

農工循環資源を用いた亜寒帯沿岸域藻類による CO₂吸収実証モデル事業

Model Project on the CO₂ Absorption by Recyclable Resources of Agriculture-and-manufacturing in Subarctic Zone Coast

上村 竜介*
Ryusuke UEMURA

下田 和敏
Kazutoshi SHIMODA

峰 寛明
Hiroaki MINE

抄 録

海洋国日本において低炭素社会を実現するためには、自然環境の変化などにより国内において過去30年間で40%も減少した藻場を再生、造成させ、藻類による沿岸域でのCO₂吸収・固定能の回復を図ることが必要と考えられる。特に、亜寒帯に位置する北海道は国内の藻場面積20万haの内の20%を占め、また、沿岸域の産業などの振興、活性化が求められることから、沿岸部の藻場再生は極めて重要である。本事業では、経済産業省からの委託事業として、企業、地域住民、自治体および国が一体となって、亜寒帯沿岸域に隣接する農工循環資源を活用した藻場によるCO₂吸収・固定の実証研究を行ったものである。事業の目的は、1. 藻場材として使用されるブロックや石材をコンクリートと比べて製造時に発生するCO₂が少ない鉄鋼スラグ水和固化体で製造する、2. ブロックや石材を海域へ設置して藻場を造成し、鉄分供給ユニットにより海域に鉄分を供給することでコンブなどの海藻類の生育を促進させることでCO₂の吸収量を高める、3. 成長した海藻類をオイルや樹脂などの工業製品に加工することでCO₂を固定させる、であった。

Abstract

In Japan, the area of marine forest has decreased by 40% in the last 30 years, due to environmental changes. To develop Low-carbon society, it is inevitable to restore and expand marine forests and promote the carbon sequestration by seaweed in the coastal zone. Especially, Hokkaido, which locates in the subarctic zone, has 200 000-ha marine forest which shares 20% of the domestic total. The restoration of marine forest in the coastal zone would also promote the development of industries in the area. In this project which is commissioned by Ministry of Economy, Trade and Industry, we made a unit which consists of companies, local residents, self-governing bodies and government. We conducted the experimental study to develop CO₂-absorption system at marine forest which locates along the shore in subarctic zone area by using agriculture-and-manufacturing recyclable resources. The objects of this project are as follows. The first is to reduce CO₂ emission by using iron and steel slag instead of concrete as the material of building blocks and stones, which compose part of marine forest. The second is to enhance CO₂ absorption by supplying iron from the installed unit attached to the building blocks and stones which comprise marine forest, and promoting growth of seaweeds such as kombu. The last is to sequester carbon by manufacturing oil and resin, which could be used for industrial products, from the elements of grownup seaweed.

1. 緒 言

海洋国日本において低炭素社会を実現するためには、自然環境の変化などによって過去30年間で40%も減少した藻場を再生、造成させ、藻類による沿岸域でのCO₂吸収・固定能の回復を図ることが必要と考えられる。特に、亜寒

帯に位置する北海道は国内の藻場面積20万haの内20%を占め、また、沿岸域の産業などの振興、活性化が求められることから、沿岸部の藻場再生は極めて重要である。以上を踏まえ本事業では、以下の3つの目標を掲げ、企業、地域住民、自治体および国が一体となって、亜寒帯沿岸域における農工循環資源を活用した藻場によるCO₂吸収実証

* 室蘭製鉄所 設備部 機械技術室 主幹 北海道室蘭市仲町12番地 〒050-8550

研究を実施したり。

1.1 CO₂ の排出低減

国内で 2007 年から実施されている 1000ha の藻場造成事業では、セメントコンクリートの製造過程において年間 53 千 t の CO₂ が発生していると推定した。このため、コンクリートと比較して CO₂ 排出量の削減が可能な鉄鋼スラグ水和固化体（以下、水和固化体と称す）を亜寒帯において 1000m³ 以上製造し、これをコンクリートと代替させることで CO₂ 発生量を 7.8t-CO₂/年削減することを目標とした。

1.2 CO₂ 吸収量の増大

過去 30 年間で国内の藻場が 40% 減少したことにより、年間 730 万 t もの CO₂ 吸収力が低下したと推定される。ここでは、鉄分・栄養塩供給ユニット（以下、施肥ユニットと称す）と水和固化体で製造した資材で藻場を新たに造成し、室蘭と寿都の試験藻場（2000m²）で CO₂ を 11t-CO₂/年吸収することを目標とした。

1.3 CO₂ の長期固定

海藻は光合成量の 57% が海底に堆積せず、海洋中に再放出されると推定されている。この再放出される海藻を採取し、樹脂やオイルなどの工業製品に転換すると、“1.2 CO₂ 吸収量の増大”で造成した藻場において、16.2t-CO₂/年を長期固定することが期待できる。よって、研究開発途上にある亜臨界水、および超臨界メタノール処理技術を利用した藻類の樹脂化、オイル化の基礎技術を開発することを目標とした。事業における成果の概要を示す。

2. 本 論

2.1 亜寒帯における低 CO₂ 型資材製造の実証

水産基盤整備や港湾・海岸工事等で一般的に使用されるコンクリート製ブロックや石材の代替材として、水和固化体の製造に取り組んだ。

まず、配合試験や品質確認試験を実施（図 1 は圧縮試験結果の一例）し、室蘭製鉄所から発生する製鋼スラグを用いた水和固化体が、所望の品質を満足できることとその製造工程を確認した。本事業の対象を北海道などの亜寒帯地域としていることから、耐凍害性を確認するための凍結融解試験も実施した。

次に、水和固化体を製造するプラント（写真 1）を新日鐵住金(株)室蘭製鉄所内に建設した。この設備設計では、水和固化体に用いる材料の配合から、サイロやコンベアの数や寸法の最適化を図った。また、建設後は最適な混練時間の検証等の試運転を実施し、製造工程は通常のコンクリートと同様でよいことを確認した。

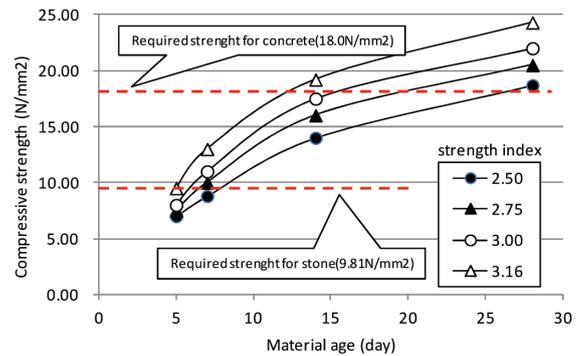


図 1 水和固化体の強度発現（5°C養生）
Compressive strength of steel-making slag concrete (5°C curing)



写真 1 水和固化体プラント
Steel-making slag concrete plant

2.2 亜寒帯における施肥と藻場造成の最適化

2.2.1 水和固化体の藻類着生促進効果の検証

藻場造成において、一般的にコンクリートブロックを海藻附着の基物として用いるが、コンクリートはその性状から水に接するとアルカリ性を呈し、水和固化体も同様である。この性質が海藻着生促進効果に与える影響を明らかにするため、水和固化体とコンクリートの試験ピースを用いた培養実験により、海藻の着生状況を調査した。試験の結果、コンブ遊走子の初期発生においては、海水中の pH は海藻の着生に大きな影響を与えることが明らかになった。

さらに、コンクリートと水和固化体による違いについて比較を行った。試験ピースの表面を海水で洗浄するあく抜き処理を行った場合には、いずれも多数の孢子体の生長が確認され差は見られなかったものの、あく抜き処理しなかった場合には、コンクリート表面には孢子体の生長が観察されないが水和固化体には確認されるという差が見られた（表 1）。この結果から、水和固化体は藻場の基質としてコンクリートよりも優位になり得ると考えられる。

2.2.2 水和固化体の藻類着生促進効果の検証

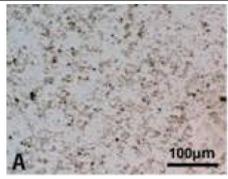
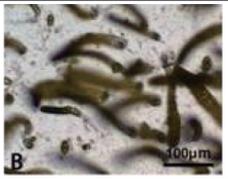
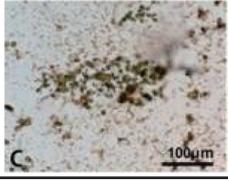
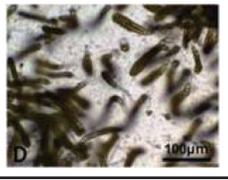
次に、試験対象海域である室蘭と寿都海域において水質（鉄分等）や食害生物（ウニ）等の海域調査を実施した。その結果、室蘭海域では海底面基質の安定性、光量、鉄分が、

一方の寿都海域ではウニによる食害（流速）、鉄分が海藻の生育にとっての主な制限要因であると判断された。これらの条件を基に、施肥と藻場造成の最適化のための拡散シミュレーションなどを実施し（図2）、水和固化体製の藻礁ブロックや人工石マウンド、鉄分施肥ユニットの配置や構造等を設計した（図3）。

2.2.3 藻礁・施肥ユニットの製造

前述の配合試験や品質確認試験の結果を基に、製鉄所内の水和固化体プラントを用いて材料を混練し、これを硬

表1 マコンブ遊走子の発生状況
Generating situation of a sea weed spore

	Non-treated	Treated
Concrete		
Steel-making slag concrete		

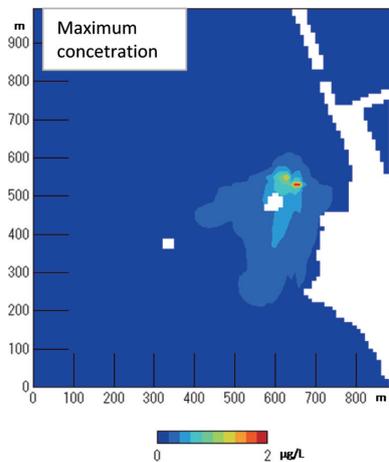


図2 鉄分シミュレーション結果例（室蘭）
Example of the simulation result of iron concentration (Murooran)

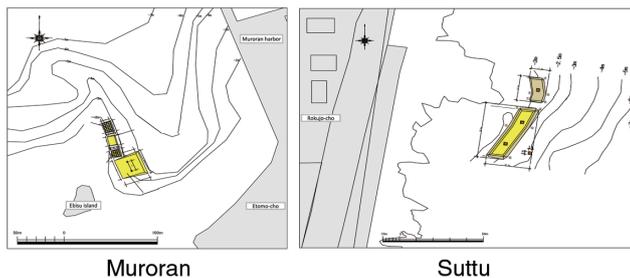


図3 藻礁配置
Arrangement of seaweed bed

化させてブロック（アルガロック、1.503m³／基）と人工石を製造した（写真2）。その実績は、当初計画の1000m³を超える1348m³であった。これら水和固化体製品に加え、施肥ユニットをトラックと台船により対象海域まで輸送し、海中に設置した。施工時期は、室蘭海域が2010年10月、寿都海域は2010年8月であった（写真3、4）。

2.2.4 藻場造成効果の評価

藻礁設置から約2か月が経過した後に周辺海域の海水を採取しその水質を調査した結果、施肥ユニット近傍で溶存鉄濃度の溶出が認められ、藻礁に鉄分が供給されていることが確認できた（図4）。

また、設置から4～6か月が経過した2月に実施した海藻の潜水調査の結果、水和固化体ブロック、人工石マウンドともにコンブの着生がみられた（写真5）。ここでは、漁業生産効果として、造成藻礁で生産されたコンブ類の総現存量を求めた（図5）。現存量の推定には、室蘭、寿都の各藻礁での効果調査で得られたコンブ密度を用いたが、調



写真2 水和固化体
Steel-making slag concrete



写真3 藻礁設置
Setting of seaweed bed



Seaweed bed Unit of iron-supply

写真4 藻礁
Seaweed bed

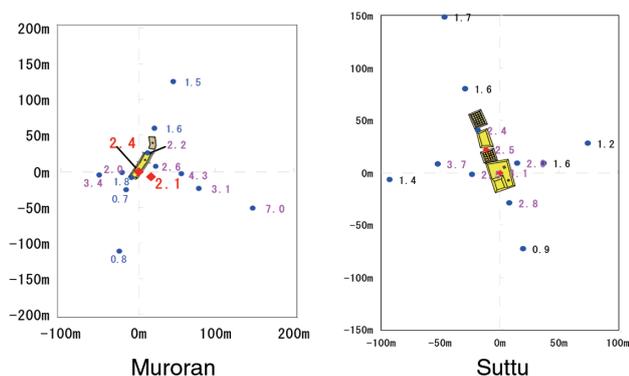


図4 溶存鉄濃度分布 (水質調査)
Concentration distribution of melted iron



Murooran Suttu

写真5 藻礁上のコンブ
Sea weed on seagrass bed

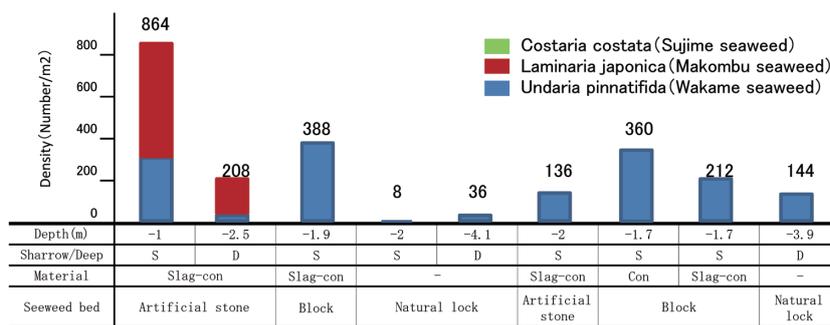


図5 コンブ現存量 (室蘭海域)
Standing stock of a sea weed (Murooran)

査を実施した2, 3月はコンブの成長初期である。このため着生本数に最盛期の葉重量 (藻体1本あたり重量) を乗ずることで最盛期のコンブ現存量推定値とした。調査実施時の実績ベースでは、室蘭では 0.077kg-wet/m²、寿都では 0.011kg-wet/m²、夏季の見込みベースでは、室蘭では 30.5kg-wet/m²、寿都では 13.8kg-wet/m² となった。

2.3 藻類の樹脂化, オイル化による CO₂ の長期固定化

2.3.1 藻類の樹脂化, オイル化に関する研究開発

前述の取り組みによって再生される藻類は、海洋環境の改善や沿岸域の産業振興、活性化ばかりでなく、さらなる可能性を有している。例えば、藻類のオイル化により石油由来の燃料と代替することが可能になれば、石油使用量の削減とその燃焼に伴う CO₂ 増加を抑制する効果もある。近年、バイオマスを活用する試みが盛んに行われているが、地球の表面積の 71% を占める海に目を向け、寒冷地においても繁茂する藻類バイオマスを炭素源とし、かつ、樹脂化を含む多様な工業製品の製造による CO₂ の固定を企図した技術の開発は少なく、本事業の取り組みは有用であると考えられる。

2.3.2 本研究での成果

地上にあるバイオマスは、その骨格としてリグニン、セルロース、ヘミセルロースを含む比較的シンプルで共通し

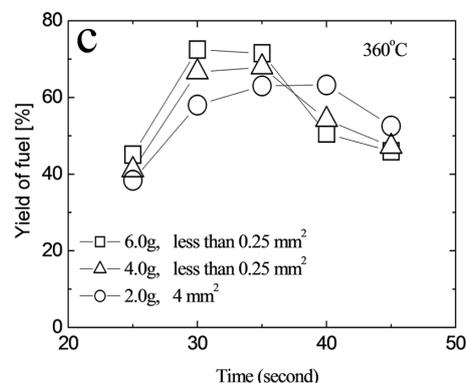


図6 油分収率の仕込み量時間依存性
Relationship between time and Yield of fuel

た組成を有するが、藻類バイオマスは、極めて多種多様な糖類から構成されており、かつ、同種の藻類であっても採取場所や採取時期によって組成が異なる。そのため、ここではコンブと汎用的なヒトエグサの2種類の藻類に絞って検討した。

オイル化検討に関しては、亜臨界水処理させるサンプルの仕込み量を多くし、高温、かつ短時間で処理すれば、収量を最大にできることがわかった (図6)。

一方、樹脂化の検討に関しては、藻類の構成成分である多糖類を直接高分子変換することで、分解、発酵、重合の工程を省いた効率的なバイオ樹脂の生産を狙った (図7)。

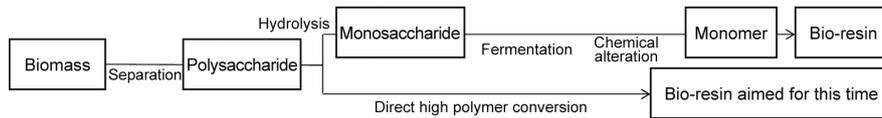


図7 バイオ樹脂の生産フロー
Production flow of bio-resin

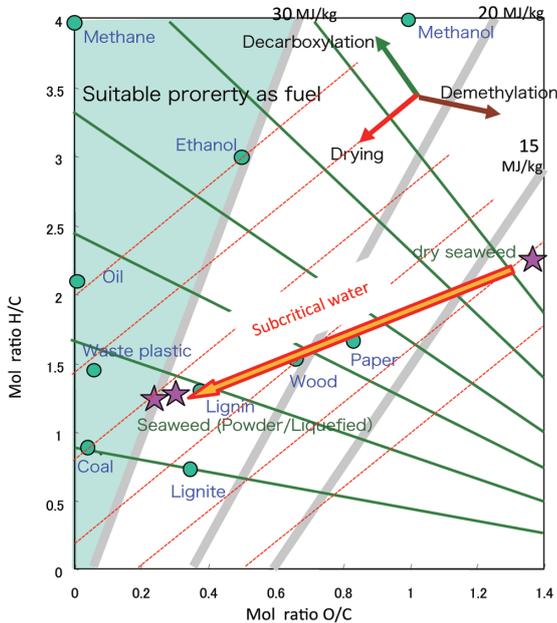


図8 藻類オイルの燃料としての評価
(水素・酸素/炭素モル比の変化と燃焼熱)
Evaluation as fuel of seaweed oil

Change of molar ratio (hydrogen, and oxygen/carbon) and combustion heat

多糖類のモデルとしてセルロースを選び、種々の酸触媒、固体酸触媒を用いてメチル化反応を実施した。本検討では、セルロースのメチル化反応は進行しなかったが、より酸強度の高い固体超強酸を用いる、または、セルロースの代わりにアルギン酸等を利用することで、樹脂化が可能ではないかと考えている。

2.3.3 藻類の樹脂化, オイル化に関する技術実証・導入

藻類の亜臨界水処理により得られたオイルについて、燃料としての性能を確認した。図8は、燃料中の炭素に対して水素が多く酸素が少ない方が、燃焼熱は高いことを示している。藻類を亜臨界水処理することで脱水反応と脱炭酸反応が起こり、さらに、縮合反応により重質化することでエタノールと同等の燃焼熱(約 30MJ/kg)を有する良質の燃料オイルが得られることが分かった。

3. 結 言

一連の実証試験の作業工程を基に、CO₂ 削減効果の評価、および事業としての自立化と横展開について考察した。

表2 CO₂ 削減量
Amount of CO₂ reduction

	Prospect and an achievement ratio	
	Standard physical unit (kg-CO ₂ /(m ² ・year))	Amount of reduction (t-CO ₂ /year)
A. Steel-making slag concrete	4.03 / 3.92 (103%)	10.9 / 7.8 (139%)
B. making seaweed bed	3.76 / 5.5 (69%)	3.71 / 10.9 (34%)
C. Oilize resinification	6.0 / 8.0 (74%)	12.0 / 16.2 (74%)
Sum total	13.8 / 17.5 (79%)	14.6 / 18.7 (78%) (A + B)

3.1 CO₂ 削減効果の評価

水和固化体の製造や海中までの設置に要した資材や重機の CO₂ 排出実績、さらに、海藻の生長程度から推測される CO₂ 吸収量を用いて、従来のコンクリートブロックによる藻場造成と比べた CO₂ 削減量を試算した結果は、m² あたり 13.8kg-CO₂/(m²・年)であった。この結果から、海藻の繁茂量が最大となる夏季の現存量を見込むと、本事業で設置した藻場による CO₂ 削減量は 14.6t-CO₂/年であると推定された(表2)。

さらなる CO₂ 削減量の拡大には、水和固化体の配合改良(セメント配合率の低減)、藻類着生面積向上のための技術確立、処理条件確立によるオイル収量の最大化などが課題として挙げられる(表2)。

3.2 事業の自立化と横展開

大気中の CO₂ 削減に大きく貢献することが期待される本事業が、社会システムの中で自立化し、さらに新たな産業として展開するためには、以下のような取り組みが必要であると考えられる。

3.2.1 水和固化体

過去の公共事業の実績等から、北海道の港湾事業等で使用されてきたコンクリートブロックの数量は約 360 千 m³/年であると試算され、このブロックを水和固化体に代替する市場が期待できる。特に、現行のコンクリートと比べて、価格面や生物着生性能で同等性能を有する他、重量コンクリート並の大きな比重を活かした用途への適用が期待できる。今後、水和固化体を市場に普及展開させるためには、骨材に製鋼スラグを使用できるプラントの確保を始めとする供給体制の構築、製造時の温度環境対策などの品質

管理技術向上などが課題となる。

3.2.2 藻場再生事業

我が国の藻場面積は 30 年間で 4 割減少していることから、水産基盤整備事業による藻場造成以外に、施肥などの藻場を再生する新たな取り組みが必要となる。この方法として、施肥による既存基質の利用と、藻場として未使用の砂浜の利用が考えられる。

今後は、費用対効果の算定方法の確立、公共事業のこれまでの枠組み（農水+環境+産業による雇用創出）を超えた一体的な取り組みづくり、陸上の森林による CO₂ 吸収量に対して遅れている海洋、特に藻場による CO₂ 吸収量評価の精度向上などが課題である。

3.2.3 藻類のオイル化と樹脂化

本事業において、オイル化は実験室規模での基礎検討を行った段階である。将来の実生産に向けた実証という観点からは、流通反応装置により反応温度、圧力、流量（反応速度）、スラリー濃度などのエンジニアリングデータを採

取すること、オイル性状（性能）とコスト等のバランスを最適化すること、水溶性有機物・固形物生成量の低減と有効利用などについて検討するといった取り組みが必要である。樹脂化については、藻類の化学利用の付加価値を高める意味からも重要な技術であり、引き続き検討したい。

謝 辞

本実証研究事業では、提案から完了までの間に、管理法人の(公財)室蘭テクノセンターを始め、事業実施者の新日鐵住金化学(株)、(株)テツゲン、五洋建設(株)、北海道大学 本村泰三教授、静岡大学 佐古猛教授、岡島いづみ助教、そして様々な機関の多くの方々にご協力を頂いた。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 室蘭テクノセンター：平成 21 年度 低炭素社会に向けた技術発掘・社会システム実証モデル事業“農工循環資源を用いた亜寒帯沿岸域藻類による CO₂ 吸収実証モデル事業”成果報告書. 2011.3



上村竜介 Ryusuke UEMURA
室蘭製鉄所 設備部 機械技術室 主幹
北海道室蘭市仲町12番地 〒050-8550



峰 寛明 Hiroaki MINE
(株)エコニクス 環境企画部 主幹研究員



下田和敏 Kazutoshi SHIMODA
機材調達部 設備調達室 主幹