

循環型社会構築のための アクアポニックスシステムの検証実験

三崎貴弘¹・平野廣和²

¹学生員 中央大学大学院 総合政策研究科 博士前期課程 (〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1)

²正会員 工博 中央大学教授 総合政策学部 (〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1)

従来の養殖業による養殖魚の排泄物に含まれる窒素分とリン酸成分は、海辺や湖沼において富栄養化を生じさせていると報告されている。また、従来の農業生産の向上を目指した化学肥料の農地への大量の散布は河川や湖沼に窒素分やリン酸成分を流入させ、富栄養化を生じさせていると報告されている。

そこで本研究では、食糧生産性の向上を主眼とした養殖と主に農作物の水耕栽培を同時並行的に行うアクアポニックスシステムを検討する検証実験を行った。この結果をもとに、このアクアポニックスの持つ一つの特徴である閉鎖循環型システムが、周辺環境において負荷を掛けずに食糧生産することが可能であると確認されたので、一連の成果を報告する。

Key Words: sustainable society, Aquaponics, closed system, ecosystem, food product

1. はじめに

近年、地球人口の増加に伴い、耕作可能地とりわけ乾燥地における食糧生産の増加が求められている。また我国においては、食糧需給率の上昇と食品履歴による食の安全が求められている。このような状況下において、食糧生産を過度に重視する余り、周辺の生態系に十分に配慮がされないまま生産性の効率化が目標として掲げられて食糧生産なされてきた。一方、従来の養殖業による養殖魚の排泄物に含まれる窒素分とリン酸成分が、海辺や湖沼において富栄養化を生じさせ、赤潮の一つの発生原因となっていると報告されている¹⁾。また、従来の農業生産の向上を目指した化学肥料の大量消費は農地から河川や湖沼に窒素分やリン酸成分を流入させ、富栄養化を生じさせているとも報告されている²⁾。

これらの問題に対して、特に生活排水からの湖沼の環境改善を意図とした日本の研究としては、富栄養化した湖沼に流入する窒素分・リン酸成分の同時的な除去に水耕栽培を活用した稲森ら^{3),4)}の研究がある。この研究は、新規の嫌気性細菌と好気性細菌を用いたプロセスと既存の単独処理浄化槽が普及した地域においては、水生植物植栽浄化法などを用いた直接浄化プロセスを

提案している。その中で、水生植物植栽浄化法においてはアシやホテイアオイなどの水耕栽培所を通過させ、窒素分・リン酸成分の除去に着目して湖沼の富栄養化の発生抑制を考察している。また、湖沼におけるヨシ湿地の果たす役割について北詰ら⁵⁾の研究がある。この研究は、湿地の水質浄化などに着目し、特に人工ヨシ湿地を生活排水の高度処理に適用する目的で、湿地の浄化能力を強化する手段を検討している。

しかしながらこれらの研究においては、大きな用地の確保が必要であり、都市部においては大規模な用地確保はコストの面からも難しいのが現状である。またこれらの方式は、窒素分・リン酸成分を湖沼への流入時に削減する手法である。これは、上述した食糧生産への安定的な増加という面から考察すると、十分に生産性を高めることが可能であるとは言えにくい。

著者らはこれらの問題に対して、環境に負荷を掛けずに食糧生産性を向上させることを主眼として、日本の気候下において養殖と水耕栽培を同時並行的に行うアクアポニックスシステムの活用を提案してきた⁶⁾⁷⁾。本システムは、水耕栽培所に植えられている植物の蒸散作用による気候の緩和も期待できる。本論では本システムの小型実験装置を東京・八王子市の中央大学・多摩キャンパス内の屋外に設置して、2004年4月より

12月にかけて長期計測を行ったので、これに関して報告する。また、現在計測を継続中の2005年3月下旬より6月上旬にかけて行った計測もあわせて報告する。

2. アクアポニックス

2.1. アクアポニックスの基本概念

アクアポニックス (Aquaponics) とは、魚の養殖 (Aquaculture) の aqua と水耕栽培 (Hydroponics) の ponics とを併せた造語である。このシステムの特徴は、人工的に閉鎖循環の空間を創設することにより、植物の生育の難しい不毛地において周辺環境に負荷をかけないことを目的とし、乾燥地帯における食糧生産を前提としている。このシステムは、養殖魚が排出する糞などを基とする窒素分や燐酸成分と植物が吸収する成分の均衡が保てることにより、一つの循環型社会を形成することが可能である。アクアポニックスの基本的な考え方は、養殖時に出る魚の排泄物を利用し、これを水耕栽培の肥料へと活用し、さらに養殖の水を水耕栽培によりろ過して閉鎖循環型空間を創り、養殖と水耕栽培を併せて行うことである。一般に養殖の特色は、魚の漁獲量を一定にすることにより、魚の値段を天然物の魚に比べて安価にすることを可能にしたことにある。しかし、魚の体調管理のために大量の化学薬品の使用に伴い、人間と周辺環境への影響を否定することができない。さらに魚が排出する排泄物により、周辺海域での富栄養化による赤潮の発生も挙げられる。一方、水耕栽培の特色は、土壌よりも清潔な環境で作物を育てることが可能なことである。土壌中には、作物にとって好ましくない種々の微生物や害虫がいるが、これを駆除するために大量の化学薬品が使われてきた。大量の化学薬品は、作物を栽培する人間はもとより、それを食べる人間や周辺環境にも悪影響を与えていることが多い。水耕栽培は農業軽減が可能であるので、コスト低減・人間や周辺環境にも寄与する。

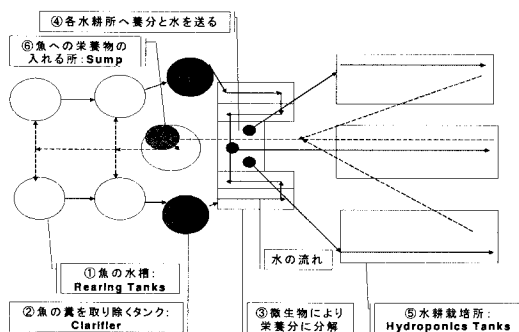


図-1 アクアポニックスシステム

本研究で取り上げるアクアポニックスシステム⁹⁾は、図-1に示すようにまず、①養殖用の水槽で魚を養殖する。②水に浮かんだ魚の排出物を除去する。③その水槽の水をバクテリアを利用して排泄物の主成分であるアンモニアから窒素に変化させる。④水耕栽培のタンクへ流す。⑤水耕栽培のタンクで育てられている作物が窒素分を吸収し水をろ過する。⑥ろ過された水は養殖用の水槽に戻され、養殖に活用されるという循環システムである。なお、このシステムは周りの気候により、養殖魚や水耕栽培作物の品目に影響を与えるが、ビニールハウスのような周辺気候と隔絶した方法を使えば、農業に不向きな不毛な土地や寒冷地でも食糧生産を行うことが可能となる。

2.2. アクアポニックスの現状

アクアポニックスシステムの研究は、1960年代より、主にアメリカ・イスラエル・オーストラリアにおいて行われ、多くの成果が発表されている。W.A. Lennardらのグループ⁹⁾は、オーストラリア・マレー・タラの養殖と水耕栽培所にレタスを植えることによって窒素分を90%以上削減し、水を浄化し循環して利用する研究を行っている。また、水耕栽培所の水を周期的に溢れさせる実験設備と水耕栽培所の水を絶え間なく溢れさせる実験設備の窒素分とリン分の除去率を比較している。E.J. Linkyらのグループ¹⁰⁾は、プエルトリコにおいて経済発展と水・エネルギーを循環して活用する社会の構築における食糧生産技術一つとしてアクアポニックスシステムの活用を提案して、実験を行っている。この実験は、ゴミ処理場より排出されるガスをハウス温室の暖房に活用し、その中でアクアポニックスシステムを使用し食糧生産を行い、栽培された作物の非食用部分を堆肥として活用するシステムの構築を行っている。

またG. Willsonの調査^{11,12)}によれば、R.d. NysらのグループとA. Neoriらのグループがアクアポニックスシステムの研究を行っている。R.d. Nysらのグループは、台所や浴室の修繕時に設置できる各家庭の目的別に沿ったアクアポニックスシステムを提案している。A. Neoriらのグループは、海水を用いたアクアポニックスシステムを提唱し、魚・海老・藻類・甲殻類・軟体類・棘皮動物を育成させる閉鎖循環型養殖を研究している。また、商業設備としては、アメリカ合衆国マサチューセッツ州アムハースト市近郊にあるバイオシェルトアーズ社¹³⁾は、アクアポニックスシステムを使って、ティラピアとバジルを育てている。週に、600ポンド(270.16キログラム)のティラピアと50から60ケースのバジルをアムハースト市に出荷している。

日本国内においてアクアポニックスシステムの研究

は、山内らのグループ¹⁴⁾とTokuyamaらのグループ¹⁵⁾が行っている。山内らの研究は、養殖魚から排泄される窒素やリンを水耕栽培植物がどの程度浄化できるかを調査している。この調査は、チンゲンサイ・コマツ菜・サラダ菜・ミツバ・バジルなどの植物で実験を行い、植物の生育を促し、より窒素・燐分を吸収させるのに必要な物質としてカリウムの重要性を指摘している。また、海藻類を活用した海産物の研究も行っている。Tokuyamaらの研究は、アクアポニックスシステムの水耕栽培所に植えられたアシの根茎に付着した硝化細菌・ニトロソモナス(*Nitrosomonas*)の種族を分析している。この分析は、分類学上に区別されているYNSRA種族の*Nitrosomonas communis*が、形態と生理的な特徴よりGNSRA種族との差異を指摘している。

2.3. アメリカ・ヴァージニア諸島大学の研究施設

アメリカ・ヴァージニア諸島大学(University of Virgin Islands)は、アクアポニックスの研究と教育を世界に先駆け行っている。ヴァージニア諸島大学のJ.E. Rakocyらのグループ^{16),17)}の研究は、アクアポニックスシステムの水質分析を行い、効率的なシステム開発を行っている。そのシステムは「ラコシー・システム」と呼ばれて、アクアポニックスシステムの一つの代表例となっている。また「ラコシー・システム」における養殖魚と水耕栽培作物の経済的な収益分析を行っている。

2.4. アメリカ・ヴァージニア諸島大学の調査事例

2003年6月22日から28日までアメリカのヴァージニア諸島大学でアクアポニックスの現地調査を行った。ヴァージニア諸島大学で活用されているアクアポ

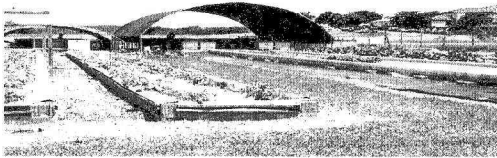


写真-1 アクアポニックス実験施設 (撮影：著者 (2003年6月))

表-1 ヴァージニア諸島ラコシー・システムの総収穫と総費用¹⁷⁾と平成14年度日本の農水業収穫所得¹⁸⁾

	アクアポニックスの一例※			日本		
	ティラピア	レタス	バジル	農業(レタス)	養殖業(ぶり類)	養殖業(真鯛)
収穫量(Kg/m ²)	558.2	381.5	181.1	3.420	97.493	47.593

※) ヴァージニア諸島大学での事例

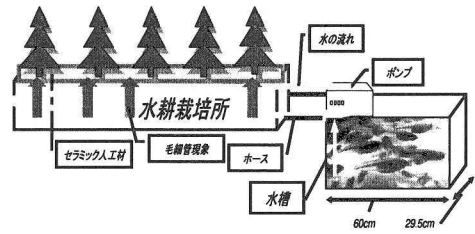


図-2 アクアポニックスシステム概念図

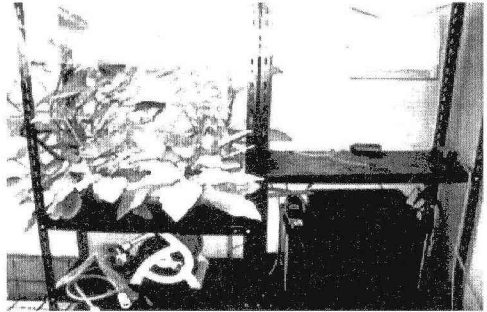


写真-2 アクアポニックスシステム (2004年8月)

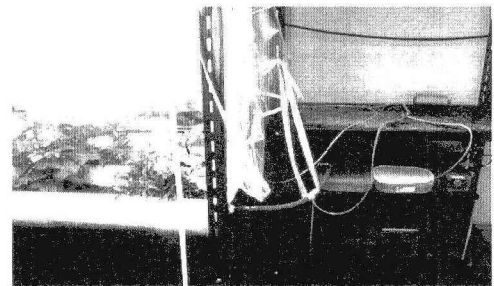


写真-3 アクアポニックスシステム (2005年6月)

ニックスシステムであるラコシー・システムを写真-1に示す。ラコシー・システムを使用した研究施設で栽培されている野菜は主に、ミント・タマネギ・メロン・スイカ・キュウリ・オクラ・白菜・セロリ・トマト・レタス・バジル・エンドウ豆とナスなどである。養殖魚としては主にティラピアである。このティラピアは淡白で白身の魚であり、成育が速く環境条件が悪くても成長することから、養殖には適している。さらに、世界中で食料としての需要があるので、養殖業にとっても好ましい。アメリカでは、ティラピアの市場が1996年から2003年の8年間に6000%の成長を記録し、生産高は22.8億ポンド(10億2060万キログラム)に達した。一方、香味野菜は、1994年から2003年の10年間に8%の成長を記録している。

経済的効率性を比較するために、ヴァージニア諸島大学で実施されている事例と日本の平均的な生産者との比較を表-1に示す。本システムの方がレタス1m²当たり112倍の収穫量が得られる。同様にティラピアと真

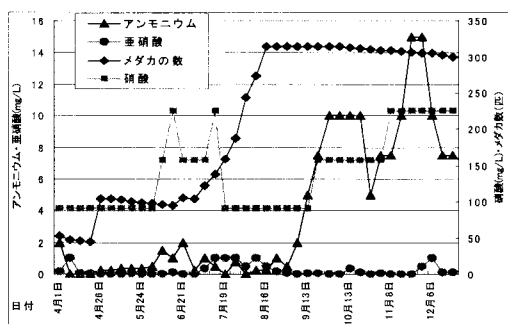


図-3 メダカの数と窒素成分の推移

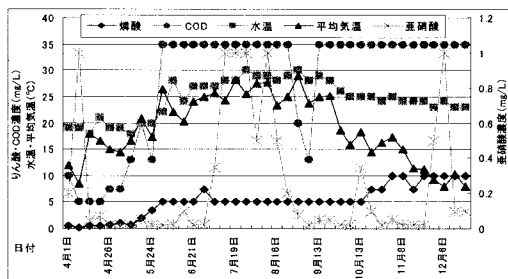


図-4 COD・燐酸・亜硝酸と水温・平均気温

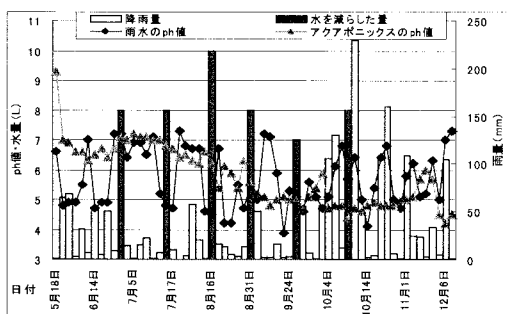


図-5 降雨量と pH 値の推移

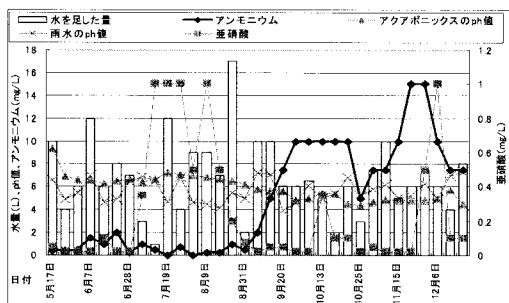


図-6 pH 値の要因と推移

鯛を比較すると、11.7 倍の収穫量が得られる。ヴァージニア諸島大学のアクアポニックスシステムのレタスは、49 日で収穫可能な大きさになる。そのため、年に

7 回は収穫可能である。これは、ヴァージニア諸島が年中温暖であり、乾燥していることに起因する。一般的な水耕栽培においても、収穫可能までには 60 日位はかかる。日本では、一般的にレタスの収穫は年に 3 回程度であるから、アクアポニックスと日本のレタス生育との間に大きな差が現れることになる。この地理的な条件を除いても、本システムの生産性は高い。

3. アクアポニックス小型実験装置

本実験に用いたアクアポニックスシステムの小型実験装置の概念図を図-2 に、実際の装置を写真-2, 3 に示す。実験装置は魚を飼育する幅 60cm・奥行き 29.5cm の水槽を主とし、これにゴムホースで連動した水耕栽培所を設けている。これは、園芸用プランタと衣装ケースという汎用製品を流用したものであり、外側の衣装ケース内に水槽から水を小型ポンプでくみ上げて供給し、プランタの中に敷き詰めているセラミックス製の人工骨材を通して水がプランタの中に毛細管現象で吸い上げられる様な構造になっている。

2004 年に養殖魚は黒メダカを当初約 60 匹用意した。栽培した植物は、バジル・ロケットサラダ・インゲン豆・ペチュニア・マリーゴールド・パセリ・明日葉と京ナスの花物、葉物、実物などを選んだ。ところで、夏期は実験設備の周りに水を撒くことにより、気化熱で実験設備周辺の気温を下げることに試みた。冬期は、アクアポニックスシステムに電気ヒーターを入れて、水温を 23℃の一定に保ち、水耕栽培所をビニールで覆って温室にして、熱を逃がさないように試みた。また、2005 年 1 月より冬季のためにアクアポニックス実験を中断していたが、同年 4 月より実験を再開した。そして、新たに好気性細菌と嫌気性細菌を繁殖させる専用のろ過場を付けた 2 つの実験設備を設置した。なお、この 2 つの設備は、2004 年に得られたシステムの高濃度硝酸値を緩和することを目的として、従来の水耕栽培所の面積を 2 倍とした。養殖魚は黒メダカを 100 匹ずつ 2004 年の設備、好気性設備と嫌気性設備の水槽に入れた。黒メダカが死んだ場合は、死んだ黒メダカを取り除いて、代わりに近いサイズの予備の黒メダカを水槽に入れ、絶えず各水槽の黒メダカ数は 100 匹となるようにした。栽培植物は、明日葉・ミニトマト・ミニキュウリ・ナス・トウガラシとマリーゴールドである。日中の気温が 30℃を超える日は、実験設備の周りに水を撒くことにより、気化熱で実験設備周辺の気温を下げることに試みた。そして、夜間の水温を一定に保つために、アクアポニックスシステムに電気ヒーターを入れて、水温を 20℃の一定に保ち、水耕栽培所をビ

ニールシートで覆って温室にして、熱を逃がさないように試みた。合わせて水耕栽培所を温室状にしたことにより、雨水による実験設備への影響を極力小さくするように試みた。なお、水質計測に使用した機器は、2004 年は株式会社・共立理化学研究所のバックテストを使用したため、値は段階的なものとなっている。2005 年においては、同社製の A-8800M という水質分析計を使用している。

4. 計測結果と考察

我国においても地球温暖化等の影響や都市のヒートアイランド化などにより、年々平均気温の上昇や乾燥化が進行している。また我国においては、食糧需給率の上昇と食品履歴による食の安全も求められている。そこで、我国の都市部における気候下において、アクアポニックスの持つ特性の一つである閉鎖循環型システムに着目し、これが適用可能であるかを小型実験設備を用いて検討を行った。実験の計測期間は、2004 年 4 月 1 日から 12 月 20 日の 38 週間分であり、このデータから考察を行う。この期間のデータは、メダカの数増加に伴うアンモニウム・亜硝酸・硝酸の窒素分を図-3 に、化学的酸素消費量 (COD) の推移と特に関係している磷酸・亜硝酸と水温と平均気温を図-4 に、降雨量とそれに伴う pH 値の推移を図-5 にそれぞれ示す。

4.1. メダカの数と窒素分の推移

図-3 より、黒メダカの個体数は、当初約 60 匹であったが、5 月から 6 月にかけて産卵により増加し、8 月 9 日に成魚と同じ大きさに成長したので、この黒メダカをアクアポニックスシステムの水槽に移した。この時点で 314 匹である。

アンモニウム濃度は 5 月 31 日に上昇を始め、この後 11 月 22・29 日に最高 15mg/L という値を示した。亜硝酸濃度は 7 月 5 日に上昇を始めているが、全期間において 0.02~1mg/L の間を推移している。硝酸濃度は 9 月 13 日までは 90mg/L、メダカの数増加以降に 157.5~225mg/L という値を指し示している。これは、黒メダカの排泄物や餌の食べ残しがまずアンモニウムとして排泄され、硝化細菌により亜硝酸、その後硝酸に分解されていることを指し示していると考えられる。

なお、12 月に入り水耕栽培所を温室状にはしていたが、植物の生育が停止し枯れてしまう事態になったため、硝酸濃度は 6 月から 10 月にかけての値と比べて高い水準になっている。12 月における 225mg/L という硝酸は植物中の高濃度硝酸態窒素の蓄積となり、製品作物としての価値を損なうので、嫌気性細菌による脱

窒反応を活用し硝酸濃度の減少と pH 値の上昇を行うという、pH 値を中和させる緩衝剤以外の方法も検討する必要がある。

4.2. COD・磷酸と実験設備の環境条件

図-4 より、磷酸濃度は 5 月 31 日より 5mg/L という値を指していたが、メダカの増加後から 2 ヶ月遅れて 7.5~10mg/L という値を示した。COD 濃度は 5 月 31 日よりメダカの増加後も 35mg/L という値を指し示している。今回のアクアポニックス実験における磷酸と COD 濃度は 6 月より 10 月にかけてほぼ同じ値を指し示した。これらの値は 6 月から 10 月にかけての植物の生育との均衡点と考えられる。メダカの数 300 匹を超えた後は COD のみがほぼ同じ値を指し示している。磷酸濃度は、上記硝酸濃度と同じ原因によって上昇したと考えられる。また、水温は 4 月から 5 月まで約 18℃に、6 月から 8 月まで約 24℃に、9 月から 11 月まで約 23℃に推移したことがわかる。ここでの平均気温は、東京都八王子市の 1 日の平均気温¹⁹⁾を示している。

4.3. pH 値の推移要因

図-5 より、pH 値は前半には約 7.0 を示しているが、9 月 6 日以降から低下を始め 12 月 15 日には 4.2 という値を指し示している。8 月中旬から 9 月上旬にかけて、雨水の pH 値は 4.0 から 5.5 位の間の雨が 150mm 以上降り続いたことから、アクアポニックスの pH 値はそれに比例するように少しずつ低下することとなった。これに関連して、アクアポニックスシステム上部に雨水確保用の容器を設置し、雨水の pH 値を計測した結果とアクアポニックスの pH 値とアンモニウム・亜硝酸と水を足した量の関係を図-6 に示す。

pH 値の上昇原因としては、水中におけるアンモニア (NH_3) からアンモニウム (NH_4^+) の変化と実験設備に水量を足したことが挙げられる。pH 値の下降原因としては、アンモニア酸化細菌 (*Nitrosomonas*) によるアンモニウム (NH_4^+) から亜硝酸 (NO_2^-) への分解に伴う酸化とアクアポニックスを屋外設置に伴う酸性雨の侵入を挙げられる。なお、このような pH の変化から、結果的に酸性土壌に強い植物が最後まで生育をすることとなった。

4.4. 2005 年の計測中の値

2005 年 3 月 31 日よりアクアポニックス実験を再開し、同年 6 月 8 日までの 10 週間分のデータを 2004 年の参考として報告する。

この期間のデータは、本実験に使用した水道水を汲み置いた値と実験に使用した餌 10g と水 200g を 3 日間常温状態で置いた水の値を表-2 に、2005 年の実験設備

表-2 汲み置いた水と餌の水質分析

	ph	NH ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄	K
汲み置きの水	7.30	0.10	0.02	3.32	0.10	2.00
餌と汲み置きの水	5.40	45.80	0.02	1.75	103.30	2.00

表-3 2005 年の実験設備の値

	2004 年の設備		好気性設備		嫌気性設備	
	4月7日	6月8日	4月7日	6月8日	4月7日	6月8日
NH ₄	0.10	0.14	1.74	0.10	2.60	0.10
NO ₂	0.02	1.18	0.05	1.41	0.05	0.26
NO ₃	9.90	39.50	4.45	51.48	0.10	47.05
PO ₄	2.68	2.23	0.10	0.16	0.31	0.33
COD	5.14	8.85	2.00	5.70	3.02	9.23
K	2.00	2.00	7.08	3.06	16.91	2.00

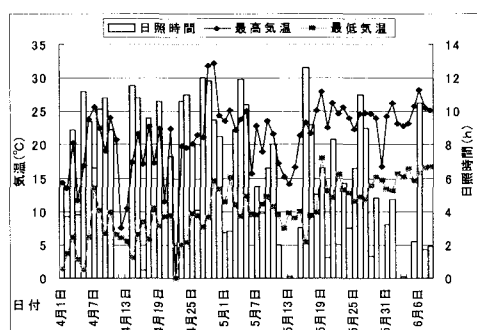


図-7 2005 年の気温と日照時間の推移

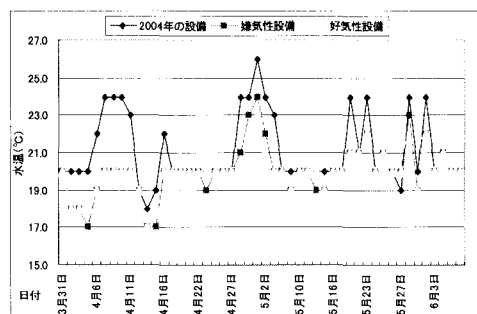


図-8 2005 年の水温の推移

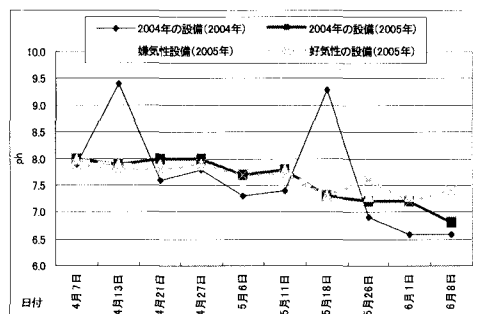


図-9 2004 年と 2005 年の pH 値の推移

が置かれている環境条件を示した気温と日照時間を図-7 に、水温を図-8 に、2004 年と 2005 年の pH 値の比較を図-9 に、また窒素成分・磷酸・COD とカリウムの計測結果については、第 1 週目 4 月 7 日と第 10 週目 6 月 8 日の値を表-3 にそれぞれ示す。

図-7 と図-8 より、2005 年 3 月下旬から 6 月上旬に実験設備が置かれた環境条件は、最高気温と最低気温の差は約 10℃ から 15℃ である。水温は 3 つの設備に 20℃ となるようにヒーターを設置していたが、最低気温が 5℃ 近くになっていた 4 月上旬は、17℃ 前後を示した。

図-9 より、3 つの実験設備とも 8.0 の pH 値は、なだらかに低下傾向にある。嫌気性設備と好気性設備がアンモニア値の上昇に伴う pH 値の上昇は見られない。これは表-3 より、アンモニウムが排出された直後に亜硝酸への移行し、H⁺ と OH⁻ イオンが相殺されたためと考えられる。また、2005 年には 3 つの設備とも、雨水の浸入を防ぐビニールシートを張ってあるために、現在のところ雨水の浸入は確認されていない。

表-3 より、前年の設備と比べて好気性設備と嫌気性設備のアンモニウム値が高い。好気性設備と嫌気性設備とも 2005 年に製作したために、まだ十分に硝化細菌が培養できていなかったためと考えられる。また、この 2 つの設備の水耕栽培所に植物を植えたのが 4 月の中旬であり、またその植物が成長を活性化させたのが 5 月上旬であった。前年の設備は 2004 年の春から植えられていた 2 年草である明日葉が 4 月上旬に成長を活性化に始めたために、硝酸値・磷酸値とカリウム値ともに、前年の設備が好気性設備と嫌気性設備と比べて値が低くなっている。今年の実験終了時に、水耕栽培所の面積と硝酸値の関係について検討していく必要がある。

5. おわりに

今回の実験と長期に渡る計測において、日本の気候下においてもアクボニックスシステムを活用することは可能であることが確かめられ、小さな空間で一つの循環型社会を構築することができた。本小型実験設備を用いた実験において、磷酸の物質の均衡する点を得られたことによる。一方、窒素分の均衡点は、養殖する魚と水耕栽培する植物の選択によって特に左右され易いと考えられる。そして、日本の気候下でアクボニックスの検証実験を行うために、屋外にシステムを設置したことによって課題も見つかった。これは、気候に影響される植物の生育が及ぼす硝酸の蓄積と酸性雨の問題である。

第一に、2004 年冬季にアクアポニックスシステムより高濃度硝酸濃度を検出したことは、商品としての養殖魚の育成状況の悪化と水耕栽培植物の高濃硝酸の蓄積問題である。これを解決する手法として、一般的な嫌気性細菌による脱窒反応を活用し硝酸濃度の減少を検討すると共に、水耕栽培所の面積を増やすことによって一つの植物が吸収する硝酸濃度を減少させることを試みる必要性を挙げられる。

第二に、屋外において雨水の侵入を許すようなシステムを構築したことは、システムの維持管理において課題を残すこととなった。このため、ハウス状の覆い無しで屋外にアクアポニックスシステムを設置することは、酸性雨の本システムへの侵入を許すことにつながり、pH 値の急激な減少を招くことに繋がった。水耕栽培において、pH 値の増減は植物の生育に影響を及し、水中の硝酸を吸収する量が減り、養殖魚の育成にも害を及ぼすことになる。特に日本においては、水耕栽培に向いた酸性で生育する植物が限られているため、商品作物としての選択が難しくなる。

この二つの問題は、アクアポニックスの本来の養殖と水耕栽培を同時並行的に行い食糧生産するという目的から逸れてしまうために避けなければならないことである。第一の問題については、上述した二つの手法の検証について、2004 年の計測結果と現在継続されている 2005 年の計測結果を比較することによって、嫌気性細菌の活用と水耕栽培所の面積と養殖魚の排泄物量との関係を解明する糸口となる可能性がある。第二の問題について、2005 年においては、雨水の侵入を防ぐビニールシートを活用してアクアポニックスの検証実験を行うことによって、酸性雨のシステムに及ぼす問題を実証する糸口となる可能性がある。

参考文献

- 1) 岩佐義朗編著：湖沼工学，pp215-251，山海堂，1990。
- 2) 稲盛悠平，藤本尚志，須藤隆一：水界生態系に及ぼす影響からみた排水処理における窒素・リン同時除去の必要性，用水と排水，Vol.35 No1, pp.19-26, 1993。
- 3) 稲森悠平，山海敏弘，松村正利：クロスメディアを踏まえた環境低負荷資源循環型の排水処理技術の高度化，資源環境対策，Vol.38 No.8, pp770-pp782, 2002。
- 4) 北詰昌義，野口俊太郎：人工ヨシ湿地による生活廃水の高度処理，用水と排水，Vol.39, No11, pp.1043-1047, 1997。
- 5) 三崎貴弘，平野廣和：循環型社会の一つの試みとしてのアクアポニックス，土木学会関東支部第 31 回技術研究発表会，VII-16, 2004。
- 6) 三崎貴弘，平野廣和：小型実験設備を用いた循環型社会への一つの試み，土木学会関東支部第 32 回技術研究発表会，VII-49, 2005。
- 7) 三崎貴弘，平野廣和：食糧生産を前提とした小型実験設備を用いた循環型社会への一つの試み，土木学会全国大会第 60 回技術研究発表会，VII-160, 2005。
- 8) アメリカ合衆国ヴァージニア諸島ヴァージニア諸島大学セント・クロイス校内の広報用システム
- 9) Wilson A. Lennard and Brian V. Leonard: A comparison of reciprocating flow versus constant flow in an integrated, gravel bed, aquaponics test system, *Aquaculture International*, No12, pp539-553, 2004。
- 10) Edward J. Linky, Harry Janes and James Cavazzoni: affordable technology for utilization of methane in a landfill environment: An example of an integrated technology array and evolving institutional networks, *Natural Resources Forum*, No29, pp25-36. 2005。
- 11) Geoff Wilson: Aquaponics Proves Profitable in Australia, *Aquaponics Journal*, Vol.6 No1, pp.6-13, 2002。
- 12) Geoff Wilson: Saltwater Aquaponics, *Aquaponics Journal*, Vol7, No1, pp12-pp17, 2003。
- 13) バイオシェルターズ社のホームページより：
<http://www.bioshelters.com/Corporate.htm>
- 14) 山内皓平，高野和則，足立伸次，山羽悦郎，宮嶋克己，吉野博之：環境にやさしい養殖・水耕栽培システム（アクアポニックス）の開発，（財）北海道科学技術総合振興センター研究開発助成事業研究成果報告書，2003。
- 15) Tatsuaki Tokuyama, Atususi Mine, Kaoru Kmiyama, Ryuichi Yabe, Kazuo Satoh, Hirotohi Matsumoto, Reiji Takahashi and Koji Itobaga: Nitrosomonas communis Strain YNSRA, an Ammonia-Oxidizing Bacterium, Isolated from the Reed Rhizoplane in an Aquaponics Plant, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, Vol.98 No4, pp.309-312, 2004。
- 16) Jame E. Rakocy: *Recirculating Aquaculture Systems*, 2nd Edition, pp631-pp672, 2002。
- 17) J.E. Rakocy and D.S. Bailey: *Initial Economics Analyses of Aquaponic Systems*, 2003。
- 18) 農林水産統計 平成 14 年産野菜・果樹の品目別経営収支と平成 14 年度家族型経営調査（海面養殖業）
- 19) 気象庁・電子閲覧室・昨日までのデータ（統計値）
<http://www.data.kishou.go.jp/etrm/>

(2005. 9. 5 受付)

A Verificational Experiment of Aquaponics system for the Construction of Sustainable Society

Takahiro MISAKI and Hirokazu HIRANO

It is said that nitrogen materials and phosphates in excrement of a usual fish farming result in one of the eutrophications in the sea, lakes and marshes. Once more many chemical fertilizers of a target for improving an agricultural productivity scattered in a farm land result in one of the eutrophications in the river, lakes and marshes that flowed in nitrogen materials and phosphates.

We havd a dissuasion as the small-size test of Aquaponics system that is combination of aquaculture and hydroponics heads for improving food productivity. As results, the closed circulatory system, one of the Aquaponics characters is confirmed the possibility of food products having no impact near the ecosystem. Therefore, Aquaponics is useful for the food products from the tests.