

大型藻類のゾーネーションに関する研究Ⅱ —アラメ・カジメの垂直分布と光環境—

STUDY ON THE ZONATION OF MACRO ALGAE . II . VERTICAL
DISTRIBUTION AND PHOTO-ENVIRONMENTS IN *Eisenia bicyclis* Setchell
AND *Ecklonia cava* Kjellman

菅原顕人¹・小松輝久²・瀬戸雅文³・佐藤博雄⁴

Akihito SUGAWARA, Teruhisa KOMATSU, Masabumi SETO and Hiroo SATOH

¹東京大学大学院博士2年 海洋研究所漁業測定部門 (〒164-8639 東京都中野区南台1-15-1)

²農博 東京大学助教授 海洋研究所漁業測定部門 (〒164-8639 東京都中野区南台1-15-1)

³正会員 水産博 北海道立中央水産試験場水産工学室 (〒046-8555 北海道余市郡余市町浜中町238)

⁴水産博 東京水産大学助教授 海洋環境学科 (〒108-0075 東京都港区港南4-5-7)

Seaweed forests of *Eisenia bicyclis* Setchell and *Ecklonia cava* Kjellman are broadly distributed along the rocky coastal area of central Honshu Island, Japan, facing the Pacific Ocean. We aimed to clarify a zonation of these plants and their causes. We measured irradiance at each depth of their habitat in a field and their photosynthetic rates in a laboratory. Seasonal changes of photosynthetic rates were higher in summer to fall and lower in winter. Initial slopes in Photosynthesis-Irradiance (P-I) curve of *Ec. cava* were higher than those of *Ei. bicyclis* at shallower depth. Daily compensation light quantity of *Ei. bicyclis* was higher than that of *Ec. cava*. This study showed quantitative facts that they were adapted to each photo-environment.

Key words : *Eisenia* and *Ecklonia*, zonation, photo-environments, photosynthetic rate

1. はじめに

アラメ *Eisenia bicyclis* Setchell・カジメ *Ecklonia cava* Kjellman は、太平洋沿岸の三陸以南より瀬戸内海沿岸の岩礁性浅海域に多く分布し、藻場を構成する大型藻類である。両種の分布が重なる海域では、アラメの垂直分布域が低潮線から水深10 m までであるのに対し、カジメでは水深4—25 m までである。このようにアラメの方がカジメより浅所に生育し、これら2種が分布する海域ではゾーネーション (Zonation) を形成することが知られている^{1) 2)}。藻場・海中林とよばれるこれらの群落は、直接的にはウニ・アワビ・サザエなどの植食動物の餌料として、間接的には魚類の産卵場や幼稚子の保護育成場として、更には海水中に溶出した窒素やリンの吸収など水質浄化面等、沿岸域の環境形成に重要な役割を担っている。近年、藻場は沿岸域の開発にともなう埋め立てや「磯焼け」によって著しく減少してきており、環境と調和した海岸施設的设计や自

然環境の修復を目的として藻場造成技術が検討され、アラメ・カジメ藻場についても各地での造成事業が始まっている^{3) 4) 5)}。しかし、これらの事業は必ずしも成功しているわけではない。これは、藻類の生残に不可欠な生息条件についての生態学的な基礎的知見が不足しているためと考えられる。

藻類の分布や生育・生残を制限する要因としては、光量、水温、基質、波浪といった物理的要因、栄養塩といった化学的要因、食害といった生物的要因が上げられる。これらの中で、光量などの光環境は、藻類の生長や生残、形態、垂直分布に大きな影響を及ぼす重要な環境要素である。

著者らは前報⁶⁾で、アラメ・カジメ成体の生残に必要な藻体の基部の固着力と、藻体にかかる波浪による作用流体力との関係について検討した。本研究では、アラメ・カジメ藻場が成立する光条件を明らかにするため、アラメ・カジメの現場での光量とこれらの種の成体の光合成速度の季節変化を測定し、光環境と垂直分布との関係について検討した。

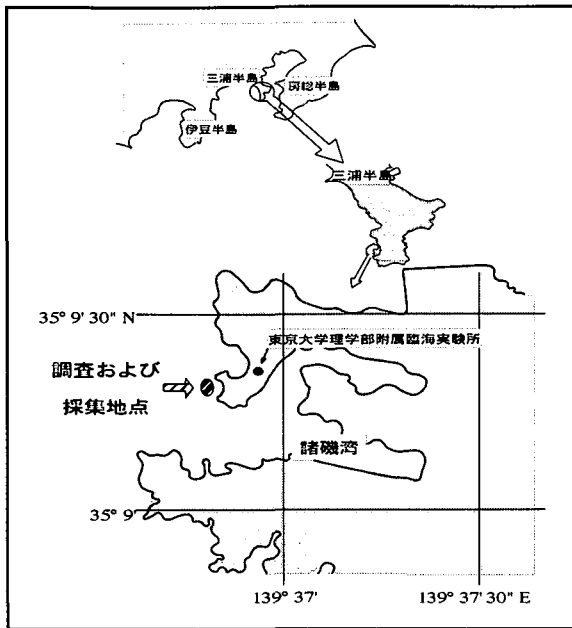


図-1 調査および採集地点概略図

表-1 1996年11月～1997年8月の期間に測定した晴天日1日あたりの積算光量 ($E/m^2/day$) の季節変化

月	アラメ場 (1.5 m 深)	浅所カジメ場 (2.7 m 深)	深所カジメ場 (4.5 m 深)
11	8.50	5.00	3.60
2	11.00	10.20	7.80
3	7.60	6.80	5.10
5	5.50	4.30	3.50
6	6.70	6.40	2.60
7	6.10	5.10	1.10
8	9.20	7.10	3.20

2. アラメ・カジメ群落の光環境

(1) 現場での光環境の測定方法

神奈川県三浦市の東京大学理学部附属臨海実験所地先(図-1)には、平均水深約1.5 m にアラメ群落、約2.7 m に小型カジメ群落(以下浅所カジメ)が、約4.5 m に大型カジメ群落(以下深所カジメ)が分布している。本研究では、このように特徴的に分布する3深度のアラメ・カジメ群落とその光環境を対象として、それらの関係について検討することにした。1996年11月～1997年8月まで、それぞれの群落における現場の光量子(光合成有効放射 PAR)を調査対象群落付近に設置されているブイ係留用ロープに、超小型メモリー光量子計(アレック電子社製、MDS-L)を各生育深度に相当する水深に、センサー部が上になるようにひもで固定して10分間隔で測定した。

(2) 光環境の季節変化の特徴

曇天の場合は雲量の違いによる差が生じて比較が困難であるため、PARは前報⁶⁾におけるアラメ・カジメの生長・成熟の現場観察時前後数日から晴天日を選び、1996年11月3日、1997年2月14日、3月18日、5月7日、6月12日、7月15日、8月4日に得られたデータからその1日間のPARの積算光量(簡便のため以下積算光量と省略する)の季節変化を求めた(表-1)。日積算光量は、どの深度においても秋から冬にかけて大きくなりその後初夏にかけて小さく再び夏から大きくなった。1年のうち日積算光量が

最大となったのは、どの深度においても短日である2月であり、アラメ場で11.00、浅所カジメ場で10.20、深所カジメ場で7.80 $E/m^2/day$ であった。最小になったのは、アラメ場、浅所カジメ場ともに5月でそれぞれ5.50、4.30 $E/m^2/day$ であった。一方、深所カジメ場では7月に1.10 $E/m^2/day$ と最小になり、各深度の群落ともいずれも長日の期間に日積算光量は最小となった。また、1997年7月ではアラメ場の日積算光量を100%としたとき、深所カジメ場の日積算光量は20%にまで低下した。長日であるにもかかわらず日積算光量が小さかったのは、夏にかけて起こる植物プランクトンの増殖にともなう透明度の減少によると考えられる。

3. アラメ・カジメの光合成速度

(1) ^{14}C 法による光合成速度測定方法

前章で述べた調査対象のアラメ、浅所カジメ、深所カジメを1996年11月、1997年2、6、8月に採集した(表-2)。採集後すぐに水槽に標本を入れて、流水により葉面に付着しているゴミ等を除去するようにした。採集の翌日に東京水産大学RI施設で、各藻体から溶脱が少なく他の部位よりも高い光合成速度が得られるとされる比較的新しい部位⁷⁾の側葉4～7番目より、コルクボーラーで葉片(0.835 cm^2)を打ち抜き、12～24時間滅菌海水でエアレーションをした。エアレーションの後、それぞれ葉片を3枚ずつ含む各試水150 ml に $NaH^{14}CO_3$ (比放射能322 MBq ; ICN Biomedicals, Inc.)を74 kbq 添加した。 ^{14}C 取り込み時の設定水温は、サンプル採集時の現場水温とした(1996年11月 ; 20℃, 1997年2

表-2 供試藻体諸元 (単位: cm)

測定部位	アラメ	浅所カジメ	深所カジメ
茎長	8.0~16.0	24.0~51.0	58.9~91.0
茎径	1.8~2.7	1.6~2.2	1.6~2.4
枝長	4.0~9.0	—	—
最大葉片長	40.0~75.0	38.0~62.0	33.0~73.0

月; 14℃, 6月; 20℃, 8月; 26℃)。光量は, 30W白色蛍光灯6本を同一光源とし, 葉片を入れたバイアルを黒色メッシュを用いて減衰させ, PARを12, 58, 155, 415 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ に, またバイアルをアルミ箔で包むことにより暗条件 (0 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$) に設定して, 計5段階の光条件を得た。各光条件下で120分間 CO_2 を取り込ませた後, ただちに滅菌海水で2回洗浄して葉片表面の ^{14}C 溶液を取り除いた。液体シンチレーター10 ml を, 洗浄後の葉片を入れたバイアルに添加し十分溶解させた後, 液体シンチレーションカウンター (Packard, Model 1600TR) により, 葉片内に取り込まれた ^{14}C 放射能を測定した。なお, 光合成速度は次式 (1) により求めた。

$$P=C(L-D)/\text{Ats} \quad (1)$$

ここで P は光合成速度 ($\mu\text{gC}/\text{cm}^2/\text{h}$), C は試水中の全炭素量 ($24.6 \times 0.15 \mu\text{gC}/\text{cm}^3$), L は取り込まれた ^{14}C 放射能の1分間の原子崩壊数 (kbq), D は暗固定で取り込まれた1分間の原子崩壊数 (kbq), A は添加した ^{14}C 放射能の1分間の原子崩壊数 ($74 \text{ kbq} = 4.44 \times 10^6 \text{ DPM}$), t は培養時間 (h), s は葉面積 (cm^2) を示す。

また, 得られた5段階の光量下の結果をもとに, 次式 (2), (3) に示すEilers & Peeters (1988) の近似式⁹⁾を用いて光—光合成速度曲線を得た。

$$P=I/(aI^2+bI+c) \quad (2)$$

$$P_{\text{max}}=1/(b+2\sqrt{ac}); \alpha=1/c \quad (3)$$

ここで I は光量 ($\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$), a, b, c は定数, 式 (3) の P_{max} は光合成速度の最大値 ($\mu\text{gC}/\text{cm}^2/\text{h}$), α は得られた曲線から求めた初期勾配 (量子収量) ($\mu\text{gCcm}^2\text{h}^{-1}/\mu\text{Em}^2\text{s}^{-1}$) を示す。また, 実験光量下で飽和に達しなかったため, 近似式で P_{max} が求められなかった場合には, 計算式ではなく, 最大の光量である415 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 下での実測値を P_{max} とした。

(2) 最大光合成速度および初期勾配

現場水温下での光—光合成速度曲線 (図-2) から求めた最大光合成速度は, どの種においても11月から2月にかけて低くなり, 8月には再び高くなる季節変動を示した。各季節で見ると, 11月は浅所カジメが17.39 $\mu\text{gC}/\text{cm}^2/\text{h}$, 2月は深所カジメが11.78 $\mu\text{gC}/\text{cm}^2/\text{h}$, 6月は浅所カジメが9.74 $\mu\text{gC}/\text{cm}^2/\text{h}$, 8月はアラメが12.18 $\mu\text{gC}/\text{cm}^2/\text{h}$ とそれぞれ最も高い値を示した (図-3)。

弱光に対する適応の程度を示す初期勾配は, 最大光合成速度とほぼ同様の季節変動が見られ, また種ごとに見ると, 1997年11月でアラメが0.43, 浅所カジメが0.96, 深所カジメが1.00 $\mu\text{gCcm}^2\text{h}^{-1}/\mu\text{Em}^2\text{s}^{-1}$ といったように, ほとんどの季節でアラメよりもカジメが, またカジメ種内でも浅所より深所の個体が高い値を示し, 深所に生育する個体ほど初期勾配が高くなる傾向が見られた (図-4)。

(3) 日補償積算光量の推定

まず呼吸速度を求めるために, 差働式検容計 (日光科学製 プロダクトメーター) による光合成速度の測定⁹⁾をおこなった。得られた呼吸速度 R_t ($\mu\text{gC}/\text{cm}^2/\text{h}$) から, 日補償積算光量 N ($\text{E}/\text{m}^2/\text{day}$) を式 (4) により求めた。

$$N=0.0864R_t\alpha^{-1} \quad (4)$$

ここで, 係数0.0864は1日あたりに変換する定数, α は初期勾配を示す。なお, 呼吸速度については, プロダクトメーターで1997年9月に測定した結果から他の月も同程度である推定して, アラメ・カジメともに各月の最大光合成速度の20%とした。

1日あたりに必要な最低光量を示す日補償積算光量は, アラメ・カジメともに夏にかけて大きくなる季節変動が見られ, また種ごとに見ると, 1997年11月でアラメが0.66, 浅所カジメが0.25, 深所カジメが0.18 $\text{E}/\text{m}^2/\text{day}$ といったようにほとんどの季節でアラメよりもカジメが小さい値を示し, 深所に生育する個体ほど日補償積算光量が小さくなる傾向が見られた (表-3)。

この結果と, 先に得られた日積算光量, 初期勾配の結果を合わせて考えると, 常に大きい光量下で生育しているアラメはより多くの光量を必要とし, アラメに比べて小さい光量下で生育しているカジメは弱光に適応していた。これらは, アラメ・カジメの幼体で得られた結果とほぼ一致していることから^{10), 11)}, 光環境がアラメ・カジメの垂直分布を規定している大きな要因であることが確認され, 現場海域で見られるゾーネーションが光条件に対応していることが示された。

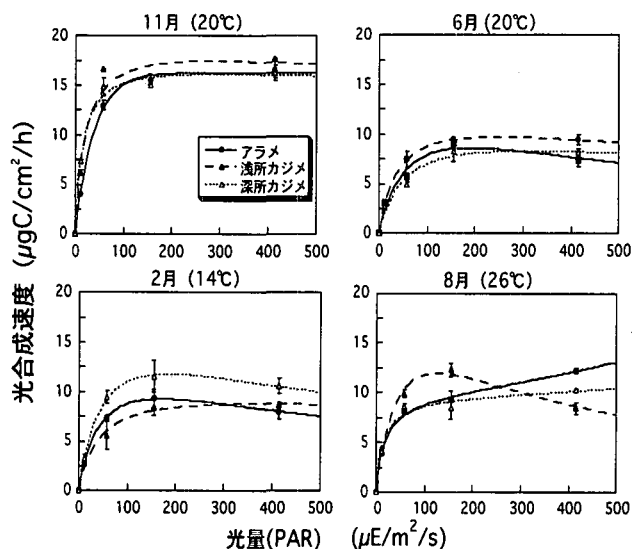


図-2 現場水温下における各月の光一光合成速度曲線

(4) 年間炭素固定量の推定

アラメ・カジメの純生産量は温帯域の森林に匹敵するといわれている¹²⁾。CO₂の増加にともなう地球温暖化が進む中で、これらの群落が多量の炭素を固定しているのかを把握することは、地球環境の観点から非常に重要である。ここでは、これまで得られた結果をもとに、年間炭素固定量を各群落1 m²あたりで概算的に算出した。なお、葉面積は前報⁶⁾で求めた形状特性値から算出し、群落密度は1997年10月28日に測定した結果（アラメ；14.67，浅所カジメ；21.50，深所カジメ；16.50 個体/m²）を用いた。

これより得られた年間炭素固定量は、どの群落においても1.7 kg 以上の高い値を示した（図-5）。この結果は、陸上で高い生産性を持つことが知られる熱帯多雨林の年間炭素量1.3 kg 以上であり¹³⁾，沿岸域の重要な生産者として、またCO₂の固定源として、これらの藻場が非常に重要な役割を果たしていることが確認された。

4. アラメ・カジメ藻場の光条件と流動条件について

アラメ・カジメが本研究での調査群落のように、带状に分布している海域では、これらの種の藻場を実際に移植し造成させるために、それぞれに適合した深度を考慮する必要がある。日補償積算光量は、1日あたりに必要とする生育のための最低光量を示すものであり、この値より積算光量が小さくなる深度では、生育不可能となる。当該海域では、深所カ

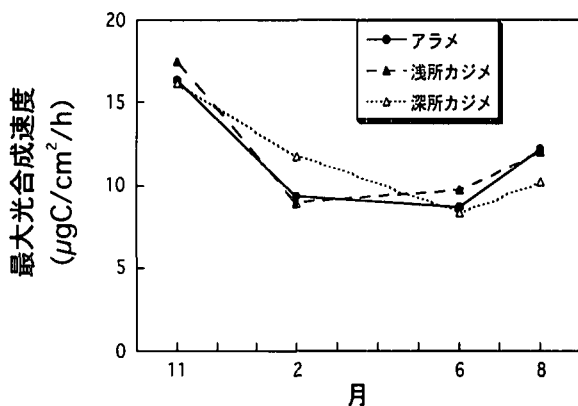


図-3 現場水温下における各月の最大光合成速度

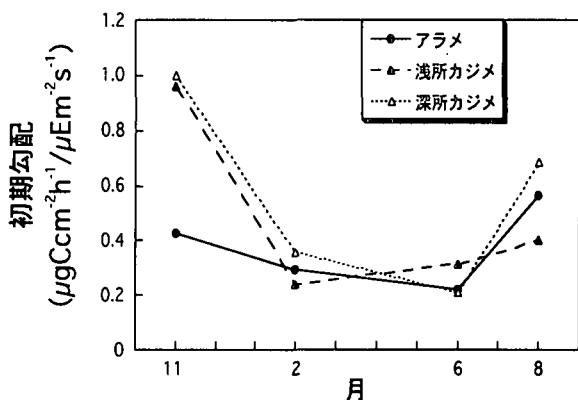


図-4 各月の光一光合成速度曲線の初期勾配

表-3 1996年11月～1997年8月の期間に得られた各月の日補償積算光量 (E/m²/day)

月	アラメ (1.5 m 深)	浅所カジメ (2.7 m 深)	深所カジメ (4.5 m 深)
11	8.50	5.00	3.60
2	11.00	10.20	7.80
6	6.70	6.40	2.60
8	9.20	7.10	3.20

ジメ場で積算光量が7月に1.10 E/m²/day まで小さくなる。これを6月の日補償積算光量と比較してみると、その値は0.94 E/m²/day であり、当該海域ではほぼこの深度がカジメが生育できる限界であるものと考えられた。また、1997年10月28～30日の静穏な海面の状態の時に、現場に43時間設置した石膏球の減少量から得られた時間平均流速は、アラメ場で24.83，浅所カジメ場で10.13，深所カジメ場で8.13

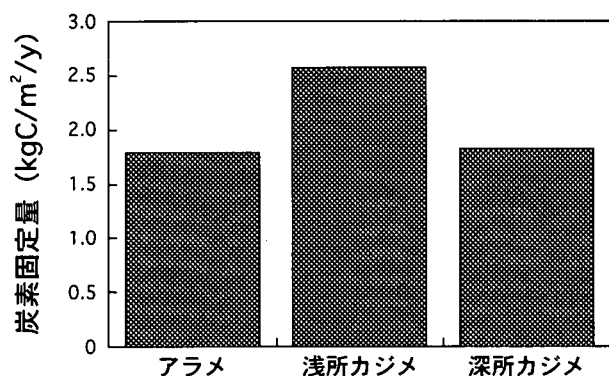


図-5 各群落の年間炭素固定量の概算値

cm/s であった。アラメはカジメに比べて側葉の数が多いたことが知られている¹⁴⁾。これらの時間平均流速値が、アラメ・カジメの揺動に必要な流速であると仮定すると、側葉数の多いアラメは、カジメの生育深度よりも大きい流速によって葉部を揺動させられるために、より多くの側葉をもっている各側葉に必要な光量を獲得できるものと考えられる。

5. おわりに

光は海藻の生育を左右する上で不可欠な環境要素である。本研究では、アラメ・カジメのゾーネーションが光環境とどのように関係しているのかを、現場での光量の測定と実験室での藻体の光合成速度の測定により検討した。今回の結果は、光環境がアラメ、カジメの垂直分布に大きく影響を及ぼしていることを具体的・定量的に示すことができた。今後は成体だけでなく幼体も含めて、これまで別々に考えられていた光・流動条件を統合してアラメ・カジメのゾーネーションを解明していきたいと考えている。

謝辞：現場調査および試料の採集にあたり、種々の御支援、御協力を頂いた東京大学理学部附属臨海実験所の森沢正昭所長をはじめ鈴木英雄技官、関本実技官、関藤守技官に、さらに光合成測定の実験にあたり、御協力を頂いた東京水産大学RI施設の尾崎誠技官に厚く御礼申し上げます。また、研究上有意義な御助言と暖かい励ましを頂いた、東京大学海洋研究所の塚本勝巳教授に心から感謝申し上げます。な

お、この研究は笹川科学研究助成により実施したものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 喜田和四郎, 前川行幸 : アラメ・カジメ群落に関する生態学的研究—I, 志摩半島御座岬周辺における群落の分布と構造, 三重大水実研報 3, pp.41-54, 1982.
- 2) 喜田和四郎, 前川行幸 : アラメ・カジメ群落に関する生態学的研究—II, 熊野灘沿岸各地域における群落の分布と構造, 三重大水実研報 10, pp.57-69, 1983.
- 3) 中久喜昭 : 磯焼け漁場の海中林造成, 栽培技研 9, pp.25-30, 1980.
- 4) 山本秀一, 児玉理彦, 野口雄二, 綿貫啓 : 相模湾西部海域におけるカジメ場造成試験, 水産土木 23, pp.13-18, 1986.
- 5) Anon. : 海域特性総合利用技術開発調査報告書(磯焼けグループ), 北海道, 68pp., 1994.
- 6) 菅原顕人, 瀬戸雅文, 小松輝久 : 大型藻類のゾーネーションに関する研究—I, アラメ・カジメの垂直分布と流動環境, 土木学会海洋開発論文集 14, pp.29-34, 1998.
- 7) Sakanishi, Y., Yokohama, Y., and Aruga, Y. : Seasonal changes of photosynthetic activity of brown algae *Ecklonia cava* Kjellmann, Bot. Mag. Tokyo 102, pp.37-51, 1989.
- 8) Eilers, P.H.C. and Peeters, J.C.H. : A model for the relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in phytoplankton, Ecol. Model. 42, pp.199-215, 1988.
- 9) 横浜康継, 片山舒康, 古谷庫造 : 改良型プロダクトメーター(差働式検容計)とその海藻の光合成測定への応用, 藻類 34, pp.37-42, 1986.
- 10) Maegawa, M., Yokohama, Y., and Aruga, Y. : Critical light conditions for young *Ecklonia cava* and *Eisenia bicyclis* with reference to photosynthesis, Hydrobiologia 151/152, pp.447-455, 1987.
- 11) Sakanishi, Y., Kida, K., Yokohama, Y., and Aruga, Y. : Comparative studies on critical light conditions for *Eisenia bicyclis* and *Ecklonia cava*, Japan. J. Phycol. 36, pp.166-174, 1988.
- 12) Yokohama, Y., Tanaka, J. and Chihara, M. : Productivity of the *Ecklonia cava* community in a bay of Izu Peninsula on the Pacific coast of Japan, Bot. Mag. Tokyo. 100, pp.129-141, 1988.
- 13) 柳哲夫 : 海の科学—海洋学入門, 恒星社厚生閣, 126pp., 1988.
- 14) 倉島彰 : 褐藻アラメおよ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, 132pp., 1996.

(1999. 4. 19受付)