

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12378

研究課題名（和文）生物系廃棄物の生物乾燥処理の高効率化を目的とした多段静置通気型反応器の適用

研究課題名（英文）Application of Multi Layer Static Pile Forced Aeration Reactor for Effective Bio-drying

研究代表者

金子 栄廣 (KANEKO, Hidehiro)

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：60177524

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000円

研究成果の概要（和文）：生物乾燥は、対象廃棄物に通気を行うことでその中の有機物を好気分解させ、同時に乾燥させる方法である。有機物分解に伴う発熱により温度が上昇するため乾燥効率が高まる。

静置通気型反応器は単純で運転管理上のエネルギー消費が少ないためしばしば生物乾燥に用いられる。しかし、全体が十分乾燥する前に温度が低下し、乾燥効率が下がるという問題がある。

本研究では多段静置通気型反応器を新たに導入し、従来よりも効率よい乾燥が行えることを実験ならびにシミュレーションにより明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生物系廃棄物は、古くから堆肥化や飼料化などにより有効活用が図られてきた。しかし、需要に限られることから広く普及していない。近年では、地球温暖化防止の観点から生物系廃棄物を含むバイオマス地域循環型エネルギー源として有効活用することが注目されている。一般に生物系廃棄物は水分を多く含むため燃えにくい。乾燥させれば燃料として活用できる可能性がある。生物乾燥は外部エネルギーの投入を抑えて生物系廃棄物を乾燥させる技術として注目されている。

本研究では、多段静置通気型反応器が高効率で乾燥が行える反応器であることを示すとともに、高い効率が得られるメカニズムも明らかにしている。

研究成果の概要（英文）：Bio-drying, one of the bio-waste treatment methods, is useful to make dry material from wet bio-waste. Due to the high temperature because of aerobic degradation of organic material and the aeration done for oxygen supply, effective drying can be achieved. Static pile forced aeration reactor is one of the popular reactors for this treatment, because of less energy consumption. This reactor, however, have disadvantage that high temperature cannot be maintained up to whole drying is done.

In this research, multi-layer static pile forced aeration reactor was newly introduced. It was clarified that this new reactor showed higher performance than traditional reactor by experiments and simulations.

研究分野：土木環境工学（廃棄物管理工学）

キーワード：生物系廃棄物 生物乾燥 資源化 多段静置通気型反応器 シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

生ごみ、下水汚泥、家畜糞尿などの生物系廃棄物は、古くから再生利用が可能な資源として認識され、堆肥化、飼料化、メタン発酵などの方法により有効活用が図られてきた。

しかし、堆肥や飼料のように物質としてリサイクルするには、安全かつ安定した品質の確保が容易でないため需要が限られ、広く普及するに至っていない。一方、メタン発酵のようにエネルギー利用を図る技術も、規模が小さいとエネルギー生産の安定性が低いこと、あるいはメタン回収後の残渣の処理処分の問題があることから利用が限定的であった。ところが、近年では地球温暖化防止の観点から生物系廃棄物を含むバイオマスを地域循環型エネルギー源のひとつとして有効活用することが重要視されるようになり、バイオマス産業都市構想<sup>1)</sup>の重要な視点にもなっている。

一般に、生物系廃棄物の多くは水分を多く含むため「燃えにくい」材料と捉えられがちである。しかし、研究代表者らの過去の研究では、完全に乾燥させれば 17,000~20,000kJ/kg 程度の高い発熱量を示すものが様々あり、燃料として活用できる可能性が高いことがわかっている<sup>2)</sup>。

本研究で対象とする生物乾燥は堆肥化と同様に生物系廃棄物の好気微生物処理反応を利用した方法で、外部エネルギーの投入を抑えつつ効率よく乾燥を行えることが期待される。この反応はおよそ図1のように進む。この反応では廃棄物中の有機物を好気微生物反応により分解させるために酸素供給を目的として通気を行うことが多い。この際、有機物が分解するのにあわせて自己発熱と昇温が起こり、通気の副次的効果として水分の蒸発すなわち材料の乾燥が進行する。

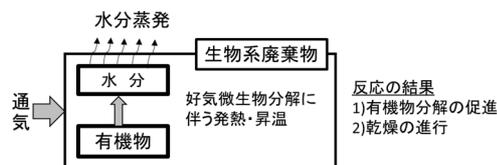


図1 生物系廃棄物の好気微生物反応

従来の堆肥化処理では製品を堆肥として緑農地還元することを目的としているので有機物分解を重視した運転管理を行っているが、運転条件を変更すれば効率よく乾燥させることができる。このことは研究代表者らのこれまでの研究<sup>3)</sup>でも明らかになっており、その乾燥効率を高めることが課題となっている。

研究代表者らはこれまでにいくつかの形式の反応器を用いて生物乾燥実験を行ってきた。中でも、この研究で使用する反応器である静置通気型反応器は、静置した材料に通気を行なうことにのみ外部エネルギーを投入すればよいので、比較的省エネルギー型の反応器である。この反応器を生物乾燥に用いた場合、図2のように材料下部から上に向かって順次反応と乾燥が進むことが明らかとなっている<sup>4-6)</sup>。

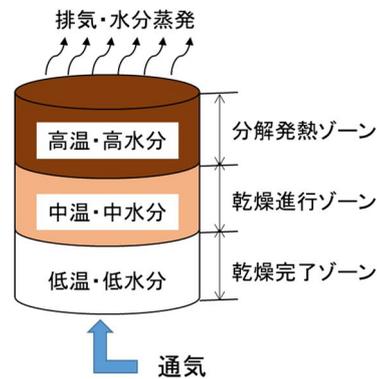


図2 静置通気型反応器概要

しかし、3日程度以上経過すると生物系廃棄物に含まれる有機物の活発な分解と発熱が終了してしまうため、まだ反応器上部の材料が乾燥していないにもかかわらず高温が維持できなくなり、乾燥効率が落ちてしまうという問題点があることが浮き彫りとなってきた。

### 2. 研究の目的

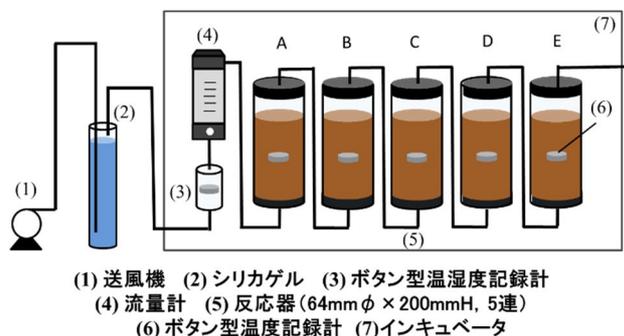
上記の問題を解決する方法として、新たに多段静置通気型反応器の導入を提案する。また、模擬生物系廃棄物を用いた室内実験を行い、多段静置通気型反応器を用いることで従来の静置通気型反応器を用いるより効率よく乾燥が行えることを示す。さらに、多段静置通気型反応器を用いた生物乾燥のシミュレーションプログラムを作成し、これを用いて従来の静置通気型に比べて多段静置通気型は高効率な生物乾燥が行えることを示す。

### 3. 研究の方法

#### (1)生物乾燥実験

##### 実験装置と材料

使用した実験装置は図3に示すとおりである。材料の交換を容易にするため、各層(カラム5本)を水平に配置した。各カラムは内径 64mm、高さが 200mm のアクリル管である。各カラムは通排気のために孔を開けたゴム栓を上下に施し、その孔を介して両端にコネクタを取り付けたシリコンチューブで直列に連結した。通気入口側から順に A 層~E 層と名称をつけて層の位置を識別した。



(1)送風機 (2)シリカゲル (3)ポタン型温湿度記録計  
(4)流量計 (5)反応器(64mmφ×200mmH, 5連)  
(6)ポタン型温度記録計 (7)インキュベータ

図3 実験装置概要

各層には模擬廃棄物を充填した。また、各層の中心に温度ロガー（(株)KN ラボラトリーズ、サーモクロン）を入れて各層の温度変化を計測した。

模擬廃棄物にはミキサーで粉碎したドッグフード（日本ペットフード(株)、ピタワン）と木くず（三洋電機(株)、SNM-HK13）を乾燥重量比で 1:2 となるように混合し、含水率が 65% になるように調製したものをを用い、各層に乾燥重量 53.2gDW、厚さ約 90mm として充填した。

実験装置はインキュベータ（東京理化、SLI-1200）内に入れ、シリカゲルを通した乾燥空気を下部から送った。通気管はインキュベータ内で十分な長さ（9m）をとって引き回し、通気温度がインキュベータ設定温度とほぼ同じになり安定するようにした。なお、インキュベータの設定温度は 40 とした。

#### 実験条件

各実験の名称と運転管理条件は表 1 のとおりとした。通気量は 0.5L/min と 1.0L/min の 2 段階に設定し、それぞれについて層を定期的に変換する実験と実験終了まで層を交換しない実験とを行った。層を交換する実験では、所定の時間に A 層を取り出し、新たに実験開始時と同じ組成・量の模擬廃棄物を E 層として追加した。交換の時期は、初回は実験開始から 48 時間後、以降は 24 時間ごととした。層交換を行わない実験は実験開始から 120 時間後まで通気を継続的に行った後、各層材料の湿潤重量と含水率を測定した。また、全層の乾燥重量と保有水分量の合計値を算定し、これに基づいて反応器全体の平均含水率を求めた。層交換を行う実験では、交換時に取り出した層内の材料について重量と含水率を測定した。

表 1 実験名と運転管理条件一覧

実験名	材料量 (gDW/層)	培養温度 ( )	通気量		層交換有無・時期	
			(L/min)	(L/min/m <sup>3</sup> )	1 回目	2 回目以降
0.5N	53.2	40	0.5	207	層交換なし	
0.5C	53.2	40	0.5	207	48 時間後	24 時間毎
1.0N	53.2	40	1.0	415	層交換なし	
1.0C	53.2	40	1.0	415	48 時間後	24 時間毎

#### (2)シミュレーションプログラムの構築

研究代表者が過去に作成した静置通気型反応器を用いた場合の生物乾燥シミュレーションプログラム<sup>7)</sup>をもとに、一部修正を加えたプログラム（2019 年版）と、これを多段静置通気型反応器に適用できるように改良したプログラム（2021 年版）を作成した。いずれも研究代表者のホームページで公開している。

シミュレーションの基本的な考え方は図 4 に示すとおりである。静置通気型反応器を用いた場合、廃棄物の好気微生物分解反応はこのように捉えることができる。すなわち、深さ方向に小部分に分割すると、それぞれの層内では近似的に反応が均一に起こると仮定できる。ある層の中での反応速度（各量の変化速度）は、その時点での材料条件および環境条件に外部からの影響を加味して決まる。このとき、材料および環境条件が反応速度に与える影響が数理モデルとして把握できていれば定量的に反応速度を求めることができる。ある時点での反応速度が求めれば、微小時間 dt 経過後の材料・環境条件が予測できるので、これを逐次的に繰り返すことによって各量の時間変化を求めるとというのがシミュレーションプログラムの概要である。

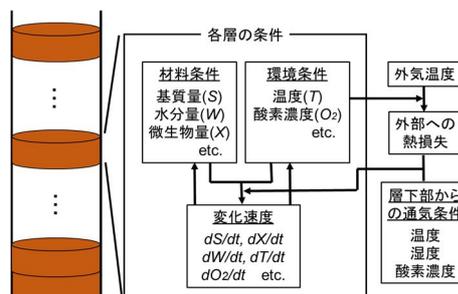


図 4 シミュレーションの考え方

また、シミュレーションの計算フロー例として材料交換を行う多段静置通気型反応器に対応できるように改良したプログラムの計算フローを図 5 に示す。

#### 4. 研究成果

##### (1)生物乾燥実験による多段静置通気型反応器の優位性検証

表 2 は生物乾燥実験の結果から、120 時間通気を行ったところで取り出された材料中に含まれる水分量をまとめて比較したものである。通気量によらず材料交換を行わなかった実験（記号 N）より材料交換を行った実験（記号 C）のほうが水分量が少なくなっている。

表 2 実験開始時および 120 時間処理後の水分量

実験名	0.5N	0.5C	1.0N	1.0C
開始時 (g/層)	98.8			
処理後 (g/層)	62.1	47.9	31.2	10.4

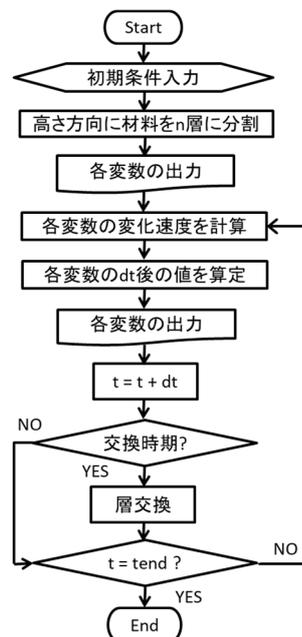


図 5 計算フロー

この結果から、材料交換を行う多段静置通気型反応器を用いたほうが、材料交換を行わない従来の静置通気型反応器に比べて、効率よく乾燥が行えることが実験的に検証できた。

## (2)シミュレーションによる多段静置通気型反応器の優位性検証

多段静置通気型反応器に対応できるように改良したシミュレーションプログラムを用い、同じ材料ならびに運転管理条件の下で、材料交換を行わずに従来の静置通気型反応器を用いて生物乾燥を行なった場合と、定期的に材料交換を行なう多段静置通気型反応器を用いて生物乾燥を行なった場合の違いについて比較した。なお、材料と運転管理条件は既報<sup>7)</sup>に合わせ、全層数は9層、外気および通気温度は40℃、通気量は0.5L/minとした。また、材料交換を行う場合、最初の交換を行う時期の3段階に設定し、いずれもその後は24時間毎に交換を行うこととした。

以下、シミュレーション結果のうち、温度ならびに取り出される材料の含水率について図示し、従来の静置通気型反応器と本研究で提案した多段静置通気型反応器を比較した結果を述べる。なお、図中の凡例では、材料交換なしのものはNoChng、材料交換ありのものは24hrs、48hrsならびに96時間後に行なう場合については、それぞれ24hrs、48hrsならびに96hrsと表記した。

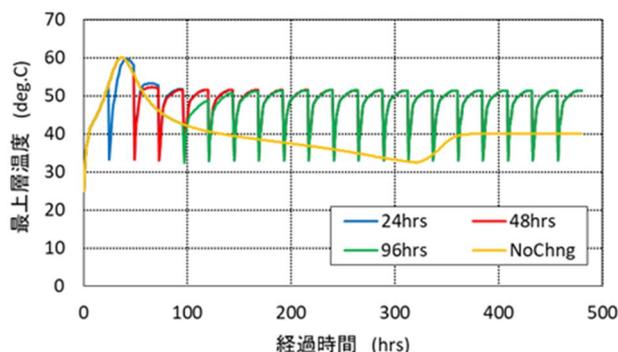


図6 最上層温度の推移

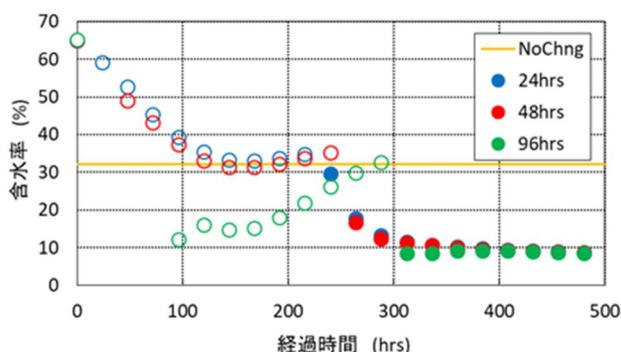


図7 取り出される材料の含水率

図6は反応器最上層の材料の温度履歴

のシミュレーション結果を示したものである。最上層の温度だけを図示したのは、この温度が反応器からの排気温度と密接に関係するからである。排気温度はその飽和水蒸気圧を左右するので、この温度の高低は反応器からの水分持ち出し量の大小と大きく関係する。

この図から、材料交換を行なわない場合 (NoChng) では約40時間までは材料温度が60℃程度に達するまで上昇するが、その後は徐々に低下してしまうことがわかる。特におよそ130~350時間後までの期間においては外気や通気温度より低くなっている。その後は外気および通気温度と同じ温度まで回復するが、材料分解に伴う発熱による温度上昇は見られない。これに対して材料交換を行なった場合 (24hrs、48hrs および 96hrs) では、材料交換時期にかかわらず最初の50時間前後までは材料交換なしの場合と同様の変化を見せた後、温度が低下することなく、外気や通気温度より10℃程度高い50℃付近で安定して推移することが読み取れる。このように高い温度を維持できるのは、生分解性有機物を含む新しい材料を定期的に最上層に供給するからであると考えられる。

以上のことから、従来の反応器よりも材料交換を行なう多段静置通気型反応器の方が最上層ならびに排気温度を高く維持しやすく、有利な乾燥条件が得られることが確認された。

材料の乾燥の進み具合を評価するため、反応器から取り出される材料の含水率についてのシミュレーション結果を図7に示す。この図においてNoChngとして示されているものは、材料交換を行なわない静置通気型反応器で216時間通気処理を行なった時点での反応器内材料の平均含水率を表している。216時間としたのは、24時間ごとの材料交換を行なう場合、最上層の材料が最下層から取り出されるまでに216時間 (24時間×9層) 通気処理されるので、材料交換がない場合も同じ処理時間に揃えるためである。なお、図中で処理開始時に充填されていて通気が216時間に達しない形で取り出された材料は白抜き、216時間通気処理が行なわれた後に取り出された材料は塗りつぶしたしたシンボルで表記している。

材料交換を行なわない場合、処理後の含水率は32%であった。これに対し、材料交換を行なう場合、最初の交換を行なう時期によって運転開始から300時間後までは含水率は安定しないが、その後はいずれの場合も10%程度で安定することがわかる。また、安定するまでの時期で見ると、最初の交換を96時間とした場合には常に32%を下回っている。一方、最初の交換を24時間後あるいは48時間後とした場合は、初めのうちは高い含水率の材料が取り出されることになるが、徐々に含水率は下がり、100時間以上経過すれば材料交換を行なわない場合と同等の含水率となることがわかる。216時間処理された材料 (塗りつぶしたシンボルで表記) についてみると、すべて材料交換を行なわない場合よりも低い含水率が達成できている。

以上のことから、多段静置通気型反応器を用いて定期的に材料交換を行なうと、材料交換を行なわない方法に比べてより乾燥した製品材料が得られることが確認できた。

### (3)実用性を考慮した多段静置通気型反応器の提案

本研究で行なったように実験室での小規模な装置であれば層の交換は比較的容易に行える。しかし、反応器のサイズや重量が大きい実規模の装置の場合には実験と同様に交換することは難しい。大規模な装置でも交換が行えるようにするための工夫が必要である。そこで、本研究のまとめとして実規模の生物乾燥施設への適用について検討した。

一例として、3槽の従来型静置通気型生物乾燥槽を備えた生物乾燥処理施設があると仮想し、この施設の配管部分だけを更新して材料交換ができるようにすることを考えた。その結果を図8に示す。

まず配管は、これまで送風機(ブロワ)から各反応槽に個別に接続されていたものを、a図のように変更する。このようにすることで一つのブロワから全ての反応槽に通気できるだけでなく各槽を直列に接続して通気が行えるようになる。

材料交換を伴う運転をするには、例えば、A槽に最も古い(すでに長時間処理した)材料が入っており、次いでB槽、さらにC槽には新しい材料が入っているとした場合「A槽 B槽 C槽」の順に直列に通気を行う。この場合はb図のように通気弁を閉じればよい。

A槽の材料が十分乾燥したらこれを取り出して新たな材料を充填し直し、通気弁をc図のように設定すれば「B槽 C槽 A槽」の順に通気を行うことができる。同様に「C槽 A槽 B槽」の順に通気させることもできる。このような運用をすれば、本研究で実験ならびにシミュレーションを行なったものと同等の運用ができる。

ここでは3槽の場合について実施設での対応方法を示したが、槽の数が多くても同様に対応することが可能である。

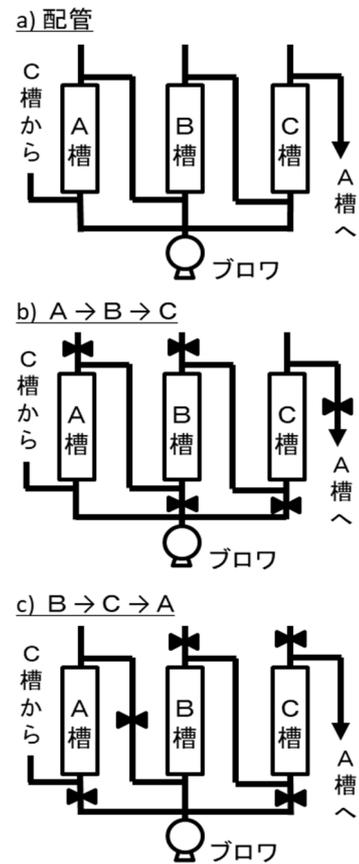


図8 実施設への対応例

### <引用文献>

- 1) 農林水産省, バイオマス産業都市の取組:  
[https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b\\_sangyo\\_toshi/b\\_sangyo\\_toshi.html](https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_sangyo_toshi/b_sangyo_toshi.html)
- 2) 井上貴仁, 平山公明, 平山けい子, 金子栄廣: 好気性微生物反応を利用した生物系廃棄物の乾燥による固形燃料化, 土木学会関東支部第42回技術研究発表会, -19, 2015
- 3) 金子栄廣, 伊藤浩二郎, 平山けい子, 平山公明: 好気微生物反応を利用した生物系廃棄物の乾燥, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol.27, pp.1-6, 2016
- 4) 伊藤浩二郎, 金子栄廣: 通気反応塔を用いたコンポスト材料の乾燥シミュレーション, 第51回環境工学研究フォーラム(土木学会主催), B6, 2014
- 5) 伊藤浩二郎, 金子栄廣: 通気反応塔を用いた生物系廃棄物の乾燥に関する研究, 第41回土木学会技術研究発表会, -13, 2014
- 6) 伊藤浩二郎, 金子栄廣: 通気反応塔を用いた生物系廃棄物の乾燥に関する研究, 第24回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, B-92, 2013
- 7) 金子栄廣, 伊藤浩二郎: 静置通気型反応器を用いた生物系廃棄物の好気微生物反応による乾燥のシミュレーション, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol.29, pp.72-79, 2018

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 金子栄廣, 松岡裕作, 八重樫咲子	4. 巻 73
2. 論文標題 多段静置通気型反応器による生物乾燥の効率化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 都市清掃	6. 最初と最後の頁 531 ~ 536
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 金子栄廣, 八重樫咲子
2. 発表標題 静置通気型反応器による生物乾燥のシミュレーション
3. 学会等名 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子栄廣, 八重樫咲子
2. 発表標題 多段静置通気型反応器を用いた生物乾燥のシミュレーションとその応用
3. 学会等名 第32回廃棄物資源循環学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子 栄廣, 西岡 良樹, 八重樫 咲子
2. 発表標題 好気微生物処理の水分の下限に関する検討
3. 学会等名 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子栄廣, 長尾雄基, 八重樫咲子
2. 発表標題 生物乾燥シミュレーションによる材料条件の感度分析
3. 学会等名 第30回廃棄物資源循環学会研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>生物系廃棄物の好気微生物処理シミュレーションプログラム (2019年版)  <a href="https://www.ccn.yamanashi.ac.jp/~kaneko/kaneko-j.html">https://www.ccn.yamanashi.ac.jp/~kaneko/kaneko-j.html</a>          生物系廃棄物の好気微生物処理シミュレーションプログラム (2021年版)  <a href="https://www.ccn.yamanashi.ac.jp/~kaneko/kaneko-j.html">https://www.ccn.yamanashi.ac.jp/~kaneko/kaneko-j.html</a></p>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------