

## ナガコンブの光合成及び生産力と関連した水中の光環境について

坂西芳彦<sup>1</sup>・鈴木健吾<sup>2</sup>・宇田川徹<sup>1</sup>・飯泉仁<sup>1</sup>・山本正昭<sup>1</sup><sup>1</sup>独立行政法人水産総合研究センター北海道区水産研究所 (085-0802 釧路市桂恋 116)<sup>2</sup>科学技術振興事業団 (332-0012 川口市本町 4-1-8) 現所属：(財) 環境科学技術研究所  
(039-3212 青森県上北郡六ヶ所村大字尾敷字家ノ前 1-7)Yoshihiko Sakanishi, Kengo Suzuki, Toru Udagawa, Hitoshi Iizumi and Masaaki Yamamoto: Underwater light climate in relation to photosynthesis and productivity of *Laminaria longissima*. Jpn. J. Phycol. (Sôru) 49:117 - 123.

In order to gain a better understanding of eco-physiological characteristics of laminarian plants living in the subtidal zone, we investigated underwater light climate along the Kushiro coast of Hokkaido. Incident PAR was calculated from following three elements, PAR on land, attenuation coefficient and depth. PAR on land was continuously measured in 10 minute interval. The attenuation coefficient was obtained by the regression analysis of the relationships between depth and incident PAR measured in every 3 days. Depth was corrected for the effect of tidal change by using the program for calculation of the sea level. At the depth of 1, 2 and 3m (below Datum Level), estimated daily PAR showed the maximal value of 16.9, 10.9 and 7.1 mol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup> each in May, and declined to reach the minimal value of 1.8, 0.6 and 0.2 mol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup> each in November. Incident PAR showed the similar seasonal change in PAR on land. On the basis of the radiation data obtained, photosynthetic characteristics and productivity of *Laminaria longissima* under in situ light condition were discussed.

*Key index words* : attenuation coefficient, Lambert-Beer's law, *Laminaria longissima*, PAR, photosynthesis, underwater light climate

<sup>1</sup> Hokkaido National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, 116 Katsurakoi, Kushiro-shi, Hokkaido, 085-0802 Japan

<sup>2</sup> Japan Science and Technology Corporation, 4-1-8 Honcho, Kawaguchi-shi, Saitama, 332-0012 Japan. Present address: Institute for Environmental Sciences, Rokkasyo-mura, Kamikita-gun, Aomori, 039-3212 Japan

海藻群落の成立を制限する要因として、光、温度、栄養塩、水の流れ、底質などの物理化学的要因と、植食動物によるグレージングやアレロパシーを含む種間競争などの生物的要因が考えられるが、なかでも光は漸深帯の海藻の生育を制限する最も重要な要因である。

コンブ目藻類では、群落内光環境と光合成特性の解析結果から、補償光量と垂直分布との対応関係が理論的に説明されている (Maegawa *et al.* 1987, 1988, 倉島 1996, 倉島ら 1996, 坂西ら 2001)。また、従来、飽和光条件での測定結果から求めたコンブ目藻類の光合成最適温度は、生育温度に比べてかなり高くなることが報告されてきたが、倉島 (1996)、倉島ら (1996) により、現場と同様な弱光下での光合成最適温度は生育温度にほぼ等しいことが明らかとなった。

これらの研究は、水中光環境の解析が、漸深帯

の海藻の垂直分布や、群落形成の要因の解明に必須であるとともに、水温と関連した生態現象を理解する上でも重要な手段であることを示唆している。しかしながら、海藻群落の立地である沿岸浅海域においては、長期わたり高い頻度で測定された水中の光強度に関するデータが極めて少ないのが現状である (Lüning & Dring 1979)。そこで、本研究では、野外調査によって、釧路市の沿岸浅海域における水中光量子量の周年変動を明らかにするとともに、得られた水中光量子量に関するデータを用い、ナガコンブ *Laminaria longissima* Miyabe の生理生態学的特性についての考察を行なった。

地上の光強度は、1998年5月1日から1999年4月30日までの間、北海道釧路市桂恋(北緯42°57', 東経144°27') (Fig.1) の北海道区水産研究所の屋上に設置したメモリー式の光量子計 (LICOR LI-1000/LI-190S) を用いて、10分間隔で連

続測定した。蓄積されたデータは、一定期間ごとにパーソナルコンピューターで読みとった。

海水の吸光係数は、実測した水中の光強度と水深との関係から以下のようにして求めた。北海道区水産研究所から約0.6km離れた桂恋漁岩突堤先端部付近の海域（水深約4m）（Fig.1）で、水深0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0mにおける光強度を地上と同時に測定した（Fig. 2）。光強度はそれぞれ地上用および水中用の光量子センサー（LICOR LI-190S/LI-192S）を組み合わせた光量子計（LI-COR LI-189）を用いて3回ずつ測定した。水中の光強度と水深の関係は次の式で表される（Lambert-Beerの公式）。

$$I_D = I_0 \exp(-kD) \cdots (1)$$

$I_D$ は水深D（m）における水中の光強度、 $I_0$ は水面直下の光強度（海面で反射される分は除く）、 $k$ は海水の吸光係数を示す。海面における光の反射率（1日平均）は北緯40°付近の中緯度海域では4～11%と報告されているので（Campbell & Aarup 1989）、平均値をとって7.5%とした。地上の光強度を $I_L$ とすると、水面直下の光強度 $I_0$ は $(1-0.075) I_L$ なので、(1)は(2)のように書き換えることができる。

$$I_D / I_L = 0.93 \cdot \exp(-kD) \cdots (2)$$

実測した各水深における相対光強度（ $I_D / I_L$ ）（水深毎に3度繰り返して測定した平均値）と水深（D）との関係はコンピューターソフトウェア（日本ボラロイド DeltaGraph Pro3）を用いて、(2)に曲線近似し、 $k$ の値を求めた。測定は1998年5月6日から1999年4月30日までの1年にわたり、概ね2日おきに、117回行った。測定時刻は、太陽の南中時に近い11:30～13:00であった。また、桂恋漁港周辺の海水の吸光係数と、コンブ群落が形成される天然の岩礁周辺のそれを比較するために、ほぼ同時刻に、桂恋漁港突堤先端部と漁港から直線距離で約600m離れた岩礁（Fig.1）で水中の光強度を測定し、海水の吸光係数を求めた。

対象とした水深帯では、潮汐による水深の変化が水中の光強度の計算に及ぼす影響が大きいと予想された。そこで、地上光データのサンプリング間隔に合わせて、山本（1971）の潮位推算プログラムで計算した10分間隔の潮位データで水深を補正し、地上光、海水の吸光係数とともに(1)に代入して、各水深帯における光強度の瞬間値を計算した。このようにして求めた光強度の瞬間値を

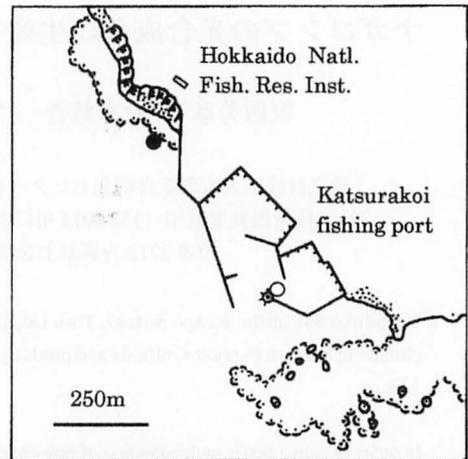


Fig. 1 Map showing Katsurakoi fishing port (○) and rocky shore (●), where underwater light measurements were performed.

積分して、1日あたりの積算光量を求めた。また、水中の光強度の瞬間値をもとに、大山（1998）、倉島（印刷中）の方法により7月の群落内のナガコンブ藻体が捕集する光強度を計算し、その値とナガコンブの光合成—光曲線のモデル式（坂西1998、坂西ら2001）を使い、弱光下での光合成—温度特性や種々の天候条件下での群落の純生産量を推定した。

その結果、桂恋漁岩突堤先端部付近の相対光強度と水深の関係、およびその回帰分析から得られた海水の吸光係数（月平均値）の季節変化を、それぞれ Fig. 3 と Fig. 4 に示す。測定日ごとにプロットを近似させて得られた海水の吸光係数は

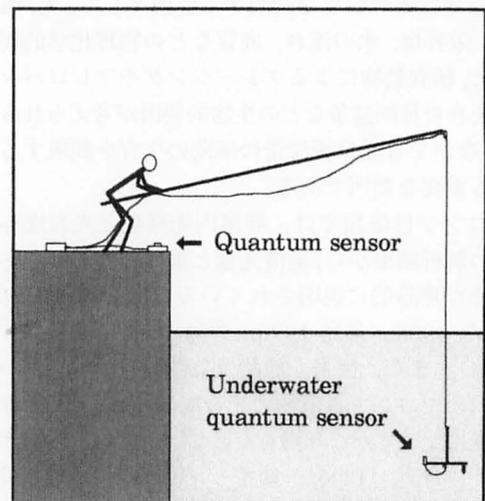


Fig. 2 Schematic illustration of underwater light measurement at the fishing port.

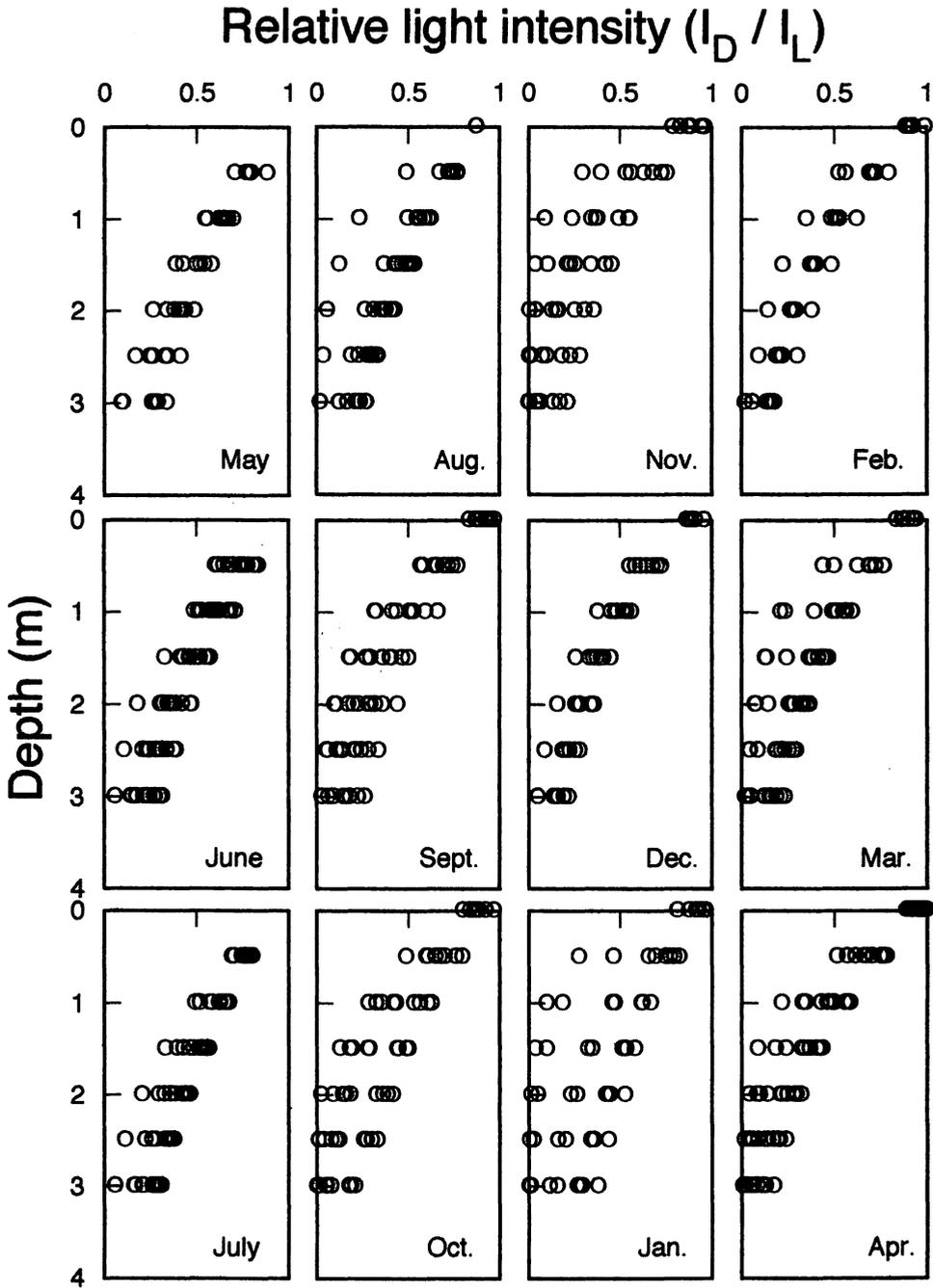


Fig. 3 Attenuation of light in the subtidal zone at Katsurakoi fishing port, Kushiro from May 1998 to April 1999. Underwater light measurements were performed 117 times for a year with 3 replications for each measurement. Each plot shows one measurement.

0.33～2.35の間で変動した。吸光係数の月平均値は、5月から7月にかけてはほぼ一定の値を示した後、11月まで増加して極大となり、12月に減少後、4月まで明瞭な傾向を示さずに変動した。極小値は0.42 (5月)、極大値は1.03 (11月)であった。

海水の吸光係数は、熱帯海域の透明度の著しく高い外洋水では0.1以下、時として純水のそれに近い値を示す場合があるが、日本沿岸では概ね0.10～0.30の範囲にあり、プランクトンや懸濁物質が少ない澄んだ外海域では0.1程度、平均

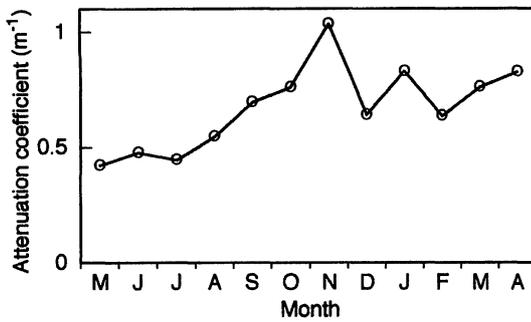


Fig. 4 Seasonal change in monthly average of attenuation coefficient of seawater, obtained by the regression analysis of the relationships between depth and incident PAR in Fig. 3, at Katsurakoi fishing port, Kushiro from May 1998 to April 1999.

的な沿岸域では0.2程度、養殖が盛んに行なわれているような濁りが強い内湾の湾奥部、赤潮発生時の海域では0.3程度である（有賀 1973, 大山 1998）。これらの値に比べ、本研究で得られた吸光係数はかなり高いものと言える。

1998年5月29日に得られた吸光係数 (0.44) は、同日のほぼ同時刻に、ナガコンブ群落が発達される岩礁周辺 (Fig. 1) で得られた吸光係数 (0.41) に極めて近い値を示した (Fig. 5)。また、過去に Fig. 1 の岩礁周辺で8月下旬に調べられた吸光係数 (0.5) (水産庁 1988) も、桂恋漁港周辺で得ら

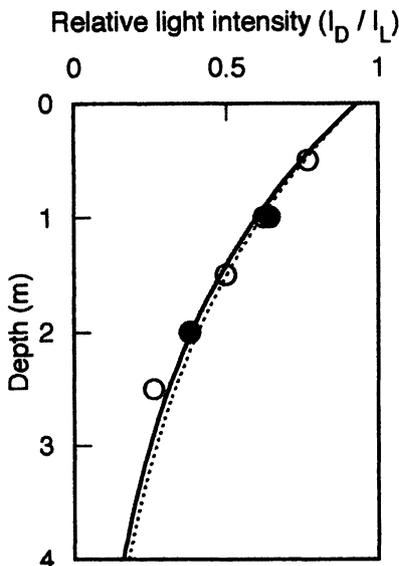


Fig. 5 Attenuation of light in the subtidal zone at Katsurakoi fishing port (open circle and solid line) and rocky shore (closed circle and dotted line) near the fishing port, Kushiro on May 29, 1998.

れた8月の吸光係数 (0.55) に近い値であった。したがって、Fig. 3 に示した桂恋漁港周辺での光の減衰は、ナガコンブ群落が発達される岩礁域の漸深帯における光の減衰とほぼ同様なものであると考えられる。

北海道区水産研究所の屋上で10分間隔で連続測定した光量子束密度と海水の吸光係数をもとに計算した地上および水中の積算光量子量の季節変化をFig. 6に示す。地上の光量子量 (日別値) (Fig. 6A) は、5～6月に高く、11～1月が低かった。5～6月の2ヶ月間で、 $40 \text{ mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$  を越えた日数は27日に達し、年間の最大値 ( $58.7 \text{ mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ ) も、この時期に記録された。11～1月では、最大値は  $23.4 \text{ mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$  であったが、日毎の変動は、5～6月に比べると小さかった。これは、11～1月の晴天率が、5～6月のそれに比べて高いことを反映している (釧路地方気象台 1998, 1999)。

地上の光量子量 (月平均値) は、6月に極大 ( $35.6 \text{ mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ )、12月に極小 ( $13.3 \text{ mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ ) を示し、水中の光量子量 (月平均値) は、5月に極大、11月に極小を示した (Fig. 6B)。水深1, 2, 3m (基本水準面からの水深) における5月と11月の光量子量は、それぞれ、 $16.9, 10.9, 7.1 \text{ mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$  であり、 $1.8, 0.6, 0.2 \text{ mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$  であった。水中光量子量の季節変化のパターンは、地上の光量子量のそれと概ね同じであったが、水中における光量子量が極大と極小を示す時期は、地上におけるそれらとは多少異なっていた。極大と極小を示す時期が、地上と水中で異なるのは、海水の吸光係数の季節変化が原因である (cf. Fig. 4)。

7月の水深2m (平均水面からの水深) の群落内 (葉面積指数  $\text{LAI}=8.34$ ) でコンブ藻体が昼間の時間に捕集する平均的な光量子束密度を求めたところ、 $27 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  となった。7月の種々の温度条件 (0, 5, 10, 15, 20°C) におけるナガコンブの数式化された光合成—光曲線 (坂西 1998) から、 $27 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  における種々の温度条件での純光合成速度を求めた。その結果得られた群落内の平均的な光条件下での光合成—温度曲線を Fig. 7A に示す。また、同じく7月の水深2mの群落内でコンブ藻体が捕集する平均的な光量子束密度の日周変動を求めた。その値を7月の種々の温度条件 (0, 5, 10, 15, 20°C) におけるナガコン

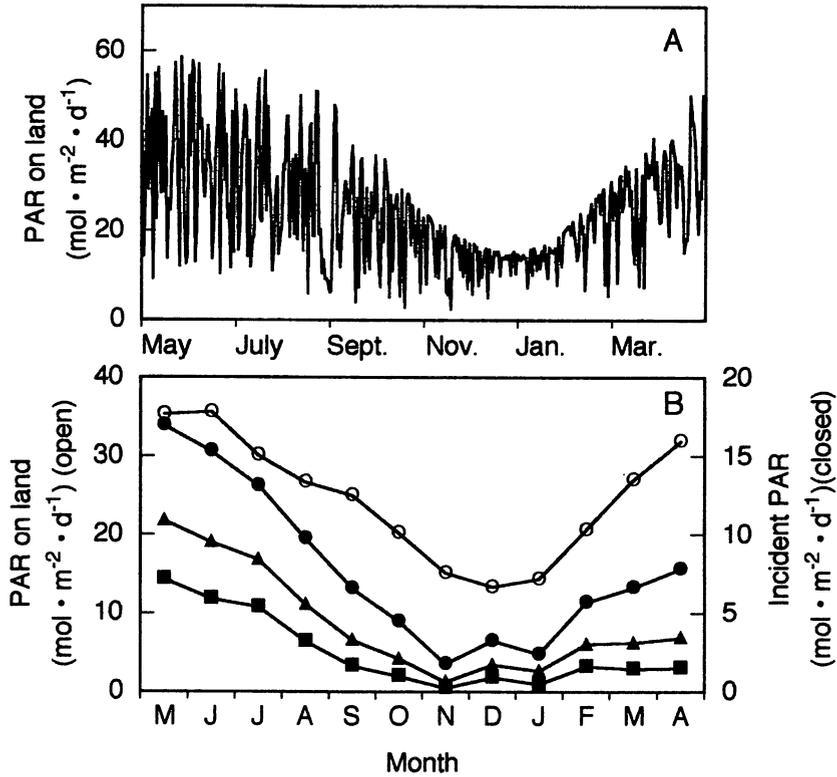


Fig. 6 Seasonal changes in PAR on land and incident PAR at the coast of Kushiro, Hokkaido from May 1998 to April 1999. (A) PAR on land. (B) Monthly averages of PAR on land (○) and estimated PAR at the depth of 1m (●), 2m (▲) and 3m (■) (below Datum Level). Datum Level is located at the level of 0.87m below mean sea level at Kushiro.

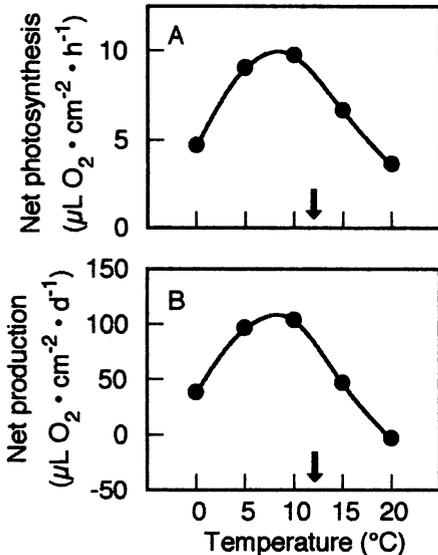


Fig. 7 Effects of temperature on net photosynthetic rates (A) and net production (B) in sporophytes of *Laminaria longissima* growing at 2m depth (below mean sea level) in July, estimated by using P-I curve equations (Sakanishi 1998) and radiation data. Arrows show the average of seawater temperature in July in the study site.

ブの数式化された光合成-光曲線(坂西 1998)に代入し,得られた種々の温度条件における純光合成速度の日周変動データを積分して単位葉面積あたりの1日の純生産を求め,群落内の平均的な光条件下での純生産量-温度曲線をFig. 7Bに示す。

Fig. 7A に示した曲線から日中の平均的なナガコンブの純光合成速度の最適温度は10°C付近にあるものと判断される。また,夜間の呼吸を計算に入れた1日あたりの純生産も10°C付近で最大になるものと判断される (Fig. 7B)。

一般に,光合成と温度との関係を調べる場合には,温度以外の要因が律速要因にならないように飽和光を照射して光合成速度を測定しているが,アラメ,カジメの群落で報告されているように,濃密な海藻群落の内部の光強度は極めて低く,海藻の葉面にあたる光強度もかなり低い(前川・喜田 1987)。そこで実際に群落内とはほぼ同じ光条件下でアラメとカジメの純光合成速度を測定し,光合成-温度曲線を求めると,光合成最適温度は飽和光下での光合成最適温度よりもかなり低

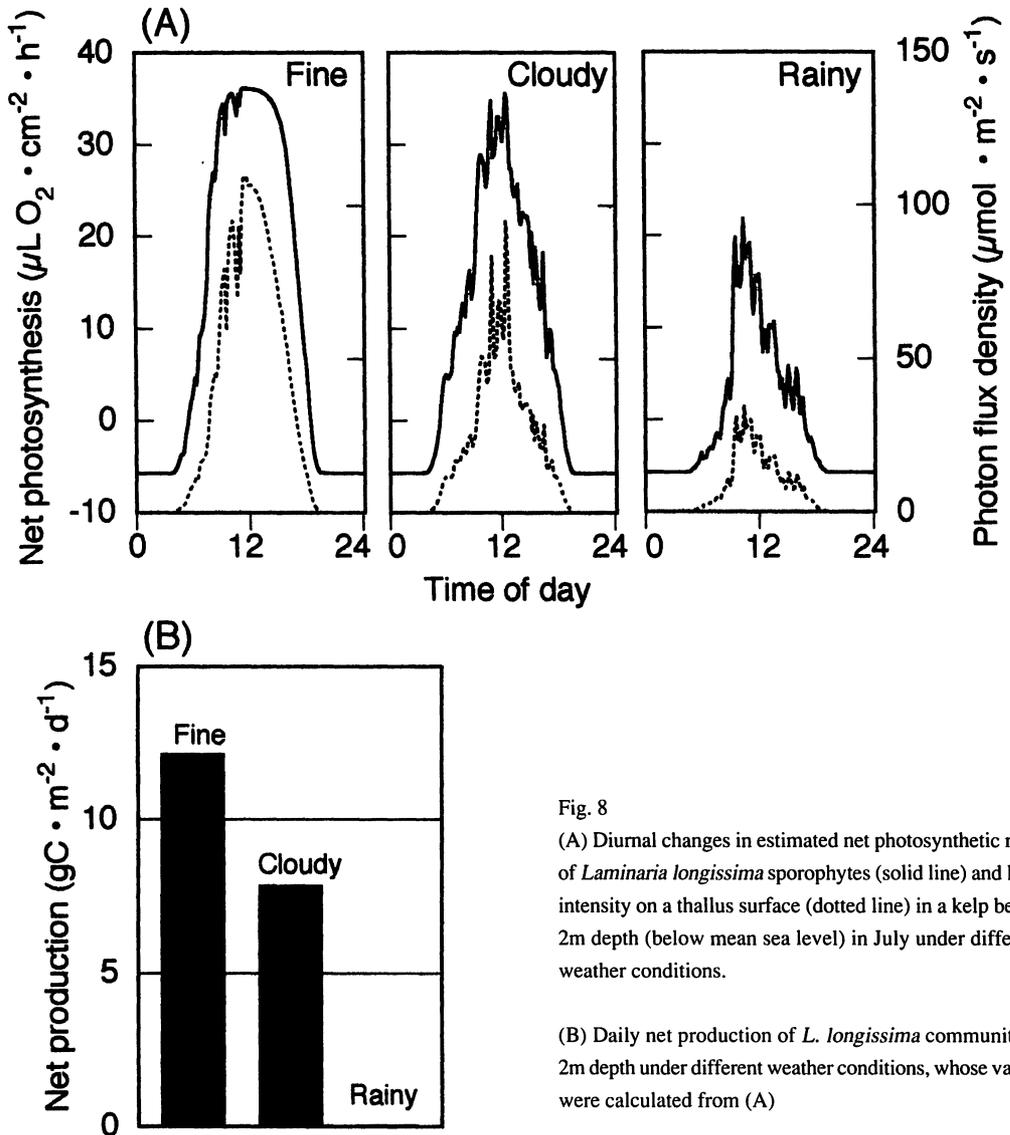


Fig. 8

(A) Diurnal changes in estimated net photosynthetic rates of *Laminaria longissima* sporophytes (solid line) and light intensity on a thallus surface (dotted line) in a kelp bed at 2m depth (below mean sea level) in July under different weather conditions.

(B) Daily net production of *L. longissima* community at 2m depth under different weather conditions, whose values were calculated from (A)

くなり、生育水温により近づくことが、最近明らかにされた(倉島 1996, 倉島ら 1996)。

ナガコンブの純光合成速度の最適温度は、飽和光条件下では生育水温(-1~16℃)よりも高い20℃付近にあることが報告されている(坂西・飯泉 1998)。しかし本研究により群落内光条件に近い弱光下では、生育水温(7月の月平均水温は12℃)に比較的近い温度になることが明らかになった。また、1日の純生産が最大になる温度も、純光合成速度と同様、生育水温とほぼ一致した。

晴天、曇天、雨天時の、水深2mにおけるナガコンブ群落の藻体が捕集できる光量子束密度の日周変動、および数式化されたナガコンブの光合成

—光曲線(坂西ら 2001)から求めた群落内のナガコンブの純光合成速度の日周変動を Fig. 8Aに、さらに純光合成速度の日周変動を積分して求めたナガコンブ群落の日純生産の推定値を Fig. 8Bに示す。

晴天時と曇天時では、南中時頃、光量子束密度は急速に極大に達するが、純光合成速度の増大はそれほど顕著ではないことがわかる。これは、南中時に近い時間帯における群落内光条件が、ナガコンブの光合成速度の飽和光、またはそれに近いレベルに達している事を示している。

推定されたナガコンブ群落の推定日純生産

は、天候によって大きく異なった。曇天日の純生産は、晴天日のその65%にとどまり、雨天日のそれは、光合成による生産と呼吸による消費が釣り合い、ほぼ0となった。方法の違いを考慮する必要はあるが、本研究で推定されたナガコンブ群落の日生産量は、他のコンブ属で報告されている値（有賀 1986）とほぼ同様であった。

宗谷地方のリシリコンブ *Laminaria ochotensis* Miyabe では、実入り期の全天日射量と製品中の等級の高いコンブ（藻体長、藻体重量などを基準に判断される）の割合との間に相関がみとめられているが（瀧谷 1998）、今回の純生産の推定結果（Fig. 8B）は、そのような現象を植物の物質生産に関わる生理生態学的観点から裏付けるものと言える。

今後、さらに群落構造を含む水中の光環境に関する知見を集積することにより、リシリコンブの場合と同様に産業上の問題も含めてナガコンブの物質生産に及ぼす光条件の影響を明らかにすることが可能になると考える。

本研究は、北海道区水産研究所の経常研究課題「亜寒帯藻場の環境と生物生産構造との関係把握」および農林水産省農林水産技術会議事務局のプロジェクト研究「森林、海洋等におけるCO<sub>2</sub>収支の評価の高度化」の一環として行われた。水中光量子量の測定、資料の提供、データの整理を通じて本研究に協力して下さった釧路地方気象台防災業務課の皆様、北海道区水産研究所海区産業研究室非常勤職員の大西かおり氏（現室蘭市在住）に感謝する。

## 引用文献

- 有賀祐勝 1973. 水界植物群落の物質生産 II 植物プランクトン. 共立出版, 東京.
- 有賀祐勝 1986. 水界生態系における藻類の役割. p.1-13. 秋山 優他 (編) 藻類の生態. 内田老鶴圃, 東京.
- Campbell, J.W. and Aarup, T. 1989. Photosynthetically available radiation at high latitudes. *Limnol. Oceanogr.* 34: 1490-1499.
- 倉島 彰 1996. 褐藻アラメ及びカジメの光合成と生育に関する生理生態学的研究. 東京水産大学博士学位論文.
- 倉島 彰 (印刷中): 現場における光強度の測定. 第7編 海藻・海草の調査. 地球環境調査辞典 第3巻 沿岸域編. フジテクノシステム, 東京.
- 倉島 彰・横浜康継・有賀祐勝 1996. 褐藻アラメ・カジメの生理特性. *藻類* 44: 87-94.
- 釧路地方気象台 1998, 1999. 地上気象観測日別値.
- Lüning, K. and Dring, M. J. 1979. Continuous underwater light measurement near Helgoland (North Sea) and its significance for characteristic light limits in the sublittoral region. *Helgoländer wiss. Meeresunters.* 32: 403-424.
- 前川行幸・喜田和四郎 1987. アラメ及びカジメ群落の生産構造に関する研究. *藻類* 35: 34-40.
- Maegawa, M., Yokohama Y. and Aruga, Y. 1987. Critical light conditions for young *Ecklonia cava* and *Eisenia bicyclis* with reference to photosynthesis. *Hydrobiologia* 151/152: 447-455.
- Maegawa, M., Yokohama Y. and Aruga, Y. 1988. Comparative studies on critical light condition for young *Ecklonia cava* and *Eisenia bicyclis* with reference to photosynthesis. *Jpn. J. Phycol.* 36: 166-174.
- 大山温美 1998. 三重県錦湾におけるカジメ群落の構造と生産力. 三重大学生物資源学部修士学位論文.
- 坂西芳彦 1998. 寒海産および暖海産コンブ目の光合成特性. 東京水産大学博士学位論文.
- 坂西芳彦・飯泉 仁 1998. 褐藻ナガコンブの光合成-温度特性について. *藻類* 46: 105-110.
- 坂西芳彦・鈴木健吾・宇田川 徹・飯泉 仁・山本正昭 2001. 釧路市沿岸における夏季のナガコンブの日補償深度. 北海道区水産研究所研究報告 65: 45-54.
- 水産庁 1988. 大規模増殖場造成事業調査総合報告書 昭和62年度版. 水産庁, 東京.
- 瀧谷 明郎 1998. リシリコンブの品質に関する要因. 北水試だより 41: 5-8.
- 山本正昭 1971. 潮位推算. 農業土木試験場技報-F 6: 85-96.

(Received 10 March 2001, Accepted 10 June 2001)

