

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

VOL.47      NO.3      September 2008

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 47 卷 第 3 号 (Vol. 47, No. 3), 2008 年 9 月 (September 2008)

## 目 次 (CONTENTS)

汀線位置の長周期変動特性および汀線位置変動の変化量に及ぼす 沖波エネルギーフラックスと沿岸流速の影響 .....鈴木崇之・栗山善昭.....	3
(Characteristics of Long-term Shoreline Change and the Effects of the Offshore Wave, the Energy Flux and Longshore Current Velocity on the Shoreline Change Rate ..... Takayuki SUZUKI, Yoshiaki KURIYAMA)	
現地調査に適したアマモ生長量推定方法の開発 .....細川真也・井上徹教・内藤了二・中村由行.....	31
(A New Method for the Estimation of Eelgrass-Growth Rate ..... Shinya HOSOKAWA, Tetsunori INOUE, Ryoji NAITO, Yoshiyuki NAKAMURA)	
震央位置を利用したインバージョン手法によるリアルタイム津波予測 .....辰巳大介・富田孝史.....	55
(Real-time Tsunami Prediction Based on Inversion Method Utilizing Epicenter ..... Daisuke TATSUMI, Takashi TOMITA)	

## 現地調査に適したアマモ生長量推定方法の開発

細川真也\*, 井上徹教\*\*, 内藤了二\*, 中村由行\*\*\*

### 要 旨

海草藻類が有する役割の一つとして、富栄養化の原因となる窒素やリンなどの栄養塩固定や地球温暖化原因となる二酸化炭素固定が挙げられる。海草藻類による物質固定への寄与の程度を明らかにするためには、海草の生長量を把握しなければならない。本研究では、1つのアマモシュートにおいて、新しい葉が生える間隔(葉間期; PI)ごとに個葉が相対的に加齢する性質を利用し、PIごとに各葉齢の葉バイオマスを推定して葉の生長量を見積る方法を提案した。この方法は、各葉齢のバイオマスとPIの情報のみを必要とし、かつ、従来の現存量調査方法を基礎とするのみで高度な技術を必要としない。

メソコスム水槽に生育するアマモの生長量について、直接測定法(plastochrone法)による測定結果と本推定法による推定結果を比較した。この結果、調査間隔が1, 2ヶ月ともにplastochrone法による結果と良い一致を示した。また、PIの季節変動を考慮に入れた方が一定のPIを仮定した場合よりも推定結果の精度は高いものの、PIを一定値としても十分な精度で結果を得られた。

三河湾の海域に生育するアマモ場において、現存量調査を行った。地上部バイオマスは若いシュートほど小さく、生長量の推定においてはシュート齢を考慮しなければならないことが示された。PIは、コホートと地下茎節間長の加齢速度から見積もる事が可能であることを示した。これらから得られた情報を基に、アマモ場の生長量を推定した。また、現存量変化と生長量との差から枯死量を推定した。この結果、アマモの生長量および枯死量の季節変動を定量的に示すことができ、三河湾におけるアマモ場の物質循環に対する役割を明らかにすることが可能となることを示した。

アマモ場の生長量の測定は、今までの環境調査としてほとんど行われることがなかった。本研究で示した海草生長量の推定方法は、高度な技術を要せずに高い精度での生長量推定を可能とすることから、実務レベルでのアマモ場生長量の測定を可能とした。これにより、将来的には、アマモ場の沿岸域における物質循環に対する役割の解明に寄与することが期待される。

キーワード: 生長量, 枯死量, 現存量, 葉間期, アマモ

\* 海洋・水工部沿岸環境研究領域沿岸環境研究チーム研究官

\*\* 海洋・水工部主任研究官

\*\*\* 研究主監

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話: 046-844-5046 FAX: 046-844-1274

E-mail: hosokawa@pari.go.jp

## A New Method for the Estimation of Eelgrass-Growth Rate

Shinya HOSOKAWA\*

Tetsunori INOUE\*\*

Ryoji NAITO\*

Yoshiyuki NAKAMURA\*\*\*

### Synopsis

Seagrasses contribute to fixations of nutrients and dioxide carbon, which cause eutrophications in urban coasts and green house effects, respectively. In order to assess the quantitative contributions, we must investigate growth rate of seagrasses in the coasts. In this study, we propose a new estimation technique for seagrass growth, which needs only the data of biomass of individual leaves and plastochrone interval (PI) but does not require any special techniques.

We compared the leaf growth rates of eelgrass in a mesocosm pool between estimated values in the new method and measured values by the leaf marking technique (plastochrone method, being the most precision method). As a result, both results taken from 1- to 2-month intervals of investigations corresponded to a result by plastochrone method with consideration of seasonal PI variation. A result without consideration of PI seasonality had also sufficient accuracy for estimation of eelgrass growth.

For test to estimate growth rates of eelgrass living in a natural coast using the new method, we choosed an evergreen eelgrass meadow in the Mikawa Bay and measured the standing stock and PI of the eelgrass during a year. This investigations showed an importance of consideration of shoot age for estimation of eelgrass growth rate, because the above ground biomass of young shoot was smaller than that of old shoot, and an availability of PI estimation from aging rates of cohort. According to these results, we estimated seasonal variation of growth and loss rates in eelgrass.

The new estimation technique proposed in this study admits easy measurement of seagrass growth by simple techniques. We believe that this technique may advance the estimation of eelgrass growth carrying out the role of eelgrass in material circulation in coasts.

**Key Words:** Growth rate, Loss rate, Biomass, Plastochrone interval, Eelgrass

---

\* Researcher of Coastal and Estuarine Environment Research Group

\*\* Senior Researcher of Marine Environment and Engineering Department

\*\*\* Exective Researcher

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone: +81-46-844-5046 FAX: +81-46-844-1274

E-mail: hosokawa@pari.go.jp

## 目 次

要 旨	31
1. はじめに	35
2. アマモの葉の生長量推定法の開発	36
2.1 生長量推定方法の概要	36
2.2 生長量推定法のアマモの葉への適用	37
2.3 まとめ	38
3. アマモの生長量推定を目的とした現地調査方法の検討	38
3.1 現地調査と検討の方法	38
3.2 調査結果	40
3.3 考察	45
4. 生長量推定法の現地アマモ場への適用	47
4.1 現地調査結果を考慮に入れた生長量モデルの拡張	47
4.2 適用結果	48
4.3 考察	49
5. 結論	49
謝辞	50
参考文献	50
付録	52

## 1. はじめに

我が国では、2003年に自然再生推進法が施行され、自然環境の保全・再生・創出を行うこととされている。これを受けて、全国の主要な湾域では関係省庁および関係地方公共団体等によって、再生プロジェクトが取り組まれている。例えば、伊勢湾再生行動計画では、干潟・浅場・藻場を含む沿岸域の保全・再生・創出による自然の浄化機能を向上させることが海域環境の改善施策の一つとして挙げられている（伊勢湾再生推進会議, 2007）。伊勢湾（三河湾を含む）において最も優占する藻場の一つとしてアマモ場があるが（環境庁, 1994; 国土交通省, 2003）、アマモ場は近年においてアマモ場面積は全国的に強い衰退傾向にあり（環境庁, 1994）、その保全・再生・創出は内湾の自然再生プロジェクトにおける一つの大きな課題とされている。

沿岸域における活発な生物活動による高い生産力は、内湾水域の物質循環に大きな役割を果たすことから、高い水質浄化能力を有していると考えられている。例えば干潟においては、二枚貝が海水中の懸濁態有機物をストックし（青山ら, 1996）、底生微細藻類は富栄養化の原因となる海水中栄養塩を高い能力で吸収する（Kuwa, 2002）。藻場生態系における主要な一次生産者である海草・海藻類の生産力も高く（Mann, 1973）、沿岸域の物質循環において大きな役割を担っていると考えられる。特に海草は、根と葉からそれぞれ底泥中および直上水中の栄養塩を吸収することから（Iizumi and Hattori, 1982; Hasegawa et al., 2005）、底泥を含めた物質循環において重要な役割を担っていると考えられている。

海草による物質の同化量は、その生長量から知ることができる。海草の葉の生長量は、針などで葉に開けた孔の一定期間における移動量から直接求めることが可能である（Zieman, 1974）。この方法は、plastochrone法と呼ばれ（Short and Duarte, 2001）、一般によく用いられる方法の一つである（Sand-Jensen, 1975; Jacobs, 1979; Mukai et al., 1979; Kentula and McIntire, 1986; Ibarra-Obando and Huerta-Tamayo, 1987; Ibarra-Obando and Boudouresque, 1994; 細川ら, 2006など）。しかしながら、海草の生長量はシュートの成熟度との関係性が強いことから（Olesen and Sand-Jensen, 1994）、藻場全体を代表させるためのサンプルの採り方に注意を要し（阿部, 2005）、1個体の測定に労力を要するこの方法では実務的な課題が多い（表-1）。一方、海草の生長量を求める方法には、労力の軽減を目的とした推定方法も提案されている。例えば、Poumian-Tapia and Ibarra-Obando (1999) や Gaeckle et al. (2006) は、アマモにおける生長量と葉鞘長の間の強い相関を応用し、葉鞘長から生長量を推定する方法を提案している。また、Gaeckle and Short (2001) は、アマモにおいて成熟した葉（3葉齢）のみに着目し、3葉齢のバイオマスを新しい葉が生える間隔（葉間期; PI）で除することで生長量を推定している。これら推定方法は、簡便な方法であり、作業効率が劣る現場での適用性が高い。しかしながら、回帰式の作成を要するなど、初期の労力投資は避けられず、回帰式の適用性が保証されない場においては新たな作業が必要となる。また、推定方法の合理性に乏しい点は最大の欠点である。海草生長量の推定には、数値計算による方法も試みられている（Bach, 1993; 今村ら, 2006）。数値計算法は、計算に要するパラメータが蓄積さ

表-1 海草の生長量の測定および推定方法の比較

	利点	欠点	出典
直接測定法 マーキング法	海草の生長量を直接測ることが可能。	現地では数をこなすのが困難。数の少なさから場の代表性が乏しくなる恐れがある（阿部, 2005）。	Zieman, 1974; Sand-Jensen, 1975; Jacobs, 1979; Mukai et al., 1979; Kentula and McIntire, 1986; Ibarra-Obando and Huerta-Tamayo, 1978; Ibarra-Obando and Boudouresque, 1994; 細川ら, 2006
推定法 相対生長式による推定法	↑ 現地のアマモのデータを基に容易に推定でき、作業効率が劣る現場での推定に適している。 ↓	回帰式の作成が必要である。	Poumian-Tapia and Ibarra-Obando, 1999; 本多ら, 2004; Gaeckle et al., 2006
3葉齢のバイオマスとPIから推定する方法		合理性に欠ける。	Gaeckle and Short., 2001
現存量と脱落量から推定する方法		脱落量の推定が困難	阿部, 2005
数値計算法	パラメータさえあれば容易かつ安価に推定可能	パラメータが必要。また、パラメータ取得のための設備を要する。	Bach, 1993; 今村ら, 2006

れていれば、コスト面や藻場を損傷する必要がない点において有効な手法である。しかし、数値計算のためのキャリブレーションに用いられる海草生長量に関する情報はほとんど蓄積されていないのが現状である。

本研究では、海草が有する沿岸域の物質循環における役割の定量的評価が求められていることに鑑み、海草の生長量を容易に推定可能な方法を開発することを目的とする。ただし、①合理性があること、②技術的な困難さを省くこと、に留意する。また、提案する方法を三河湾のアマモ場に対して適用し、現場での作業性を考慮に入れながら、作業の最適化を図る。最後に、得られた結果を基に三河湾のアマモ場の生態学的な特性を明らかにする。なお、専門用語については付録 A を参照されたい。

## 2. アマモの葉の生長量推定法の開発

### 2.1. 生長量推定方法の概要

#### (1) 生長パターン

アマモの葉と地下茎の節間は、細胞分裂によって生長点から押し出されるように伸長する (Tomlinson, 1974; 図-1 参照)。1つの新しい葉および節間は、葉間期 (PI) ごとに形成され、既に形成されたものは相対的に加齢する。葉の齢は葉齢として定義される。シュートは葉束、地下茎および根を含む一つの単位であり、子シュートは親シュートの地下茎節を基点に分枝し、新たに別の単位を形成する。1つのシュートが有する地下茎の節の数により、シュート齢は定義される (Olesen and Sand-Jensen, 1994)。

#### (2) 葉の生長のモデル化

葉の生長は、出現、伸長、成熟そして脱落という過程で示される (図-2(a))。一般に、生長量とは時間当たり生成される生物量を示し、個々の葉の生長量 ( $grl: \text{mg DW leaf}^{-1} \text{d}^{-1}$ ; DWは乾燥重量を意味する) は、次式から求めることができる。

$$grl_{i-n2} = (L_i^k - L_{i-n}^{k-n}) / nPI \quad (1)$$

ここに、 $L$ : 個葉のバイオマス ( $\text{mg DW leaf}^{-1}$ )、 $PI$ : 葉間期 ( $d$ )、 $i$ : 時間ステップ、 $k$ : 葉齢、 $n$ : 葉間期を単位としたステップ間隔、である。なお、個々の葉の生長量を直接測定する plastochrone 法の原理においては、式(1)中で加齢を考

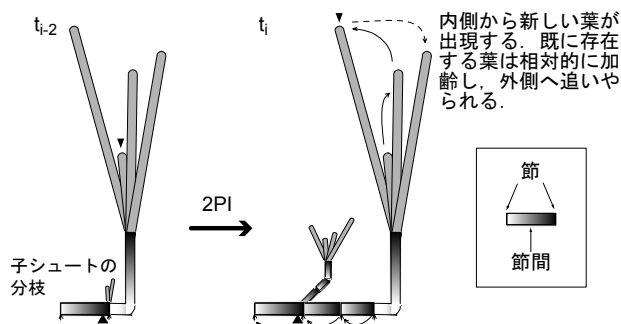


図-1 アマモの生長パターン、葉間期 PI ごとに1枚の葉と1つの地下茎の節が形成される (図中では 2PI の場合を示している)。三角印は同一の葉もしくは地下茎の節を追跡している。

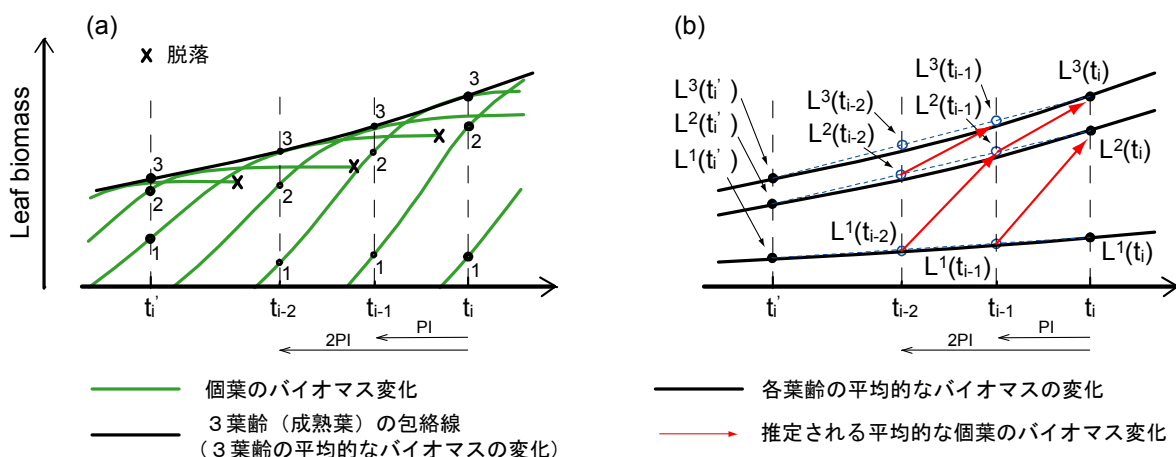


図-2 葉の生長量推定方法の模式図。(a) 1つのシュートにおける個葉バイオマスの変化、図中の数字は葉齢を表している。(b) 各葉齢の葉バイオマスの変化をいくつかのシュートで平均化した図、生長量の推定においては、調査日  $t_i$  と前回の調査日  $t_{i-1}$  における葉バイオマスを図のように内挿補間することで、 $t_{i-1}$  もしくは  $t_{i-2}$  における葉バイオマスを推定し、個葉バイオマスの生長量を求める。

表-2 モデル化されたアマモ葉の生長量算定式群. 葉が形成される間隔 ( $PI$ : 葉間期) を1つのタイムステップとし, 個シュートの生長量 ( $grs$ ) を個葉のバイオマス ( $\bar{L}$ ) から求めている.  $n$ : ステップ間隔,  $i$ : 最近のタイムステップである. 上付き文字は葉齢を示している.

$n$	
1	$\overline{grs}_{i-1/2} = [\bar{L}_i^1 + (\bar{L}_i^2 - \bar{L}_{i-1}^1) + (\bar{L}_i^3 - \bar{L}_{i-1}^2)] / PI$ (3)
2	$\overline{grs}_{i-1} = [\bar{L}_i^1 + \bar{L}_i^2 + (\bar{L}_i^3 - \bar{L}_{i-2}^1) + (\bar{L}_i^4 - \bar{L}_{i-2}^2)] / 2PI$
ここに, $\bar{L}_i^4 = \bar{L}_{i-1}^3$ なので, $\bar{L}_{i-1}^3 = (\bar{L}_i^3 + \bar{L}_{i-2}^3) / 2$ とすることで,	
	$\overline{grs}_{i-1} = [\bar{L}_i^1 + \bar{L}_i^2 + 3/2 \bar{L}_i^3 - \bar{L}_{i-2}^1 - \bar{L}_{i-2}^2 + 1/2 \bar{L}_{i-2}^3] / 2PI$ (4)
3	$\overline{grs}_{i-3/2} = [\bar{L}_i^1 + \bar{L}_i^2 + 2 \bar{L}_i^3 - \bar{L}_{i-3}^1 - \bar{L}_{i-3}^2 + \bar{L}_{i-3}^3] / 3PI$ (5)
4	$\overline{grs}_{i-2} = [\bar{L}_i^1 + \bar{L}_i^2 + 5/2 \bar{L}_i^3 - \bar{L}_{i-4}^1 - \bar{L}_{i-4}^2 + 3/2 \bar{L}_{i-4}^3] / 4PI$ (6)

慮せず (上付き文字を考慮せず), かつ時間間隔 (分母) に注意を要しない. 次に, 1つのシュートにおける葉束の生長量 ( $grs$ : mg DW shoot<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) に展開すると, (1)式は次式に拡張できる.

$$grs_{i-n/2} = [L_i^1 + L_i^2 + \dots + L_i^n + \sum_{k=1}^{NL} (L_i^k - L_{i-n}^{k-n})] / nPI \quad (2)$$

ここに,  $NL$ :  $i$ の時の葉数である. 上記の2式は, 個々の葉もしくは葉束を直接追跡しなければ, その生長量を求めることができない. ここでは, 任意の場における葉の生長の季節性はすべてのシュートにおいて同じであると仮定し, 各葉齢の葉のバイオマスの平均値 ( $\bar{L}$ ) からシュートの平均的な生長量 ( $\overline{grs}$ ) を推定する方法を提案する (表-2). 表-2の式群は, アマモ属一般に適用可能であるが, アマモの場合, 3葉齢以上の葉はほとんど生長しないことから (Sand-Jensen, 1975; Jacobs, 1979; Mukai et al., 1979; Ibarra-Obando and Huerta-Tamayo, 1987; 細川ら, 2006),  $NL$ は2としている. なお, 以上のモデルにおいては葉の損傷がないことを前提としているため, 葉が損傷しやすい種類や場においては取り扱いに注意が必要となる.

本方法の特徴は, 葉の加齢を考慮して時間間隔 (分母) に注意を払うことで, 各葉齢の葉のバイオマスの平均値から平均的な生長量を推定している点にある.

## 2.2. 生長量推定法のアマモの葉への適用

前節で示した海草の葉の生長量モデルをメソコスム水槽に生育するアマモに対して適用する. メソコスム水槽に生育するアマモは大きな物理的攪乱を受けず, 葉が損傷しにくいいため, 比較材料として適している. ここでは細川ら

(2006)によってすでに *plastochrone* 法で求められた生長量と本研究において推定する結果とを比較し, その適用性について検討する.

### (1)材料

細川ら(2006)はメソコスム水槽に生育するアマモにおいて生長量を測定した. *plastochrone* 法を用いて葉面積の増加量を測定し, 生長量は別に求めた葉面積当りの重量を乗ずることで定量した. サンプルとしたシュート数は15本とし, 調査間隔は6 dから15 dとした. この方法においては, 付加情報として, 各調査日における個葉バイオマスと調査間隔における  $PI$  が得られた. なお,  $PI$  は次式により求めた.

$$PI = N_{shoot} \cdot \Delta t / \sum_{N_{shoot}} NL_{new} \quad (7)$$

ここに,  $N_{shoot}$ : 回収できたシュートの数,  $NL_{new}$ : 回収できたシュートにおいて調査間隔 ( $\Delta t$ ) で出現した新しい葉の数である. 生長量の推定における調査間隔は, およそ1ヶ月の場合と2ヶ月の場合を設定した. また,  $PI$ の季節変動の考慮の有無に分けて方法の適用性を検証した. 調査間隔が約1ヶ月で  $PI$ の季節変動も考慮に入れた場合 (Exp 1), 調査間隔が約1ヶ月で  $PI$ を観測期間通じて一定値 (14.3 d: 年間平均値) とした場合 (Exp 2), 調査間隔が約2ヶ月で  $PI$ の季節変動も考慮に入れた場合 (Exp 3) とした. 推定においては,  $PI$ の間隔ごとに得られる葉バイオマスの平均値を調査日の葉バイオマスの平均値から内挿補間により求め (図-2(b)), 表-2のモデル式を適用する.

### (2)結果

調査間隔が1および2ヶ月程度の場合, 選択された  $n$ はそれぞれ1から2および2から4であった. 調査間隔に関らず, 推定結果は *plastochrone* 法による結果とよく一致した (図-3).  $PI$ の季節変動は, 考慮に入れた推定結果の方が高い精度で推定できたが, 考慮に入れない場合でも十分な結果が得られた. 3つの方法の間で結果に差は見られなかった (表-3).

### (3)考察

現存量の調査間隔が1ヶ月程度の場合,  $PI$ の季節変動を考慮入れた方が精度の高い結果が得られたものの,  $PI$ を一定とした場合でも十分な結果が得られた. 実際には, 調査期間中の  $PI$ は9.8 dから23.4 dの間で変動していたため, 設定した一定値 (14.3 d) に対する変動分の誤差は許容しなければならない. しかしながら, 例えば  $PI$ が測定できないような状況においては, 一定の  $PI$ を仮定しても生長量の季節変動は十分に推定できる.

一方, 調査間隔については, 1ヵ月と2ヶ月の間で大きな差が見られなかった. 時間解像度の低下さえ許容できれ



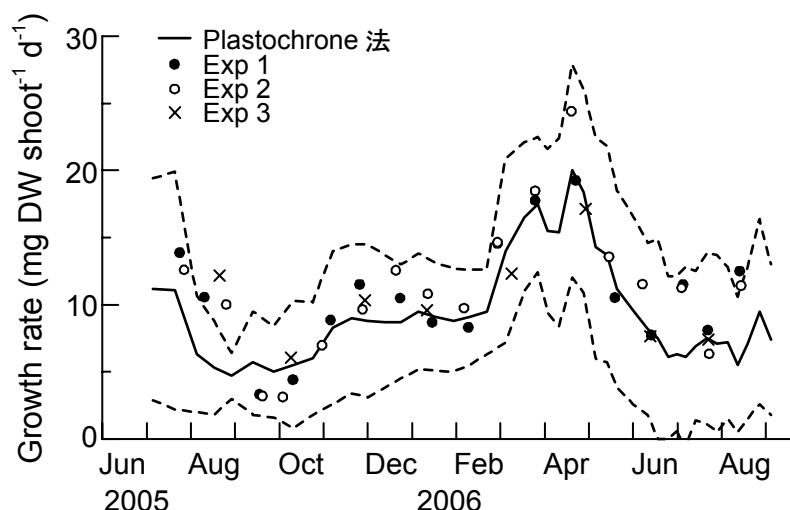


図-3 メソコスム水槽で生育するアマモへの生長量推定法の適用結果（地上部生長量の推定）。破線は plastochrone 法による測定結果の標準偏差を示す。Exp 1, 調査間隔が約1ヶ月でPIの季節変動を考慮に入れた場合, Exp 2, 調査間隔が約1ヶ月でPIを観測期間通じて一定値（年間平均値）とした場合, Exp 3, 調査間隔が約2ヶ月でPIの季節変動も考慮に入れた場合

表-3 plastochrone 法による生長量測定結果と推定法による結果の比（推定結果/plastochrone 法の結果）を平均（Average）、標準偏差（SD）、標準誤差（SE）について示す。Nは推定結果の数を示す。3つの方法による結果の間には有意な差は見られなかった（ $p > 0.05$ , Tukey 法）。

	N	Average	SD	SE
Exp 1	17	1.18	0.38	0.09
Exp 2	17	1.19	0.36	0.09
Exp 3	8	1.17	0.46	0.16

ば、調査間隔は2ヶ月でも十分である。ただし、調査間隔が大きすぎると内挿補間から個葉バイオマスが推定できなくなるため注意を要する。

### 2.3. まとめ

本章では、アマモ葉の生長モデルを構築し、葉の生長量の推定方法を開発した。推定手順は以下の通りである。①  $t_0$ において各葉齢の葉のバイオマスを計量する。葉齢ごとに葉バイオマスの平均を求め、次にPIを求めるため、② 適当な数のシュートを選定し、すべての葉に針などを用いて印をつける。③調査間隔  $\Delta t$  後、各葉齢の葉バイオマスを計量する。①と同様、葉齢ごと葉バイオマスの平均を求める。また、④マーキングしたシュートにおける新規形成葉身を計数し、PIを求める。⑤  $\Delta t/PI$  から、最適な整数 ( $n$ ) を選定し、表-2の式群から適した推定式を選ぶ。⑥選定された式からアマモ葉の生長量を求める。

葉の生長量を精度よく推定するためには、葉のバイオマスの計量を精度よく行わなければならない。このため、付

着藻類の除去を確実にすることは重要である。また、損傷した葉を除かなければ、本推定法の条件を満たさなくなる。以上に留意し、葉のバイオマスを精度よく測定できれば、精度の高い葉の生長量推定が行える。さらに、生長量の季節変動を得るためには、調査の間隔の設定に十分な注意が必要である。本研究では、調査間隔が1, 2ヵ月であれば十分に生長量の季節変動を追うことを示した。

本研究で示した葉の生長モデルは、PIごとに葉齢のランクが1つ上がることを考慮した点に特徴がある。Gaeckle and Short (2001)は同様の生長量推定式(式(8))を提案しているが、これは式(2)において  $n$  を無限大にした場合に相当する。

$$grs = L^3 / PI \quad (8)$$

## 3. アマモの生長量推定を目的とした現地調査方法の検討

### 3.1. 現地調査と検討の方法

#### a) 生長量推定を目的とした方形枠による現存量調査

調査は、愛知県蒲郡市に位置する竹島周辺の基本水準面 0~2 m に分布するアマモ場を対象とし、アマモが高密度に維持される竹島東側の場所で行われた(図-4および付録B参照)。調査期間は2006年11月から2007年10月までのおよそ1年間とした。サンプリング間隔は、推定解像度を確保するため、1ヵ月程度とした。アマモシュートのサンプリングは、アマモ生長量のシュート齢依存性を考慮できるようにするため、一辺 50 cm の方形枠 (0.25 m<sup>2</sup>) を用

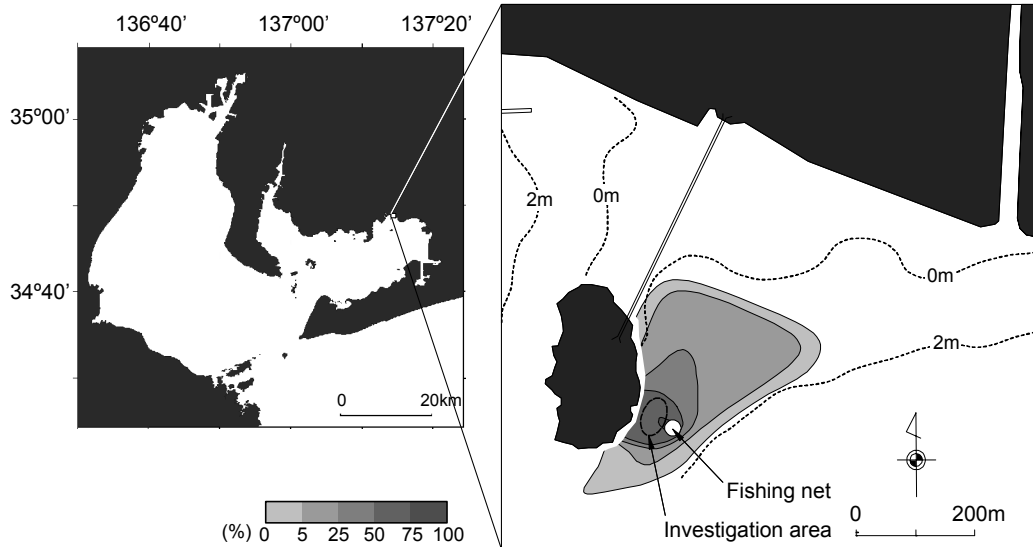


図-4 調査対象とした三河湾のアマモ場（蒲安市竹島周辺）と被度。方形枠による現存量調査および葉間期調査は竹島東側のアマモ高被度域において行った。なお、調査箇所は、調査期間中、高被度域が維持される場所であった（付録B参照）。

いて行き、得られたシュートすべてを調査対象のサンプルとした。調査箇所は4から8とした。生長量推定において葉の損傷は避けなければならないため、方形枠設置時の葉部損傷に細心の注意を払った。前章では、葉部（地上部）のみの生長量について推定したが、ここでは地下部も含めた全生長量の推定を試みるため、地下部が損傷しないよう丁寧にサンプルし、サンプリングされたシュートは、実験室に持ち帰り、速やかに分析に供した。

実験室においては、地下茎が切断されたショートを除き、各シュートについて地下茎の節の数からシュート齢を求めた。分枝した子シュートのシュート齢は、親シュートとの接続点を1として計数した。地下茎が切断していたシュートのシュート齢は不明とした。1つの方形枠において、シュート齢ごとにシュート数を計数した。サンプルは、葉、葉鞘および地下部（地下茎と根）の各部位に切断し、それぞれの部位における付着藻類や泥などを洗い落とした後、80度24時間の条件下で乾燥させ乾燥重量を計測した。葉と葉鞘の乾燥重量の合計を地上部バイオマスとし、平均と標準偏差を求めた。ただし、サンプル数が多い場合は、5つのサンプルについて求めた。地下茎については、更に、十分な節数を有するサンプル（シュート齢が不明なサンプルを含む）について各節間の長さを測定した。サンプル数は5とした。

#### b) 葉間期測定

方形枠によるサンプリングに加え、同じ調査期間においてPIの測定も行った。調査箇所は4～6とし、各箇所におけるサンプルシュートの数は15本とし、シュートのすべ

ての葉に針を用いて孔をあけて印をつけた。2006年12月と2007年1月においては、15本の内、残存していたサンプルの孔の確認は水中で行った。しかし、2007年2月以降は残存していたサンプルは船上に回収し、孔の確認は実験室に持ち帰った後に行った。回収日にサンプルシュートが花枝化していた場合、そのシュートは葉間期測定から除外した（花枝化により形態変化するため、葉間期の測定ができなくなる）。実質回収したサンプルより、式(7)によってPIを求めた。

現存量調査におけるサンプリングと葉間期測定は、SCUBA潜水によって行った。

#### c) データ解析

PIは、上記に示した測定に加え、1つシュートにおける地下茎の節の相対的齢の移動速度（加齢速度）からも推定した。すなわち、各調査月において、シュート数がピークとなるシュート齢を見出し、そのピークの移動速度からシュート齢を見積もった。加えて、節間長がピークとなる節間を見出し、そのピークとなる節間の移動速度からも加齢速度を見積もった。これらの加齢速度の平均を該当する期間のPIとした。次に、この結果と測定結果と比較して、PIの見積もりにおいて、現地アマモ場においてどちらの方法が適しているか検討した。

#### d) 統計解析

地上部バイオマスのシュート齢の間の差は、一元分散分析による多重比較（Tukey法）により検定した。解析には、統計解析ソフト R 2.4.1 の多重比較検定ライブラリ（multcomp）を用いた（R Development Core Team, 2006）。

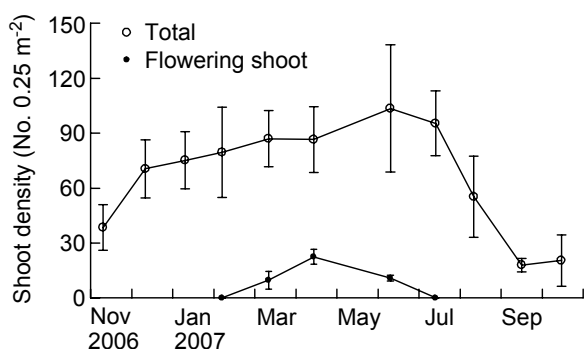


図-5 アマモシュート密度の季節変化. 全栄養シュート (Total) と生殖シュート (Flowering shoot) の密度を示している. エラーバーは標準偏差を示している.

### 3.2. 調査結果

#### (1) 平面分布とシュート密度

##### a) 平面分布の季節変化

竹島周辺におけるアマモ場の密度は時間変化したもの、大きな空間分布は見られなかった (付録B).

##### b) シュートの密度と齢構造

シュート密度は1年周期を示し、2007年9月に最も低く  $18.0 \pm 3.7$  shoots  $0.25 \text{ m}^2$  (平均 $\pm$ 標準偏差)、2007年6月に最も高く  $103.5 \pm 34.7$  shoots  $0.25 \text{ m}^2$  であった (図-5). シュート密度は、主に2006年11月から12月の期間と2007年4月から6月の期間に増加し、2007年7月から9月に急激に減少した. 実生 (発芽して間もない株) は12月に  $0.4 \pm 0.5$  shoots  $0.25 \text{ m}^2$  程度観測されたが、シュート密度の増加を説明できる程度ではなかった. シュート齢 (節数) が1や2のシュートは2006年11月から2007年1月までの期間と2007年6月に多く観測された (図-6; 図中の矢印については3.2.(4)で議論する). これらの時期はシュート密度が増加する時期とほぼ一致する. 一方、2007年8月から10月の期間には若いシュートは全く観測されなかった.

花枝化したシュートは2007年3月から6月に観測され、全シュート数に対する花枝化率は26.2%であった.

#### (2) 地上部バイオマスのシュート齢依存性

地上部バイオマスはシュート齢への依存性を示した (図-7). 特に2006年11, 12月, 2007年2, 4, 6月において若齢のシュートと古いシュートの間で地上部バイオマスに有意な差が見られた (表-4). 地下茎の損傷によりシュート齢が不明であったシュートの地上部バイオマスは、常に若齢のシュートの地上部バイオマスに対して有意に大きかった.

#### (3) 節間長分布の季節変化

2006年11月から2007年3月までの間においては、15以上の節間を有する地下茎がサンプリングできたが、2007年4月以降にサンプリングされた地下茎の節間はおよそ15以下であった (図-8; 図中の矢印については3.2.(4)で議論する). すべての月における節間番号が1 (最も若い節間) の節間長は不連続に短い、これは節間の形成が未成熟のためである.

各月の節間長には分布が見られた. 多くの節間を有する2006年11月から2007年3月の地下茎においては、2箇所 (節間番号2から5程度の場所、15以上程度の場所) に節間長のピークが見られた. 後者のピークの節間長は15-20 mmであり、前者のものよりも長い. 2007年4月以降に見られるピークの節間長は時間経過に従って節間番号が大きくなっている. また、そのピーク値は15-20 mmであり、2006年11月から2007年3月の節間番号15以上の節間長と同程度である.

#### (4) 葉間期の測定結果と推定結果との比較

##### a) 葉間期測定結果

サンプルの回収率は、サンプルを船上に上げた場合に対して水中で作業した場合の方が2倍程度低かった (表-5). これは、水中での作業性の悪さが原因している. 作業性以外の原因として、春季 (回収日が2007年3月, 4月, 6月) においては、サンプルの花枝化が実質回収率を大きく低下させた. また、夏季 (回収日が2007年9月, 10月) においては、サンプルの流出・死亡が回収率を低下させた. なお、夏季においては、著しい葉の損傷が観測され、葉の孔の確認が非常に困難であった. PIの測定結果は、夏季以外の季節で15 d ( $0.068 \text{ leaf d}^{-1}$ ) から24 d ( $0.042 \text{ leaf d}^{-1}$ ), 夏季で61 d ( $0.016 \text{ leaf d}^{-1}$ ) から700 d ( $0.001 \text{ leaf d}^{-1}$ ) であった (図-9).

PIの測定結果から推定したシュートの加齢速度とシュートのコホートおよび節間長の分布より (図-6および図-8), 2007年4月以前ではPIの測定結果は概ねこれらピークを追随できているものの、2007年7月以降 (PIの測定結果が大きい時期) になるとピークの移動速度を明らかに過小評価している.

##### b) コホートと節間の加齢速度から推定した葉間期

シュートのコホートにおいて2007年2月における節番号2を基点としたコホートの移動と2007年8月における節番号5を基点としたコホート移動を読み取った. 節間長の分布からは、2007年4月のピークの移動速度を読み取った. この結果、2007年1月から6月においては、シュートコホートの分布からピークの移動速度が求められ、 $0.056 \text{ node d}^{-1}$ であった (PIでは18.0 d, 図-10). また、2007年

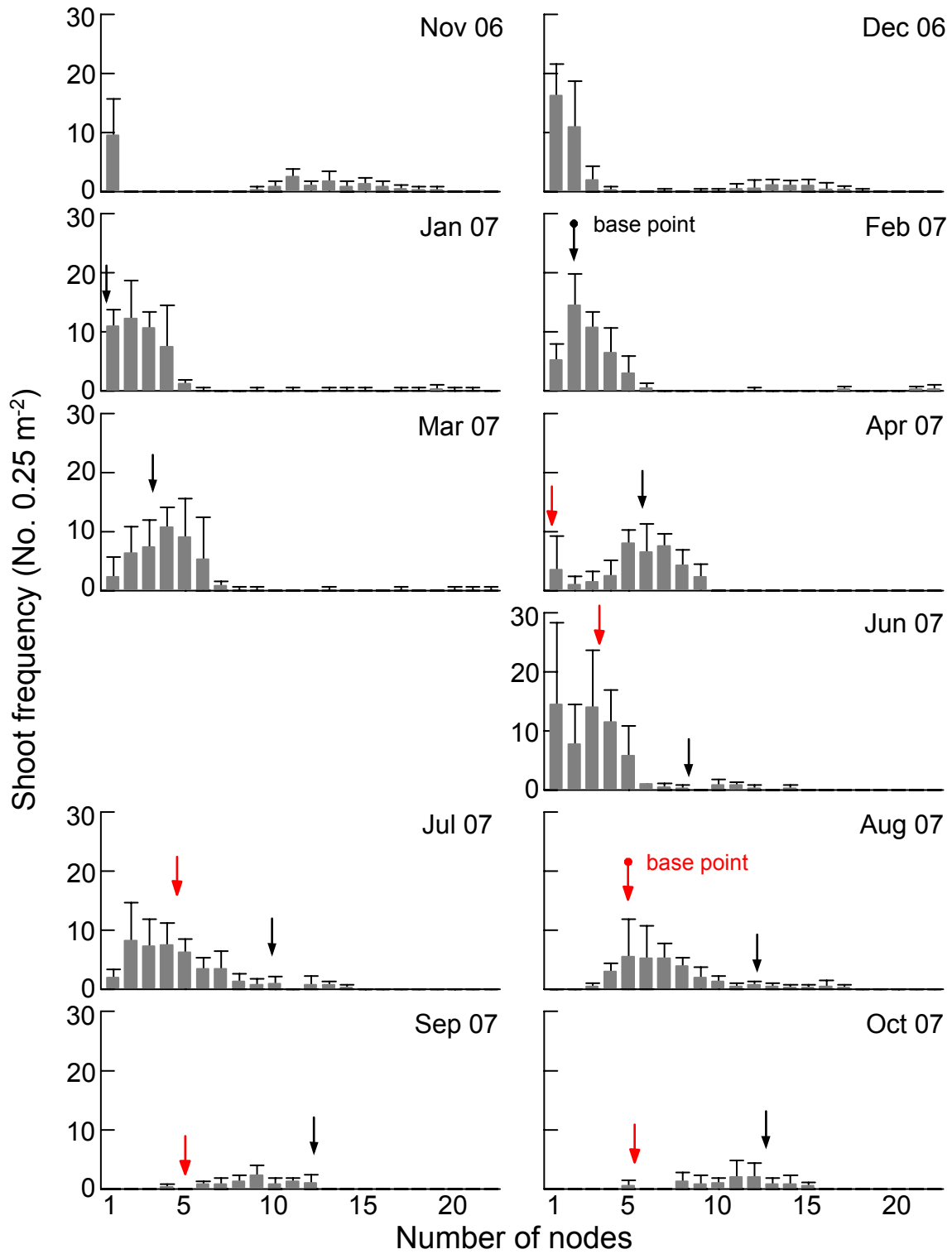


図-6 各シュート齢の出現頻度。横軸は、1つのシュートが有する節の数を示しており、シュート齢を意味する。エラーバーは標準偏差を示している。コホート（葉齢の集団のことであり、山状の分布からコホートを認識できる）に明確なピークが見られる点を基点（base point）とし、葉間期（図-9）から推定したシュートの加齢を追跡した結果を矢印で示している。

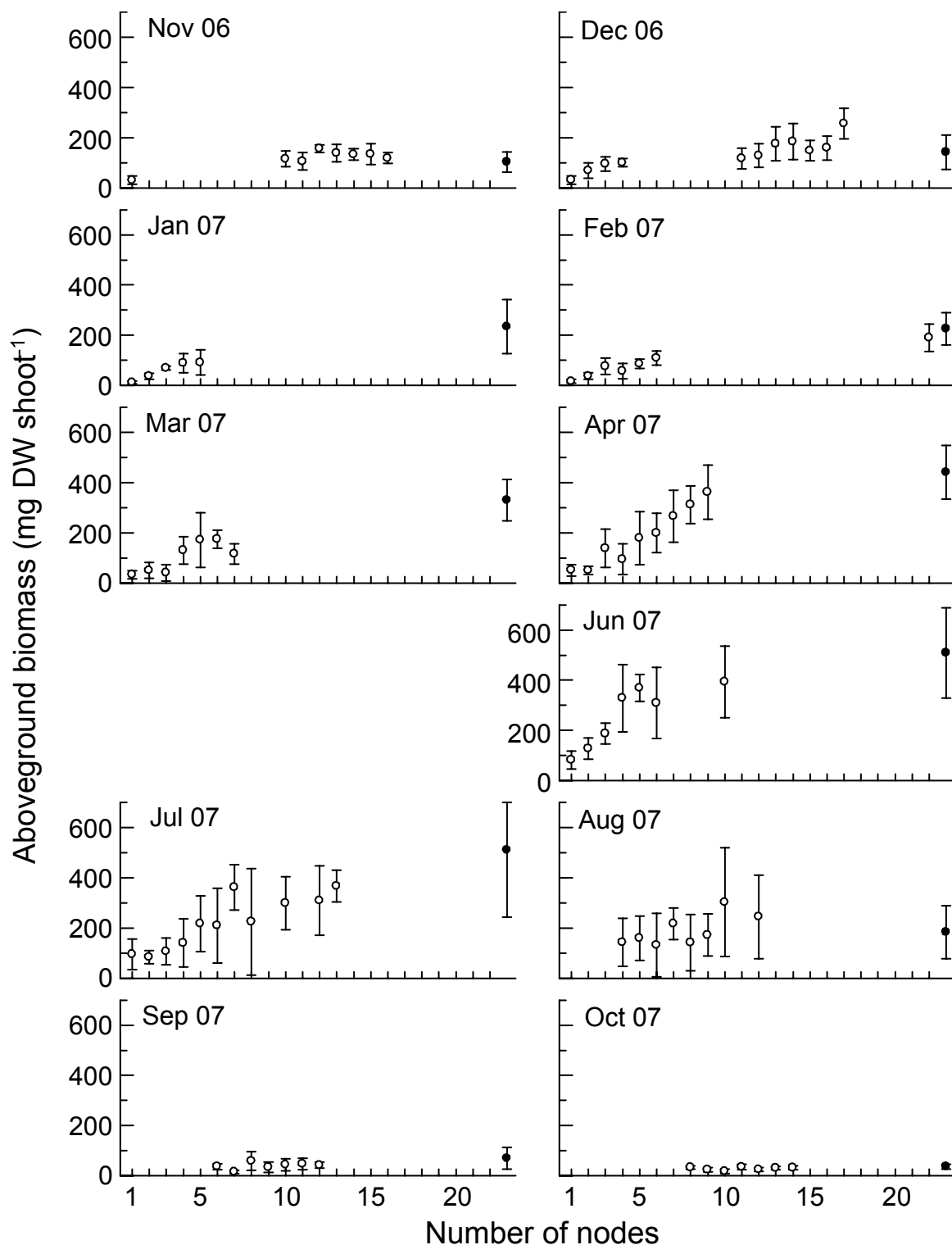


図-7 アマモのシュート齢ごとの地上部（葉と葉鞘）バイオマス。横軸は、1つのシュートが有する節の数を示しており、シュート齢を意味する。図中右端の黒丸は不明シュートを表している。エラーバーは標準偏差を示している。

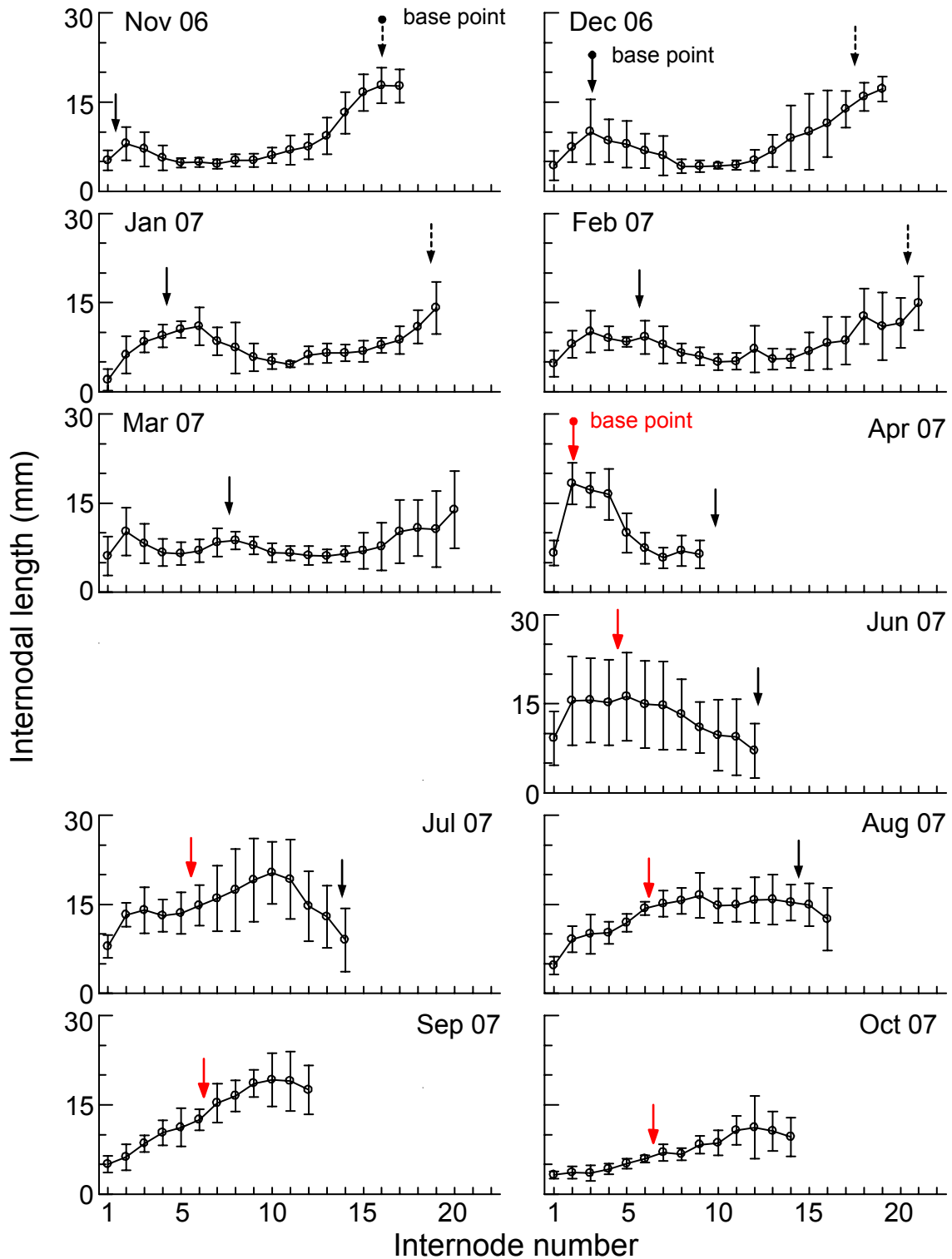


図-8 地下茎の各節間の長さ。横軸は、生長点から数えた節間の番号 (internode number) を示しており、若い番号ほど新しい節間を意味する。エラーバーは標準偏差を示している。コホートに明確なピークが見られる点を基点 (base point) とし、葉間期 (図-9) から推定したシュートの加齢を追跡した結果を矢印で示している。

表-4 アマモ地上部バイオマスのシュート齢の間における多重比較検定 (Tukey 法) の結果. \*, p < 0.05 ; \*\*, p < 0.01 ; \*\*\*, p < 0.001.

2006年11月10日

	10	11	12	13	14	15	16	不明
1	***	***	***	***	***	***	***	***
10								
11			**					
12								**
13								*
14								
15								
16								

2006年12月11日

	2	3	4	11	12	13	14	15	16	17	不明
1	***	***	*	**	***	***	***	***	***	***	***
2					*	***	***	***	**	***	***
3						***	***	*	*	***	**
4					*	*				***	
11										**	
12										*	
13										*	
14										*	*
15										**	
16										*	
17											***

2007年1月9日

	4	5	不明
1	*	*	***
2			***
3			***
4			***
5			***

2007年2月5日

	3	4	5	6	22	不明
1	*		**	**	***	***
2				*	***	***
3		***	**	*	***	***
4						***
5						***
6						***
22						

2007年3月1日

	4	5	6	7	不明
1	**	***	***	*	***
2	*	**	**		***
3	*	**	**		***
4					***
5					***
6					***
7					***

2007年4月13日

	5	6	7	8	9	不明
1	**	**	***	***	***	***
2	*	**	***	***	***	***
3			*	**	***	***
4		*	**	***	***	***
5				*	***	***
6				*	**	***
7						***
8						**
9						

2007年6月8日

	4	5	6	10	不明
1	***	***	***	**	***
2	**	***	*	*	***
3	*	**		*	***
4					**
5					*
6					**
10					

2007年7月11日

	7	8	10	12	13	不明
1	**		*	*	**	***
2	**		*	*	*	***
3	*				*	***
4					*	***
5						**
6						***
7						
8						**
10						*
12						
13						

4月から10月においては、コホートの分布から0.080 node d<sup>-1</sup> (12.5 d), 節間長の分布から0.052 node d<sup>-1</sup> (19.4 d) が求められ, 平均は0.066 node d<sup>-1</sup> (15.2 d) であった. 2007年1月から6月においては, シュートコホートの移動速度から推定されたPIは測定結果と一致したものの (図-9), 2007年4月から10月においては測定されたPIと推定されたPIに大きな差が見られた.

c)親シュートと子シュートの間における葉間期の関係  
子シュートのシュート齢 (節数) は, 接続している親シュートの節の生長点からの相対的位置とほぼ比例関係にあった (図-11). すなわち, この結果は分枝した後の節の形成速度 (PI) が親シュートと子シュートの間で同じであったことを示している.

### 3.3. 考察

シュート密度は1年間で5.8倍の変化を示した. シュート密度の増加時期において実生が観測されたものの, その量はわずかであった. 一方で, 活発な分枝はシュート密度の増加時期とほぼ一致していることから (図-5と図-6), シュート密度増加に寄与したのはほとんどが分枝によるものであったと考えられる. シュート密度が減少する時期においては, 若いシュートが出現しておらず, 分枝が起きていなかった. メソコスム水槽におけるアマモのシュートは分枝する時期には死亡せず, 密度が減退する時期には分枝が起こらないことが示されており (Hosokawa and Nakamura, unpublished data), 後者においては三河湾とメソコスム水槽で同じ結果が得られた. また, シュート密度と分枝のフェノロジー (季節性) は, 我が国のアマモに共通して見られるようである (Nakaoka and Aioi, 2001). もしメソコスム水槽のアマモのフェノロジーが三河湾のアマモに適用できるなら, 三河湾におけるシュート密度は増加時期 (分枝するが死亡しない時期) と減退時期 (死亡するが分枝しない時期) に明確に分けることができる.

地上部バイオマスは, Olesen and Sand-Jensen (1994) の結果と同様に, シュートの成熟度が高くなるに従って大きくなること示された (図-7). 特にシュート齢が1の地上部バイオマスはすべての月において有意に小さい (表-4). シュート密度が増加する時期 (2006年11月から2007年2月) においては, 若いシュート齢のシュートの割合は比較的高く (図-6), 全体の現存量や生長量を評価する場合においてシュート齢構成を無視できな

表-5 葉間期調査におけるサンプルの回収率. 調査開始日から回収日までの間にサンプルが花枝化していれば, 回収した数から花枝化した数を差し引いて実質回収数とした. 回収日が2006年12月と2007年1月については, 孔の確認を水中で行った. それ以外の日においては, サンプルを船上に上げ, 実験室で孔の確認を行った. 値は平均±標準偏差を示している.

開始日 ~回収日	開始時の サンプル数	回収数	花枝化 した数	実質回収数 (実質回収率:%)	N
06年11月 ~12月	15	7.7±3.4		7.7±3.4 (51.1±22.6)	6
06年12月 ~07年1月	15	7.7±3.0		7.7±3.0 (51.1±20.1)	6
07年1月 ~2月	15	12.7±1.5		12.7±1.5 (84.4±10.0)	6
2月 ~3月	15	13.7±1.0	0.8±1.8	12.8±0.8 (85.6±5.0)	6
3月 ~4月	15	14.2±1.2	6.2±2.4	8.0±3.1 (53.3±20.7)	6
4月 ~6月	15	13.8±1.0	0.3±0.5	13.5±0.6 (90.0±3.8)	4
6月 ~7月	15	13.5±0.6		13.5±0.6 (90.0±3.8)	4
7月 ~8月	15	14.5±0.6		14.5±0.6 (96.7±3.8)	4
8月 ~9月	15	6.8±1.7		6.8±1.7 (45.0±11.4)	4
9月 ~10月	15	7.3±1.5		7.3±1.5 (48.3±10.0)	4

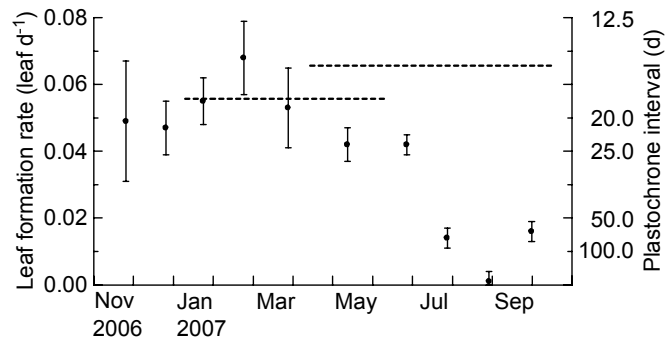


図-9 葉間期の調査結果 (点) およびシュートのコホートと節間長の分布から推定された葉間期 (破線; 図-10 より推定した). エラーバーは標準偏差を示している.

ことが示された. 一方, シュート齢が不明なシュートの地上部バイオマスはほとんどの月において有意に大きかったことから (表-4), シュート齢が不明なシュートは成熟したシュートである可能性が高い. 成熟したシュートの地下茎ほど長いとため, 地下茎が方形枠の設置時や回収時の負



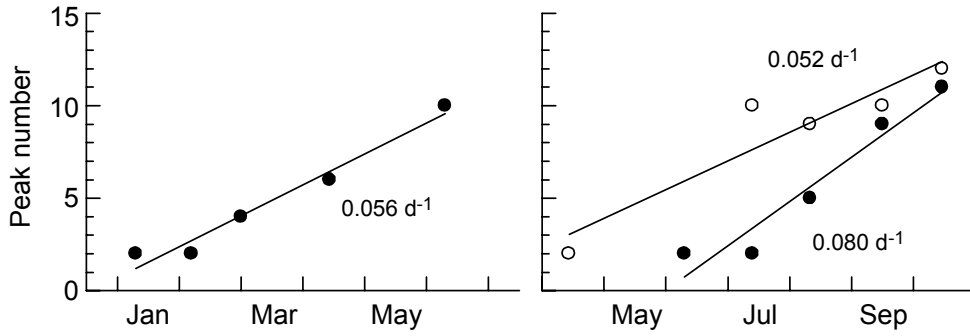


図-10 シュートのコホートと節間長の加齢速度（葉間期）。コホートと節間長の各月におけるピークを図（それぞれ図-6 と図-8）から読み取り、プロットした。黒丸はシュートのコホートのピーク、白丸は節間長のピークを示している。ここで推定した加齢速度は、図-9 において破線として示している。

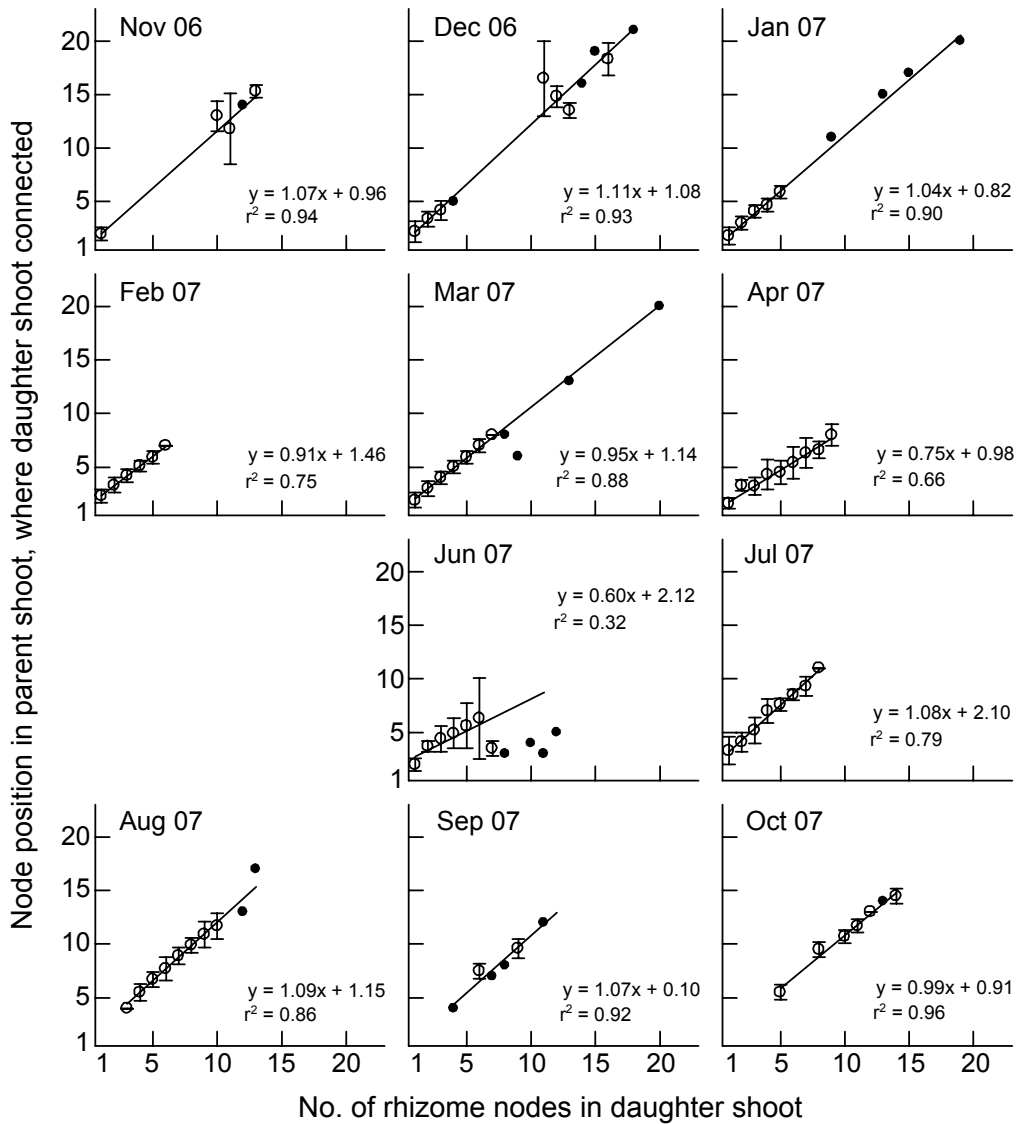


図-11 子シュートのシュート齢（節数）と親シュートにおける接続節との関係（付録 A 参照）。黒丸はデータ数が 1 つの点を示し、白抜き丸はデータ数が 2 つ以上の点を示している。エラーバーは標準偏差を示している。

荷に耐えられず損傷しやすかったものと考えられる。

アマモのPIは一般的に10 dから30 d程度であるにもかかわらず (Sand-Jensen, 1975; Jacobs, 1979; Dennison and Albert, 1985; Kentura and McIntire, 1986; Ibarra-Obando and Huerta-Tamayo, 1987; Gaeckle and Short, 2002; Hauxwell et al., 2006; メソコスム水槽における結果はすでに2章で示した), 葉間期の測定では夏季において61 dから700 dと非常に大きな値を示した (図-9)。これは、夏

季における著しい葉の損傷が、孔の判別を困難にしたためであると考えられる。一方、シュートコホートや節間長のピーク値の移動速度から推定したPIは、既往の報告値の範囲内であった。これらによる推定方法では、ピーク値の読み取りに個人差が生じる可能性はある。しかしながら、個人差が無視できる程度であるならば、この方法の方が葉が損傷しやすいような場所では葉に孔をあける方法より有効な手法であると考えられる。

子シュートのシュート齢 (節数) は、接続している親シュートの節の生長点からの相対的位置とほぼ比例関係にあった (図-11)。この結果は、葉間期にシュート齢の依存性がないことを意味している。すなわち、葉間期の測定もしくは推定においてはサンプルのシュート齢に配慮する必要がなく、また、これらの測定もしくは推定から得られる葉間期はすべてのシュート齢の代表値となりえることを意味している。

#### 4. 生長量推定法の現地アマモ場への適用

##### 4.1. 現地調査結果を考慮に入れた生長量モデルの拡張

3章で示した調査結果より、アマモの生長量を推定するにあたっていくつかの特徴および課題が明らかとなった。まず特徴としては、シュート密度の変化においては、増加時には分枝による増加量だけを考慮し減退時には死亡量のみを考慮すればよいことが明らかとなった。また、PIはシュート齢の依存性がないため、個体群の中から適当に抽出されたサンプルによる代表値を全体に適用しても問題はない。一方、課題から明らかとなった注意点では、地上部バイオマスのシュート齢依存性が生長量をシュート齢別に整理した方がいいことを示している。またPIは葉に印をつけて測定する方法よりも、シュートのコホートや節間長の分布の移動速度から推定する方法の方が信頼性が高い。これらを踏まえ、以下においてアマモ生長量の推定方法を

表-6 シュート齢を考慮に入れてモデル化されたアマモ葉の生長量算定式群。葉が形成される間隔 (PI : 葉間期) を1つのタイムステップとし、個シュートの生長量 ( $\overline{grs}$ ) を個葉のバイオマス ( $\overline{L}$ ) から求めている。n : ステップ間隔, i : 最近のタイムステップ, j : シュート齢である。上付き文字は葉齢を示している。

n		
1	$\overline{grs}_{i-1/2, j-1/2} = [\overline{L}_{i,j}^1 + \overline{L}_{i,j}^2 + \overline{L}_{i,j}^3 - \overline{L}_{i-1, j-1}^1 - \overline{L}_{i-1, j-1}^2] / PI$	(9)
2	$\overline{grs}_{i-1, j-1} = [\overline{L}_{i,j}^1 + \overline{L}_{i,j}^2 + 3/2\overline{L}_{i,j}^3 - \overline{L}_{i-2, j-2}^1 - \overline{L}_{i-2, j-2}^2 + 1/2\overline{L}_{i-2, j-2}^3] / 2PI$	(10)
3	$\overline{grs}_{i-3/2, j-3/2} = [\overline{L}_{i,j}^1 + \overline{L}_{i,j}^2 + 2\overline{L}_{i,j}^3 - \overline{L}_{i-3, j-3}^1 - \overline{L}_{i-3, j-3}^2 + \overline{L}_{i-3, j-3}^3] / 3PI$	(11)

拡張する。

(1)1つのシュートの生長量と枯死量

1つのシュートにおける地上部の生長量は、シュート齢 (j) の加齢を考慮に入れると表-6のように拡張される。また、1つのシュートにおける枯葉量 ( $\overline{loss}$ ) については、次式のように地上部生長量と地上部バイオマスの変化率との差から求まる。

$$\overline{loss}_{i-n/2, j-n/2} = \overline{grs}_{i-n/2, j-n/2} - (\overline{BA}_{i,j} - \overline{BA}_{i-n, j-n}) / nPI \quad (12)$$

ここに、 $\overline{BA}$  : シュートの地上部 (葉, 葉鞘) のバイオマス (mg DW shoot<sup>-1</sup>) である。地上部の生長量および枯葉量については、各調査地点において求めた。一方で、地下部の生長量 ( $\overline{grr}$ ) は次式により求めた。

$$\overline{grr}_{i-n/2, j-n/2} = \sum_{m=2}^{n+1} \overline{R}_{i,j}^m / nPI \quad (13)$$

ここに、m : 節間番号,  $\overline{R}^m$  : m番目の節間の平均バイオマス (mg DW node<sup>-1</sup>) である。節間バイオマスは、地下茎バイオマスに地下茎の長さに対する節間長の比を乗じて求めた。また、節間番号が1の節間は未成熟のため (3.2.(3)), 2の節間が成熟した最も新しい節間とした。なお、これらのパラメータの取得に多大な労力を要するため、各シュート齢のサンプルをすべての地点から無作為に5つ抽出して、その平均から地下部の生長量を求めた。

(2)単位面積当りの生長量と枯死量

a)密度が増加傾向の場合

単位面積当りの地上部生長量 (GRA) は式 (14) で表される。

$$GRA_{i-n/2} = \sum_{j=1}^n D_{i,j} \overline{BA}_{i,j} / nPI + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M (D_{i,j} + D_{i-n, j-n}) \overline{grs}_{i-n/2, j-n/2} \quad (14)$$

ここに、D : シュート密度 (shoots m<sup>-2</sup>), M : 最大シュート齢である。同様に、単位面積当りの地下部生長量 (GRU) は、地下部バイオマス ( $\overline{BU}$ ) を考慮して式 (15) となる。

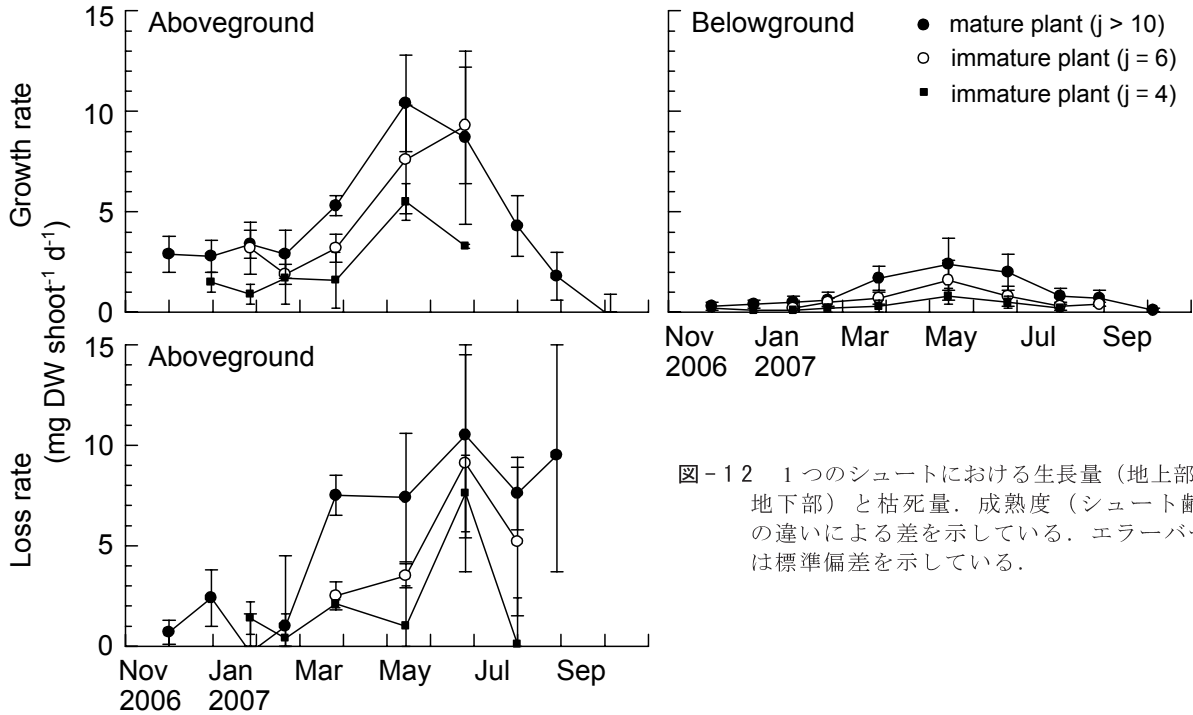


図-12 1つのシュートにおける生長量（地上部と地下部）と枯死量．成熟度（シュート齢）の違いによる差を示している．エラーバーは標準偏差を示している．

$$GRU_{i-n/2} = \sum_{j=1}^n D_{i,j} \overline{BU}_{i,j} / nPI + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M (D_{i,j} + D_{i-n,j-n}) \overline{grr}_{i-n/2,j-n/2} \quad (15)$$

密度が増加する時にシュートは死亡しないため，単位面積当りの枯死量は枯葉によるもののみとなる．単位面積当りの枯葉量 (LL) は次式で表される．

$$LL_{i-n/2} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M (D_{i,j} + D_{i-n,j-n}) \overline{loss}_{i-n/2,j-n/2} \quad (16)$$

b) 密度が減退傾向の場合

地上部および地下部の生長量は，式(14)と(15)において第一項を無視できる．また，シュートの死亡に伴う単位面積当りの枯死量 (LS) は次式で表される．

$$LS_{i-n/2} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M (\overline{BA}_{i,j} + \overline{BA}_{i-n,j-n}) (D_{i,j} + D_{i-n,j-n}) / nPI \quad (17)$$

#### 4.2. 適用結果

地上部の生長量は，2007年6，7月においてシュート齢6が最も高く 10.2 mg DW shoot<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>であったが，観測期間を通じて，概ねシュート齢に比例して大きくなった (図-12)．地下部の生長量も地上部と同様にシュート齢に比例して大きくなった．全生長量 (地上部+地下部) に対する地下部生長量の比率もシュート齢に比例して大きくなった (表-7)．

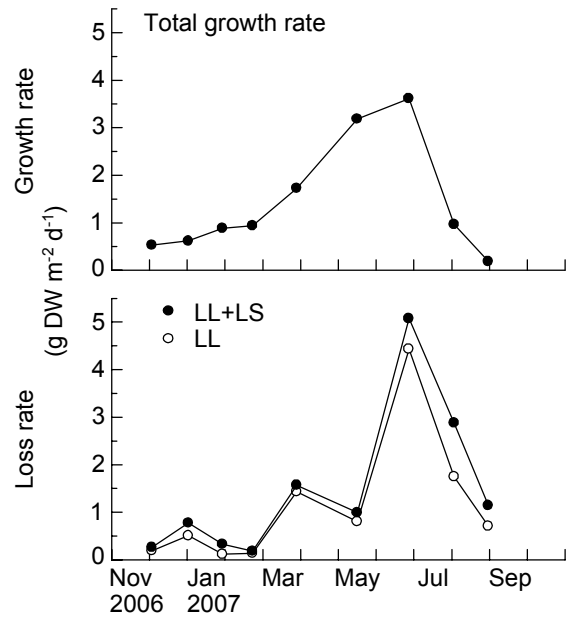


図-13 単位面積当たりにおける全生長量（地上部+地下部）と枯死量 (LL: 枯葉による枯死分と LS: 枯葉とシュートの死亡による枯死分)

枯死量は概ね生長量と同様の季節変動を示したが，2007年6，7月に大きなピークが見られた．単位面積当りの生長量と枯死量 (枯葉量を含む) の季節変動は，シュート当りの場合と同様の傾向を示した (図-13)．両方の最大値は2007年6，7月に見られ，それぞれ 3.6 g DW m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>，

表-7 各シュート齢における全（地上部+地下部）生長量に対する地下部生長量の比率。観測期間を通した平均と標準偏差を示す。

シュート齢	地下部生長量 / 全生長量	N
2	0.07 ± 0.01	3
3	0.12 ± 0.05	5
4	0.12 ± 0.04	6
5	0.12 ± 0.06	6
6	0.14 ± 0.07	6
7	0.13 ± 0.08	4
10以上	0.18 ± 0.06	9

5.1 g DW m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>であった。

### 4.3. 考察

三河湾におけるアマモの生長量の季節変動は、メソコスム水槽におけるアマモと概ね同様の傾向を示した。2つの場の開花・結実、分枝などのフェノロジー（季節性）は、我が国における典型的なアマモのフェノロジーを示している（Nakaoka and Aioi, 2001）。生長量の季節変動はフェノロジーに強く関係していると考えられることから、この2つの間における生長量の季節変動も同様の傾向を示したものと考えられる。一方、地上部生長量の大きさに着目すると、三河湾とメソコスム水槽との間で2倍程度の差が見られた（図-3および図-12）。草丈（3葉齢の葉における底泥面から葉の先端までの長さ）も4月の最も長い時期で、三河において 55 ± 11 cm、メソコスム水槽において 138 ± 28 cmで、2倍程度の差が見られ、このサイズの違いが生長量の違いを生じさせたものと考えられる。シュート密度は、三河湾において最大で 414 shoots m<sup>-2</sup> (103.5 ± 34.7 shoots 0.25 m<sup>2</sup>) であったのに対し、メソコスム水槽では最大で 146 shoots m<sup>-2</sup>であったことから、サイズの差を生じた1つの原因として密度効果が考えられる（Jacobs, 1979）。しかし、地域性など両者にはさまざまな条件の違いが含まれているため、詳細な原因は不明である。この生長量の場所間における差は、異なる地域のアマモ生長量の引用は容易にはできないことを意味している。

全生長量に対する地下部の生長量の割合はシュート齢に比例して大きくなった。地上部と地下部での生長量の割合に関して報告した研究例は少ない。アマモにおける全生長量に対する地下部生長量の割合は、Roscoffで 20-50%（Jacobs, 1979）、油壺湾で 10-40%（本多ら, 2004）と見積もられており、我々の結果も含め、概ね50%以下である点において共通している。一方、全生長量に対する地下部の生長量の割合をシュート齢との関係について示した研究は

恐らく他にない。一般に、子ラメットが成熟するまでの間、親ラメットと子ラメットの間には生理的な関連性が強く（水分や同化産物のやりとり；生理的統合）、この関係は海草においてもよく見られる（Tomasko and Dawes, 1989; Duarte and Sand-Jensen, 1996; Marbà et al., 2002; Marbà et al., 2006）。すなわち、未成熟なシュートほど全生長量に対する地下部生長量の割合が低かった結果は、子シュートが資源の獲得から利用までを独立して行えるようになるまで親シュートからの資源投資を葉へ優先投資していたことを示しているのかもしれない。なお、Jacobs(1979)と本多ら（2004）は、この割合の季節性について示しているが、互いに逆の傾向であった。本研究では、明確な季節性は示されなかった。

### 5. 結論

本研究で得られた主要な結論は以下の通りである。①現存量調査方法を基礎としたアマモの生長量推定法を提案した。②この方法をメソコスム水槽に生育するアマモへ適用した結果、推定値はplastochrone法（直接測定法）によって得られた測定値と一致した。調査間隔を1, 2ヶ月とすることで精度の高い結果が得られることを示した。PIは一定値でも生長量の季節変動を十分に推定できることを示した。③本推定法を三河湾のアマモ場に適用し、本方法が現地のアマモ場においても十分に生長量を定量的に推定できることを示した。

本研究で提案した方法により、現存量調査を基本とした簡易な技術で、現地の海草の生長量を推定する事が可能となった。また、情報量や精度の低下をある程度許容することで、ここで示した調査内容から一部の作業を軽減することも可能である。例えば、葉に孔をあけてPIを測定する方法においては、さまざまな要因を受けて測定結果の信頼性が低かったため、この結果は用いなかった。PIは、シュートのコホートや節間長の分布の移動速度から推定が可能であるし、既に報告されている値があればそれを代用しても問題ないかもしれない。シュート齢に関するデータを考慮せずに生長量を求めると1.5倍程度の過大見積りになるが、この程度の誤差を許容できたり、季節性のみを明らかにしたい場合であったりすれば、シュート齢に分類した調査は省くことが可能である。個葉および地下茎（節もしくはそれに換算できるパラメータ）の乾燥重量やシュート密度は最低限必要な情報であるため省略することはできないが、今回示した調査方法からのスケールダウンは精度の低下を許容できる範囲で十分に可能である。

本研究で示した方法の欠点は、刈り取りによるサンプリ

ングを基礎としているため、造成した海草場などの現存量が少なく希少な場所には適さない点にある。また、今回の対象はアマモとしたので、損傷の少ない3葉齢の葉までを考慮すればよかったが (Sand-Jensen, 1975; Jacobs, 1979; Mukai et al., 1979; Ibarra-Obando and Huerta-Tamayo, 1987; 細川ら, 2006), 未成熟でも損傷しやすい葉を有する海草においては、適用が困難となることに注意する必要がある。

(2008年5月2日受付)

## 謝辞

論文の構成および内容について貴重なコメントをいただいた桑江朝比呂氏には深く感謝いたします。旧沿岸環境領域諸氏には研究の遂行にあたってご協力いただいた。特に、三好英一氏、内村真之氏、Etienne Jean Faye氏にはメソコスム実験および現地調査においてご指導いただいた。仲岡雅裕氏 (北海道大学大学院) および千葉大学大学院群集生態学研究室の方々には貴重なコメントをいただいた。平石海洋・水工部長には何度も原稿に目を通していただき、貴重なコメントをいただいた。本研究の現地への適用に関しては、国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術事務所からの受託研究業務として実施しており、同所の西村大司所長および同所元環境課長の長谷川雅弘氏には多大なるご協力を得た。なお、本研究は港湾空港技術研究所競争的研究資金：平成19年度特定萌芽の研究「現地における新しい海草の生産量調査方法」(研究代表者：細川真也)の一環として実施された。

## 参考文献

- 青山裕晃, 今尾和正, 鈴木輝明, 1996. 干潟域の水質浄化機能, 一一色干潟を例にして一, 海洋, Vol.28, No.2, 178-188.
- 阿部真比古, 2005. アマモ群落の構造と環境特性に関する研究, 三重大学大学院博士論文, pp101.
- 今村正裕, 本多正樹, 松梨史郎, 川崎保夫, 2006. アマモ場生態系モデルの開発とその適用, 土木学会論文集 G, Vol.62, No.2, 229-245.
- 伊勢湾再生推進会議: 伊勢湾再生行動計画, 2007.3 ([http://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/sai\\_ise/koudou.html](http://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/sai_ise/koudou.html))
- 環境庁: 海域生物環境調査報告書 (干潟, 藻場, サンゴ礁調査) 第2巻藻場, 第4回自然環境保全基礎調査 (<http://www.biodic.go.jp/reports/4-12/r00a.html>)
- 国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所, 2003.3. 伊勢湾内藻場・貧酸素水塊調査報告
- 細川真也, 三好英一, 内村真之, 中村由行, 2006. メソコスム水槽におけるアマモ地上部の現存量と生長・脱落速度の季節変動, 港湾空港技術研究所報告, Vol.45, No.3, 25-45.
- 本多正樹, 今村正裕, 松梨史郎, 川崎保夫, 2004. アマモ現存量・生産力推定法の開発と油壺湾アマモ場への適用, 電力中央研究所報告, U03062, pp11.
- Bach, H.K. (1993) A dynamic model describing the seasonal variations in growth and the distribution of eelgrass (*Zostera marina* L.) I. Model theory. *Ecological Modelling*, 65, 31-50.
- Dennison, W.C. & Alberte, R.S. (1985) Role of daily light period in the depth distribution of *Zostera marina* (eelgrass). *Marine Ecology Progress Series*, 25, 51-61.
- Duarte, C.M. & Sand-Jensen, K. (1996) Nutrient constraints on establishment from seed and on vegetative expansion of the Mediterranean seagrass *Cymodocea nodosa*. *Aquatic Botany*, 54, 279-286.
- Gaekle, J.L. & Short, F.T. (2002) A plastochrone method for measuring leaf growth in eelgrass, *Zostera marina* L. *Bulletin of Marine Science*, 71, 1237-1246.
- Gaekle, J.L., Short, F.T., Ibarra-Obando, S.E., & Meling-López, A.E. (2006) Sheath length as a monitoring tool for calculating leaf growth in eelgrass (*Zostera marina* L.). *Aquatic Botany*, 84, 226-232.
- Hasegawa, N., Iizumi, H., & Mukai, H. (2005) Nitrogen dynamics of the surfgrass *Phyllospadix iwatensis*. *Marine Ecology Progress Series*, 293, 59-68.
- Hauxwell, J., Cebrián, J., & Valiela, I. (2006) Light dependence of *Zostera marina* annual growth dynamics in estuaries subject to different degrees of eutrophication. *Aquatic Botany*, 84, 17-25.
- Hosokawa, S., Nakamura, Y., Rhizome branching in eelgrass *Zostera marina* shoots, unpublished.
- Ibarra-Obando, S.E., Huerta-Tamayo, R., 1987. Blade production of *Zostera marina* L. during the summer-autumn period on the Pacific coast of Mexico. *Aquat. Bot.* 28, 301-315.
- Ibarra-Obando, S.E. & Huerta-Tamayo, R. (1987) Blade production of *Zostera marina* L. during the summer-autumn period on the Pacific coast of Mexico. *Aquatic Botany*, 28, 301-315.
- Ibarra-Obando, S.E. & Boudouresque, C.F. (1994) An improvement of the Zieman leaf marking technique for *Zostera marina* growth and production

- assessment. *Aquatic Botany*, 47, 293-302.
- Iizumi, H. & Hattori, A. (1982) Growth and organic production of eelgrass (*Zostera marina* L.) in temperate waters of the Pacific Coast of Japan. III. The kinetics of nitrogen uptake. *Aquatic Botany*, 12, 245-256.
- Jacobs, R.P.W.M. (1979) Distribution and aspects of the production and biomass of eelgrass, *Zostera marina* L., at Roscoff, France. *Aquatic Botany*, 7, 151-172.
- Kentula, M.E. & McIntire, C.D. (1986) The autecology and production dynamics of eelgrass (*Zostera marina* L.) in Netarts Bay, Oregon. *Estuaries*, 9, 188-199.
- Kuwaie, T., 2002. Factors affection nutrient cycling in intertidal sandflats, *Report of the Port and Airport Research Institute* 41, pp134.
- Mann, K.H. (1973) Seaweeds: Their productivity and strategy for growth. *Science*, 182, 975-981.
- Marbà, N., Hemminga, M.A., Mateo, M.A., Duarte, C.M., Mass, Y.E.M., Terrados, J., & Gacia, E. (2002) Carbon and nitrogen translocation between seagrass ramets. *Marine Ecology Progress Series*, 226, 287-300.
- Marbà, N., Hemminga, M.A., & Duarte, C.M. (2006) Resource translocation within seagrass clones: allometric scaling to plant size and productivity. *Oecologia*, 150, 362-372.
- Mukai, H., Aioi, K., Koike, I., Iizumi, H., Ohtsu, M., & Hattori, A. (1979) Growth and organic production of eelgrass (*Zostera marina* L.) in temperate waters of the Pacific Coast of Japan. I. Growth analysis in Spring-Summer. *Aquatic Botany*, 7, 47-56.
- Nakaoka, M. & Aioi, K. (2001) Ecology of seagrasses *Zostera* spp. (Zosteraceae) in Japanese waters: a review. *Otsuchi marine science*, 26, 7-22.
- Olesen, B. & Sand-Jensen, K. (1994) Demography of shallow eelgrass (*Zostera marina*) populations - Shoot dynamics and biomass development. *Journal of Ecology*, 82, 379-390.
- Poumian-Tapia, M. & Ibarra-Obando, S.E. (1999) Demography and biomass of the seagrass *Zostera marina* in a Mexican Coastal Lagoon. *Estuaries*, 22, 837-847.
- R Development Core Team (2006) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Sand-Jensen, K. (1975) Biomass, net production and growth dynamics an eelgrass (*Zostera marina* L.) population in Vellerup Vig, Denmark. *Ophelia*, 14, 185-201.
- Short, F.T. & Duarte, C.M. (2001). Methods for the measurement of seagrass growth and production. In *Global Seagrass Research Methods*, pp. 155-182.
- Tomasko, D.A. & Dawes, C.J. (1989) Evidence for Physiological Integration between Shaded and Unshaded Short Shoots of *Thalassia testudinum*. *Marine Ecology Progress Series*, 54, 299-305.
- Tomlinson, P.B. (1974) Vegetative morphology and meristem dependence - the foundation of productivity in seagrasses. *Aquaculture*, 4, 107-130.
- Zieman, J.C. (1974) Methods for the study of the growth and production of turtle grass, *Thalassia testudinum* König. *Aquaculture*, 4, 139-143.



### 付録A 用語の説明

海草は、海藻とは異なり、海に生育する高等植物である。アマモ (*Zostera marina* L.) は北半球に優占する海草の一種である。アマモは、葉と葉鞘から成る地上部と地下茎と根から成る地下部によって構成される (図-A. 1)。これらを1つの単位とし、本論文ではシュートと呼んでいる。地下茎には節があり、節と節の間を節間と呼ぶ。

シュートを1つの個体とすれば、アマモは有性生殖と無性生殖によって個体数を増やす。有性生殖においては、2つの配偶子の接合によって種子を形成し、種子が発芽することで1つの個体が形成される。この個体を一般的に実生(みしょう)と呼ぶ。無性生殖においては、1つの個体の生長点から分化によって別の個体を形成(分枝)する。新しく形成された個体を子ラメット、基の個体を親ラメットと呼ぶ。本論文では、親ラメットと子ラメットの間での生理的な関係を議論する場合には「ラメット」の用語を使用した。ただ単に物質的な単位として議論する場合にはそれぞれ親シュートおよび子シュートとして用語を使用した。

なお、親・子のシュートは、それぞれ別の単位として定義することに利便性があるが、実際には同じ個体の分化(当然ながら遺伝子は同じである)によって増えているだけなので、生殖というよりはクローン生長と呼ぶ方が正しく、こちらの言葉の方が一般的となりつつある。本論文では、シュートの成熟度は、そのシュートが有する地下茎の節の数により定義した。親シュートと子シュートの関係は、図-A. 2のように示され、クローン生長することによって平面的に広がる。

分枝によるクローン生長が季節的に均一でなく、例えば冬に一斉に分枝した場合、その世代のシュート密度が1つの集団を形成する。これをコホートと呼ぶ。

### 参考文献

竹中明夫, 2004. 光を受ける植物のかたち-植物生態学-, 朝倉書店, 81-113.

### 付録B 調査期間中におけるアマモ場の被度変化

三河湾竹島周辺におけるアマモ場は、基本水準面0~2mに分布し、調査期間中、その場所に大きな変化はなかった(図-B)。一方、被度は密度変化(図-5)と同様に強い季節変化を示した。

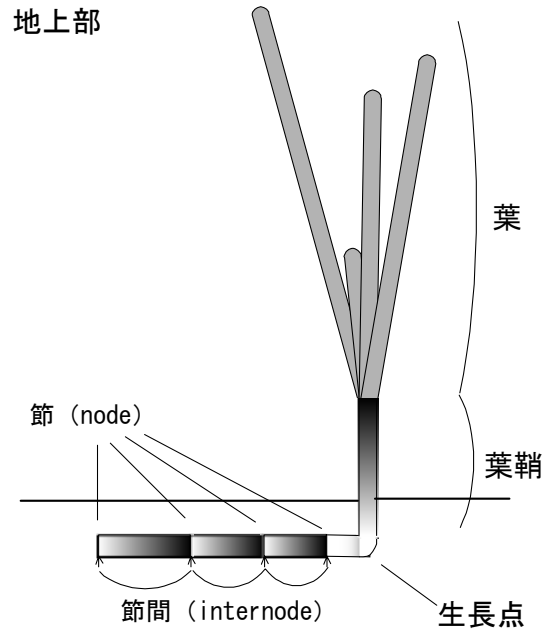


図-A. 1 アマモ各部名称。地上部は葉と葉鞘で構成され、地下部は地下茎と根で構成される。地下茎は節と節で区切られた節間の総称である。

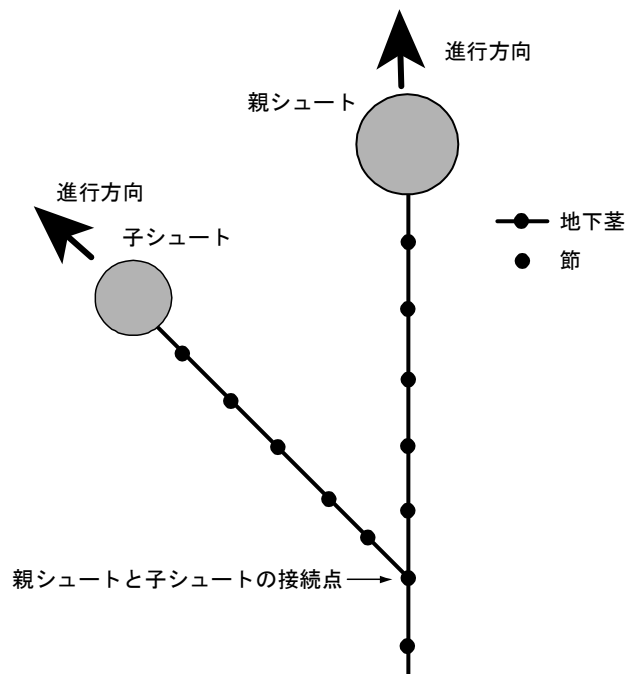


図-A. 2 アマモの地下茎の伸長と分枝を示した平面模式図。親シュートから分枝した子シュートは親シュートに対してある角度で別の方向に伸長する。親シュートと子シュートは1つの節で接続する。

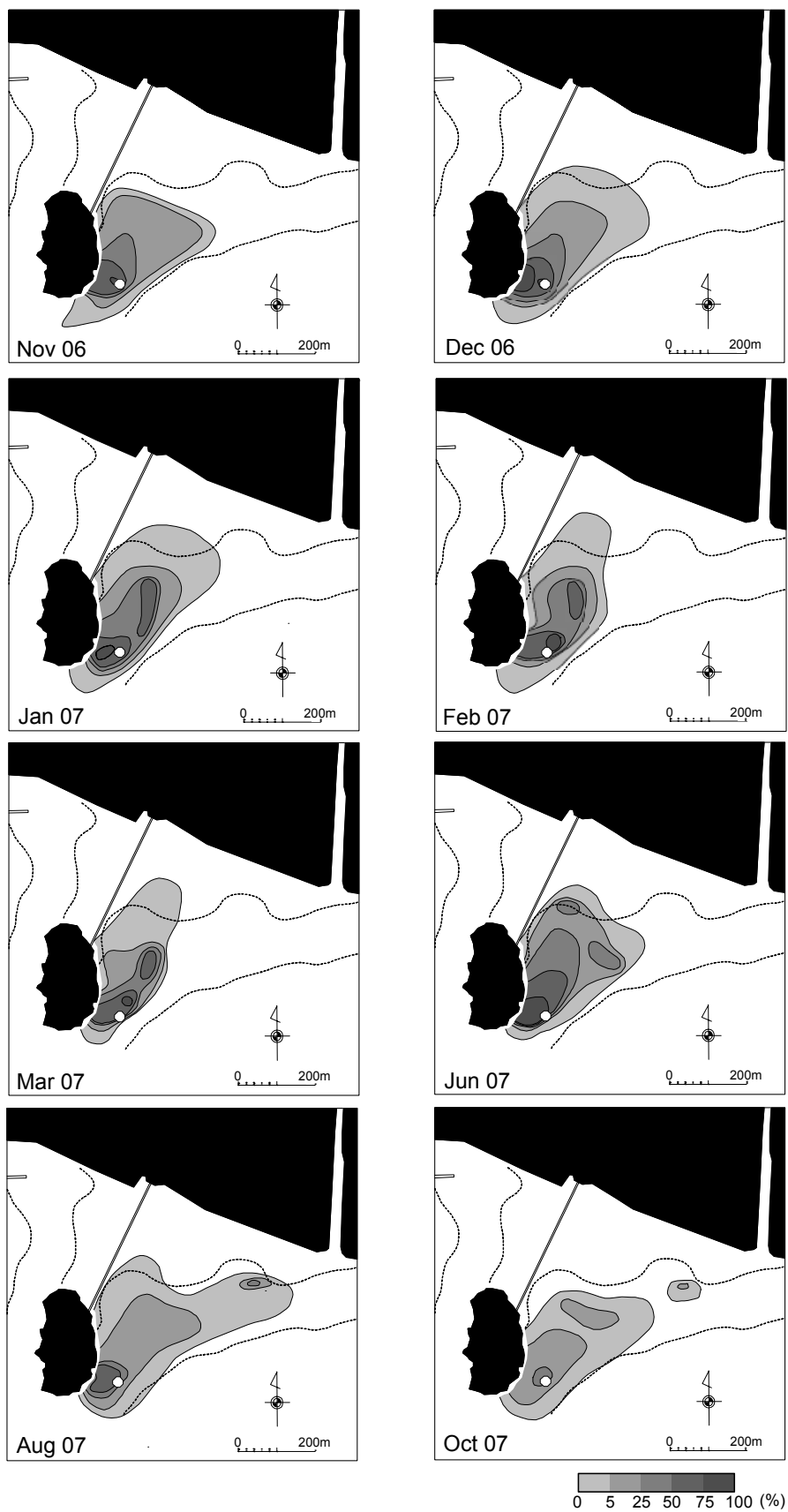


図-B 三河湾のアマモ場（蒲郡市竹島周辺）における調査期間中の被度変化



港湾空港技術研究所報告 第47巻第3号

2008.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2008) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

## CONTENTS

Characteristics of Long-term Shoreline Change and the Effects of the Offshore Wave, the Energy Flux and Longshore Current Velocity on the Shoreline Change Rate .....	Takayuki SUZUKI, Yoshiaki KURIYAMA ..... 3
A New Method for the Estimation of Eelgrass-Growth Rate .....	Shinya HOSOKAWA, Tetsunori INOUE, Ryoji NAITO, Yoshiyuki NAKAMURA .....31
Real-time Tsunami Prediction Based on Inversion Method Utilizing Epicenter .....	Daisuke TATSUMI, Takashi TOMITA .....55