

## 鉄鋼スラグ底質浄化装置と液膜式酸素供給装置との組合せによる 途上国のための養殖池用複合型水質浄化システムの開発

山口大学大学院理工学研究科 今井 剛

### 1. 研究目的

発展途上国のタイにおいては現在、養殖（エビ、カニ、魚等）が盛んであり、特にエビやカニは国内需要に対応するためにも、また輸出産業としても極めて重要な産業である。しかしながら、狭い養殖池の中で可能な限り多くの養殖を行うために溶存酸素(DO)量の慢性的不足、餌を過剰に与えるために養殖池の底質のヘドロ化による底層部の嫌気化と硫化水素、アンモニア性窒素の増加により、養殖に対する障害が生じている。さらに近年、より効率的に養殖するために、養殖池における“マンション化”が日本から導入されつつある。これはかごの中に数匹のエビやカニを入れ、それをあたかもマンションのように積層状に養殖池内に設置するもので、確かに空間を有効に活用できるもののDOの不足がより深刻となる。タイの養殖池ではほとんど水面攪拌式曝気装置（水面上にモーターを設置しプロペラで水面を叩いて曝気するもの）が採用されているが、この方法では上述の“マンション化”した高効率養殖において十分な酸素供給が望めず、酸素供給方法の改善に喫緊のニーズがある。さらに日本は輸入国としてまた先進国としても、タイのような発展途上国の産業振興に対して「持続可能」な技術的支援をなすべきで、かつ、輸入相手国の水環境修復・保全に十分な国際貢献をなすべきである。そこで、本研究では発展途上国に適用可能な養殖池への鉄鋼スラグ底質浄化装置と液膜式酸素供給装置とを組み合わせた新規水質浄化システムの開発を行い、それを広く発展途上国（本研究の実施対象はタイ）に提供することを本研究の目的とする。

本研究は、廃水処理における曝気操作の省エネルギー化を目指し、水表面からの酸素供給に注目した、従来の曝気操作とは異なる新規発想に基づく水の液膜を利用した「液膜式酸素供給装置」（図1参照）を開発してきており、これを養殖池用に改良・発展させる。しかしながら、酸素供給のみでは養殖池等の閉鎖性水域の底質からの硫化水素やアンモニア、リンを抑制するには十分でないことが先行研究にて明らかになっている。そこで本研究では、鉄鋼製造に関連して副生する鉄鋼スラグを底質浄化材として活用する。すなわち、鉄鋼スラグを底質へのアルカリ供給源として活用（酸化還元電位を上昇させる）し、硫化水素やアンモニア、リンの発生抑制の有無を調査するとともに、鉄鋼スラグを底質浄化用に装置化（カートリッジ化を想定）することでその固化を抑制し、ハンドリング性能を向上させ、使用後の鉄鋼スラグの回収・リサイクル（主にコンクリート骨材としての利用を予定）を促進し、廃棄物ゼロを目指す。

本研究では水表面にて水の泡(液膜)を積極的に形成させ、液膜の持続時間の延長と水表面を乱すことで気泡内の空気中の酸素と外側の気体からの酸素とが非常に薄い液膜

へ同時に供給され、また気体交換が迅速に起こるため、無理なく低エネルギーで酸素溶解効率を高めることができる(図 1 参照)。また、鉄鋼スラグをアルカリ供給源として活用し、かつ硫化水素の抑制促進材として用いることで底質改善・浄化を実施して養殖対象物をより良く生産させて実用化を図ることは、これまでに例がない。本装置(図 1 参照)と鉄鋼スラグ底質浄化装置を組み合わせることで底質改善・浄化までも行うところに本研究の独自性がある。

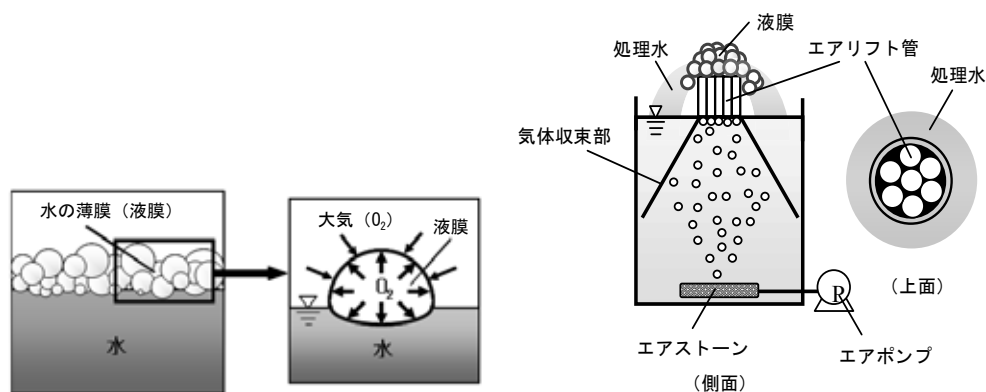


図 1. 液膜式酸素供給装置の概略図

## 2. 現地調査結果

### (1) 目的及び調査方法

本装置を発展途上国であるタイにおける養殖池に適用することを前提に、現在のタイの実養殖池の現状を把握するために以下の調査を実施した。具体的にはタイの養殖事業主にご協力を頂き、フィールド調査を行い、そこから得られた水質データを参考に、本装置の必要性を評価することを目的とした。

8月9日、13日、18日にタイ、バンコクの近郊にある13か所の養殖池を訪問し、水質調査を実施した。13か所の養殖池の種類分けを行い、以下の5種類に分類した。

- ① Fish Pond(aeration)
- ② Fish Pond(no aeration)
- ③ Shrimp Pond(aeration)
- ④ Fish and Shrimp Pond(aeration)
- ⑤ Fish and Shrimp Pond(no aeration)

また、水質調査対象項目としては DO、pH、ORP、水温、SS、VSS、COD<sub>Cr</sub> を測定した。また、水質調査を行ったエアレーションありの魚の養殖池(①)において一時的にエアレーションを停止させ、酸素消費速度の調査を行った。酸素消費速度の導出については2章にて後述する酸素移動速度の導出方法に基づいて算出した。以下の図 2 に示すものは調査を行った養殖池の1つである。



図 2. 調査対象池

## (2) 調査結果と考察

以下の表に調査結果を示す(表 1~5)。

魚は養殖池内の広範囲を泳ぐことによって、DO をうまく捕捉することができる(DO の豊富な場所へ泳いで移動できる)ため、一般的にはエアレーションは必要ないとされている。そこでエアレーションなしの魚の養殖池(②)の調査結果をみると、全体的に DO は低い値を示した。逆にエアレーションありの魚の養殖池(①)の調査結果では、DO は高い値を示した。これは、当然のことながらエアレーションを行うことで適切に酸素供給が行われたためであると考えられる。また、エアレーションありの魚の養殖池(①)の酸素消費速度は 28.32 (mg/s)であり、1 時間当たり 0.83(mg/L)の DO が消費されていることが明らかになった。したがって、養殖を適切に行うためには酸素供給装置が必要であり、上記の酸素要求レベルを満たす装置を開発する必要があることが判明した。

エビの養殖の場合は、エビが養殖池の底面にて生息する傾向にあるため(バナメイエビ以外のエビは底質が砂質の場合、砂に潜って生息するといわれている)、DO をうまく捕捉することができない。そのため、エビのみを養殖する養殖池ではエアレーション操作は必須となる。エアレーションありのエビの養殖池(③)の調査結果からは、安定した DO の値を得ることができた。

以上の結果より、エアレーションを行っていない養殖池では低 DO を示したため、酸素供給装置を設置することが必須である。また養殖事業主へのインタビューから、既存の水面攪拌式曝気装置によりエアレーションが行われている養殖池もより効率的な酸素供給装置を求めていることが判明したため、低ランニングコストであり、効率的な酸素供給が行える本装置が発展途上国であるタイにおいても受け入れられる可能性をこの調査から伺うことができた。

表 1. Fish Pond(aeration)(①)

Fish Pond(aeration)	DO[mg/L]	ph[-]	ORP[mV]	水温[°C]	SS[mg/L]	VSS[%]	COD[mg-C/L]	酸素消費速度[mg/L]
8/9	8.47	8.29	223.00	31.60	58.80	19.89	61.33	28.32
average	8.47	8.29	223.00	31.60	58.80	19.89	61.33	28.32

表 2. Fish Pond(no aeration)(②)

Fish Pond(no aeration)	DO[mg/L]	ph[-]	ORP[mV]	水温[°C]	SS[mg/L]	VSS[%]	COD[mg-C/L]
8/9①	2.25	8.76	240.00	30.20	69.25	57.65	146.67
					92.25	39.22	146.67
8/9②	4.45	9.26	224.00	30.70			
8/9③	9.22	9.16	221.00	31.90			
8/13①	1.51	8.03		30.10	17.50	23.85	24.00
	0.72			29.80			
8/13②	5.16	8.04		30.10	11.35	13.99	45.33
8/18①	1.55	7.73	229.00	30.60	12.25	91.76	26.67
	0.25			30.50			
	0.69			30.10			
8/18②	1.97	7.90	227.00	30.30	9.00	73.75	32.00
average	2.78	8.41	228.20	30.43	35.27	50.04	70.22

表 3. Shrimp Pond(aeration)(③)

Shrimp Pond(aeration)	DO[mg/L]	ph[-]	ORP[mV]	水温[°C]	SS[mg/L]	VSS[%]	COD[mg-C/L]
8/9	4.61	8.30	244.00	31.9	-6.6	3.03	
average	4.61	8.30	244.00	31.9	-6.6	3.03	

表 4. Fish and Shrimp Pond(aeration)(④)

Fish and Shrimp Pond(aeration)	DO[mg/L]	ph[-]	ORP[mV]	水温[°C]	SS[mg/L]	VSS[%]	COD[mg-C/L]
8/13③	17.58	9.12		34.10	62.50	67.56	146.67
	4.32			30.30			
8/13④	19.04	9.46		33.50	41.08	71.84	146.67
	4.32			30.20			
8/18③	12.30	9.81	152.00	34.30	31.00	73.89	101.33
average	11.51	9.46	152.00	32.48	44.86	71.10	131.56

表 5. Fish and Shrimp Pond(no aeration)(⑤)

Fish and Shrimp Pond(no aeration)	DO[mg/L]	ph[-]	ORP[mV]	水温[°C]	SS[mg/L]	VSS[%]	COD[mg-C/L]
8/9	6.52	8.50	216.00	30.60			
average	6.52	8.50	216.00	30.60			

### 3. 液膜式酸素供給装置の淡水・海水養殖池用への改良と養殖池への最適設置設計

#### (1) 養殖池向け液膜式酸素供給装置の開発

養殖池向けの液膜式酸素供給装置を開発するにあたって、自立型設置方式(図 3)の改良を行った。自立型設置方式は池の底面に自立させる形態であり、もともと水深の変化のほとんどない排水処理プロセス用に製作されたものである。しかしながら、養殖池、特にタイでは素掘りの養殖池が多いため、同じ養殖池の中でも水深が変化する。そこで、

養殖池の水深の変化に対応できる装置の開発が必要であった。そこで、本装置を自立型設置方式から水位変化に柔軟に対応できる(ペットボトル等のフロートを浮きとして、池中に装置を浮かせる形態)フロート型設置方式(図 4)へと改良を行った。



図 3. 自立型設置方式



図 4. フロート型設置方式

## (2) 養殖池を仮定したラボスケール実験

本液膜式酸素供給装置の配置形態の最適化と設置数の最適化を行う必要がある。その予備的検討として、養殖池を模した水槽(90cm×120cm×40cm)を用い、ラボスケール実験を実施した。実験方法として、まず亜硫酸ナトリウムを実験対象水に適量加えて貧酸素水を作り、次にそこに本装置 4 基を 1unit としたフレーム (図 5)を設置し、エアポンプを用いて曝気を行いながら DO の測定を行った。なお、図中のプレートとは、池の水の流れ方向をコントロールすることを目的に設置したプラスチック板である。評価方法としては、各配置形態の酸素移動効率  $E_A$  [%] を求めて比較した。酸素移動効率  $E_A$  [%] とは、単位時間あたりに装置によって処理対象水に送り込まれた酸素の総質量  $M_{O_2}$  [mg/min] で酸素移動速度  $N_{(20)}$  [mg/min] を除したものとして算出され、(1) 式のように示される。

$$E_A = \frac{N_{(20)}}{M_{O_2}} = \frac{K_L a_{(20)} \cdot DO_{s(20)} \cdot V}{\gamma \cdot O_{O_2} \cdot Q_g} \quad (1)$$

ここで、 $K_L a_{(20)}$  とは総括酸素移動容量係数であり、計測された DO 濃度の時系列データ ( $DO_i$ ,  $t_i$ ) を用いてグラフ上に  $t_i$  と  $\ln(DO_{s(t)} - DO_i)$  の関係をプロットし、その傾きを最小二乗法によって  $K_L a_{(t)}$  を求め、水温 20[°C] の値に補正したものである。本研究では水槽(または後述する養殖池)を深さ方向に 2 分割(養殖池においては 3 分割)し、それぞれの

層を完全混合と考えて  $K_{La(20)}$  を算出し、それらの平均値をその池の  $K_{La(20)}$  として定めた。また、 $DO_{S(20)}$  は水温 20[°C]における飽和溶存酸素濃度[mg/L]、 $V$  は処理対象水の体積[L]、 $\gamma$  は基準状態の空気比重量[mg/L]、 $O_{O_2}$  は空気中の酸素含有重量[mg-O<sub>2</sub>/mg-air]、 $Q_g$  は曝気空気量[L/min]である。ゆえに、酸素移動効率とは、処理対象水に送り込まれた酸素の総質量に占める処理対象水が吸収した酸素の質量の割合である。この値が大きいほど送り込まれた酸素の多くを溶解させていることを示す。

表 6 に結果を示す。まず、最適な設置形態について、同じ unit 数(1unit)の条件である配置(1-A、1-B、1-C、1-D)の  $E_A$  値から検証する。これらの配置のうち 1-C が最も  $E_A$  値が高かったことから、最適な設置形態としては 1-C のように装置を中央に直列に並べた配置であることがわかった。また、1-A(プレートなし)と 1-B(プレートあり)との  $E_A$  値の比較を行うと、1-B の方が高い値を示したことから、プレート設置により  $E_A$  値は向上することが確認できた。

次に、最適な unit 数について全ての設置形態の  $E_A$  値から検証する。その際、各設置形態における  $E_A$  の平均値を求め、グラフを作成した(図 6)。図 6 より、unit 数が減少するにつれて  $E_A$  値は向上していることがわかる。つまり、unit 数が少ない方が高い効率を示すと考えられる。

以上より得られた結果をもとに後述の 5 章にて、現地の養殖池を用いてより詳細な検討を行う。

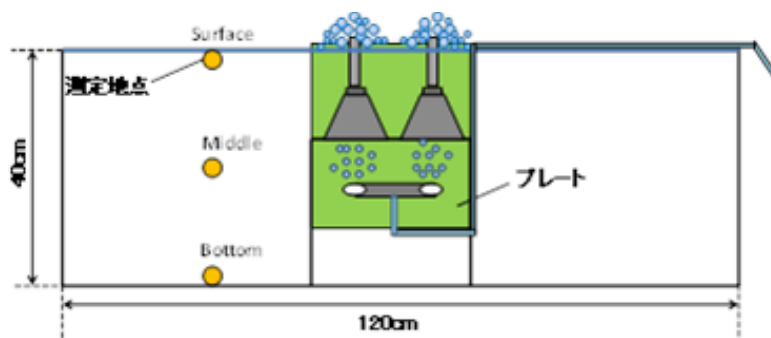


図 5. 実験水槽概略図

表 6. ラボ実験結果

設置形態	1-A	1-B	1-C	1-D	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	4-A
Set Model										
$E_A$ [%]	1.29	1.39	1.48	1.29	1.42	1.13	1.06	1.22	1.18	0.81

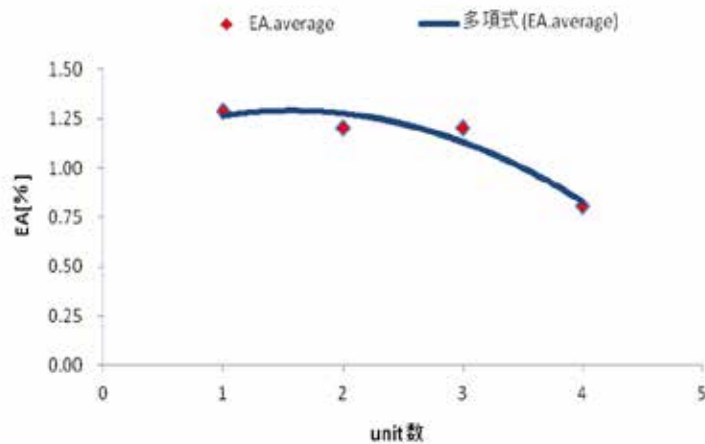


図 6. unit 数に対する酸素移動効率  $E_A$ [%]

#### 4. 鉄鋼スラグカートリッジの開発

##### (1) ラボスケールでの鉄鋼スラグによる pH 溶出試験

鉄鋼スラグの pH の溶出特性を把握するために 10L のバケツを用いたラボスケール実験を実施した。実験方法としては、試料水を入れた 10L のバケツに鉄鋼スラグを重量比で 1%になるように投入し、pH の経日変化を測定した。ここで、現地の養殖池では淡水もしくは塩分濃度 5~10ppt 程度の汽水を使用しているため、本実験では試料水として水道水(塩分濃度 0ppt)、海水(塩分濃度 30ppt)、水道水+海水(塩分濃度 10ppt)の 3 種類を用いることとした。

実験結果を図 7 に示す。図 7 より海水の量を増やすことで pH の上昇が抑制されることが明らかとなった。これは、海水は水道水と比べ多くのイオンが水中に溶け込んでいるため、その緩衝作用によるものと考えられる。また、エビ養殖池と同程度の塩分濃度である塩分濃度 10ppt の水を用いた実験では、養殖池の水質としては十分な pH 値が得られた。

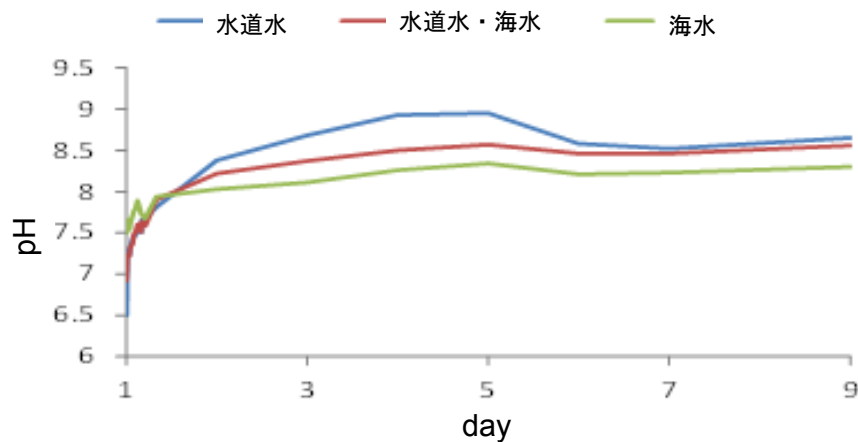


図 7. ラボスケールでの pH 溶出試験結果

## (2) 現地の環境水を用いた鉄鋼スラグによる pH 溶出試験

現地の環境水を用いて、鉄鋼スラグの pH の溶出特性を把握するためのラボスケール実験を実施した。実験方法としては、環境水を入れた 10L のバケツに鉄鋼スラグをそれぞれ重量比で 2%、1%、0.5%となるように投入し、pH の経日変化を測定した。結果を図 8 に示す。図 8 より、スラグ 2%を投入したバケツが最も高い pH を示したため、以下では重量比 2%のスラグを用いた実証試験池での pH 溶出試験を行うこととした。

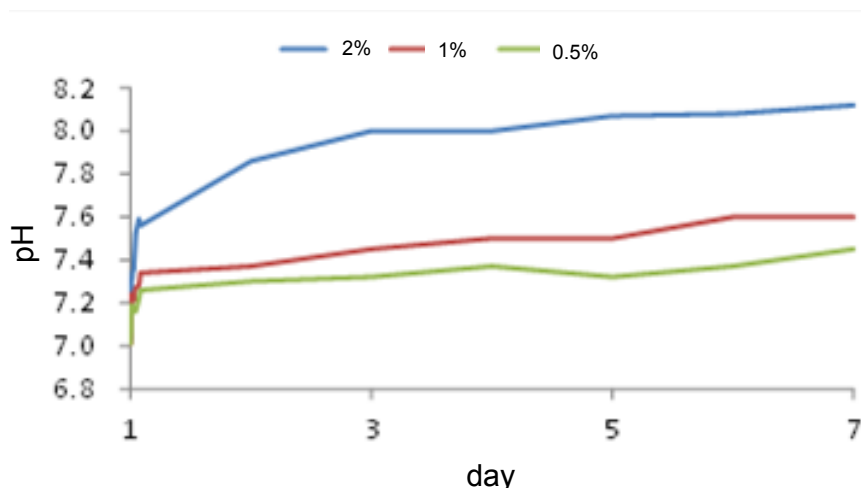


図 8. 環境水を用いたラボスケールでの pH 溶出試験結果

## (3) 現地の養殖池を用いた鉄鋼スラグによる pH 溶出試験

この実験はタイ東部のチャントブリー県の実際の養殖池(10m×10m×1.5m)を用いて行った。実験方法としては、約 50t の環境水の入った 2 つの養殖池の片方に鉄鋼スラグ 1t を投入(2%に相当)し、鉄鋼スラグを投入した池(スラグ池)と、鉄鋼スラグを投入していない池(ブランク池)の pH の経日変化を測定した。実験結果を図 9 に示す。図 9 より、スラグ池は 3～6 日目にかけて鉄鋼スラグを投入したことが要因と考えられる pH の上昇がみられたが、その後 pH は減少し低い値で推移した。pH が減少した原因としては、緩衝作用を持つイオンが多く入っていたことにより、スラグによるアルカリ溶出が妨げられたことが考えられる。ここで、現地の環境水を用いた pH 溶出実験においては、このような緩衝作用は観察されなかったことから、養殖池の底泥(養殖時に発生する糞尿や残餌、それらに起因する底泥)が緩衝作用となったと考えられる。そのため今後は、現地の養殖池水に近い水質を持つ水を選定し、その水を用いたラボ実験により鉄鋼スラグの最適投入量を定める必要がある。



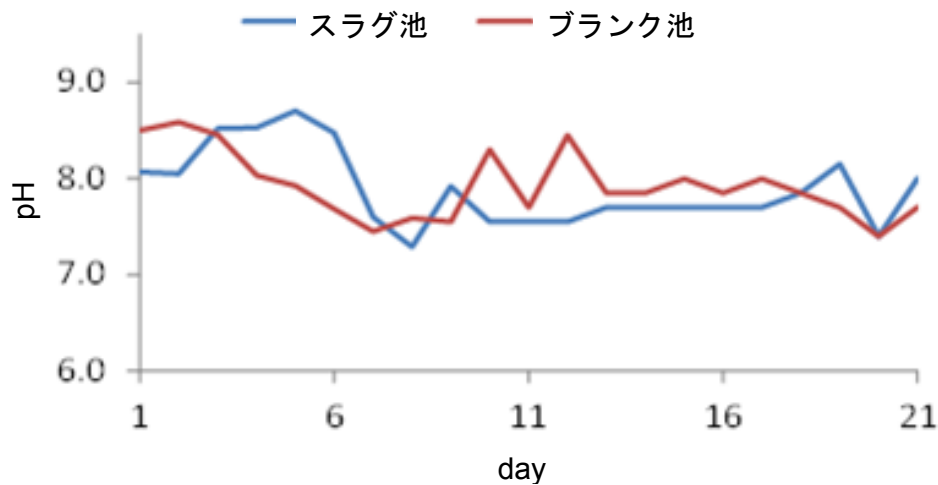


図 9. 実養殖池での pH 溶出試験結果

## 5. 本研究で発展させた液膜式酸素供給装置による養殖池での実証試験の実施

### (1) 最適設置形態の検討

#### a) 実験方法及び評価方法

3章の室内実験での基礎的検討結果を踏まえて、さらにそれを現地にて追実験することでデータの信頼性を向上させることを目的に、以下の現地実験を行った。すなわち、養殖池にどのように液膜式酸素供給装置を配置すれば、効率よく酸素を供給できるかを現地実験により検討した。この現地実験はタイ東部のチャンタブリー県の実地の養殖池(10m×10m×1.5m)を用いて実地で行った。実験装置の概略は図5と同様である。実験方法としては、まず亜硫酸ナトリウムを実験対象水に適量加えて貧酸素水を作り、次にそこに本装置4基を1unitとしたものを設置し、エアポンプを用いて曝気を行いながら水深10cm、75cm、150cmで溶存酸素メーター(HORIBA社、OM-51)を用いてDOの測定を行った。また、評価方法については前述の酸素移動効率(3章を参照)を用いた。

#### b) 実験結果及び考察


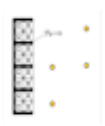


実験条件及び実験結果を表7、8に、Case2におけるDOの鉛直方向の分布を図10に示す。曝気量は1unitあたり100[L/min](本装置1基あたり25[L/min])とし、曝気水深はそれぞれの状況に合わせて30~50cmで設定した。また、図中のプレートは池の水のフローを一定化させることを目的に設置した。表8からわかるように、Case3が最も高い値を示した。この結果より、単体配置及び結合配置よりも直列配置の方がより大きな水の流れを作ることができ、酸素溶解効率の上昇に繋がると考えられる。また、Case4は4unitすべてを中心に設置しており、Case1、Case3よりも岸までの対角の距離が長くなるため、 $E_A$ が低下したと考えられる。さらに、Case2よりも $E_A$ が低くなったことから、全方向に水の流れを作るよりも一方向に大きな流れを作る方が効率的であること

が示唆された。よって、最適な設置形態については Case3 のように装置を池中央に直列に並べた配置であることがわかった。なお、この結果は 2 章と同様であり、2 章の結果が再確認された。また図 10 から、Case2 の鉛直方向、水平方向において濃度分布が生じていなかったことがわかる。その他のケースにおいても濃度分布は生じておらず、本装置により池全体に均等に酸素を供給できたことが確認された。

表 7. 最適設置形態検討実験の実験条件

設置形態	Case1	Case2	Case3	Case4
曝気量[L/min]	400	400	400	400
曝気水深[cm]	30~50			
水温[°C]	32.2	31.2	33.4	30.5
電気量[W]	240	240	240	240
塩分濃度[ppt]		11	10	10

表 8. 最適設置形態検討実験の結果

設置形態	Case1	Case2	Case3	Case4
Set Model				
$E_A$ [%]	3.03	2.22	4.30	1.72

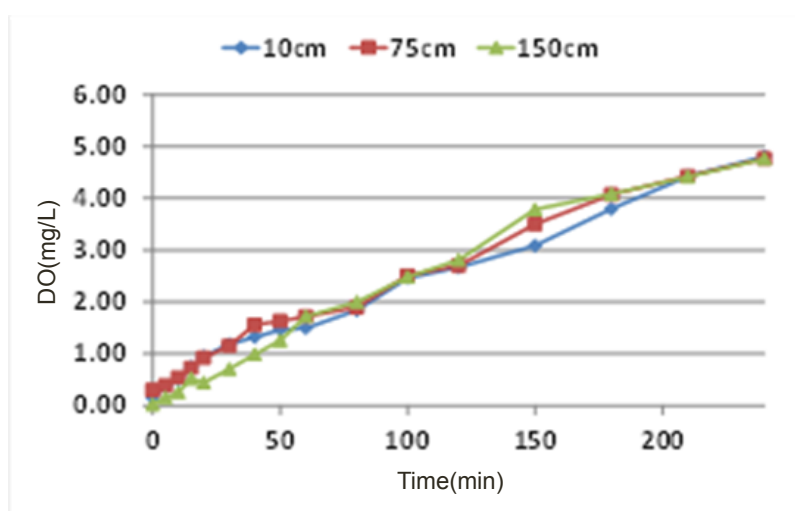


図 10. Case2 における DO の鉛直分布

## (2) 最適設置(unit)数の検討

### a) 実験方法及び評価方法

ここでも 3 章の結果を踏まえて、養殖池に最も効率よく酸素を供給できる設置数(以下 unit 数)の検討を行った。用いる実験池及び実験方法は(1)の現地実験と同様である。評価方法については酸素移動速度と酸素移動効率(3章を参照)を用いて評価を行った。

### b) 実験結果及び考察

実験条件及び結果を表 9、10 に示す。検討を行った unit 数は 1unit~4unit である。表 9 に示すように case5~7 と case8、9 とでは塩分濃度が異なる。そのため、このままでは 1unit~4unit の結果を直接比較して評価することは難しい。そこで 2unit 時の Case5 と Case9 とを同様の結果とみなし、修正を行った。Case5 と Case9 の結果を比較すると  $N_{(20)}$  及び  $E_A$  はそれぞれ 1.33 倍、1.45 倍 Case5 が高いことがわかる。よって Case8 の  $N_{(20)}$  及び  $E_A$  をそれぞれ 1.33 倍、1.45 倍して修正した値を Case8-A とし示す。Case8-A と Case5~7 の  $N_{(20)}$  及び  $E_A$  の値をまとめたものを図 11 に示す。

表 9. 最適設置数検討実験の実験条件

設置形態	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9	Case8-A
unit数	2unit	3unit	4unit	1unit	2unit	1unit
曝気量[L/min]	200	300	400	100	200	100
水温[°C]	27.9	27.4	29.7	33.1	31.7	33.1
電気量[W]	120	180	240	60	120	60
塩分濃度[ppt]	5			11		5

表 10. 最適設置数検討実験の結果

Result	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9	Case8-A
unit数	2unit	3unit	4unit	1unit	2unit	1unit
Set model						
$N_x$ [mg/s]	30.13	38.24	38.28	11.70	22.66	15.56
$E_A$ [%]	3.08	2.61	1.95	2.18	2.12	3.17

ここでは、液膜式酸素供給装置の特徴である省エネルギー性を最大限に活かすために、最適 unit 数を判断する際には酸素移動効率に重点を置いた。しかしながら、酸素移動速度が低すぎれば養殖池に酸素を供給することが困難になるため、酸素移動速度の下限を  $N_{(20)}=28.1$ [mg/min]と設定した。これは実養殖池の酸素消費速度である(1章の現地調

査結果にて前述)。この下限値を考慮した最大の酸素移動動力効率の unit 数は図 11 より 2unit (池の表面積 100m<sup>2</sup>に対して) であることが明らかとなった。なお、この最適 unit 数とは養殖池に液膜式酸素供給装置を設置するときの 1 つの目安であり、実際にはその養殖池の必要とする酸素需要量により unit 数を調整する必要がある。

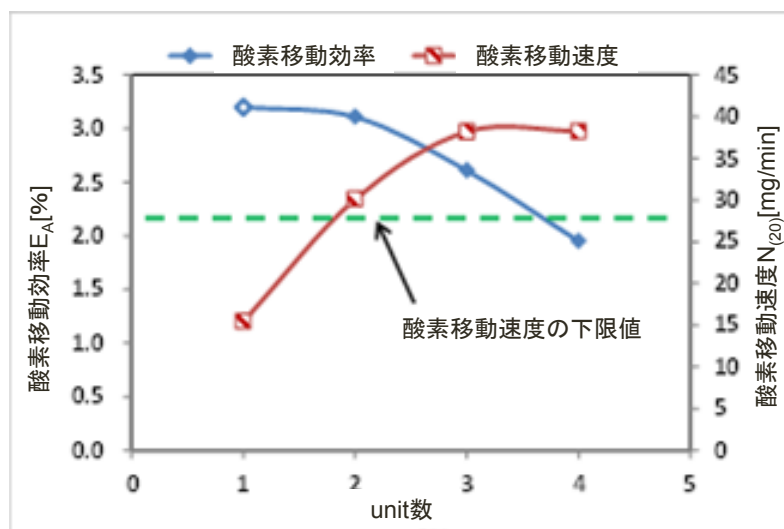


図 11. 酸素移動速度及び酸素移動効率からの最適 unit 数の検討

## 6. 液膜式酸素供給装置と従来式とのコスト比較

### (1) 実験方法及び評価方法

これまでの実験で、液膜式酸素供給装置の最適配置及び最適 unit 数の把握ができたため、ここでは従来型の水面攪拌式曝気装置との消費エネルギー比較を行い、本装置がどの程度の省エネルギー効果を持つのかを検討する。水面攪拌式曝気装置を設置した実証試験池の様子を図 12 に示す。

実験方法については、4 章と同様であり、水面攪拌式曝気装置も、液膜式酸素供給装置と同様に亜硫酸ナトリウムを実験対象水に適量加えて貧酸素水を作り、水面を攪拌しながら曝気を行い水深 10cm、75cm、150cm にて溶存酸素計(HORIBA 社、OM-51)を用いて DO の測定を行った。また、評価指標としては消費エネルギーの比較であるので、酸素移動動力効率を用いることとした。酸素移動動力効率  $E_p$ [g/W]とは、(2)式にあるように酸素移動速度  $N_{(20)}$ を稼働に必要な動力、仕事率  $P_{min}$ [W]で除し、単位変換して求められる。

$$E_p = \frac{N_{(20)}}{P_{min}} [mg/min/W] = \frac{60}{1000} \cdot \frac{N_{(20)}}{P_{min}} \left[ \frac{g}{Wh} \right] \quad (2)$$

すなわち、酸素移動動力効率  $E_p$ [g/W]とは単位動力(1[Wh])当たりの酸素溶解量を表し、 $E_p$ [g/W] が大きいほど少ない動力で多くの酸素を溶解させることができ、ゆえに省エ

エネルギーであることを示す。

## (2) 実験結果及び考察

実験結果を表 11 に示す。液膜式酸素供給装置は最適 unit 数の 2unit(3 章参照)のときの酸素移動動力効率であり、水面攪拌式曝気装置はパドルが 3 つの場合の酸素移動動力効率である。双方を比較すると、液膜式酸素供給装置の方が水面攪拌式曝気装置より約 1.6 倍高く、その省エネルギー効果を確認することができた。ゆえに、新規酸素供給装置として液膜式酸素供給装置を確立することができれば、本研究の目的である養殖池の過剰養殖の問題改善のみにとどまらず、発展途上国の二酸化炭素排出量の削減にも貢献できる可能性が見えてきた。

表 11. 消費エネルギー比較実験の結果

装置タイプ	液膜式	水面攪拌式
設置形態	2unit	
$E_p$ [g/Wh]	0.90	0.55



図 12. 水面攪拌式曝気装置を設置した実証試験池

## 7. 液膜式酸素供給装置による実養殖池での実証試験

前章までより、液膜式酸素供給装置の理想設置モデル及び省エネルギー性能が明らかとなり、養殖池に適用できる可能性が見出されてきた。よって、本章では実養殖池への適用を図りその影響評価実験を行うことで、液膜式酸素供給装置を養殖池への新規酸素供給装置として適用できることを明らかにしていく。

### (1) 実験方法及び実験条件

実験条件を表 12 に示す。実験方法としてまず現地の養殖池(縦 10m、横 10m、深さ

1.5m)に液膜式酸素供給装置と水面攪拌式曝気装置を設置した。水面攪拌式曝気装置は4パドル式タイプを1基導入し、液膜式酸素供給装置は改良型を6~8基(1基あたりの曝気量100L/min)導入した。そして各池に生物学的評価を行う養殖対象物である稚エビを7,500匹放流した。養殖密度は、タイの養殖産業等で推奨されている標準的な養殖密度である。運転時間が16~24時間と幅がある理由としては、給餌後2時間程度は装置を止めエビが食事をするために時間を作るからであり(パドル装置が稼動している状態では池の流速が速すぎるため、エビが餌を食べることができない)、一日の給餌回数は天候により変化する(降雨などにより水温の低い日が続くとエビの活動が鈍るため多くの餌を必要としない)ためこのような表記とした。なお、養殖期間は約3か月間とした。

測定項目は①DO:5時30分,15時の測定サイクルと8時,12時の測定サイクル、10時と17時の測定サイクルを繰り返し、水平方向に2点、深さ方向に2点(水面付近と底面付近)の計4地点を各池で測定した。また、実験終了日前日の夜に酸素供給装置を停止させ、各池の酸素消費速度を測定した。②水質及びその他の項目: NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, 塩分濃度, 水温, pH, SS, Chl-a, アルカリ度, 透明度, マグネシウム濃度, カルシウム濃度を測定した。③養殖対象物の体重・体長: 実験期間中(2回)、実験終了時に各池で稚エビ50匹をサンプリングし、平均体重・平均体長を測定し、実験終了時に各池のエビの収量及び生存数を計測しエビの生存率を算出した。④各装置に積算電力計を設置し消費電力を測定した。

表 12. 実験条件

	パドル装置	液膜装置
実験池容積(m <sup>3</sup> )	90	
装置個数	1	6~8
運転時間	16~24	
バナメイエビ飼育数(匹)	7500	
曝気量(L/min)	-	600~800
消費電力量(kW-h)	1.5	0.6~0.8

## (2) 実験結果及び考察

### a) DOの測定結果及び考察

各池のDOの経日変化を図13に示す。これは得られたDOデータを1日ごとに平均し、その経日変化として示したものである。これらのグラフよりどちらの池も稚エビの成長に伴い若干ではあるがDOが減少傾向であった。液膜池に関しては、常時6基を稼動させており、DOの不足に備え予備の液膜装置を2基用意させていたが稼動させなかった。パドル池に優位性が見られた。また図13より、パドル池にのみ飽和溶存酸素力を大きく超えた測定値をいくつか計測したが、これは光合成による酸素供給であると考えられる。図14に各池におけるpHの経日変化を、図15にChl-aの経日変化を示す。

これらのグラフより、各池において植物プランクトン量の指標とされる Chl-a の値に優位な差がなく、pH の値が増加傾向にあったことから、植物プランクトンによる光合成は行われていたことが示唆された。しかし、液膜池では水温上昇を懸念し、実験開始から 5 日目に日除けのネットを設置したため光が遮断されてしまい、パドル池のような DO 増加がおきなかったと考えられる。

また、光合成による DO 増加が連日記録されなかった理由としては、これは測定の時間と給餌の時間の関係によるものだと考えられる。本養殖試験では給餌後 2 時間は装置の稼働を止め、エビの食事の時間を設けているため、その間に光合成で生成した酸素は大気中に放出されず水中に蓄積されていく(普段はパドル装置の強い攪拌により、光合成で生成した DO は大気中に放出されてしまう)。光合成の発生条件がよく水中に DO が十分溶解している状態で測定した結果、飽和量を超える DO 値を測定したと考えられる。底層部の DO 値が表層部ほど高くない理由としても、装置を止めていることにより上下混合が行われないこと、底層部では光エネルギーの供給量が少ないことなどが考えられる。

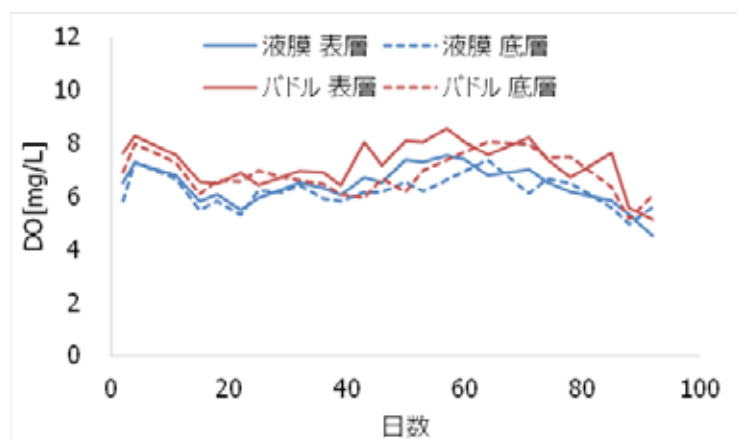


図 13. DO の経日変化

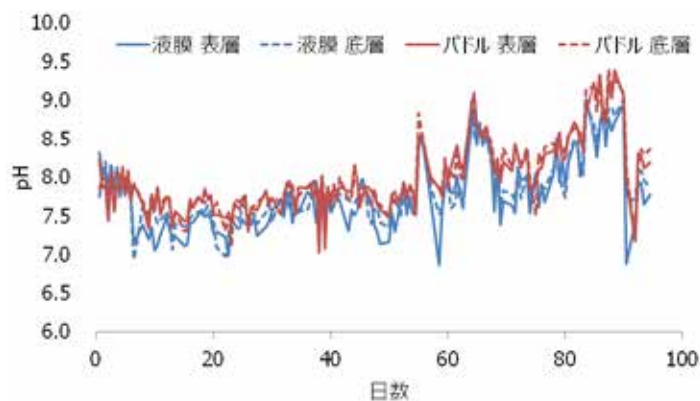


図 14. pH 測定結果

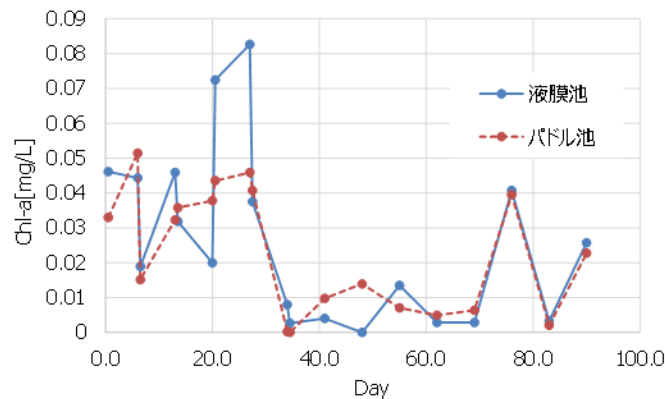


図 15. Chl-a 測定結果

b) 水質測定結果及び考察

$\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{I-N}$ (無機態窒素)、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、SS、Mg イオン、Ca イオン、アルカリ度、塩分濃度、濁度の測定結果を図 16,17,18,19,20 に示す。

図 16 より、生物に最も影響を与えると考えられるアンモニア態窒素のピークは各池で 20~30 日付近にみられ、その後減少傾向であった。アンモニア態窒素の蓄積が起きなかった原因は後述する 28~30 日目に発生が確認されたウイルス性の病気によるエビの大量死が考えられる。これによりエビの生存数が激減したためアンモニア態窒素の生成量が減少し、アンモニア酸化細菌による硝化速度が勝ったため蓄積が起きなかったと考えられる。またアンモニア態窒素濃度の結果、pH と温度の関係より毒性アンモニア濃度に換算したところ、最大値で  $\text{NH}_3=0.06\text{mg/L}$  であった。これは、GUILLERM ら<sup>1)</sup>による報告されたバナメイエビの毒性アンモニア 24 時間暴露時の半数致死濃度  $\text{LC50}=1.12\text{mg/L}$  よりも低く、エビの生存に影響を与えた可能性は低いと考えられる。

図 16~18 より、その他の富栄養化関連物質においても各池に置いて蓄積傾向は見られず、エビの生存数が 20~30 日付近で激減した可能性はこれらの結果からも伺えた。

図 17~19 より、マグネシウム、カルシウム、アルカリ度については各池でバナメイエビ養殖における推奨濃度レベル(マグネシウム濃度 200mg/L 以上、カルシウム濃度 100mg/L 以上、アルカリ度 80mg/L 以上)をほぼ満たしていた。

図 20 より、塩分濃度は各池で減少傾向にあった。これは雨水が養殖池に流入したことにより、塩分濃度が薄まっていったためだと考えられる。



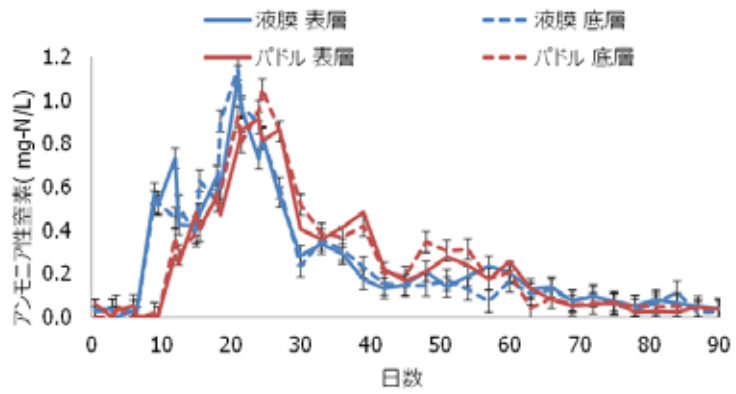


図 16. アンモニア性窒素の測定結果

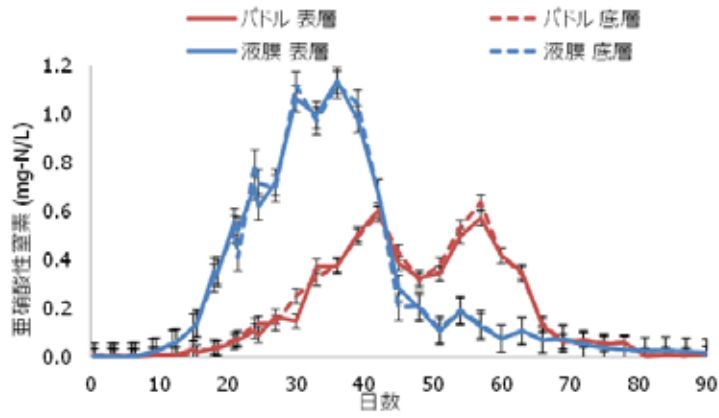


図 17. 亜硝酸性窒素の測定結果

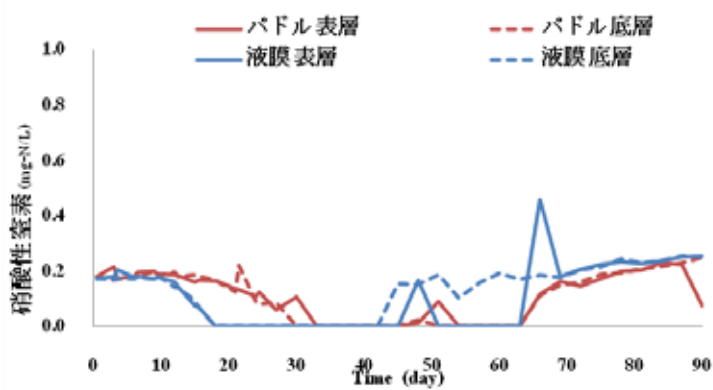


図 18. 硝酸性窒素の測定結果

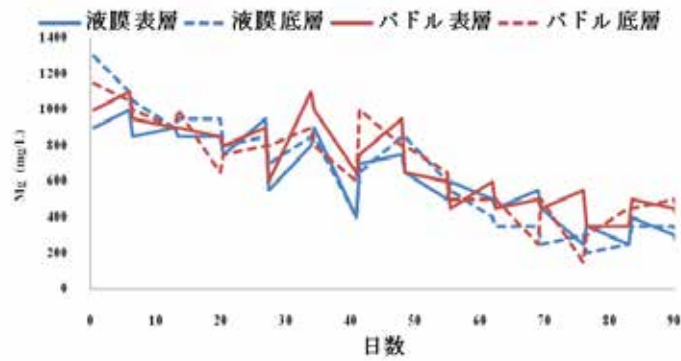


図 19. マグネシウムイオンの測定結果

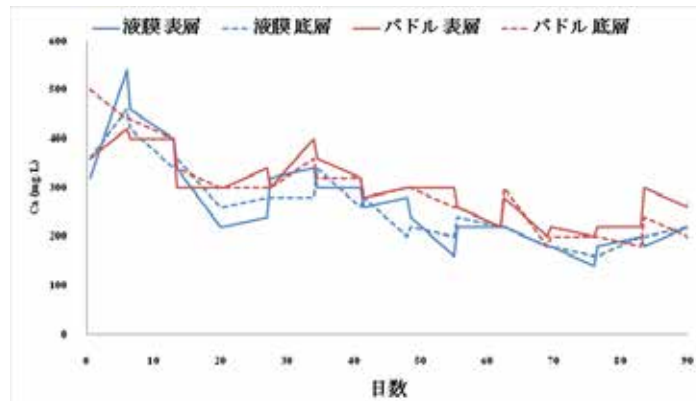


図 20. カルシウムイオンの測定結果

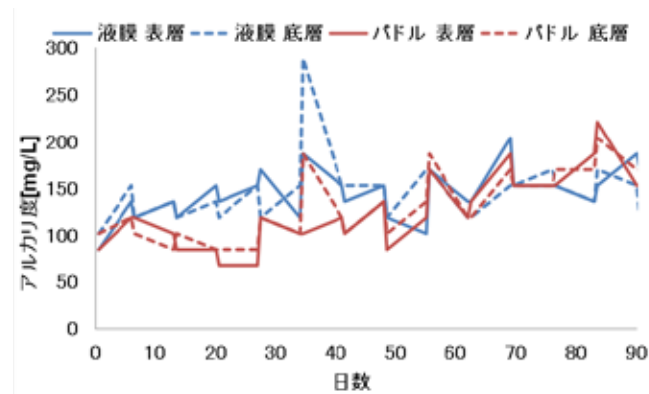


図 21. アルカリ度の測定結果

c) 生物評価の結果と考察

養殖実験最終日に測定したエビの生存数・生存率及び収穫量の結果を表 13 に、30 日毎の平均体重・平均体長の測定結果を図 22,23 に示す。表 13 より生存率は液膜池で 11%、パドル池で 4.5%と極めて低い結果となった(一般的な生存率は 50~60%程度)。この生存

率低下の原因として、各池の水質に特異的な差や毒性がみられなかったこと、養殖実験開始から 28~30 日にかけて、エビの生育確認用のネットにエビの死骸が乗っていたこと、28~30 日にかけてのエビの死が「NH<sub>4</sub>-N の減少が始まった時期(図 16 参照)」、「養殖池で流行しているウイルス性の病気(通称:EMS) の一般的な発生時期(養殖開始から 1 か月前後)」とも重なることなどから、EMS の流行による大量死が起きたことが示唆される。生存率の低下が EMS によるものと仮定すると、流速の速いパドル池では、EMS により遊泳障害を起こしたエビの生育環境には適さないため、生存率の低下に繋がったと考えられる。

表 13. 生存数・生存率及び収穫量の測定結果

	収穫量 [kg/pond]	生存数	生存率[%]
液膜池	6.7	827	11.0
パドル池	4.0	338	4.5

また図 22,23 より、平均体重・平均体長の測定結果は共にパドル池に優位性が見られた。各池において水質悪化や DO 低下などみられず、水質に大きな差が無かったにも関わらず成長には顕著な差が現れた。この原因の特定には至らなかったが、以下の 3 つの可能性が考えられる。

- 1) ウイルス性の病気(EMS)による影響。EMS は発育不良を引き起こす病気でもあるため、液膜池のエビに何らかの成長阻害を与えたのではないかと考えられる。しかしパドル池においては、生存数は少なかったものの EMS による影響も断定するには至らなかった。
- 2) 各装置の流速の違いによる影響。エビをきわめて水質の穏やかな環境で飼育すると運動不足により体調不良になるという説があるが、定量化等はされていない。
- 3) 溶存酸素量の違いによる影響。オゾン発生器を殺菌装置として使用する場合、副次的に溶存酸素量が増えるため魚の成長が早まり、通常よりも巨大化したという報告があることなどから、溶存酸素量は生物の成長に大きな影響を与える重要な要素であるといえる。日除けネットの設置によりすべての時間帯で光合成による酸素供給は起きず、DO 値は非常に安定的であった。このことから、溶存酸素量の違いによる影響が最有力ではあるが、さまざまな要素が複合的に影響していると考えられるため、断定には至らなかった。

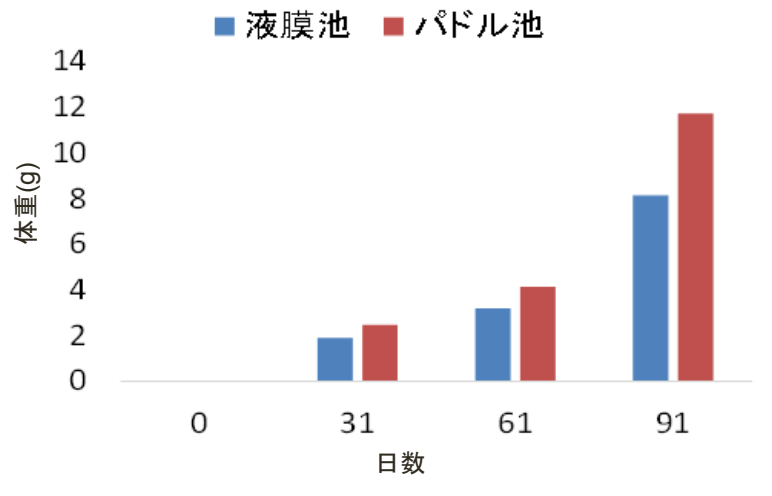


図 22. 平均体重測定結果

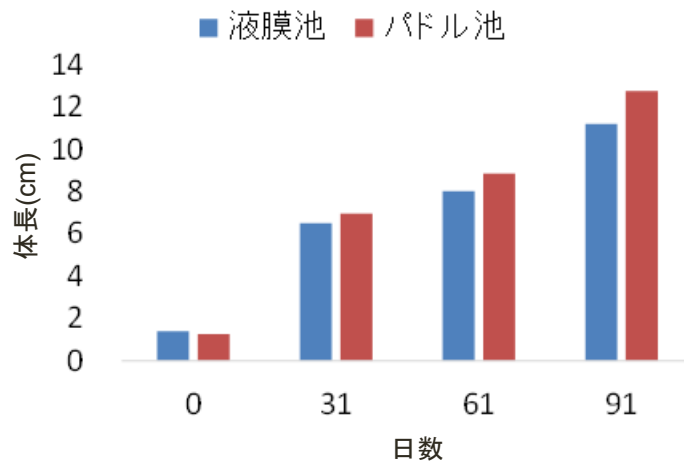


図 23. 平均体長測定結果

## 8. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 現地調査の結果から、養殖池、特にエビの養殖池においては酸素供給装置の必要性が明らかとなり、また本装置のニーズが明らかになった。
- (2) 本液膜式酸素供給装置をより実用的なさまざまな推進に対応できるフロート型設置方式に改良した。
- (3) 鉄鋼スラグの投入量は養殖池の水量の2%であることを把握した。
- (4) 本液膜式酸素供給装置の最適配置形態は、養殖池の中央に直列に並べた配置であり、最適配置数は養殖池の表面積 100m<sup>2</sup>に対して 2unit（液膜装置 8 基）であることが明らかとなった。

- (5) 本液膜式酸素供給装置は従来の水面攪拌式曝気装置より約 1.6 倍省エネルギー効果が高いことが明らかとなった。
- (6) 養殖試験の結果、液膜装置は 3 か月の養殖で 40%の電力を削減することができ、100m<sup>2</sup>のエビ養殖池あたり 6 基の液膜装置を導入することで十分な酸素供給が行えることが明らかになった。一方で、成長率に関しては、パドル池に優位性が見られた。この原因の特定には至らなかったが、ウイルス性の病気(EMS)の発生した今回の養殖試験においては生存率の低下により水質等の評価も困難であったため、液膜装置の正当な生物影響評価を行うには再び養殖試験を行う必要があるといえる。

### 謝辞

本研究は JFE21 世紀財団技術研究助成より援助を受けた。ここに感謝の意を表する。

### 参考文献

- 1) Charlor Limsuwan : THE EFFECTS OF TEMPERATURE ON THE FEEDING BEHAVIOR OF *Litopenaeus vannamei* : *Aquaculture Business Research Center Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Thailand* 2009 pp. 337-345