

# カジメの生理生態的係数と環境データを用いた繁茂期現存量の算出

本多正樹<sup>1</sup>\*・中根幸則<sup>1</sup>・三浦正治<sup>2</sup>・長谷川一幸<sup>3</sup>

<sup>1</sup>一般財団法人電力中央研究所環境科学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

<sup>2</sup>公益財団法人海洋生物環境研究所 (〒162-0801 東京都新宿区山吹町 347 番地 藤和江戸川橋ビル7階)

<sup>3</sup>公益財団法人海洋生物環境研究所中央研究所 (〒299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田 300)

Masaki Honda<sup>1</sup>\*, Yukinori Nakane<sup>1</sup>, Masaharu Miura<sup>2</sup> and Kazuyuki Hasegawa<sup>3</sup>: Estimation of maximum standing crop of *Ecklonia cava* by using a numerical model with ecophysiological parameters and environmental data. Jpn. J. Phycol. (Sôru) 62: 143-151, November 10, 2014

Annual maximum standing crops of *Ecklonia cava* beds in four locations (Tei in Kochi Prefecture, Shima in Mie Prefecture, Shimoda in Shizuoka Prefecture, and Miura in Kanagawa Prefecture) were calculated by using a numerical model with ecophysiological parameters (photosynthesis, respiration, weight per unit leaf area, extinction coefficient of leaf area index, and blade loss ratio of the frond) and environmental data (solar irradiance, seawater temperature, and transparency). Decrease in maximum standing crops and C/F ratio (ratio of stipe and blade biomass) was calculated with increasing optical depth. Calculated maximum standing crops and C/F ratio at Tei were smaller than the other locations due to a lower photosynthetic parameter. Calculated maximum standing crops were in agreement with observed standing crops in mature phase populations (the standing crop is in steady state). All observed standing crops were in range of calculated standing crop at each location and optical depth.

*Key Index Words:* calculation, *Ecklonia cava*, optical depth, seawater temperature, solar irradiance, standing crop, transparency

<sup>1</sup>Environmental Science Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, 1646 Abiko, Abiko-shi, Chiba 270-1194, Japan.

<sup>2</sup>Head Office, Marine Ecology Research Institute, Towa-edogawabashi Bldg. 7F. 347 Yamabuki-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-0801, Japan.

<sup>3</sup>Central Laboratory, Marine Ecology Research Institute, 300 Iwawada Onjuku-machi Isumi-gun, Chiba 299-5105, Japan

\* Author for correspondence: m-honda@criepi.denken.or.jp

## 緒言

多年生褐藻カジメ (*Ecklonia cava* Kjellman) は、茨城県以南の関東から東海地方、志摩半島を経て四国南岸の太平洋沿岸、瀬戸内海、九州と日本海の一部沿岸に生育し (川嶋 1993)、多くの生態研究が三浦半島、伊豆半島、志摩半島、土佐湾で行われた。カジメ群落の現存量は冬に最小、夏に最大となる季節変化を示し (岩橋 1968, 大野・石川 1982, Yokohama *et al.* 1987, 芹澤ら 2001)、その群落更新は、林冠を形成し現存量が飽和する成熟相から、大型藻体が流失し幼体が加入するギャップ相、加入した藻体が成長し現存量が増大する建設相を経て再び成熟相に戻る数年の過程を辿る (Maegawa & Kida 1989)。現存量の大きい繁茂したカジメ群落内では、群落に入射する光の多くが葉部に吸収され (林田 1986, 前川・喜田 1987)、群落下部に到達する光量は海面の1%以下にも低下し、藻体の成長や加入が制限を受けている (林田 1986, Maegawa *et al.* 1987)。このように、現存量の大きなカジメ群落内では光量が大きく低下することから、成熟相の飽和した現存量は主に光量に制限されていると想定される。従って、その現存量は群落光合成生産量の計算手法を用いて物理環境情報から予測できると考えられる。

本研究では、現存量が調査された神奈川県三浦市、静岡県下

田市、三重県志摩市、高知県香南市 (手結) のカジメ群落を対象として、日射量と海水温から計算した光学的深度 (水深と消散係数の積) 毎の最大現存量と実際に測定された繁茂期の現存量を比較することにより、物理環境情報から繁茂期の現存量を再現できるか確認した。

## 方法

モデルと生物係数: カジメ群落の現存量変化の基礎式は、本多 (1996) を基とする (1) 式とした。

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \left\{ \int_0^F \frac{\Phi_r (K I_0 e^{-CD-KFz})^2}{\Psi_r + \Omega_r (K I_0 e^{-CD-KFz}) + (K I_0 e^{-CD-KFz})^2} dFz - R_{BT} S_B - R_{ST} S_S \right\} / (CR_C CR_D) - E S_B \quad (1)$$

$\Delta S/\Delta t$ : 現存量変化 ( $\text{kg(w.w.) m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ ),  $F$ : 群落の葉面積指数,  $\Phi_r, \Psi_r, \Omega_r$ : 温度  $T^\circ\text{C}$  における光合成係数,  $K$ : 葉の吸光係数,  $I_0$ : 海面直下における光量 ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $C$ : 海水の消散係数 ( $\text{m}^{-1}$ ),  $D$ : 群落までの水深 ( $\text{m}$ ),  $R_{BT}$ : 温度  $T^\circ\text{C}$  における葉部呼吸係数,  $S_B$ : 葉部現存量 ( $\text{kg(w.w.) m}^{-2}$ ),  $R_{ST}$ : 温度  $T^\circ\text{C}$  における茎部呼吸係数,  $S_S$ : 茎部現存量 ( $\text{kg(w.w.) m}^{-2}$ ),  $CR_C$ : 炭素含率,  $CR_D$ : 乾燥歩留まり,  $E$ : 葉の流失率

Table 1. Biological parameters for Equation 1.

Parameter	Location		Unit	Reference
	Miura, Shimoda, Shima	Tei		
Photosynthesis:				
$\Phi_T$	0.37	0.28	$\text{gC m}^{-2} \text{hr}^{-1}$	Honda1996, Serisawa <i>et al.</i> 2001
$\Psi_T$	234	same as on the left	$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})^2$	Honda1996
$\Omega_T$	43.6	same as on the left	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Honda1996
Respiration:				
$R_{BT}$	4.23 $10^{-2}$	same as on the left	$\text{gC kg(w.w.)}^{-1} \text{hr}^{-1}$	Honda1996
$R_{ST}$	4.83 $10^{-3}$	same as on the left	$\text{gC kg(w.w.)}^{-1} \text{hr}^{-1}$	Honda1996
Leaf area index:				
$F$	$S_B CR_D / CR_B$	same as on the left	Dimensionless	Present study
Dry weight per unit leaf area:				
$CR_B$	0.075	0.11	$\text{kg(d.w.) m}^{-2}$	Serisawa <i>et al.</i> 2001
Carbon content of dry weight:				
$CR_C$	0.3	same as on the left	Dimensionless	Honda1996
Dry weight / wet weight:				
$CR_D$	0.15	same as on the left	Dimensionless	Honda1996
Extinction coefficient of leaf area index:				
$K$	0.4 - 0.8	same as on the left	Dimensionless	Present study
Blade loss ratio:				
$E$	Jan Feb Mar Apr-Aug Sept Oct Nov Dec			
	0.03 0.02 0.015 0.01 0.02 0.1 0.15 0.2		$\% \text{hr}^{-1}$	Present study

$\Phi_T$ , Light saturated photosynthetic rate at  $T^\circ\text{C}$ ;  $\Psi_T$ ,  $\Omega_T$ , Photosynthetic parameters at  $T^\circ\text{C}$ ;  $R$ , Gas constant;  $R_{BT}$ , Respiratory rate of blade at  $T^\circ\text{C}$ ;  $R_{ST}$ , Respiratory rate of stipe at  $T^\circ\text{C}$ ;  $S_B$ , Standing biomass of blade.

研究対象としたカジメ群落は、神奈川県三浦市、静岡県下田市、三重県志摩市、高知県香南市（手結）とし（Fig. 1）、計算に用いた生物係数を Table 1 に記した。手結産カジメ（以降、手結カジメと記す）は、三浦半島、伊豆半島、志摩半島のカジメに比べて小型である（大野・石川 1982, 富永ら 1999, Serisawa *et al.* 2002）。Serisawa *et al.* (2001) の結果から、手結カジメは下田産カジメ（以降、下田カジメと記す）に比べて、繁茂期の単位葉面積あたりの光飽和時光合成速度が 25% 程低く、単位葉面積あたりの重量が 45% 程重かったことが分かる。本研究では、三浦、下田、志摩各地のカジメの  $\Phi_T$  値には本多 (1996) の報告した値を用い、手結カジメの  $\Phi_T$  値は本多 (1996) の  $\Phi_T$  値に 0.75 を乗じた値を用いた。単位葉面積あたりの重量  $CR_B$  は、Serisawa *et al.* (2001) を参考に、手結カジメ  $0.11 \text{ kg(d.w.) m}^{-2}$ 、下田カジメ  $0.075 \text{ kg(d.w.) m}^{-2}$  とし、下田カジメと同様に大型となる三浦と志摩のカジメについて下田カジメの値を用いた。

吸光係数  $K$  は以下のとおり決定した。Maegawa *et al.* (1987) は実海域でカジメ群落中の光量の分布を測定して、葉部現存量  $0.7 \text{ kg(d.w.) m}^{-2}$  の群落下の光量が群落上で測定された光量に対して 2% に低下したと報告した。Table 1 中  $F$  の換



Fig. 1. Map showing the location of the four study sites along the Pacific coast of Japan.

算式から葉部現存量  $0.7 \text{ kg(d.w.) m}^{-2}$  の場合  $F$  値は 9.3 となり、Beer-Lambert 式の一般形である (2) 式 (Monsi & Saeki (1953) を改変) 中  $F$  に 9.3,  $I_p/I_0$  に 0.02 を代入して求めた  $K$  は 0.42 であった。本多 (1989) は水槽内に模擬したカジメ群落内で光量分布を測定し、 $K$  が 0.3 ~ 0.6 程度と報告した。これらは、潜水作業が可能な穏やかな海況、あるいは水槽内に群落を模擬した海水流動がない条件下での  $K$  値である。 $K$  値

Table 2. Depth, quadrat size and standing crops of *Ecklonia cava* at each location from published reports.

Location	Depth	Quadrat size	Standing crop	Reference	Sampling Year/ Month
Tei	3-5 m	1 m <sup>2</sup>	10.0 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Ohno & Ishikawa 1982	1981/ Aug
	7-10 m	1 m <sup>2</sup>	6.4 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Ohno & Ishikawa 1982	1981/ Aug
	12 m	1 m <sup>2</sup>	2.5 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Ohno & Ishikawa 1982	1981/ Sept
	6-9 m	1 m <sup>2</sup>	4.3 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Serisawa <i>et al.</i> 2001	1996/ July
Shima	8 m	1 m <sup>2</sup>	0.5-1.2 kg(d.w.) m <sup>-2</sup>	Maegawa & Kida 1987	1984/ June-July
	6.2 m	0.25 m <sup>2</sup>	10.6 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Biodiversity Center of Japan 2008	2004/ June
Shimoda	5 m	9 m <sup>2</sup>	9.2 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Iwahashi 1968	1966/ Aug
	7 m	9 m <sup>2</sup>	3.0-4.0 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Iwahashi 1968	1966/ July-Aug
	10 m	9 m <sup>2</sup>	2.4-3.6 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Iwahashi 1968	1966/ July-Aug
	7 m	9 m <sup>2</sup>	3.0 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Iwahashi 1968	1967/ July
	10 m	9 m <sup>2</sup>	4.1 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Iwahashi 1968	1967/ July
	5 m	1 m <sup>2</sup>	17.0 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Yokohama 1977	1973/ Aug
	5 m	1 m <sup>2</sup>	2.2-2.9 kg(d.w.) m <sup>-2</sup>	Yokohama <i>et al.</i> 1987	1980/ July-Aug
	5 m	1 m <sup>2</sup>	0.9 kg(d.w.) m <sup>-2</sup>	Maegawa <i>et al.</i> 1987	1985/ June
	6-9 m	1 m <sup>2</sup>	10.7 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Serisawa <i>et al.</i> 2001	1997/ July
	Miura	3-3.5 m	1 m <sup>2</sup>	4.7-5.3 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Takama 1979
4 m		1 m <sup>2</sup>	4.4-6.8 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Takama 1979	1977/ Aug
5 m		1 m <sup>2</sup>	3.9 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Takama 1979	1977/ Aug
6 m		1 m <sup>2</sup>	1.7-7.3 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Takama 1979	1977/ June-Aug
7 m		1 m <sup>2</sup>	4.8-5.6 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Takama 1979	1977/ June-Aug
8-8.5 m		1 m <sup>2</sup>	1.6-4.4 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Takama 1979	1977/ June-Aug
9 m		1 m <sup>2</sup>	2.9-4.3 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Takama 1979	1977/ June-Aug
10 m		1 m <sup>2</sup>	1.4 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Takama 1979	1977/ Aug
11 m		1 m <sup>2</sup>	1.6 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Takama 1979	1977/ June
12 m		1 m <sup>2</sup>	0.4 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Takama 1979	1977/ Aug
13 m		1 m <sup>2</sup>	1.4 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Takama 1979	1977/ June
14 m		1 m <sup>2</sup>	1.0-1.3 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Takama 1979	1977/ Aug
17.5 m		1 m <sup>2</sup>	0.4 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Takama 1979	1977/ Aug
7 m	0.25 m <sup>2</sup>	19.9 kg(w.w.) m <sup>-2</sup>	Biodiversity Center of Japan 2008	2004/ July	

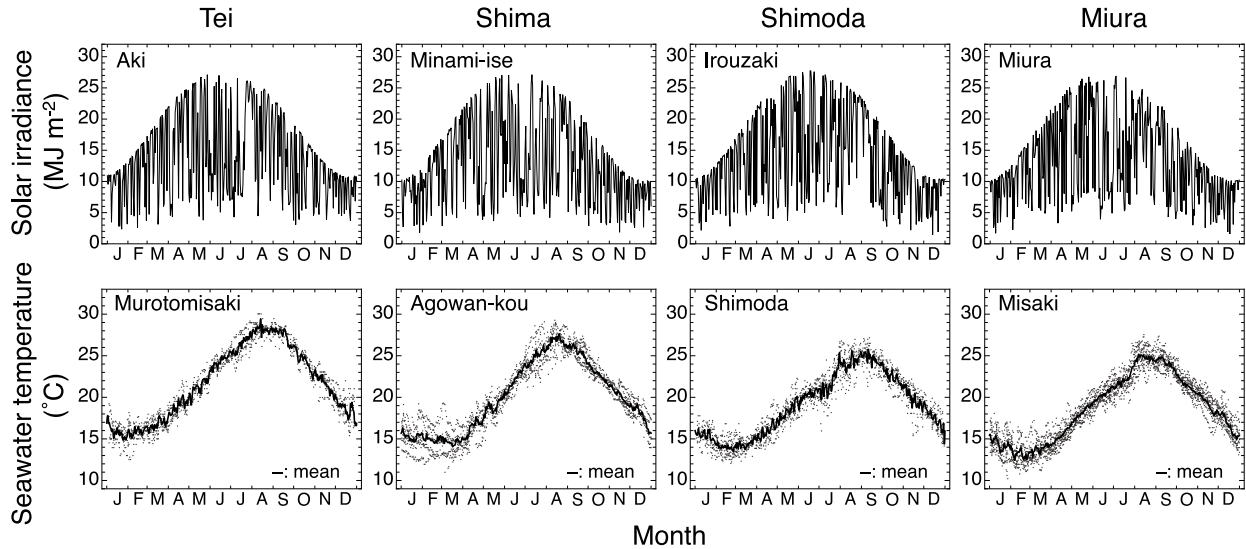


Fig. 2. Seasonal changes of solar irradiance and seawater temperature at four sites: Tei, Shima, Shimoda, and Miura. Data were derived from the websites of New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO)\* and Japan Oceanographic Data Center (JODC)\*\*; the same or adjacent sites to our four *Ecklonia* study sites were selected. \*<http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>; \*\*[http://www.jodc.go.jp/data/coastal/obs\\_data\\_index.html](http://www.jodc.go.jp/data/coastal/obs_data_index.html)

は葉の傾きによって変化し、葉の傾きが水平に近い場合に大きな値をとる (Monsi & Saeki 1953)。海水流動が大きい場合、カジメの葉は、茎を支点に水平方向に流れるため、 $K$  値はより大きな値になると考えられ、本研究では  $K$  値を 0.4 ~ 0.8 で設定した。葉の流失率  $E$  は、Yokohama *et al.* (1987) に記載された脱落速度と生産速度の割合および葉部現存量が少ない冬季と繁茂期の葉部現存量比を再現できるように設定した。

$$\frac{I_F}{I_U} = e^{-K F} \quad (2)$$

$I_F$ : 葉面積指数  $F$  の群落下における光量,  $I_U$ : 群落上における光量

日射量: 新エネルギー・産業技術総合開発機構がウェブサイト上で公開している日射量データベース (<http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>) の中で、手結、志摩、下田、三浦の各カジメ群落調査地点に近い、高知県安芸地点、三重県南伊勢地点、静岡県石廊崎地点、神奈川県三浦地点の各月日の 1 時間毎の日射量データを取得した (Fig. 2)。日射量の 1 年間の積算量は、安芸地点  $5.02 \text{ GJ m}^{-2}$ 、南伊勢地点  $4.64 \text{ GJ m}^{-2}$ 、石廊崎地点  $5.02 \text{ GJ m}^{-2}$ 、三浦地点  $4.74 \text{ GJ m}^{-2}$  であり地点間で 8% 程度の違いがあった。なお、安芸市は手結のある香南市に、南伊勢町は志摩市に、石廊崎のある南伊豆町は下田市にそれぞれ隣接している。

海水温: 日本海洋データセンターがウェブサイト上で公開している全国の定置水温データ ([http://www.jodc.go.jp/data/coastal/obs\\_data\\_index.html](http://www.jodc.go.jp/data/coastal/obs_data_index.html)) の中で、手結、志摩、下田、三浦の各カジメ群落調査地点に近い、高知県室戸岬地点 (室戸市, 2002 ~ 2006, 2009 年)、三重県英虞湾口地点 (志摩市,

2003 ~ 2009 年)、静岡県下田地点 (下田市, 2002 ~ 2008 年)、神奈川県三崎地点 (三浦市, 2002 ~ 2009 年) の各海水温データを取得し、月日毎の平均値を求め、測定日間の海水温は線形で内挿して、各月日の 1 時間毎の海水温時系列データを作成した (Fig. 2 の平均水温, 以降、平均水温データと記す)。なお、室戸岬地点は手結地点から約 45 km 離れているが、作成した平均水温データの最低値は  $14.9^\circ\text{C}$ 、最高値は  $29.4^\circ\text{C}$  であり、手結地点の水温  $15 \sim 29^\circ\text{C}$  (Serisawa *et al.* 2001) と同範囲であった。各地点の平均水温データの最高値、平均値、最低値はそれぞれ、室戸岬地点  $29.4$ ,  $21.6$ ,  $14.9^\circ\text{C}$ 、英虞湾口地点  $27.6$ ,  $20.3$ ,  $14.1^\circ\text{C}$ 、下田地点  $25.8$ ,  $19.1$ ,  $13.5^\circ\text{C}$ 、三崎地点  $25.2$ ,  $18.7$ ,  $12.4^\circ\text{C}$  となり、三崎地点、下田地点に比べて、英虞湾口地点で  $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 、室戸岬地点で夏季に約  $4^\circ\text{C}$ 、平均で約  $3^\circ\text{C}$  高かった。

成熟相の飽和現存量の算出: 4 地点それぞれについて、上記の光量と温度のデータセットを用いて、(1) 式を基に作成した計算プログラムに入力し、現存量の周年変化が安定するまで計算を繰り返す (Fig. 3)、現存量が飽和する成熟相の現存量の周年変化を計算した。計算した時系列の現存量計算値から大きい順に 720 データ (24 時間  $\times$  30 日) を抽出し平均したものを最大現存量として、光学的深度 (消散係数と水深の積、(1) 式中の  $C D$ ) 毎に求めた。また、繁茂期の葉部現存量に対する茎部現存量の割合 ( $C/F$  比) は 0.1 以下 (芹澤ら 2001) から 0.6 以上 (前川・喜田 1987) まで様々な値をとるため、 $C/F$  比を 0.05 ~ 0.65 で計算を行った。

各地点で測定された現存量: 再現性確認のための現存量文献値は、繁茂期の群落から刈り取って計量されたものを用いた (Table 2)。手結地点において、カジメは水深 15 m 付近まで生育し 13 m 以浅で繁茂していた (富永ら 1999)。ここで

は、水深 3～12 m の現存量が報告されていた (大野・石川 1982, 芹澤ら 2001)。志摩地点において、カジメは水深 25 m 付近まで繁茂するが (前川・喜田 1987), 文献に記載されていた繁茂期の現存量は水深 6.2～8 m の値であった (前川・喜田 1987, 環境省自然環境局生物多様性センター 2008)。下田地点において、カジメは水深 23 m にも生育するが (芹澤ら 2003), 繁茂期の現存量が測定されたのは水深 5～10 m であった (岩橋 1968, Yokohama 1977b, Maegawa *et al.* 1987, Yokohama *et al.* 1987, 芹澤ら 2001)。三浦地点においては、カジメ生育下限水深の 18 m 付近まで調査され、現存量が測定された (高間 1979, 環境省自然環境局生物多様性センター 2008)。

消散係数  $C$ : Table 2 の現存量が得られた水深から光学的深度を求めるために各地の消散係数を得る必要がある。本研究では、各地点の透明度  $Z_{SD}$  を、各県のウェブサイトに公開されている公共用水域の水質測定結果と文献から推定し、換算式  $C = 1.44/Z_{SD}$  (Kirk 1983) を用いて  $C$  値を算出した。

手結地点: 2007～2011 年度の高知県公共用水域及び地下水の水質測定結果報告書 (<http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/030801/mizu-houkokusho.html>) の手結から最も近い透明度測定地点は約 6 km 離れた物部川沖であったが、ここは河川からの懸濁物質流入の影響下にあると考えられた。次いで近い地点は約 25 km 離れた奈半利沖で近くに大きな河川はない。繁茂期にあたる夏季の透明度の中央値は物部川沖で 7 m, 奈半利沖で 16 m であったことから、手結地点の透明度を 7～16 m の範囲にあると考え、前述の換算式を用いて手結地点の  $C$  値を 0.09～0.21 とした。

志摩地点: 2001～2012 年度の三重県公共用水域及び地下水の水質測定結果 (<http://www.eco.pref.mie.lg.jp/earth/100150/kokyo/>) の志摩地点に近い英虞湾口で測定された夏季の透明度の中央値は 7 m であり、 $C$  値を 0.21 とした。

下田地点: Yokohama (1977a) には下田外海の夏季の透明度が 13～18 m 程度であることが記されている。一方、2009～2012 年度の静岡県公共用水域及び地下水の水質測定結果 ([http://www.pref.shizuoka.jp/kankyoku/ka-050/sui/mizukekka\\_pdf.html](http://www.pref.shizuoka.jp/kankyoku/ka-050/sui/mizukekka_pdf.html)) において下田地点近くの透明度は下田港内で測定され 4～6 m であったが、これは港外に比べて低い値と考えられた。そこで、下田地点の  $C$  値を、Yokohama (1977a) の透明度から算出した 0.08～0.11 とした。

三浦地点: 今井 (1988) は 1975～1985 年の当該海域の透明度が 5～20 m と季節的に大きく変動し、夏季に低く、冬季に高くなることを示している。1996～2000 年度の神奈川県公共用水域の水質測定結果 (<http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f41010/>) の城ヶ島西地点にも、ほぼ同様の季節変動が示されていた。2001 年度以降は、月別測定結果が記されていないが、同地点における透明度の最小値と最大値は、それぞれ平均 5 m と 19 m 程度で、今井 (1988) の報告した範囲とほぼ同じであった。そこで、今井 (1988) に記された夏季の透明度 5～8 m から、三浦地点の  $C$  値を 0.18～0.29 とした。

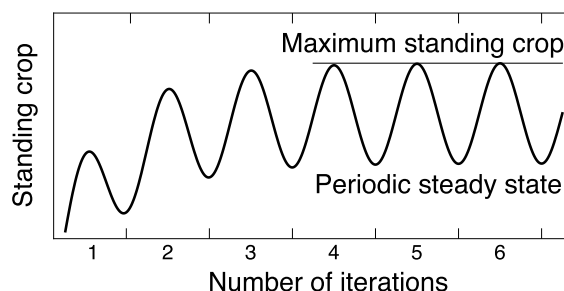


Fig. 3. Schematic diagram of the maximum standing crop calculation. The maximum standing crop was the maximum value of standing crop in the periodic steady state solution. The periodic steady state solution was obtained after several iterations.

## 結果

$C/F$  比と  $K$  値を変えて計算した各地点の光学的深度毎の最大現存量を Fig. 4 に示した。この計算結果から、以下の 4 つの特徴が明らかになった。1) いずれの海域においても、光学的深度が深くなるに伴い、最大現存量が小さくなり、ついには、現存量の周年変化が安定する解が得られなくなった。2) 現存量の周年変化が安定する解が得られなくなる光学的深度は、 $C/F$  比が大きい程浅くなった。3)  $K$  値が大きくなると、光学的深度が浅い条件での最大現存量が小さくなる一方、光学的深度が深い条件での最大現存量が大きくなり、より光学的深度が深い条件でも現存量の周年変化が安定する解が得られるようになった。4) 手結地点の最大現存量は他地点の値に比べて小さく、また、 $C/F$  比が大きい条件で解が得られる光学的深度は他地点に比べて浅かった。

各地、各月日の定地水温データと、平均水温データを比較すると、定置水温データの 80% 以上が、高知県室戸岬地点では平均水温データ  $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ , 三重県英虞湾口地点では  $\pm 1.6^{\circ}\text{C}$ , 静岡県下田地点では  $\pm 1.3^{\circ}\text{C}$ , 神奈川県三崎地点では  $\pm 1.4^{\circ}\text{C}$  の範囲内であった。これらの水温差が最大現存量に及ぼす影響を解析したところ、いずれの地点、光学的深度においても、水温が高い場合に最大現存量が小さく、水温が低い場合に最大現存量が大きくなる結果が得られたが、上記の  $\pm 1.1 \sim \pm 1.6^{\circ}\text{C}$  の水温変動範囲では、最大現存量の変動は最大でも  $0.7 \text{ kg(w.w.) m}^{-2}$  以下と計算された (Fig. 5)。

$K$  値 0.4～0.8,  $C/F$  比 0.05～0.65 の条件で計算した光学的深度毎の最大現存量を上限として、存在可能な現存量を Fig. 6 に示した (灰色の範囲)。また、図中に、各地点で計測された 6～9 月の現存量文献値 (47 サンプル) を光学的深度に対応させて示した。手結地点と三浦地点では生育下限に近い水深まで調査が行われた。一方、志摩地点と下田地点は、生育下限水深が 20 m 以深であったが、現存量が測定されたのは 10 m 以浅の群落を対象であった。手結地点と三浦地点は、透明度の観測値に幅があったために  $C$  値の設定幅を広くしたことにより、現存量文献値に対応する光学的深度の幅が

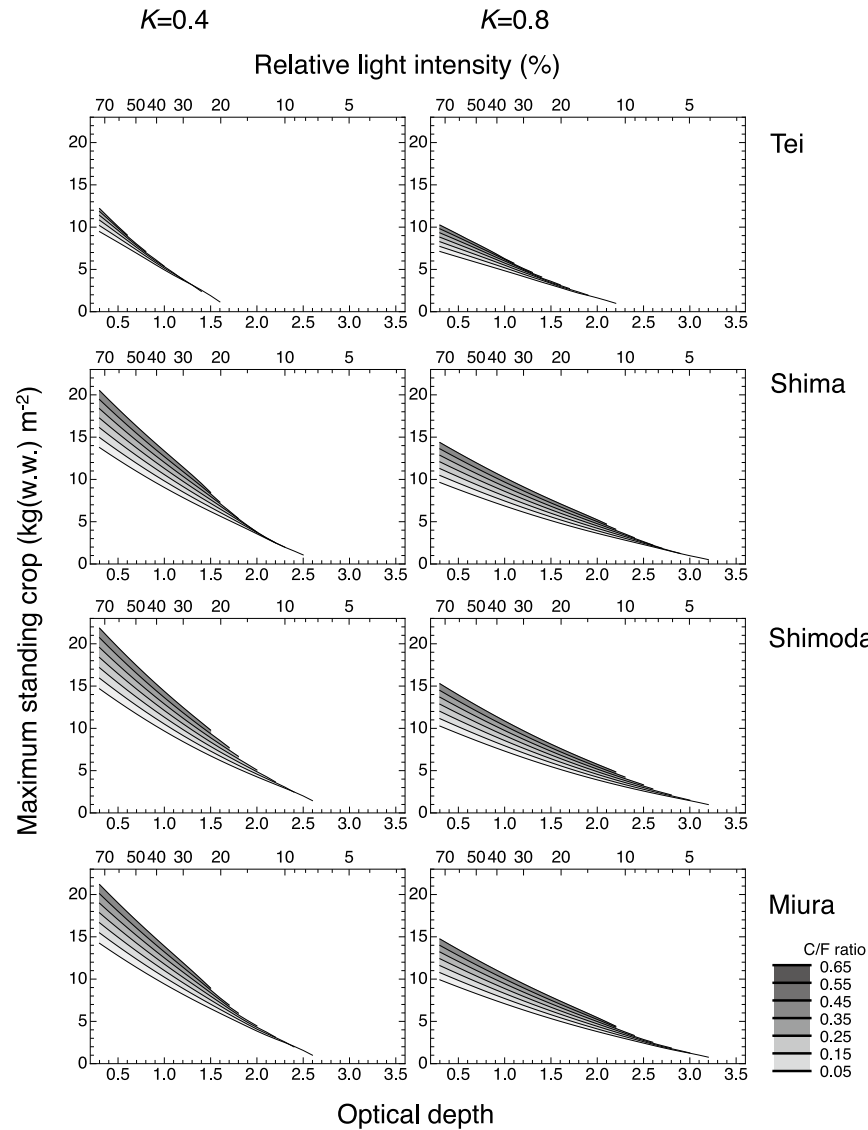


Fig. 4. Calculated maximum standing crops of *Ecklonia cava* with C/F ratio (ratio of stipe and blade biomass) for each study site. Calculation was carried out with the mean temperatures in Figure 1. Optical depth = the attenuation coefficient ( $C$  in Equation 1)  $\times$  the water depth ( $D$  in Equation 1).

広がった。三浦地点の1サンプル (d#) を除き、既往文献に報告された各地点の様々な水深の繁茂期の現存量は、計算から得られた存在可能な現存量の上限と同等ないしそれを下回っていた。

### 考察

Fig. 6 に示したとおり、三浦地点の1サンプル (d#) のみ、測定された現存量が計算した最大現存量を大きく上回ったが、この調査 (環境省自然環境局生物多様性センター 2008) では、生育密度が最も高い場所を選び  $0.25 \text{ m}^2$  の方形枠で採取する方法がとられていた。Maegawa & Kida (1991) によるカジメ群落の個体分布様式の研究から、規則分布 (一様分布) となる成熟相であっても、 $3 \text{ m}^2$  内の個体数 29 個体 (平均  $9.7$

個体  $\text{m}^{-2}$ ) の群落中で生育密度が高い  $0.5 \text{ m}$  四方内の個体数が 6 個体 ( $24$  個体  $\text{m}^{-2}$ ) であった事が分かる。このことから、生育密度の高い場所を選び  $0.25 \text{ m}^2$  方形枠を用いる場合には、現存量を大きめに推定する可能性が高いと考えられる。従って、測定された現存量が最大現存量を大きく上回った三浦地点の1サンプルは、サンプリング方法により過大な値となった可能性がある。

カジメ群落は、成熟相からギャップ相、建設相を経て再び成熟相に数年掛けて戻る更新過程を辿り (Maegawa & Kida 1989)、水域、水深、時期が同じであっても、方形枠毎に年齢組成が異なり、群落更新過程の異なる段階が混在する (前川・喜田 1987)。また、個体密度や年級群組成は基盤形状にも影響を受け、転石などの不安定な基盤上には、小型の藻体が

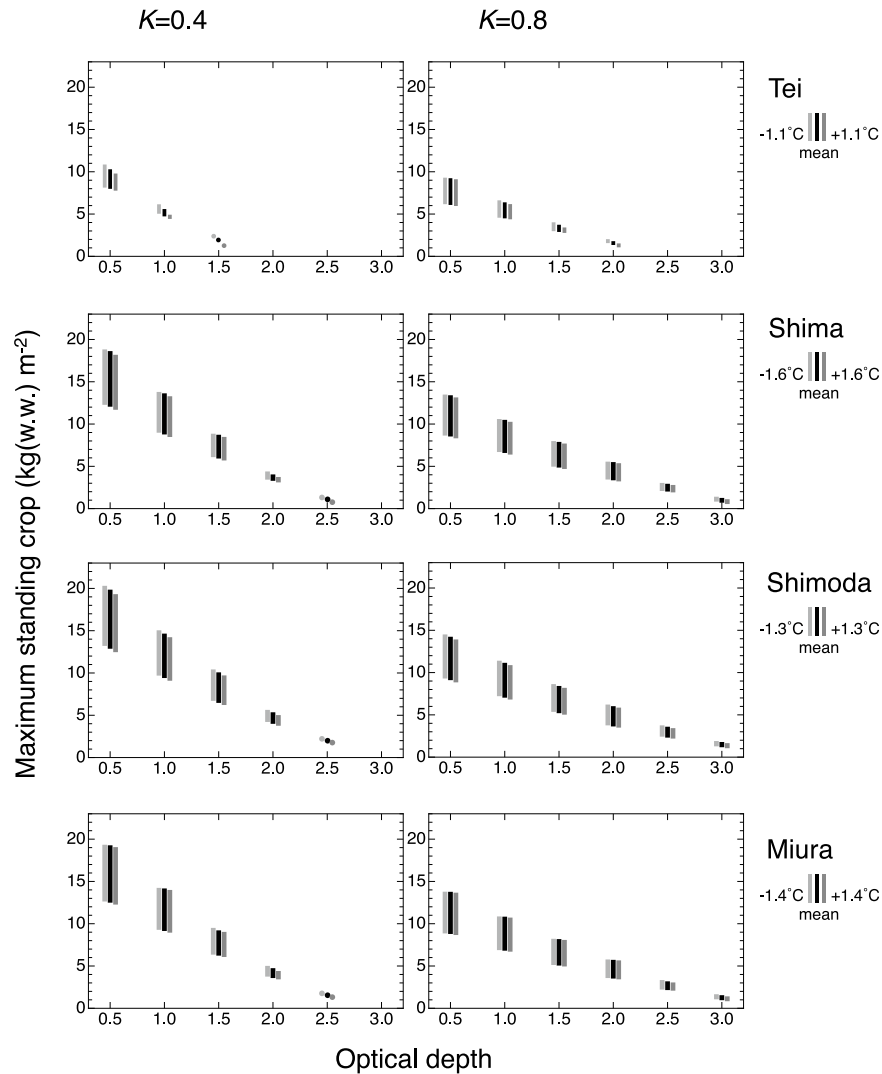


Fig. 5. Calculated maximum standing crops of *Ecklonia cava* with water temperature difference. The range of bars is the result for C/F ratio 0.05 to 0.65. The mean temperatures are shown in Figure 1.

生育することが知られている (大野・石川 1982, 喜田・前川 1983)。従って、繁茂期に測定された現存量には、成熟相の飽和した現存量と、それを下回るギャップ相、建設相および基盤特性を反映した現存量も含まれると考えられる。

志摩地点において同一底質条件のカジメ群落で実施された調査で、3、4 歳齢の藻体が現存量の多くを占める群落、1、2 歳齢の藻体からなる群落、および主に 1、2 歳齢の藻体からなるが 3、4 歳齢の藻体も混じる群落の 3 タイプの比較で、3、4 歳齢の藻体が多い群落で現存量が大きいことが示されている (前川・喜田 1987)。3、4 歳齢の大型の藻体が多い群落では、大型藻体の葉部が群落上層に茂り、大半の光がここで吸収され、下層には成長が抑制された幼体や小型藻体が少数見られる群落構造となる。大型の藻体が少ない群落では、上層での光吸収が少なく、下層に若齢の小型藻体の繁茂が報告されている (前川・喜田 1987)。Fig. 6 中の志摩地点の現存量

c\* のサンプル中、計算した最大現存量とほぼ等しかったものは、上記の 3、4 歳齢の藻体が多く、葉部が群落上層に集中し、下層の小型藻体の成長が抑制されていた群落で、現存量が飽和した成熟相の段階にあったと考えられた。現存量がより小さいサンプルは、葉部がより下層まで拡がり、若齢藻体も多く見られた生産構造の群落を、現存量が最小のサンプルは 1、2 歳齢の藻体からなる群落を示しており、現存量が飽和していない段階にあったと考えられた。

手結地点において大野・石川 (1982) が報告した繁茂期の現存量 a は、計算した最大現存量と同程度であった。この現存量 a は 5 歳齢までの藻体から形成された群落で (大野・石川 1982)、幼体の個体重量 (10 g(w.w.)) と最繁茂期の幼体の個体密度 (~ 38 個体 m<sup>-2</sup>) から幼体の現存量は大きくても 0.4 kg(w.w.) m<sup>-2</sup> 程度と考えられ、群落の現存量の 9 割以上が成体によって占められていたと考えられた。幼体は大きい

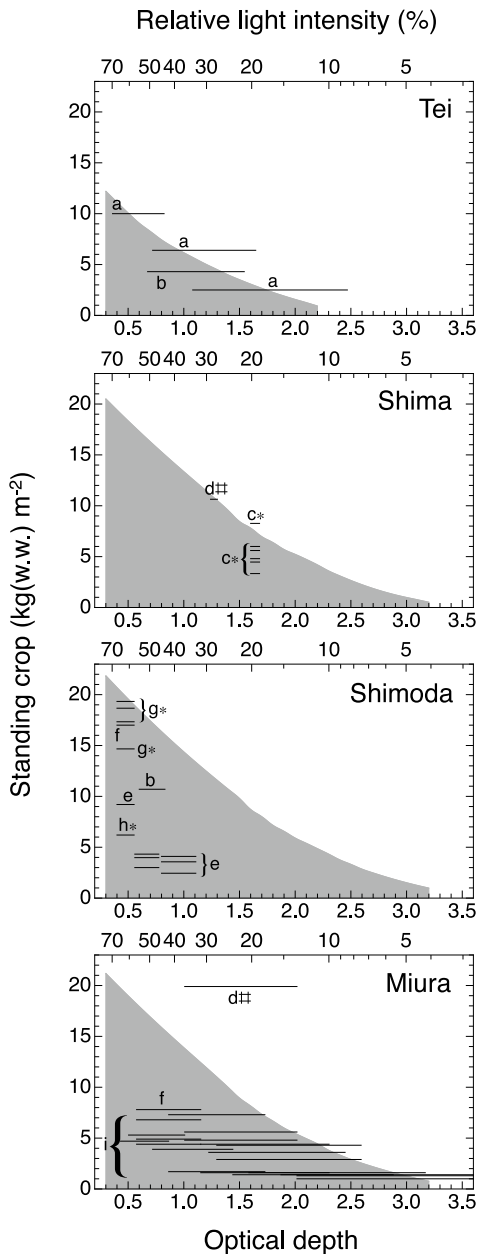


Fig. 6. Estimated standing crop range (shaded area) and observed values (bar) of *Ecklonia cava* beds at each study site. a. Ohno & Ishikawa (1982); b. Serisawa *et al.* (2001); c. Maegawa & Kida (1987); d. Biodiversity Center of Japan (2008); e. Iwahashi (1968); f. Yokohama (1977b); g. Yokohama *et al.* (1987); h. Maegawa *et al.* (1987); i. Takama (1979). \*Convert dry weight into wet weight. #By using 0.25 m<sup>2</sup> quadrat.

ものでも 20 cm 程度で、成体（茎長 13 ~ 35 cm）の下層で、成体が吸収した残りの光しか受光できない環境下で成長が抑制されていたことが推察され、この群落が成熟相にあったと考えられた。一方、現存量 b は主に 0 歳齢と 1 歳齢の藻体からなる群落であった（芹澤ら 2001）。手結カジメの現存量は下田や志摩のカジメに比べて小さい特徴があるが（大野・石川 1982, 芹澤ら 2001), Fig. 4 にもこの特徴が再現されている。また、C/F 比の小さい群落になる光学的深度が他地点の

カジメに比べて浅い計算結果が得られ、手結カジメの茎が短く藻体に占める重量が小さい生態的特徴（大野・石川 1982, 富永ら 1999, 芹澤ら 2001）を再現できたと考えられた。

Yokohama (1977b), Yokohama *et al.* (1987) が報告した現存量 f と g\* は、計算した最大現存量とほぼ等しく、他の現存量は計算値に比べて小さかった。現存量 e を得た群落について、岩橋 (1968) は、同地点で数年前に調査した時に比べて個体密度が低く、個体密度の年変動には物理的な力による流失も影響していると報告しており、現存量 e が最大現存量に比べて小さかったのは、流失による個体密度の低さに起因したと考えられた。現存量 h\* の群落 (Maegawa *et al.* 1987) は、その生産構造から、群落上層に葉部があるとともに下層にも多くの小型藻体が生育しており、群落下層にも生育に必要な光量が到達していたと考えられた。現存量 b の群落（芹澤ら 2001）は、3 歳齢が最も多く、2 歳齢、4 歳齢と続き、0 歳齢も生育する群落であり、その年級群組成から成熟相に近い更新過程にあったと考えられた。

三浦地点において、高間 (1979) は様々な水深で成体と幼体の現存量と個体密度を調べた。測定された最も現存量が大きい群落 (7.3 kg(w.w.) m<sup>-2</sup>) でも幼体の占める割合が 20% を超え、成体の約 5 倍の個体密度で幼体が生育していたと記されており、下層まで光が到達する建設相にあったと考えられた。

以上、三浦、下田、志摩、手結の各地点で測定された繁茂期の現存量について、1 m<sup>2</sup> 方形枠あるいはそれ以上の面積を対象として測定された現存量 45 サンプルは全て、光学的深度の全範囲に渡って計算した最大現存量と同等ないしそれ以下の範囲に存在した。その中で、年級群組成から成熟相にあると考えられたサンプルはいずれも、最大現存量と測定された現存量が同程度であった。また、計算では、手結カジメの現存量が他地点のカジメに比べて小さい特徴と現存量に占める茎の割合が小さい特徴を再現できた。このように、生態的特徴を異にする群落を含む各地点のカジメ群落について、光学的深度に対応した最大現存量を、日射量、海水温から算出できたと考えられた。

## 引用文献

- 林田文郎 1986. カジメの群落生態学的研究-III カジメ群落の構造について. 東海大学紀要海洋学部 22: 159-169.  
 本多正樹 1989. 海中砂漠緑化技術の開発第 1 報 海中林の生産力推定モデル. 電中研報告 U89009.  
 本多正樹 1996. カジメ群落の生産力モデル-光と温度の関数として-. 藻類 44: 149-158.  
 今井利為 1988. 三浦半島毘沙門におけるカジメの子嚢斑形成時期について. 神水試研報 9: 21-25.  
 岩橋義人 1968. 伊豆半島沿岸のアラム・カジメの生態的研究-II カジメの生育量の季節的变化. 静岡水試研報 1: 33-36.  
 神奈川県公共用水域の水質測定結果. <http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f41010/>  
 環境省自然環境局生物多様性センター 2008. 第 7 回自然環境保全基礎調査 浅海域生態系調査 (藻場調査) 報告書.  
 川嶋昭二 1993. 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 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. 三重大水産研報 10: 57-69.
- Kirk, J. T. O. 1983. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge.
- 高知県 公共用水域及び地下水の水質測定結果報告書. <http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/030801/mizu-houkokusho.html>
- 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. & Kida, W. 1989. Regeneration process of *Ecklonia* marine forest in the coastal area of Shima Peninsula, central Japan. Jpn. J. Phycol. 37: 194-200.
- Maegawa, M. & Kida, W. 1991. Distributional pattern of *Ecklonia cava* (Phaeophyta) marine forest in the coast of Shima Peninsula, central Japan. Jpn. J. Phycol. 39: 173-178.
- Maegawa, M., Yokohama, Y. & Aruga, Y. 1987. Critical light conditions for young *Ecklonia cava* and *Eisenia bicyclis* with reference to photosynthesis. Hydrobiologia 151/152: 447-455.
- 三重県 公共用水域及び地下水の水質測定結果. <http://www.eco.pref.mie.lg.jp/earth/100150/kokyo/>
- Monsi, M. & Saeki, T. 1953. Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. Jpn. J. Bot. 14: 22-52.
- 日本海洋データセンター 全国の定置水温データ. [http://www.jodc.go.jp/data/coastal/obs\\_data\\_index.html](http://www.jodc.go.jp/data/coastal/obs_data_index.html)
- 大野正夫・石川美樹 1982. 土佐湾産カジメ類の生理生態学的研究 I. 群落の周年変化. 高知大海洋生物研報 4: 59-73.
- 芹澤如比古・秋野秀樹・松山和世・大野正夫・田中次郎・横浜康継 2001. 水温環境の異なる2つの生育地のカジメ群落における現存量, 密度, 年齢組成の比較. 水産増殖 49: 9-14.
- Serisawa, Y., Akino, H., Matsuyama, K., Ohno, M., Tanaka, J. & Yokohama, Y. 2002. Morphometric study of *Ecklonia cava* (Laminariales, Phaeophyta) sporophytes in two localities with different temperature conditions. Phycol. Res. 50: 193-199.
- 芹澤如比古・村上裕重・田中次郎・青木優和・坂西芳彦・平田徹・御園生拓・横浜康継 2003. 静岡県下田市田牛地先の異なる水深における褐藻カジメ・アラメ群落の特徴. 水産増殖 51: 287-294.
- Serisawa, Y., Yokohama, Y., Aruga, Y. & Tanaka, J. 2001. Photosynthesis and respiration in bladelets of *Ecklonia cava* Kjellman (Laminariales, Phaeophyta) in two localities with different temperature conditions. Phycol. Res. 49: 1-11.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 日射量データベース. <http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>
- 静岡県 公共用水域及び地下水の水質測定結果. [http://www.pref.shizuoka.jp/kankyoku/ka-050/sui/mizukekka\\_pdf.html](http://www.pref.shizuoka.jp/kankyoku/ka-050/sui/mizukekka_pdf.html)
- 高間浩 1979. 三浦市沿岸におけるアラメ・カジメの現存量と群落構造について. 神奈川県水産試験場・神奈川県水産試験場相模湾支所, 相模湾資源環境調査報告書-II (環境部門 資源生物部門). pp. 137-151.
- 富永春江・芹澤如比古・大野正夫 1999. 土佐湾, 手結地先の異なる水深に生育するカジメの形態, 密度および現存量について. Bull. Mar. Sci. Fish., Kochi Univ. 19: 63-70.
- Yokohama, Y. 1977a. Biomasses of seaweeds. In: Hogetsu, K., Hatanaka, M., Hanaoka, T. & Kawamura, T. (eds.) Productivity of biocenoses in coastal regions of Japan. pp. 48-54. JIBP Synthesis, 14. Univ. Tokyo Press, Tokyo.
- Yokohama, Y. 1977b. Productivity of seaweeds. In: Hogetsu, K., Hatanaka, M., Hanaoka, T. & Kawamura, T. (eds.) Productivity of biocenoses in coastal regions of Japan. pp. 119-127. JIBP Synthesis, 14. Univ. Tokyo Press, Tokyo.
- Yokohama, Y., Tanaka, J. & 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.

(Received March 26, 2014; Accepted July 21, 2014)