

好熱菌による生ごみ減量処理と発酵熱の活用

○嘉数万里奈 前原百音 新垣奈瑠瀬 島袋未悠 新垣さくら 富永万結実
沖縄工業高等専門学校 生物資源工学科

【背景】

沖縄県の離島では、食品廃棄物の焼却処理が実施できない離島もあり、処理方法に問題を抱えている。そこで、低コスト・低エネルギーで食品廃棄物を処理することができ、生ごみ減量率が高く処理後の残渣を肥料・飼料として利用することができる微生物を用いた生ごみ処理機「ヤキナ君、(株)光エンジニア」が開発された。今回、この応用を考える。

【目的】

生ごみ処理機「ヤキナ君」の処理能力や処理条件のエビデンスが不足しており、高温で減量処理できる最適運転条件を検討する。また、沖縄県は観光産業が発達しているため、ホテルや商業施設での生ごみ処理機の利用も見据え、今回は、生ごみ処理機の発酵熱(約 50℃)を利用する方法として図1に示した「足湯」が実際にできるか検討する。また、この足湯の保湿効果や血行促進効果、リラックス効果のための炭酸ガス発生と利用、その副産物クエン酸カルシウムを肥料として利用できるかも検討する。また、足湯加温後の排気の脱臭方法についても検討する。

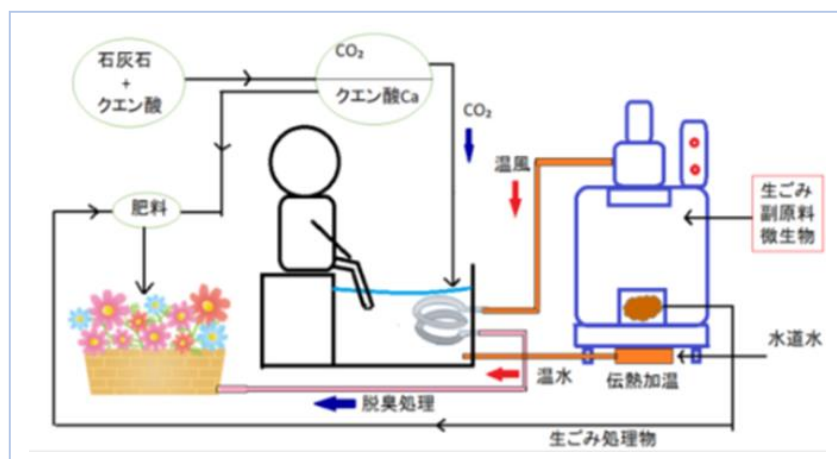


図1. 発酵熱を利用した足湯体系図

【実験装置 (生ごみ処理機)】

ヤキナ君は、容量 168ℓの小型機から容量 12000ℓまでの実機の提供が可能である¹⁾。今回、我々は、容量 168ℓの小型機を使用して実験を行った。大型の実機は、沖縄県糸満、粟国島などで生ごみ処理機として実用化されている。タイマーで、生ごみ処理の攪拌ならびに通気時間が調整できる処理装置である。

生ゴミ処理機は、微生物(主に好気性である中温菌と好熱菌)の代謝能力を利用して生ゴミ

中の有機物を分解する。中温菌と好熱菌は 35℃～60℃の範囲で増殖し、有機物が発酵分解される。通常、好気性発酵を利用する処理は、生ゴミを水、二酸化炭素、アンモニアに分解する。この処理では、微生物の好気性発酵であり、好気性菌、通性嫌気性菌により行われる。

しかし、酸素が不足すると嫌氣的な反応が進み、反応速度は遅くなり酸やアルコール等が発生する。通常、菌は pH が 6～8 のアルカリで良好な増殖を示すが、嫌氣的分解をする微生物は pH4～6 の酸性側で増殖する。



図 2. 生ごみ処理ヤキナ君



図 3. 内部攪拌機



図 4. 送風ファン



図 5. 制御盤

【実験材料】

1) 使用する微生物

① EM ぼかし菌

EM 研究機構が販売している EM ぼかし菌 (10kg 入り) を使用した。EM ぼかし菌は、乳酸菌、酵母、光合成細菌など数十種類の菌群で構成されている。乳酸菌は糖を大量の乳酸に変える乳酸発酵を行い、酵母はアミノ酸や多糖類などの色々な生理活性物質を生産し、光合成細菌は有機物を代謝している²⁾。

② 腐葉土

市販の腐葉土を使用した。

③ 牛糞

市販の牛糞を使用した。

④ 高温菌 (55～70℃で生育)

Thermus thermophiles NBRC101084, および *Geobacillus toebii* NBRC107807



図 6. EM ぼかし菌



図 7. 牛糞



図 8. 腐葉土

2) 使用する材料

① 生ごみ

使用した生ごみは、沖縄高専学生寮レストランの残飯である。

② おが屑

建築廃材、街路樹などから作成したおが屑を使用した。

③水道水

EM ぼかし菌を基本的な微生物として用い、腐葉土、牛糞を適宜加えて種菌とし、生ごみ、おが屑、米ぬか、水を混合する割合はそれぞれ条件により変えた。



図 9. 食堂生ごみ



図 10. おが屑



図 11. 米ぬか

【実験測定機器】

実験時の測定機器として、水分計 (SHIMADZU)、pH メーター (HORIBA)、臭い計 (TANITA)、風量計 (CUSTOM) を用いた。



図 12. 水分計

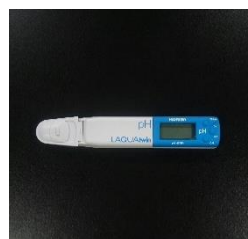


図 13. pH 計



図 14. 臭い計



図 15. 風量計

【実験方法】

1) EM ぼかし菌の添加量の検討試験

EM ぼかし菌の添加量を調べるためにビーカーワーク試験を行った。

種菌の作成は、おが屑：EM ぼかし菌：水＝2：1：1を500ml ビーカーで混合し、24時間室温で静置して行った。添加の生ごみは、ご飯、麺、肉、野菜などを均等に混合した。

試験は、70%（生ごみ70%＋種菌30%）、80%（生ごみ80%＋種菌20%）、90%（生ごみ90%＋種菌10%）の割合で、500ml ビーカーに400mlとなる様にそれぞれ添加し、72時間室温（25℃）で処理を行った。経時的に、水分量、温度の測定を行った。

2) 微生物材料の組合せの検討試験

EM ぼかし菌に腐葉土、牛糞を加えることで、温度上昇がどう変わるか調べるためにビーカーワーク試験を行った。

生ごみ：おがくず：EM ぼかし菌：米ぬか：水＝2：1：0.6：0.2で混合したものをコントロールとして設定した。さらに、腐葉土、牛糞を表1.の割合で、500ml ビーカーに400mlとなる様にそれぞれ添加し、3日間室温（25℃）で処理を行った。また、2日目の測定後に水道水5%量をそれぞれ追加し、水分の影響を見た。

表1. 微生物材料の組合せ

	1の生ごみ	EMぼかし菌	米ぬか	腐葉土	牛ふん	水
a.コントロール	2	1	0.6	0	0	0.2
b.腐葉土	2	1	1	2	0	0.3
c.牛ふん	2	1	1	0	2	0.3
d.腐葉土＋牛ふん	2	1	1	2	2	0.4

3) ヤキナ君を用いた微生物材料の組合せの検討試験

小型のヤキナ君（処理槽容積168ℓ）を用い、EM ぼかし菌＋米ぬかで生ごみ処理を行い、1週間ごとに、腐葉土、牛糞、高温菌を加えることで、温度上昇がどう変わるか経時的に調べるために試験を行った。

小型ヤキナ君に、生ごみバケツ（15ℓ）5杯＋おが屑5杯＋EM ぼかし菌（10ℓ）＋米ぬかバケツ1杯を入れ、生ごみ処理を開始し、約1週間ごとに牛糞または腐葉土をバケツ1杯ずつ添加した。なお、生ごみバケツ1杯＋おが屑1杯を毎日添加した。また、高温菌については、*Thermus thermophiles* NBRC101084の培養液50ml、および*Geobacillus toebii* NBRC107807の培養液50mlを同時に添加した時の昇温試験も引き続き1週間実施した。ヤキナ君での機械的攪拌と生ごみへの通気は、タイマーで1時間稼働と1時間停止を繰り返した。

4) CO₂発生試験、反応副産物の肥料化試験

① CO₂発生試験

炭酸カルシウム（Wako）とクエン酸（Wako）をコック付きのテドラーバッグ（容積5ℓ）

中で反応させ、ガス検知器（容積 100ml）を用いて CO₂の発生量を測定した。

下記の反応式から 10g の炭酸カルシウムとクエン酸 13g を反応させると約 2.20の二酸化炭素が発生する計算となる。



また、試薬の炭酸カルシウムの代わりに沖縄のサンゴを用い、クエン酸 15g 水溶液と反応させて二酸化炭素が発生するか検討した。

② CO₂発生試験時の副産物（クエン酸カルシウム）の肥料化試験

炭酸カルシウムとクエン酸を反応させてできるクエン酸カルシウムは、植物にエネルギーを使用させないで吸収できる良好な肥料になることが知られている^{4~6}）。

市販のプランター（台形(13×17)×15×54cm）に市販の野菜の土を土体積（台形(13×16)×13×54cm=2639cm³=2.60）入れ、これに①の反応副産物（クエン酸カルシウム）をよく混合し、均一に添加した。添加した反応副産物(クエン酸カルシウム)量は、0g (Free)、1.3g (1/2000 倍)、3.3g (1/800 倍)、10.4g (1/250 倍) とした。

混合した土の深さ約 1.5cm に、二十日大根（タキイ）の種子を撒いて、生育具合を比較し肥料としての効果を調べた。

5) ヤキナ君での足湯実証試験

小型ヤキナ君 (1680) に生ごみバケツ (150) 5 杯+おが屑 5 杯+EM ぼかし菌 (100) を入れ、生ごみ処理を開始し、途中で牛糞と腐葉土をバケツ 1 杯添加した。生ごみバケツ 2 杯+おが屑 2 杯は、毎日添加し、経時的に処理生ゴミの温度、水分、pH を測定した。ヤキナ君での機械的攪拌と生ごみへの通気は、タイマーで 1 時間稼働と 1 時間停止を繰り返した。

処理ゴミの温度が高温で安定した後から足湯の加温試験を開始した。足湯の加温時には、ヤキナ君の攪拌と送風は連続で行った。ヤキナ君からの排気には、内径 22mm の樹脂製ホースを用いた。図 17 の小型浴槽（台形(37×50)×43×65cm=121.60）内に 21℃ の水道水（台形(37×50)×39×65cm=110.30）を入れ、ステンレス製の加熱配管（直径 1×67cm の 3 本セット）に内径 22mm の樹脂製ホースを接続し、ヤキナ君からの温風を通気して足湯の加温を行った。

足湯加温済みの排気は、植物の根の部分に穴を掘り、おが屑を入れ、その空間に樹脂製ホースの先端にネットを被せて設置して送風し、図 19 のように土を掛けて、臭気の変化の測定を行った。

また、2 日間通気による水加温後、ヤキナ君からの温風から生じた凝縮水の溜りが見られ昇温が低下したので、ポリ容器で作成した図 18 凝縮水の除去容器をステンレス製の加熱配管出口に設置し、さらに 2 日間通気して、足湯の加温を行った。

足湯の水加温後、テドラーバッグで作成した二酸化炭素を加圧して足湯にバブリングしながら、足湯として実際に人での利用を試みた。



図 16. 温風出口



図 17. ステンレス製加温装置



図 18. 温風の凝縮水除去装置



図 19. 排気の脱臭

【実験結果】

1) EM ぼかし菌の添加量の検討試験

生ごみ 70%+種菌 30%、生ごみ 80%+種菌 20%、生ごみ 90%+種菌 10%で、3 日間処理した結果を表 2, 3 に示す。

生ごみ量が少ない方 70% (生ごみ 70%+種菌 30%) が、発酵度合いが良く昇温が認められた。種菌は、20~30%程度の添加が適していると判断された。

表 2. 水分量の変化

	0h	24h	48h	72h
70%	60%	60%	48%	44%
80%	63%	51%	47%	46%
90%	67%	63%	56%	55%

表 3. 温度の変化

	0h	24h	48h	72h
70%	30°C	32°C	36°C	39°C
80%	30°C	31°C	34°C	36°C
90%	30°C	32°C	33°C	34°C

2) 材料の組合せの検討試験

生ごみ：おがくず：EM ぼかし菌：米ぬか：水 = 2 : 1 : 0.6 : 0.2 で混合したものをコントロールとし、腐葉土、牛糞を添加した場合の昇温を見た結果を図 20 に示した。

生ごみ処理 1 日後は、腐葉土と牛糞の両方を添加した場合に昇温したが、2 日目以降は、腐葉土を添加した場合に良好な昇温が見られた。腐葉土の微生物が昇温に有効であることが推察された。

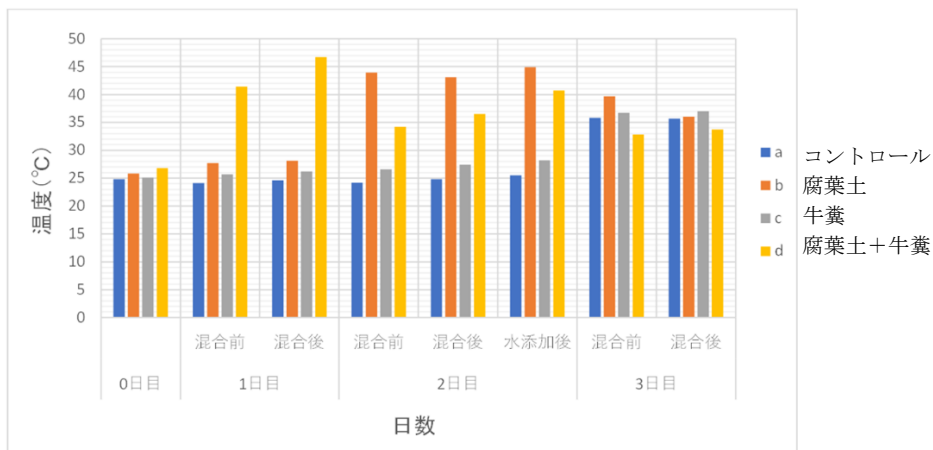


図 20. 材料の組み合わせによる温度変化

3) ヤキナ君を用いた微生物材料の組合せの検討試験

ヤキナ君を用い、EM ぼかし菌+米ぬかで生ごみ処理を行い、途中で腐葉土、牛糞、高温菌を加えることで、温度上昇がどう変わるかを調べた。図 21 に示した米ぬか添加時に 46~48°C の昇温が見られたが、図 22~24 に示した腐葉土、牛糞、高温菌添加時には、ゴミ処理物の温度は 41~43°C であり大きな上昇は見られなかった。

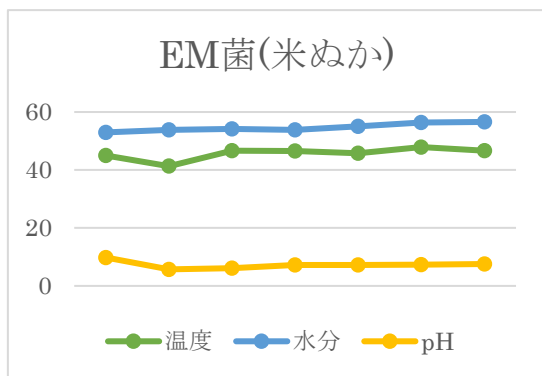


図 21. 米ぬか添加時

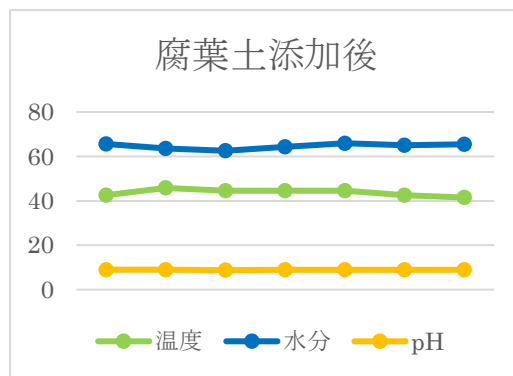


図 22. 腐葉土追加時

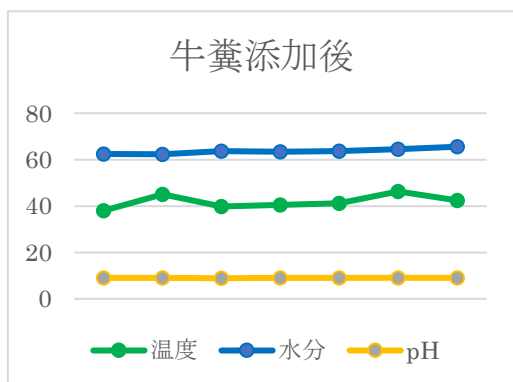


図 23. 牛糞追加時

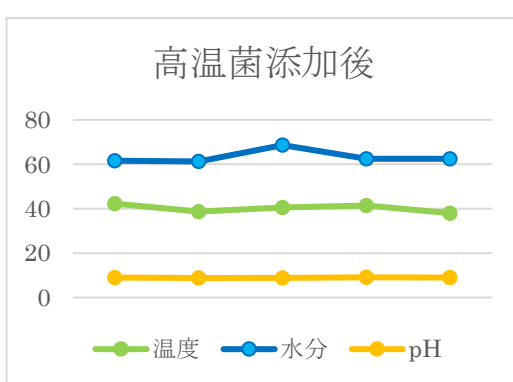


図 24. 高温菌 2 種類添加時

4) CO₂発生試験、反応副産物の肥料化試験

① CO₂発生試験

試薬の炭酸カルシウム 10g とクエン酸 13g をコック付きのテドラーバッグ (容積 50) 中で反応させ、ガス検知器 (容積 100ml) を用いて CO₂の発生量を測定した結果、検知管で二酸化炭素の発生の確認ができ、実際に生成できた CO₂量は約 2.40であった。

海岸に打ち上げられたサンゴ板 176g にクエン酸 15g の水溶液を加え、テドラーバッグ (容積 50) 中で反応させたところ、生成できた CO₂量は約 1.30であった。

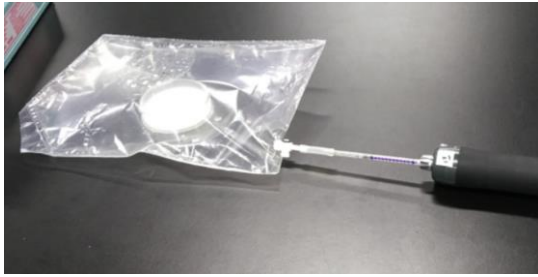


図 25. 試薬を用いた CO₂発生試験



図 26. サンゴを用いた CO₂発生試験

② CO₂発生試験時の副産物 (クエン酸カルシウム) の肥料化試験

プランターの土 2.60に、CO₂発生時の副産物 (クエン酸カルシウム) を 0g (Free)、1.3g (1/2000 倍)、3.3g (1/800 倍)、10.4g (1/250 倍) 添加し十分に混合後、二十日大根の種子を撒いて、7日後の生育具合を比較した結果を図 27~30 に示した。

クエン酸カルシウムの肥料としての効果は、クエン酸カルシウム量 1.3g (1/2000 倍) で茎の太さや葉の大きさが最も良好な生育が見られ、3.3g (1/800 倍) でも 0g (Free) より優れていた。一方、10.4g (1/250 倍) 添加したものでは、濃度が高すぎるためか葉が黄変し生育が悪かった。



図 27. 基本土壌のみ



図 28. クエン酸 Ca 1/2000



図 29. クエン酸 Ca 1/800



図 30. クエン酸 Ca 1/250

5) ヤキナ君での足湯実証試験

ヤキナ君に生ごみバケツ 5 杯+おが屑 5 杯+EM ぼかし菌を入れ、生ごみ処理を開始し、処理 3 日後に牛糞と腐葉土を各バケツ 1 杯添加し、生ごみを毎日添加しながら、経時的に処理ゴミの温度、水分、pH を測定した結果を図 31 に示した。処理生ごみの温度が、39～54℃まで昇温され、48℃前後に維持された処理 9 日目から実際に足湯の加温試験を行った。

小型の浴槽 (121.6ℓ) 内に 21℃の水道水 (110.3ℓ) を入れ、ステンレス製の加熱配管 (直径 1cm の 3 本セット) に内径 22mm の樹脂製ホースを接続し、ヤキナ君からの温風を 2 日間通気して足湯の加温を行った結果、21℃の水温が 29℃まで上昇した。ステンレス製の加熱配管に凝縮水が溜まって加温が弱まっていることが判明したため、図 18. 凝縮水除去装置を設置し、さらに 2 日間通気して足湯の加温を行った結果、34℃まで上昇した。

温風の体積流量は、測定した温風風速 3.0m/sec および樹脂ホース内径 22mm から $1.1 \times 1.1 \times 3.14 \times 300 \times 60 = 68400 \text{ml/min} = 68 \text{l/min}$ であった。

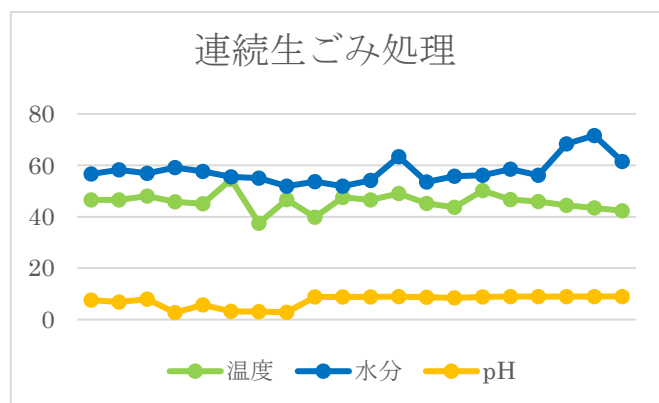


図 31. 連続生ごみ処理試験



図 32. 足湯加温試験

昇温された浴槽水中に、テドラーバッグで発生させた二酸化炭素を押し出して、図 33 に示すようにバブリングさせながら、図 34 のように足湯として実際の利用を行った結果、足湯としての良好な機能を確認できた。

小型のヤキナ君では、温風の風量が少ないこと、水に対して空気の比熱が小さいことから 34℃までしか昇温できなかったが、大型の本機では足湯としての利用が可能と推測された。

また、加温後の熱風排気の臭気については、樹脂ホースの直接の出口の評点平均が 4.5 であったのに対し、植物の根を通して出てくる空気の臭いは、評点 1.5 まで低減されていた。



図 33. 発生 CO₂ のバブリング

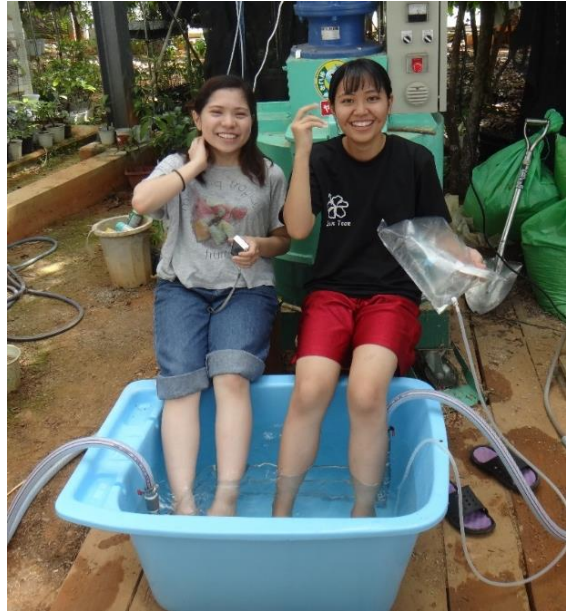


図 34. 足湯の体験

【考察】

生ごみ処理機「ヤキナ君」の処理条件として、微生物材料の検討、米ぬか及びおが屑の添加物の検討を行った。その結果、EM ぼかし菌による生ごみ処理時に米ぬかを添加することで、50℃近い高温での生ごみ処理が持続できることが分かった。途中、腐葉土や牛糞を添加することで昇温を促せることも判明した。

実際に、小型ヤキナ君（168ℓ）の処理生ごみの温度を 48℃前後に維持した状態で、樹脂ホース 22mm を通じ体積流量 68ℓ/min で温風を流し、直径 1cm×長さ 64cm の 3 本セットのステンレス製加温管を用いて小型浴槽の 21℃の水道水（110.3ℓ）を加温したところ、34℃まで昇温することができた。

小型ヤキナ君（168ℓ）の温風量が少なかったが、実機のヤキナ君（1800ℓ、3600ℓ、5400ℓ）では、十分な熱量の温風供給ができると考えられる。水の比熱が 4.2kJ/kg・℃に比べ空気の比熱は 1.0kJ/kg・℃と小さいため、できるだけ水蒸気を含んだ温風の利用が望まれる。そのためには、今回の足湯加温時に支障となった凝縮水の除去方法が重要となる。図 35 に示したステンレス製の伝熱器具における凝縮水の除去方法、例えば、最も下部のステンレス管に凝縮水排出ホースを取り付けるなどの工夫が必要である。

生ごみ処理から発生する温風は、生ごみ自体ならびに発酵で生じる強い異臭を保持しているが、土や植物を用いた脱臭方法を取ることで、異臭を軽減できることが分かった。脱臭時において、土の脱臭に適した有用微生物の検討が必要と考えられる。

足湯は 42℃くらいが適温とされているため、冬場や足湯使用時の昇温と温度を一定に保つためには、図 36 に示した電気自動温度制御器などの使用が妥当であると考えられた。



図 35. 伝熱機の工夫



図 36. 温度制御器

足湯の保湿効果や血行促進効果、リラックス効果のための炭酸ガス発生と利用については、炭酸ガスポンベの購入も考えられるが、5kg で 2~3 万円と高価であるため、薬品や沖縄の海岸に打ち上げられるサンゴの化学反応で二酸化炭素の発生を検討した結果、化学反応で良好な二酸化炭素の発生が認められた。なお、サンゴ使用時には、粉碎する必要があると判断された。CO₂発生時の反応副産物であるクエン酸カルシウムは、良質の肥料となることが知られており、プランターの土 2.6ℓ に対し、実際に CO₂発生時の副産物（クエン酸カルシウム）を 1.3g（1/2000 倍）から 3.3g（1/800 倍）添加した実験で、二十日大根の種子の茎の太さと葉の大きさが良好な生育が認められ、肥料としての利用が可能と判断された。

以上の今回の小型ヤキナ君（168ℓ）での試験結果を踏まえ、実機（1800ℓ、3600ℓ 級）での温風を利用した足湯の実用化が期待される。

【参考資料】

- 1) 光エンジニアホームページ
- 2) EM 研究機構ホームページ
- 3) 重曹足湯の作り方 <https://feely.jp/4600483/>
- 4) クエン酸カルシウム(高吸収性肥料) http://www.npdi.net/products/products_b/cal01/
- 5) カルシウムの働き | 欠乏症や過剰症にならないために
<https://www.sc-engei.co.jp/fertilizer/working/Ca.html> (2019/12/17)
- 6) クエン酸の発根作用機作 | みんなのひろば | 日本植物生理学会
https://jspp.org/hiroba/q_and_a/detail.html?id=3862
- 7) 炭酸足湯のススメ。冷え症対策&リラックスに効果的！ | 炭酸美容ラボ
<http://carbonatedbeauty.com/炭酸足湯のススメ。冷え症対策%ef%bc%86/>