

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2017～2021

課題番号：17KT0070

研究課題名(和文) 焼却炉の未利用廃熱を利用した農業 水産養殖複合システムの開発と実証試験

研究課題名(英文) Agriculture using unused waste heat of incinerator-Development of agriculture-aquaculture complex system and verification tests

研究代表者

山根 健治 (Yamane, Kenji)

宇都宮大学・農学部・教授

研究者番号：60240066

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：レタスの水耕栽培(HP)、ナマズの水産養殖(AC)、それらを複合したアクアポニックス(AP)の実証試験を行った。硝酸態窒素およびリン酸の蓄積はAPおよびHP区で軽減され、養液中から亜硝酸菌や硝酸細菌が検出され、APは持続可能な栽培システムであることが示された。焼却炉の約98℃の低温排熱から約43℃の温風を利用したデシカント冷房システムの実証試験をイチゴ温室で実施した。導入空気の温度よりも約10℃温度を低下させ、冷房能力は約175Wで、COPは0.32と試算された。さらに、吸着剤に吸着された水分の脱着が可能であることを確認し、廃熱を利用した冷房の可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

閉鎖系のアクアポニックスにおける餌の役割および微生物の動態を明らかにした点は学術的に意義がある。また、廃熱を利用したデシカント冷房の開発は学術的に意義がある。園芸と水産の複合経営や省エネルギー的な栽培につながるという観点から社会的にも意義がある。

研究成果の概要(英文)：Trial tests of lettuce hydroponics (HP), aquaculture of catfish (AC), and aquaponics (AP) were performed. Accumulation of nitrate nitrogen and phosphate in the nutrient solution was reduced in the AP and HP groups. Nitrifying bacteria and nitrate bacteria were detected in the nutrient solution. AP has been shown to be a sustainable cultivation system even in small systems. A demonstration test of a desiccant cooling system using hot air of about 43°C from the low temperature waste heat of about 98°C of an incinerator was conducted in a strawberry greenhouse. Cooling ability was 175 W, and COP was estimated to be 0.32. It was confirmed that the moisture adsorbed on the adsorbent can be desorbed in this system, and thus the possibility of cooling using waste heat was shown.

研究分野：園芸科学

キーワード：アクアポニックス デシカント冷房 微生物叢

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

焼却炉は地域の住民からは公害をもたらす施設と考えられてきたが、東日本震災後は焼却炉の持つエネルギーに注目が集まっている。農業分野では、温室の加温などに多くの化石エネルギーが消費されている。農業生産用温室暖房や冷房の代替エネルギーとして焼却炉廃熱を利用することができれば、CO<sub>2</sub>発生量の削減と同時に、熱エネルギーを得るための費用削減により収益性を上昇させた農業生産をはかることができる。また、廃熱を利用した水産物の養殖と作物生産を組合せることでより省エネルギーで効率的な生産システムの構築が期待される。アクアポニックス(AP)とは水産養殖の「Aquaculture」と水産養殖の「Hydroponics」を掛け合わせた造語で、魚の排泄物を細菌が利用し、植物がそれらを養分として吸収し、浄化された水が再び魚の水槽へと戻る、という循環型エコシステムである。水産養殖では、窒素投入量の約25%が魚によって摂取され、70%以上が周囲に排出される(Hargreaves, 1998)が、APによりそのロスを減らし、水質の悪化も抑えられると報告されている。さらに、APは、窒素(N)やリン(P)のリサイクルにより環境負荷の低減に寄与することが期待されている。

APシステムに用いる魚類はシステムの構造上、排泄を多く行う種類が好まれる。ティラピア・ナマズ・金魚・コイなどが一般に用いられる。植物種には水耕栽培に向いている葉菜類・果菜類が好まれ、リーフレタス・パクチョイ・ハーブ類・ミニトマト・キュウリなどがこれにあたる。

栃木県においては、温泉水を利用した陸上養殖トラフグが実施されている。焼却炉廃熱を利用したトラフグの養殖においても白子などの高付加価値の生産が期待されている。

### 2. 研究の目的

本研究では、宇都宮大学が位置する栃木県内にある焼却炉の未利用廃熱を熱エネルギー源として冷暖房に活用し、地域特性を考慮した農産物と水産物の複合生産のための基礎技術を検討する。また、イチゴ、トマト等の農産物と、陸上養殖トラフグや地域特産品開発のためのナマズ養殖等を組み合わせて、熱のカスケード利用による実証試験を実施し、次世代型農業技術を構築することに貢献する。特に、魚の餌だけで植物の成長をサポートできるが、APにおける魚との共生は植物の成長に有益な効果を与えるという仮説をたて検証した。トラフグを陸上養殖する際、飼育水にはNなどの植物の栄養成分が豊富に含まれている一方で、塩濃度が0.7~0.9%ほどある。この飼育水を利用するにあたり、耐塩性を持つ農作物が望ましい。そこで耐塩性があるアイスプラントとトラフグ養殖との複合生産について検討した。さらに、廃熱を利用したデンカント冷房システムの開発について検討することを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) ナマズを活用したアクアポニックスの確立と細菌叢の調査

窒素とリンを含まないレタスの水耕栽培(HP)、ナマズの水産養殖(AC)、それらを組み合わせたアクアポニックス(AP)の3つの閉鎖培養システムを作成し、すべての処理にNとPを含む同量の餌を加えた。リーフレタス(*Lactuca sativa* var. *crispa*) 'グリーンパン' とナマズ(*Silurus asotus*)を供試した。宇都宮大学峰キャンパス内の環境調節実験棟の自然光ガラス室内(23/20)に、アクアポニックスシステムを設置した。システムは魚用水槽の養液をポンプで植物の養液栽培槽へと汲み上げ、余剰養液が魚用水槽に落ちる循環式とした。溶液は各区40Lとし、ろ過装置は設置せず、魚用水槽にはエアポンプで常時空気を送り込んだ。レタスはスポンジに播種し、1/1000のハイポネックス(N:P:K=6:10:5)溶液で栽培した。播種30日後、実生を移植し、養液栽培を行った。ナマズの餌はひかりクレストキャット(キョウリン社、N含有量8%)を使用した。実験は7週間実施した。養液は4me/L KCl, 2me/L CaCl<sub>2</sub>・2H<sub>2</sub>O, 1me/L MgSO<sub>4</sub>・7H<sub>2</sub>Oとした。AC区にはナマズのみを育成し、レタスを移植せず、水質調査のみを行った。全処理区にナマズの餌を一日当たり1gずつ与え、微量元素として0.50ppm マンガン:MnCl<sub>2</sub>・4H<sub>2</sub>O, 0.01ppm モリブデン:H<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>・H<sub>2</sub>O, 0.50ppm ホウ素, 3ppm 鉄:EDTA-Na-Fe( )を加えた。

レタス生育を2週間毎に各区4個体ずつサンプリングを行い、葉数、最大葉長、最大根長、SPAD値、シュート重、根重および乾物重について測定した。SPAD値は、葉緑素計(SPAD-502 KONICA MINOLTA)を用い測定した。1週間毎に各区の養液のサンプリングを行い、pH、EC、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>およびPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>を測定した。レタス葉身部の窒素含有量測定は改良デュマ法による窒素分析を行った。培養液中から培養液中の細菌叢DNAを採取し、16S rRNA遺伝子のV3-V4領域を利用したメタゲノム解析を行った。

#### (2) トラフグ飼育水を利用したアイスプラント栽培

アイスプラント(*Mesembryanthemum crystallinum*) 'プチサラ'を供試した。環境調節実験棟の自然光ガラス室内(27/25)において、セルトレイに播種し、1/1000倍希釈のハイポネックス養液で栽培した。栽培期間は8/19~11/19までの3か月間行った。なお、発芽46日後に実生24個体ずつ移植し、引き続きハイポネックス養液で栽培した。フグ飼育水の成分は、134 ppm NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 170 ppm Ca<sup>+</sup>, 117 ppm K<sup>+</sup>, 16 ppm PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, 3 ppm NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, pH 7.6, EC 13.2 S/m, 0.92% NaClであった。1/1000倍希釈ハイポネックス養液を対照区とし、フグ飼育水1/3希釈区(塩濃度目安0.3%)、2/3希釈区(塩濃度目安0.6%)および原液区(塩濃度目安0.9%)を設定した。

最大全長，最大葉長，最大根長，全重，シュート重，根重，葉数，乾物重，糖質およびプラッタ一細胞最大径を測定した。

### (3) 焼却炉廃熱を利用したデシカント冷房装置の試作と実証

一般に高温廃熱は発電に利用される場合が多いが，200 °C 以下の低温廃熱の利用は温熱として熱交換により，温湯を作成するかそのまま放散する場合が多い。一方，温室の周年利用や収穫期をずらすために温室内を冷房することが求められるようになった。これらを考慮し，焼却炉からの低温廃熱を温室の冷房に利用するため，デシカント冷房装置を試作した。

栃木県内にある焼却炉に隣接するイチゴ温室（6 m × 10 m × 4.2 m）のそばに装置を試作した。装置はデシカント部、デシカントから水分を脱着させるための熱交換器、デシカント部を通過した空気を冷却するための熱交換器から構成された。実証試験は2019年9月，11月に行った。測定項目は温室外温度，湿度，デシカント通過後の温度，湿度，冷却用熱交換器通過後の温度，湿度，デシカントの水分吸着量，水分脱着量であった。

## 4. 研究成果

### (1) ナマズを活用したアクアポニックスの確立と細菌叢の調査

AP 区のレタスの生育量は，移植 0 週から 2 週後までの生育が旺盛であったのに対し，HP 区では 2 週以降に生育が促進された。養液中の硝酸態窒素およびリン酸の蓄積は，植物の取り込みの結果，AP および HP 区で軽減された（図 1）。養液中の K<sup>+</sup> および EC も AC 区では高まり，AP と HP 区では低下する傾向にあった（図 1）。AP 区で育てられたレタスは 2 週間まで活発に成長し，生産期間を通して植物に一定レベルの窒素を含んでいた（図 2）。一方，HP 区のレタス植物は初期段階でゆっくりと成長し，2 週間後には窒素濃度の増加が遅れたことから，AP では魚が餌のより速い分解を助けるが，HP では餌が徐々に溶解する可能性が示唆された。

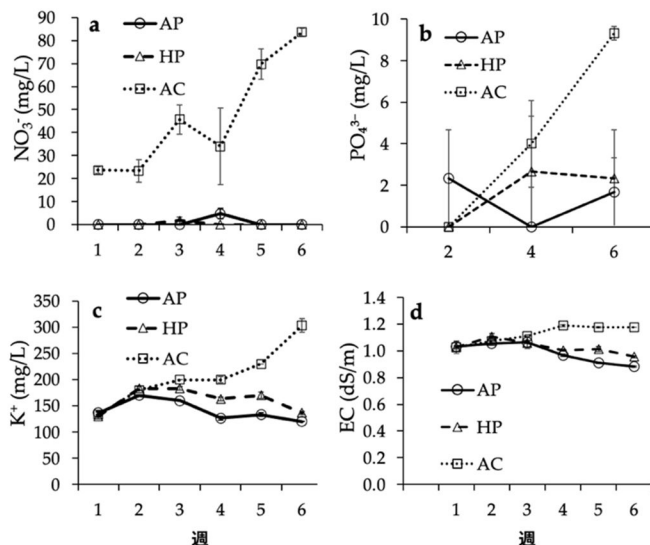


図 1 養液中の NO<sub>3</sub><sup>-</sup>，PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>，K<sup>+</sup> および EC の変化。  
アクアポニックス (AP)，水耕栽培 (HP)，水産養殖 (AC)。Mean ± SE (n=3)。

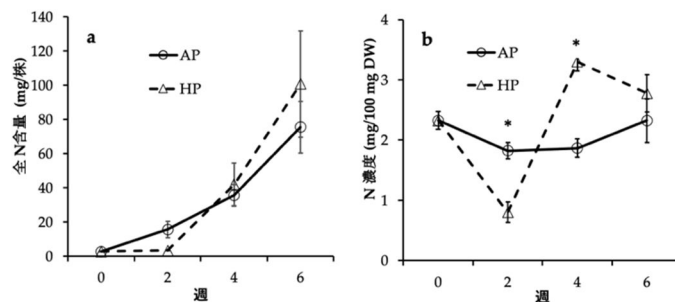


図 2 レタス植物体の全 N 含量と乾物当たりの N 含量。  
Mean ± SE (n=4)。\*5%水準で有意差あり。

養液中の細菌叢について 16SrRNA 遺伝子の解析により，網レベルでは，放線菌，アルファプロテオバクテリア，ベータプロテオバクテリアおよびガンマプロテオバクテリアが主要な微生物群であった（図 3）。微生物叢の各区の AC 区では，養液中にシアノバクテリアや藻類（葉緑体）が集積しており，水質の悪化につながっていた（図 3）。2177 の OUT についての主座標分析の結果，細菌叢の特徴は処理区よりも採取時期による変動が大きかった（図 4）。全ての区で，亜硝酸酸化細菌である Nitrospira および Nitrobacter が検出され，窒素の循環に寄与していると考えられる。

本研究から，HP において魚の餌はレタスの成長を生育後半はサポートできるが，AP における

魚との共生は植物の初期成長に有益な効果を与えるという仮説が検証された。APは、HPやACに比べて養液の汚染を防ぎ、高い水質を維持しており、小規模なシステムにおいてもAPがより持続可能な栽培システムであることが示唆された。

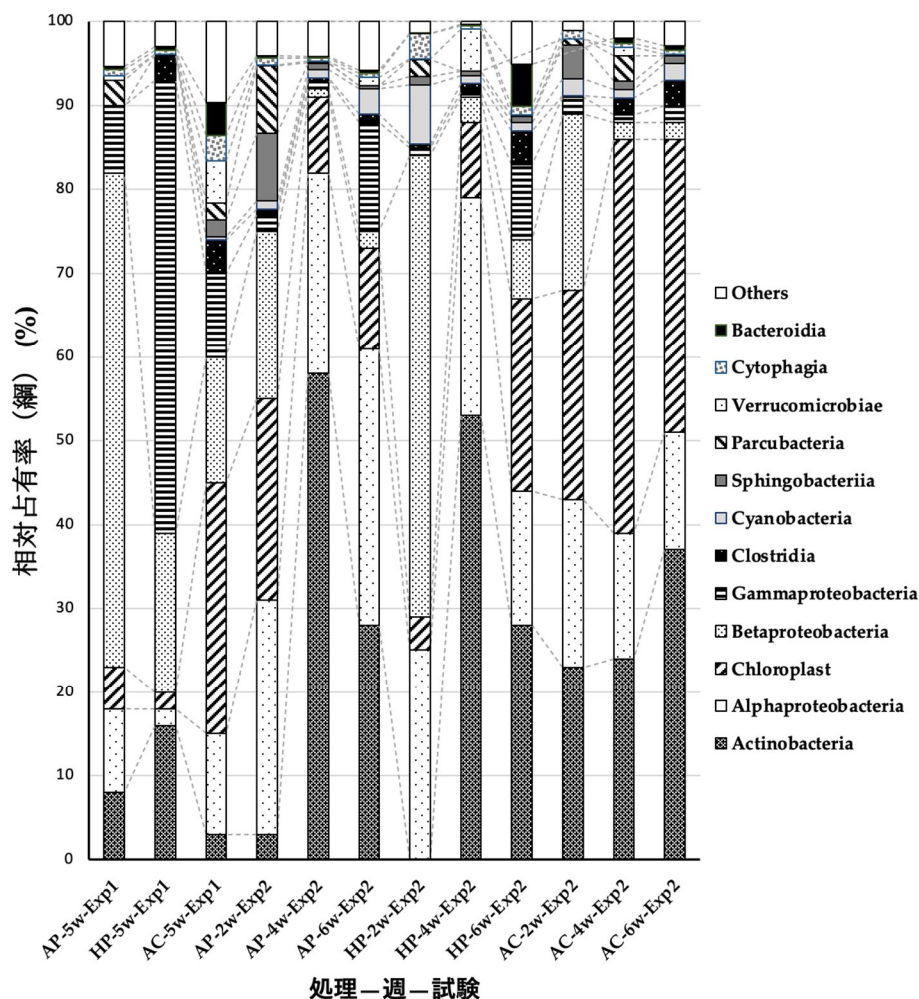


図3 養液中の細菌叢における綱レベルでの占有率。W:週(栽培期間)。Exp1では餌を0.5gずつ処理。

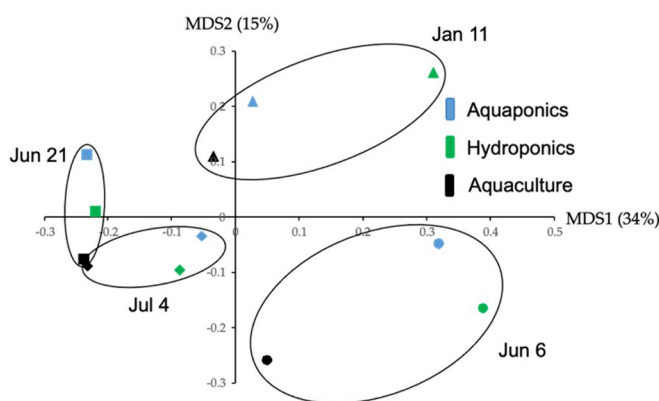


図4 主座標分析による分離。MDS 1,2 は全変動に占める%。

## (2) トラフグ飼育水を利用したアイスプラント栽培

生育調査では、全長、葉長、シュート新鮮重(図5)、乾物重および葉数でフグ飼育水施用区の方が対照区に比べて有意に高かった。これはフグ飼育水に含まれるN,Pおよび塩分がアイスプラントの生育を促進したためと考えられる(Agarie, 2004)。

ブロッカー細胞の最大細胞径では、処理開始30日後で対照区の540 μmから最大で2/3希釈区の1106 μmまで有意に増加した。フグ飼育水の塩分がアイスプラントのブロッカー細胞に蓄積し、ブロッカー細胞の形成を促進したと考えられる。アイスプラント中のピニトール含量率では、対照区とフグ飼育水施用区で有意差が見られ、対照区と最大の1/3希釈区では5倍以上の差が

見られた。

以上の結果から、トラフグ養殖とアイスプラントの複合生産の可能性が示唆された。フグ飼育水の施用はアイスプラント生育を促進し、プラッター細胞を拡大し、ピニトール含有率を高めるなどの有効性が示された。Agarie (2004) の報告からアイスプラントの塩濃度は 0.56% 程度が最適とされていることから、2/3 希釈区の塩濃度が適切であると考えられた。フグ飼育水は採取時期によっても成分が変化する可能性があるため、塩分濃度を調整して施用するのが望ましいと考えられた。廃熱を利用したフグ養殖において、廃液をコンスタントに活用するため、養殖施設と併設した温室の設置と、適切な濾過技術の検討が必要である。

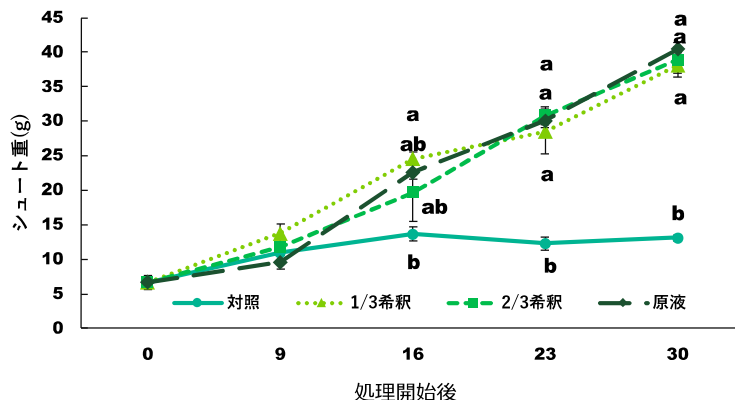


図5 フグ飼育水処理がアイスプラントのシュート新鮮重に及ぼす影響  
 平均値 ± SE (n = 4). Tukey-Kramer の多重検定により異符号間に有意差有り (p < 0.05)

### (3) 焼却炉廃熱を利用したデシカント冷房装置の試作と実証

測定期間の吸引空気は平均温度は 25.2 °C、平均相対湿度は 27.3 %であった。また、デシカント空調システムで処理した作製空気は平均温度は 14.6 °C、平均相対湿度は 83.0 %であった。シリカゲル通過後の平均温度は 24.0 °C、平均相対湿度は 30.9%であった。次に、空気冷却用熱交換器通過後の空気は平均温度は 18.9 °C、平均相対湿度は 44.8%、気化冷却器通過後空気は平均温度は 14.6 °C、平均相対湿度は 83.0%となった。導入空気の温度よりも約 10°C 温度を低下することができた (図 6)。このときの冷房能力は約 175 W で、COP は 0.32 と試算された。

外気を吸引し、焼却炉の低温廃熱を利用してデシカント部の再生処理を行った。吸引空気の平均温度は 19.3 °C、平均相対湿度は 41.4 %であった。空気加熱用熱交換器の通過後の平均温度は 50.1 °C、平均相対湿度は 9.3 %で、デシカント部通過後の空気の平均温度は 22.3 °C、平均相対湿度は 34.4 %であった。このときの絶対湿度では通過後において、1.31 g/kg ほど増加したことからもデシカント部において脱着が起きたと考えられる。また、デシカント部全体では再生運転一時間あたり、261 g ほど脱着が起こった。

以上のように外気温度を約 10°C 低下させ、今まで放散していた低温熱を冷房システムに活用できることが示された。本報の装置は約 60 万円で製作しており、今後は経済性の検討がさらに必要である。

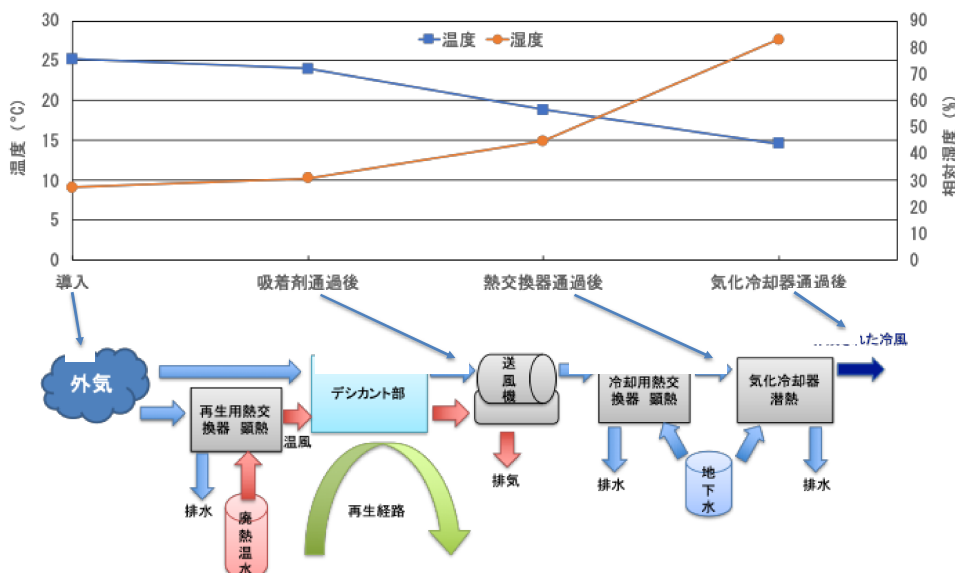


図6 デシカント冷房装置の概要と各部の通過温湿度

5. 主な発表論文等

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

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>Yamane Kenji, Kimura Yuuki, Takahashi Keita, Maeda Isamu, Iigo Masayuki, Ikeguchi Atsuo, Kim Hye-Ji | 4. 巻<br>7         |
| 2. 論文標題<br>The Growth of Leaf Lettuce and Bacterial Communities in a Closed Aquaponics System with Catfish    | 5. 発行年<br>2021年   |
| 3. 雑誌名<br>Horticulturae   | 6. 最初と最後の頁<br>222 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.3390/horticulturae7080222   | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>該当する      |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>山根健治・藤本月花・大和勇輝・前田勇・飯郷雅之・池口厚男・Kim Hye-Ji. |
| 2. 発表標題<br>異なる光条件下においてトラフグ飼育水がアイスプラントの生育に及ぼす影響      |
| 3. 学会等名<br>園芸学会令和3年度春季大会                            |
| 4. 発表年<br>2021年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>山根健治・木村侑紀・大和勇輝・前田勇・飯郷雅之・池口厚男・Kim Hye-Ji. |
| 2. 発表標題<br>ナマスとのアクアポニックスにおけるリーフレタスの生育と培養液の細菌叢の変化.   |
| 3. 学会等名<br>園芸学会令和2年度春季大会                            |
| 4. 発表年<br>2020年                                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山根健治・高橋慶太・池口厚男・飯郷雅之・前田 勇・Kim Hye-Ji |
| 2. 発表標題<br>ナマスとのアクアポニックスにおけるリーフレタスの生育          |
| 3. 学会等名<br>園芸学会平成31年春季大会                       |
| 4. 発表年<br>2019年                                |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Kenji Yamane, Keita Takahashi, Atsuo Ikeguchi, Masayuki Iigo, Isamu Maeda and Hye-Ji Kim  |
| 2. 発表標題<br>A case study: the growth of lettuce in an aquaponics system                               |
| 3. 学会等名<br>The 3rd International Conference on Agriculture and Agro-Industry 2018 (ICAAI2018) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                       | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)           | 備考 |
|-------|---|---------------------------------|----|
| 研究分担者 | 飯郷 雅之<br><br>(Iigo Masayuki)<br><br>(10232109)  | 宇都宮大学・農学部・教授<br><br><br>(12201) |    |
| 研究分担者 | 池口 厚男<br><br>(Ikeguchi Atsuo)<br><br>(10222415) | 宇都宮大学・農学部・教授<br><br><br>(12201) |    |
| 研究分担者 | 前田 勇<br><br>(Maeda Isamu)<br><br>(10252701)     | 宇都宮大学・農学部・教授<br><br><br>(12201) |    |

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 |
|---------|---------|