

## 褐藻アラメ・カジメの生理特性

倉島 彰<sup>1</sup>・横浜康継<sup>2</sup>・有賀祐勝<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京水産大学藻類学研究室 (108 東京都港区港南 4-5-7)

<sup>2</sup> 筑波大学下田臨海実験センター (415 静岡県下田市 5-10-1)

Akira Kurashima<sup>1</sup>, Yasutsugu Yokohama<sup>2</sup> and Yusyo Aruga<sup>1</sup> 1996: Physiological characteristics of *Eisenia bicyclis* Setchell and *Ecklonia cava* Kjellman (Phaeophyta). Jpn. J. Phycol. (Sôru) 44:87-94.

Photosynthetic and respiration rates were compared between *Eisenia Bicyclis* and *Ecklonia cava*. The optimum temperature for light-saturated photosynthesis was 25-29 °C in sporophytes of both species and the maximum photosynthetic rate was higher in *Ei. bicyclis* than in *Ec. cava*. The optimum temperatures became low with decreasing light intensities. Under light lower than 50  $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  the net photosynthetic rate was lower in *Ei. bicyclis* than in *Ec. cava* at all temperatures investigated. Daily compensation light quantity estimated from photosynthesis-light curves was higher in *Ei. bicyclis* than in *Ec. cava* at an environmental temperature. Daily compensation light quantity of gametophytes was higher in *Ei. bicyclis* than in *Ec. cava* at all temperatures investigated. These results suggest that *Ec. cava* can grow in deeper water as compared with *Ei. bicyclis* under a definite temperature, and that *Ec. cava* can grow in warmer regions as compared with *Ei. bicyclis* under a definite light condition.

**Key Index Words:** daily compensation light quantity-Ecklonia cava-Eisenia bicyclis-irradiance-photosynthesis-temperature

<sup>1</sup>Laboratory of Phycology, Tokyo University of Fisheries, Konan 4-5-7, Minato-ku, Tokyo 108, Japan

<sup>2</sup>Shimoda Marine Research Center, University of Tsukuba, Shimoda 5-10-1, Shizuoka 415, Japan

アラメ *Eisenia bicyclis* Setchell とカジメ *Ecklonia cava* Kjellman はともに大型の多年生褐藻で、日本の太平洋沿岸に密な海中林を構成する。海中林は岩礁域における主要な 1 次生産の場であると同時に魚類の生育場として、また、直接的に植食動物の餌料として重要である。

両種の分布域については、アラメは岩手県から九州北部までであるのに対し、カジメは北関東から九州までとされており (川嶋 1989, 月館ら 1991)、アラメの方がやや北方に分布する。また、両種がともに生育する場所ではアラメの方がカジメより浅所に生育することが知られている (喜田・前川 1982, 1983)。これらのことから両種間には温度あるいは光に対する生理特性の相違があるものと考えられる。

近年、アラメとカジメの光合成あるいは呼吸速度の測定法が確立されたことから (Sakanishi *et al.* 1988)、

両種の光合成特性について多くの研究がなされてきている (Maegawa *et al.* 1987, 1988, Haroun *et al.* 1989, Sakanishi *et al.* 1988, 1989, Aruga *et al.* 1990)。Maegawa *et al.* (1987, 1988) は両種の幼胞子体の光合成-光曲線を比較して、カジメはアラメに比べ光量の少ない深所に生育できることを明らかにした。一方、藻類の水平分布は温度の影響を受けるとされるが (van den Hoek and Breeman 1989, Lüning 1990)、ある藻の光合成-温度曲線において最大光合成速度を示す水温は、その藻の生育環境の水温よりかなり高いという一般的な傾向が存在することから (Yokohama 1973, Davison 1991)、光合成-温度曲線から直接水平分布を論ずることは困難と言える。

本研究では、アラメとカジメの異なる水温のもとで得られた光合成-光曲線から、各水温における光補償点を求め、さらに水温ごとの日補償積算光量を算出し、それらの値から両種の水平分布域の相違について考察した。

## 材料と方法

アラメとカジメの胞子体は静岡県下田市の鍋田湾から潜水によって採集し、直ちに筑波大学下田臨海実験センターに運んだ。これら胞子体は、実験の前処理を行うまで同センター内の屋外流水槽中に保存しておいた。

### ・配偶体の培養

屋外流水槽中に保存された胞子体から子嚢斑部を切り取り、濾過海水および水道水で洗浄し、2-3時間風乾させた後、滅菌海水に浸して遊走子を放出させた。遊走子をピペットで吸い取り、シャーレ内の滅菌海水に滴下して希釈した後、スライドガラス上に滴下した。スライドガラス上に遊走子が着生したことを確認した後、腰高シャーレに移して培養を行った。培養条件は水温20°C、光強度約10 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、明暗周期12L:12Dとし、培地にはPESI培地を用いた。培地交換は2週間に1度行った。配偶体がある程度増えてから500mlのフラスコに移し、同じ条件下で通気培養を行った。2-4週間後に、光強度約10 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、明暗周期12L:12D、水温10, 20, 25°Cの条件下に移し、さらに2-3週間通気培養した後に実験に用いた。

### ・光合成の測定

光合成および呼吸速度の測定には差働式検容計(プロダクトメーター, Yokohama and Ichimura 1969)を用いた。胞子体については、3.5cm<sup>2</sup>に打ち抜いた円形葉片を10mlの濾過海水と共に反応容器に入れて測定を行った。配偶体については、細断した後に10mlのPESI培地と共に反応容器に入れて測定を行った。光源にはスライドプロジェクター(Cabin 67-Z)を用い、ニュートラルフィルター(Hakuba CF-SND -2, -4, -8)で光強度を調節した。光量子束密度の測定には光量子計(LICOR LI-185B)を用いた。

胞子体の光合成-温度曲線および呼吸-温度曲線を作成する場合には、側葉から打ち抜いた円形葉片を流海水中に一晩浸した後に測定に用いた。水温は5-29°Cの7段階とし、1回の測定に同一の葉片を用いて5°Cから順に水温を上げていった。測定に先立ち、20°C、400 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で約30分間予備振盪をおこなった。

胞子体の光合成-光曲線を作成する場合には、打ち抜いた円形葉片を流海水中に3時間浸した後に、光強度を50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ に、水温を5, 10, 15, 20, 25, 27°Cの6段階に設定し、各条件下で通気しながらの前培養を12-24時間行った後、水温をそのままに保って0-50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の間の4段階の光強度で測定を行った。配偶体については、培養した藻体を遠心機を用いて集め

た後に培地交換をしてから、20°Cでは0-400 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の間の7段階の光強度の下で、10および25°Cでは0-50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の間の4段階の光強度の下で測定を行った。

### ・生長実験

全長5-10cmの胞子体を採集し、付着物を取り除いた後に葉状部の面積が3-4cm<sup>2</sup>となるように先端を切断した。光強度10および50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、温度5, 15, 25°C、明暗周期12L:12Dの条件下で培養を行った。培養は濾過海水中で行い、海水は毎日交換した。24時間ごとに藻体の輪郭をトレーシングペーパーに写し取り、スキャナー(Epson GT8000)を用いてコンピューターに取り込み、ソフトウェア(NIH image 1.55)によって面積を求めた。6日間培養を行った後に、培養時と同一の温度で光合成を測定し光合成-光曲線を得た。

### ・日補償積算光量の計算

日補償積算光量は以下のような方法で求めた。各温度で得られた光合成-光曲線から0-25 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の間で1次回帰し、光合成-光曲線の初期勾配を得た。この初期勾配を $\alpha$ とし、t°Cにおける補償点をCt, t°Cにおける呼吸速度をRtとすれば、次の関係が成り立つ。

$$Ct = Rt \cdot \alpha^{-1} \quad (\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$$

また、Ctの24時間分の積算光量は当該温度において生存に必要な1日当たりの光量つまり補償積算光量といえるが、これをCdtとすれば次の関係が成り立つ。

$$Cdt = 0.0864 Ct \cdot \alpha^{-1} \quad (\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1})$$

## 結 果

### 胞子体の生理特性

アラメおよびカジメ胞子体の7段階の光強度下における純光合成および呼吸-温度曲線を季節ごとに得たが、5月の結果をFig.1に示した。高温域では測定時の光強度が高いほど純光合成速度が高く、また、低温になるほど光強度による差が小さくなる傾向が見られるが、5°Cにおいて25-400 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲で値がほとんど変わらなかったことが分かる。両種とも400 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ において純光合成速度が極大値に達した温度は、27.5°Cであり、種間に差は認められなかった。光強度が低くなると純光合成速度が極大値に達する温度は低温側に移るが、その位置は不明瞭になる傾向が見られた。12.5 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ においては10°Cから20°Cの間で値はほぼ一定となったが、アラメでは約20°Cを越えると、そしてカジメでは約25°Cを越えると値が負となった。400 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ における値は一般にアラメの方がカジメより高く、50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下ではカジメの方がアラメよ

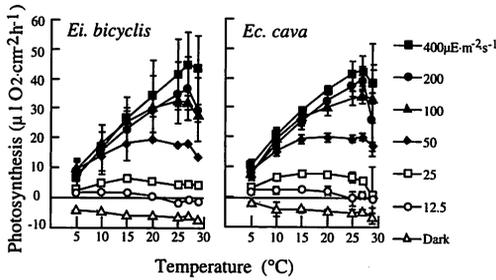


Fig. 1. Photosynthesis-temperature curves at different experimental light intensities in sporophytes of *Eisenia bicyclis* and *Ecklonia cava* determined in May.

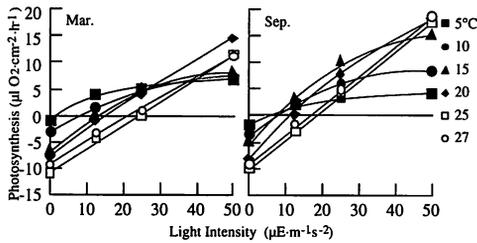


Fig. 2. Photosynthesis-light curves at different experimental temperatures in sporophytes of *Eisenia bicyclis*.

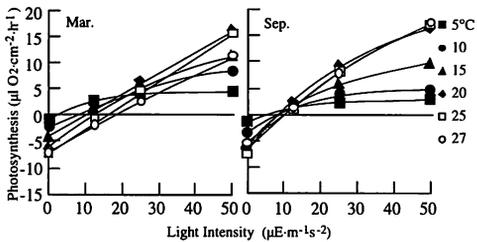


Fig. 3. Photosynthesis-light curves at different experimental temperatures in sporophytes of *Ecklonia cava*.

り高くなった。

暗所における呼吸速度は、測定した5°Cから29°Cまでの範囲でアラメの方がカジメより高い傾向が通年見られた。温度の上昇につれて呼吸速度は徐々に高くなるが、2月の低温期には27°Cから29°Cにかけて急激に上昇する傾向が両種のいずれでも見られた。

2ヶ月おきにアラメとカジメの胞子体で光合成-光曲線を得たが、3月と9月の曲線を Fig. 2 および Fig. 3

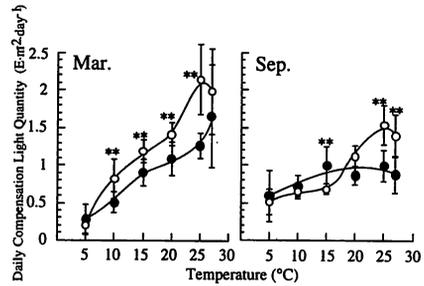


Fig. 4. Daily compensation light quantity-temperature curves calculated from photosynthesis-light curves in sporophytes of *Eisenia bicyclis* (open circles) and *Ecklonia cava* (solid circles). Vertical bars indicate SD. \*\*=significant,  $p < 0.01$ ; \*=significant,  $p < 0.05$  (t-test).

に示した。1月から11月のいずれの月でも、10-27°Cでは純光合成速度は0.25 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲で直線的に増加した。5°Cにおいては25 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で飽和に達した。両種とも10 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下の弱光下では5°Cにおける純光合成速度が最も高かったが、12.5-25 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲では他の水温における値とほぼ同じとなり、50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ では最も低くなった。呼吸速度は温度が高くなるにつれて高くなった。曲線の初期勾配は15-27°Cの範囲ではほぼ一定で、5°Cと10°Cではやや低かった。初期勾配は、5°Cにおいてはアラメの方がカジメより高い値であったが、他の温度ではほぼ同じ値となった。

Fig. 2 および Fig. 3 の各光合成-光曲線上の補償点から計算したアラメとカジメの日補償積算光量-温度曲線を Fig. 4 に示した。3月には一般にアラメの方がカジメよりも日補償積算光量は大きかったと言える。これは、同じ温度条件ではアラメの方がカジメより生育に必要な最低限の光量が多く、逆に同じ光条件下ではアラメの方がカジメより生育可能な上限水温が低いことを示す。一方、5-15°Cの範囲では値はほぼ同じか、アラメの方が低くなった。両種とも、低温部における日補償積算光量は7月から9月の高水温期にかけて高くなる一方、高温部における値は逆の傾向を示し、その結果特にカジメでは、7月には15°Cにおける日補償積算光量が1.29 $\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ であるのに対し25°Cでも1.33 $\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ とほとんど変わらず、9月には15および25°Cともに1.00 $\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ となるというように、15-25°Cの範囲で値はほぼ一定となった。アラメでは高温期にはカジメの場合と似た傾向がやや低温側で見られた。

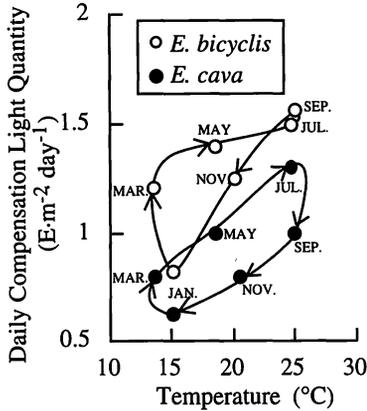


Fig. 5. Seasonal changes of the daily compensation light quantity in sporophytes of *Eisenia bicyclis* (open circles) and *Ecklonia cava* (solid circles) in relation to the mean seawater temperature of each month.

Fig. 5 に鍋田湾の年間水温の変化と、その水温に対応する各月の日補償積算光量をプロットした。両種とも、生育環境において生育に必要なとする最低限の光量は冬より夏に大となるものと言える。また、1年を通してアラメとカジメで重なる部分はほとんどなく、季節にかかわらず同一温度条件下ではアラメの方がカジメより常に必要とする最低限の光量が大で、逆に同一光条件下ではアラメの方がカジメより生育可能な上限水温が低いと判断される。

#### ・配偶体の生理特性

Fig. 6 にアラメとカジメの配偶体と孢子体の 20°C における純光合成—光曲線を示した。両種とも、孢子体では約 200  $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  で光飽和に達したのに対し、配偶体では約 50  $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  で光飽和に達したとみなせる。光飽和に達した時の純光合成速度はアラメ孢子体では 1.04  $\mu\text{l O}_2\cdot\mu\text{g chl. a}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 、同配偶体では 0.59  $\mu\text{l O}_2\cdot\mu\text{g chl. a}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 、カジメ孢子体では 1.30  $\mu\text{l O}_2\cdot\mu\text{g chl. a}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 、同配偶体では 0.75  $\mu\text{l O}_2\cdot\mu\text{g chl. a}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  であった。また、光補償点は、アラメ孢子体では 11.9  $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、同配偶体では 3.4  $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、カジメ孢子体では 4.8  $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、同配偶体では 1.3  $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  であり、両種とも配偶体における値は孢子体の約 1/3 であった。

10°C、20°C および 25°C の各温度で培養した配偶体の 10°C、20°C および 25°C の各温度で得られた純光合成—光曲線を Fig. 7 に示した。高温で培養したものほど 50  $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  での純光合成速度が低く、呼吸速度も低い傾向が見られる。曲線の初期勾配には培養および測

定温度による違いは認められなかったが、測定時の温度が高いほど 50  $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  での純光合成速度は高くなった。

アラメとカジメの配偶体の日補償積算光量—温度曲線を Fig. 8 に示した。日補償積算光量は、各温度で培養した配偶体の初期勾配 (Fig. 7) と、配偶体の呼吸—温度曲線から計算したものである。両種とも高温で培養したものほど日補償積算光量は低くなった。孢子体

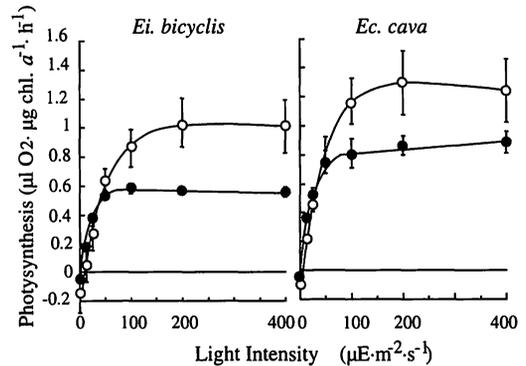


Fig. 6. Photosynthesis-light curves of sporophytes (open circles) and gametophytes (solid circles) of *Eisenia bicyclis* and *Ecklonia cava*.

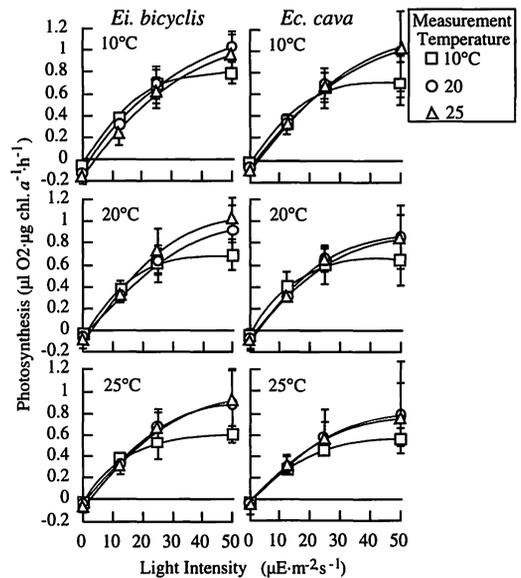


Fig. 7. Photosynthesis-light curves measured at 10°C, 20°C and 25°C in gametophytes of *Eisenia bicyclis* and *Ecklonia cava* cultured at different temperature.

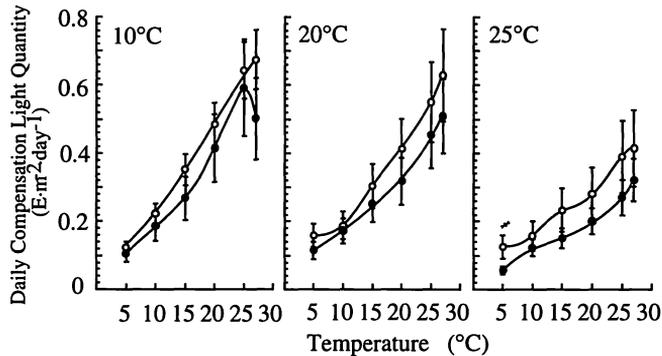


Fig. 8. Daily compensation light quantity-temperature curves of gametophytes of *Eisenia bicyclis* (open circles) and *Ecklonia cava* (solid circles) grown at 10°C, 20°C and 25°C. Vertical bars indicate SD. \*=significant,  $p < 0.05$  (t-test).

と同様に配偶体でもカジメの方がアラメより日補償積算光量が全温度域で小となったが、胞子体と配偶体を比較すると、両種とも配偶体では胞子体の場合の約1/2-1/3の値となった。

#### ・幼胞子体の生長試験

前述の各条件下での純光合成測定の結果から判断されたアラメおよびカジメ胞子体の生理特性を裏づける目的で、10および50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の光強度と5、15および25°Cの温度を組み合わせた6条件の下で両種の幼胞子体を6日間培養し、その間における葉面積の増加を相対値でFig. 9に示した。両種とも最も面積が大きくなったのは15°C、50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の下であった。光強度が10 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の場合には、アラメは5°Cで最も生長したが、カジメは15°Cで最も生長し、次いで5°C、25°Cの順であった。50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の場合には両種とも15°Cで最も生長したが、25°Cと5°Cでの結果を比較するとアラメでは5°C、カジメでは25°Cの方がよく生長した。また、15°Cおよび25°Cで培養した場合にはいずれの光条件下でもカジメの方がアラメよりよく生長したが、5°Cではアラメの方がよく生長した。図には示さなかったが、25°C、12.5 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の条件下で培養したものは両種ともほとんど生長せず、特にアラメでは葉状部の一部が枯死して培養開始時より面積が小さくなった個体が見られた。

上記の6日間培養した後の幼胞子体について、培養時と同一の温度で光合成を測定し、得られた光合成-光曲線から日補償積算光量-温度曲線を求めた結果をFig.10に示した。両種とも50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で培養したものより10 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で培養したものの方が日補償積算光量は小となった。50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で培養した場合には、両種

とも高温になるほど日補償積算光量は大となった。10 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で培養した場合には、アラメでは高温になるほど日補償積算光量が大きくなる傾向が明瞭であったのに対し、カジメでは傾向は不明瞭で、15°Cで最も小となり、5°Cでやや大となった。また、50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で培養した場合にはいずれの温度でもアラメの方がカジメより日補償積算光量は大となったが、10 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で培養した場合には5°Cでアラメの方がカジメより日補償積算光量が小となった。

#### 考 察

アラメとカジメの水平分布を比較すると、アラメの方がやや北方に分布することから、温度に関する生理特性に違いがあるものと予想されたが、光飽和下における純光合成-温度曲線の極大値となる温度には両種間で差が認められなかった。さらに、極大値となる温度も25-29°Cと本研究を行った鍋田湾の平均水温である19°Cより6-10°C高いというSakanishi *et al.* (1989)の報告と同様の結果が得られた。しかしながら、50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下の弱光下の光合成-温度曲線では、純光合成速度が極大値を示す温度は10-20°Cと低温側に移り、生育地である鍋田湾の年間平均水温19°Cに近い温度となった。このような弱光下では純光合成速度はアラメの方がカジメより低く、さらに2月、5月および11月には、光強度12.5 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ における純光合成速度が高温下では負となったが、負となり始める水温はアラメの方が低かった。これは5月に得られた12.5 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の下での純光合成-温度曲線で顕著であり、アラメの純光合成速度は約20°Cで負となったのに対し、カジメでは約25°Cまで正であった。呼吸速度はいずれの温度にお

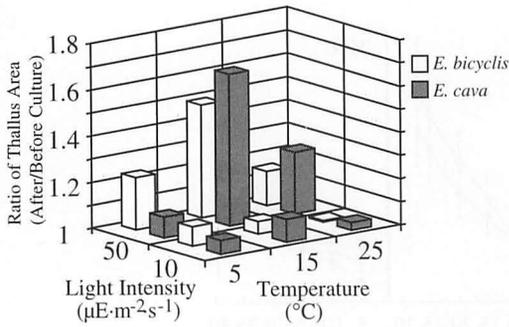


Fig. 9. Growth of young sporophytes of *Eisenia bicyclis* and *Ecklonia cava* in culture for 6 days at different light and temperature conditions.

いてもアラメの方がカジメより高かった。

海藻の光合成-温度曲線において極大値を示す温度は、一般に生育水温や生長の最適温度よりかなり高くなることが知られている (Yokohama 1973, Lüning 1990, Davison 1991)。これは、同一の性質を有する試料の各温度条件に対する短期的反応の結果とみなされており、それぞれの温度で長期間培養すると純光合成速度が極大値を示す水温は変化することが示されている (Davison 1987, Li and Morris 1982, Kübler and Davison 1995)。これらの研究では、光合成-温度曲線を求める際には温度以外が律速因子とならないように飽和光強度で光合成速度の測定を行っている。しかしながら、アラメ・カジメ群落内の光強度は極めて低いことが報告されており (前川・喜田 1987)、両種の生理特性を比較するためには、実際の生育環境に近い弱光下において光合成-温度曲線を求めるべきであると考えられる。

アラメ・カジメ群落内の光環境に近い弱光下での純光合成速度はアラメの方が低く、また呼吸速度はアラメの方が高かったことから、様々な温度で純光合成-光曲線を求め、それぞれの温度で両種が生育するのに必要な最低限の光量すなわち日補償積算光量を求めてみた結果、1年を通じて生育温度付近においてはアラメの方がカジメよりも生育に必要な最低限の光量が大であることが明らかとなった。これは、両種が同所的に生育する場合には、アラメの方がカジメよりも浅所に分布するということであり、Maegawa *et al.* (1987, 1988) の結果を支持するものである。また3月の結果を同一の光条件下で見た場合、アラメの方がカジメよりも生育可能な上限温度が低いとみなすことができ

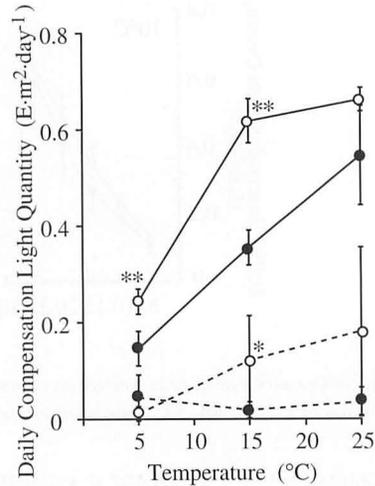


Fig. 10. Daily compensation light quantity-temperature curves in young sporophytes of *Eisenia bicyclis* (open circles) and *Ecklonia cava* (solid circles) after culture for 6 days at  $50\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (solid lines) and  $10\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (dotted lines). \*\*=significant,  $p < 0.01$ ; \*=significant,  $p < 0.05$  (t-test).

る。これらの結果は水平分布においてアラメの方が北方にカジメの方が南方に分布することを示すものである。なお、カジメでは5°Cにおける光合成-光曲線の初期勾配が、他の温度における光合成-光曲線の初期勾配よりも顕著に低く、日積算補償光量もアラメより大となったが、この結果はアラメが分布する北方域にカジメが分布しないという事実に対する生理的要因を示唆するものと言える。

日補償積算光量-温度曲線は季節変動を示し、両種とも7-9月の夏季には高温域での日補償積算光量は低くなり、同一光条件下での高温耐性が高くなった。鍋田湾においては7-9月に最も水温が高くなる。また、カジメ群落の現存量が最大となり (Yokohama *et al.* 1987) 相互被陰により群落内の光強度が低下することから、これは7-9月の高温・低光強度期における馴化と考えられる。このような馴化が見られたものの、それぞれの月の平均水温における日補償積算光量は、両種とも夏から秋の高温期には冬から春の低温期に比して高くなった。夏季にはカジメの生産力は低下する (Yokohama *et al.* 1987) が、群落内の光強度が低下するにもかかわらず日補償積算光量が他の季節より高いことがその理由の一つと考えられる。各月の平均水温に

おける日補償積算光量を両種間で比較すると、いずれの月においてもアラメの方がカジメより高い値を示した。すなわち、両種とも季節的な変化に応じた馴化が認められるが、アラメよりもカジメの方が弱光および高温に対して有利な生理特性を有していると考えられる。

なお、アラメ・カジメは、夏から秋にかけて子嚢斑を形成するが、カジメでは子嚢斑の占める面積は葉状部全体の30%に達し (Haroun *et al.* 1989, 倉島 1989), 子嚢斑部の光合成活性は子嚢斑を形成していない部分に比べて低く、光補償点も高くなることが報告されている (Aruga *et al.* 1990, 倉島 1989)。これらのことから本研究で得られた夏から秋の日補償積算光量は過小評価となっている可能性がある。

アラメとカジメの配偶体についても、光合成—光曲線を求めて日補償積算光量—温度曲線を得た。配偶体については野外で採集するのは不可能なため、鍋田湾における最低水温に近い10°C、最高水温に近い25°C、平均水温に近い20°Cで培養を行い、それぞれについて測定を行った。Kübler and Davison (1995) は、*Chondrus crispus* において培養温度および測定温度ともに純光合成速度および初期勾配に影響を与えることを報告している。しかし、本研究では両種とも培養温度による初期勾配の差は認められなかった。一方、どの温度で培養したのも、測定温度が高いほど50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ における純光合成速度が高くなったが、測定温度による初期勾配の差も認められなかった。

配偶体の日補償積算光量は、カジメの方が全温度域で小となったことから、胞子体同様、配偶体でもアラメよりカジメの方が高温・弱光下に適していると考えられる。胞子体と配偶体とを比較すると、両種とも配偶体の方が光補償点および光飽和点ともに低いことがわかる。配偶体では光飽和時の純光合成速度も低く、胞子体と比べて典型的な陰生植物の特徴を有していると言える。さらに、両種とも配偶体の日補償積算光量が胞子体と比べてはるかに小であり、同一の光条件下、特に弱光下では配偶体は胞子体よりもかなりの高温下で生育可能であることを示している。両種とも低温で培養すると高温下での日補償積算光量が高く、高温で培養すると低くなったが、これは胞子体の冬季と夏季の日補償積算光量の変化に対応する。コンブ目の配偶体では胞子体に比べて生長の適温や生存上限温度が高いことが知られている (Wiencke *et al.* 1994)。本研究の結果はこれらの培養条件に関して得られてきた知見を支持するものであると言える。

幼胞子体を温度および光条件を変えて培養した場合、10 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で培養した幼胞子体の方が50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で培養したものより日補償積算光量が低くなった。これは、弱光下で培養した幼胞子体の呼吸速度が極めて低くなるためである。藻類が深所や弱光下で生育すると、呼吸速度が低下すると同時に光補償点も低くなることが知られており (Lüning 1990), アラメ・カジメでも馴化が認められたと言える。幼胞子体でも成体と同様に、低温域を除き同一条件下ではアラメの方がカジメより日補償積算光量が高いという関係は変わらなかった。

日補償積算光量は生育に必要な最低限の光量を示すものであることから、日補償積算光量が大であるほど同一の光条件下での生長が遅くなることが予想される。従って、培養後の幼胞子体の日補償積算光量—温度曲線から、10 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 5^\circ\text{C}$ の条件下で培養した後にはアラメの方がカジメより面積が増加し、他の条件下ではカジメの方が面積が増加しているものと推測される。さらに、50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で培養すると両種とも低温ほになると面積が増加し、10 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で培養するとアラメは低温になるほど、カジメでは15°Cで最も面積が増加しているものと推測することができる。しかし、10 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で培養した場合には推測通りとなったものの、50 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で培養した場合には両種とも5°Cよりも15°Cで面積が増加し、推測とは異なっていた。これは、光合成—光曲線から明らかなように、5°Cでは約25 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ において光飽和に達し、それ以上の光量を利用できないためと考えられる。

本研究では、胞子体および配偶体の種々条件下での純光合成速度を測定することにより生理特性を比較した。その結果、同一の温度条件下ではアラメよりカジメの方が生育に必要な最低限の光量が少なく、同一の光条件下ではアラメよりカジメの方が高温まで生育可能であることが明らかとなった。このような生理特性の違いが、垂直分布ではアラメよりカジメの方が深所に、水平分布ではアラメよりカジメの方が高温水域に生育する理由の一つであろう。藻類の分布域は、藻体の生存の限界の温度だけでなく生殖の限界の温度にも依存する (Cambridge *et al.* 1984)。アラメの配偶体については8°Cから24°Cで生長し、8°Cから20°Cで有性生殖器官を形成することが報告されている (谷口・秋山 1982) が、胞子体については培養が困難であることから、成熟条件は明らかになっておらず今後の課題である。また、日補償積算光量—温度曲線からアラ

メ・カジメは温度が上昇するとより多くの光量を必要とすることが明らかとなった。従って、光条件が変わらずに高水温となったり、あるいは温度条件が変わらずに光強度が低くなることは、アラメ・カジメ群落の生産力の低下さらには衰退につながるものと言える。

#### 引用文献

- Aruga, Y., Toyoshima, M. and Yokohama, Y. 1990. Comparative photosynthetic studies of *Ecklonia cava* (Laminariales, Phaeophyta) bladelets with and without zoosporangial sori. *Hydrobiologia* 204/205 : 473-477.
- Cambridge, M., Breeman, A. M., Oosterwijk, R. van and Hoek, C. van den 1984. Temperature responses of some North Atlantic *Cladophora* species (Chlorophyceae) in relation to their geographic distribution. *Helgoländer Meeresunters.* 38 : 349-363.
- Davison, I. R. 1987. Adaptation of photosynthesis in *Laminaria saccharina* (Phaeophyta) to changes in growth temperature. *J. Phycol.* 23 : 273-283.
- Davison, I. R. 1991. Environmental effects on algal photosynthesis : Temperature. *J. Phycol.* 27 : 2-8.
- Haroun, R., Yokohama, Y. and Aruga, Y. 1989. Annual growth cycle of the brown alga *Ecklonia cava* in central Japan. *Topics in Marine Biology* 53 (2-3) : 349-356.
- Hoek, C. van den and Breeman, A. M. 1989. Seaweed biogeography of the North Atlantic : Where are we now? p55-67. In : D. J. Garbary and G. R. South (eds.) *Evolutionary Biogeography of the Marine Algae of the North Atlantic*. NATO ASI Series Vol.G22, Springer-Verlag, Berlin.
- 川嶋昭二 1989. 日本産コンブ類図鑑. 北日本海洋センター, 札幌.
- 喜田和四郎・前川行幸 1982. 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. 三重大実研報 3 : 41-54.
- 喜田和四郎・前川行幸 1983. 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. 三重大実研報 10 : 57-69.
- Kübler, J. E. and Davison, I. R. 1995. Thermal acclimation of light-use characteristics of *Chondrus crispus* (Rhodophyta). *Eur. J. Phycol.* 30 : 189-195.
- 倉島彰 1989. 褐藻カジメ (*Ecklonia cava* Kjellman) の子囊斑形成とそれに伴う光合成活性の変化. 東京水産大学修士学位論文.
- Li, W. K. W. and Morris, I. 1982. Temperature adaptation in *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin : Photosynthetic rate compensation and capacity. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 58 : 135-150.
- Lüning, K. 1990 *Seaweeds. Their Environment, Biogeography and Ecophysiology*. John Wiley & Sons, New York.
- 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., Kida, W., Yokohama, Y. and Aruga, Y. 1988. Comparative studies on critical light condition for young *Eisenia bicyclis* and *Ecklonia cava*. *Jpn. J. Phycol.* 36 : 166-174.
- Sakanishi, Y., Yokohama, Y. and Aruga, Y. 1988. Photosynthesis measurement of blade segments of brown algae *Ecklonia cava* Kjellman and *Eisenia bicyclis* Setchell. *Jpn. J. Phycol.* 36 : 24-48.
- Sakanishi, Y., Yokohama, Y. and Aruga, Y. 1989. Seasonal changes of photosynthetic activity of a brown alga *Ecklonia cava* Kjellman. *Bot. Mag. Tokyo* 102 : 37-51.
- 谷口和也・秋山和夫 1982. アラメ配偶体の生長及び成熟に対する水温と光条件. 東北水研研報 45 : 55-59.
- 月館真理雄・新井章吾・成原淳一 1991. 宮崎県門川地先のカジメ群落の観察. 藻類 39 : 389-301.
- Wiencke, C., Bartsch, I. Bischoff, B., Peters, A. F. and Breeman, A. M. 1994. Temperature requirements and biogeography of Antarctic, Arctic and amphiequatorial seaweeds. *Bat. Mar.* 37 : 247-259.
- Yokohama, Y. 1973. A comparative study on photosynthesis-temperature relationships and their seasonal changes in marine benthic algae. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 58 : 463-472.
- Yokohama, Y. and Ichimura, S. 1969. A new device of differential gas-volumeter for ecological studies on small aquatic organisms. *J. Oceanogr. Soc. Japan* 25 : 75-80.
- Yokohama, Y., Tanaka, J. and Chihara, M. 1987. Productivity of the *Ecklonia cava* community in a bay of Izu Peninsula on the Pacific coast of Japan. *Bot. Mag. Tokyo* 100 : 129-141.