

海水中の栄養塩を利用した不稔性アオサの培養と生産設備

Culture Characteristics of the Sterile *Ulva Lactuca* (Chlorophyta) in Enriched Seawater and Planning of its Production System

平山 伸¹・大久保精二²・宮坂 政司²

Shin HIRAYAMA, Seiji OOKUBO and Masashi MIYASAKA

Abstract

Sterile *Ulva*, which is a green alga, has the potential to grow all year round, therefore, this macroalga is expected to be a feed resource containing various nutrients such as proteins, amino acids, and minerals. *Ulva lactuca* was selected from the “Marine Park” in Yokohama, and its growth rate ($\text{g-dry}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$) was measured using a model reactor simulated the surface of the sea. In these experiments, the growth rate of *Ulva lactuca* was found to be 15–20 $\text{g-dry}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ which is estimated to be 10 times greater than that in nature field. Based on these data, we newly designed a float type of efficient *Ulva lactuca* production system. Fifty $\text{kg-dry}/\text{d}$ of *Ulva lactuca* without containing foreign substances such as the sands and 1.9 $\text{kg-N}/\text{d}$ are expected to be harvested when the float type system (60 m wide $\times$ 110 m long $\times$ 2 m deep) is used with enriched seawater. Hence, this facility also has a potential for feed resource production using enriched seawater including deep seawater.

Key Words: *Ulva lactuca*, enriched seawater, nitrogen recovery, growth rate, food resource, production system

1. はじめに

近年、不稔性アオサが国内の富栄養化海域において増殖しており、このような増殖がアジアやヨーロッパでも拡大している¹⁾。これらの地域のうち観光地ではアオサの悪景観、腐敗臭発生、海底動植物へのマイナス影響のため何らかの対策が必要となっている。

一方、不稔性アオサは世代交代しにくいことから、培養環境下で安定な通年生産が期待できる。さらに、アオサには蛋白質やミネラル等の栄養素が含まれ、飼料効果試験が着手されていることから、将来の食糧・飼料源としても注目されている¹⁾。本論文では、富栄養化海域を利用した不稔性アオサの培養特性と運用上の検討、さらに資源生産を兼ねた浮体式培養

生産装置の概念設計について述べる。

2. 材料と方法

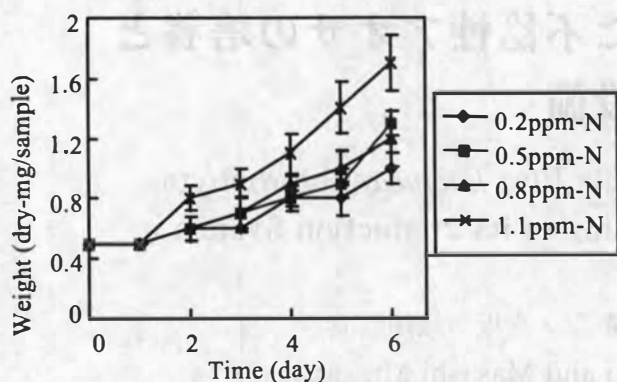
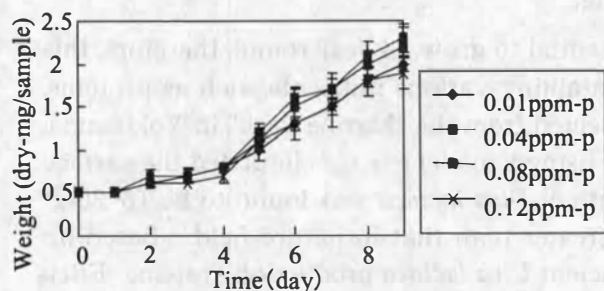
安定に増殖可能なアオサとして、横浜・海の公園から不稔性アオサ (*Ulva lactuca*) を選別して、実験に供した。

実験は、太陽光の一日の強度と波長を模擬したソーラーシミュレータを用いて屋内培養実験を行い、このアオサの培養安定性、増殖速度に及ぼす $\text{NO}_3\text{-N}$ (硝酸態窒素) 濃度、 $\text{PO}_4\text{-P}$ (リン酸態リン) 濃度の影響を調べた。

次に、太陽光の下で実海水を用いた屋外培養実験を行い、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の影響、1日の単位照射面積当たりの増殖速度 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$) の測定、葉面積指数 ($\text{LAI}^{1)}$ = アオサ葉体全面積 / 培養装置の水面面積)

¹三菱重工業(株) 基盤技術研究所 (〒236-8515 横浜市金沢区幸浦一丁目8-1)

²三菱重工業(株) 横浜研究所 (〒231-8715 横浜市中区錦町12番地)

Fig.-1 Effect of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrationFig.-2 Effect of $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration

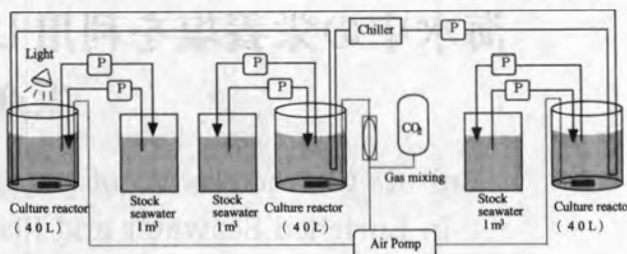
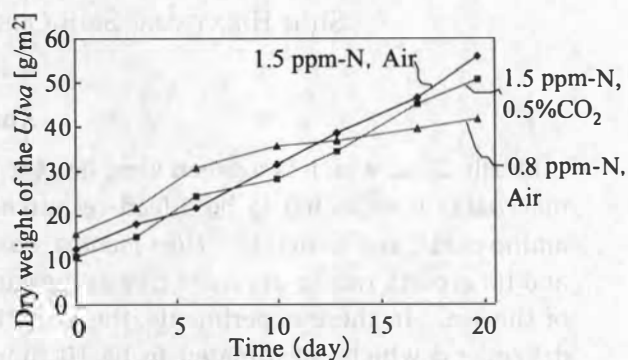
と比増殖速度の計測，夜間連続照射の影響， CO_2 （二酸化炭素）供給の影響，およびアオサに含まれる N（窒素），P（リン）の含有量測定を行った。

3. 結果と考察

(1) 屋内培養実験

屋内培養実験は，太陽光の一日の強度と波長を模擬したソーラーシミュレータと 900 ml 培養槽を用いた。φ8 mm の不稔性アオサを 5 枚投入し，0.5 % CO_2 を含むエアーを 35 ml/min 付加して攪拌，温度は 20 ~ 26 °C に設定した。各条件とも $\text{PO}_4\text{-P}$ は横浜・海の公園付近と同濃度の 0.12 ppm に固定し， $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度をパラメーターとして 4 条件同時に培養を行った。Fig.-1 にその結果を示すが， $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 0.2 ~ 0.8 ppm までは，ほぼ同じ増殖速度を示したが，1.1 ppm では 3 ~ 4 割増殖速度が増加することが解った。Fig.-2 は屋内培養実験での $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の影響を示し，各条件とも $\text{NO}_3\text{-N}$ は横浜・海の公園付近と同濃度の 1.1 ppm に固定した。その結果， $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度 0.01 ~ 0.12 ppm では増殖速度に大きな差は認められなかった。

以上の結果から， $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度よりも $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度

Fig.-3 Outdoor *Ulva* Culture reactorFig.-4 Effect of N concentration and CO_2

の方がアオサの増殖速度に大きな影響を及ぼすことが解った。

一方，海洋深層水は高知県室戸沖のもので， $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 0.2 ~ 0.4 ppm と $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度 0.04 ~ 0.06 ppm を含むことが報告されており²⁾，深層水レベルの栄養塩でもアオサが増殖出来るものと考えられた。

(2) 屋外培養実験

次に，太陽光の元での屋外培養実験を実施した。これは 3 つの培養槽からなり，横浜・海の公園から海水を取水し，窒素濃度を NaNO_3 （硝酸ナトリウム）により一定に調整したものを循環させて培養を行った。培養は $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度，夜間照射， CO_2 供給をパラメータとし，増殖速度，比増殖速度，LAI，およびアオサの N，P 含量を測定した。なお，試験期間が冬季に掛かったため，水温は約 25 °C にコントロールした。Fig.-3 に屋外培養のリアクターシステムを示す。各水槽の側面は遮光されており，海水面上面のみの光入射を模擬している。また，アオサ葉体が十分受光できるようエアレーションによる攪拌を行った。投入する不稔性アオサは φ 37 mm に調製し，各水槽の水面上と底面で照度を測定して，

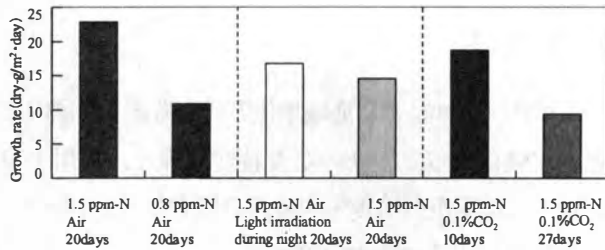


Fig. 5 Growth rates of *Ulva lactuca* under various outdoor conditions

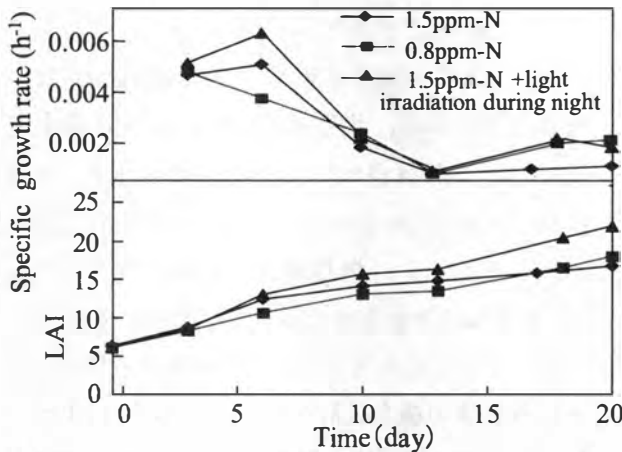


Fig. 6 Analysis for effective productivity by LAI

上下の照度比が 100:1 となるよう枚数を設定した。Fig. 4 は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 1.5 ppm と 0.8 ppm でのアオサの重量変化を示したもので、1.5 ppm に比べ、0.8 ppm では増殖速度が低下することが解る。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 1.5 ppm で 5% CO_2 添加した場合、エアーレーションのみのケースに比べ、増殖速度はほとんど変化せず、 CO_2 の添加効果については、最適な添加濃度やアオサの密度が今後の課題である。

これまで行った屋外培養でのアオサの増殖速度の代表的なものを Fig. 5 に示す。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度については濃い方が増殖速度が速く、1.5 ppm では $20 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ を超えるケースもある。また、1,500 Lux の夜間照射を 12 時間行っても、1 割程度の増殖速度向上が得られただけであった。1.5 ppm で 0.1% CO_2 を添加した場合、27 日間の長期培養では 10 日間の短期培養に比べ、平均増殖速度が半減することがわかり、短期間でアオサを回収して、再植種することが効率的な培養生産になると考えられた。

これらの結果から培養制御によるアオサの増殖速度は $15 \sim 20 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ は期待できる。これは自然界（横浜・海の公園）でのアオサの増殖速度 1 ~ 2

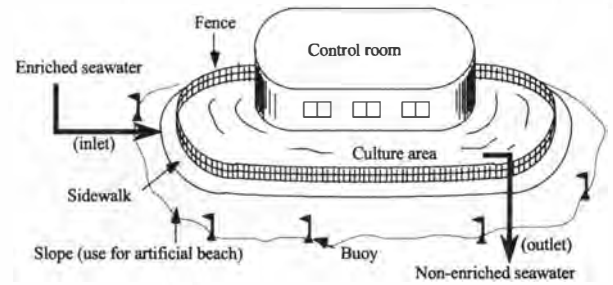


Fig. 7 Concept of float type *Ulva lactuca* production system

$\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$ （文献¹⁾から算出した結果）の 10 倍に相当すると考えられ、国内での穀物飼料生産や牧草より速い増殖速度である³⁾。また、含有量測定から、培養装置単位面積当たりの窒素とリンの固定速度は、それぞれ $700 \text{ mg-N/m}^2 \cdot \text{d}$ 、 $55 \text{ mg-P/m}^2 \cdot \text{d}$ と推定できる。また、屋外培養実験では $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 0.8 ppm でもアオサの増殖速度 $11 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ を示しており、屋内培養実験での $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 0.8 ppm 以下で増殖速度がほぼ一定との結果を加味すると、アオサ培養に海洋深層水を適用する場合、栄養分含量からは $10 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ 程度の増殖速度が期待できる。

次に葉面積指数（LAI）と比増殖速度の関係について検討を行った。Fig. 6 によれば LAI が 13、つまり培養 7 日までが比増殖速度が速い傾向を示す。これにより、高い増殖速度を維持するためには培養日数にして約 7 日毎にアオサを回収し、再植種することが重要であり、工業的な高効率生産への基礎データになると考えられる。

(3) 培養装置

これらの結果を受け、アオサ培養装置の概念設計を行った。Fig. 7 はその概観を示したもので、全体が浮体式で、中央部は機械室、その周囲はクロレラ等の微細藻培養で多用されているレースウェー型培養装置となっており、さらにその周囲にはスロープがあり、人工海浜として利用できるレジャー機能を備えた複合施設である。運用とエネルギー供給のために陸地とは浮き橋で繋がっており、アオサ回収装置コンベヤーを備えている。長さ 110 m、幅 60 m の規模で、チェーン係留されており、底部は囲われていて、外部と遮断された構造となっている。装置の深さは、攪拌効率を上げてアオサへ効率よく

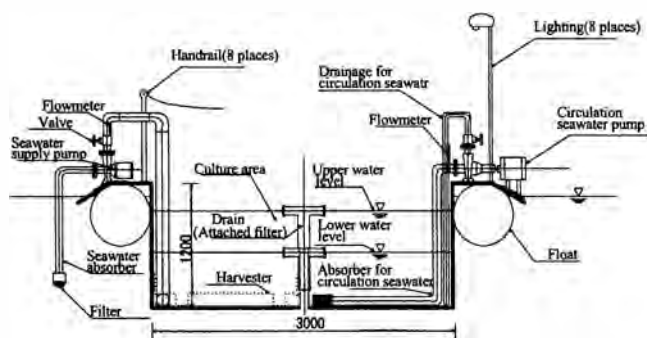


Fig.-8 Plan of a model mini-plant for *Ulva lactuca* production

受光させるため、水深 2 m としている。また、動力源の一部としてソーラーパネル、水流発生装置としてパドルを備えている。生産性向上のため夜間照射設備、加温装置、CO₂ 供給装置を備えることも可能であり、付加価値の高い食品生産における採算性についても見通しを得ている。この装置を富栄養化した海域に設置することで、アオサ生産と共に海水からの N、P の回収が期待できる。さらに、深層海水の利用方法として、余剰な深層海水を本装置に引き込むことにより、深層海水の沿岸等の環境への影響低減も期待できる。また、Fig.-8 に示すような 7 m³ 規模のミニプラントの概念設計も行っており、富栄養化海域でのアオサ生産試験研究レベルに対応可能である。

現在、収穫したアオサの有効利用法として有用成分の分離・精製や、その生理活性の評価を行っており、新たな有効利用法が見つかりつつある。これらのアオサの培養から有効利用までの一連の組み合わせによって、富栄養化海域を利用したアオサによる物質生産システムが可能になる。さらに、大型化することによって未利用海洋資源を基盤とする食糧・飼料生産形態ができ、食糧自給率向上に寄与できるものと考えられる。

4. おわりに

不稔性アオサによる海域浄化方式を考案し、屋内・屋外実験によるアオサの培養特性把握と、運用上の検討、海洋浮遊型培養生産装置の概念設計を行った。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 横浜・海の公園産アオサ (*Ulva lactuca*) の増殖速度は、P 濃度より N 濃度に大きく影響されることが確認できた。
- (2) 横浜・海の公園産アオサ (*Ulva lactuca*) は、培養制御により、増殖速度 15 g/m²・d 以上を示した。これは自然界での算出増殖速度 1～2 g/m²・d の約 10 倍の速度でアオサが生育可能ということを示し、培養制御により自然界よりも N、P の吸収速度を速めることが可能である。
- (3) 陸上での増殖速度をもとに、海洋浮遊型のアオサ培養装置の概念設計を行った。長さ 110 m、幅 60 m、培養面積 2,700 m² の設備で、砂などの異物が混入しない清浄アオサ 50 dry-kg/d の生産・回収、1.9 kg/d の N の除去が期待できる。また、培養制御により、富栄養化海域を利用したアオサ生産やアオサからの物質生産が期待できる。
- (4) 以上により、アオサによる海域浄化＝バイオリメディエーションと食料・飼料などの資源生産を兼ね合わせた装置化技術の見通しを得た。

参考文献

- 1) 能登谷正浩編著：アオサの利用と環境修復，成山堂書店，1999。
- 2) 財団法人日本海洋開発産業協会編：海洋開発ニュース，Vol. 27，No. 6，pp. 9-12，1999。
- 3) Hirayama, S., Ookubo, S. and Miyasaka, M.: Culture characteristics of the sterile *Ulva* sp. in enriched seawater and concept of its production facilities, Proceedings of The International OTEC/DOWA Association '99, Uehara, H., Wang, J. H. and Ikegami, Y. eds., pp. 273-279, 1999。

(2000. 2. 29受付)