

下水汚泥の減容化と資源化に関する研究（第3報）

—二重管式熱交換器導入による熱エネルギー効率の改善事例—

Study on the development of a new sewage treatment flow system for excess sludge reduction and resource recovery (Report 3)

- Improvement instances of heat energy efficiency by a double-pipe exchanger in this system -

中野 光一（九州工業大学 大学院 生命体工学研究科） 前田 憲成（九州工業大学 大学院 生命体工学研究科）
西野 隆治（技術本部 企画開発部）

Kouich Nakano (Kyushu Institute of Technology)
Takaharu Nishino (Engineering Planning Department)

Toshinari Maeda (Kyushu Institute of Technology)

我が国における多くの下水処理施設で活性汚泥法が適用されてきているが、発生する余剰汚泥の量は増加の一途をたどり、深刻な社会問題となってきた。そこで、著者らは高温好気（Thermophilic aerobic digestion : TAD）処理を適用した下水汚泥の減容化と資源化を指向する新しい活性汚泥処理フローシステムを考案し、種々の検討を行ってきた。本研究では、汚水処理システムのエコフィッティングの観点から、熱交換器の導入、工場や温泉等の温排熱の利用、バイナリー発電の導入を考慮した新しい活性汚泥処理システムを考案し二重管式熱交換器を導入した熱交換効率やバイナリー発電の導入の可能性について検討を行った。

Activated sludge methods are applied for many waste water treatment plants in our country. But rapid increase of excess sludge produced from the waste water treatment system becomes one of the serious social problems. Therefore we attempted to construct a new flow system that decrease the excess sludge and produce useful resource using thermophilic aerobic digestion. And we have developed some items. In this study, from the eco-fitting point of view, improvement of heat energy efficiency by a double-pipe exchanger and application of a binary electric power generation are investigated.

1. 緒言

わが国における下水処理は、現在自治体あるいは第3セクターによって実施されているが、多くの処理施設で活性汚泥法が適用されてきている。そして、この方法では余剰汚泥が発生するため、この余剰汚泥をセメントの原料の一部として添加したり、乾燥後に改良して肥料原料の一部にしたりするほか、大部分は埋立土壌として利用されてきた。ところが、計画された埋め立て予定地に対して、発生する余剰汚泥の量は、この20年間、年々増加の一途をたどり、深刻な社会問題となってきた。

この深刻な社会問題に鑑み、前報¹³⁾および前前報¹²⁾では、高温好気（Thermophilic aerobic digestion : TAD）処理を適用した下水汚泥の減容化と資源化を指向する新しい活性汚泥処理フローシステムを考案するとともに、汚泥溶解菌の分離・同定、汚泥溶解菌を添加した調整未減菌汚泥の減量率の測定・評価、単離した菌株の特性評価と調整減菌汚泥の減量率の測定・評価、TAD処理後の汚泥のCOD値測定による特性評価、汚泥を原料としたメタン発酵の可能性評価等の検討を行った。そして、汚水処理システムのエコフィッティングの観点¹⁻¹¹⁾から、約60℃の高温で運転される汚泥溶解槽等に着目し、汚泥溶解菌の活性状態を維持し、汚泥溶解性の向上・安定に資するように、高温槽の改良を通して、伝熱効率や温度応答性の改良を図り、本システムの熱エネルギー効率の改善を試みた¹³⁾。

本研究では、図1に示すように、更なる高付加価値化や低コスト化を実現するため、熱交換器の導入、工場や温泉等の温排熱の利用、バイナリー発電の導入を考慮した新しい活性汚泥処理システムを考案した。そして、二重管式熱交換器を導入した熱交換効率について検討¹⁴⁾を行った。また、バイナリー発電の導入の可能性についても検討を行ったので、以下に報告する。

2. 実験方法

本汚水処理システムの要素設備で、約30℃で運転される曝気槽（低温槽）と、約60℃で運転される汚泥溶解槽（高温槽）に着目し、新しく考案したシステムの有効性

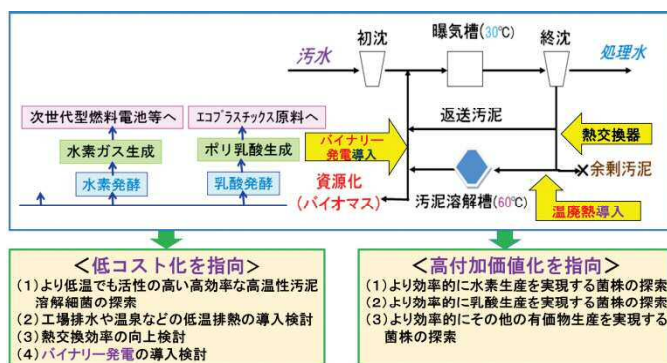


図1 下水汚泥の減容化と資源化・低コスト化を指向する新しい活性汚泥処理フローシステム

を検討するために、まず、実プラントで用いられている制御値をスケールダウンすることにより実験に用いる基礎的オペレーティング制御値の導出を行なった。本研究で実施した二重管式熱交換器の選定・設計、二重管式熱交換器の熱交換性能の実測方法、バイナリー発電の導入可能性の検討方法等について以下に述べる。

2. 1 二重管式熱交換器の選定と設計

熱交換器には、図2に示すように種々の熱交換方式があるが、省スペースで流路をそのまま利用できる点、更に汚水中に含まれる固形物により閉塞の可能性があることから、平滑管型の二重管式熱交換器を選定・採用した。

二重管式熱交換器は、外管をオーステナイト系ステンレス鋼SUS304、内管を銅管とした（図3）。また、二重管式熱交換器の寸法を表1に示す。

2. 2 二重管式熱交換器の熱交換性能の実測方法

二重管式熱交換器のシステム構成および流体の流動方向は、図4に示すように並流式と向流式とした。実験装置は表2に示す。測温は、熱電対にて低温側と高温側で同時に行い、同時刻の温度をデータロガーで記録した。また、実験条件は表3に示す通りとした。

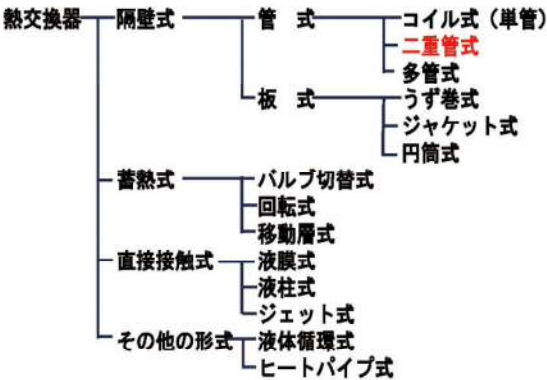


図2 種々の熱交換方式



図3 二重管式熱交換器外観

表1 二重管式熱交換器の寸法

		外径 (mm)	材厚 (mm)	長さ (mm)
外管	SUS304	10	1	200, 500, 1,000
内管	Copper	4, 6	1	200, 500, 1,000

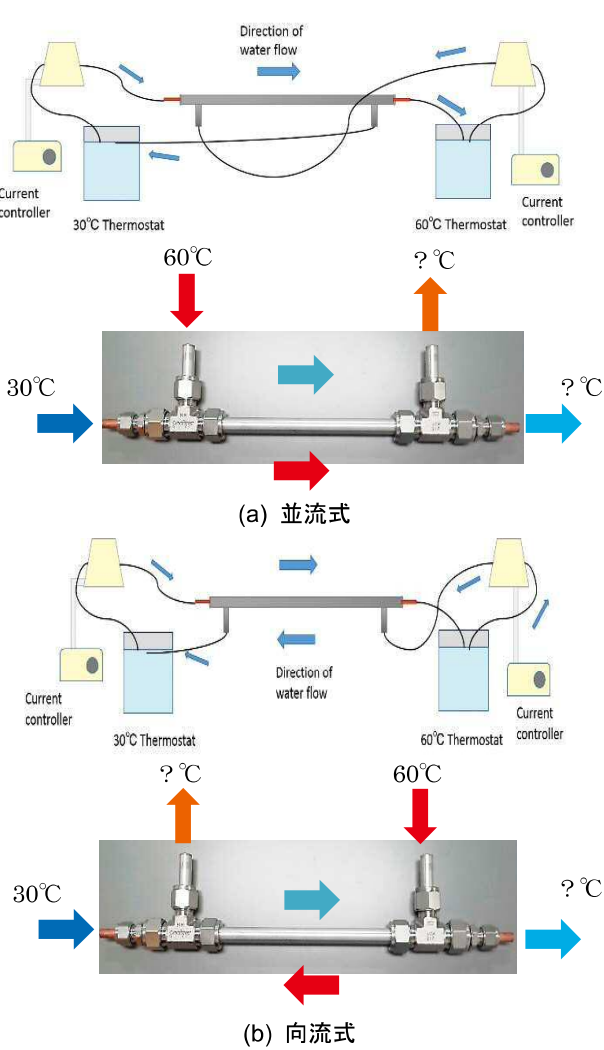


図4 二重管式熱交換器のシステム構成および流体の流動方向

表2 実験装置

装置名称	メーカー	型番	備考
Heater	TAITEC	SX-10R	(低温流体)
Heater	TAITEC	SH-12	(高温流体)
Water Bath	TAITEC	Personal Lt -10F	(高温流体)
Water Bath	TAITEC	Personal H -10	(低温流体)
ポンプ	Masterflex	7553-80	×2
熱電対	AS ONE	K型熱電対 DS-K	0.5×300×2
データロガー	AS ONE	RX-450K	×2
シリコンチューブ	Masterflex	96400-15	

表3 実験条件

高温流体温度	60℃
低温流体温度	30℃
流動方向	並流, 向流
流量	5~50ml/min.

2. 3 バイナリー発電の導入可能性の検討

バイナリー発電とは、加熱源系統と作動媒体系統の2つ (binary) の熱サイクルを利用する発電方式である。工場温排水、温泉水、太陽熱温水、ごみ焼却施設などの比較的低温の温 (排) 水 (70℃～95℃) を用いて、水より沸点の低い液体 (アンモニア、ペンタン、ハイドロフルオロカーボンHFC (hydrofluorocarbon) : エアコンなどの冷却材など) を作動媒体とし、加熱・蒸発させて、その蒸気でタービンを回して発電を行うオーガニックランキンサイクル (ORC) 等が適用されている。また、環境に優しいことも特徴のひとつであり、工場や温泉の低温排熱を利用できる地域に本下水汚泥の減容化と資源化システムを導入できる場合、エネルギーコストを大幅に低減できる可能性がある。60℃への昇温に工場や温泉の低温排熱を活用し、さらに、30℃への冷却にバイナリー発電を適用すれば、発電された電力を本システムの動力として活用することが可能であり、一石二鳥の効果が期待される。そこで、このバイナリー発電の適用可能性について各種文献等の情報収集により調査検討を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 二重管式熱交換器の熱交換性能の実験結果

平滑管型二重管式熱交換器の総括伝熱係数等をベースにした理論計算値は、実験結果と同様の結果を示したが、系外への熱の放散を考慮しておらず、熱交換性能に関する実験値は理論計算値よりもやや低い値を示した。ここでは、実験結果に基づいて以下に考察する。

3. 1. 1 向流および並流における管長の影響

流量を10ml/minとし、流動方向を向流、並流とした。実験開始から約10分後、流体の温度変化が安定してから測定を行った。向流および並流における管長と温度変化の関係を図5、図6に示す。図中のHighは高温流体 (初期温度60℃) の温度降下、Lowは低温流体 (初期温度30℃) の温度上昇を示している。向流、並流いずれの場合も低温流体の温度は約53℃まで上昇した。また、管長が長くなるほど熱交換性能は向上し、内管径が4mmの場合の方が熱交換性能は向上することがわかる。並流の場合には、高温流体および低温流体の温度変化に収束傾向が認められた。

3. 1. 2 向流における流量の影響 (内管径:4mm)

流動方向を向流、内管径を4mmとした。実験開始から約5分後、流体の温度変化が安定してから測定を行った。向流における流量と温度変化の関係を図7に示す。この結果より、管長が長くなるほど熱交換性能は向上することがわかる。流量が30ml/min程度までは、熱交換性能にやや増加傾向が認められるが、その後は漸減している。

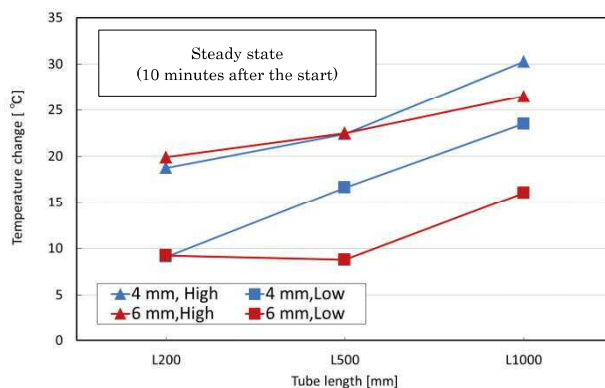


図5 向流における管長と温度変化の関係
(流量: 10ml/min)

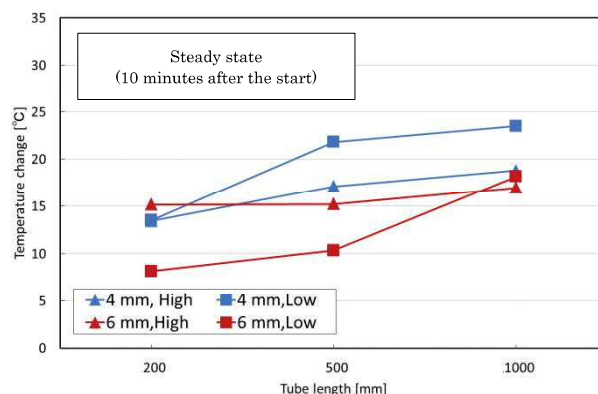


図6 並流における管長と温度変化の関係
(流量: 10ml/min)

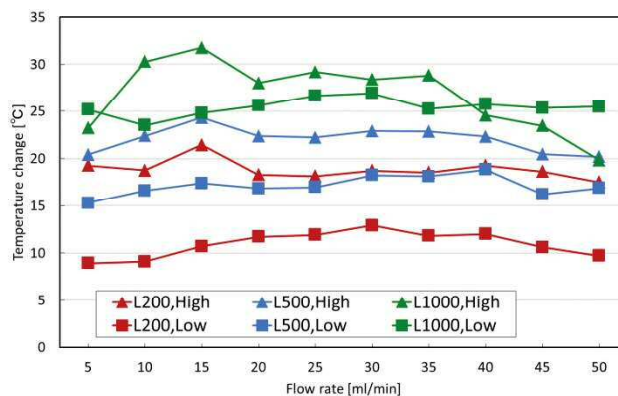


図7 向流における流量と温度変化の関係
(内管径: 4mm, 管長: 200, 500, 1,000mm)

3. 1. 3 向流における流量の影響 (内管径: 6mm)

流動方向を向流、内管径を6mmとした。実験開始から約5分後、流体の温度変化が安定してから測定を行った。向流における流量と温度変化の関係を図8に示す。この結果からも、管長が長くなるほど熱交換性能は向上することがわかる。また、管長が短い場合には流量の増加に伴う熱交換性能の低下が認められる。これは、流量が増加すると流速が早くなるため、熱交換に要する時間が短くなるためと考えられる。

3.1.4 並流における流量の影響（内管径:4mm）

流動方向を並流，内管径を4mmとした．実験開始から約5分後，流体の温度変化が安定してから測定を行った．並流における流量と温度変化の関係を図9に示す．この結果からも，管長が長くなるほど熱交換性能は向上することがわかる．一方，向流の場合と比較すると熱交換性能は流量の増加とともに低下しており，高温流体と低温流体の温度変化の割合も低くなっている．

3.1.5 並流における流量の影響（内管径:6mm）

流動方向を並流，内管径を6mmとした．実験開始から約5分後，流体の温度変化が安定してから測定を行った．並流における流量と温度変化の関係を図10に示す．この結果からも，管長が長くなるほど熱交換性能は向上することがわかる．一方，向流の場合と比較すると高温流体と低温流体の温度変化の割合も低くなっている．

3.1.6 向流における内管径と流量の影響

流動方向を向流とした．実験開始から約5分後，流体の温度変化が安定してから測定を行った．向流における流量と低温流体（30℃）の温度上昇の関係を図11に示す．この結果からも，管長が長くなるほど熱交換性能は向上することがわかる．また，管長が短く，かつ流量が少ない場合には，内管径が6mmの場合の方が熱交換性能は向上している．一方，流量の増加とともに，熱交換性能は，内管径が4mmの場合の方が向上する．

3.1.7 並流における内管径と流量の影響

内管径を4mm，6mmとし，実験開始から約5分後，流体の温度が安定した状態で測定した並流における流量と低温流体（30℃）の温度上昇の関係を図12に示す．この結果から，内管径4mmの場合，熱交換性能は良い値を示すが，流量変化による変動はそれほど大きくないことがわかる．

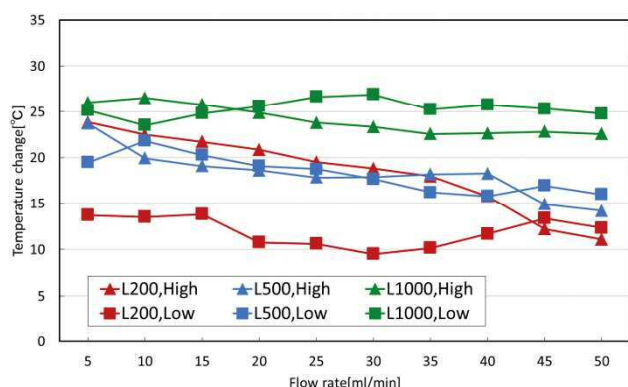


図8 向流における流量と温度変化の関係
（内管径：6mm，管長：200，500，1,000mm）

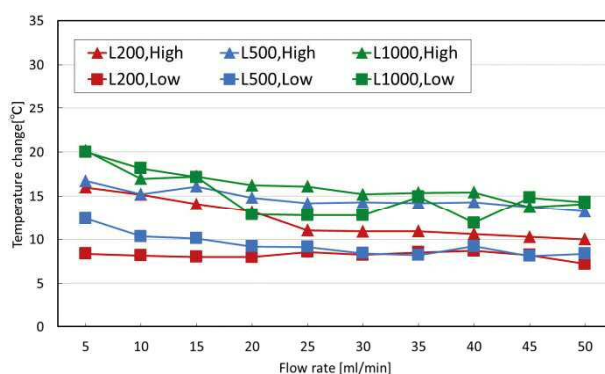


図9 並流における流量と温度変化の関係
（内管径:4mm，管長：200，500，1,000mm）

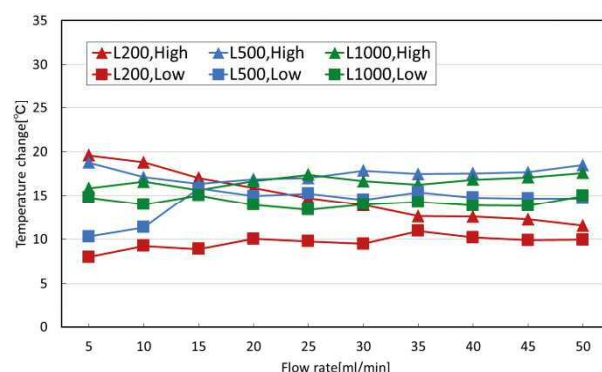


図10 並流における流量と温度変化の関係
（内管径:6mm，管長：200，500，1,000mm）

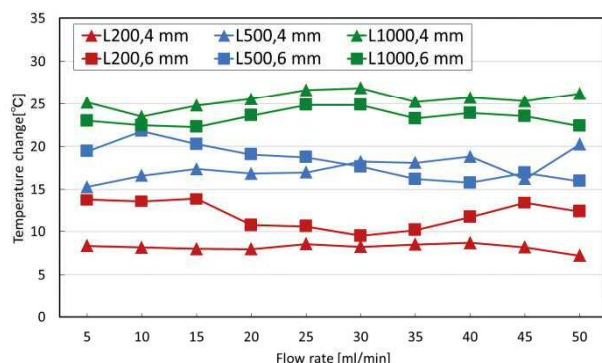


図11 向流における流量と低温流体の温度上昇の関係
（内管径：4，6mm，管長：200，500，1,000mm）

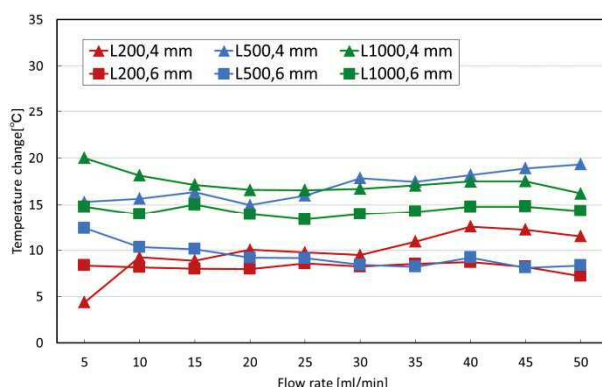


図12 並流における流量と低温流体の温度上昇の関係
（内管径：4，6mm，管長：200，500，1,000mm）

3. 2 バイナリー発電の適用可能性

現在、バイナリー発電向けの発電装置を製造販売しているメーカは数社あり、より低温でも発電可能な発電装置も開発されてきている。また、ユニット形式で導入が簡単であり、小型から大型までの設計が可能である。

温泉排熱や工業温排水等の活用しながら、このバイナリー発電システムも導入すれば、発電された電気を下水処理施設の電力として利用することも可能である。

表4にバイナリー発電の適用が期待される全国の温泉を示す。わが国には、47都道府県に温泉が存在し、本システムへの二重管式熱交換器とバイナリー発電の導入は、さらなるトータルコストダウンが可能となり、実用化に向けた開発を大きく加速するものと考えられる。

4. 結 言

更なる高付加価値化や低コスト化を実現するために、熱交換器の導入、工場や温泉等の温排熱の利用、バイナリー発電の導入を考慮した新しい活性汚泥処理システムを考案し、二重管式熱交換器を導入した熱交換効率やバイナリー発電の導入の可能性について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 二重管式熱交換器の向流および並流における管長の熱交換性能に及ぼす影響検討するために、管長を200, 500, 1,000mmと変化させた場合、低温流体（初期温度30℃）は約53℃まで温度上昇しており、管長が長くなるほど熱交換性能は向上した。また、内管径は、外径6mmよりも4mmの場合の方が熱交換性能は向上した。並流の場合には、高温流体および低温流体の温度変化に収束傾向が認められた。

- (2) 二重管式熱交換器の向流における流量の熱交換性能に及ぼす影響を検討したところ、内管径4mmの場合、流量が30ml/min程度までは、熱交換性能がやや増加する傾向が認められるが、その後は漸減した。一方、内管径6mmの場合、管長が短い場合には流量の増加に伴う熱交換性能の低下が認められた。これは、流量が増加すると流速が早くなるため、熱交換に要する時間が短くなるためと考えられる。
- (3) 二重管式熱交換器の並流における流量の熱交換性能に及ぼす影響を検討したところ、内管径4mmの場合、熱交換性能は流量の増加とともに低下しており、高温流体と低温流体の温度変化の割合も低くなった。また、内管径6mmの場合にも、高温流体と低温流体の温度変化の割合も低くなった。
- (4) 二重管式熱交換器の向流における内管径と流量の熱交換性能に及ぼす影響を検討したところ、管長が短く、かつ流量が少ない場合には、内管径6mmの場合の方が熱交換性能は向上した。一方、流量の増加とともに、熱交換性能は、内管径4mmの場合の方が向上した。
- (5) 二重管式熱交換器の並流における内管径と流量の熱交換性能に及ぼす影響を検討したところ、内管径4mmの時、熱交換性能は良い値を示すが、流量変化による変動はそれほど大きくないことが判明した。
- (6) わが国には、47都道府県に温泉が存在し、本システムへの二重管式熱交換器とバイナリー発電の導入は、さらなるトータルコストダウンが可能となり、実用化に向けた開発を大きく加速するものと考えられる。

表4 バイナリー発電の適用が期待される全国の温泉

No	都道府県名	温泉の件数	温泉の名称(代表例)	No	都道府県名	温泉の件数	温泉の名称(代表例)
1	北海道	104件	登別温泉、定山渓温泉、洞爺湖温泉、支笏湖温泉、湯の川温泉	25	滋賀県	12件	雄琴温泉、石山温泉、長浜太閤温泉、尾上温泉、宝船温泉
2	青森県	28件	浅虫温泉、大鰐温泉、酸ヶ湯温泉、蔦温泉、獄温泉	26	京都府	17件	天橋立温泉、嵐山温泉、湯の花温泉、夕日ヶ浦温泉、鳴き砂温泉
3	岩手県	29件	八幡平温泉、花巻温泉、大沢温泉、鶯宿温泉、安比温泉	27	大阪府	9件	伏尾温泉、石切温泉、大鳴山温泉、箕面温泉
4	宮城県	21件	鳴子温泉、秋保温泉、遠刈田温泉、金山温泉、作並温泉	28	兵庫県	29件	有馬温泉、城崎温泉、宝塚温泉、湯村温泉、香住温泉郷
5	秋田県	37件	男鹿温泉、鶴の湯温泉、玉川温泉、黒湯温泉、田沢湖高原温泉郷	29	奈良県	18件	十津川温泉、吉野温泉、洞川温泉、入之波温泉、湯泉地温泉
6	山形県	30件	蔵王温泉、天童温泉、赤湯温泉、上山温泉、湯野浜温泉	30	和歌山県	25件	白浜温泉、川湯温泉、龍神温泉、串本温泉、加太温泉
7	福島県	69件	土湯温泉、飯坂温泉、岳温泉、磐梯熱海温泉、猪苗代温泉	31	鳥取県	12件	三朝温泉、皆生温泉、鳥取温泉、はわい温泉、関金温泉
8	茨城県	9件	袋田温泉、五浦温泉、平潟港温泉、湯の網温泉、大子温泉	32	島根県	26件	玉造温泉、松江しんじ湖温泉、立久恵峡温泉、出雲湯村温泉
9	栃木県	25件	鬼怒川温泉、日光温泉、川治温泉、塩原温泉、那須温泉	33	岡山県	19件	湯原温泉、湯ノ浦温泉、郷緑温泉、奥津温泉
10	群馬県	63件	草津温泉、伊香保温泉、水上温泉、四万温泉、猿ヶ京温泉	34	広島県	18件	湯来温泉、湯の山温泉、湯坂温泉、宮浜温泉、温井温泉
11	埼玉県	11件	和銅鉱泉、小鹿野温泉大竜寺源泉、不動の湯温泉、四季の湯温泉	35	山口県	20件	湯田温泉、川棚温泉、湯ノ口温泉、長門湯本温泉、萩温泉郷
12	千葉県	18件	白浜温泉、犬吠崎温泉、勝浦温泉、鴨川温泉、千倉温泉	36	徳島県	10件	祖谷温泉、鳴門温泉、四季美谷温泉、神山温泉、ふいご温泉
13	東京都	20件	岩蔵温泉、鶴ノ湯温泉、蛇の湯温泉、松ノ湯温泉	37	香川県	8件	黒川温泉、塩江温泉郷、こんぴら温泉、湯元さめき瀬戸大橋温泉
14	神奈川県	27件	湯河原温泉、箱根湯本温泉、強羅温泉仙石原温泉、芦ノ湖温泉	38	愛媛県	15件	道後温泉、湯ノ浦温泉、鈍川温泉、今治温泉、権現温泉
15	新潟県	68件	六日町温泉、弥彦温泉、瀬波温泉、妙高温泉、大沢山温泉	39	高知県	17件	あしずり温泉郷、よさこい温泉、龍河温泉、黒潮温泉龍馬の湯
16	富山県	23件	宇奈月温泉、水見温泉郷、薬師温泉、金太郎温泉	40	福岡県 (北九州市)	14件	筑後川温泉、原鶴温泉、脇田温泉、船小原温泉、吉井温泉、若松天然温泉、八幡天然温泉、寺迫ラジウム温泉、河内天然温泉
17	石川県	23件	和倉温泉、山代温泉、片山津温泉、輪島温泉郷	41	佐賀県	12件	嬉野温泉、武雄温泉、古湯温泉、熊の川温泉、佐里温泉
18	福井県	10件	芦原温泉、三国温泉、越前玉川温泉、東尋坊温泉、丸岡温泉	42	長崎県	14件	雲仙温泉、小浜温泉、島原温泉、させぼ温泉、千里ヶ浜温泉
19	山梨県	39件	石和温泉、甲府温泉、山中湖温泉、富士河口湖温泉郷、下部温泉	43	熊本県	39件	杖立温泉、人吉温泉、黒川温泉、玉名温泉、地獄温泉
20	長野県	139件	別所温泉、上諏訪温泉、野沢温泉、白竹温泉、乗鞍高原温泉	44	大分県	39件	別府温泉、湯布院温泉、長湯温泉、筋湯温泉、天ヶ瀬温泉
21	岐阜県	38件	飛騨高山温泉、下呂温泉、長良川温泉、平湯温泉、湯河温泉	45	宮崎県	14件	青島温泉、宮崎リゾート/たまゆらの湯、湯之元温泉、吉田温泉
22	静岡県	67件	熱海温泉、修善寺温泉、寸又峡温泉、伊豆長岡温泉、堂ヶ島温泉	46	鹿児島県	27件	指宿温泉、霧島温泉郷、丸尾温泉、霧島神宮温泉
23	愛知県	18件	蒲田温泉、三谷温泉、西浦温泉、湯谷温泉、南知多温泉郷	47	沖縄県	1件	那覇天然温泉
24	三重県	26件	湯の山温泉、柳原温泉、鳥羽本浦温泉、浜島温泉				

<参考文献>

- 1) 中野光一：北九州環境ビジネス推進会（KICS）の紹介ービジネスパートナーの構築に向けてー，米国姉妹都市提携 50 周年記念事業「シアトル地区における北九州経済セミナー」，（2009），シアトル地区貿易開発協議会，（米国）<招待講演>
- 2) 中野光一：先端エコフッティング技術課題への取り組み，高田技報 Vol.19 pp.36-37，（2009）
- 3) 尾川博昭，前田憲成，中野光一：下水污泥減容を微生物により行う污水处理プロセスエネルギーのエコフッティング，先端エコフッティング技術開発センター紀要 第 1 号，pp.45-46，（2009）
- 4) 中野光一：海外研究調査出張報告書-資料 5（污水处理に関する調査），先端エコフッティング技術開発センター紀要 第 1 号，pp.74-95，（2009）
- 5) 前田憲成，毛利健太郎，高石万理，中野光一，尾川博昭：下水污泥減容を微生物により行う污水处理プロセスエネルギーのエコフッティング，先端エコフッティング技術開発センター紀要 第 2 号，pp.63-75，（2010）
- 6) 中野光一，河村正樹：東京都污水处理施設視察報告，先端エコフッティング技術開発センター紀要 第 2 号，pp.76-86，（2010）
- 7) Takahiro Hashimoto, Toshinari Maeda, Kiwao Kadokami, Rodolfo Garcia-Contreras, Tomas K. Wood, Kouichi Nakano, Hiroaki I. Ogawa : Investigation of biological implication for metabolism of a quorum sensing inhibitor by *Pseudomonas aeruginosa* , The 24th International Symposium on Chemical Engineering, December 2-4, 2011, Hyundai Hotel, Gyung-ju, Korea, PA-01, pp.157-158, （2011）
- 8) Yusuke Tomita, Kouichi Nakano, Toshinari Maeda, Hiroaki I. Ogawa : Study on development of a new sewage treatment flow system for reducing the amount of excess sludge, The 24th International Symposium on Chemical Engineering, December 2-4, 2011, Hyundai Hotel, Gyung-ju, Korea, PC-06, pp.251-252, （2011）
- 9) Hirofumi Nakashima, Kouichi Nakano, Toshinari Maeda, Hiroaki I. Ogawa : Reduction of sewage excess sludge by using biological together with alkali treatment, The 24th International Symposium on Chemical Engineering, December 2-4, 2011, Hyundai Hotel, Gyung-ju, Korea, PC-08, pp.255-256, （2011）
- 10) Nguyen Tuan Minh, Yushi Tumori, Takaharu Nishino, Tatsuya Yamashita, Kouichi Nakano, Toshinari Maeda : Study on the development of a new sewage treatment flow system for excess sludge reduction and resource recovery, The 25th International Symposium on Chemical Engineering, December 14-15, 2012, Okinawa, Japan, PB-07, pp.233-234, （2012）
- 11) Yushi Tumori, Kouichi Nakano, Toshinari Maeda, Takaharu Nishino, Tatsuya Yamashita : Study on the development of a new sewage treatment flow system for excess sludge reduction and resource recovery -Improvement instances of heat energy efficiency in this system-, The 26th International Symposium on Chemical Engineering, December 6-8, 2013, Busan, Korea, OB-05, pp.57-58, （2013）
- 12) 中野光一，前田憲成：下水污泥の減容化と資源化に関する研究（第 1 報），高田技報, Vol.23, pp.16-21, （2013）
- 13) 中野光一，西野隆治，山下達也，前田憲成：下水污泥の減容化と資源化に関する研究（第 2 報）- 熱エネルギー効率の改善事例 -，高田技報, Vol.24, pp.10-15, （2014）
- 14) Makoto Miyaoaka, Kouichi Nakano, Toshinari Maeda, Takaharu Nishino : Study on the development of a new sewage treatment flow system for excess sludge reduction and resource recovery (Report 2) -Improvement instances of heat energy efficiency in this system-, The 28th International Symposium on Chemical Engineering, December 4-6, 2015, Ramada Plaza Jeju, Korea, OE-07, pp.133-134, （2015）

<謝 辞>

本研究開発テーマは，先端エコフッティング技術研究開発センターに，第Ⅱ期エコフッティング技術課題（研究期間：平成 20 年 8 月～3 年間）として採択され，その後，さらに継続技術課題として現在に至っている¹⁻¹⁴⁾。本研究の推進に当たり，先端エコフッティング技術研究開発センターからはご支援を，また，九州工業大学名誉教授尾川博昭先生には研究当初にいろいろとご教示いただきました。そして，大学院生の宮岡まこと君には実験を主体的に実施して頂きました。ここに記して感謝申し上げます。



中野 光一 Kouichi Nakano
九州工業大学 大学院 生命体工学研究科
生体機能応用工学専攻
(株)高田工業所 休職中
特任准教授 博士(工学)