

洋上施設での事業化を視野に入れた大型藻類の生産・利活用技術の経済性および二酸化炭素固定量に関する調査

Investigation of Capable CO₂ Fixation and Economical Study about Seaweeds Cultivation and Utilization Products Business on an Offshore Platform Facility

柳橋 邦生 Kunio Yanagibashi*1

梗概

本論文は、平成24年度ならびに平成25年度に経済産業省から受託した、海洋を利用した二酸化炭素固定化・有効利用技術の実用化に関する調査事業^{1) 2)}の主要な成果を再構成したものである。本調査事業では、大型藻類の二酸化炭素固定量の増大に適した大型藻類(海藻)の選定とその培養条件、培養した藻類の有効利用方法について調査を行い、必要となる培養施設や有用成分抽出施設、エタノール製造施設の概念設計を行ったうえで経済性評価と藻類培養によるCO₂固定量の評価を行った。

経済性の評価では、フコイダンやウルバンといった高付加価値の有用成分を健康食品や医薬品の原料として製品化することにより、事業として成立する可能性があることが確認できた。CO₂固定量は、ミナミアオノリを1km四方の洋上施設で培養すると仮定した場合で年間5万tとなった。

キーワード：海藻，フコイダン，ウルバン，二酸化炭素，事業性評価，洋上プラットフォーム

Summary

This paper shows main results of investigation project confided by Ministry of Economy, Trade and Industry to examine capable CO₂ fixation by seaweeds and effective utilization technology on an offshore platform facility. At the project, selection of seaweeds to maximize CO₂ fixation, suitable cultivation condition, effective method to utilize cultivated seaweeds were investigated and conceptual design of cultivation facility and were examined. Economical evaluation and amount of CO₂ fixation were also examined.

It is confirmed that business including extract products like fucoidan or ulvan has potential. Amount of CO₂ fixation was calculated as 50,000 t when *ulva meridionalis* is cultivated on 1km square platform.

Keywords: sea weeds, fucoidan, ulvan, CO₂ fixation, economical evaluation, marine platform

1 はじめに

海洋国である我が国の強みを活かし、海洋を利用した二酸化炭素固定化・有効利用技術の実用化に関する実現可能性調査を行った。具体的には、大型藻類の高効率培養技術や藻類からの有用物質生成、海洋上における自然エネルギー活用等の複数の技術を融合したシステムを設計し、そのシステム全体の経済性や有効性などについて調査を行った。

本論文では、対象となる藻類に関する調査・検討をまとめるとともに、藻類培養技術に関する調査・検討、選定された藻類の利活用に関する調査・検討、藻類培養施設、藻類利活用施設とこれらを海洋上で構築するための海洋プラットフォーム施設の検討を行い、固定化した藻類の有効利用を含むシステムの全体の経済性、ならびに藻類培養による二酸化炭素固定量の評価を行って、実用化に向けた課題とともにまとめた。

*1 技術研究所 エコエンジニアリング部長 博士(工学) General Manager, Research & Development Institute, Dr. Eng.

量域に最適条件を有することが示唆された。これら2種については、何れもCO₂による施肥効果が確認されている。オニアマノリについては、最適水温が15~20℃と報告されているほかは、有用な知見が得られなかった。ミナミアオノリとオニアマノリについては、文献調査だけでは情報が少ないため、培養基礎実験を実施した。

培養基礎実験における実験因子は、水温、光量子量、CO₂濃度、栄養塩とし、Table 2のとおり各水準を定めた。なお、培養は胞子集塊化法を採用し、藻体自身が光量子量の低下に影響を及ぼさないように、藻体の湿重量が培養液量の1/1000（培養密度0.1%）を超えない条件で実験を行った。

培養試験の結果、本実験条件の範囲では光量子やCO₂濃度が高いほど日間成長率が高くなる傾向が確認できた（Fig. 1およびFig. 2）。最適培養条件における日間成長率は、ミナミアオノリではCO₂濃度別実験7.0mmol/kg試験区の136%、オニアマノリは水温別実験15℃試験区の40%を代表値とした。文献調査及び培養基礎実験の結果から、最適培養条件及び日間成長率をTable 3にまとめる。

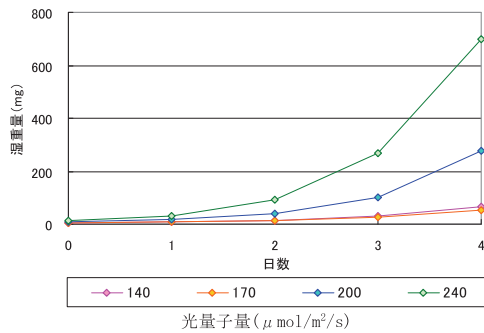


Fig. 1 光量子による成長率への影響¹⁾
Influence of photon on growing ratio

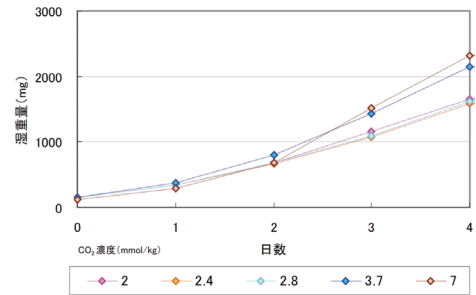


Fig. 2 CO₂濃度による成長率への影響¹⁾
Influence of CO₂ concentration on growing ratio

Table 2 基礎培養実験の条件¹⁾
Factors and levels at basic cultivation test

種名	項目	試験区						
		20	25	30	35	-	-	
ミナミアオノリ	水温 (°C)	20	25	30	35	-	-	光量: 200μmol/m ² /s 明/暗: 12h/12h 栄養塩: 表層海水+ES培地-Tris (1回/日交換)
	光量子量 (μmol/m ² /s)	100	140	170	200	240	-	水温: 25°C 明/暗: 12h/12h 栄養塩: 表層海水+ES培地-Tris (1回/日交換)
	CO ₂ 濃度 (mmol/kg) (高知大学実験データ)	2	2.4	2.8	3.7	7	-	水温: 25°C 光: 100-400μmol/m ² /s 明/暗: 12h/12h 栄養塩: 表層海水+N,P,Fe,VitaminB ₁₂ (2回/日連続交換)
	栄養塩 (添加液N:Pモル比) (表層海水)	0:0	5:1	10:1	20:2	40:4	80:8	光量・水温: 屋外 (表層海水を連続滴下) 添加栄養塩: NaNO ₃ , NaH ₂ PO ₄ ・2H ₂ Oの混合液を水槽に滴下
オニアマノリ	水温 (°C)	10	15	20	25	-	-	光量: 200μmol/m ² /s 明/暗: 12h/12h 栄養塩: 表層海水+ES培地-Tris (1回/2日交換)
	光量子量 (μmol/m ² /s)	140	170	200	240	-	-	水温: 20°C 明/暗: 12h/12h 栄養塩: 表層海水+ES培地-Tris (1回/2日交換)
	CO ₂ 濃度 (mmol/kg)	2	4	6	-	-	-	水温: 15°C 光: 170-180μmol/m ² /s 明/暗: 12h/12h 栄養塩: 表層海水+ES培地 (2回/日連続交換)
	栄養塩 (添加液 (N:Pモル比) (表層海水)	0:0	5:1	10:1	20:2	40:4	80:8	屋外 (表層海水を連続滴下) 添加栄養塩: NaNO ₃ , NaH ₂ PO ₄ ・2H ₂ Oの混合液を水槽に滴下

Table 3 培養最適条件と日間成長率¹⁾
Best Condition for Seaweeds Cultivation and the Growing-up Ratio

種名	水温 (°C)	光量子量 (μmol/m ² /s)	CO ₂ 濃度 ^{※1)} (mmol/kg)	栄養塩濃度 (μmol/L)	日間成長率 (%)
ミナミアオノリ	25°C	240以上	7.0以上	N: 20, P: 2	136
オニアマノリ	15°C	240以上	添加効果なし	N: 20, P: 2	40
ワカメ ^{※2)}	15°C	100	約2.2 ^{※3)}	-	28.3

※1 全炭酸濃度

※2 ワカメのデータは文献値 (日間成長率は15°C, 100μmol/m²/s, 明暗周期 16h: 8h, 深層水使用での実験値)

※3 CO₂濃度1500ppmを全炭酸濃度に換算

2.3 培養施設の効率化を考慮した培養条件の検討

2.2の検討は、藻体自身による光量子量の低下の影響が少ない培養密度（0.1%）を前提としたが、培養設備を効率よく運用することを考慮すると、藻体自身による光量子量の低下の程度によっては培養密度を上げることで結果的に生産量を向上させることが可能であると考えられる。とくに成長率の大きいミナミアオノリは、培養密度を上げることによる生産量の向上が期待されるため、再度、培養密度と日間成長率の関係を評価するために培養実験を行った。

Table 4 培養設備用の培養実験の条件²⁾
Factors and levels at cultivation test for cultivation facility

種名	項目	試験区					その他条件
ミナミアオノリ	光量子量 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	200	300	500	700	1000	水温：25℃ 明/暗：12h/12h 栄養塩：表層海水+ES培地（3回/日交換） 攪拌速度：15s ⁻¹ CO ₂ ：無添加
	全炭酸濃度 (mmol/kg)	10.7	無添加	-	-	-	水温：25℃ 光：1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 明/暗：12h/12h 栄養塩：表層海水+ES培地（3回/日交換） 攪拌速度：15s ⁻¹
	攪拌速度 (s ⁻¹)	15	28	-	-	-	水温：25℃ 光：1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 明/暗：12h/12h 栄養塩：表層海水+ES培地（3回/日交換） CO ₂ ：無添加

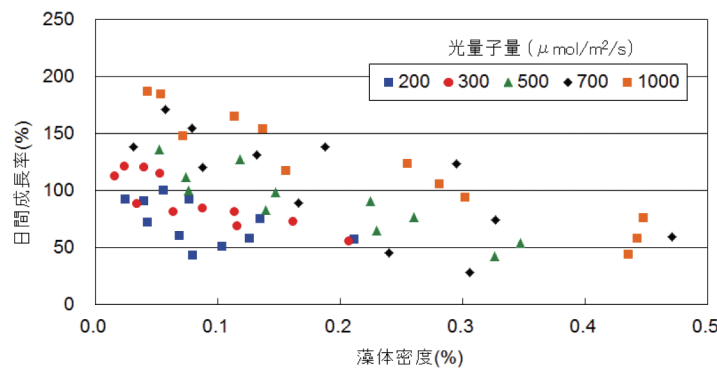


Fig. 3 光量子ごとの藻体密度と成長率の関係²⁾
Relation between growing ratio and cultivation density under several photon conditions

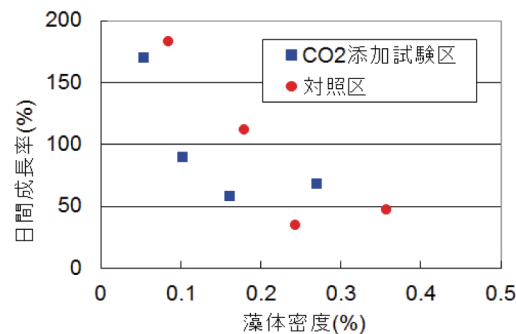


Fig. 4 CO₂濃度の成長率への関係²⁾
Relation between growing ratio and cultivation density under different CO₂ condition

光量子量の違いが成長に与える影響については、光量子量が高くなるにつれて培養初期の成長速度が上昇した。高密度での日間成長率は高く維持され、高密度下における藻体間の光条件に関する競合は緩和された (Fig. 3)。

CO₂が成長に与える影響に関しては、藻体密度0.25%前後での比較においては、CO₂添加試験区の日間成長率が対照区を上回り、CO₂添加による成長促進効果が高密度条件下において顕在化した。CO₂添加効果は、CO₂を添加しない場合と比較して日間成長率は1.42倍となった (Fig. 4)。

攪拌速度が成長に与える影響に関しては、有意な差は見られなかった。文献調査では大型海藻で最適流速の存在が報告されており、本実験では、設定試験区が2条件のみである点、流れが定量化の困難な攪拌流であった点が課題とされ、流速影響については更なる条件検討を行った上で再検証することが必要であると考えられる。

得られた試験結果より、CO₂無添加条件で、光量子量700~1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、藻体密度0.1%とした際の日間成長率を試算した。その結果、藻体密度0.1%で日間成長率153.14%となり、文献値を大きく上回った。さらに、藻体密度0.5%においては日間成長率46.84%と推定された。CO₂競合緩和効果を考慮した場合、培養条件の最適化により藻体密度0.5%における日間成長率は50%を上回るものと推測される。さらに、上記結果よりミナミアオノリの生産性を簡易的に試算したところ、69.6g-dry/m²/dayと見積もられた。この値は、多くの微細藻類の生産性を10-20g/m²/dayであることと比較すると非常に高い生産性を有すると言える。

2.4 培養した藻類の有効利用方法について調査

大型藻類を沿岸部で養殖し、食品用の素材として事業を行っている例はあるが、エネルギー製品や工業製品は一般に食品と比較して経済的な価値が低いために、藻類の利活用にあたっては医薬品や健康食品などの高付加価値の素材を分離・抽出して

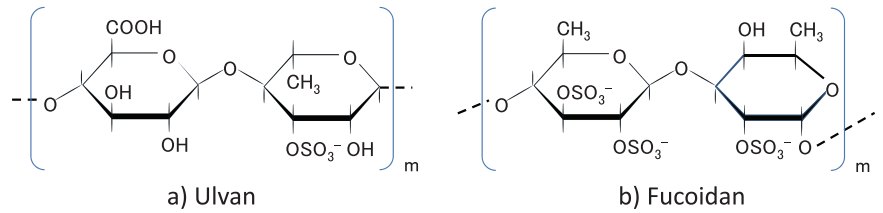


Fig. 5 ウルバンa) およびフコイダンb) の構造式
Chemical structure of ulvan a) and fucoidan b)

販売することを念頭に置く必要がある。調査事業では大型藻類に含まれる有用物質について文献調査およびヒアリングを実施して候補となる成分を絞り込み、対象となる有用成分の含有量を測定した。ここでは、得られた結果のみTable 5~6に示す。

特に注目すべき有用成分としては、ミナミアオノリに含まれるウルバン、ワカメ等に含まれるフコイダンは高付加価値で含有量が高いため、事業にこれらを抽出・利活用を組み込むことにより、事業収支の改善に寄与することが期待される。

Table 5 大型藻類の成分分析結果 (1)
Results of chemical analysis contained in seaweeds, Part 1

グループ	試料名	産地	多糖					脂質		アミノ酸
			アルギン酸 %	寒天 %	ウルバン %	セルロース %	ヘミセルロース %	総油量 %	EPA mg/kg	遊離タウリン mg/kg
緑藻	ミナミアオノリ	培養	-	-	18	7.9	5.0	0.11	2300	100未満
	スジアオノリ	有明海	-	-	-	14	18	0.12	9000	100未満
	スジアオノリ	博多湾	-	-	-	4.6	21	0.20	8500	100未満
	アナアオサ	博多湾	-	-	-	5.0	14	0.10	4500	100未満
	ミル	筑前海	-	-	-	16	19	0.58	60	100未満
紅藻	オゴノリ	有明海	-	17	-	5.9	16	0.11	500	45000
	オゴノリ	博多湾	-	22	-	2.5	38	0.52	320	25000
	シラモ	博多湾	-	20	-	5.0	5.2	0.03	480	30000
	ツノマタ	筑前海	-	14	-	2.7	7.5	0.03	370	15000
	キリンサイ	培養	-	21	-	12	22	0.02	200	22000
褐藻	ワカメ	博多湾	15	-	-	5.0	13	2.4	360	100未満
	ワカメ	有明海	27	-	-	3.6	8.2	3.4	320	100未満
	マコンブ	培養	46	-	-	5.2	3.1	8.5	1200	100未満
	タマハハキモク	博多湾	28	-	-	5.9	7.1	10	120	100未満
	マメタワラ	有明海	38	-	-	4.6	13	0.28	50	100未満
	アカモク	筑前海	22	-	-	5.9	8.0	0.34	20	100未満
	ヒジキ	筑前海	47	-	-	4.7	9.3	0.62	600	100未満

Table 6 大型藻類の成分分析結果 (2)
Results of chemical analysis contained in seaweeds, Part 2

グループ	試料名	産地	水溶性ビタミン				脂溶性ビタミン			
			葉酸	ビタミンB12	コリン	イノシトール	ビタミンA (レチノール)	ビタミンA (レチノール当量)	βカロテン	ビタミンK
			μg/kg	μg/kg	mg/kg	mg/kg	μg/kg	μg/kg	μg/kg	μg/kg
緑藻	ミナミアオノリ	培養	450	31	-	-	100未満	5800	36000	-
	スジアオノリ	有明海	600	10	-	-	100未満	9000	27000	-
	スジアオノリ	博多湾	470	11	-	-	100未満	8700	35000	-
	アナアオサ	博多湾	1700	23	-	-	100未満	3400	15000	-
	ミル	筑前海	340	150	-	-	100未満	2600	9000	-
紅藻	オゴノリ	有明海	3500	7.5	200	-	-	-	16000	-
	オゴノリ	博多湾	890	3.1	200	-	-	-	13000	-
	シラモ	博多湾	1900	0.1未満	200	-	-	-	3000	-
	ツノマタ	筑前海	0.1未満	0.1未満	200	-	-	-	2000	-
	キリンサイ	培養	2000	8	200	-	-	-	15000	-
褐藻	ワカメ	博多湾	1600	0.1未満	-	260	-	-	46000	2900
	ワカメ	有明海	3200	0.1未満	-	200	-	-	20000	1900
	マコンブ	培養	800	0.1未満	-	50	-	-	4600	50未満
	タマハハキモク	博多湾	440	8.9	-	60	-	-	35000	50未満
	マメタワラ	有明海	230	0.1未満	-	4未満	-	-	13000	3600
	アカモク	筑前海	500	0.1未満	-	4未満	-	-	19000	170
	ヒジキ	筑前海	1200	0.1未満	-	4未満	-	-	19000	50未満

3 藻類の培養施設および利活用施設の検討

3.1 藻類培養施設

藻類の培養施設については、海面養殖技術、タンク培養技術およびリアクター培養技術について文献調査、視察・ヒアリングを行っておよその生産性ととも、経済性、環境性、工業性ならびに事業化実績についてまとめた。結果をTable 7に示す。大型藻類の培養実績を重視すると生産性の高いタンク培養技術が有望である。ただし、タンク培養では施肥効果を期待してCO₂を培養液に溶解させた場合、容易に大気中に放出されること

が予想されるため、リアクター培養技術を一部取り入れる必要があると考えられる。

本調査で検討する培養施設はこの調査結果を参考に、タンク養殖技術に一部リアクター培養技術を加味した方式を検討し、培養水製造工程、幼体培養工程、藻類培養工程、藻類回収工程で構成した。検討した藻類培養施設のシステムフローをFig. 6に、本施設の中核部分の藻類培養工程の概要図をFig. 7に示す。後述の3.3で示すプラットフォーム上では、Fig. 7の藻類培養プロセスを32基配置する。本培養施設で収穫できる藻類の量は、ミナミアオリを培養密度0.5%で培養した場合で128t (dry)/日、ワカメを培養密度0.1%で培養した場合で16.8t (dry)/日である。

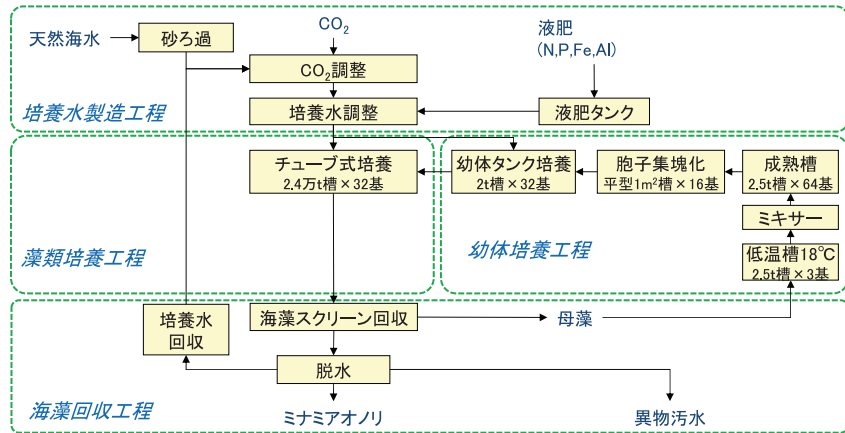


Fig. 6 藻類培養施設のシステムフロー (参考文献2)をもとに作成)
System flow of a facility for seaweeds cultivation

Table 7 藻類培養技術の比較¹⁾

Comparison of cultivation techniques for seaweeds and micro algae

	海面養殖技術	タンク培養技術	リアクター培養技術
培養の規模	100ha~200ha	500m ²	-
生産性	0.004~0.6kg/m ² ・年	1~10kg/m ² ・年	20~78kg/m ² ・年
生産費用		2,400万円/年程度	数億円/年程度
CO ₂ 固定量 (年間)*1	0.4~6t-CO ₂ /ha	10t-CO ₂ ~100t-CO ₂ /ha	200~780t-CO ₂ /ha
特徴	・海面を利用した自然成長に任せた培養方式 ・単位面積当たりの生産性は低い	・タンク内の水質や藻体などを人為的な管理が可能 ・単位面積当たりの生産性は海面養殖の10倍以上	・リアクター内の水質や藻体を人為的な管理が可能 ・単位面積当たりの生産性は海面養殖の100倍以上
経済性	○ロープ網に種苗を付着させる方式で設備コスト・運用コストとも低い ×海域の環境に影響されやすく通年稼働は不可能	△設備・運用コスト面で今一步の研究開発が必要 ○生育環境の管理が可能で通年培養が可能	×大規模な環境を想定した場合、設備コスト、運用コストに課題あり
環境性	×海洋に自然に吸収されたCO ₂ の吸収のみ可能で排気ガス等、高濃度CO ₂ の固定化には不適	△海洋と隔離した環境のため、排気ガス等の高濃度CO ₂ の固定化が可能。完全な閉鎖系ではないため水面からCO ₂ 拡散の課題がある	○完全閉鎖系であるため、CO ₂ の拡散はない
工業性	×工業技術の導入は養殖地域の監視、藻体を着床させたロープ等の牽引、藻体の回収となる	△培養水の管理、藻体の管理面で、工業技術の導入が可能。タンクであるためバッチ生産であり連続プロセス化に課題あり	○タンク培養と概ね同じ、人工光等を利用した光量子量の管理面で工業技術の利用が可能
事業化実績	○食用、化学原料等あり	○食用としてあり	×大型藻類では見られない

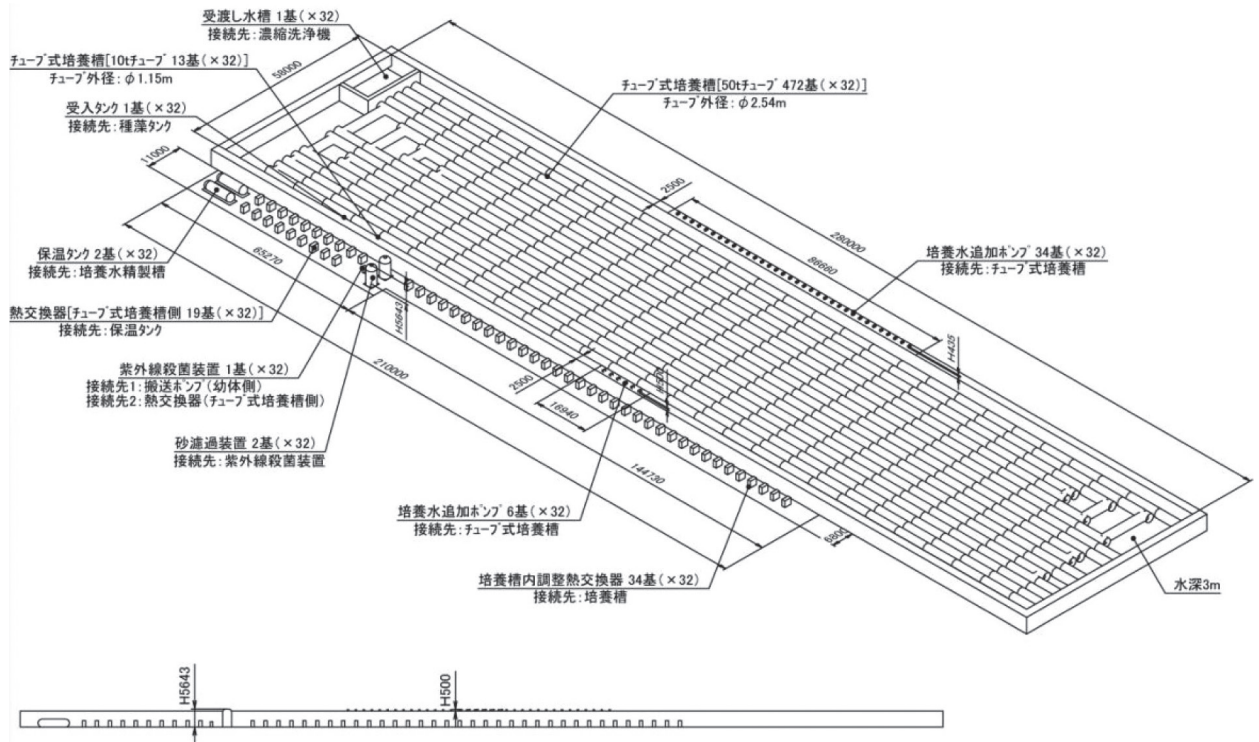


Fig. 7 藻類培養工程の概要図¹⁾
 Overview of a part of seaweeds cultivation process

3.2 藻類利活用施設

大量に培養した藻類の利活用は、高付加価値の有用成分を抽出し素材として販売するほか、抽出後の藻類を糖化・発酵させてエタノールを生成させることや、さらにその残渣をメタン発酵させてバイオガスを得ること、最後に残った残渣を肥料や飼料として利用することが考えられる。藻類には、glucose, xylose, rhamnose, agarose, Galactose, Mannoseといった様々な糖類が含まれている。エタノールを生産する際は、経済的な観点で極力エタノールの収率を高める必要があり、NEDOで実施されていた「木質バイオマスからの高効率バイオエタノール生産システムの研究開発」(実施者：京都大学、鳥取大学、日本化学機械製造株式会社、トヨタ自動車株式会社)の成果、および京都大学によるアルギン酸からエタノールを生成する研究の成果を参考として、Rhamnose以外の糖質はZymobacter Palmaeの野生株や遺伝子組み換え株、体腔を有する細菌を利用してエタノールへの転換が可能であると想定した。また、この場合はエタノール発酵後の残渣には糖質が非常になくなることから、この残渣を利用したメタン発酵は困難であると判断し、Fig. 8の利活用プロセスを検討することとした。

概念設計を行った藻類利活用施設のプロセスフローをFig. 9に示す。藻類利活用施設は、乾燥、溶媒抽出・回収、加熱液化、酵素糖化・ろ過・分離、発酵、蒸留・凝縮、残渣蒸留・袋詰めで構成した。なお図中のタンク容量等の数値は、藻類原料を10t (dry) と想定した時のものである。

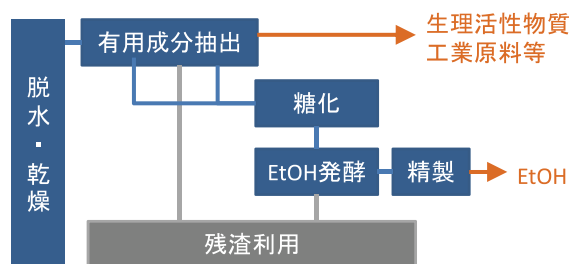


Fig. 8 本調査における藻類の利活用プロセス¹⁾
 Utilizing process of seaweeds in this work

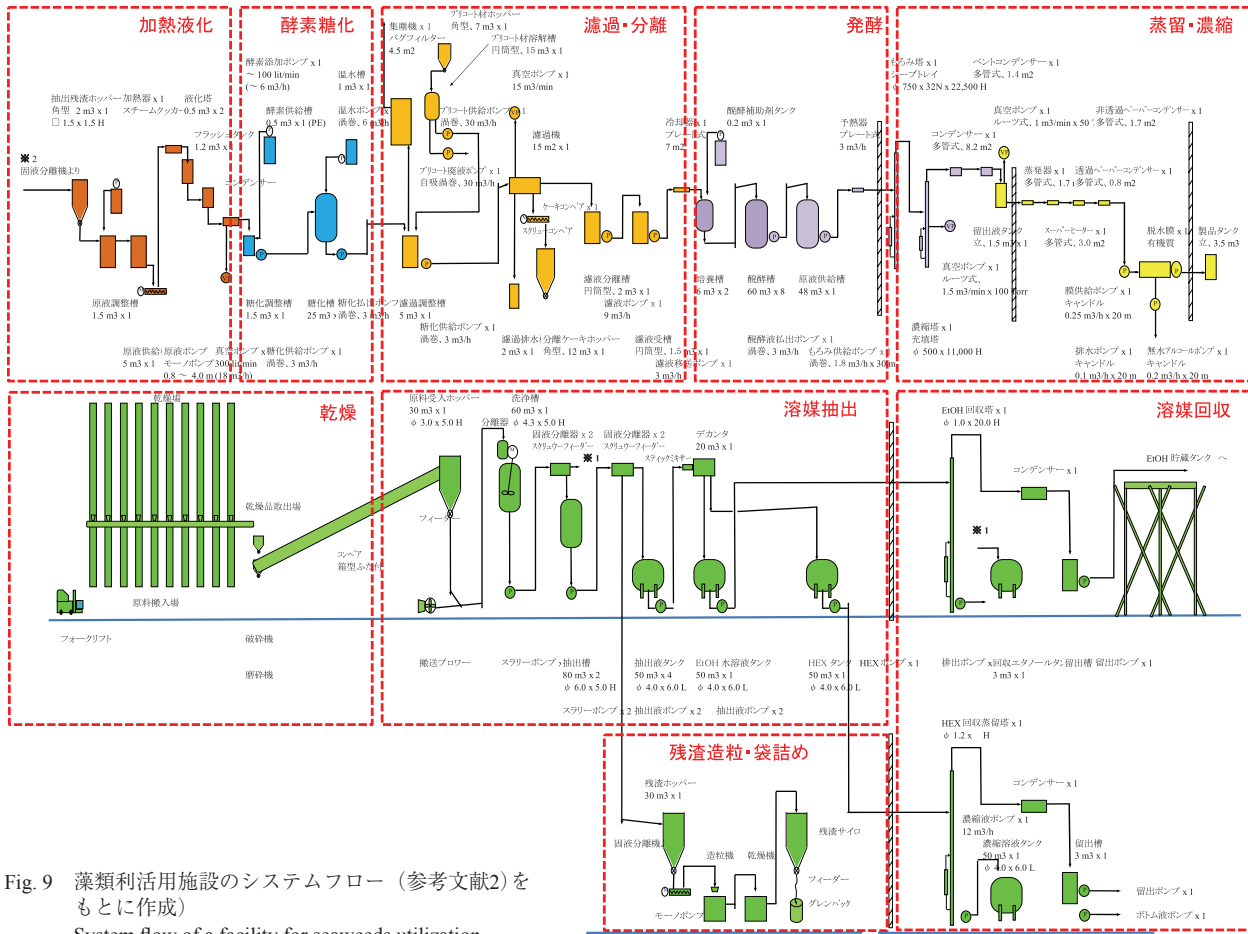


Fig. 9 藻類利活用施設のシステムフロー（参考文献2）をもとに作成）
 System flow of a facility for seaweeds utilization

3.3 洋上プラットフォーム施設の検討

上記の3.1および3.2の施設を上載するプラットフォーム施設については1km×1kmの規模を想定し、着底式と浮体式のプラットフォームについて、構造的な成立性の検討を含めて概念設計を行った。設置する海域は、沿岸、湾内、外洋の3種類を想定することとし、設計外力の算定に必要な波高等の環境条件のデータは、それぞれ博多湾、富山湾、隠岐の海域条件を参考とした（Table 8）。設計寿命は50年とした。概念設計を行った藻類培養・利活用を上載した洋上プラットフォームの外観をFig. 10に示す。プラットフォーム上には、藻類の培養および利活用に必要な電力、蒸気、給排水等のユーティリティー施設も整備することを想定した。このうち電力については、藻類培養施設および藻類利活用施設の昼間・夜間のデマンドを考慮したうえで風力発電30MW、太陽光発電4MWに所定量の充電電池を設置して供給することを想定した。藻類利活用施設および管理棟の一部で必要となる蒸気は、バイオマスボイラーをプラットフォーム中央部甲板の下部に設置して供給することを想定した。これらの上乗荷重は、想定した建屋の種別に応じて29.4kN/m²（利活用施設倉庫棟）～49.0kN/m²（利活用施設工場棟）を設定した。風車に関しては質量を400t（上乗荷重3920kN）と設定した。さらに浮体および上載施設は、電気防食や重防食塗装を行うことも想定した。

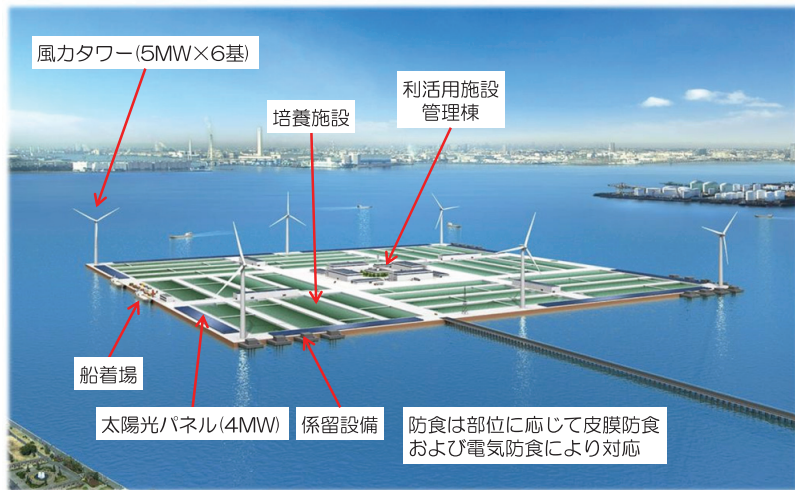


Fig. 10 藻類培養・利活用を上載した洋上プラットフォームの外観
 Overview of an offshore facility for seaweeds cultivation and utilization

Table 8 プラットフォームの概念設計のために想定した各海域の環境条件¹⁾
Environmental condition assumed on each sea area to examine concept design

項目	沿岸型	湾内型	外洋型
水深	17m	70m	190m
有義波高	5.7m	5.4m	8.7m
有義波周期	10.3s	8.8s	11.1s
潮流	0.4kt	1.0kt	0.3kt
風速 (風向: 全方位)	35m/s	29m/s	42m/s
潮位	HHWL: 2.84m HWL: 2.16m MSL: 0.97m LWL: 0.07m LLWL: -0.51m	HHWL: 1.00m HWL: 0.44m MSL: 0.20m LWL: -0.05m LLWL: -0.40m	HWL: 0.3 m MSL: 0.17m LWL: 0.1 m
津波	0.32m	3.9m	-
海底土質	貝殻まじり砂/泥まじり砂	泥	貝まじり細砂または岩
気温	-8.2~37.7℃	-11.9~39.5℃	-8.9~35.8℃
水温	14~27℃	11~27℃	12~26℃
平均湿度	63~75%	69~82%	71~83%
最大積雪	0.3m	2.08m	1.07m
地震 (水平深度)	0.05 (0.10)	0.10	0.10

着定式のプラットフォームは、水深が比較的浅い海域に適用できることから、沿岸型の環境条件で検討を行った。基本断面を Fig. 11 に示す。外周部については重力式、培養槽部、通路部、中央部については杭式の構造とした。重力式および杭式のプラットフォームの安定計算の結果をそれぞれ Table 9 および Table 10 に示す。このように着底式のプラットフォームは、1km 四方の規模においても構造的に成立することが確認できた。

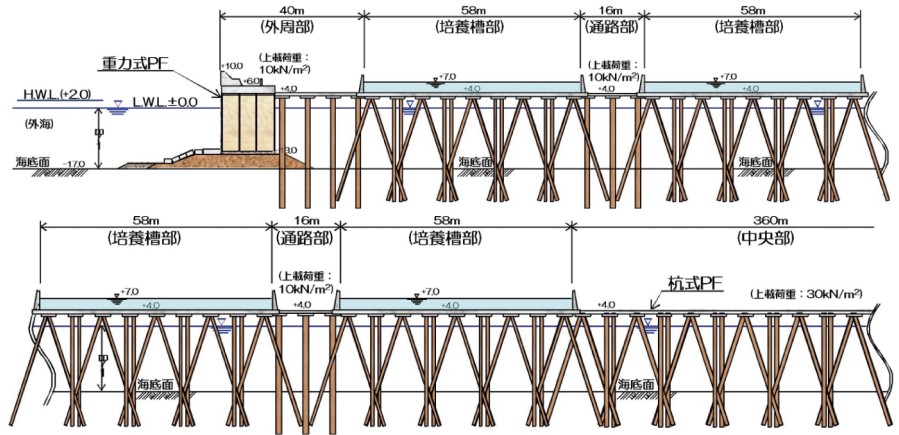


Fig. 11 着定式のプラットフォームの基本断面¹⁾
Basic vertical cross section of bottom seated platform

Table 9 重力式プラットフォームの安定計算結果¹⁾
Stability calculation results of gravity type platform

重力式プラットフォーム (外周部 北面 (波浪卓越面))							重力式プラットフォーム (外周部 東・西・南面)								
項目	滑动安全率		転倒安全率		地盤支持力 (kN/m ²)		越波流量の想定範囲 (m ³ /m/s)	項目	滑动安全率		転倒安全率		地盤支持力 (kN/m ²)		越波流量の想定範囲 (m ³ /m/s)
荷重状態	暴風時	地震時	暴風時	地震時	暴風時	地震時	暴風時	荷重状態	暴風時	地震時	暴風時	地震時	暴風時	地震時	暴風時
計算値	1.72	2.09	2.52	3.79	393	349	1.3E-3 ~ 1.9E-2	計算値	2.17	2.01	2.62	2.77	398	408	3.0E-5 ~ 1.5E-3
許容値	1.20	1.20	1.20	1.20	501	728		許容値	1.20	1.20	1.20	1.20	581	511	
判定	OK	OK	OK	OK	OK	OK		判定	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
比率	0.70	0.57	0.48	0.32	0.78	0.48		比率	0.55	0.60	0.46	0.43	0.68	0.80	

Table 10 杭式プラットフォームの安定計算結果¹⁾
Stability calculation results of pile type platform

杭式プラットフォーム (通路部および外周部の内側)						杭式プラットフォーム (中央部および培養槽部)							
項目	杭の押込み力 (kN)		杭の応力度比		水平変位 (スラブ) (mm)	項目	杭の押込み力 (kN)		杭の応力度比		杭の応力度比	水平変位 (スラブ) (mm)	
荷重状態	常時	地震時	常時	地震時	地震時	荷重状態	常時	地震時	常時	地震時	常時	地震時	
計算値	1,674	2,343	0.18	0.99	211	計算値	1,568	3,199	0	63	0.73	1.00	37
許容値	4,775	9,550	1.00	1.00		許容値	2,262	4,524	619	1,222	1.00	1.00	
判定	OK	OK	OK	OK		判定	OK	OK	OK	OK	OK	OK	
比率	0.35	0.25	0.18	0.99		比率	0.69	0.71	0.00	0.05	0.73	1.00	

浮体式についてはポンツーン型とセミサブ型の2種類を検討した。浮体式のプラットフォームの構造的な成立性を検討するため、培養槽を並行配置および円側配置にした場合を想定し、さらに培養槽を甲板上に開口を設けて設置する場合、通路を設けて浮体構造を補強する場合、培養槽を甲板上に設ける場合、ならびに生け簀形状を模擬した場合に分けて、Table 11およびFig. 12に示す解析モデルを想定し、各海域の環境条件で動的応答に対する強度検討、バラスタタンの積み付け計算による静的な応答に対する強度検討、および局部強度検討による浮体各部寸法の算出を行った。本論文では、動的応答に対する強度検討について記述する。

Table 11 ポンツーン型浮体の動的応答の解析モデル¹⁾
Analysis model of dynamic response on pontoon type buoyant body structure

モデルの種類	培養槽配置		
	培養槽 平行配置	培養槽 円側配置	培養槽 円型配置
基本モデル	モデル (a)	モデル (e)	モデル (e)
補強モデル	モデル (b)	モデル (f)	モデル (f)
培養槽 甲板上モデル	モデル (c)	モデル (c)と同じ	モデル (c)と同じ
生け簀モデル	モデル (d)	-	-

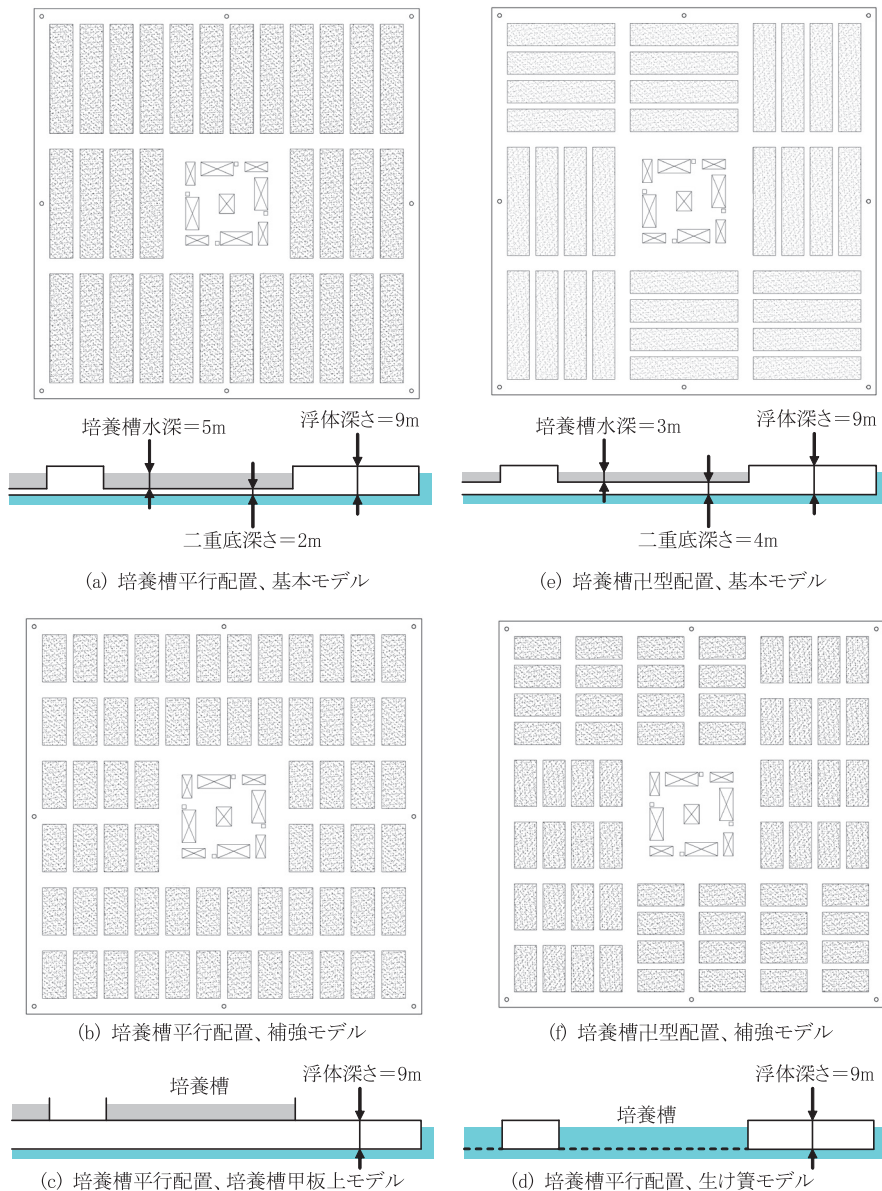


Fig. 12 ポンツーン型浮体の動的応答の解析モデル¹⁾
Analysis model of dynamic response on pontoon type buoyant body structure

Table 12 ポンツーン型浮体の動的応答の検討結果¹⁾
 Analysis results of dynamic response on pontoon type buoyant body structure

モデルの種類	培養槽配置	培養槽 平行配置	培養槽 円型配置
基本モデル		発生応力 = 1152 MPa 設置可能海域の波高 = 1.1m	発生応力 = 544MPa 設置可能海域の波高 = 2.4m
補強モデル		発生応力 = 924 MPa 設置可能海域の波高 = 1.4m	発生応力 = 545MPa 設置可能海域の波高 = 2.4m
培養槽 甲板上モデル		発生応力 = 371 MPa 設置可能海域の波高 = 3.5m	-
生け簀モデル		発生応力 = 796MPa 設置可能海域の波高 = 1.6m	-

ポンツーン型浮体構造の動的応答に関する検討結果をTable 11に示す。本検討ケースでは、培養槽を円形に配置した構造で2.4mまでの波高、培養槽を甲板上に設置した構造で3.5mまでの波高に耐えることが確認できた。この波高はTable 8の沿岸型や湾内型の波高より小さいが、消波ブロック等を適切に設置することにより対応は可能であると考えられる。

セミサブ型に関しては、ポンツーン型浮体のように上部デッキを切り欠いて培養槽を設けると剛性が著しく低下するため、上部デッキ上に培養槽を設けるFig. 12 (c)の下部構造がセミサブ型のものを想定して検討を行った。検討の結果、培養槽を並行配置にした条件で、発生応力は76MPa、設置可能海域の波高は16.3mとなり、Table 8の外洋型の波高でも耐える構造であることが確認された。

浮体式プラットフォームの係留方式としては、カタナリー係留およびドルフィン・フェンダー係留の2種類を検討した結果を加味し、設置海域ごとに適したプラットフォームの構造としてはTable 12のようにまとめた。代表的な構造として、湾内型の設置海域にポンツーン型の浮体とカタナリー係留を組み合わせた例をFig. 13に示す。

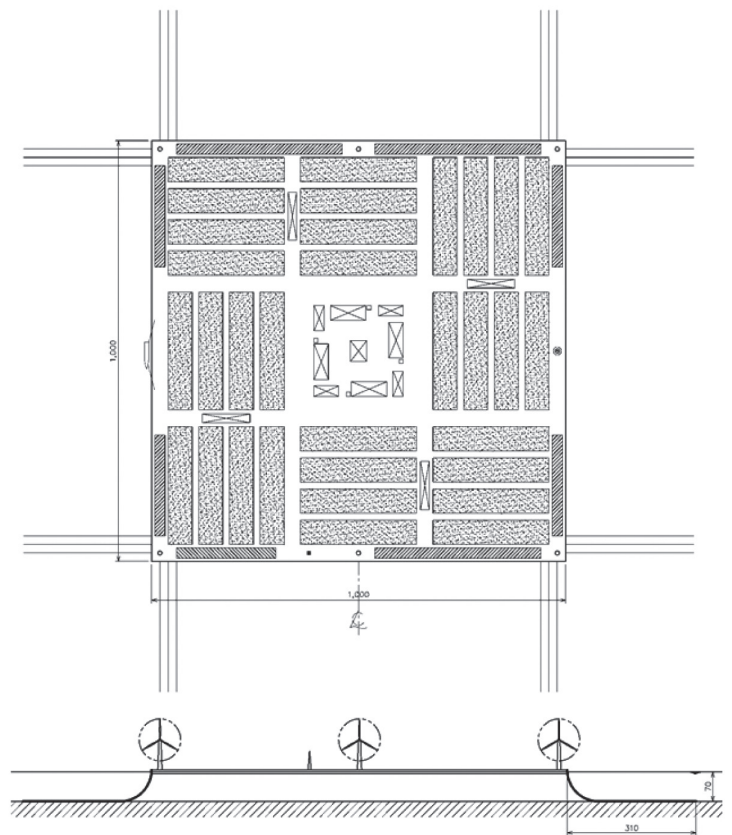


Fig. 13 ポンツーン型浮体+カタナリー係留の例¹⁾
 A combination of pontoon floating structure and catenary mooring

Table 13 設置海域ごとの構造形式の適用性¹⁾
 Availability of platform structure type on each offshore position

構造形式		設置海域	沿岸型 水深 = 17m 波高 = 5.7m	湾内型 水深 = 70m 波高 = 5.4m	外洋型 水深 = 190m 波高 = 8.7m
着底式 プラットフォーム	重力式		○	×	×
	杭式		◎	×	×
	ジャケット式		△	△	×
浮体式 プラットフォーム	浮体 構造形式	ポンツーン型浮体	○	○	×
		セミサブ型浮体	×	◎	◎
	係留方式	ドルフィン・フェンダー係留	◎	×	×
		カタナリー係留	×	◎	◎

4 経済性の評価およびCO₂収支の検討

4.1 経済性の評価

上述の3で実施した概念設計に基づいて概算レベルで積算を行った藻類培養施設、利活用施設、電力や蒸気等のユーティリティー供給施設の建設費と運用費をそれぞれTable 13およびTable 14に示す。また、プラットフォームの形式および設置海域に応じた建設費をTable 15に示す。本調査で検討した規模のプラットフォームは、構造形式によっては1兆円を超える建設費が必要となる。

事業収支の検討条件をTable 16に示す。藻類培養については、成長速度の速いミナミアオノリ、および有用成分が比較的多いワカメについて検討を行った。藻類の利活用は、Fig. 8の想定に沿って有用成分を抽出し、エタノール転換を行って残差を肥料・飼料化することを想定した。プラットフォームについては湾内型でポンツーン型浮体およびカテナリー係留の構造を採用し、公的資金により100%賄うケース、公的資金により50%賄うケース、および公的資金投入ゼロのケースについて検討を行った。有用成分の価格は、医薬品や健康食品の分野を中心に株式会社富士経済発行の市場調査の文献等をもとに設定した（Table 17）。

Table 14 藻類培養施設、藻類利活用施設、ユーティリティー施設および再生可能エネルギー施設の建設費（参考文献1）および2）より作成）

Construction cost of seaweeds cultivating facility, utilizing facility, utility facility and renewable energy facility

	培養密度0.1%の場合	培養密度0.5%の場合
藻類培養施設	46,234,286,000	53,194,246,000
藻類利活用施設	33,200,000,000	26,100,000,000
ユーティリティー施設（管理棟）	8,320,000,000	8,485,000,000
再生可能エネルギー施設	20,310,000,000	20,260,000,000
建屋（工場棟、倉庫棟、管理棟）	1,480,000,000	3,320,000,000
合計（円）	109,544,286,000	111,359,246,000

Table 15 藻類培養施設、藻類利活用施設、ユーティリティー施設および再生可能エネルギー施設の運用費（参考文献1）および2）より作成）

Running cost of seaweeds cultivating facility, utilizing facility, utility facility and renewable energy facility

	培養密度0.1%の場合	培養密度0.5%の場合	備考
藻類培養施設	2,993,000,000	3,835,600,000	建設費の6%+栄養塩類のコストを計上
藻類利活用施設	996,000,000	706,500,000	建設費の3%を計上
ユーティリティー施設（管理棟）	140,000,000	170,000,000	
再生可能エネルギー施設	289,000,000	289,000,000	
建屋（工場棟、倉庫棟、管理棟）	148,000,000	148,000,000	
合計（円）	4,566,000,000	5,333,100,000	

Table 16 各設置海域における構造形式別のプラットフォーム建設費¹⁾

Platform construction cost according to the structure on each sea area

設置海域	構造形式	概略建設費（億円）
沿岸型	着底式プラットフォーム	2,480
	浮体式；ポンツーン型浮体+ドルフィン・フェンダー係留	3,220~3,500
湾内型	浮体式；ポンツーン型浮体+カテナリー係留	3,070~3,350
	浮体式；セミサブ型浮体+カテナリー係留	9,900~10,890
外洋型	浮体式；セミサブ型浮体+カテナリー係留	10,040~11,030

Table 17 藻類中の有用成分の価格（参考文献1）および2）より作成）

Price of useful component contained in seaweeds

有用物質					工業製品	肥料・飼料
βカロテン	EPA	糖質	ウルバン	フコイダン	エタノール	-
10万円/kg	1.8万円/kg	185円/kg	2,100万円/kg	30万円/kg	1,183円/kg	40円/kg

Table 18 事業収支の検討条件²⁾
 Examination condition of the business income and expenditure

借入金利の考え方	借入期間を20年とする。当初、売上げが安定するまでの5年間については、金利負担をゼロとして、6年目から20年目までの金利負担については、20年間で負担すべき金利分を15年で均等割りとする。	
資本金の考え方	5年間に売上げが無くとも、元本のみの返済が可能なよう、金利負担のない5年分の返済額（表では負担額）の合計を資本金とする。	
個別システム	プラットフォーム	1km四方の湾内型でポンツーン浮体プラットフォームを構築する条件とし、以下の3ケースを検討 ケース1：公的資金により建設費を100%賄う ケース2：公的資金により建設費を50%賄う ケース3：公的資金投入ゼロ
	ユーティリティ	プラットフォーム上の給排水、蒸気の供給等を想定
	再生可能エネルギー	風力（5MW×6基）、太陽光発電（4MW）、蓄電池、非常用の系統電力受電設備を組み合わせることを想定
	藻類培養	Fig.3のシステムで培養。培養密度はミナミアオノリの場合で0.5%、ワカメの場合で0.1%
	藻類活用	有用成分抽出後にエタノール転換、残渣を肥料・飼料化（Fig. 8）
人件費	雇用に要する費用全て込みで時給2,500円とし、有給労働時間8.5時間（内1時間休憩）、1日3交代、1シフト50人、年間365日稼働として計算	
販管費	ランニングコスト、人件費の合計金額の10%と設定	
製品取引価格	各製品（成分）の市場価格を参考とし、各種藻類の生産量に応じて売上見込み額を算出	
法人税等	想定しない	

事業性の検討結果をTable 19に示す。ミナミアオノリを培養する場合、ワカメを培養する場合のいずれも、1km四方の規模の洋上プラットフォーム上で藻類培養・利活用を事業化した場合の収益は数千億円以上の規模の収益性の高い事業となる見込みとなった。プラットフォームの建設費に公的資金の補助を受けることによる年間支出及び年間利益の変化はそれほど大きくなかった。これは、建設投資の額は大きいものの、長期にわたる事業期間を設定したことにより年間経費ベースではプラットフォーム建設費への公的資金の有無の影響が小さくなったものと考えられる。なお、ワカメをこの規模で培養してフコイダンを抽出すると年間300tもの生産量となり、国内需要の10倍に相当する。具体的に適地を選定して事業計画を立案する段階では、需要量に応じた設備規模を検討したうえで事業化・投資判断を行うことになる。また、Table 17の有用成分の価格は、現在の取引価格をもとにしたものであり、価格の経年的な変動や大量供給時の価格低下についても詳細検討が必要である。

Table 19 事業性の検討結果（参考文献1）および2）より作成
 Results of the business income and expenditure on seaweeds cultivation and utilization business

ケース		項目	ワカメ	ミナミアオノリ
ケース1	プラットフォームを公的資金により100%賄う	年間売上高	280,069百万円	849,426百万円
		年間支出	31,975百万円	39,268百万円
		年間利益※	248,094百万円	810,158百万円
ケース2	プラットフォームを公的資金により50%賄う	年間売上高	280,069百万円	849,426百万円
		年間支出	33,328百万円	40,621百万円
		年間利益※	246,741百万円	808,805百万円
ケース3	プラットフォームの公的資金投入をゼロとする	年間売上高	280,069百万円	849,426百万円
		年間支出	34,681百万円	41,974百万円
		年間利益※	245,388百万円	807,452百万円

4.2 CO₂収支の検討

藻類培養により、藻体には光合成による炭素が固定化される。ここでは、成長速度が速いミナミアオノリ（藻体中の炭素含有量29%）を対象としてその収支を示す。藻類の培養には施設に要する電力と従事者が洋上施設で生活するためのエネルギー消費があるが、これらは再生可能エネルギーで賄うために藻体固定量がすなわち上記で検討してきた施設におけるCO₂固定量となる。藻類培養に要するエネルギーを含めた検討結果をTable 19に示す。本調査で検討した条件、すなわち1km四方の規模の洋上施設においてミナミアオノリを培養密度0.5%の条件で培養し、その培養に必要なエネルギーを再生可能エネルギーで賄った場合は、年間約5tのCO₂を固定できることがわかった。

Table 20 CO₂収支の算出結果²⁾
Calculation results of CO₂ fixed quantity

区分		条件	再生可能エネルギーの利用無し		再生可能エネルギーの利用有り	
			蒸気通常	バイオマスボイラー蒸気	蒸気通常	バイオマスボイラー蒸気
CO ₂ 固定量 (t-CO ₂ /年)	藻類培養		50,535		50,535	
CO ₂ 排出量 (t-CO ₂ /年)	培養施設の稼働	15,239	15,239	0	0	
	管理棟の稼働(供用部)	5,646	4,605	1,041	0	
CO ₂ 収支 (t-CO ₂ /年)			29,650	30,691	49,494	50,535

5 おわりに

以上の調査結果から、大型藻類を大量培養・利活用する大規模洋上施設は、経済的に成立する可能性があり、藻類への二酸化炭素固定量として年間5万t-CO₂を見込むことができるという調査結果を得た。本調査で提示した施設を実現するためには、例えば大型藻類の大量培養施設の技術的な実証をはじめ、多くの技術的な課題が残されている。また、本調査で検討した大規模な施設で生産された製品を隣接する沿岸部の地域での活用や、必要なエネルギーの相互融通や廃熱利用などスマートコミュニティの中核施設としての展開も検討していくことが必要であり、経済産業省の二酸化炭素海洋固定化・有効利用技術調査事業の報告書では、これらの点についても調査結果をとりまとめている。こうした地域連携を視野に入れた藻類培養・利活用施設の活用の方向性としてとりまとめた代表的なイメージをFig. 14に示す。

今後は、具体的な設置海域の検討を行いながら、関係自治体との連携構築や地域の商工会議所をはじめとする地域固有の産業との連携活動を通じて、より具体的な事業計画を立案していくことが重要である。

最後に、本調査事業を実施するうえで大型藻類の調査については株式会社環境総合テクノス様、藻類の有効成分については一般財団法人九州環境管理協会様、藻類培養施設については横河電機株式会社様および一般財団法人九州環境管理協会様、株式会社宮入バルブ製作所様、株式会社野村総合研究所様、藻類利活用施設については、日本化学機械製造株式会社様および関西設計株式会社様、プラットフォーム関連施設については、川崎重工業株式会社様、関西設計株式会社様、株式会社ナカボーテック様、株式会社デンロコーポレーション様、再生可能エネルギー施設については、株式会社安川電機様および安川シーメンスオートメーション・ドライブ株式会社様、事業試算については、株式会社野村総合研究所様、CO₂収支については、株式会社環境総合テクノス様、地域連携を視野入れた考察や実現に向けた課題整理については、国立大学法人東京工業大学ソリューション研究機構様および一般社団法人海洋環境創生機構様といった非常に多くの方々から多大な協力を得て、調査事業を遂行することができました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 経済産業省、平成24年度二酸化炭素海洋固定化・有効利用技術調査事業報告書
- 2) 経済産業省、平成25年度二酸化炭素海洋固定化・有効利用技術調査事業報告書



Fig. 14 地域コミュニティと連動させた藻類培養・利活用洋上施設の活用イメージ¹⁾
Image of seaweeds cultivation and utilization offshore facility with neighbor community