

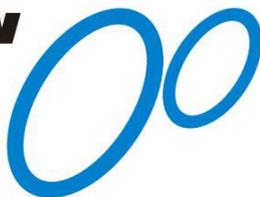
平成 2 3 年度

藻類による高効率CO<sub>2</sub>固定プラントに関する  
実証研究報告書

平成 2 4 年 3 月

一般財団法人エンジニアリング協会

**KEIRIN**



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



## 序

本報告書は、財団法人JKAから機械工業振興資金の補助を受け、一般財団法人 エンジニアリング協会が実施した平成23年度「藻類による高効率CO<sub>2</sub>固定プラントに関する実証研究」の成果を取りまとめたものであります。

地球温暖化対策として、再生可能エネルギーの創出・普及が重要な位置を占めていますが、バイオマスエネルギーはそのひとつとして期待されています。

本実証研究ではバイオマスエネルギーについて、従来研究の主対象であった陸上植物に対し、極めて成長率の高い海洋性植物の藻類に着目し、これを少ない所要エネルギー、かつ低コストで大量に生産することを目的として、実験プラントを用いて最適な運用・運転条件を求め、実現可能性を実証しようとするものであります。

なお、本実証研究は、平成22年度財団法人機械システム振興協会からの受託事業「非着床型藻類バイオマスによるCO<sub>2</sub>高効率固定プラントの開発に関するフィージビリティスタディ」を発展させたものです。

当協会は、創立以来、社会・経済の変化の様相を見定めながら、エンジニアリング及びエンジニアリング産業の新しい活躍の可能性を求め、地球環境の保全、資源エネルギーの有効利用、社会資本の充実、地域の活性化等幅広く社会開発型システム関連のテーマを選定し、産学連携のもと、当協会の研究開発企画委員会に技術テーマ別研究会等を設置して、調査研究を推進しております。

本事業は、この研究開発企画委員会の活動の一環として、学識経験者及び関連の専門家からなる研究会（委員長：行本正雄中部大学教授）を編成し、実証研究を実施したものであります。

この事業にご協力いただいた関係各位に対し心から謝意を表するとともに、本報告書が各方面で有効に活用されることを切望する次第です。

平成24年3月

一般財団法人エンジニアリング協会  
理事長 久保田 隆



## 委員名簿

### 藻類CO<sub>2</sub>固定プラント研究会

委員長	中部大学 工学部 機械工学科 教授	行本 正雄
委員	高知大学 総合研究センター 海洋生物研究教育施設 准教授	平岡 雅規
委員	芙蓉海洋開発株式会社 取締役技術部長	大澤 宏至
委員	株式会社竹中工務店 技術研究所先端技術研究部 エコエンジニアリング部門マネージャー	柳橋 邦生
委員	JFEメカニカル株式会社 参与 技術総括部長	侍 留 誠
オブザーバー	四万十市 観光課 課長補佐 兼四万十川対策係長	桑原 晶彦
オブザーバー	JFEメカニカル株式会社 設計部兼開発営業部 部長	溝田 久和
研究員	一般財団法人エンジニアリング協会 研究理事	朝倉 紘治
研究員	一般財団法人エンジニアリング協会 客員研究員	上田 貴夫
事務局	一般財団法人エンジニアリング協会 技術部長	大野 宣夫
事務局	一般財団法人エンジニアリング協会 技術部 研究主幹	石瀬 俊明



## 目 次

序

第 1 章	実証研究の背景と目的	-----1
第 2 章	大型培養槽の構造	-----2
2.1	基本仕様	
2.2	製作、現地据付	
2.3	設備の改良	
第 3 章	大型培養槽の性能評価実験	-----9
3.1	試験項目と計測方法	
3.2	光量評価実験	
3.3	水深の影響評価試験	
3.4	設備消費電力量の評価実験	
3.5	CO <sub>2</sub> の溶解方法と溶解試験結果	
3.6	藻類の回収方法に関する検討	
第 4 章	藻類培養試験（1 t、15 t 水槽を対象とした試験）	-----38
4.1	対象とする藻類とその作製方法	
4.2	これまでに得られている藻類の増殖特性	
4.3	単年齢培養試験、混合密度一定試験	
4.4	CO <sub>2</sub> 吹込み培養実験	
4.5	大型水槽（15 t 水槽）の培養試験	
4.6	照射板を使った大型水槽（15 t 水槽）の培養試験	
4.7	まとめと今後の課題	
第 5 章	試験結果のまとめと今後の課題	-----51
5.1	大型培養槽の性能と課題	
5.2	藻類の成長率評価	
5.3	目標成長率を確保するための培養方法の提案	
第 6 章	藻類バイオマスの事業性	-----58
6.1	社会的背景	
6.2	対象とすべきシステム構成	
6.3	事業性評価の考え方	
第 7 章	藻類培養技術の最新動向と今後の展望	-----63
7.1	大型藻類および微細藻類を対象とした光量子の導入法に関する調査	
7.2	今後の展望	

## 第1章 実証研究の背景と目的

地球温暖化対策として、カーボンニュートラルな新エネルギーの創出・普及が重要な位置を占めているが、バイオマスエネルギーはその1項目として期待されている。

本研究は従来のバイオマス研究の主対象であった陸上植物に対し、極めて成長率の高い海洋性植物の藻類に着目し、これを少ない所要エネルギー、低コストで大量に生産することを目的とし、大型試験プラントを用いて、最適な運用・運転条件を求め、実現可能性を実証しようとするものである。

本研究は、平成22年度に財団法人エンジニアリング振興協会が、財団法人機械システム振興協会から委託を受けて実施した「非着床型藻類バイオマスによるCO<sub>2</sub>高効率固定プラントの開発に関するフィージビリティスタディの初年度の成果を引き継いで実証試験を実施するもの」であり、以下の成果が期待される。

- ・生物によるCO<sub>2</sub>固定手法に工業化技術を採用し、大量かつ安定的な固定システムを確保すること。
- ・大量に製造される藻類バイオマスを、燃料、飼料・食品、薬品等の低コスト原材料として有効活用できること。

藻類を増殖させ、バイオ燃料として利用する技術は、米国をはじめ様々な国で取り込まれている。しかし、その殆どは、高増殖率の微細藻類を用いた方法であり、生産した藻類の分離回収には、フィルタープレスや高速遠心分離等のエネルギーコストの高い方法をとらざるを得ない。一方、アオノリを代表とする大型藻類は、分離・回収に殆どエネルギーを必要としない簡単な方法で回収できる利点を持つに関わらず、あまり注目されていない状況にある。

本実証試験では、平成22年度に製作した藻類培養プラントを用いて、課題である藻類増殖率の向上を図るための培養環境に焦点を当てて、装置の改善、試験方法の検討をすすめる、改善案を主体にした、実証試験を実施することにより、CO<sub>2</sub>吸収固定・有効利用技術の実用化を目指す。

主な実施項目は以下の通りである。

- (1) 大型試験装置の培養環境の改良方法の検討
  - ・装置の水深、置かれた環境及び光量子量の測定値に基づいた培養環境の評価
  - ・光量子量の改善方法の検証（ミラー設置、水深改善等の検討）
  - ・その他培養環境の影響評価
- (2) 培養試験の実施
  - ・単年齢種の培養試験、混合培養試験、密度一定試験等、複数のパラメーターを組み合わせた培養試験を実施し、目標の培養速度が達成できるかどうか検証する。同時に消費電力量を計測し、藻類培養のエネルギー原単位を把握する。
- (3) 結果の評価と、事業化に向けた検討

## 第2章 大型培養槽の構造

### 2.1 基本仕様

設備は、地下海水を取水し一旦、タンクに蓄える給水装置と、藻類を培養する U 字培養槽（培養槽）、培養水を循環させ CO<sub>2</sub> の溶解とエアバブリングを行う循環装置より構成した。培養槽内の攪拌は循環水の流下水を利用し、攪拌効率の向上と省エネを図るため培養槽底面を半円形とし、槽横断面を U 字形状とした。また、攪拌停滞部の攪拌を補うため、エアレーション機能を付加させた。

なお、藻回収は手作業で行うものとし、将来構想として機械化の検討案を後述の第 3.6 節に示した。設備仕様を下記に、設備構造と配管系統図を図 2.1-1、図 2.1-2 に示す。

#### ① 給水装置/ 四万十市殿範囲

給水タンク：1m<sup>3</sup>、樹脂製

給水ポンプ：28L/min×10m、φ25、0.4kw、1台

水質：地下海水

#### ② U 字培養槽（培養槽）

サイズ：幅 3m×高さ 2.5m×長さ 2.3m（底面 1.5m 半径×垂直部高さ 1m）

U 字形状の培養槽、水面部面積：7m<sup>2</sup>

培養槽深さ：1.5m、2m、2.5m の 3 段階に調整可能

容量：Max 15m<sup>3</sup>

構造：鋼板溶接構造、外面断熱材付

覗き窓：φ200×4ヶ所、上部周囲にデッキ、仮設足場付

槽内攪拌：循環配管からの流下水、エアレーション

CO<sub>2</sub> 溶解：バブリング

#### ③ 循環装置

貯水槽：幅 1.5m×高さ 1m×長さ 2.3m、容量 3m<sup>3</sup>、

鋼板溶接構造、外面断熱材付

循環ポンプ：32L/min×25m×2台、φ25、0.4kw/台

エアレーション：吹込管 φ20×1850mmL（気孔 1.2mm）

ブローア－：200L/min×20kPa×0.215kw、1台

#### ④ その他

水質調整：栄養剤、pH調整剤を U 字培養槽内に直接投入

藻回収：手作業

大型培養槽の仕様	
サイズ	幅(半径): 3m (R1.5m) 垂直部高さ: 1m 長さ: 2.3m
容量	水面高 2.5m: 15m <sup>3</sup> (Max) 水面高 1.5m: 8m <sup>3</sup> (Min)
面積	7m <sup>2</sup> (槽水面部)

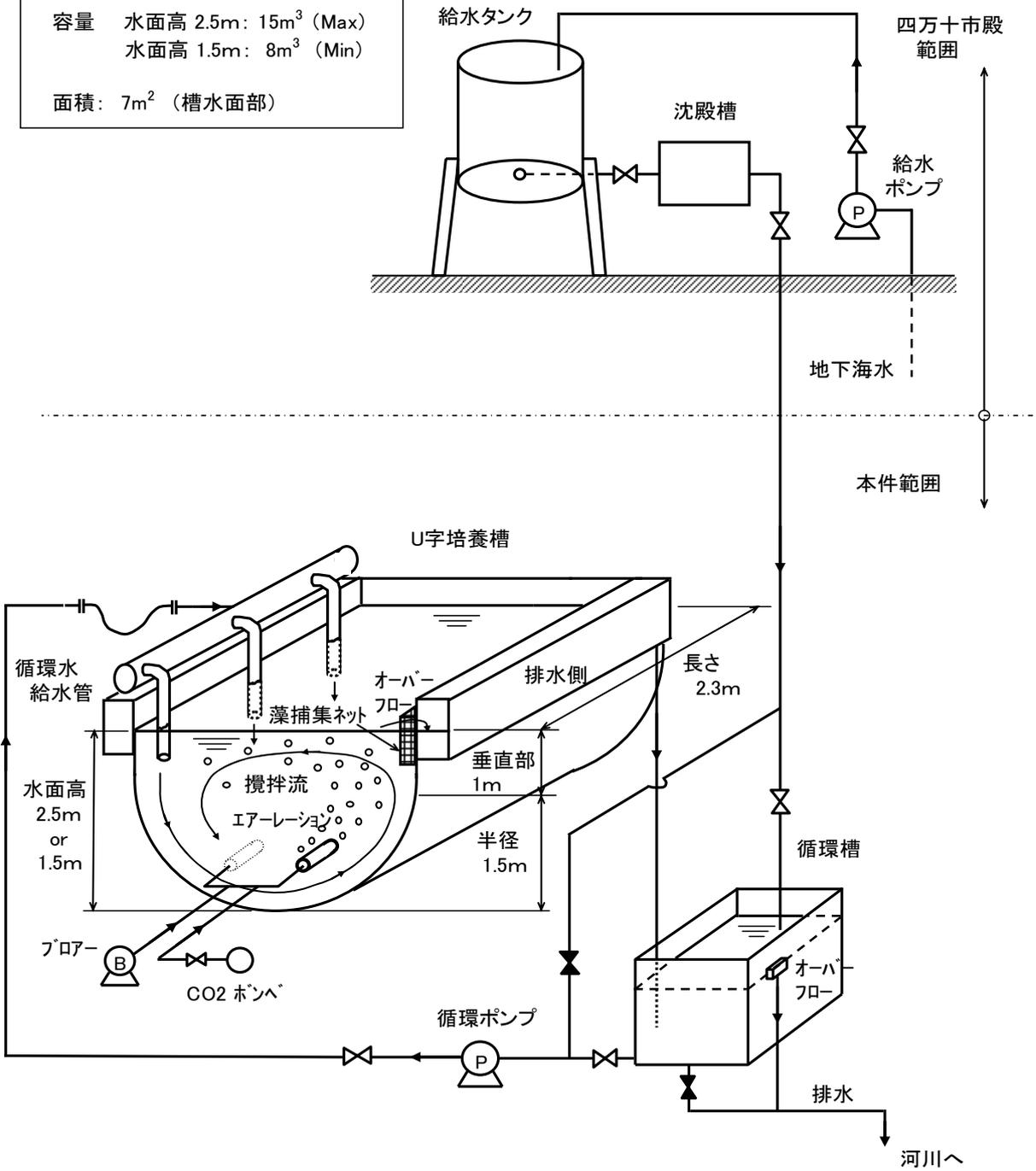


図 2.1-1 大型培養槽の構造 (当初)

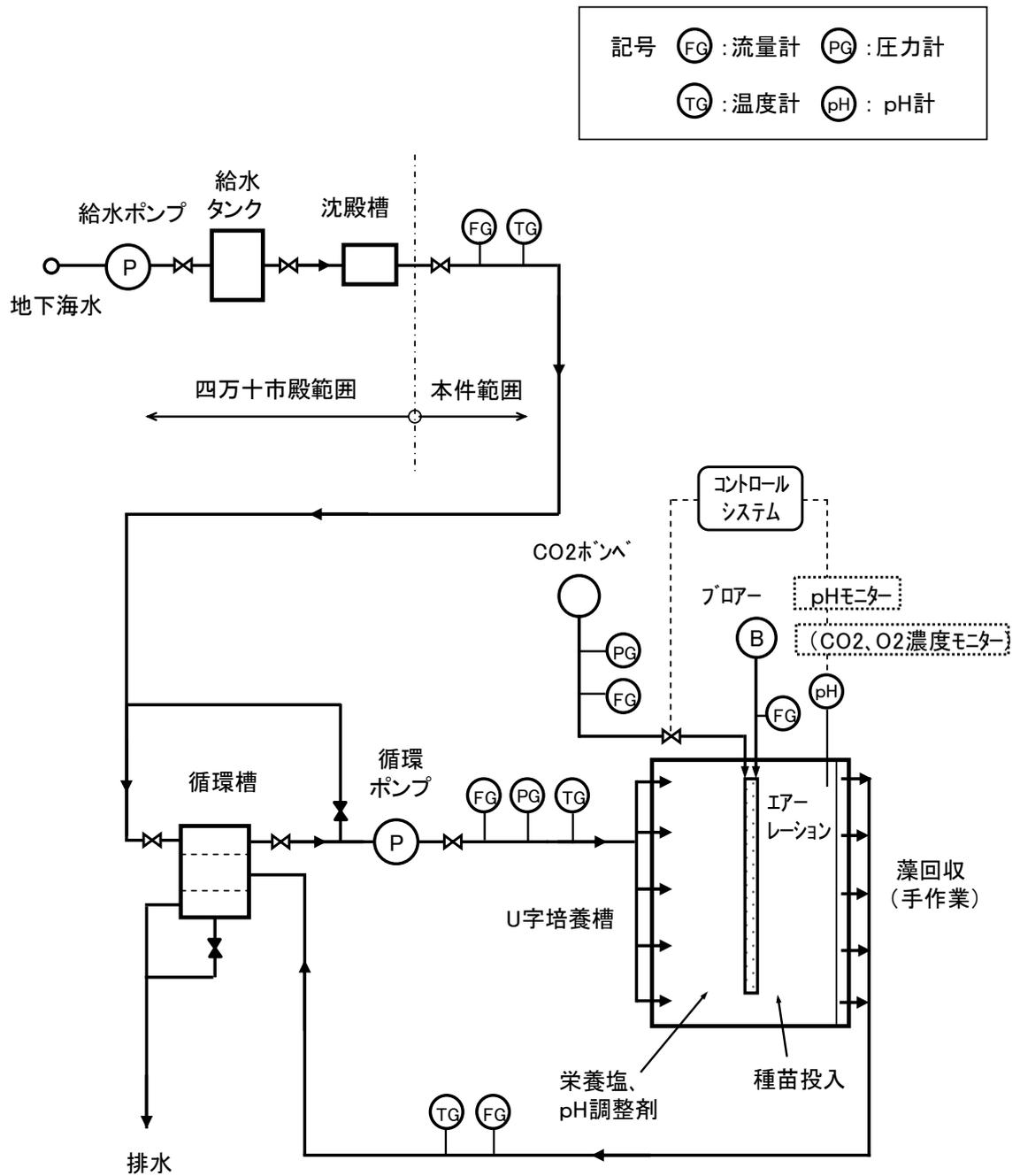


図 2.1-2 配管系統図 (当初)

## 2.2 製作、現地据付

実験設備は工場にて製作し、培養槽、循環槽ごとにプレハブ後、四万十市下田の現地に輸送した。現地では、各水槽廻りの基礎を施工後、据付、配管接続工事を行い、完成させた。製作、および、据付工程写真を図 2.2-1 に示す。(平成 22 年度財団法人機械システム振興協会 受託事業)



工場製作



現地据付

図 2.2-1 製作および据付工程写真

## 2.3 設備の改良

実験開始後、藻類の生長率改善を目的として、下記の設備改造を行った。

### ① 反射鏡の設置

培養槽内の日陰部における光量低下を補うため、反射鏡を設置した。設置位置は培養槽の東、西面とし、太陽高度に応じて太陽光を効果的に水槽内へ導くため、反射鏡の角度を手動にて調整可能な構造とした。

### ② 培養水供給の掛け流し化

培養水は当初、海水使用量節減のため、循環再利用する方式にしていたが、栄養不足が懸念されたため、培養後の海水は再利用せず排水する「掛け流し」方式に変更した。そのため、循環槽を単なる貯水槽としての機能に配管接続の改造により変更した。

反射鏡の構造と仕様を図 2.3-1 に示す。また、改造後の設備構造、および、配管系統図をそれぞれ、図 2.3-2、図 2.3-3 に示す。



反射鏡の仕様 サイズ：2m×0.9m×2面（東西に各1面）、材質：樹脂ミラー  
設置角度：太陽高度に応じて調整可（手動）

図 2.3-1 反射鏡の構造

大型培養槽の仕様

サイズ 幅(半径): 3m (R1.5m)  
 垂直部高さ: 1m  
 長さ: 2.3m

容量 水面高 2.5m: 15m<sup>3</sup> (Max)  
 水面高 1.5m: 8m<sup>3</sup> (Min)

面積: 7m<sup>2</sup> (槽水面部)

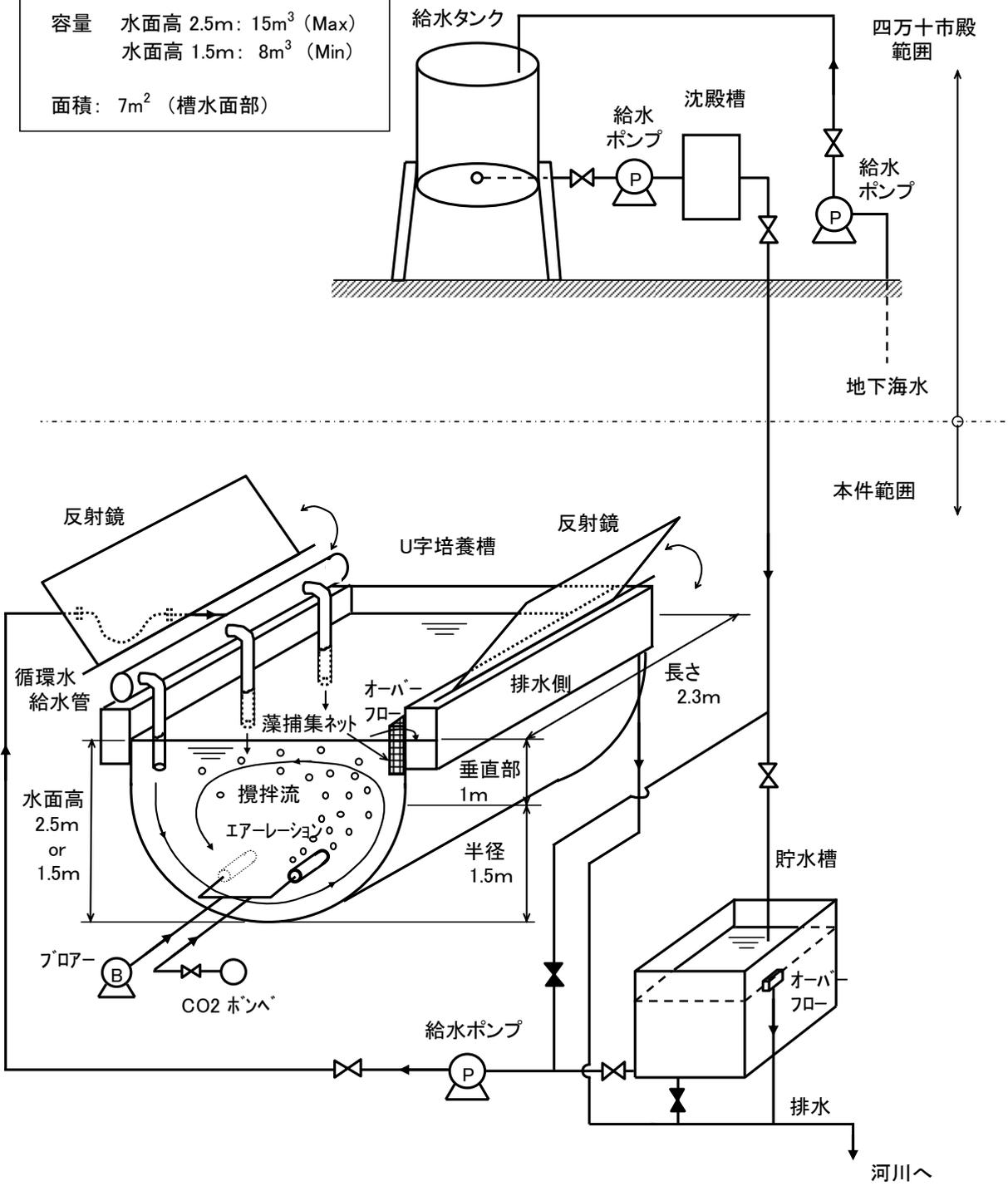


図 2.3-2 大型培養槽の構造 (改造後)

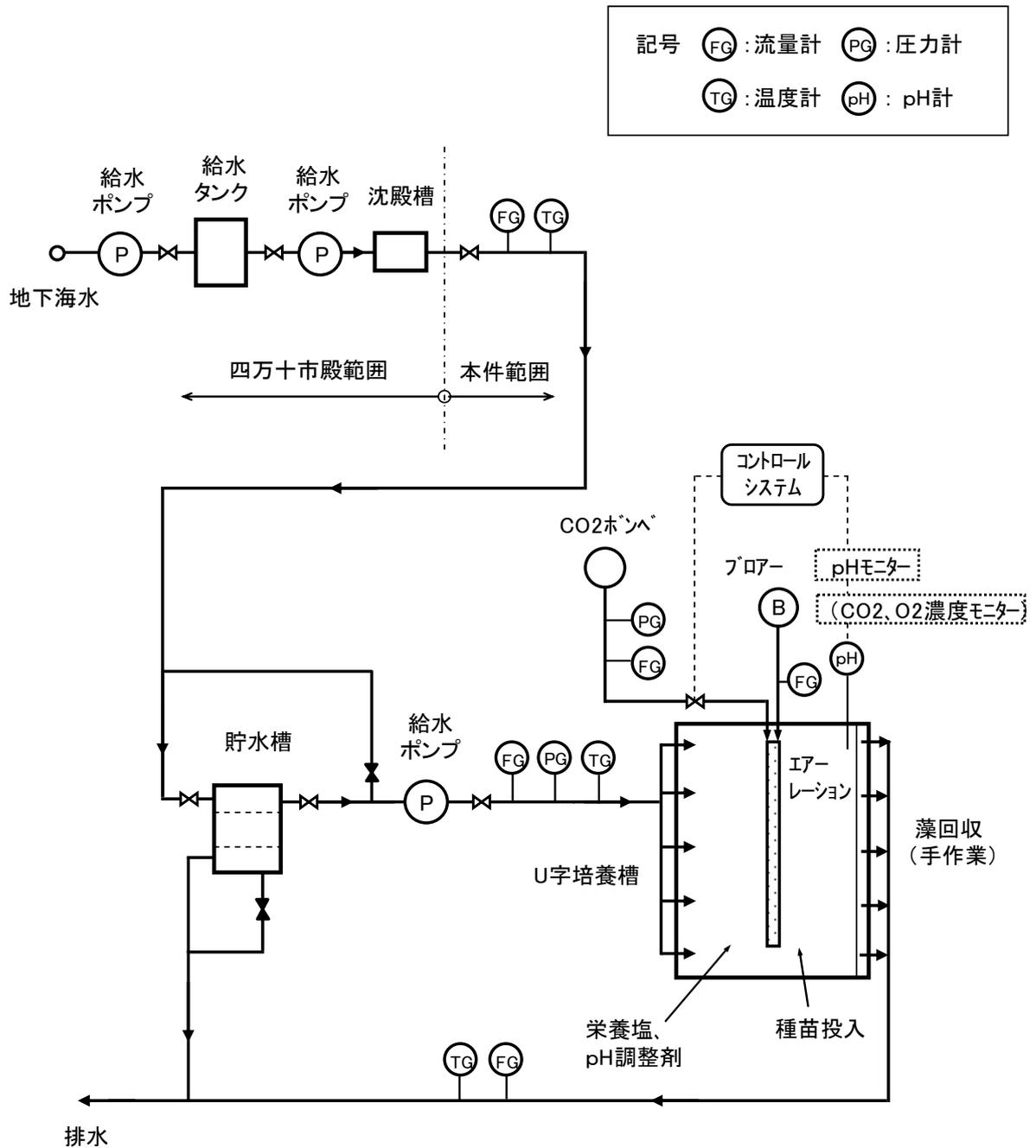


図 2.3-3 配管系統図 (改造後)

## 第3章 大型培養槽の性能評価試験

### 3.1 試験項目と計測方法

水槽内の光量子量の改善および水深の影響評価を目的とした光量評価試験、藻類培養のエネルギー原単位把握を目的とした設備消費電力量の評価試験、CO<sub>2</sub>吹き込み圧による培養水槽内のCO<sub>2</sub>濃度の変化および水槽内のCO<sub>2</sub>濃度分布を把握することを目的としたCO<sub>2</sub>吹き込み試験を行った。

試験は高知県四万十市に昨年度設置したU字培養槽（容量＝最大15t）および中部大学の半円形水槽（半径＝1m、奥行き＝1m、容量＝1.5t）と半円形1/4モデル水槽（半径＝25cm、奥行き25cm、2.45×10<sup>4</sup>cm<sup>2</sup>）を用いて行った。

#### 3.1.1 光量の評価試験

##### ① U字培養槽による試験

U字培養槽では水槽内の光量の改善を目的として、培養槽北側に樹脂ミラー（2000mm×900mm）を設置した場合と、設置しない場合について、それぞれ培養水のみケースと藻類を培養したケースについて培養槽内の光量を測定した。なお、光源はすべて自然光である。

測定ケースについては表3.1.1-1に、測定位置については図3.1.1-1に示す。

表 3.1.1-1 測定ケース

番号	試験条件			測定年月日	備考
	反射板の有無	藻類の有無	測定場所		
1	無	無	北側 直上	2011.08.09	
2	無	無	北側 水槽内	2011.08.09	水槽内の5, 60, 130cm深度にて計測
3	有	無	北側 直上	2011.08.12	
4	有	無	北側 水槽内	2011.08.12	水槽内の5, 60, 130cm深度にて計測
5	有	有	北側 直上	2011.08.13	
6	有/無	有	北側 水槽内	2011.08.13	水槽内の5, 60, 130cm深度にて計測
7	有	無	南側 直上	2011.10.11	
8	有	無	南側 水槽内	2011.10.11	水槽内の5, 60, 130cm深度にて計測

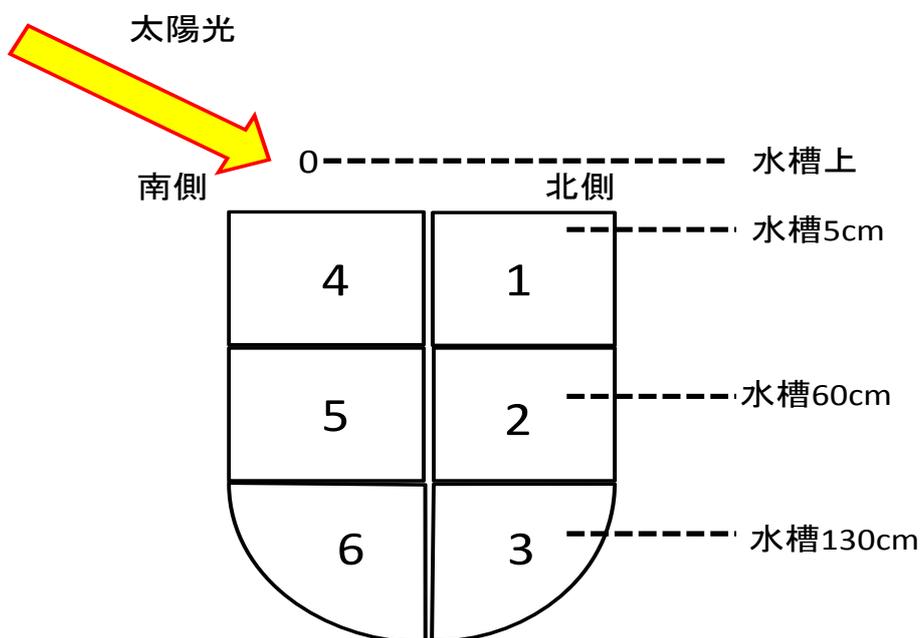


図 3.1.1-1 測定位置

② 半円弧水槽及び 1/4 モデル水槽を用いた試験

U字型培養槽を用いた試験と同様の目的および水深の影響評価を行う目的で、まず、水槽内の培養水（水道水）の有無、藻類の有無による水槽内の光量子量分布を測定した。なお、半円弧水槽では実験施設の天井からの光と蛍光灯の二つの光源を用い、1/4 モデル水槽では蛍光灯の光を光源として試験を行った。

測定条件については表 3.1.1-2 に、測定位置については図 3.1.1-2 に示す。

表 3.1.1-2 測定条件

1500L 水槽		1/4 モデル水槽		
番号	試験条件	番号	試験条件	
	反射板		反射板	蛍光灯位置
1	なし	1	なし	90°
2	左にアルミ箔	2	なし	45°
3	右にアルミ箔	3	右に鏡あり	90°
4	両側アルミ箔	4	右に鏡あり	45°
5	右に鏡あり			

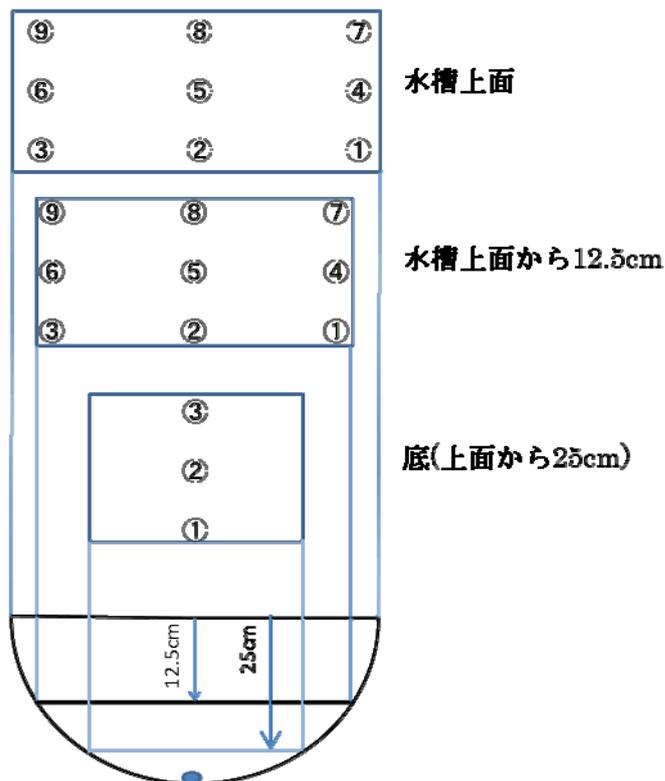
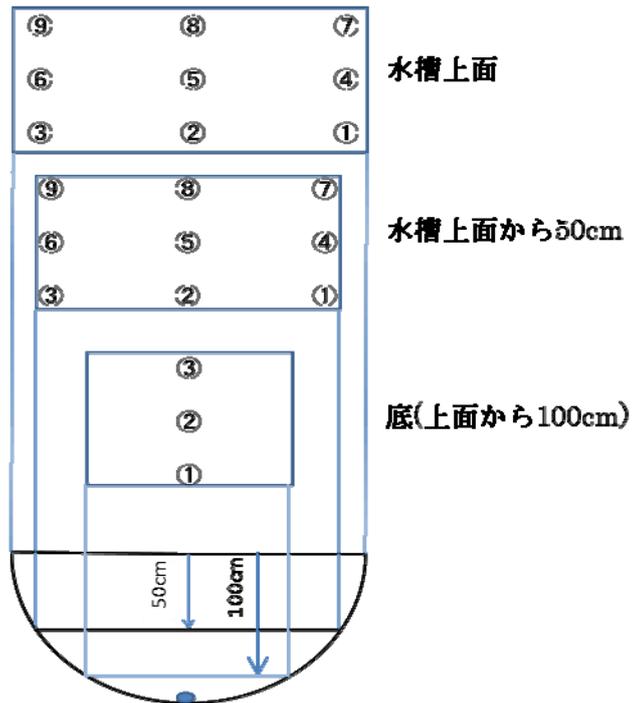


図 3.1.1-2 測定位置(上:1500L 測定位置 下:1/4 モデル水槽測定位置)

### 3.1.2 設備電力量の評価試験

藻類培養のエネルギー原単位把握を目的として、U字型培養槽およびU字型培養槽の予備培養槽である1t水槽で使用している培養水供給ポンプおよびエアレーションポンプの消費電力量を計測



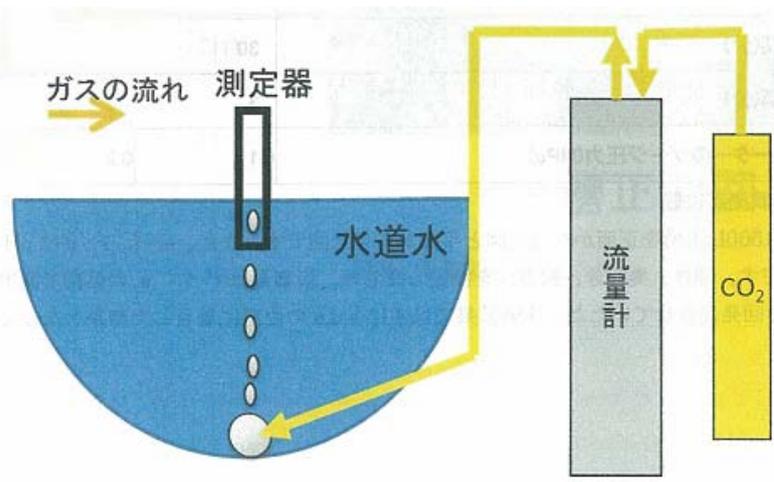


図 3. 1. 3-1 実験装置概略図

表 3. 1. 3-1 塩ビパイプ仕様

長さ (cm)	58.5
穴の径 (mm)	2
穴の数	3
ピッチ (mm)	65

表 3.1.3-2 溶解実験条件

CO <sub>2</sub> ガス (%)	100	
使用水	水道水	
水槽の水温 (°C)	20~23	
ガス流量 (L/min)	10	
水槽容量 (L)	1500	
測定時間 (分)	30	
測定間隔 (分)	3	
レギュレーターのゲージ圧力 (MPa)	0.1	0.2

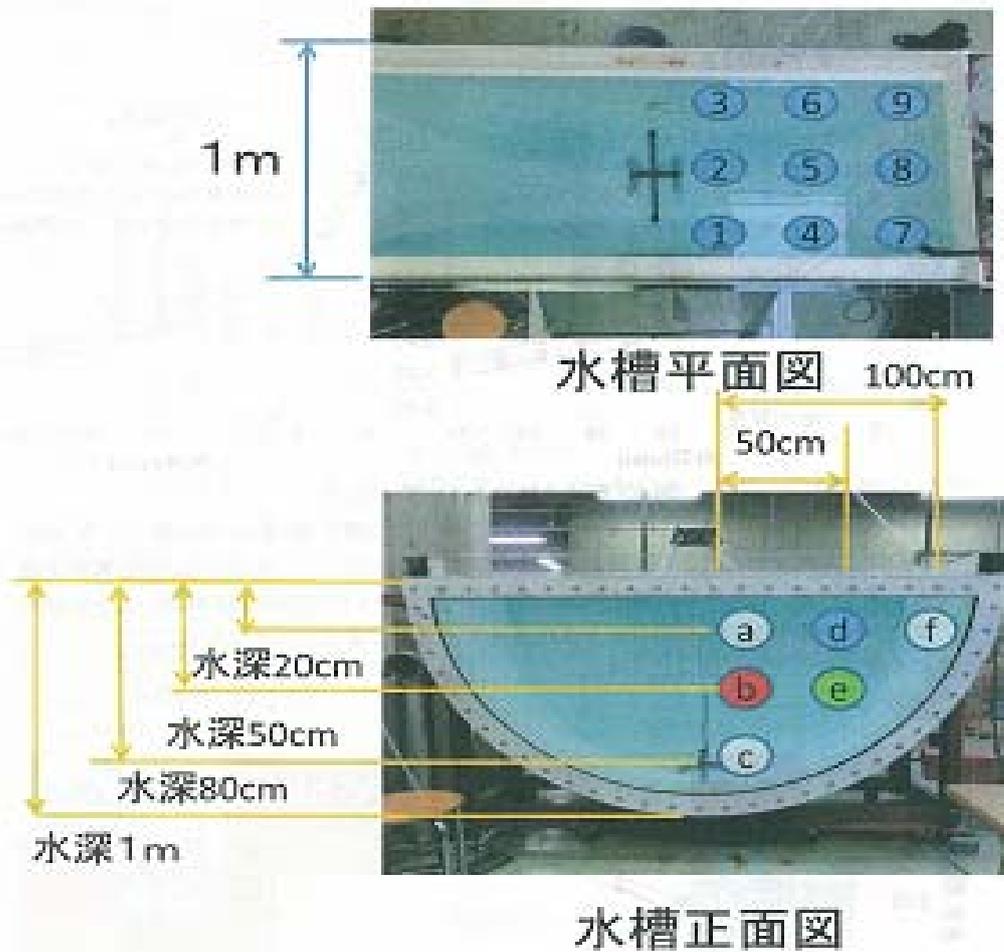


図 3.1.3-2 水槽内の測定位置

### 3.1.4 測定機器



図 3.1.3-3 Delta OHM 製ポータブル照度・輝度・放射照度計 HD2102.2

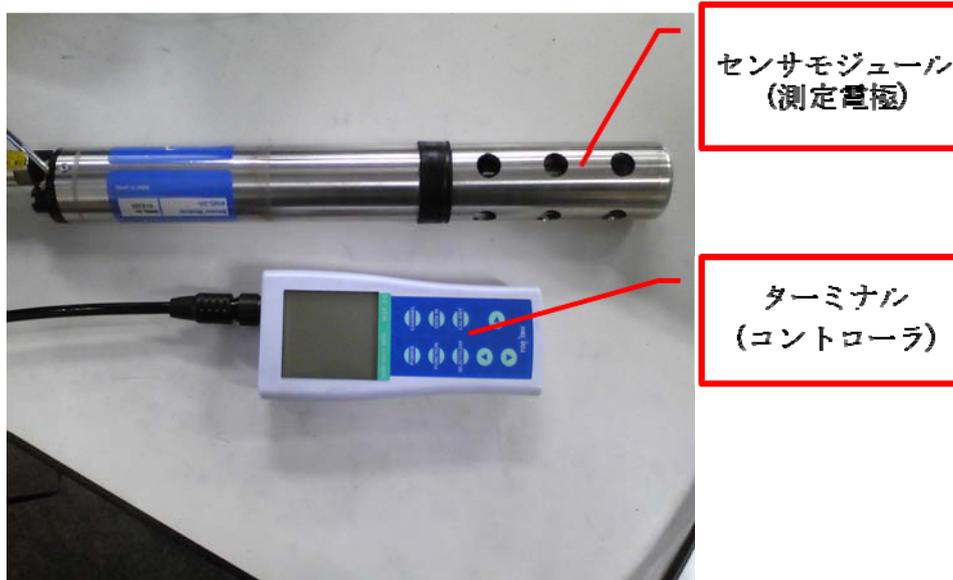


図 3.1.3-4 ポータブル多項目水質計 WQC-24 (pH 計)



図 3.1.3-5 東亜 TDK 製炭酸ガス濃度計

## 3.2 光量の評価試験

藻の培養の必須条件である光合成を十分促進させるためには、いかに水槽の中に光を到達させるかに依存してくる。これまでの培養試験は、主に 1t 以下の小型水槽にて実施してきた。この場合、アクリル円筒水槽であり、光は周面からも十分入ってくるので、時間、あるいは設置条件にかかわらず、満足できる光量を確保することができた。

今回、試作した 15t 水槽は水深が最大で 2.5m 程度あること、また、時間帯によって日照条件の影響を受けやすいことが挙げられ、光合成に必要な十分な光量が確保できるかどうかを性能評価を行う上での必要不可欠の事項であった。この点をあきらかにするため、以下のような方法で、水槽内到達光量について評価を実施した。

### 3.2.1 測定及び評価方法

15t 水槽の南北断面を 6 ブロックに区分して各断面での平均光量を光量計にて求め、水槽直上の光と比較することによって到達率を求めることとした。図-3.2.1 に模式図にてその方法を示す。

水槽を光の良く差し込む北側と、日陰になる南側にわけ、深さ方向については、表層部(計測上の代表深度 5cm)、中間深度部(代表深度 60cm)及び底部(代表深度 130cm)として、断面を 6 分割した領域を設定しそれぞれの断面位置において、直上の日影にならない測定位置 (0 位置) に対して、どの程度光が届いているかを測定した。結果は、直上の光量に対しての到達率で評価した。

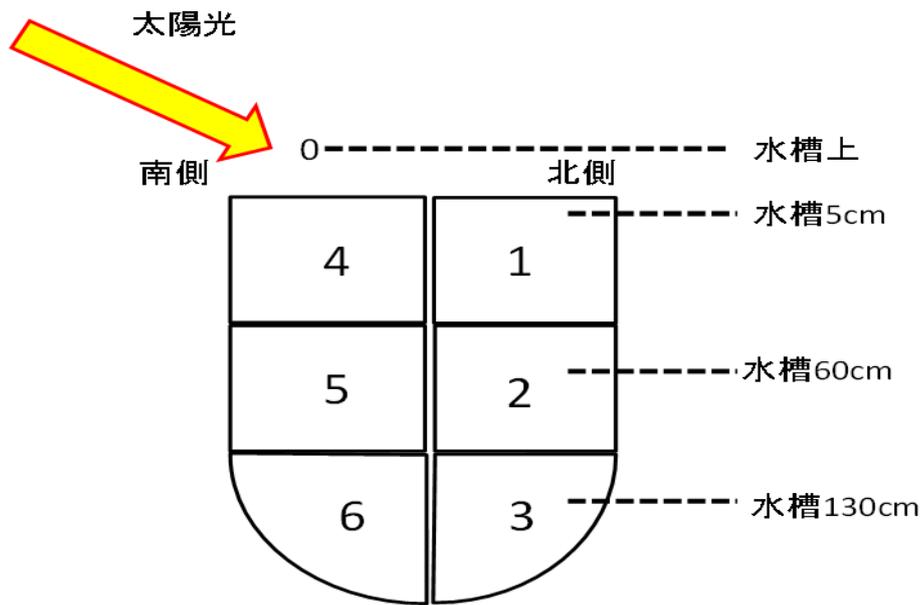


図 3.2.1 計測位置と評価断面の区分

測定データは表 3.2.1 に示すとおりである。

表 3.2.1 測定ケース(再掲)

番号	試験条件			測定年月日	備考
	反射板の有無	藻類の有無	測定場所		
1	無	無	北側 直上	2011.08.09	
2	無	無	北側 水槽内	2011.08.09	水槽内の5,60,130cm深度にて計測
3	有	無	北側 直上	2011.08.12	
4	有	無	北側 水槽内	2011.08.12	水槽内の5,60,130cm深度にて計測
5	有	有	北側 直上	2011.08.13	
6	有/無	有	北側 水槽内	2011.08.13	水槽内の5,60,130cm深度にて計測 反射板の有無を時間帯で使い分け
7	有	無	南側 直上	2011.10.11	
8	有	無	南側 水槽内	2011.10.11	水槽内の5,60,130cm深度にて計測

### 3.2.2 測定結果

各測定試験結果を図 3.2.2-1～図 3.2.2-6 に示す。

なお、ケース 1 及びケース 2 は、継時的な日照変化をみるために、朝 6 時から夕方 6 時まで計測を実施した。(図 3.2.2-1 及び、図 3.2.2-2)

ケース3及びケース4は、光量の到達率が予想より下回ることが明らかになったので、新たに取り付けた反射板の有無による光量の到達率の差異を明らかにするために計測したものである。(図3.2.2-3及び、図3.2.2-4)

ケース5及びケース6は、同様にして反射板の有無と藻類の有無の違いを明らかにするために実施した試験である。(図3.2.2-5及び、図3.2.2-6)

また、ケース7及びケース8は、北側位置と、南側位置光量を比較する目的で実施した。本試験は約30分程度の計測時間であるため経時特性の図ではなく、この時間における平均光量を求めて、他の計測との比較で示している。(表3.2.2-2)

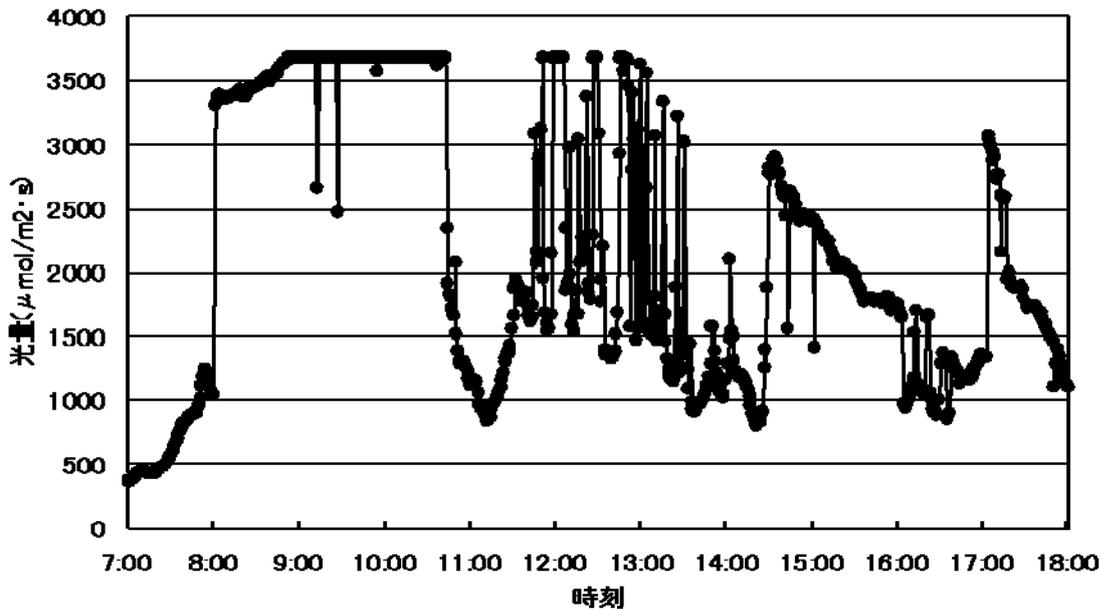


図 3.2.2-1 光量測定試験結果 ケース1 (直上における光量 8月9日)

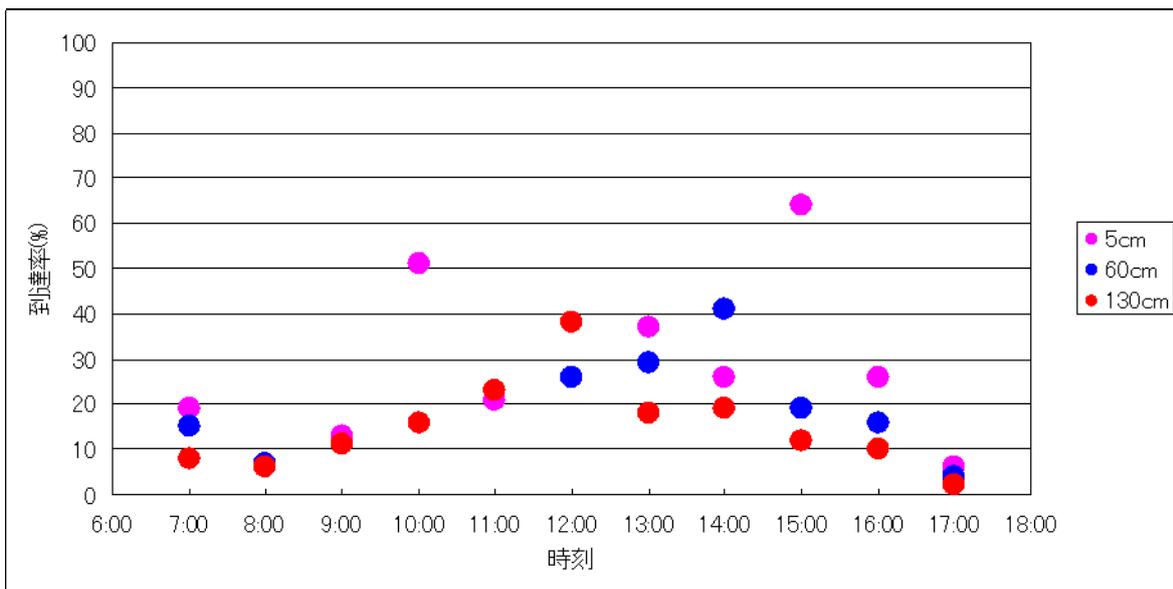


図 3.2.2-2 光量測定試験結果 ケース2 (各測定深度における光量 8月9日)

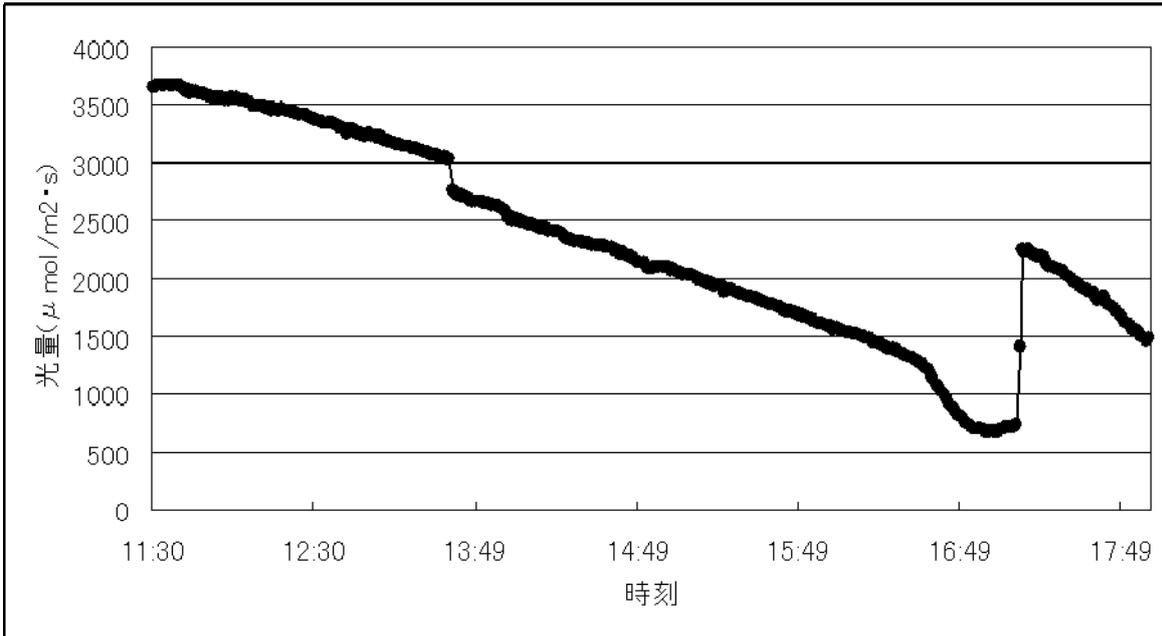


図 3.2.2-3 光量測定試験結果 ケース 3 (直上における光量 8月12日)

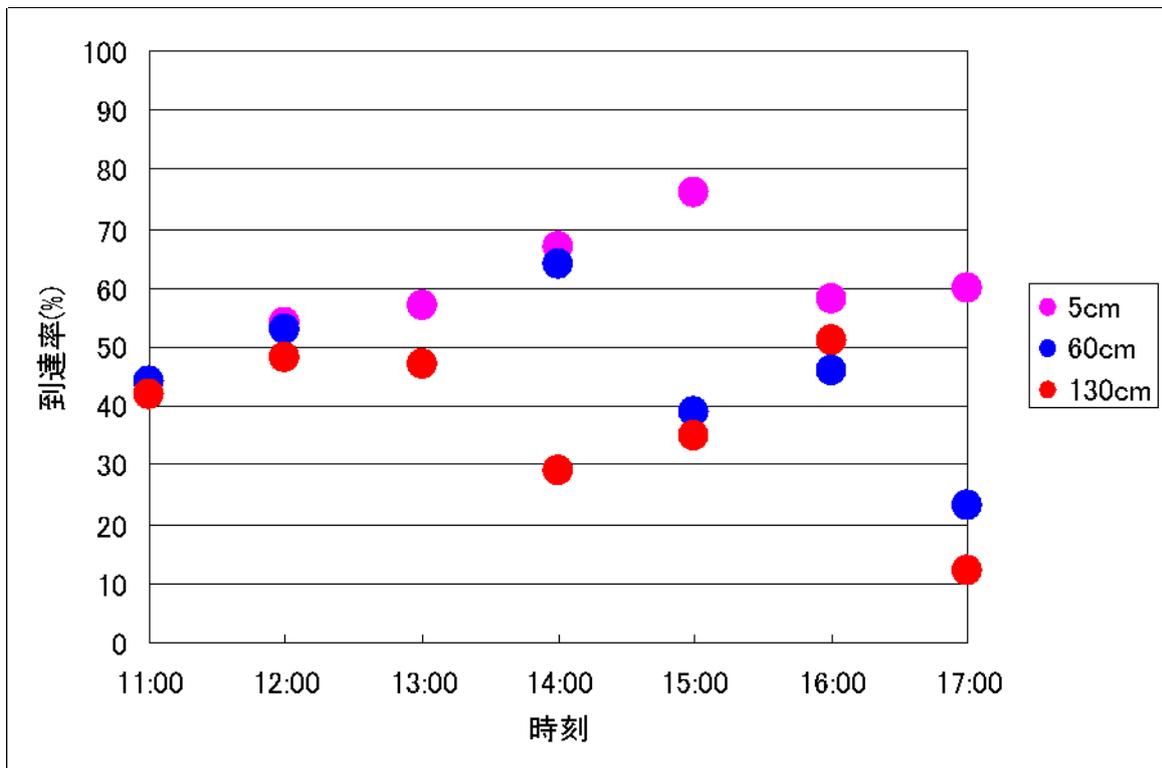


図 3.2.2-4 光量測定試験結果 ケース 4 (各測定深度における光量 8月12日)

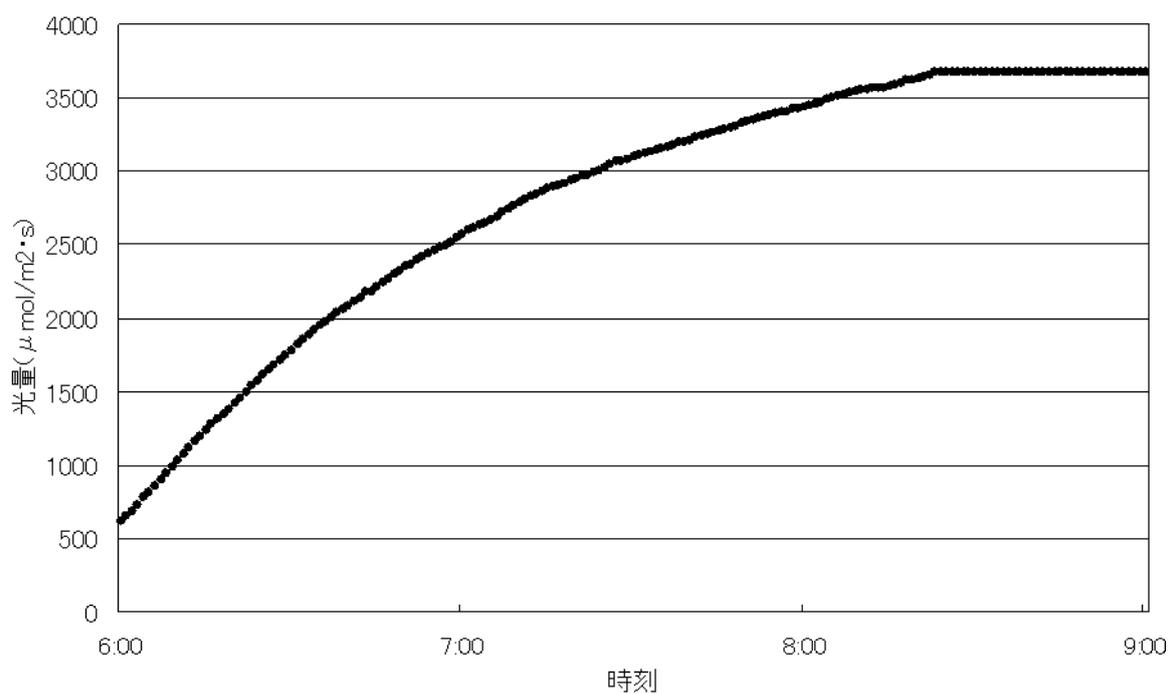


図 3.2.2-5 光量測定試験結果 ケース 5 (直上における光量 8月13日)

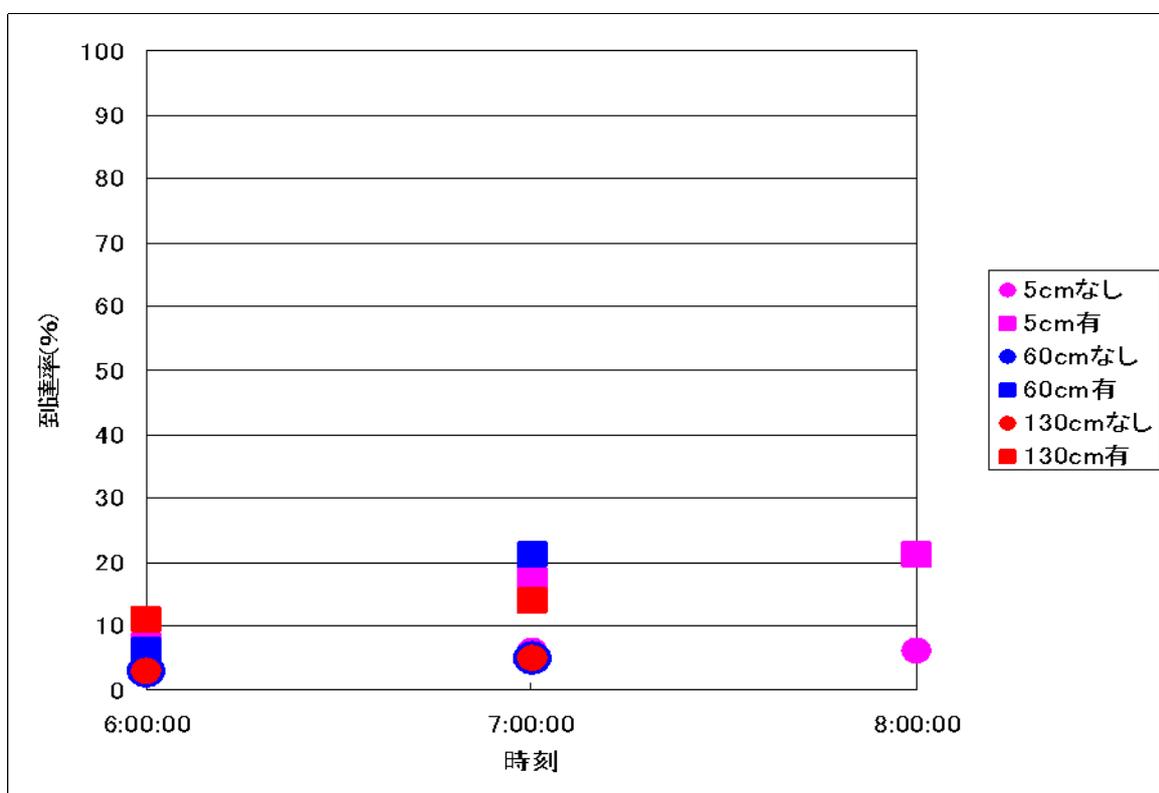


図 3.2.2-6 光量測定試験結果 ケース 6 (各測定深度における光量 8月13日)

表 3.2.2-1 水槽直上における時間帯別平均光量 (単位:  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ )

時間帯	8/09	8/12	8/13	推定
6:00~9:00	2081	-----	2931	→2200
9:00~12:00	2764	>3000	-----	→3000
12:00~15:00	1972	2400	-----	→2000
15:00~18:00	1688	1575	-----	→1600
1日平均	2126	2325	-----	→2200

表 3.2.2-1 は、各測定日の水槽直上における時間帯ごとの平均的な光量を示したものである。光量は当然のことながら日照条件に依存するが、今回のような8月の時間帯では夕方近くを除き、 $2000\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  以上の光量が平均的には確保できていることがわかる。

表 3.2.2-2 南側断面の平均光量と北側断面における平均光量の比較

南側平均光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ) (2011.10.11 14:30~15:00)			北側平均光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ )		
直上	1770	100%	直上	1798	100%
5cm	285	16%	5cm	1380	77%
60cm	228	13%	60cm	714	40%
130cm	137	8%	130cm	576	32%

### 3.2.3 考察

表 3.2.2-2 は、光量が不足すると予想された南側断面と、北側断面の平均的な光量を比較したものである。なお、データの整理に当たっては、直上での光量がほぼ同じ量になるような時間を選定した。この表からわかるとおり、北側断面位置においても、深さが 60cm 以深になると光量が、半分以下になることがわかる。また、南側断面では、さらに光量が不足し、浅部においても到達光量は著しく低下することが判明した。

### 3.2.4 光量の到達率

以上の測定結果から、藻が光合成により増殖するのに必要な光量に対してどの程度受光できているかを以下の方法で検討した。

藻の生育に必要な最低光量は、以前の測定結果より  $140\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  と報告されている<sup>1)</sup>。また、藻による光の透過量の低減量は別途中部大学での試験結果より  $200\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ <sup>2)</sup>であることが判明

している。このことより、藻が存在する状態での最低必要光量は  $140+200=340\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  程度である。

以上より、各深さに藻を入れていた時の計算上の光量到達率は以下の式で求められる。

$$\text{光量到達率 (\%)} = \text{到達光量} / 340 \times 100$$

ただし、到達光量  $> 340$  の場合は 100% の到達率とする

このようにして求めた各断面位置の光到達率を表 3.2.3 に示す。また、同結果を図示したものを図 3.2.3 に示す。

表 3.2.3 各断面位置の光到達率

南側平均光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ) (2011. 10. 11 14:30~15:00)				北側平均光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ )			
位置	測定値	必要光量	到達率	位置	測定値	必要光量	到達率
直上	1770	340	100	直上	1798	340	100%
5cm	285	340	83	5cm	1380	340	100%
60cm	228	340	67	60cm	714	340	100%
130cm	137	340	40	130cm	576	340	100%

同表より、日中に日射の入りやすい北側は直上の光量に比べれば、十分とはいえないものの、必要光量の視点からは一応は確保されていると判断される、一方、南側断面の場合、特に 60cm 以深では必要光量に比べて半分以下の光しか到達していないものと判断される。

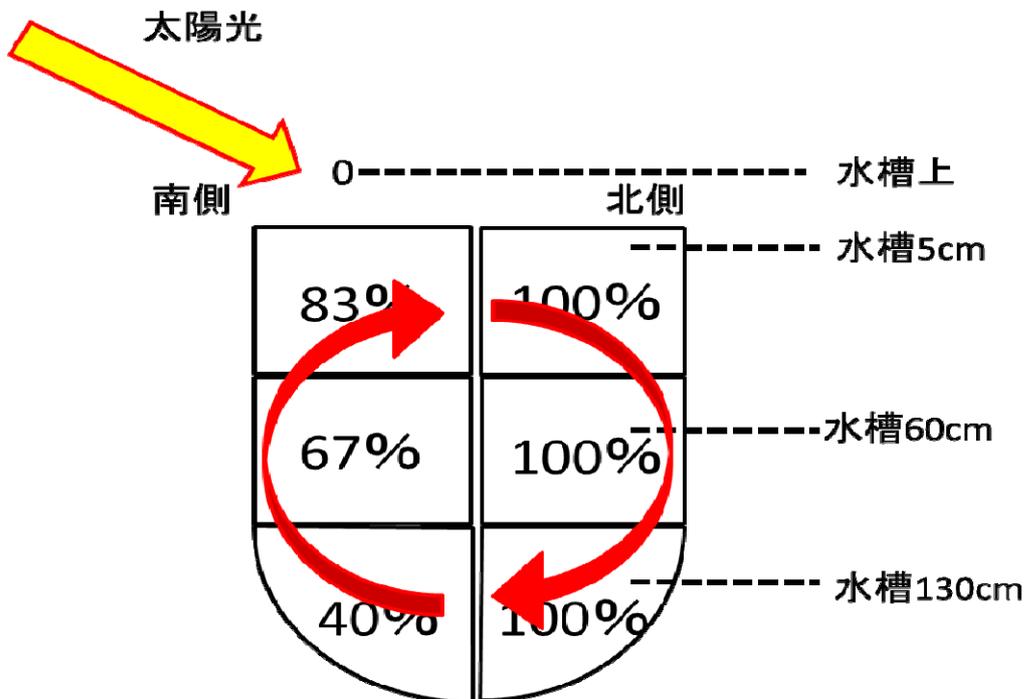


図 3.2.3 大型水槽の各断面位置における平均光到達率の評価

このことより、水槽直上での1日の平均光量が  $2200\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  と仮定、水槽内を藻類が矢印のように回転しているものとする、平均的な光量は、約 80%程度しか受けることができない。

必要光量に到達しない場合、藻の成長は阻害されると仮定すると、水槽半分は成長に寄与しないゾーンになる。すなわち約 50%の成長率しか確保できない。

結果として、当水槽の深さと平面形状のバランスが悪いことが藻類の成長率に影響を及ぼしたものと判断される。

### 3.3 水深の影響評価試験

#### ① 1500L 半円型水槽

実験結果を図 3.3.1-1 と図 3.3.1-2 に示す。1500L 半円型水槽の光量を比較した場合、水槽左側にアルミ箔を張った場合に光量が  $1\text{mmol}/\text{m}^2\text{s}$  以上に上がっている。また、右側に鏡を置いた場合も水深 1m の場所まで光が届いている。グラフの縦軸は(比較値)/(アルミ箔なし、鏡なしの値)としている。

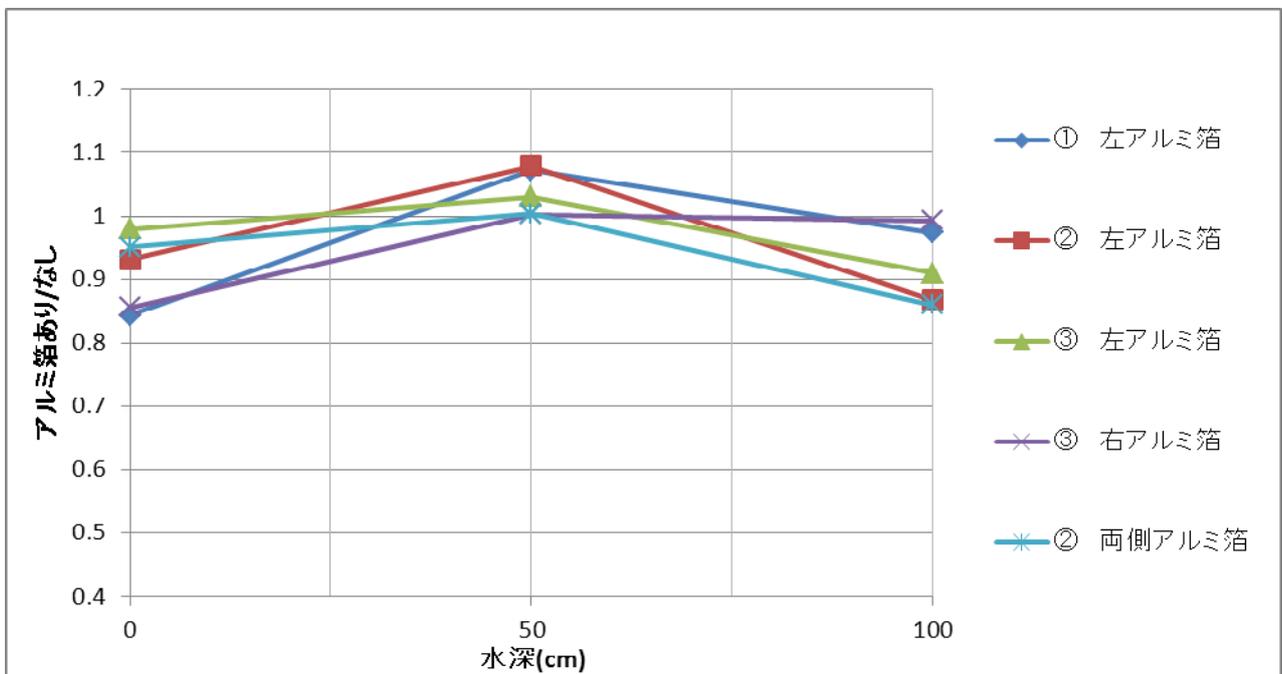


図 3.3.1-1 1500L 半円型水槽の光量 ( $1\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  以上の場合)

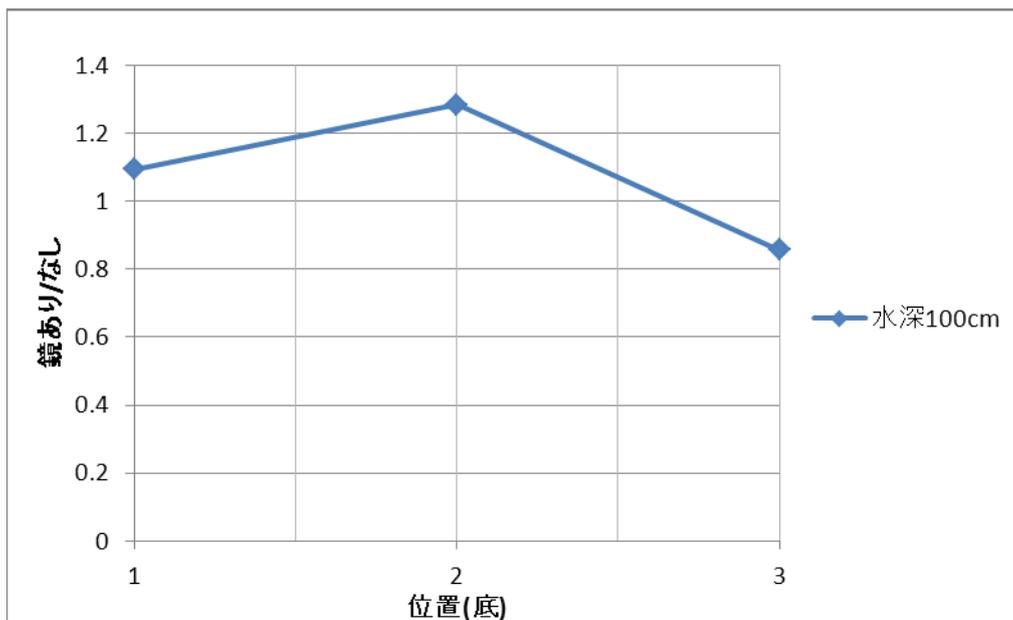


図 3.3.1-4 水槽右側に鏡を置いた場合の光量比較 (単位mmol/m<sup>2</sup>s)

② 厚紙の半円型水槽

実験結果を 3.3.1-3 と 3.3.1-4 に示す。厚紙の半円型水槽(半径=25cm、奥行き 25cm、 $2.45 \times 10^4 \text{cm}^2$ )の光量を比較した場合、蛍光灯 90 度と蛍光灯 45 度では③の位置では 1 以上の値が確認できた。また、蛍光灯の角度は 90 度の方が 45 度に比べて高い値である。グラフの縦軸は(比較値)/(鏡なしの値)としている。

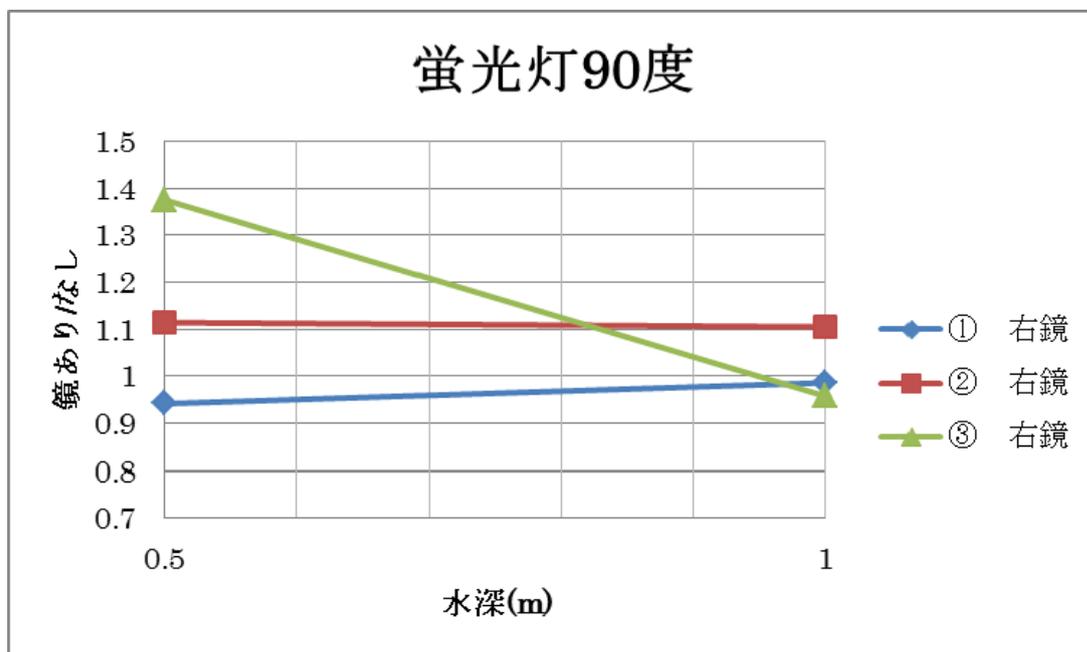


図 3.3.1-3 蛍光灯 90 度の場合の光量 (単位mmol/m<sup>2</sup>s)

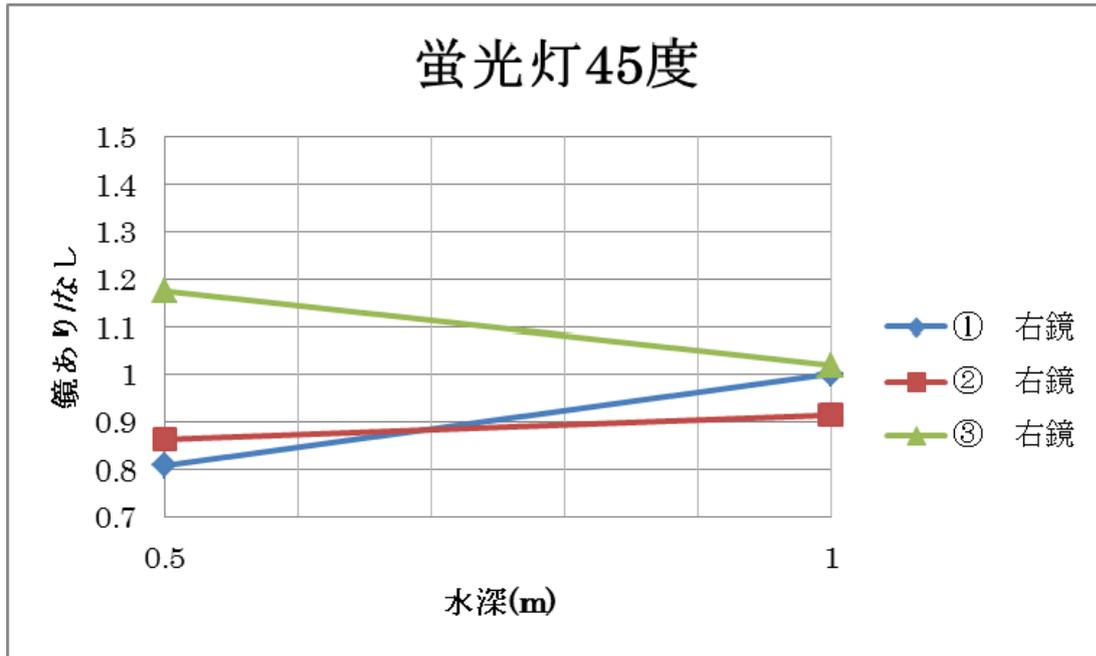


図 3.3.1-4 蛍光灯 45 度の場合の光量 (単位  $\text{mmol}/\text{m}^2 \text{s}$ )

### 3.4 設備消費電力量の評価試験

大型 (15 t) 培養槽の設備関連のシステム系統を図 3.4.1 に示す。培養に必要となる設備電力量を評価する上での機器は同図に占められるように、動力ポンプ (ポンプ 1 及びポンプ 2) とエアレーション用ポンプの 2 系統に大別することができる。地下海水供給ポンプはシステム、或いは場所により種々の方法が採用されるため、培養槽の設備とは別扱とし、今回は対象に含めないこととした。ポンプ 1 は循環槽に培養水を供給するためのものであり、ポンプ 2 は循環槽から培養槽に供給するために設置された。

同敷地には、1 t 水槽も設置して、試験に使用されているが、1 t 水槽の場合、培養水は自然落下で使用されており、エアレーションポンプのみが動力として考慮対象になる。

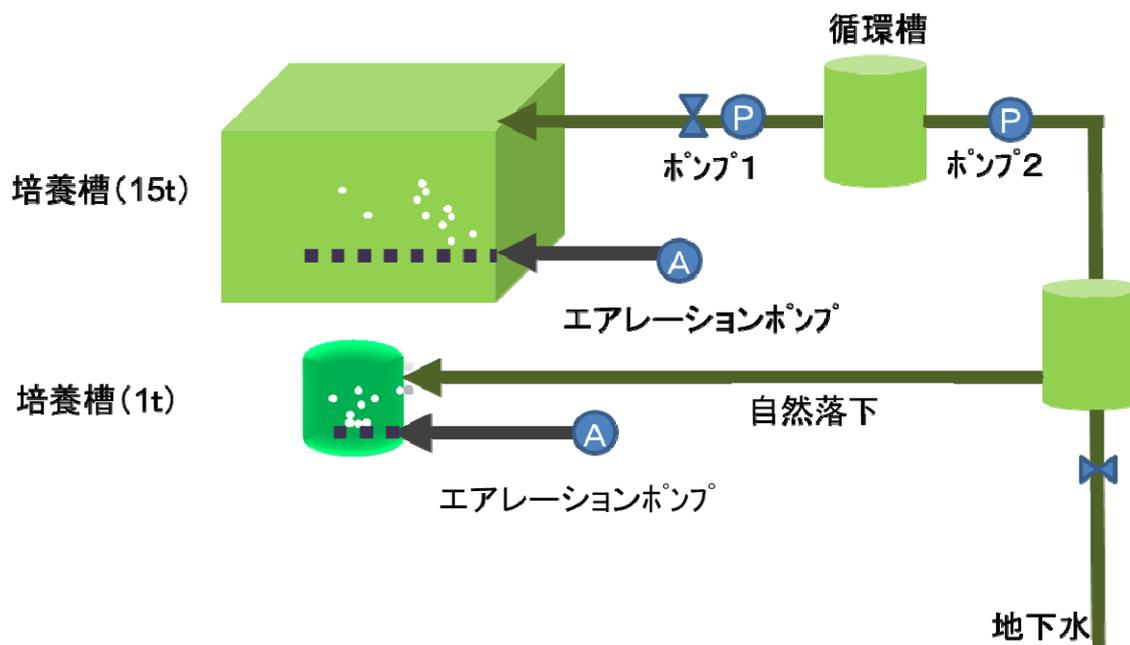


図 3.4.1 試験場所における培養槽の設備系統模式図

システムの運転時にどの程度の電力が消費されているかを明らかにするために、試験運転をして測定した各ポンプ類の消費電力を表 3.4-1 から表 3.4-3 に示す。

表 3.4-1 ポンプ 1 の消費電力量

	測定 ケース	流量 (L/min)	電力量 W
ポンプ 1	1	10	372
	2	20	464
	3	30	509

ポンプ 1 における電力量の測定は、流量をパラメータにして計測された。同表より、循環水量 23L/min (システムの通常運転時) における平均電力量は、 $464 + (509 - 464) * 3 / 10 = 478\text{W}$  として求められた。

表 3.4-2 ポンプ 2 の消費電力量

	測定 ケース	流量 (L/min)	電力量 W
ポンプ 2	1	変動	平均230 最大274

ポンプ2では流量が変動していたため、システムの通常運転時における値として平均値として得られた230Wを採用することとした。

一方、エアレーションポンプは表3.4-3で与えられる値を用いた。

表 3.4-3 エアレーションポンプの消費電力量

エアレーション ポンプ	1 t 水槽用	15 t 水槽用
	73w	208w

これらのポンプ消費電力量より、大型培養槽（15t）及び1t水槽の各々について総消費電力量を計算した結果を表3.4-4に示す。

同表において、循環ポンプの消費電力量は実際の運転時にはバルブ操作で、実質供給に寄与する割合を掛けて修正した値を用いている。すなわち、循環ポンプでは定格値のうち、バルブ操作で3/4の循環量に調整しており、バブリングでは、エアを3/7の割合で逃がしているため、その係数を乗じている。

本システムとの比較対象として、現在事業規模で養殖を実施している室戸のスジアオノリ養殖場のデータをあわせて同表に示した。室戸養殖場では、多段階養殖を実施しており、最終段階の培養槽（7t）で約1.1kg-wet/日のスジアオノリの収穫が商業レベルで可能となっている。この養殖場における培養水（深層水）は、汲み上げてきた深層水を供給ポンプ（循環水槽1と単位水量あたり同水準の能力のポンプが使用されていると仮定）で培養槽に送り込み、培養槽では、バブリングにて攪拌（ポンプは0.3kw/7t培養槽）しているという条件で比較した。

表 3.4-4 各培養槽の消費電力量の比較

場所	循環ポンプ1 消費電力量 (kw)	循環ポンプ2 消費電力量 (kw)	エアレーシ ョン ポンプ 消費電力量 (kw)	総消費電力量 (kw/t)
四万十試験 15トン水槽	$0.478 \times 3/4 = 0.36$ (バルブ操作で、出力を3/4に調整)	$0.230 \times 3/4 = 0.17$ (バルブ操作で、出力を3/4に調整)	$0.208 \times 3/7 = 0.09$ (エアを3/7の割合で逃がしているため)	0.041
四万十試験 1t水槽	-----	-----	0.073	0.073
室戸養殖場 7t水槽	$0.5 \times 7/15 = 0.23$ 循環ポンプ1と同水準のものと仮定し、水槽容量で換算して推定		0.3	0.076

同表より、今回製作した大型培養槽の単位水量を循環させるのに必要な設備電力は、現状設備の約1/2で賄えると言えよう。このことより、本試験装置は当初の狙いであった省エネルギーを目指した培養槽としての機能を保有していることが明らかにすることができた。

最終的な目標は、できるだけ低消費電力にて最大成長率を確保する、すなわち培養プロセスの設備電力量原単位（またはエネルギー原単位、 $Kw/Kg$ -藻類生産量=消費電力量/生産量で求められる）を最小化することである。この点を評価するため、現在稼働している室戸の水槽におけるエネルギー原単位と試験を実施してきた1t水槽及び15t大型水槽の計画設備電力量の原単位を比較したものを表3.4-5に示す。

室戸養殖場でのスジアオノリの生産高は現在0.17kg-wet/t・日と報告されている。設備電力量として表3.4-4で与えられた値を用いると、原単位として10.7kwh/kg-wetを得ることができる。

一方、1 t 培養槽では最大成長率として、約500g/日のデータが採取されている。これを用いると、3.5 kwh/kg-wet 設備電力量原単位を得ることができる。これは、室戸の現状電力量のおよそ1/3であり、省エネルギー化が十分可能なことを示している。

現状では、15 t大型水槽では、すでに指摘されたように、光量到達率が計画通り得られていないため藻類の成長率が十分確保できていないが、この点を改良し、かつCO<sub>2</sub>効果的に溶解させて、成長率が常に維持できるような稼働条件を採用して目標成長率を達成すれば、約1/10の設備電力量で藻類生産は可能になる。

表 3.4-5 各培養槽の設備電力量（ $Kwh$ ）原単位の比較

場所	消費電力量 (kwh/t・日) <small>水槽容量当たりの消費電力</small>	藻類の生産量 (kg-wet/ t・日) <small>水槽容量当たりの 湿潤重量換算生産高</small>	エネルギー 原単位 (kwh/kg-wet) <small>エネルギー原単位 =消費電力量/生産量</small>	備考
四万十試験 15トン水槽	$0.041 \times 24$ =0.98	計画目標値 1	0.98	1 t 水槽と同等の光量条件を確保、かつCO <sub>2</sub> 吹き込み併用ができた場合
四万十試験 1トン水槽 <small>ホソエダアオノリ</small>	$0.073 \times 24$ =1.75	試験達成値 0.5	3.5	試験実績による最大成長率は500 g/日を達成
室戸養殖場 7 t 水槽 <small>スジアオノリ</small>	$0.076 \times 24$ =1.82	現状生産高 0.17	10.7	

### 3.5 CO<sub>2</sub>の溶解方法と溶解試験結果

#### 3.5.1 溶解方法

バブリングでは気体の密度や気泡の大きさに気泡の上昇速度と接触する液相のレイノルズ数が求められる。気泡が大きいと上昇速度が速く、レイノルズ数が大きくなる。レイノルズ数が大きいと物質移動係数が大きくなるが、接触時間が短くなる。また気泡が水面まで上昇すると気泡内のガスは大気に拡散してしまい、送り込んだ気体に対して溶解した気体が少なく効率が悪い。バブリングの種類で最も簡単な方法は、液体中にあるオリフィス等の気泡発生装置に気体を送り込み気泡を発生させ溶解させるエアレーションである。表面張力の影響より気泡径は最小 100 $\mu$ m である。

#### 3.5.2 溶解試験結果

図 3.5.1-1 に示す pH は、測定位置①～③の位置が、④～⑥に比べて pH の低下が速く、中央に比べて右端が最も大きな pH 低下が確認された。

図 3.5.1-2 に示す全炭酸量についても、同様の結果が得られた。

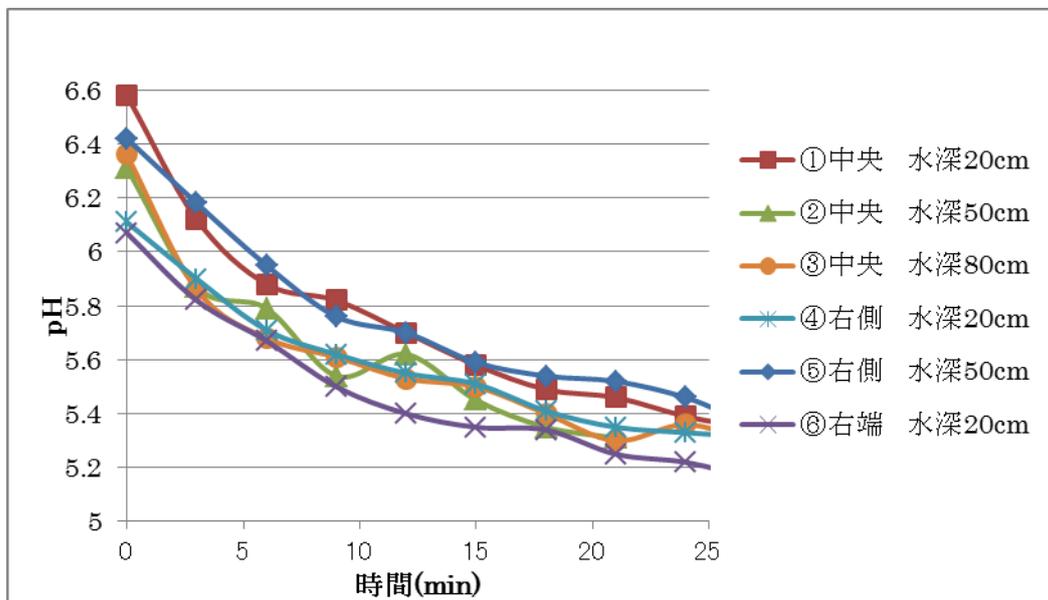


図 3.5.1-1 pH 比較

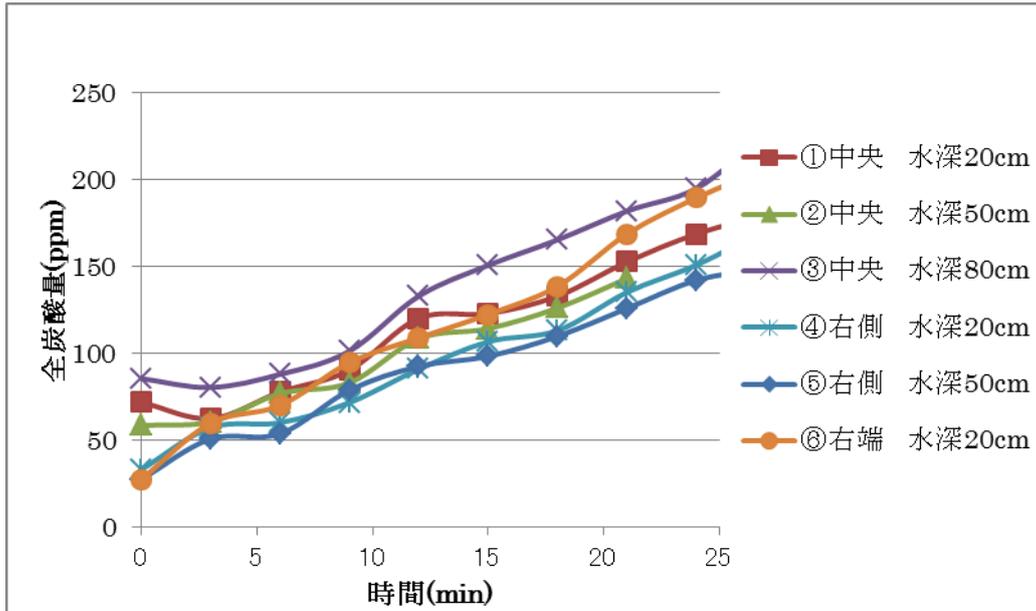


図 3.5.1-2 全炭酸量の比較

図 3.5.1-3 は pH と全炭酸量の時間変化を示す。10 分前後で pH5.7-5.5 で、全炭酸量 100ppm の溶解量を測定した。

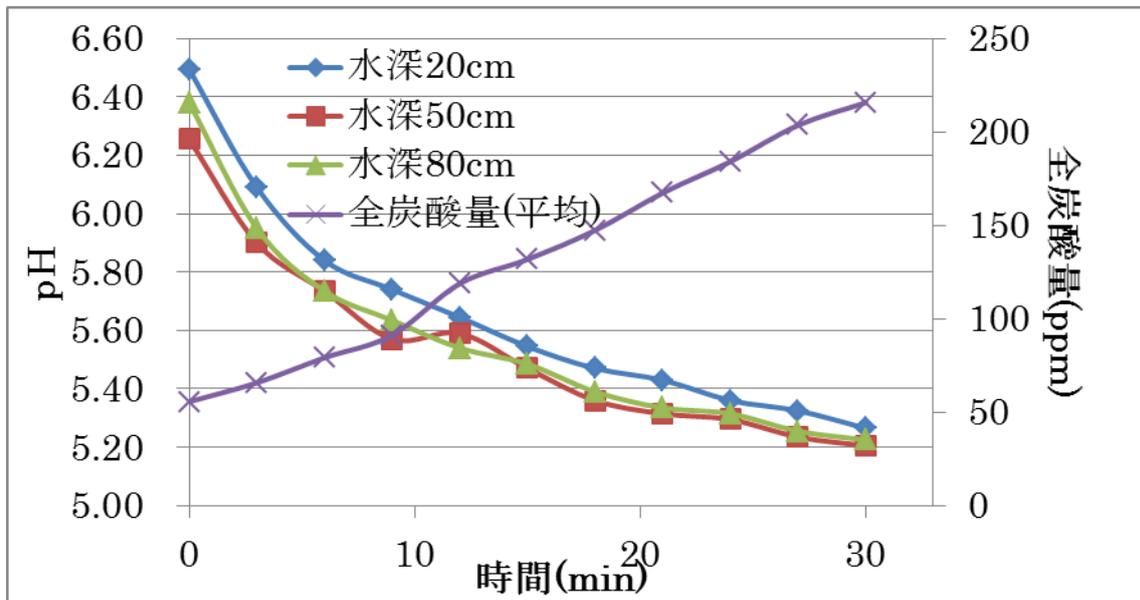


図 3.5.1-3 pH と全炭酸量の時間変化

図 3.5.1-4 は容量 1500L と 30L における pH の比較を示す。容量が小さい方が pH の下がりやすい。どちらの条件においても最初の 9 分間で大きな変化が観測され、15 分以降は変化がない。水槽容量によらず、pH の低下の程度は同じである。

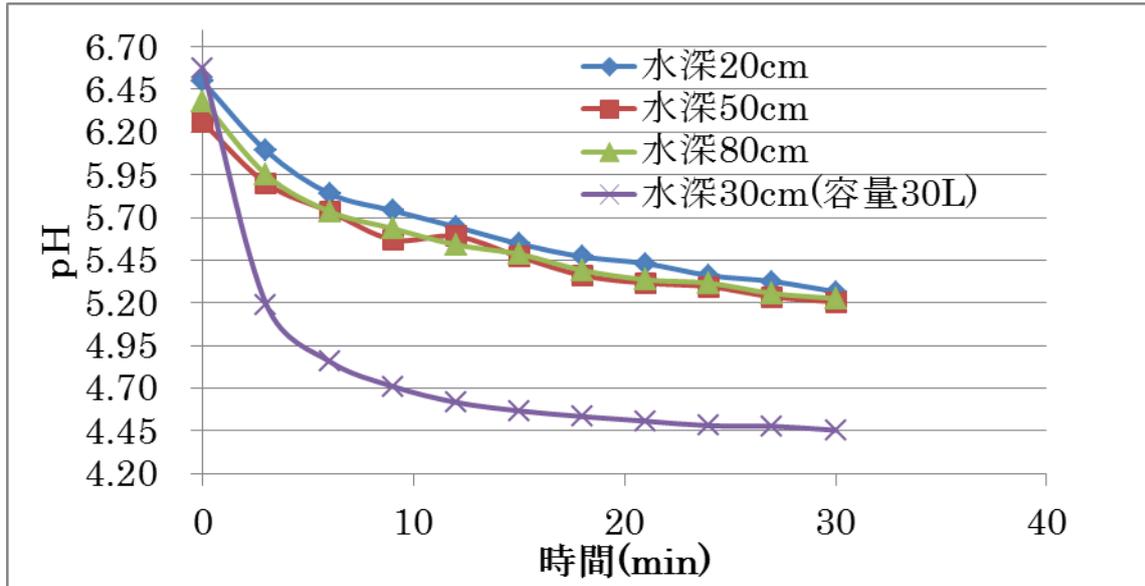


図 3.5.1-4 水槽容量の違いによる pH の比較

図 3.5.1-5 は 1500L 水槽と 30L 衣装ケースの全炭酸量を比較した。水槽容量が小さい方が良く溶解し、CO<sub>2</sub>の気泡が水面に上昇する速度が速い。

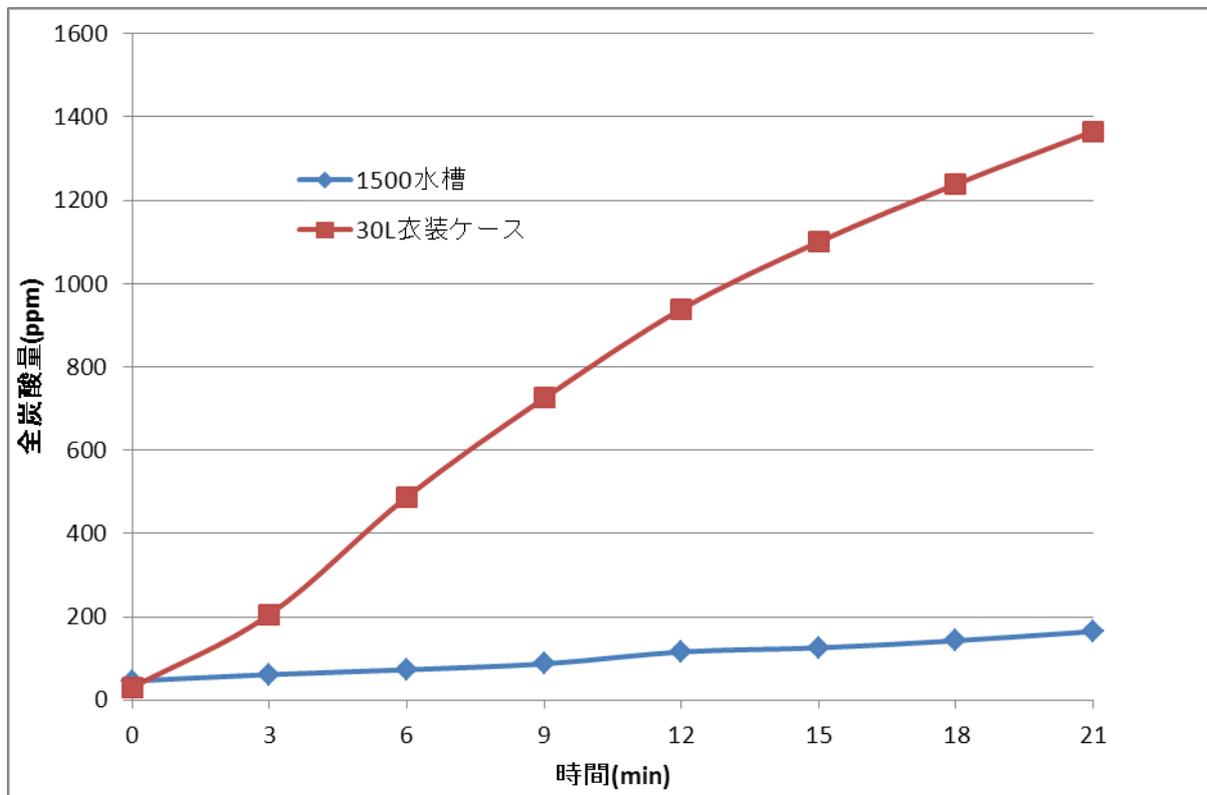


図 3.5.1-5 1500L 水槽と 30L 衣装ケースの全炭酸量を比較

### 3.5.3 まとめと今後の課題

バブリングは水槽内の攪拌動力となるが、CO<sub>2</sub>溶解速度が緩やかで、1.5t 水槽で 30 分程度必要となる。無気泡溶解法では図 3.5.1-6 に示すように、その半分で定常できる。

水槽深さが深くなると、光量が低下し水槽内の CO<sub>2</sub> 溶解濃度もばらつきが発生する。水槽は水深 50cm 以下が適切と考えられる。

また、水槽が浅い場合形状も半円型、U 字型よりも三角形、台形の方が望ましいと考えられる。

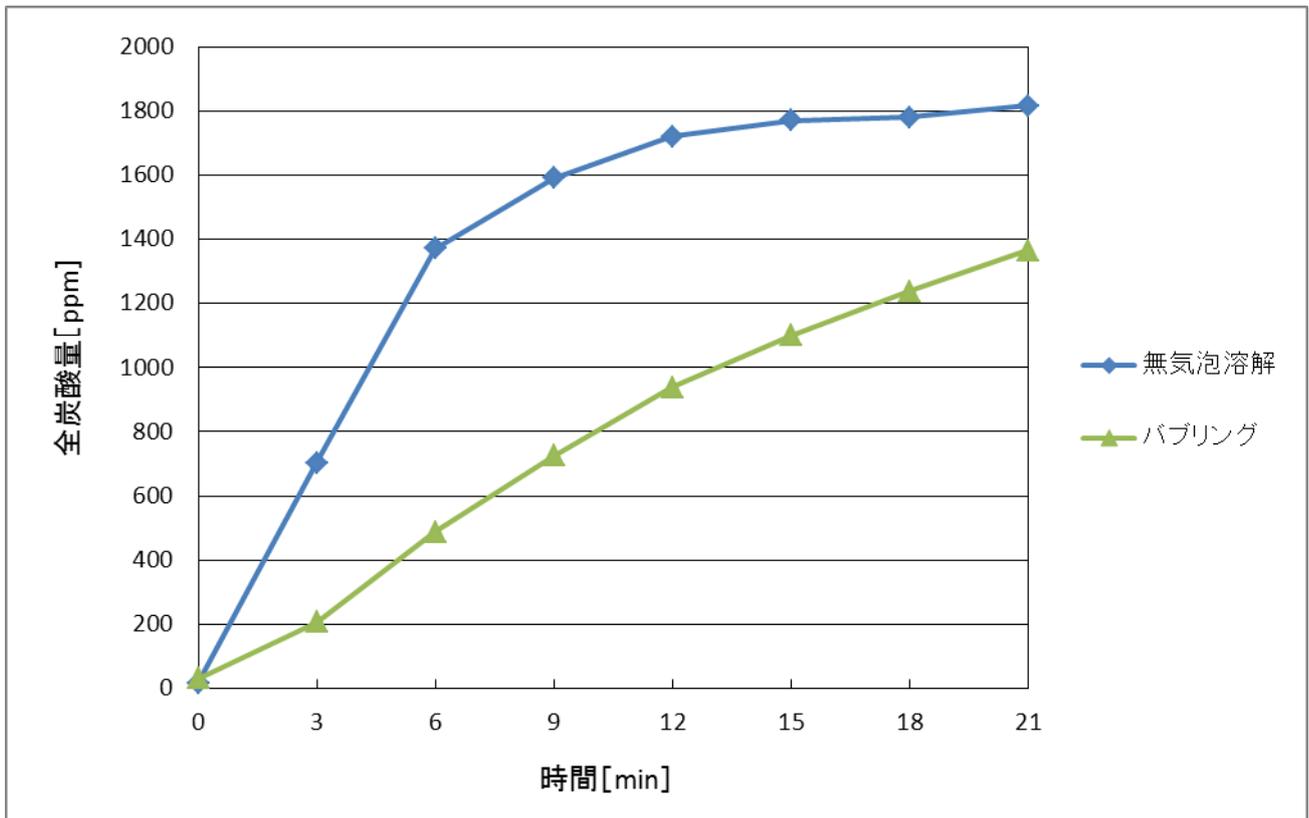


図 3.5.1-6 各溶解方法による全炭酸量の比較

## 3.6 藻類の回収方法に関する検討

今回研究対象とした浮遊集塊型の技術で培養した藻類の回収方法について、具体的な回収装置のアイデアを検討するとともに、その基礎検討を行った。

### 3.6.1 藻類回収設備のアイデア検討

藻類を回収する装置として以下のアイデアを検討した・

#### 1) 熊手による捕集方式

成長した藻類を熊手状の捕集具により引き上げ、回収する方法である。図 3.6.1-1 では、捕集具を引き上げ、回収樋に上下逆向きに保持し、洗浄水により藻類を捕集具より洗い流す。図 3.6.1-2 では、ロープ状のものに固定された熊手が成長した藻類をからめとり、培養槽外部で上下逆になって落下したものを回収する。いずれも藻類の洗い流しや落下が不十分な場合は、人手により補助的な作業が必要となる可能性がある。

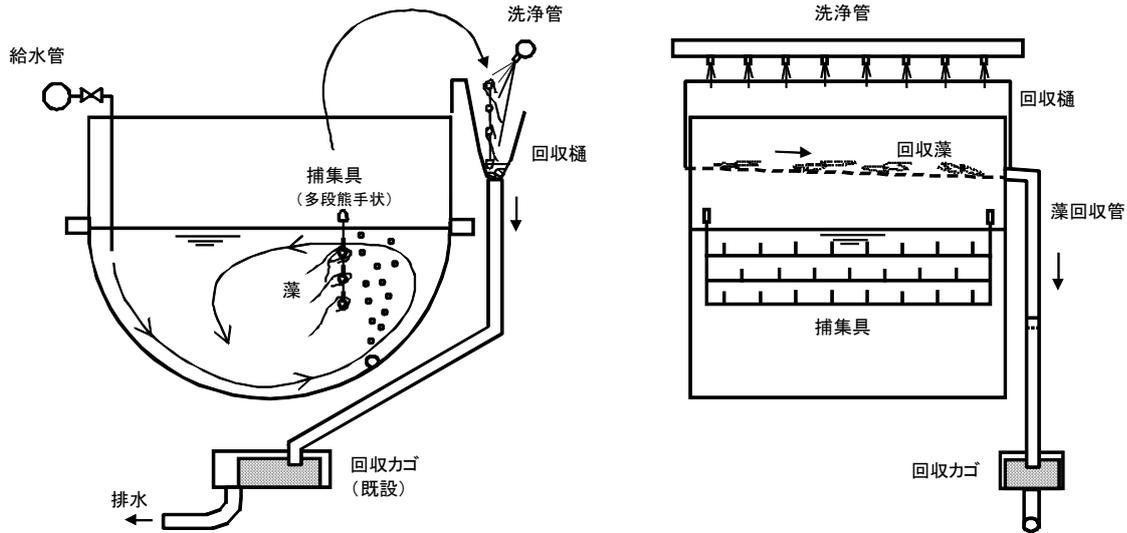


図 3.6.1 回収装置アイデア (1)

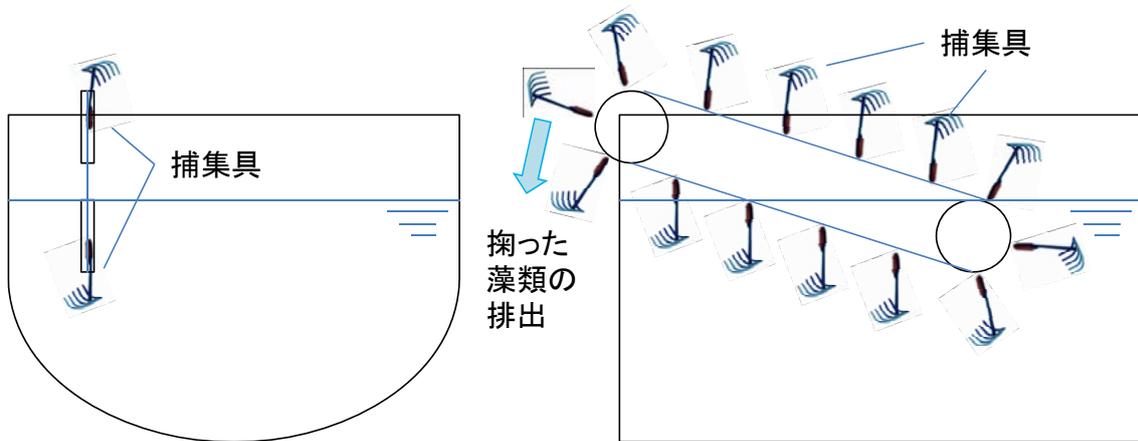


図 3.6.1-2 回収装置アイデア (2)

## 2) メッシュ利用方式

成長した藻類をメッシュにより未成長の藻類を分離し、成長した藻類を回収する方法である。

図 3.6.1-3 は、ポンプおよび掻取／逆洗付オートストレーナにより、選別して収穫する方法を検討したものである。通常のストレーナでの異物（廃却物）を収穫、回収するため、市販品では回収部の配管径が小さく、対象物も異なるので、専用品の開発が必要と考えられる。固形物の分離方法としては最も実績のある方法であるが、海藻では実績が無く、確証が必要である。その際、詰り防止等に関する開発要素が最も大きいと考えられる。

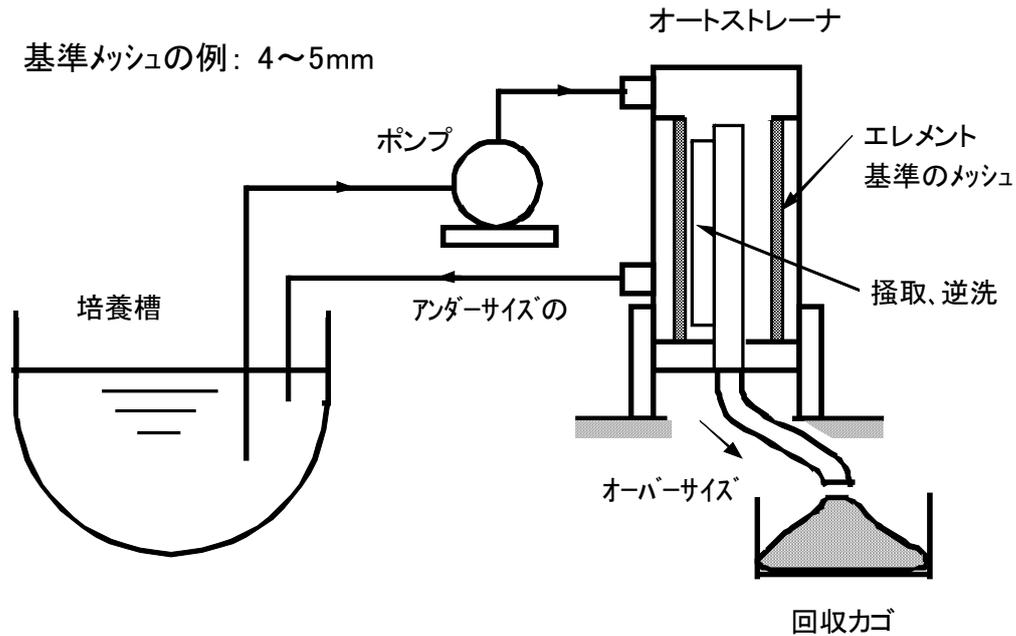


図 3.6.1-3 回収装置アイデア (3)

図 3.6.1-4 は、選別機能（パンチング）をもたせたスクリーにより、掻き揚げる方式を検討したものである。海苔製造では、ミンチ後の海苔の脱水、搬送用で実績があり、スクリーは、ブラシ製のものを使用されている。本図の構造のものは市販機にはないため、専用機の開発が必要である。その際、サイズの選別機能が実用レベルまで確保できるかどうか、即ち、未成長の藻類が成長した藻類に付着して分離できない状態にならないかが課題となる。なお、このスクリーコンベアは、魚類の引揚げ、搬送にも使用されている。

図 3.6.1-5 は、基準メッシュ付の受け樋、収穫カゴを介して、選別、回収する方式を検討したものである。受け樋と回収カゴのみのため、構造は最もシンプルであるため、比較的安価な装置になることが予想される。受け樋下に、フィーダ機能付の振動スクリーンを設置すれば、篩い分けの強化が可能と考えられる。

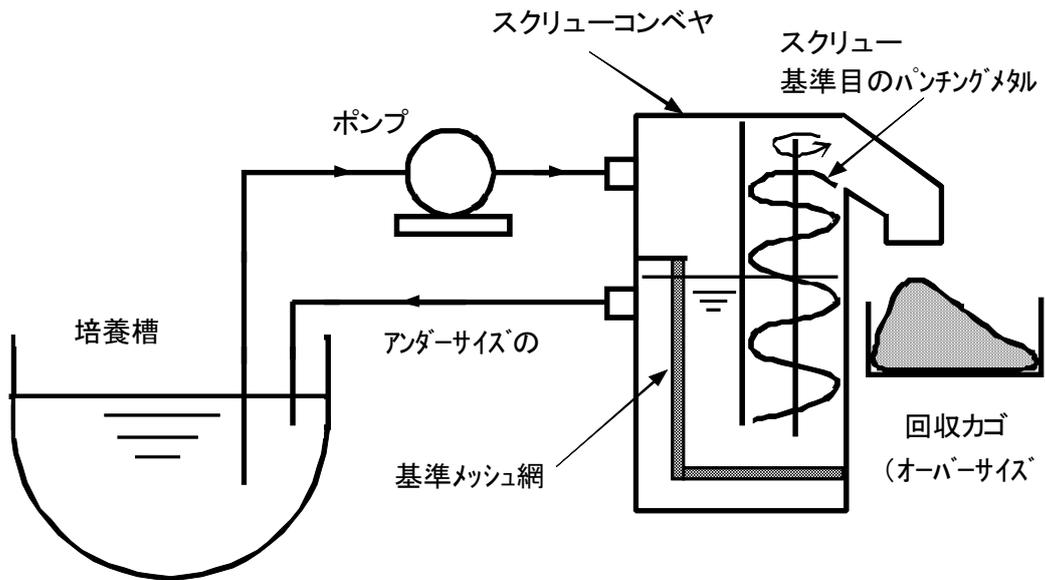


図 3.6.1-4 回収装置アイデア (4)

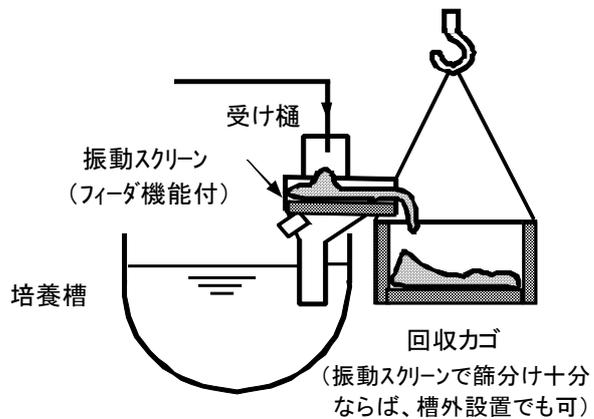
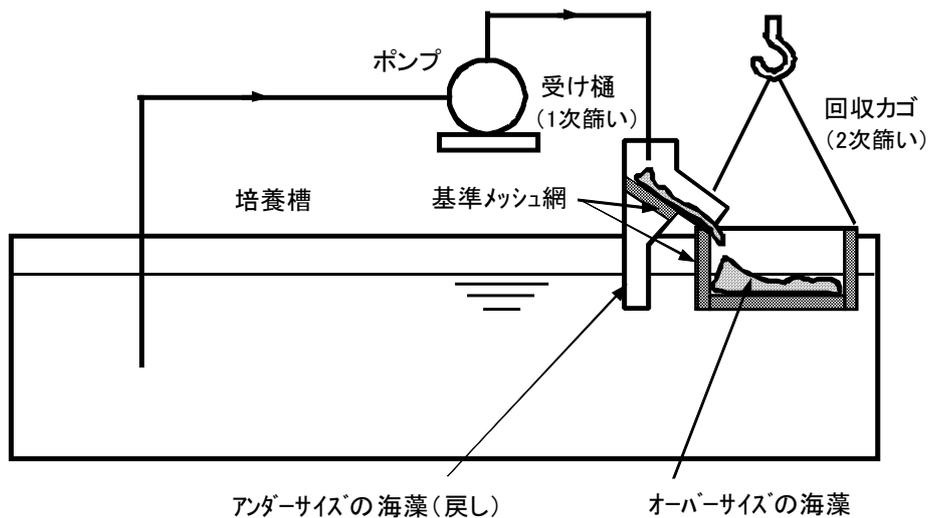


図 3.6.1-5 回収装置アイデア (5)

図 3.6.1-6 は、搬送機のベルト等に固定された基準メッシュ製のカゴがにより、選別・回収する

方式を検討したものである。カゴが外部で回転し、藻類を落下させる機構は試作して調整する必要がある。

これらの装置も図 3.6.1-4 の装置と同様に、サイズの選別機能が実用レベルまで確保できるかどうか、即ち、未成長の藻類が成長した藻類に付着して分離できない状態にならないかが課題となる。

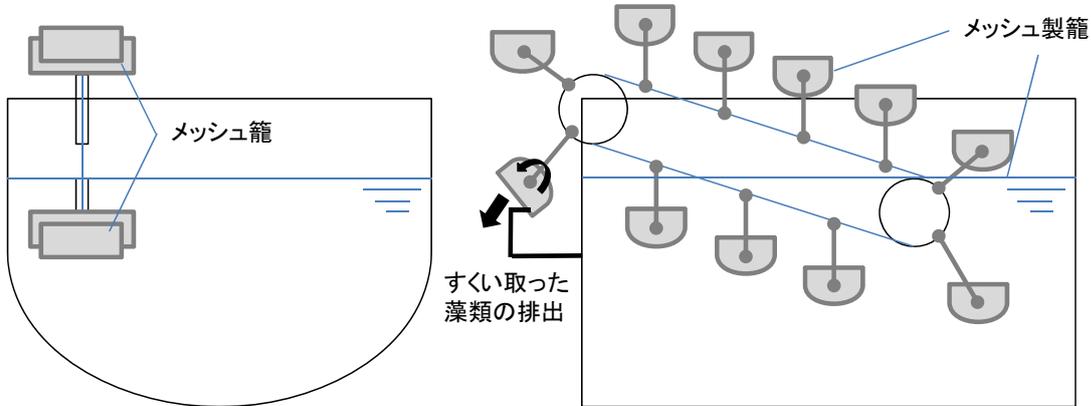


図 3.6.1-6 回収装置アイデア (6)

### 3) 流水抵抗利用方式

図 3.6.1-7 は、藻類を含んだ培養液を傾斜させたベルトコンベアにかけ流し、上方に進むベルトと水量のバランスで流水抵抗が比較的小さい藻類のみを元の水槽に戻す方式を検討したものである。

再生骨材工場で紙や木片、プラスチック類といった不純物の除去に用いられている方法であり、流水抵抗の大きい成長した海藻はベルト下側に流され、流水抵抗の小さい未成長の海藻はベルトを登りきる状態になることが期待される。流水中で分離する方式であるため、図 3.6.1-4～図 3.6.1-6 の装置で課題となる、サイズの選別機能、即ち、未成長の藻類が成長した藻類に付着して分離できない状態を回避できる可能性はあるが、実験機を製作し検証する必要がある。

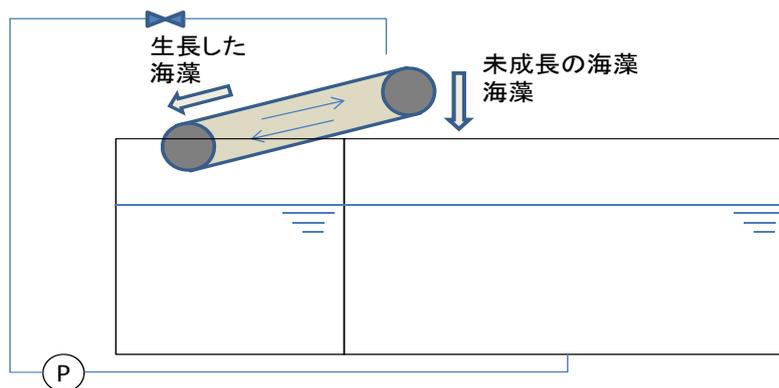


図 3.6.1-7 回収装置アイデア (7)

### 3.6.2 成長した藻類の分離機構の基礎検討

上記の 3.6.1 で最も大きな課題であるメッシュを利用した方式におけるサイズの分離機能について数種類のメッシュを用い、成長した藻類と未成長の藻類の分離の可否に関する基礎検討を行った。

### 1) 試験方法

図 3.6.2-1 に示すように、JIS Z 8801-1 に規定されている公称目開き 19mm、26.5mm、37.5mm のふるいを用い、試作した培養槽で成長させたスジアオノリをかけ流し、下部のバケツに流下する様子を目視観察した。

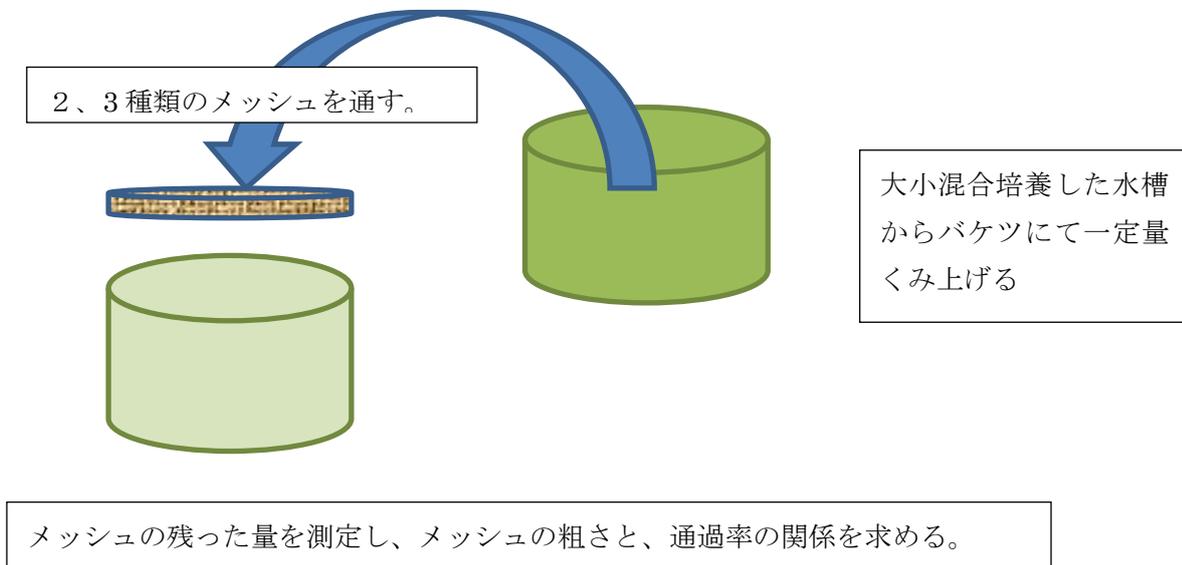


図 3.6.8 成長した藻類の分離機構の基礎実験の方法

### 2) 試験結果

ふるいによる大小の藻類を分離性状を調べたが、それにほとんど分離できないことが確認された。ふるいに大きい藻類が留まると、小さい藻類が大きい藻類に絡みつき、分離が難しい状況であった。

### 3) 考察

上記のとおり、いったんふるいに藻類が留まると分離が困難となるため、留まった藻類を速やかに回収する機構が必要となる。そのため検討したアイデアのうち、図 3.6.1-4～図 3.6.1-6 の装置は原理的に分離が難しいと考えられる。メッシュを利用した方式のうち、図 3.6.1-3 のようにオートストレーナによりメッシュ表面の藻類を逐次回収する方式であれば、藻類回収方法として適用できる可能性は残されていると考えられる。今後、本事業の中では検証できなかった熊手による捕集方式、および流水抵抗を利用した方式と合わせて検証することが望ましい。

### 参考文献

- 1) 非着床型藻類バイオマスによる CO<sub>2</sub> 高効率固定プラントの開発に関するフィージビリティスタディ報告書、(財)機械システム振興協会・(財)機械システム振興協会 平成 23 年 3 月
- 2) 中部大学試験報告 (内部資料) 平成 23 年 12 月

## 第4章 藻類培養試験（1t、15t水槽を対象とした試験）

### 4.1 対象とする藻類とその作製方法

海藻には緑藻、紅藻、褐藻の3つの分類群があり、その中でも高い生長速度をもつのは緑藻で、特にアオサ藻綱に極めて高い増殖速度をもつ種類が含まれている。アオサ藻綱の中でもアオサ属は富栄養化した内湾で大量繁茂し、この現象は赤潮 red tide になぞらえて green tide “グリーンタイド” と呼ばれている。グリーンタイドは世界各地で発生しており、環境問題となっている。近年では2008年夏に北京オリンピックのカヌー会場となった青島沿岸で世界最大級のグリーンタイドが発生した。そのとき、600km<sup>2</sup>の海域を緑藻が覆い、100万トン以上の緑藻バイオマスが回収された。このグリーンタイドを引き起こした緑藻は、アオサ属のスジアオノリという種類であることがわかっている。日本では、東京湾、博多湾、大阪湾など大都市近郊の内湾で、アナアオサ、ミナミアオサといったアオサ属がグリーンタイドを発生させている。グリーンタイドを起こすアオサ属は極めて高い生産性をもつので、藻類バイオマスの生産にはこの属を使うのが適当である。

表 4.1-1 アオサ属の日間生長率<sup>1)</sup>

種名	日間生長率平均±標準偏差%(n=5)
ミナミアオサ	59±6.1
リボンアオサ	60±5.3
アナアオサ	45±5.3
スジアオノリ	61±4.3
ホソエダアオノリ	112±3.0

培養条件：温度 20℃,光,100μmol/m<sup>2</sup>/s,300mL-ES 培地,通気培養



図 4.1-1 採集されたホソエダアオノリ<sup>1)</sup>

日本の代表的なグリーンタイド種であるミナミアオサやアナアオサを含むアオサ属5種の日間生長率を表1に示す。ミナミアオサ、リボンアオサ、アナアオサ、スジアオノリは平均45-61%の日間生長率であるのに対し、ホソエダアオノリは112%と非常に高い日間生長率である。ホソエダア

オノリの藻体は細く枝分かれの多い形態をしており(図 4.1-1)、徳島県吉野川河口汽水域や高知県浦ノ内湾で夏に大量繁茂する種類である。ホソエダアオノリのこの高い生長速度は、海藻バイオマスを生産するとき有利である。従って、本研究ではホソエダアオノリを主要実験材料として選定した。

不稔性、難稔性といった生殖細胞(孢子)形成を起こしにくい性質をもつアオサ種では、藻体をちぎって栄養繁殖させることで容易に陸上タンク養殖を行なえる。しかし、ちぎって増やせる種類は限られている。ホソエダアオノリを含む多くのアオサ属では、栄養繁殖のみで藻体を生長させ続けることができない。アオサ属では数 10cm に達した藻体は、縁辺部分から孢子を放出し、その空になった部分が脱落して消失するので、孢子放出が起こる度に小さくなっていく。また、藻体をちぎって増やそうと藻体を細断化すると、それが刺激となり、孢子形成が誘発される。孢子形成を防ぐことがバイオマス消失を防ぐ重要な課題となる。孢子化を防ぐには、種苗に幼体を使う方法がある。大きく生長した藻体では孢子形成が起こりやすいが、生長初期の幼体では起こりにくい。この性質を利用して、繰り返し孢子から藻体まで育てて収穫する方法が 1 つの解決策である。

天然海域で行なわれているような孢子をロープや網などの基盤に付着させ、タンク内に固定して養殖すると、タンクを 2 次平面的に使用することになり、収容できる藻体量が少なくなってしまう。また、タンク内の光環境が均一でないので藻体の生長にむらができるといった問題が生じる。これらの問題を解決するためにタンク内に藻体を固定しない非着床型藻類の培養技術が必要となる。

以上のような問題を解決し、実用化されている非着床型の藻類培養技術として、孢子集塊化法(孢子及び発芽体の集塊化による海藻養殖法：特願 2000-404228)がある。孢子集塊化法では、孢子の段階で複数の藻体が互いに連結するように実験室で操作し、孢子(または発芽体)の集塊を大量に作る。アオサ属では 10cm 程度に生長した藻体を数 mm の藻体片に細断して培養することで孢子形成を誘導できる。通常、細断化から 2~3 日後に孢子が藻体片から放出される。図 4.1-2 に放出された孢子の写真を示した。

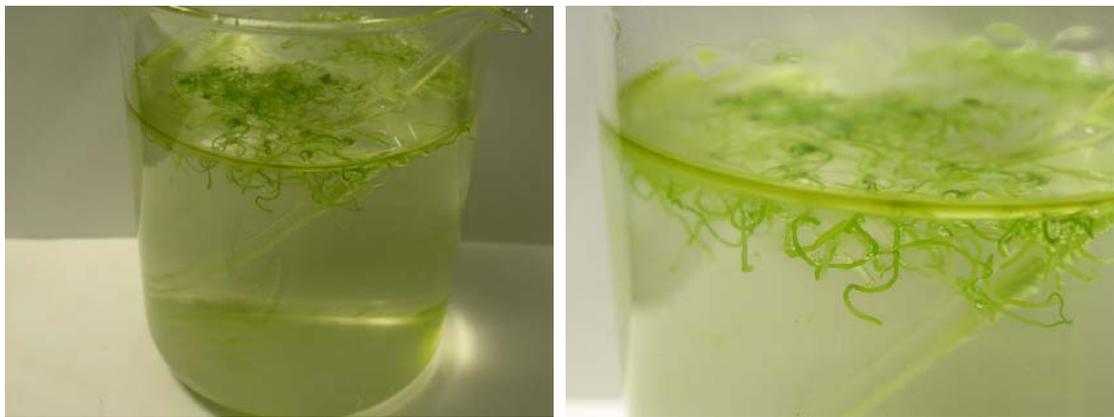


図 4.1-2 藻体片の培養による孢子放出の誘導(左写真)。孢子は放出されて水表面周縁に集合して黄緑の線として観察できる(右写真)<sup>1)</sup>

孢子には走光性があり、光に反応して集合する性質をもっている。それを利用して、孢子を集める。蛍光灯下に培養容器を置くと図 2 右のように、水表面周縁部に光に反応して孢子が集まってくる。これをピペットで集め、滅菌海水中を泳がせることで単離する(図 4.1-3)。

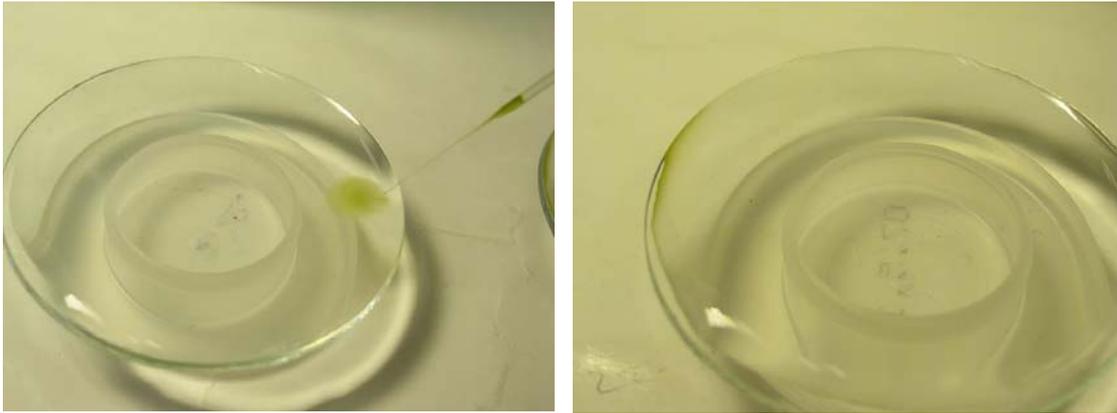


図 4.1-3 ピペットで集めた胞子を滅菌海水中で泳がせ単離. 右写真では左側に光源として蛍光灯があり、光源とは逆の右側に胞子を慎重に注入. 数分後、光に集まる性質(正の走光性)をもつ胞子は左側に移動し水表面周縁の左側に集合(左写真)<sup>1)</sup>

単離された胞子を高濃度でシャーレに播種し、培養することで、胞子同士が互いに接触し、発芽体のマットを形成する。形成された発芽体マットはシャーレから引き剥がされ、ミキサーで粉砕されて、直径 1mm 以下の発芽体(胞子)集塊となる。作製された発芽体集塊は養殖用種苗として懸濁液状態で培養瓶に長期保存できる。養殖種苗は培養室のフラスコで拡大培養され、藻体長 5mm 以上の幼体集塊にまで育てられる。そうして作製された幼体集塊を図 4.1-4 に示す。

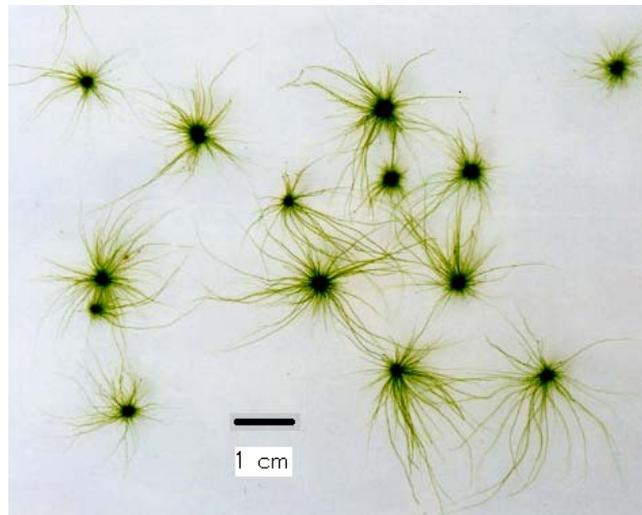


図 4.1-4 アオノリの幼体(発芽体)集塊<sup>1)</sup>

これらの幼体集塊を水槽内で海水の注水または通気によって攪拌しながら浮遊させて、培養試験を行なった。

## 4.2 これまでに得られている藻類の増殖特性

<水温、光量、塩分>

ホソエダアオノリの最適培養条件をもとめるため、水温、光量、塩分を変化させて室内培養実験を行なった結果を以下図 4.2-1~3 に示す。この実験では、藻体長 5-10mm に育ったホソエダアオ

ノリ藻体 8 個体ずつを 300mL 培地(海水を栄養補強した ES 培地)に入れ、培養条件毎に 4 日間通気培養して藻体長の変化を記録した。

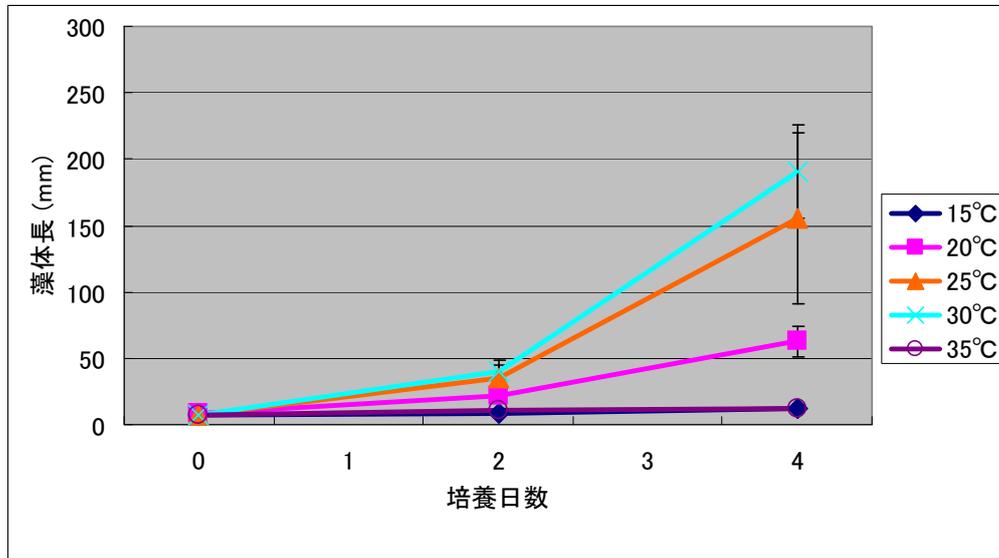


図 4.2-1 水温別培養試験の結果<sup>1)</sup>

水温別培養試験では 15°Cから 20°C、そして 25°Cと、水温が上がるにつれて生長量が大きくなり、25-30°Cで藻体長が最大となった。35°Cの高温ではほとんど生長しなかった。

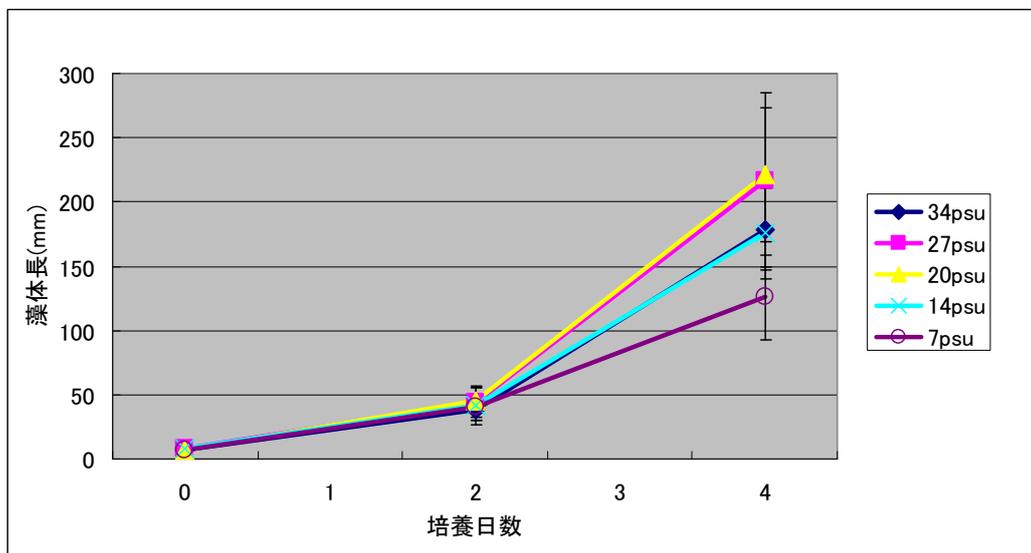


図 4.2-2 塩分別培養試験の結果<sup>1)</sup>

塩分別培養試験では 14-34psu の範囲で有意差なく高い生長量を示し、その範囲より低塩分の 7psu では生長量が低下した。

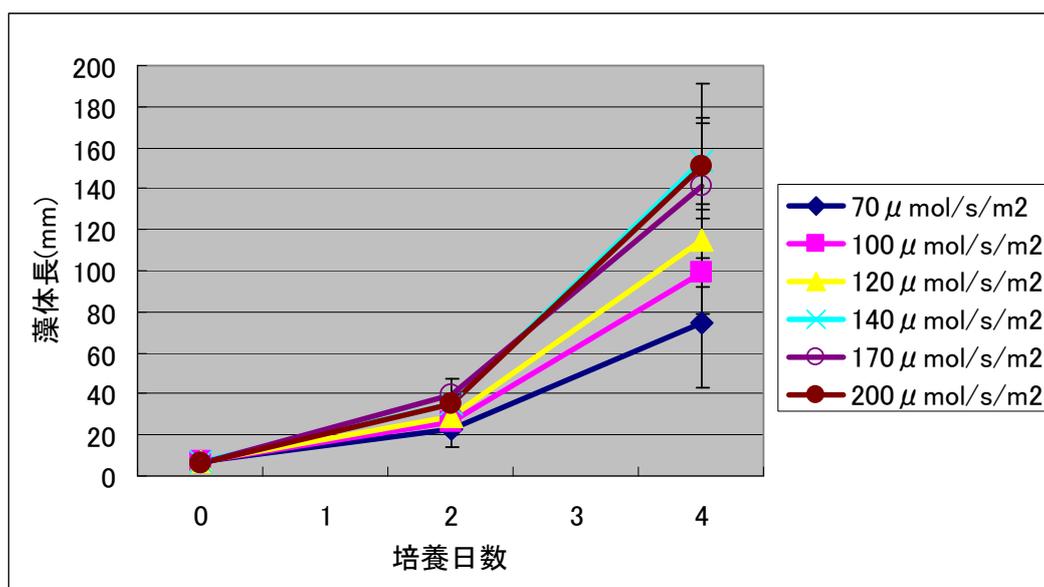


図 4.2-3 光量別培養試験の結果<sup>1)</sup>

光量別培養試験では 70 から 100、120、140μmol/s/m<sup>2</sup> まで光量が多くなるにつれて生長量が増加し、140μmol/s/m<sup>2</sup> 以上ではそれ以上生長量が増えることはなかった。

以上の結果から、ホソエダアオノリの最適な培養条件は

(水温)25～30℃

(塩分)14～34psu

(光量)140μmol/s/m<sup>2</sup> 以上

と考えられた。

<点滅光>

大型水槽の上面から光照射して水槽内で海藻集塊が循環して生長するとき、それら海藻集塊は、底面付近で光量が減衰し、上面で光量が高くなるという光環境を繰り返し経験することになる。水槽を大型化していくときの収量を見積もるためには、このような光量変動が海藻の生長に与える影響を調べる必要がある。大型水槽内で浮遊する海藻が受ける光量変動を擬似的に再現するために点滅光照射試験を実施した結果も示しておく。

表 4.2-1 点滅区の点灯と消灯の時間間隔<sup>1)</sup>

点灯	消灯
5 秒	5 秒
10 秒	5 秒
15 秒	5 秒
3 分	3 分
6 分	3 分

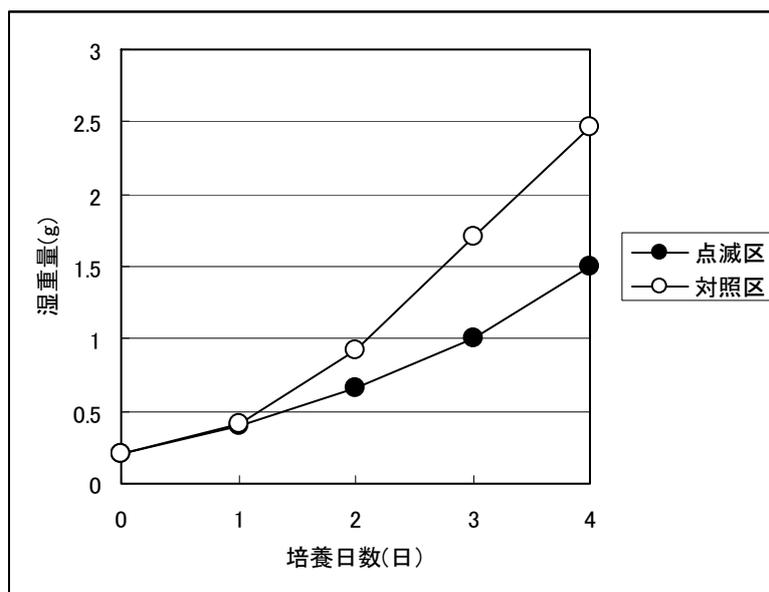


図 4.2-4 点滅区(点灯/消灯=5 秒/5 秒)と対照区(連続照射)の湿重量変化<sup>1)</sup>

藻体長 5mm 程度のホソエダアオノリ発芽体集塊を使用し、20℃に保たれた培養庫内に、培養容器(内容量 1 L、透明プラスチック、円柱形)を設置した。培養容器の両側から蛍光灯様発光ダイオードを片側 2 本ずつ配置して 1,000-1,800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の光量で照射した。対照区は明期/暗期=12hr/12hr で連続照射し、点滅区は明期の間光源を点滅させ、点灯と消灯の時間間隔を表 2 のように 5 パターン設定した。その結果を以下に示す。

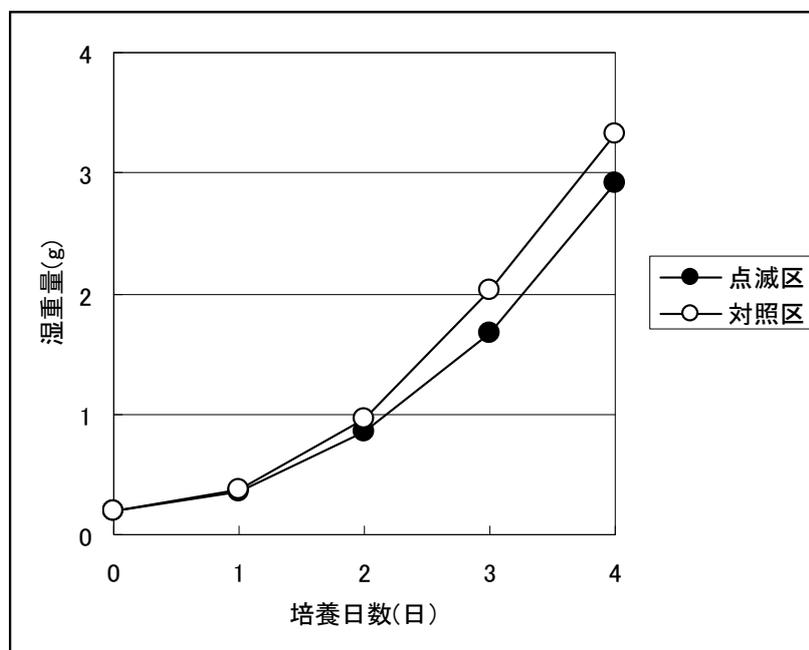


図 4.2-5 点滅区(点灯/消灯=5 秒/15 秒)と対照区(連続照射)の湿重量変化<sup>1)</sup>

図 4.2-4 に点滅区(点灯/消灯=5 秒/5 秒)と対照区(連続照射)の湿重量変化を示した。点滅により照射

される光量が半分になったことで、点滅区のほうは増加量が減少した。1日目から2日目で落ち込みが大きく、対照区の日間増加量 0.50g に対して、点滅区は 0.26g で約半分(-48%)になった。図 4.2-5 には点滅区の点灯時間を 15 秒に延長した結果を示した。点灯時間を長くすることで、増加量の落ち込みは-15%にまで回復した。さらに点灯時間を 10 秒に延長した場合では-31%であった。点滅区の点灯/消灯間隔を 5 秒単位から 3 分単位に長くした場合でも点滅区は対照区と比べて日間増加量は減少し、点灯/消灯=3 分/3 分で約-60%、点灯/消灯=6 分/3 分で-25%であった。明期における光源の点滅は、ホソエダアオノリの生長量を減少させる。点灯時間と消灯時間の時間間隔が同じ場合、つまり光照射時間が半分になると、およそ半分の生長量になった。このことは光照射時間がホソエダアオノリの生長量に直接影響していると考えられる。この考えは点灯時間が延長されるほど、生長量が回復することからも裏付けられる。水槽内で海藻が循環し、底面付近で光が届かない条件下では、生長が阻害されることが示唆された。しかし、実際的水槽内では、底面に近づくとつれて徐々に光量が減少するので、今回の試験のように明瞭な光照射の切り替えとは少し条件が異なる。

### 4.3 単年齢培養試験、混合密度一定試験

#### 4.3.1 試験条件、計測方法

<単年齢培養試験>

図 4 に示したようなホソエダアオノリの発芽体集塊をプラスチックおよび 30L タンクでエアレーションで海水をよくかき混ぜながら培養して湿重量 10g 程度の種苗を作製した。この種苗を野外に設置した 100L タンクで地下水(図 10 左写真)を掛け流しながら 1 週間ほど培養して 100g 以上に増殖させた。さらに 1t 水槽(ポリカーボネイト製円形、図 10 右写真)に移して湿重量の変化を記録した。使用された地下水は高知県四万十市下田地区で汲み上げられており、塩分 32psu、水温約 20℃で周年安定していた。また、100L 水槽および 1t 水槽のどちらもタンク容量の 3~5 倍の地下水を連続供給し、エアレーションした。これにより地下水の栄養分と水温が安定的に保たれた。



図 4.3.1-1 地下水汲み上げ施設(左)と 1t 水槽(右)

<混合密度一定試験>

図 4.3.1-1 に示すように時間をずらして種苗を 30L 水槽と 100L 水槽で作製し同じ 1t 水槽に次々と投入することで、年齢(大きさ)の違うホソエダアオノリを混合して培養した。1t 水槽内の湿重量

が 1kg 程度になったところで収穫し、450g を 1t 水槽に戻した。そして新規の種苗(長さ 2-3cm)50g を加えて合計 500g の初期量で培養を継続した。これを数日繰り返しておよそ 500g の密度を保って収穫量を調べた。

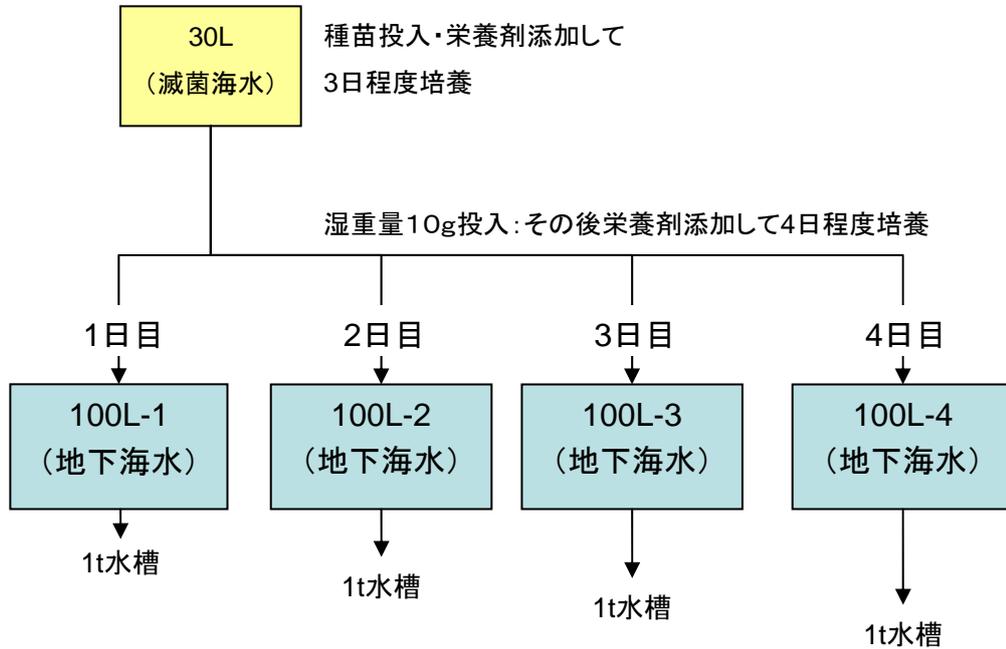


図 4. 3. 1-2 . 混合密度一定試験の培養手順

#### 4. 3. 2 試験結果とその考察

<単年齢培養試験>

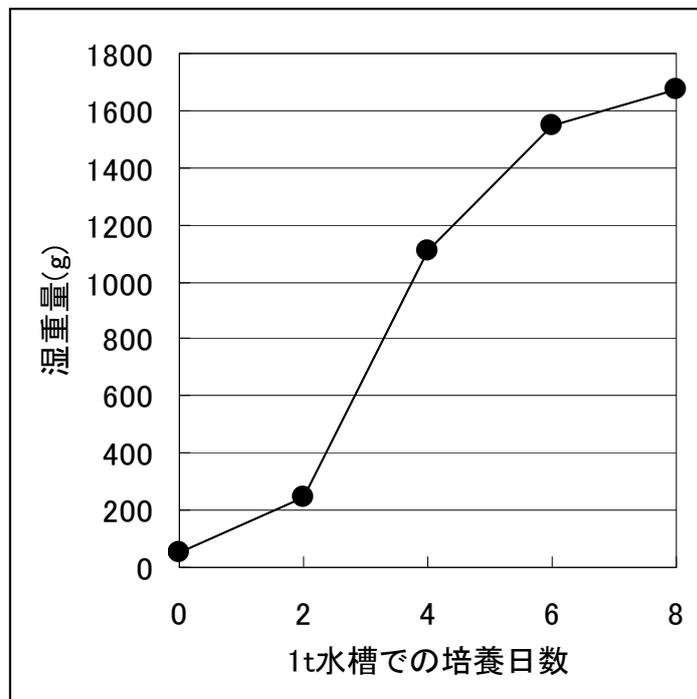


図 4. 3. 2-1 1t 水槽でのホソエダアオノリの湿重量変化

図 4.3.2-1 に示すように、1 トン水槽では 50g で投入された種苗が日間生長率約 2 倍で順調に増殖し、1.1kg を超えたところで生長率の低下が観察された。さらに 1.6kg あたりからほとんど生長しなくなった。最も増重量が大きかったのは 2～4 日目で、246g が 2 日で 1,107g に生長した。そのときの日間生長率 2.1 倍で、1 日に約 500g の湿重量の増量があった。

<混合密度一定試験>

図 4.3.2-2 に試験結果を示す。種苗(長さ 2-3cm)を湿重量 47g 投入し、1 日後に 45g、4 日後にも 45g を追加投入して、5 日目には 1,434g になって収穫した。そのうち 450g を水槽に戻し、新たに 54g の小さい種苗を加えて合計 504g で培養を継続した。次の日の 6 日目には 788g に増量していたが、同様の操作で 440g を水槽に戻し、68g の小さい種苗を加えて合計 508g で培養を継続した。次の日の 7 日目は 612g に増えていた。この日は 450g を戻して培養を継続し、次の日の 8 日目には 580g に増加した。長短混合した藻体の収量は 5-6 日目で 504g から 788g へと 284g 増加したが、6-7 日目で 508g から 612g へと増量は半分以下の 104g となり、7-8 日目でも増量は 130g にとどまった。水槽内には長い藻体がからまって存在し、生長が悪くなったと考えられた。

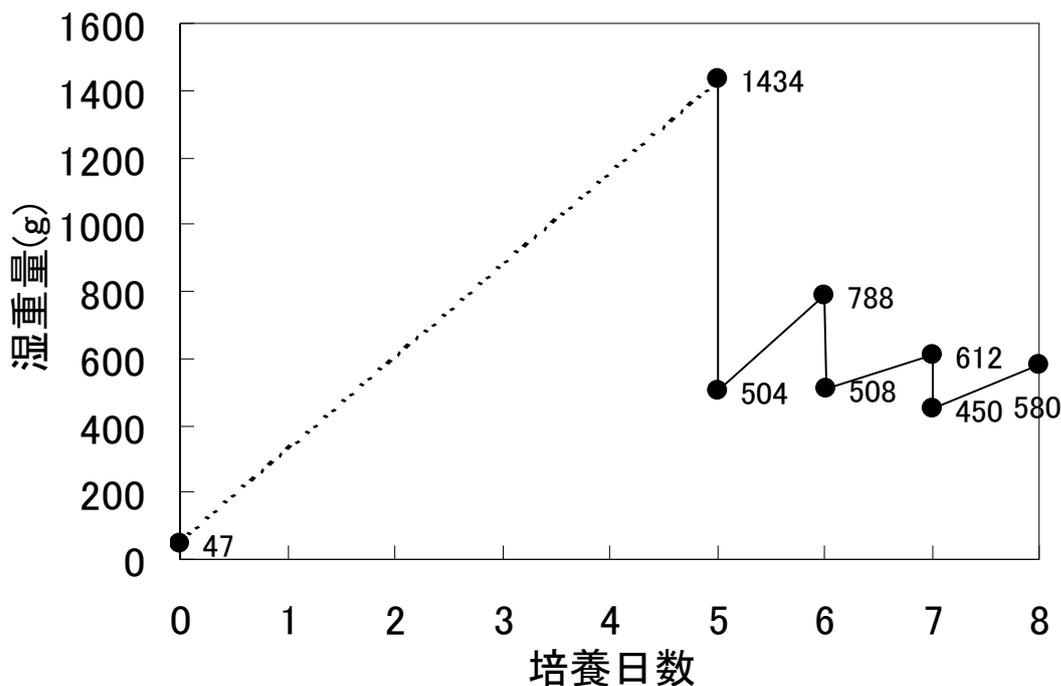


図 4.3.2-2 混合連続培養試験におけるホソエダアオノリの生長

#### 4.4 CO<sub>2</sub> 吹き込み培養試験

##### 4.4.1 試験条件、計測方法

4.3.1 で述べた 1t 水槽での培養方法に加えて、初期量数 10g 程度のホソエダアオノリを投入して培養する過程で CO<sub>2</sub> を添加した。添加日時は培養 3,4,6 日目の昼頃に pH メーターで 1t 水槽内が pH6-7 になるまで CO<sub>2</sub> を吹き込んだ。

#### 4.4.2 試験結果とその考察

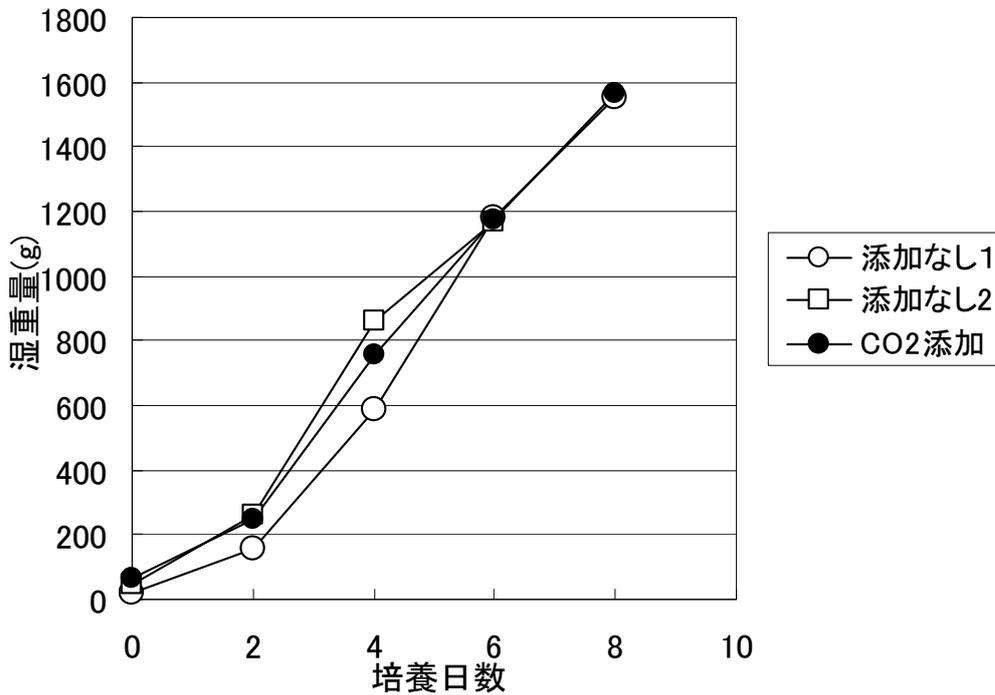


図 4.4.2-1 CO<sub>2</sub>添加条件における1t水槽でのホソエダアオノリ湿重量変化

培養日数	添加なし1(9/14-22)		添加なし2(9/24-30)		CO <sub>2</sub> 添加(10/12-20)	
0	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ
1	晴・曇り	曇り	晴れ	晴れ	曇り	曇り
2	雨	雨		曇り	曇り	雨
3	曇り	曇り	晴れ	晴れ	雨	曇り
4	雨	雨	晴・曇り	晴・曇り	晴・曇り	晴・曇り
5	雨	雨	晴・曇り	曇り	晴・曇り	曇り
6	曇り	雨	晴・曇り	曇り	晴れ	晴れ
7	曇り	曇り			晴・曇り	晴れ
8	晴れ	曇り			晴れ	晴れ

図 4.4.2-2 実験期間の天候状況

図 4.4.2-1 に示すように、CO<sub>2</sub>を添加しない場合の培養(2 ケース)も実施して CO<sub>2</sub>添加区と比較したが、大きな差は認められなかった。図 4.4.2-2 に試験実施日の天候状況を示す。「添加なし1」では雨と曇りの日が培養2日目から7日目まで続いて、特に4-5日目が雨であった。CO<sub>2</sub>添加区では「添加なし1」と同様に培養2-3日目に雨であり、一方4-5日目は晴れであった。「添加なし1」よりもCO<sub>2</sub>添加区のほうが培養期間中の天候はよかったが、どちらも同様の生長を示した。本実験は密閉水槽ではなく上部が開放されて空気と接している上、エアレーションをしているので、CO<sub>2</sub>を吹き込んでも空気中に追い出されて十分な効果が得られていない可能性があった。

## 4.5 大型水槽（15t 水槽）の培養試験

### 4.5.1 試験条件、計測方法

15t 水槽には 500g-1kg の初期重量でホソエダアオノリを投入し、地下海水の注水量 3 回転、エアレーションで海水をよく循環させながら、6 月～10 月の期間、毎月培養を実施した。

### 4.5.2 試験結果とその考察

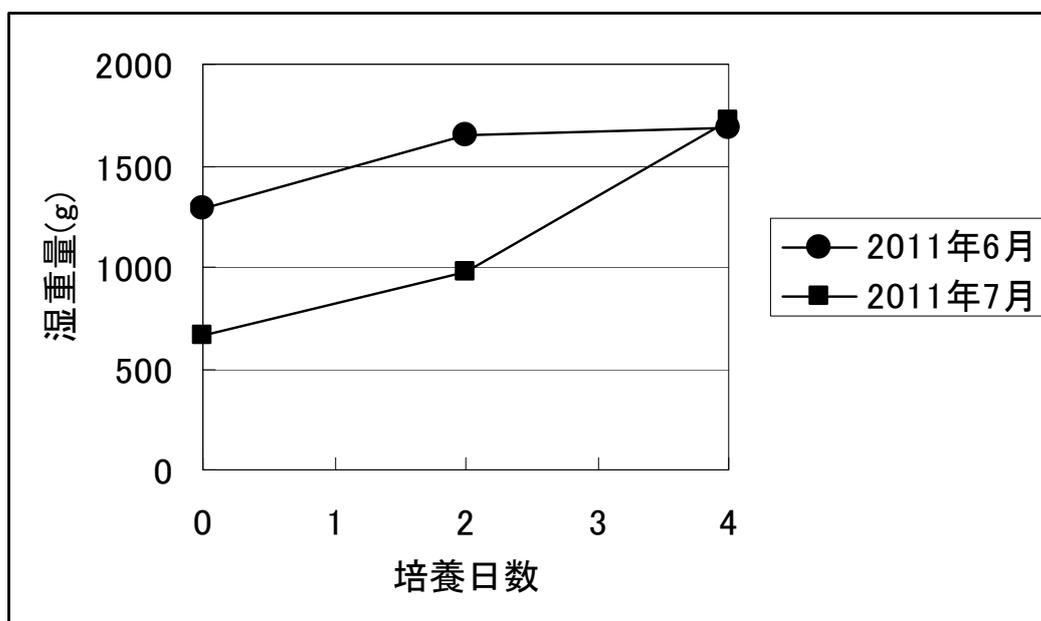


図 4.5.2-1 15t 水槽でのホソエダアオノリの湿重量変化

15t 水槽でのホソエダアオノリを培養した 6 月と 7 月の結果を図 4.5.2-1 に示す。15t 水槽でのホソエダアオノリの生長は、1t 水槽で計測された日間生長率 1.4～2 倍の生長率(図 12)よりも低く 1.3 倍以下であり、湿重量が 1.5kg 以上になると生長率が著しく低下した。1t 水槽では湿重量が 1kg を超えると生長率が低下するので(図 12)、15t 容量ならば 15kg までは良好な日間生長率(1.4 倍以上)で増殖すると期待された。しかし、その 10 分の 1 の 1.5kg の湿重量でも低い生長率になった。このような 15t 水槽での低い生長率は、栄養分不足と光量不足が考えられたが、1t 水槽との比較から栄養分の供給元である地下海水は十分量が注水されており、光量不足が問題になっているとみられた。また、15t 水槽の深さは 2.5m であり、このことが培養槽内に日光が十分に届かない原因となっている可能性があった。以上のような考えから、以下のように 15t 水槽の培養槽内の光量を計測する一方、培養槽内の光量を上げるように反射板を使って実験を行なった。

## 4.6 反射板を使った大型水槽（15t 水槽）の培養試験

### 4.6.1 試験条件、計測方法

4.5.1 で述べた培養条件に加えて、培養 5 日目から 9 日目までの 4 日間の昼に、15t 水槽内が明るくなるように約半時間ごと反射板の角度を変えて日光を反射した。

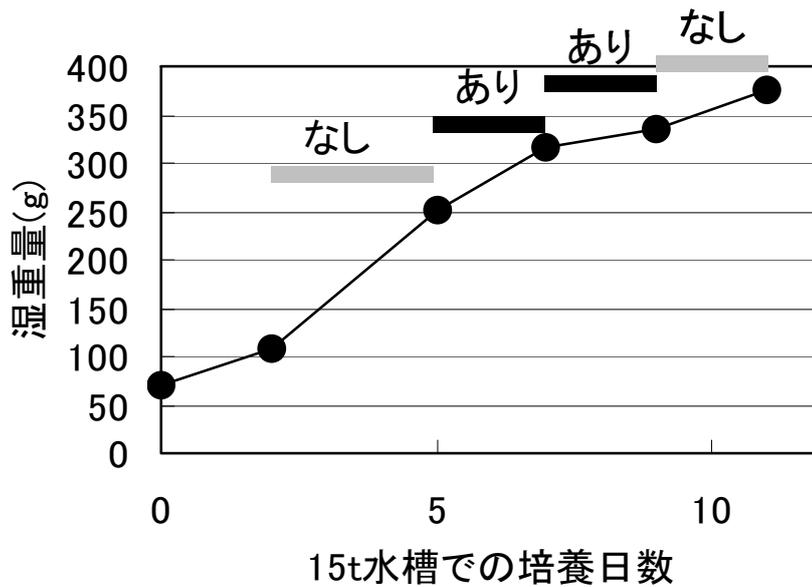


図 4. 6. 1-1 反射板を使用した場合としない場合の生長曲線

培養日数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
天気 午前	曇り	雨	台風	曇り	晴れ	晴れ	晴れ	晴・曇り	曇り	晴・曇り	晴・曇り	曇り
天気 午後	曇り	雨	曇り	曇り	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	晴・曇り	晴れ	晴・曇り	晴・曇り

図 4. 6. 1-2 実験期間の天候

#### 4. 6. 2 試験結果とその考察

図 4. 6. 1-1 に試験結果を示した。15t 水槽に対して、数 100g の非常に少量のサンプルであったにも関わらず、低い生長速度で推移した。反射板で日光照射を試したが、ホソエダアオノリの生長速度が上がることはなかった。特に照射板を使った 5～9 日目は晴れが続き、光条件はよかったが、それでも生長率は低いままであった。

#### 4. 7 まとめと今後の課題

野外に設置した 1t 水槽で地下海水を供給したホソエダアオノリの培養は、実験室で観察された増殖速度と同等の日間生長率 2 倍以上が達成できた(4.3.2)。また、ホソエダアオノリの室内培養では 1L 水槽で湿重量 1g を超えるあたりで生長速度が落ちることが示されているが、1t 水槽では湿重量 1kg 以上で生長速度が落ちた。どちらも水槽容量の 1000 分の 1 程度の湿重量まで藻体が増えると生長率が落ちることで一致する。つまり 1L 水槽と 1t 水槽では生長曲線が相似形でよく一致していた。1t 水槽でのホソエダアオノリ培養過程で計測された最も増重量が大きかったのは、500g を投入して 1 日後に 1,000g を超えたケースである。この場合、増重量が湿重量 500g(乾重量約 50g)

となり、1t 水槽の底面を 1 m<sup>2</sup> とすると 50g/day/ m<sup>2</sup> となる。これはかつて 10 年間で 140 億円の国家予算が投じられた細菌・藻類等利用二酸化炭素固定化・有効利用技術研究開発「ニューサンシャイン計画」<sup>2)</sup>の目標値である 40.8g/day/m<sup>2</sup> (=50g-CO<sub>2</sub>/day/m<sup>2</sup>)を上回る効率である。ニューサンシャイン計画では高度な機器であるバイオリクターが必要であるが、本研究では一般に市販されている透明のプラスチック水槽に地下海水を掛け流すという方法であった。それに対して、15t 水槽での結果は生長率が低かった。15t 水槽の深さが 2.5m あり、光量不足がこの結果を招いていると考えられた。大型水槽に拡大するときには、深さをよく検討しなければならない。

#### 参考文献

- 1) 非着床型藻類バイオマスによる CO<sub>2</sub> 高効率固定プラントの開発に関するフィージビリティスタディ報告書 (財)機械システム振興協会・(財)エンジニアリング振興協会(2011)
- 2) ニューサンシャイン計画「細菌・藻類等利用二酸化炭素固定化・有効利用技術研究開発」採集評価報告書 産業技術審議会評価部会 二酸化炭素固定化等技術評価委員会(2000)

## 第5章 試験結果のまとめと今後の課題

本実証試験の目的は、以下に示す項目を検証し、実用化に向けた課題を明らかにすることであった。

### ① U字型断面を有する大型培養槽の性能確認

ここでいう機能とは、「U字断面が培養水の循環方式としてスムーズに水流循環することができるかどうか確認すること」および、「設備電力消費量が、一般的に使用されている矩形断面よりも省エネルギーになっていることを確認すること」である。

### ② 上記水槽の特徴を活用して、大型藻類（ホソエダアオノリ等）の目標生長率として

1kg-wet/m<sup>2</sup>・日を達成するためのパラメータを明らかにして、今後に向けた実用培養槽の設計に反映できる課題を解決すること

### ③ 高効率培養方式の1つの方法である混合培養（大小の藻類を同一水槽で培養可能かどうか）の可能性について検討すること

### ④ CO<sub>2</sub>の添加効果を明らかにすること

これらの点について、検討結果をまとめると以下のようなものである。

## 5.1 大型培養槽の性能と課題

大型培養槽の機能については、以下の観点から評価した。

### 5.1.1 水槽形式について

今回試作したU字断面水槽（円筒形断面）は培養水の循環に必要な設備動力からは非常にすぐれた断面形状であることがわかる。U字側面に沿って培養水がスムーズに層流で回転循環することが試験で確認されており、これは循環ポンプ動力の節減に有効である。循環ポンプの動力量で見れば、通常の矩形断面の水槽の数分の一程度の電力量で培養液を循環させることが可能である。

留意すべきは水槽の深さであり、一般的な長方形水槽では、開口平面積（受光面積）に対して深さが深すぎると、日照条件により、水槽下部まで十分な光を到達させることができない。今回のような平面形状での試験値から予想すると、自然光（屋外での日射条件のもと）のもとでは約1m程度の深さが限界であると判断される。これより深くなると、日射条件の悪い領域は光量が不足してくると考えられ、藻類の生長に影響を及ぼす。深さが必要な培養槽の場合には、補助人工光の適用等の方法を考える必要がある。

### 5.1.2 設備電力量

培養システムで通常必要となる電力源としては、培養槽への給水用ポンプ、及びエアレーション用のポンプを挙げることができる。一般的に、培養槽への給水は、システム構成、設置場所等に大きく依存する。特に海水をどのような方法で水槽へ導水するかで大きく異なり、室戸の養殖システムのように深層水を利用する場合には、深層水くみ上げポンプ動力等も考慮すべきであろう。今回の試験地のように、地下海水を汲み上げて使用する場合はそのポンプ動力も対象になる。今回は、評価を単純化するため、元になる汲み上げシステムを別にして、培養システムの元栓までは水は供給されているものとしてその先の培養時に要する電力量での比較を試みた。結果として、U字断面

培養槽は通常の矩形断面培養槽より、大幅に電力量を低減させることが可能であることが明らかとなった。上述したように、これは循環流を比較的容易に作るができるためである。

したがって、今後実用システムを設計する場合でも本方式は有力な水槽形式であるといえる。また、エアレーションを水流の循環の補助手段として利用する方法も大いに有利であり、水槽の水流駆動システムとして両者併用方式が推奨される。

## 5.2 藻類の生長率評価

### 5.2.1 目標生長率の設定

大型藻類のとして、これまでは、スジアオノリが研究対象の中心であった。しかし、新たにさらに生長性のいい、ホソエダアオノリが発見されたため今回の試験ではこのホソエダアオノリを試験の対象として取り挙げた。ホソエダアオノリは徳島県吉野川河口域で夏に大量繁茂する種類である。室内試験では、スジアオノリは平均 145-161%の日間生長率であるのに対し、ホソエダアオノリは 212%と非常に高い日間生長率を示すことが確認されている。また、ホソエダアオノリのこの高い生長速度は、バイオマス燃料用藻類として生産するとき有利であると考えられる。

藻類の高効率培養を評価するうえでの成長率については、平成 2 年から 10 年間実施された「ニューサンシャイン計画「細菌・藻類等利用二酸化炭素固定化・有効利用技術研究開発」」を参考にして以下のように検討した。上記の研究において目標とされた数値は、 $50\text{g-CO}_2/\text{m}^2/\text{day}$  であり、これは「温帯地域森林の有機物生産量の 10 倍に相当する値」とされている。この  $50\text{g-CO}_2/\text{m}^2/\text{day}$  をアオノリの重量でいえばどれくらいなのかを換算してみる。

$$\begin{aligned} & 50\text{g-CO}_2/\text{m}^2/\text{day} \\ & =50\text{g}\times 12/44\text{-C}/\text{m}^2/\text{day}=13.6\text{g-C}/\text{m}^2/\text{day} \\ & =13.6\text{g}\times 3\text{-dw-aonori}/\text{m}^2/\text{day} \text{ (アオノリ乾重量 dw の 1/3 が炭素 C)} \\ & =40.8\text{g dw}/\text{m}^2/\text{day} \end{aligned}$$

すなわち、日  $40.8\text{g(dw=乾重量)}$  収穫されればニューサンシャイン計画の目標が達成できたことになる。高知県室戸岬で稼働している食用アオノリ生産施設では、タンク容量  $487\text{m}^3$  で、年間  $3.12\text{t}$  の収穫量が見込まれる。タンクの高さが  $1\text{m}$  とすると、面積は  $487\text{m}^2$  となる。したがって、 $3.12\text{t dw}/487\text{m}^2/365\text{day}=17.5\text{g dw}/\text{m}^2/\text{day}$  となり、食用スジアオノリが 1 平方メートル当たり毎日  $17.5\text{g dw}$  収穫されていることになる。これはニューサンシャイン計画の目標値の 42%に相当する。

今回取りあげたホソエダアオノリの生長速度は上述したように、日倍率 2 倍以上確保できそうということが室内試験結果等で得られている。従って、スジアオノリの代わりにホソエダアオノリを使用するだけでニューサンシャイン計画の目標値を上回ることができる。さらに、食用アオノリ生産施設では 1 つのタンク工程に 1 週間を費やしていたが、これを短縮して 1 日で収穫するシステムを構築してみる。システム構築には、日間生長率  $p(\%)$  と最終収量  $f(\text{g})$  の 2 つの値が必要となる。最終収量とは、藻類をタンクに投入して 1 日(24 時間)養殖後の藻類全量とする。つまり初期投入量を  $a$  とすると、 $a\times p/100=f$  という関係になる。この式から日間生長率が一定なら初期量を増やせば増やすだけ、最終収量も増える。これまで得られているデータから、実現可能な例を以下に試算してみる。

(例 1) スジアオノリを取り上げて、日間生長率 140%で最終収量  $100\text{g dw}$  の場合

必要なタンク面積 $=1+\Sigma(1/1.4)^n=3.5 \text{ m}^2$

$100/3.5=28.6 \text{ g dw/ m}^2/\text{day}$

食用アオノリ生産施設の 1 週間毎に収穫しているところを、毎日収穫するようにタンクシステムを組み替えることで、現行の  $17.5 \text{ g dw/m}^2/\text{day}$  から  $28.6 \text{ g dw/m}^2/\text{day}$  に改善できることを示している。

(例 2) 栄養塩添加で日間生長率 200%、CO<sub>2</sub> 添加で最終収量 200g dw になる場合

必要なタンク面積 $=1+1/2+1/2^2+1/2^3 \cdots =2.0 \text{ m}^2$

$200/2.0=100 \text{ g dw/m}^2/\text{day}$

この例は実験室内でのホソエダアオノリの生長データに基づいている。CO<sub>2</sub> 添加により最終収量を通常の 30-40%増しの 200g に引き上げることができる。つまりニューサンシャイン計画の目標値の 2.4 倍(=100/40.8)にまで生産性が上がることがわかる。

上記の試算例 2 を基にして以下の値（乾燥重量表記）を目標値に設定した。

（藻類の水分量は 90%程度であり、乾燥重量は湿潤重量の 1/10）

設定目標値 100 g dw/m<sup>2</sup> 日（湿潤重量で 1kg/m<sup>2</sup> 日）

この目標を達成するためには、以下の事項が基本要件になっているので、これらが達成できているか、もしくはどのような方法論で達成できるかを明らかにする必要がある。これが明らかになると、実用化プラントの仕様を設定することができる。

- i) 原位置環境においても 2 倍/日以上の上昇率の達成が可能なること
- ii) 藻類の培養密度が限界生長密度を超えて高密度になった場合、CO<sub>2</sub> の添加等により、増殖率を保持することが可能であること

（注）ここでいう限界生長密度とは、自然培養方式で藻類が本来の生長率で培養できる密度を意味しており、アオノリ類の場合水槽容量の約 1/1000 と考えられている。1 t 水槽の場合は 1kg の湿潤重量に相当し、これより増えると生長が阻害されることが指摘されている。（平成 21 年度海洋バイオマス研究コンソーシアム報告書）この現象を防止する有力な方法として、CO<sub>2</sub> の添加が挙げられる。

なお、上記目標の設定に際しては、室戸方式の多段階培養が前提になっているが、培養槽の合理化を図るためには、単一培養槽における混合培養方式も検討課題としては重要になる（必須条件ではないが）。このため、本試験では混合培養の可能性についても検討を加えた。ここでいう多段階培養方式とは、培養槽が藻の限界生長密度にならないように、藻の長さに応じて水槽を大型水槽に移し替えていく方法である。一方、混合培養方式とは、一つの水槽で、藻を移し替えることなく培養する方法を指す。それぞれの特徴については後述するとおりである。

## 5.2.2 実証試験データによる基本要件の検討

今回の一連の試験結果より、上記の基本要件については、以下のようにまとめることができる。

i) 生長率について

ホソエダアオノリを使用して試験した代表的データを図 5.2.2-1 に示す。(試験結果は、第 4.4 章にて既に示した通り)

本結果に基づくと、1 トン水槽では 246g が 2 日で 1107g に生長している。従って、日間生長率 2.12 倍で、1 日に約 500g の湿重量の増量があった。これは目標とする 2 倍の生長率を上回る結果を得ており、前節に示した目標値を上回っている。

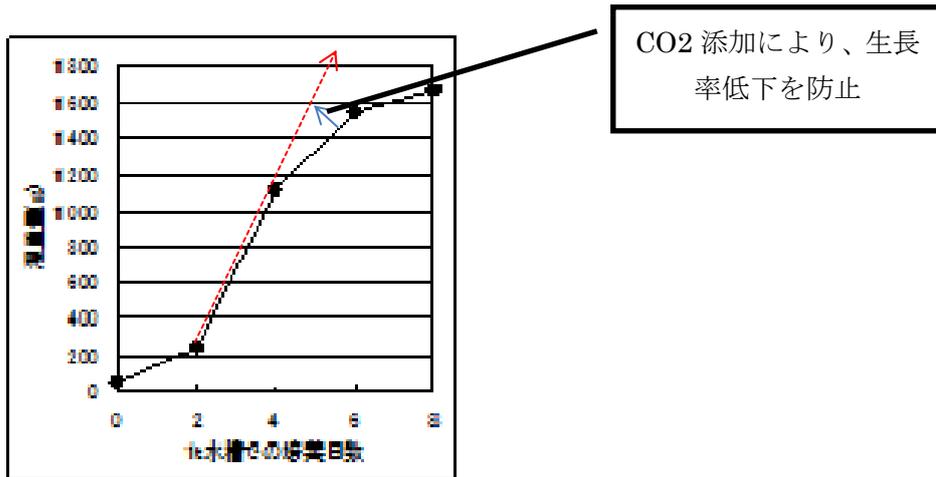


図 5.2.2-1 ホソエダアオノリの増殖試験結果

ii) 限界培養密度と CO<sub>2</sub> の添加による生長率低下の防止効果

さて、上記に示したホソエダアオノリの生長曲線では、最大生長量を示した 4 日以降生長率に低下傾向が示された。(図 5.2.2-1) この原因として、限界培養密度の影響を挙げることができる。ここで、成長が限界生長密度に達した場合に CO<sub>2</sub> を添加して成長率を維持できた場合の事例を図 5.2.2-2 に示す<sup>1)</sup>。

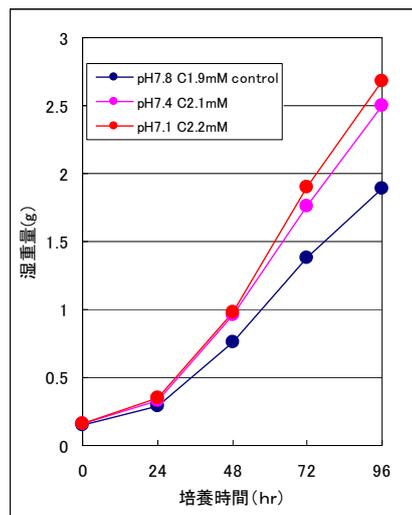


図 5.2.2-2 CO<sub>2</sub> の添加試験事例<sup>1)</sup>

本試験では、実験開始から 48 時間後から CO<sub>2</sub> を添加した藻類の生長量が明らかに高くなり、96 時間後には CO<sub>2</sub> の無添加のものに対して収量が 30-40% 増加している。特に実験後半にホソエダアオノリが増加して、密閉容器内が混んできた状態のときに CO<sub>2</sub> 添加効果が大きく出る。これは密閉容器内の栄養分や CO<sub>2</sub>、光といった資源が取り合いになるためと考えられ、限界生長密度を超えた場合には CO<sub>2</sub> の添加が有効な手段になりうることを示している。

今回の屋外の 1 t 水槽においても同様な試験 (4.4 章) を実施したが、顕著な増加を観察することが出来なかった。その理由として、屋外の開放系水槽では、添加した CO<sub>2</sub> が早期に大気中に気化逸散してしまった可能性が指摘された。従って、屋外のプラントにおいては、このような状況を防ぐ手だてが重要であると考えられる。

### iii) 混合培養方式について

表記の培養方式が藻類の生育環境として同一か差が生じるかを明らかにするために、生育時の密度環境が同じ条件のもと、

① 苗の状態から十分成長するまで同一の大きさの環境の中で生育した場合 (単一培養)

② 順次種苗を入れながら大小の大きさのものを混合して培養する (混合培養)

の比較試験を実施した。

その結果、小型水槽レベルでは、両者の試験結果には差が生じなかったが、1 t 水槽では、混合培養での成長率が単一培養よりも低下する結果となった。

その時の天候状態等にも試験結果は大きく左右されるので、一概に混合培養が不可であるとの結論を出すには早計かと判断される。しかし、混合培養は藻の回収方法にも課題が残されており、大小混合した藻の培養状態から、成長した大型種だけを回収することは非常に難しい。今後さらに検討を要する課題であると考えられる。

## 5.3 目標生長率を確保するための培養方法の提案

以上の試験結果より、今後の実用化に向けた培養槽の仕様として以下のような考え方を提案することが出来る。

### 5.3.1 培養方式

培養槽の構成として、現在室戸において実施されているスジアオノリの養殖と同等の多段階培養方式と、今回検討を試みた混合培養方式の 2 種類を挙げる事が出来る。それぞれの特徴と課題は以下の通りである。

表 5.3.3-1 培養方式の比較

方式	概要	特徴	課題
多段階培養方式	藻の成長に応じて水槽を大型水槽に移し替えていく方法。	生長に応じた水槽を複数個設置する。	・藻の移し替え作業が必要 ・管理が容易
混合培養方式	同一の水槽で、種苗から成長した大型株までを培養する。回収は、成長した大型種を選別して回収	・水槽を1つ用意すればよい。 ・常に種苗を投入し、成長したものを回収する連続培養が可能 ・設備電力が少なく済む	・大小の藻類が団塊にならないように管理する必要あり ・藻類の回収に工夫が必要（大型種のみ選別回収技術）

### 5.3.2 培養システム構成の提案

1 t 水槽を単位水槽として、前節で示した各培養方式に対応したシステム構成と、必要な仕様を以下に示す。なお、検討の前提として、以下の条件を設定した。

- ①生育期間 1 週間（初日に必要量投入し、以後毎日投入毎日回収の定常生産を想定）
- ②藻類成長率 2 倍/日
- ③定常生産状態で、1kg-wet/m<sup>2</sup>/day の生産量を確保する
- ④培養槽の深さは1 mとする。

#### (1) 多段階培養方式の場合

本方式の場合の必要水槽、及び藻量は表に示すとおりである。

表 5.3.2-1 培養方法及びシステム構成 1

多段階培養	経過日数	初期投入	2	3	4	5	6	7 (回収)	
	各段階毎の必要水槽容量 (m <sup>3</sup> )	0.032		0.063	0.125	0.25	0.5	1	
	全容量 (m <sup>3</sup> )	≒2							
	藻量 (kg)	0.032	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	

すべての段階で培養密度が限界密度を超えており、CO<sub>2</sub>、栄養塩等の補給が必要となる。

(2) 混合培養方式の場合

混合培養方式の場合、多段階培養を1つの水槽にまとめて培養すると仮定することによる培養槽の容量にすればよい。したがって、表 5.3.2-2 で与えられる。

表 5.3.2-2 培養方法及びシステム構成 2

混合培養	経過日数	初期投入	2	3	4	5	6	7 (回収)
	全容量 (m <sup>3</sup> )	≒2						
	藻量 (kg)	0.032	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2

すべての段階で培養密度が限界密度を超えており、CO<sub>2</sub>、栄養塩等の補給が必要となる。同様な方法を 15t 級の水槽に適用すれば、表 5.3.2-3 に示すような生産量が確保できる。

表 5.3.2-3 培養方法及びシステム構成 (15t 級の水槽の場合)

混合培養	経過日数	初期投入	2	3	4	5	6	7 (回収)
	全容量 (m <sup>3</sup> )	≒15						
	藻量 (kg)	0.2	0.4	0.8	1.9	3.75	7.5	15

すなわち、初期投入量を 200g で水槽を稼働し、1 週間後に定常生産に入れば、毎日 15Kg のホソエダオノリの生産が可能になる。これは、ちょうど 1kg-wet/m<sup>2</sup>/day の生産量に相当する。

ただし、15t 水槽程度の大きさになると、初期投入の種苗量が 200g 程度も必要になるため、この種苗作成用の水槽が別途必要になることを前提とする。

いずれの培養方式においても、目標生産率を達成するためには、培養槽の密度が自然培養における限界生長密度 (1/1000 程度) を超えるため、CO<sub>2</sub> の吹き込み、栄養塩補給等による培養環境の維持を図る必要がある。また、混合培養の場合は特に、成長した藻類の回収を効率的に行うことが、所定の生産量を確保するうえで重要である。

参考文献

- 1) 海洋バイオマス研究コンソーシアム平成 21 年度報告書 (内部資料) 平成 22 年 3 月

## 第6章 藻類バイオマスの市場展開の方向性

### 6.1 社会的背景

昨年、発生した 3.11 東北大震災以来、世の中は持続可能な社会を目指す方向に大きく舵をきった。藻類のうちで陸上の植生に比較して繁殖性の高い海藻の光合成を利用して、炭酸ガスを高効率に固定・再資源化する技術開発システムを目指すという本プロジェクトの目的は持続可能な循環型社会に向けて期待されるものである。更に本システムが完成すれば気候変動に影響されない安定した海洋牧場構想が可能となる。

藻類バイオマスの研究は 10 年以上前から、米国やオランダ等世界的に研究が進められている。実用化については高知大学が栄養分の高い深層水を使用して海藻を培養し、それを利用して事業者が食材用として空港等で販売しているなどの例がある。

地球温暖化対策で種々の炭酸ガス固定化の技術開発が行われているが、本プロジェクトの藻類の光合成による排ガス中の高濃度で排出される方式は、処理量から考えて炭酸ガス固定の主たる方式ではない。

本プロジェクトの実用化目標は発電所や製鉄所等の高密度のエネルギー供給プロセスから生じた CO<sub>2</sub> を低密度の太陽エネルギーにより光合成反応を利用して、固定化・再資源化するという、処理量としてはバランスのとれないプロジェクトである。従って、将来へ向けての実用化のビジネスモデルとしては図 6.1-1 に示す「海藻バイオマスコプロダクションシステム」の構築を目指すことが妥当と考える。特にエネルギー転換が実用化レベルで可能となればその効果は大きいと考える。

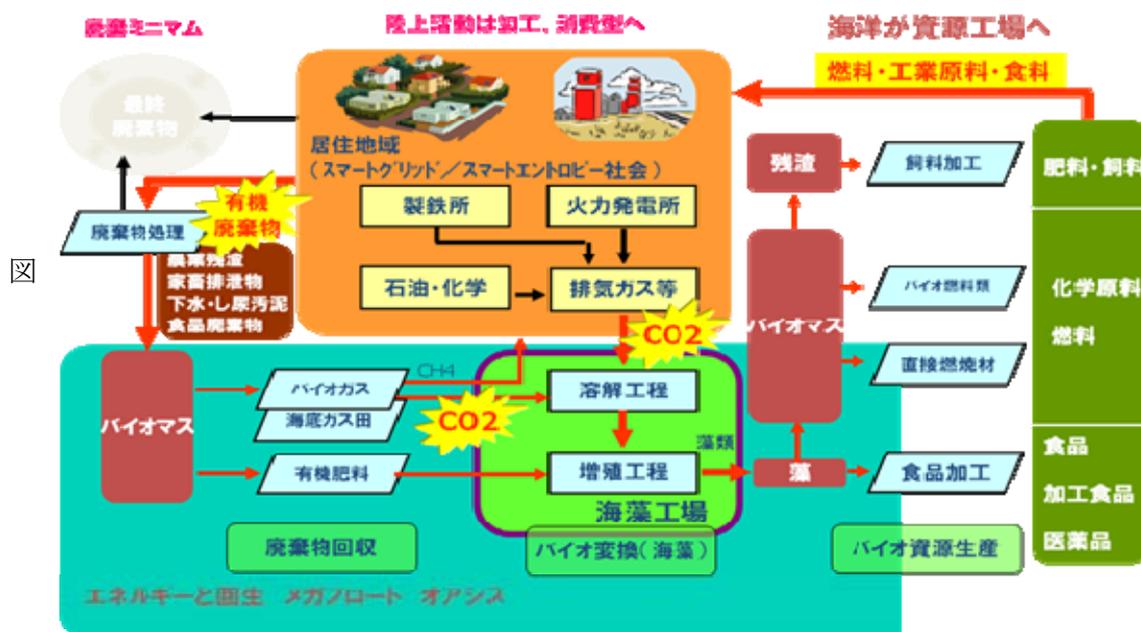


図 6.1-1 海藻バイオマスコプロダクションシステム全体像

(出典：(財)機械システム振興協会・(財)エンジニアリング振興協会「非着床型藻類バイオマスによる CO<sub>2</sub> 高効率固定プラントの開発に関するフィージビリティスタディー報告書」平成 23 年 3 月)

## 6.2 対象とすべきシステム構成

本プロジェクトは図 6.1-1 全体像に示すように、発電所や製鉄所の従来は大気中に放出されている排ガスを取り込み、植物の光合成機能を利用して海藻を培養・繁殖させて、海藻の有効活用をさせようという構想である。具体的な開発本プロジェクトはシステムの根幹をなす海藻の光合成による培養・繁殖のシステムを確立することにある。

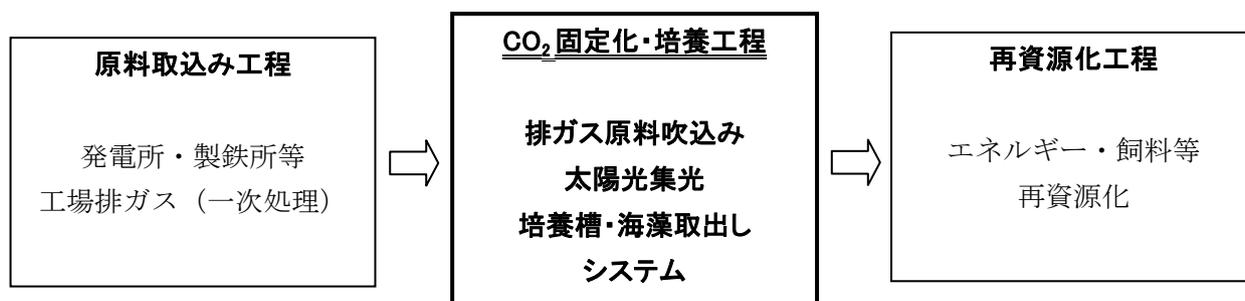


図 6.2-1 システム全体フロー図

システムをフロー図として表すと図 6.2-1 のようになる。今回のプロジェクトで確認したシステムは CO<sub>2</sub> 固定化・培養工程である。この工程のシステム構成について本プロジェクトにて確認した成果を詳述する。

### 1) 排ガス原料吹込みシステム

工場排ガスは、一般的に排ガス処理設備で粉塵等の固形物等は除去されており、そのまま培養槽へ吹き込むことが可能である。吹き込みは溶解槽下部より通常のバブリング（穴あきパイプ等）で吹き上げるのが、海藻との接触及び培養水の循環の観点から重要であることが本試験で確認された。

### 2) 培養水の循環システム

培養水の均一化をはかるために培養水を循環すること及び培養水は適当な頻度で入れ替えて、必要に応じて栄養塩を注入すると、培養効率を高めることが本試験で確認されている。培養槽の形状によって種々の構成となるが、本試験に使用した横型円筒半割り形状では図 6.2-2 試験設備全体図で示されるようになる。循環槽を設けて、必要に応じて栄養塩を注入、循環ポンプで培養水の循環を行う。実用化設備では同図の下部にあるエアレーションより排ガスを原料炭酸ガスとして吹き込む。

### 3) 太陽光集光システム

本試験で太陽光の集光の重要性が再確認されており、三つの方法で試験を行った。

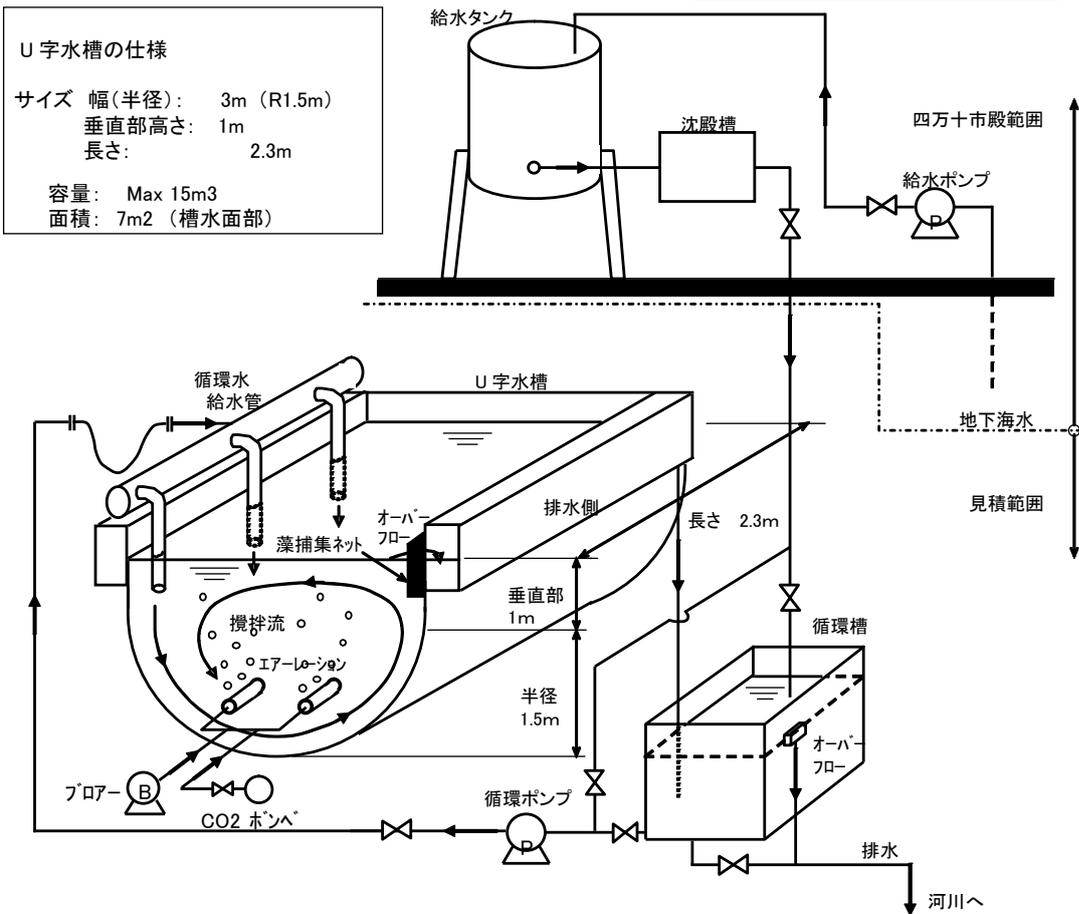
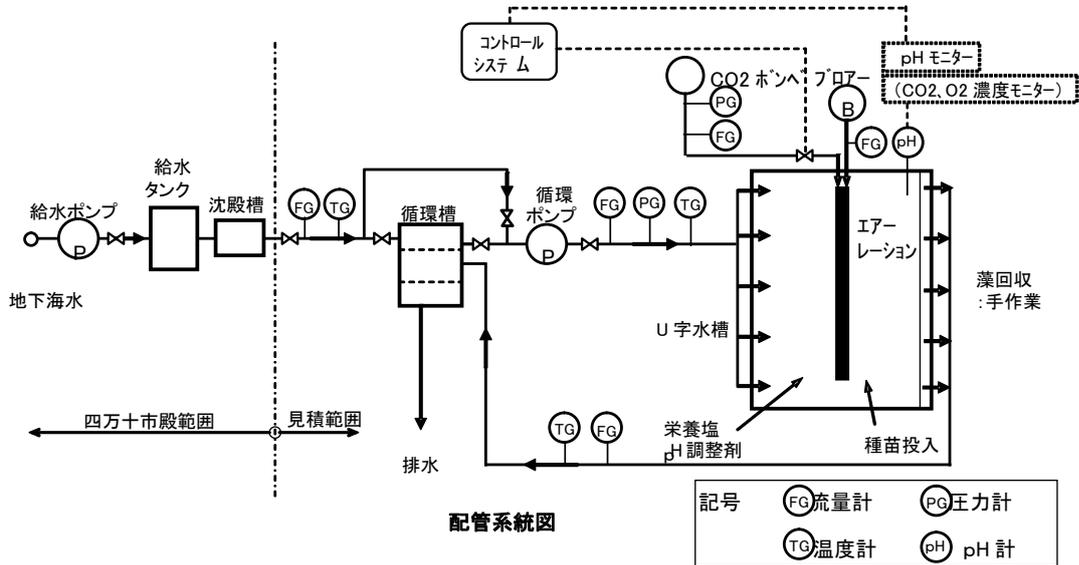
- (1) 培養槽の太陽光入射部分に反射鏡を設置して、太陽の軌道に合わせて反射面を移動させる方式。
- (2) 培養槽の内面に光を反射するシートを貼り付ける方式。
- (3) 予備培養槽として1トンのアクリル製の透明槽の方式。

結果は圧倒的に透明のアクリル槽使用が太陽光の集光に優れていた。エネルギー消費も伴うが、人工太陽光の方式等も考えられる。

実用化にあたっては集光技術を再度検討の余地がある。

4) 培養槽

本試験では横型円筒半割り形状と予備試験の亚克力製透明の縦型円筒形状を使用した  
 両方ともに採用可能との結論となった。但し、横型円筒半割り形状の場合は水深 1m程度を  
 限界として集光が有効な形状を検討の必要がある。



5) 海藻の収穫 (取出し) 方式

すくい網方式、棒での掻き揚げ方式を試験したが、どちらも適当な方法ではないとの結果であった。検討の結果、後工程の再資源化工程との連続性のある方式を選択するべきとの結論となった。

#### 6) 混合培養方式（連続運転方式）と多段階培養方式（バッチ方式）

培養プラントはバッチ方式が普通であるが、効率化と収穫量の向上が期待できる可能性のある連続運転方式とバッチ方式の連続運転化について検討を行った。結果は現状では多段階培養方式の半自動化が望ましい。

##### (1) 多段階培養方式（バッチ方式）の連続運転化

第5章5.2節で示すとおり種苗の成長日令に従い培養槽の大きさを順次大きくしていく。

このときに日令に従い成長した海藻を大きな培養槽へ移し替えることが、課題である（表5.3.3-1の課題欄参照）。この移し替えを連続運転化できれば、生産工程で有効である。図6.2-3に半自動で移し替えを行う方式を示す。

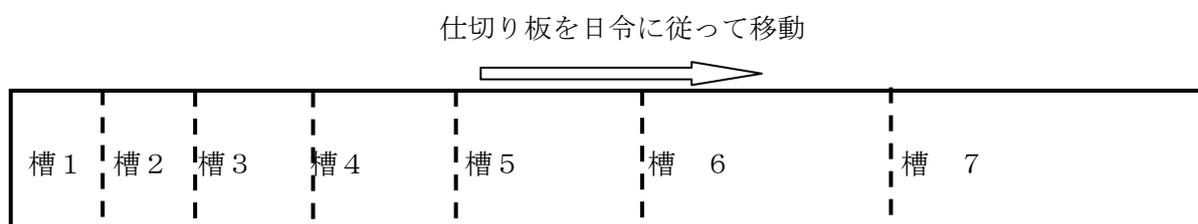


図 6.2-3 多段階培養槽の配置と移し替え方式模擬図

一日の作業は①槽7より、日令7日に成長した海藻を回収する。そして仕切り板を右に移動させて空になった槽1に種苗する。また、生産量は日令、容積、海藻量の関係を示す表5.3.2-1 培養方式及びシステム構成を参考にして、培養槽の容量を調節することにより可能となる。

##### (2) 混合培養方式

大きな培養槽一槽で連続運転を行う方式であるが、日令の異なる海藻を混合しても培養速度等には影響はないことは試験で確認されたが、日令7日の大型の海藻のみを回収する方法が課題となる。日令の浅い海藻を付着させて回収すると総合的な海藻の生長効率は明らかに落ちる。試験では前述5)で報告したが、条件を満たす大きさ選別回収方法が見出せなかった。

### 6.3 市場展開の方向性

二酸化炭素源である発電所や製鉄所の排ガス中の二酸化炭素の処理設備としての構想というのは、量的な問題で無理がある。しかしながら、海藻の光合成による二酸化炭素固定化の方式は、これまでも多くの人が言われているように将来的に有効な方法である。開発技術の事業化はいわゆる“死の谷”をどうやって超えるかにかかっている。ここでは、事業性を市場（マーケット）と事業主体の面から考えてみる。

#### 1) 海藻バイオマス・エネルギー分野

期待されるバイオマス・エネルギー分野では「非着床型藻類バイオマスによるCO<sub>2</sub>高効率固定プラントの開発に関するフィージビリティスタディー報告書(平成23年3月)」の3.7.2 バイオ燃料用供給の市場規模によると500億円/年の市場と試算されている。

- ① 55 万 t-CO<sub>2</sub> 固定 ⇒ エタノール 6,800kL 生産
- ② 4,000 万 t-CO<sub>2</sub> 固定/年 ⇒ エタノール 50 万 kL 生産
- ③ エタノール 50 万 kL × 100/L = 500 億円

2) 食品、飼料分野

- (1) 事業主体：漁協組合をはじめとする漁業関係者、地域振興関係者が考えられ、極めて現実的である。
- (2) 事業評価：漁業関係者にとっては海藻を食品や飼料として販売することは特別に新しい事業ではなくなじみがある。また、高知県の室戸では深層水の栄養分を活用した食用ノリ販売事業が成立している。将来的に、事業規模を大きくする方策として考えられる一つの方法は、調味料等を扱う大手食品会社と食品関連の商社がパートナーシップを組んで、海藻培養施設を日本全国及び中国市場へ展開することが考えられる。ビジネスモデルを図化すると図 6.2-4 となる。

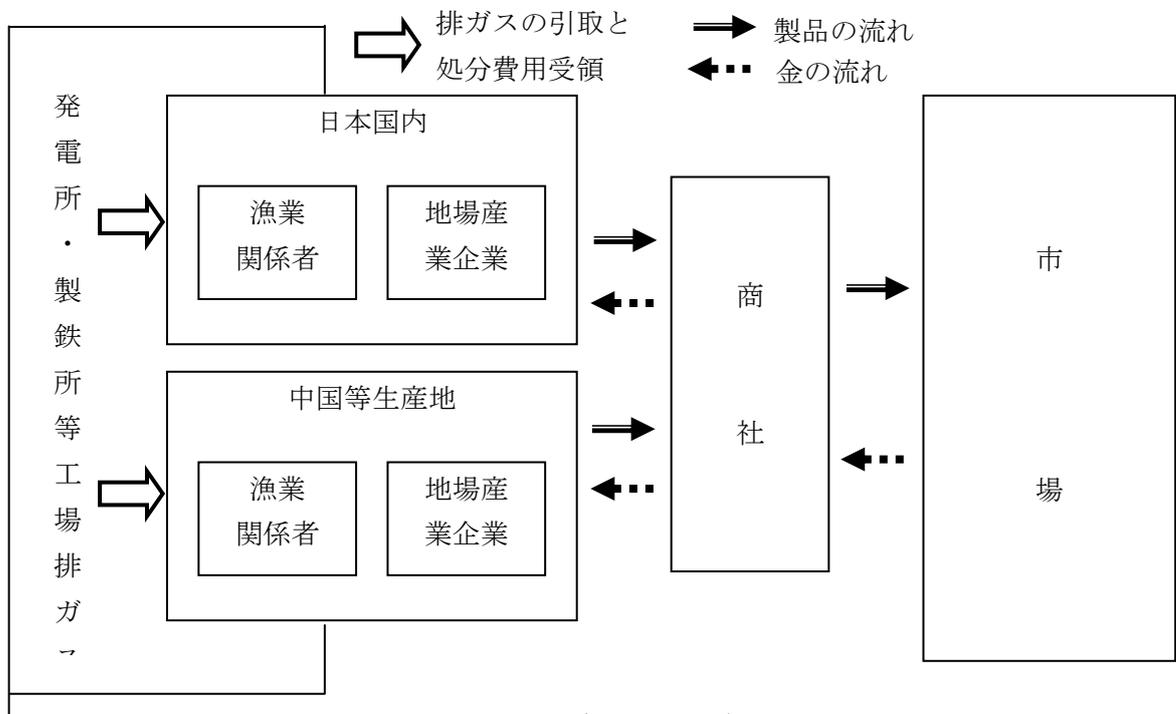


図 6.2-4 海藻関連食品事業ビジネスモデルイメージ

3) 総合的評価

以前より研究されていた藻類バイオマスの事業化は事業採算が取れないこととビジネスモデルが組めないことで事業としては本格化していない。しかしながら地球温暖化防止の観点、3.11 東北大震災による原子力発電への懸念等がクローズアップされており、今後炭酸ガス固定の問題と自然エネルギー確保の問題から、大きく展開される可能性がある。しかしながら、バイオ燃料への展開は技術的な課題が残されていることもあり、まず地域振興の観点から食品やハマチの養殖用飼料等の事業から開始するのであろう。図 6.2-4 に示すように東南アジアを含めて数百億円のビジネスにはなると思われる。

## 第7章 藻類培養技術の最新動向と今後の展望

今回研究対象とした浮遊集塊型の培養方法による藻類の大量培養技術は、可能性のあるものの、光子量を如何に槽内に導入するかが課題として残った。本章では、過去および近年に実施された大型藻類および微細藻類を対象とした光量子の増強に役立つ可能性があるものについて調査し、今後の展望を検討した。

### 7.1 大型藻類および微細藻類を対象とした光量子の導入法に関する調査

#### 7.1.1 透光性素材の利用

図 7.1.1-1 は、近年 NASA で開発された OMEGA System と呼ばれるものである<sup>1)</sup>。これは、透明の樹脂製の素材で作製されたバッグを連結したもので構成されており、廃水処理とボトリオコッカス藻 (Botryococcus) による炭素固定を兼ねたシステムとなっている。個々のバッグは、図 7.1.1-2 に示すような長方形のものであり、この中に藻類とともに処理された廃水を肥料として入れて増殖させる。廃水は浄化されて放水され、藻類が生産した脂質を BDF として利用することが想定されている。最新の情報は、長方形以外にも図 7.1.1-3 に示すような六角形のバックとしたものが開発されている。バッグ内の流体の攪拌は、波のエネルギーでバッグが揺すられて内部が流動し、光合成が効率よく行われると説明されている。

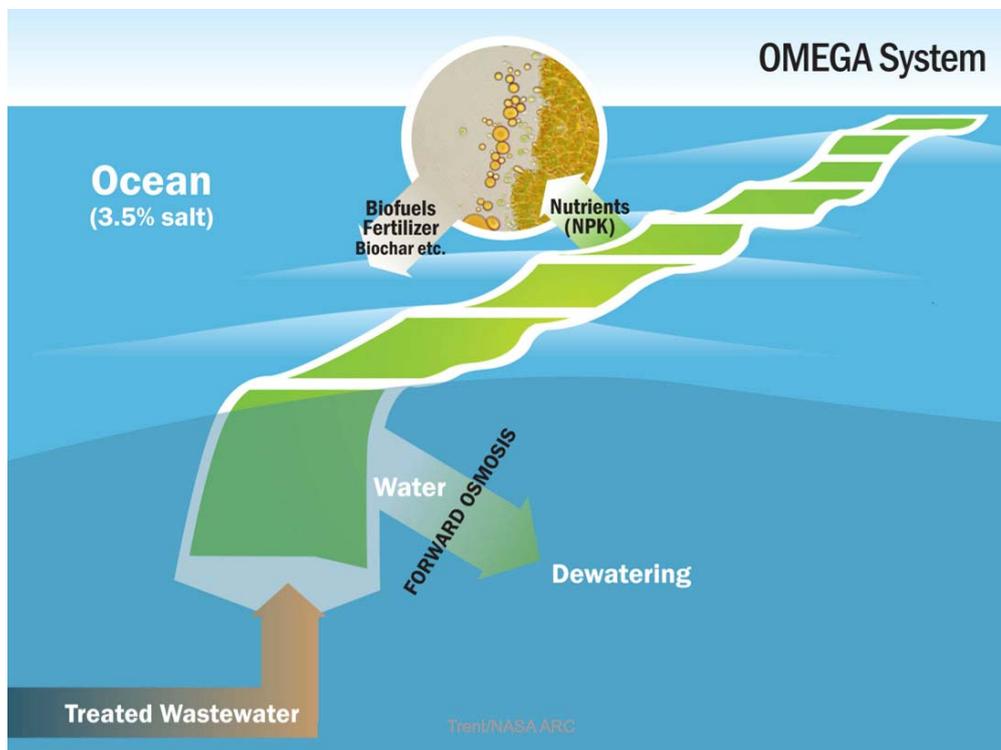


図 7.1.1-1 NASA OMEGA project の概要<sup>1)</sup>

(出典：NASA の Web サイト)

樹脂製のため耐久性に関する不安が残るが、Jonathan Trent 教授の説明では、補修は簡単であり、万が一バッグが破損して廃水が漏れいしても、周囲に生息する魚類が肥料を取り込んだ海水中のプランクトンを捕食するため、問題はないことが主張されている。

自然採光による光量の増強という意味では、有望な技術と考えられるが、日本の沿岸部や近海において同様の素材を適用できるかについては、バッグの破損等に伴うメンテナンスコストを含めて未知数であるが、透光性の素材を利用するという考え方は、本事業で研究開発した培養槽に応用する価値があると考えられる。



図 7.1.1-2 NASA OMEGA Project の模擬試験の様子<sup>1)</sup>

(出典：NASA の Web サイト)



図 7.1.1-3 NASA OMEGA Project 六角形モジュールの例<sup>1)</sup>

(出典：NASA の Web サイト)

### 7.1.2 人工光源の利用

ヤマハ発動機では、ヘマトコッカス藻（Haematococcus）からアスタキサンチンを抽出し、高生理活性物質として薬品や食品素材として販売する計画について記者発表された。現在、事業は中止したようではあるが、図 7.1.2-1 に示すような培養装置が用いられていた。培養槽は、培養液を満した高さ 2m、奥行き 9m のプレート形状となっており、両側面から人工光を照射して光合成を促進させるものである。培養槽内の藻類は、光を受ける側面部と暗部である内部を移動しながら、光合成の効率を高める仕組みとなっている（図 7.1.2-2）。培養槽だけではなく、ヘマトコッカス藻の株の選定や、培養液についても独自のノウハウで調整されたものであることが説明されている。

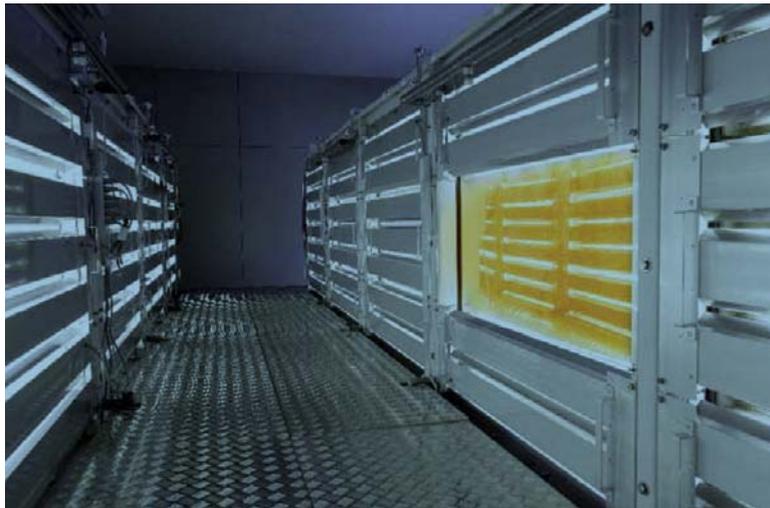
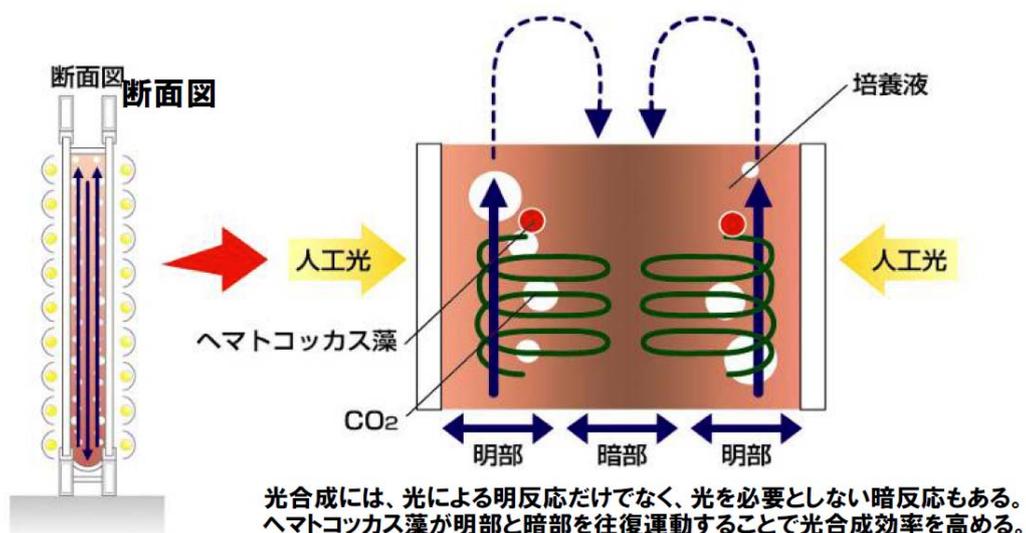


図 7.1.2-1 高効率バイオリアクターの外観<sup>2)</sup>

（出典：ヤマハ発動機発表資料）



光合成には、光による明反応だけでなく、光を必要としない暗反応もある。ヘマトコッカス藻が明部と暗部を往復運動することで光合成効率を高める。

図 7.1.2-2 高効率バイオリアクターの断面図<sup>2)</sup>

（出典：ヤマハ発動機発表資料）

前身となるキートセラス藻での研究成果であるが、図 7.1.2-3 のように藻類増殖速度は大幅な改良がなされてる。

なお、製品化に関しては日清オイリオグループと提携し、藻類の粉末化までをヤマハ発動機が、抽出から原料化までを日清オイリオグループが担うことが発表された(図 7.1.2-4 および図 7.1.2-5)。

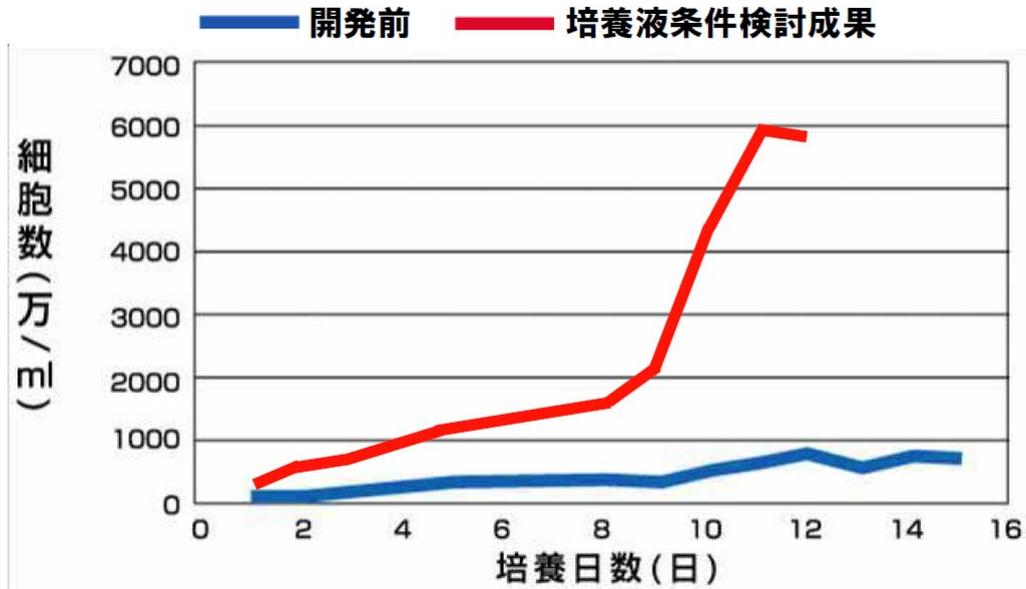


図 7.1.2-3 藻類の増殖速度の向上 (キートセラス藻の場合)<sup>2)</sup>

(出典：ヤマハ発動機発表資料)

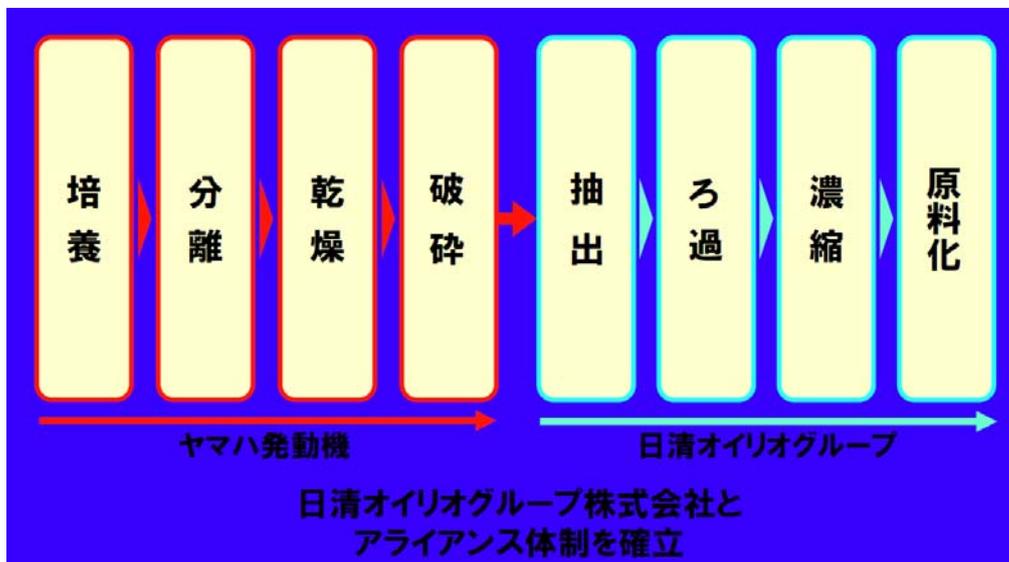


図 7.1.2-4 アスタキサンチンの生産・利用体制<sup>2)</sup>

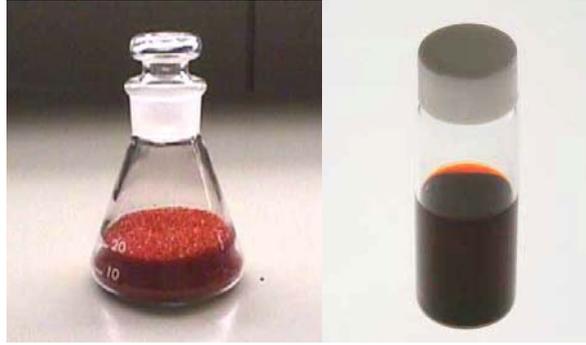


図 7.1.2-5 製造されたアスタキサンチン（左：粉末、右：抽出液）<sup>2)</sup>

（出典：ヤマハ発動機発表資料）

## 7.2 今後の展望

本事業で研究開発した培養槽の光合成の効率化のためには、槽内に導入する光量子の増加が課題であり、その方向性としては次の2点が考えられる。

### 7.2.1 透光性素材による培養槽の構築

本事業で研究開発した培養槽を柔軟な素材で構成すると、内部の流動性の確保に支障が生じる可能性が高いため、NASA OMEGA Project で用いられたような素材は、適用は困難である。ただし、以下のような課題はあるものの、アクリル等の硬質樹脂で構成することは不可能ではないと考えられる。

#### 1) 構造的強度の確保

大型化に伴う強度の確保のためには、十分な部材厚の確保と接合方法が課題となる。素材強度は鋼材に比較して高くないため、面材の強度として確保し、必要な補強部材のみを鋼製とするなど、経済的な配慮も検討する必要がある。

#### 2) 耐久性の確保

樹脂製の場合、一般に紫外線への耐性、塩化物の影響、高温および低温環境下での耐久性などを克服する必要がある。

#### 3) 生物付着に伴う透光性の低下対策

供用中に藻類および外部への貝類等が付着する可能性がある。定期的にクリーニングを行う等、メンテナンスについて検討しておく必要がある。

### 7.2.1 人工光源装置の付加による光合成の効率化

本事業で研究開発した培養槽は大型化に伴い、水面から培養槽低部までが深い構造になることが予想される。海水中では光の減衰が著しいため、底部に何らかの補助的な光源を設置することができれば、光合成の効率化を図ることが可能になると考えられる。最近ではエネルギー消費の小さいLEDが普及しつつあり、小型の風力発電や太陽光発電により電力を賄って、工業的利用を行うことには可能性がある。この際、人工光源（LED）装置の付加による光合成の効率化に関しては以下の課題が考えられる。

#### 1) 沿岸部・海洋環境でのLED光源の耐久性

培養槽内は海水で満たされること、および培養槽が沿岸部や海洋環境下に設置されることが想定されるため、LED光源の耐久性がどの程度見込むことができるか検証しておく必要がある。

2) 適用できる風力発電装置または太陽光パネルの耐久性およびコストの検討

培養槽に用いる人工光源の電力を供給するために通常の方法で給電すると、炭素固定量と消費量から見て、バランスしない可能性がある。そこで風力発電や太陽光発電により電力を賄うことが想定されるが、その発電方式についてコストを含めた検討が必要となる。

3) 光源部への海洋生物や汚れの付着に伴う光合成の効率低下に対する対策

光源は、培養槽内でカバーを介して槽内に面することが想定されるため、その表面が培養する藻類や、海水中に混入した貝類等の生物、あるいは海水中の成分析出による汚れが発生する可能性がある。定期的にクリーニングを行う等、メンテナンスについて検討しておく必要がある。

<参考文献>

1) <http://www.nasa.gov/centers/ames/research/OMEGA/index.html>

2) ヤマハ発動機「バイオ事業の新たな展開」記者発表会資料，2005年7月6日，  
<http://www.yamaha-motor.co.jp/news/2005/07/06/pdf/bio.pdf>

書名 平成23年度藻類による高効率CO<sub>2</sub>固定プラントに関する  
実証研究報告書

発行 平成24年3月  
一般財団法人 エンジニアリング協会  
〒105-0001  
東京都港区虎ノ門三丁目18番19号  
TEL 03(5405)7201(代表)

印刷 有限会社 園企画プリント