアイクルチーム総括主任研究員、工博
Dr. Shuichi OCHI

尾崎正明***



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所材料地盤研究グループ
プリアイクルチーム上席研究員
Masaaki OZAKI