

微生物を活用した新しい水耕栽培技術の開発

青森県立名久井農業高等学校 平山 昊也

1 はじめに

私は、全国でも珍しい水耕栽培に特化した農業を学ぶ環境システム科で学習している。いろいろなタイプの栽培を経験したが、その中で水耕栽培の課題もわかってきた。ひとつは養液を常に吸収できるので生育は早い、野菜の硝酸態窒素濃度が高くなる傾向にあることである。硝酸態窒素は摂取し過ぎると健康を害する恐れがあり、EUでは基準を設けているが日本にはない。またもうひとつは養殖と野菜栽培を同時に行う近年話題のアクアポニックスである。魚の食べ残しの餌や糞を栄養にして育てる循環型農業のひとつだが、魚を飼育する関係上、液肥を使えないため、生育が劣るという欠点がある。そこで私は2年かけてこれら2つの課題解決に貢献するプロジェクトを行ったので報告する。

2 低硝酸水耕野菜の栽培技術の開発

2-1 動機

現在、世界の健康問題の1つに硝酸態窒素がある。硝酸態窒素は、それ自体は急性毒性をほとんど持たないが、乳幼児の胃の中で微生物により亜硝酸性窒素に還元された後、体内に吸収され、血液中のヘモグロビンと結合し、酸素欠乏症を引き起こすといわれている。また、トマト、ナス、キュウリなどの果菜類では、実は硝酸態窒素は移行しにくく、茎葉にたまる傾向がある。そのため、葉を食べるチンゲン菜、小松菜などの葉菜類が問題である。したがって、これらの問題となる硝酸態窒素含有量を軽減させる新しい水耕栽培法が必要と考え、研究に取り組んできた。

2-2 研究方法

(1) 栽培容器の製作

根腐れを防ぐため、エアレーションを容器内に設置し、養液内の酸素量を増やした。また、アブラムシ発生防止のためにアルミホイルを容器に巻きつけて対策をした(図1)。栽培する植物は、ミニハクサイ(宝種苗 ミニサラ白菜)を使用し、容器には6つの栽培用穴があるものを使用し、同じ試験区でそれぞれ4株ずつ栽培した(図2)。空いた穴にはスポンジを差し込み、蒸発をできる限り防いだ。容器は縦19cm、横28cm、高さ12cmのもの(4.5L)を使用した。



図1 栽培装置



図2 ミニハクサイ

(2) 試験区(5区)

水耕栽培用の肥料には生育を促進するために最初から硝酸態窒素が多く含まれている。常に根が養液に浸っている水耕栽培では吸収しやすいので早く大きくなるが、硝酸態窒素

が蓄積してしまう傾向にある（図 3）。そこで私は水耕栽培肥料の量を半分に減らし、その分、尿素に置き換えることにした。尿素は尿素態窒素であり、微生物によってアンモニア態窒素に変わるため、硝酸態窒素になるまで時間がかかり、蓄積しにくいと考えた（図 4）。

しかしそれでは栄養不足になるので自ら養分を作れるように光合成を促す青（波長 4 5 0 nm）と赤（波長 6 6 0 nm）の LED を照射する区も設け、生育を比較することにした。また硝化を促す硝化菌(BICOM)と納豆菌を加える区も設けた。各区の詳細は次の通りである。

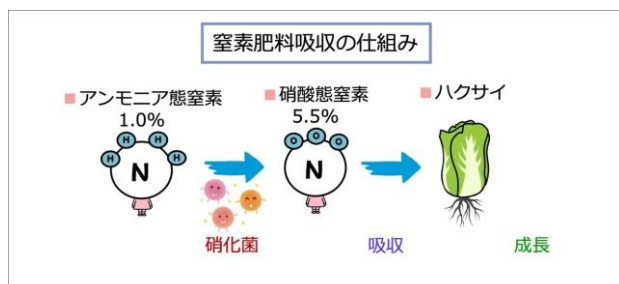


図 3 ハクサイの養分吸収の仕組み

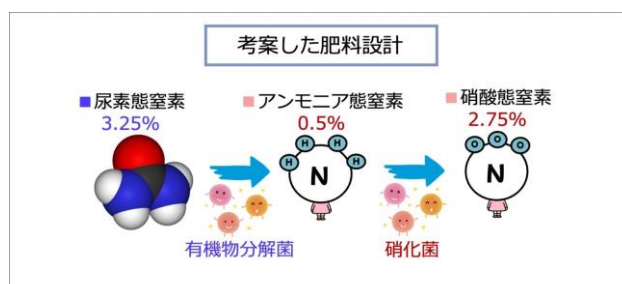


図 4 新しい肥料設計

表 1 試験区

試験区名	養液	LED
Control	H(ハイポネックス)6-10-5 4.5g/水 4.5L	なし
尿素混合+納豆菌	H2.3g+尿素 0.5g+納豆菌 5ml/水 4.5L	なし
尿素混合+納豆菌+LED	H2.3g+尿素 0.5g+納豆菌 5ml/水 4.5L	赤青
尿素混合+納豆菌+硝化菌(BICOM)	H2.3g+尿素 0.5g+納豆菌 5ml +硝化菌(BICOM)9ml/水 4.5L	なし
尿素混合+納豆菌+硝化菌(BICOM)+LED	H2.3g+尿素 0.5g+納豆菌 5ml +硝化菌(BICOM)9ml/水 4.5L	赤青

（3）生育調査

ハクサイは好硝酸性作物であり、アンモニア態窒素よりも硝酸態窒素を好んで吸収する作物なので今回のような硝酸態窒素を少なく施すと生育が悪くなると考えられる。そこでハクサイを週に 1 回、試験区の草丈や葉数、葉緑値などのを測定した。

（4）養液の成分調査と収量調査

週に 1 回ずつ硝酸態窒素やアンモニア態窒素、EC、リン酸などの養液の成分を調査した。また収穫時に重量や硝酸態窒素の量、Brix を調査した。

2-3 結果

（1）生育調査

草丈は LED を照射した区がいずれも大きくなった。これは光によって光合成が盛んになったからだと思われる。LED を照射しない場合は、硝化菌である BICOM1 を添加した区と Control が大きくなった（図 5）。

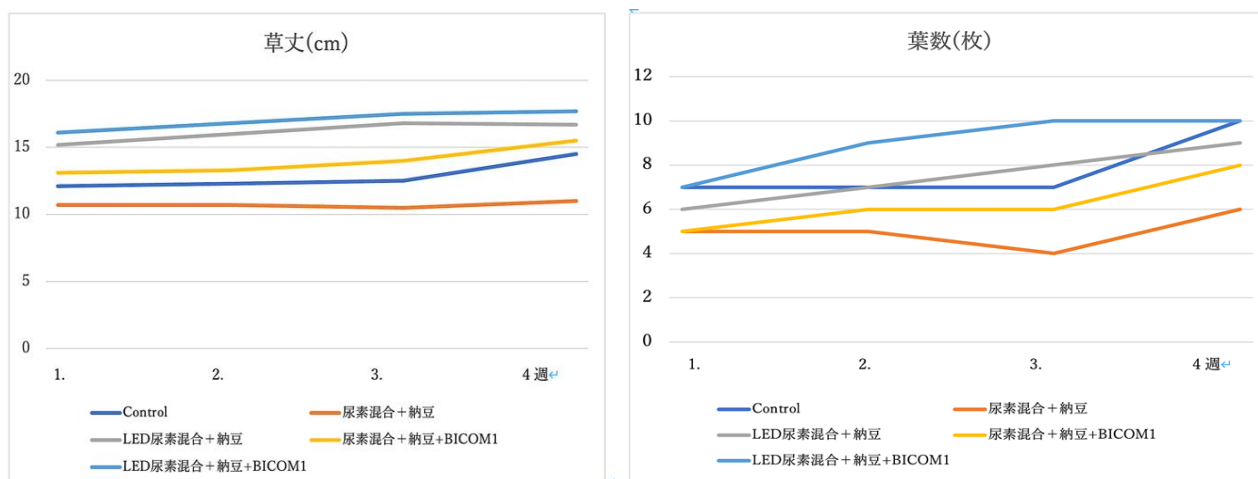


図5 生育比較（左：草丈 右：葉数）



Control



尿素混合+納豆



尿素混合+納豆+LED



尿素混合+納豆+BICOM1



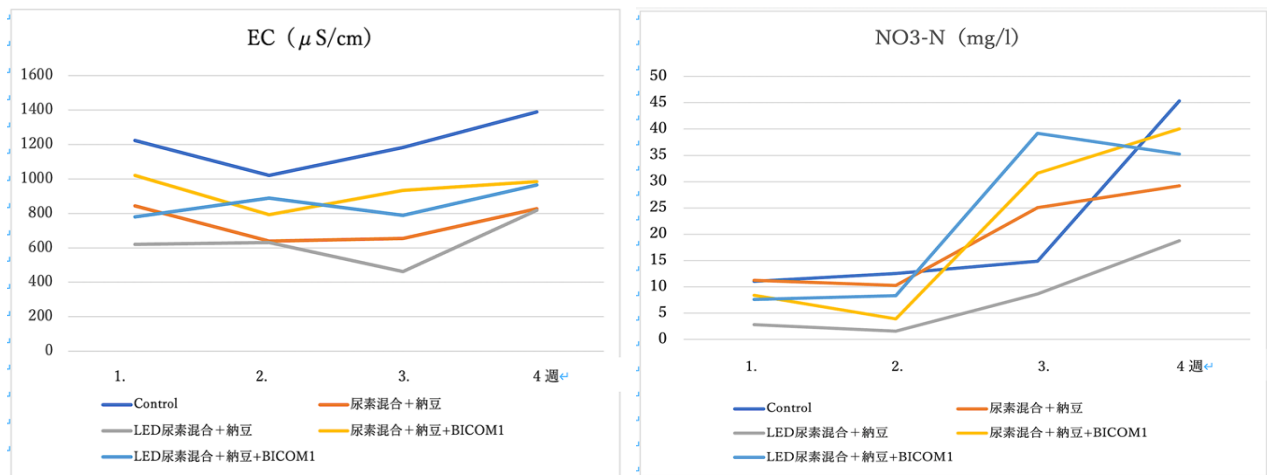
尿素混合+納豆+BICOM1+LED

図6 5区の生育の様子

Control が大きくなったのは、最初から硝酸態窒素が入っているからである。それ以上に BICOM 1 を添加した区が大きくなったのは、アンモニア態窒素を硝酸態窒素に変える硝化菌を強制的に添加したからで、より早く継続的に硝酸態窒素を増やしたからだと思われる。しかし尿素をアンモニア態窒素に変える納豆菌だけの区では、硝酸態窒素が増えず生育が遅れたと思われる（図6）。

（2）養液の成分調査

EC は control が一番高く、他 4 つはほぼ変わらず大差なかった（図7）。これは Control に用いた肥料には最初から NPK の肥料が含まれているからである。硝酸態窒素は BICOM 1 を添加した区が多くなった。BICOM はアンモニア態窒素を硝酸態窒素に変える硝化菌なので、どんどん硝酸態窒素が作られたからだと考えられる。



尿素+納豆菌区のアンモニア態窒素が増えたのは、納豆菌が尿素態窒素をアンモニア態窒素に変える微生物のため、どんどんアンモニア態窒素を作ったからだと思われる。逆にControlのアンモニア態窒素が徐々に減っていったのは、硝酸態窒素に変わりハクサイに吸収されていったからだと考えられる。

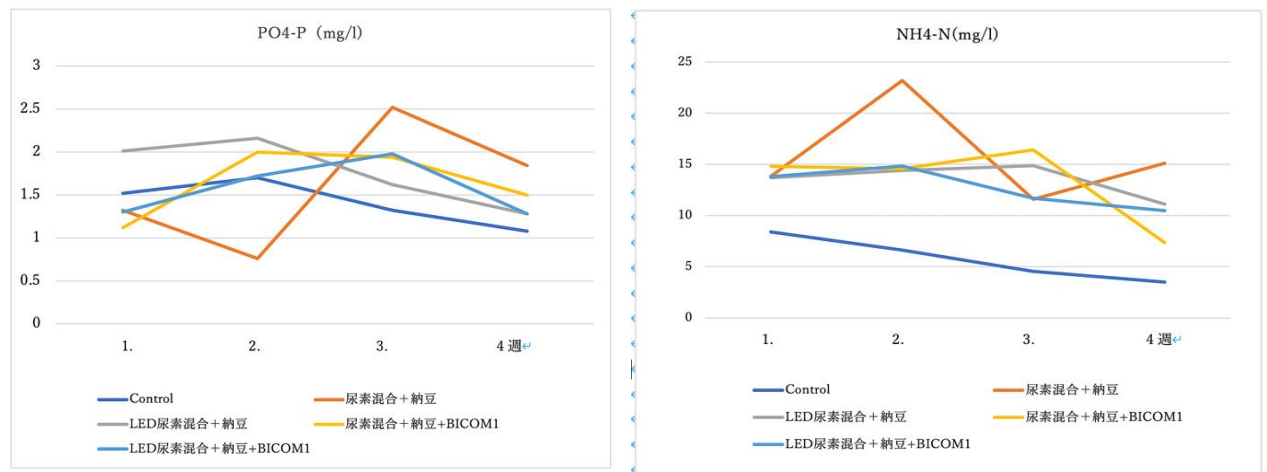
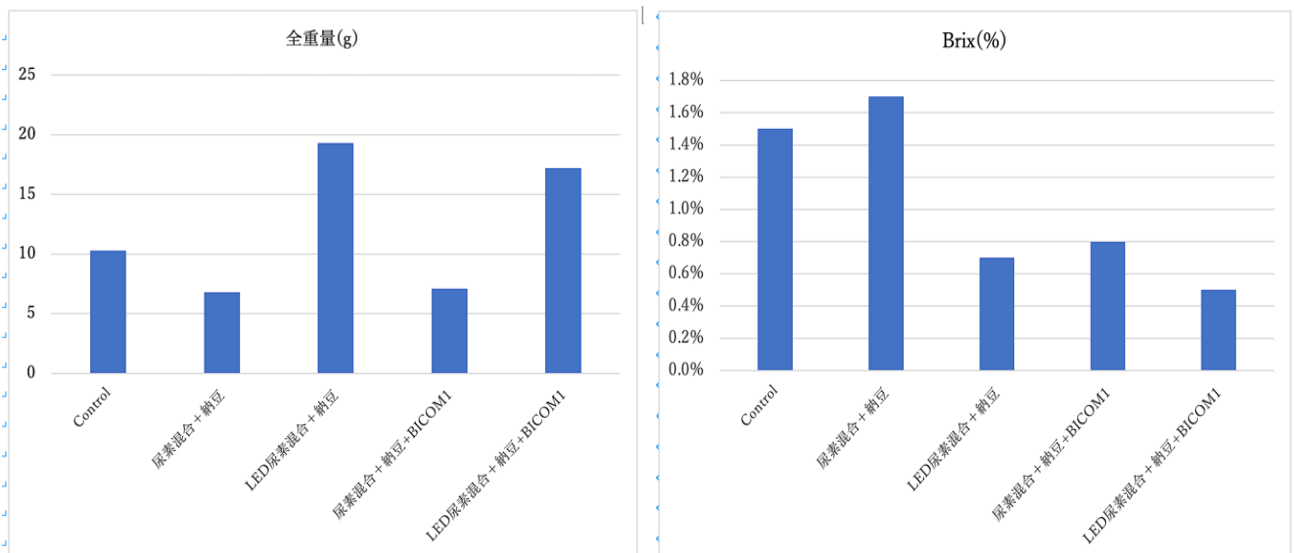


図7 各試験区の水質変化

(3) 収量調査

収量では、見た目通りの結果で尿素混合+納豆+LEDが一番重く、尿素混合+納豆が一番軽かった。



いずれも LED を使用した試験区が重くなっており、光合成が盛んになったためだと考えられる。しかし尿素と納豆菌だけではと予想通り硝酸態窒素が足りず、成長が遅れたと思われる（図 8）。各区の詳細は次の通りである。

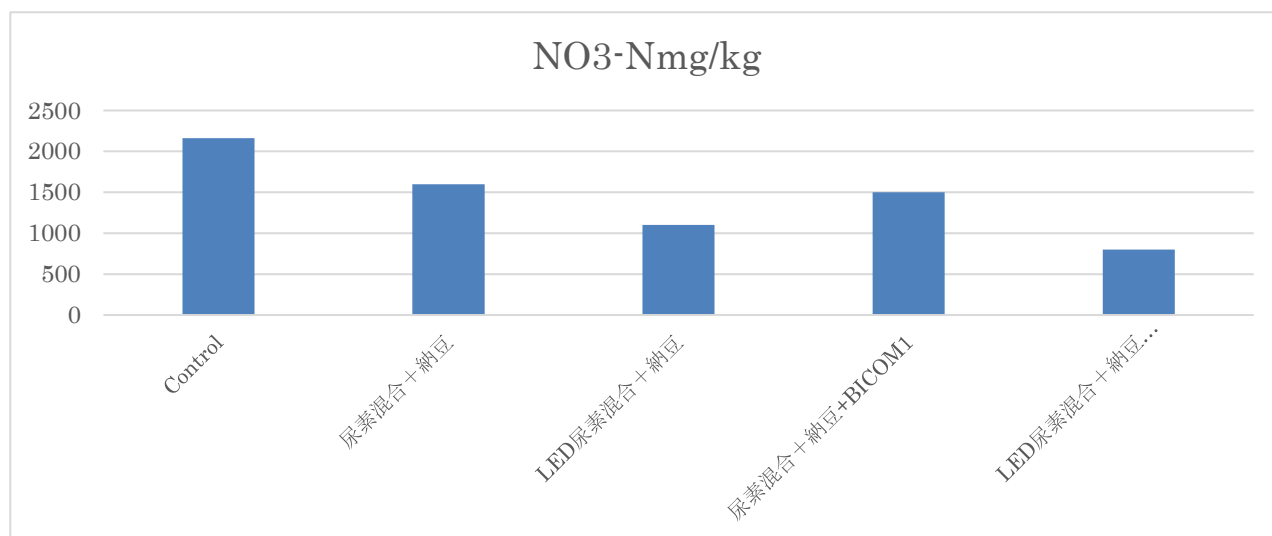


図 8 収量調査（上左：全重量 上右：糖度 下：硝酸態窒素含有量 mg/kg）

ハクサイの茎葉に含まれている硝酸態窒素は Control で 2000mg/kg を超え圧倒的に多くなった。これは EU の基準の上限に近く、これ以上多いと出荷できない数値である。しかし尿素と LED 照射を行なった区では半減した（図 8）。これは尿素を用いたことでハクサイに吸収された硝酸態窒素が少なかったことが考えられる。

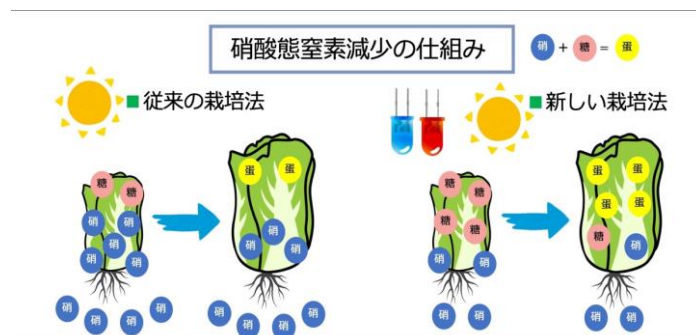


図 9 硝酸態窒素減少の仕組み

また植物は光合成で作った糖と硝酸態窒素を反応させて体を作るタンパク質に変える。LED を照射した区が成長したのは、積極的に光合成を促したことで糖が合成され、わずかな硝酸態窒素に反応させたからだと思われる。したがって吸収された硝酸態窒素の多くが成長に利用されたため、蓄積しなかったと考えられる（図 9）。

表 2 収量調査

試験区名	重量 g (5 株)	硝酸態窒素 mg/Kg
Control	51.0	2160
尿素混合+納豆菌	37.1	1100
尿素混合+納豆菌+LED	97.4	800
尿素混合+納豆菌+硝化菌 (BICOM)	38.0	1500
尿素混合+納豆菌+硝化菌 (BICOM)+LED	90.5	1000

2-4 まとめ・考察

LED を使ってハクサイを栽培すると普通に栽培したハクサイに比べ、硝酸態窒素を減らすことが出来た。これは、尿素を使ったことでハクサイに与える硝酸態窒素を減らしたこと、そしてLEDによって光合成を促して糖を合成し、硝酸態窒素を成長に使わせたからだと考えられる。尿素とLEDを組み合わせた区の収量が増え、茎葉の硝酸態窒素が減ったのがその証である。この栽培法を世間に広めて利用してもらうことで、安全安心な野菜を提供できると思われる。

2-5 今後の課題

この研究はハクサイの硝酸態窒素を減らすのを目的としていたが、トマト、ホウレンソウ、コマツナ、チンゲンサイ、胡瓜も硝酸態窒素が多いと聞くことがあるので、これらの野菜でも利用できるのか試していきたい。また、この研究で得たノウハウを世界の情報発信し、多くの人に広めていくとともに、世界視野にたった農業を進めていきたい。

3 アクアバイオポニックスの開発

3-1 動機

気候変動の影響を受けにくい水耕栽培が世界中に普及している。私たち環境システム科は水耕栽培などに特化した全国でも珍しい学科で、また近年は魚を養殖しながら、食べ残しの餌と糞を肥料にして野菜を育てるアクアポニックスという水耕栽培法も誕生している。これは化学肥料を使わない循環型栽培法で、その意義は高く評価されている。しかし魚の飼育上、液肥を使用できないことから、養液栽培に比較すると野菜の生育が劣るという欠点がある。アクアポニックスは、収入を得るための手段のため、収量また収益が少ないと普及しないと考えた私たちは、魚と野菜を同時に育てる「アクアポニックス」(図1)と微生物を利用する水耕栽培「プロバイオポニックス」(図2)の2つを組み合わせた新しい水耕栽培の開発を目指すことにした。私たちは目指すこの栽培法を「アクアバイオポニックス」と呼ぶことにした。



図1 アクアポニックス



図2 プロバイオポニックス栽培

3-2 研究方法

(1) 微生物の選択

植物の多くは、硝酸態窒素を好んで吸収する。自然界では、枯葉などの有機物をアンモニア態窒素に分解する細菌とアンモニア態窒素を硝酸態窒素に分解する細菌の作用によって窒素が供給される(図3)。しかし水槽の中ではこれらの微生物数は少ない。そこで2つ

の細菌を水槽に添加することにした。そして私たちは前者を納豆菌、後者を硝化菌とし実験を行った。



図3 窒素の吸収過程

(2) 野菜と魚の選択

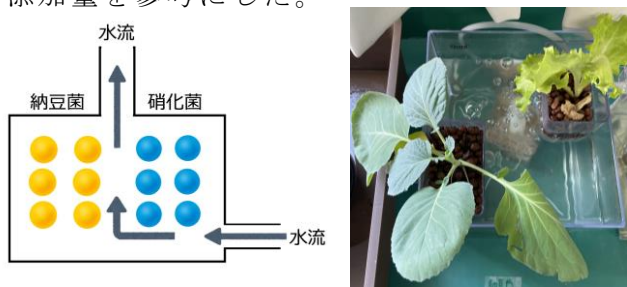
納豆菌、硝化菌が野菜の生育にどのような影響を与えるか探るために、硝酸態窒素とアンモニア態窒素の両方を好むキャベツ、硝酸態窒素を好むレタス（好硝酸性植物）を選択した。またアクアポニックスではティラピアや錦鯉、マスなどの淡水魚を養殖するのが一般的だが、本実験では魚への影響を探るのが目的のため、入手しやすい淡水魚のタナゴ（図3）とした。



図3 タナゴ

(3) 装置の仕組み

今回は 3.5L の小型水槽でモデル実験を行なった。水槽にはエアレーション装置（GEX ロカボーイ M）を設置する。装置は改良し、人工イクラの技術で細菌を固定したビーズを入れる。水槽の水は装置内に吸い込まれ、細菌によって処理された水がまた水槽に戻される仕組みである。試験区と微生物の量は次の通りである（図4）。なお微生物は観賞魚水槽の添加量を参考にした。



試験区	納豆菌量	硝化菌量
Control	なし	なし
納豆菌区	5ml	
硝化菌区	なし	15ml
硝化菌＋納豆菌区	5ml	7.5ml

図4（左：改良エアレーション 中央：設置水槽 右：試験区と添加量

細菌のビーズ化の方法は次の通りである。

- ① 30℃のお湯 70ml に細菌を 30ml とアルギン酸ナトリウム 1g を加えて混ぜる（これは人工イクラを作る際の比率である）

- ② 水 150ml に塩化カルシウム 20g を溶かす
- ③ ②の液に①の液をスポイトで 1 滴ずつ垂らす（図 5）
- ④ 固化したら水洗いしてエアレーション装置内に充填する（図 6）

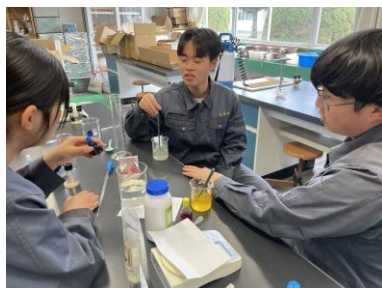


図 5 ビーズ製作



図 6 改良エアレーション（左：無搭載 右：ビーズ搭載）

3-3 研究結果

（１）水槽の水質分析

細菌によって魚の食べ残しの餌や糞の分解が促進されるなら、水質が良くなる。

そこで、1 週間ごとに各水槽の水質分析を行なった。その際、pH の分析は、LAQUAtwin-pH-11B（HORIBA）、EC は LAQUAtwin EC-33B（HORIBA）を用いた。さらに NH₄-N、NO₃-N、PO₄-P は DPM2（共立理化学研究所）を用いて測定した（図 7）。



図 7 水質分析

その結果、pH はほぼ中性で栽培に影響を与えるものではないことがわかった。EC はビーズを搭載していない Control よりも細菌を搭載した 3 区が高くなった。これは細菌によって窒素などが増えているからだと推測される（図 8）。アンモニア態窒素は納豆菌区が高くなった。納豆菌は有機物をアンモニア態窒素に変える細菌のため、餌や糞が効率的に分解されていることがわかる。その逆で Control、硝化菌区では増えなかった。有機物を分解する菌はあるものの、納豆菌よりも少ないからだと考えられる。

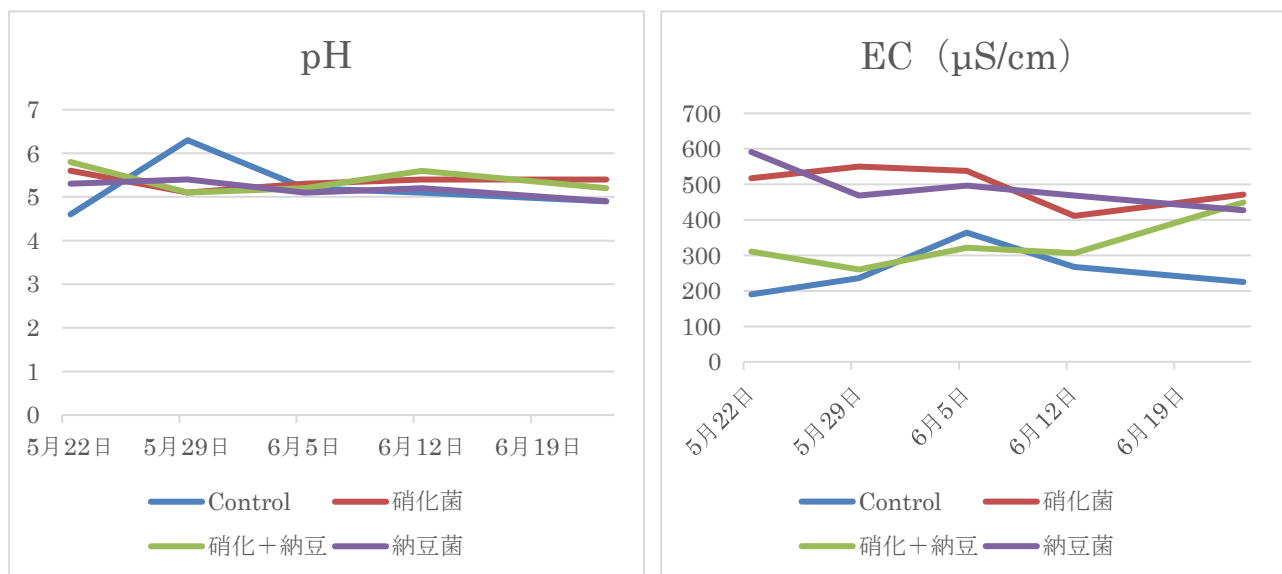


図 8 pH と EC の変化

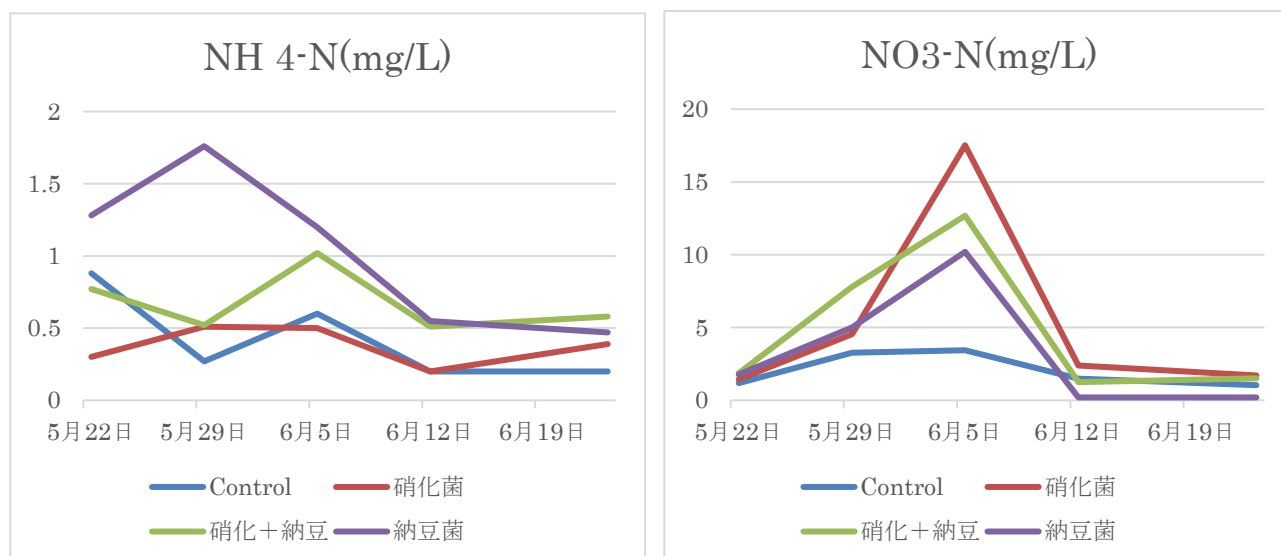


図9 NH₄-N と NO₃-N の変化

しかし硝酸態窒素は、硝化菌区で多くなり、Control、納豆菌区は増えなかった。これは硝化菌区に搭載した硝化菌ビーズにより、アンモニア態窒素を硝酸態窒素に効率よく分解したからだと考えられる。また硝化菌と納豆菌の2つビーズを搭載した区では、アンモニア態窒素および硝酸態窒素とも高く、2つの細菌が分解を促進しているからだと考えられる（図9）。リン酸態リンでは、窒素のような大きな差は見られなかった。細菌は有機物を分解する。したがってリン酸も増えるはずだが、窒素のように即効性はなく、そのため目立った増加は見られなかったと考えられる（図10）。また1水槽2匹のタナゴは細菌ビーズを入れても変わった動きはなかった。したがってビーズを搭載してもタナゴの場合は成長に影響がなく、元気に飼育できることがわかった（図11）。他の魚でも試したい。

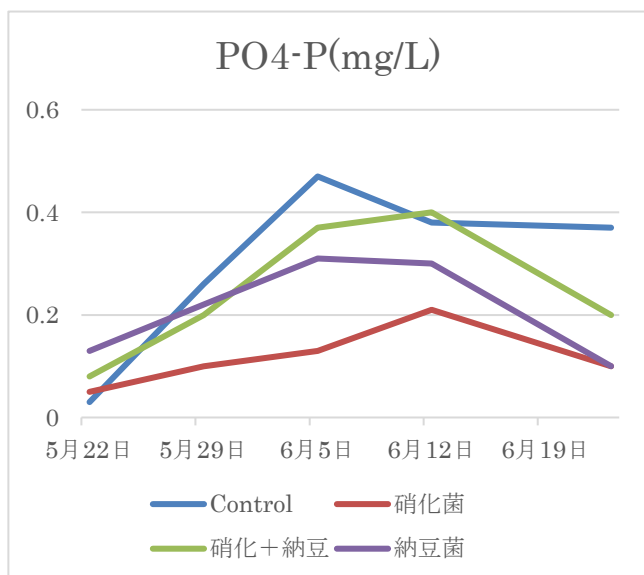


図10 PO₄-P の変化

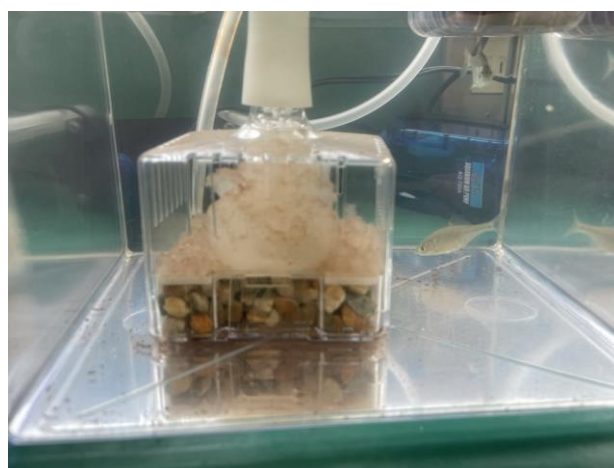


図11 タナゴの様子

(2) 生育

生育を比較した（図12）。左がキャベツ、右がレタスである。キャベツは生育初期から納豆菌区の生育がよく、後半に納豆菌と硝化菌の2つを加えた区の生育が良くなった。

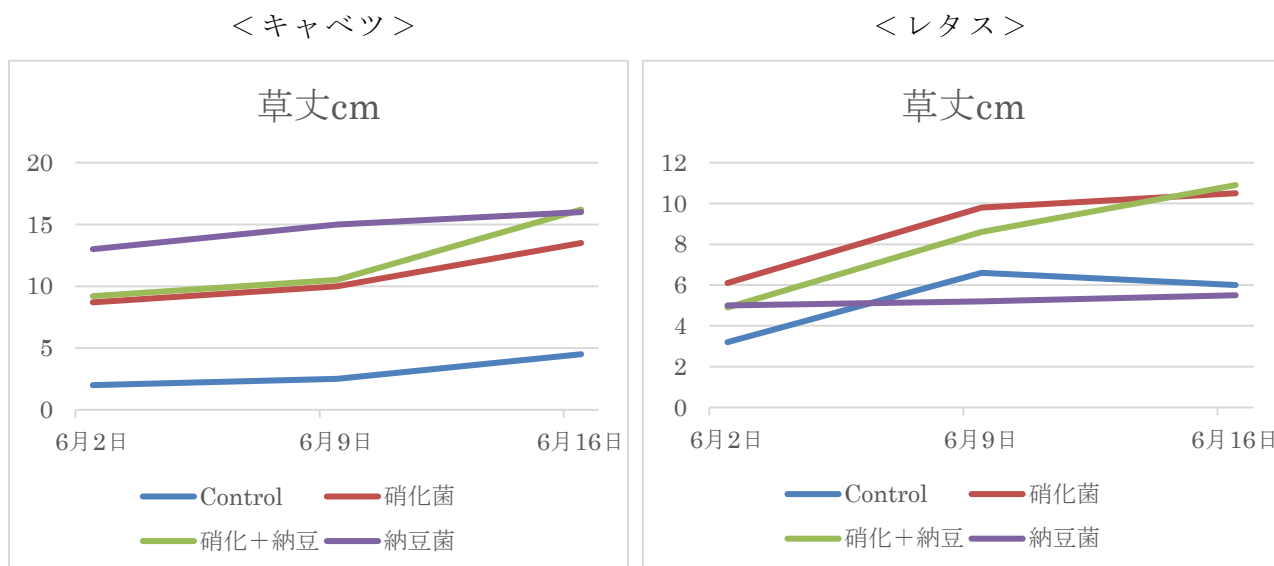


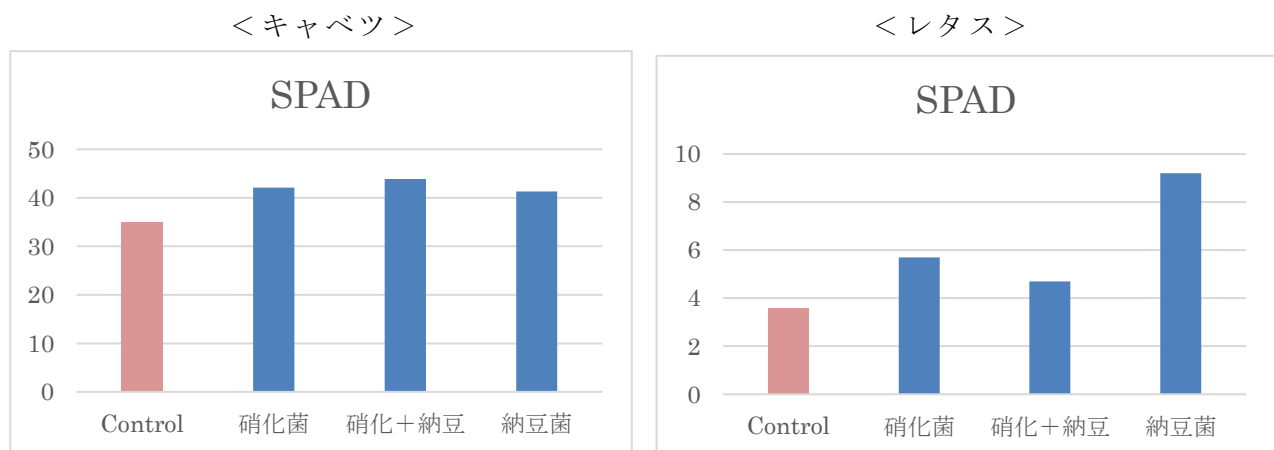
図 12 草丈（左：キャベツ 右：レタス）

キャベツは、アンモニア態窒素と硝酸態窒素の両方を好む植物である。水槽の中には微生物が最初からわずかに存在し、アンモニア態窒素を供給している。納豆菌区キの生育が良かったのは、納豆菌ビーズを搭載しているため、アンモニア態窒素がより積極的に生産されたからだと考えられる。しかしビーズ無搭載の Control では生育が遅れた。これは栄養不足が原因と考えられ、現在のアクアポニックスの問題点をあらためて知ることになった。レタスではキャベツの逆で、硝化菌が入った区の生育が良かった。これはレタスが好硝酸態窒素植物だからだと考えられる。また 2 つの菌のビーズを搭載した区では、レタス、キャベツとも生育が良かった。2 つの菌が作る窒素のバランスが良かったからではないかと考えられる。

（3）収量

アクアポニックスが思うように普及しないのは、養殖している魚の健康を考えて水耕栽培のように養液を使わないため、収量が少ないことが理由のひとつである。そこで最後は、収量調査を行なった。左がキャベツ、右がレタスである。

その結果、SPAD（葉色値）では、微生物を投入した区が高くなった（図 13）。これは窒素の吸収が増えたことで葉の色が濃くなっているからだと考える。しかし Control は低く、栄養不足であることがうかがえる。



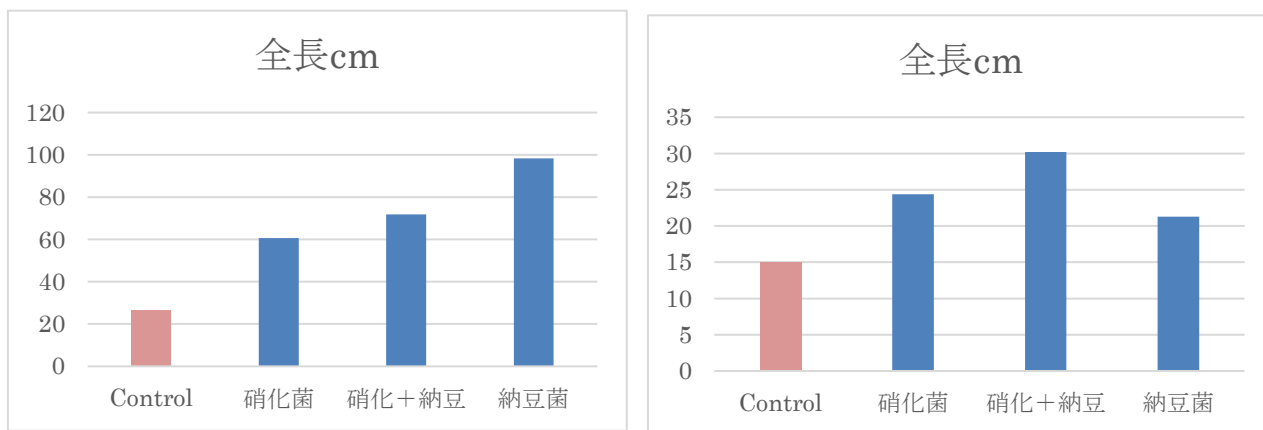


図 13 SPAD(葉色値)と草丈の比較

全長、地上部長（可食部）、地上部重量（可食部）はキャベツとレタスで反対の結果になった（図 15）。キャベツは納豆菌が入った区が大きく、重い。またレタスでは硝化菌が入った区が大きく重くなった（図 14）。キャベツとレタスの好む窒素の違いが大きく影響していることがわかる。また納豆菌と硝化菌が入った区は 2 つの細菌効果のため、より成長することがわかった。

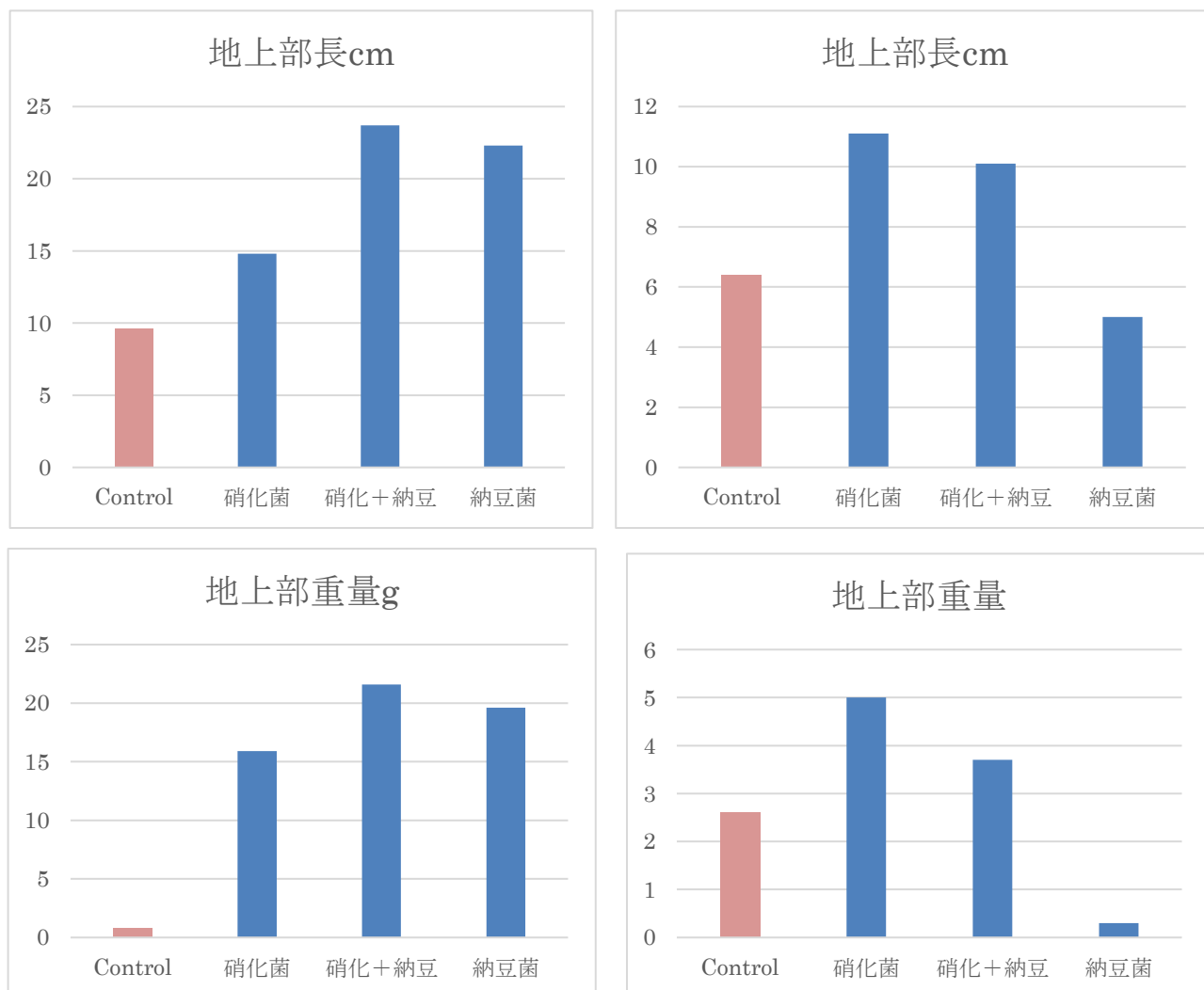


図 14 地上部長と地下部重量の比較

下の表 1 は液体肥料で育てた水耕栽培のリーフレタスの 5 株重量である。生育途中の中

間調査結果ではあるが、化学肥料である液肥を使わなくても遜色ない収量を得られることがわかった（図 16）。



図 15 生育の様子

表 1 レタスの収量比較

試験区	5 株総重量 g
水耕栽培	23.7
硝化菌区	21.1
硝化菌 + 納豆菌区	19.6



図 16 生育比較(上:レタス 下:キャベツ)

左から Control、硝化菌区、硝化菌 + 納豆菌区、納豆菌区

3-4 まとめ

魚の養殖と野菜栽培を同時に行えること、化学肥料を使わず排出される有機物などを肥料として有効利用する観点から、アクアポニックスが近年注目されている。しかし魚の飼育を伴うため液肥を投入できず、生育が劣るという問題を抱えている。その問題を納豆菌と硝化菌という 2 つの細菌をビーズ化して投入することで、硝化作用を積極的に促進させ、課題を解決することを目指し「アクアバイオポニックス」研究を 2 年間行ってきた。その結果、仮説の通り、細菌の効果で水耕栽培に匹敵する収量をあげられることを明らかにすることができた。

また従来の微生物を活用するプロバイポニックス栽培では、養液を補充、交換する際に水槽内の微生物が流れ出てしまうという欠点があった。しかし私たちが考案した栽培法では、納豆菌と硝化菌を人工イクラの技術でビーズ化して固定しているため、養液交換の際も、貴重な細菌が流れ出すことは少ない。これは養液を交換した際も微生物量を確保できるため、野菜の生育を維持することにつながる、またと微生物資源の節約になるため低コストにもつながる利点もある。

さらに作物には硝酸態窒素を好む植物やアンモニア態窒素を好む植物、またどちらも利用できる植物がある（表 3）。効率的に栽培するには、作物の好む栄養環境を作る必要がある。本実験では納豆菌と硝化菌を 1:0、0:1、1:1 の 3 パターンの比率で試したが、作物によって最適な比率が異なることが想像できる。この栽培法はビーズの数を減らすことで、このバランスを簡単に変えられることができるのもこの利点である。

表3 好む窒素の種類による植物の分類

分類	作物
好アンモニア性植物	イネ、サトイモ、果樹など
好硝酸性植物	レタス、トマト、ホウレンソウ、ブロッコリーなど
どちらも利用できる植物	キャベツ、ナス、キュウリなど

このように微生物を活用することで、生育が劣る課題を抱えているアクアポニックスでも生育を促進できることがわかった（表3）。微生物は持続可能な天然資源のため、私たちが考案した「アクアバイオポニックス栽培」（図17）は、学会等で高く評価され受賞している。さらにSDGsにも大いに貢献できる技術になる可能性が高いと確信している。

表3 従来の栽培との違い

	栄養分	光合成	生育
水耕	◎	○	◎
アクア	▲	○	▲
アクア バイオ	○	◎	◎

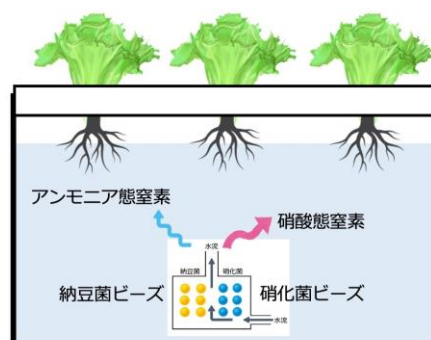


図17 アクアバイオポニックスのイメージ

3-5 今後の課題

本実験では水耕栽培の養液に比べると、終始窒素濃度は5～10分の1であった。しかしアンモニア態窒素が2mg/Lを超えると、成長に影響を受ける魚もあるといわれている。今後は養殖と栽培に適した細菌の添加量を探り、環境共生型の新しい水耕栽培法として実用化を目指したい。そして世界に情報を発信していきたい。

4 総合まとめ

2年かけて1人で水耕栽培の抱える問題の解決を目指し、微生物を利用したプロジェクトを行ってきた。課題を完全に解決することは難しいが、従来の液肥の一部を尿素に置き換えLEDを照射することで低硝酸水耕野菜が生産できること、微生物ビーズを投入すると液肥を使わずにアクアポニックスの野菜の生育を促進できることなどを立証することができた。このように微生物の力を利用することで、さまざまな可能性のある技術の原石を見つけることができた。



図18 プロジェクト活動の様子

また研究を通して歴史のある水耕栽培だが、まだまだ未成熟で、これからどんどん改善される技術であることもわかった。とても有意義な 2 年間であり、今後の農業に大いに貢献するものだと確信している（図 18）。

5 今後の展望

研究成果を学会等で披露しているが、微生物を使った新しい技術は高く評価され、賞もいただいている。今後は実用化を目指してさらに研究を進めていきたい。そして海外にも積極的に情報発信していくつもりである。