

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

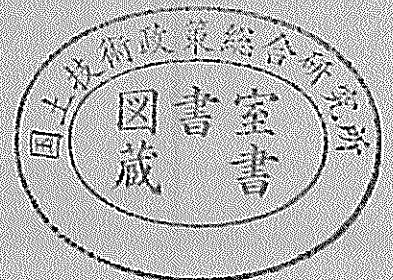
No.1108 September 2005

メソコスム水槽を用いたアマモの生育限界光量に関する検討

中	村	由	行
細	川	真	也
三	好	英	一
桑	江	朝	比呂
小	沼		晋
井	上	徹	教
神	尾	光	一 郎

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. メソコスム実験水槽のシステムの概要とアマモに関する基礎知識	4
2.1 メソコスム実験水槽と稼動システムの概要	4
2.2 メソコスム実験水槽の本格運転までの経緯	6
2.3 アマモ生態の基礎	6
3. 水温・光環境がアマモの生育に及ぼす影響についての検討	6
3.1 アマモ生育調査の概要	6
3.2 水温がアマモの生育に及ぼす影響	7
3.3 光環境がアマモの生育に及ぼす影響	7
4. アマモ生育限界光量に関する検討とアマモ生物量の季節変動についての考察	10
4.1 アマモ生育限界光量に関する検討	10
4.2 解析モデルを用いたメソコスム実験水槽におけるアマモ生物量変動の考察	14
5. おわりに	17
謝辞	18
参考文献	18
付録	19

Effect of Light and Water Temperature on Growth of *Zostera marina* L.

Yoshiyuki NAKAMIRA*

Shinya HOSOKAWA**

Eiichi MIYOSHI**

Tomohiro KUWAE**

Susumu KONUMA**

Tetsunori INOUE***

Koichiro KAMIO****

Synopsis

Light condition and water temperature are the key parameters controlling the growth of eelgrass, *Zostera marina* L. In this study, we investigated the effect of these two parameters on the net growth of *Z. marina* by the mesocosm experiment facility and a numerical simulation model of seasonal changes in the biomass. After 200 shoots of *Z. marina* being transplanted into the mesocosm pool, the leaf length and the shoot density were surveyed every 1-2 month. There was a seasonal fluctuation in the *Z. marina* leaf length and shoot density; horizontally heterogeneous distribution was observed in the shoot density but not in the leaf length from the mesocosm experiment. Calculated horizontal distribution of relative light period was consistent with the horizontal distribution of shoot density, which was greater at longer light period areas. A new estimated value of minimum light requirement for *Z. marina*, which takes into account for renewal of the leaves, was proposed.

* Director of Coastal and Estuarine Environment Research Group

** Project Researcher of Coastal and Estuarine Environment Research Group

*** Research Director of Coastal and Estuarine Environment Research Group

**** Former trainee of Coastal Ecosystems Division, Tokyo Kyuei Corp., Ltd

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

Phone : +81-46-844-5046

Fax : +81-46-844-1274

E-mail:hosokawa@pari.go.jp

メソコスム実験水槽を用いたアマモの生育限界光量に関する検討

中村 由行 *
細川 真也 **
三好 英一 **
桑江朝比呂 **
小沼 晋 **
井上 徹教 ***
神尾光一郎 ****

要 旨

アマモ生育に影響を及ぼす因子について、メソコスム実験水槽を用いて実験を行い、更にアマモ生物量変動解析モデルを用いる事で検討を行った。

メソコスム実験水槽におけるアマモ生育実験では、主に、アマモの株密度と葉条長の季節的変動と平面分布、水質、光量について調査を行った。また、泥面における直射日光の到達時間について解析を行った。この結果、メソコスム実験水槽におけるアマモは、水温が高くなる7-9月において葉条長は短くなり、10-12月にかけて葉条長・株数が増加する傾向を示した。これらは、既に報告されているアマモの生活史の傾向と概ね一致した。一方、水槽内の株密度分布について検討したところ、生長過程において特定の場所で顕著に高くなる事が示された。光量調査と直射日光の到達時間の平面分布より、水槽の覗き窓側は太陽光入射の影響を強く受ける事から株密度の増加に大きな影響を与えた事が示唆された。これらの結果を踏まえ、アマモの生育限界光量について検討を行った。本研究において示した葉の脱落量を考慮に入れた生物量維持光量は、有効な指標である事を示した。

最後に、メソコスム実験水槽に入射する光量の推定を行い、アマモ生物量変化式を用いた解析を行った。この結果、メソコスム実験水槽の本格運転開始後すぐに加入した附着藻がアマモの光合成を阻害していた事が示唆された。また、水槽の覗き窓側からの太陽光入射はアマモ生物量増加に大きく寄与している事が示された。

キーワード：メソコスム実験水槽、生育限界光量、補償点光量、生物量維持光量、アマモ生物量変動解析モデル

* 海洋・水工部沿岸環境領域領域長

** 海洋・水工部沿岸環境領域特任研究官

*** 海洋・水工部沿岸環境領域主席研究官

**** 前海洋・水工部沿岸生態研究室受託研修生（現（株）東京久栄）

〒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

1. はじめに

1992年の地球サミットでリオ宣言が採択されて以降、我が国では自然との共生を目指した環境整備が取り組まれている。沿岸域における具体的な環境整備としては、干潟や藻場の再生事業が挙げられ（海の自然再生ワーキンググループ（2003））、藻場再生事業では、特に、我が国における代表的な海草藻場であるアマモ場がその対象となっている。しかし、アマモ場は複雑な環境の中で生育していることから、アマモ場の成立条件をよく理解した上で適地選定を行わなければ、造成の成功は望めない。

アマモ場の成立条件の中で、光環境条件を満たす事が最も重要な点の一つとして挙げられる。川端（1996）は、山口県柳井湾に生育するアマモ場における調査結果と川崎ら（1987）のアマモ培養実験の結果をまとめ、アマモ場を造成するためには年平均で $2.5\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 以上、春から夏にかけて $3.0\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 以上、秋から冬にかけて $1.5\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 以上の光量が必要であるとしている。一方、寺脇・玉置（2003）は屋外に設けた透明な円筒形の水槽に遮光ネットを被せて10月から12月にかけてアマモの培養実験を行った結果、遮光ネットなし（光量：100%）の水槽と遮光ネットを被せて光量をほとんどカットした（光量：3%と1%）水槽では株数の減少と葉条長の低下が見られたと報告している。この結果は、適度な光量でないとアマモの生長は阻害され、アマモ場が成立できなくなる事を示している。

当研究所は、自然に近い条件で稼働しているアマモ場のメソコスム実験水槽を有している。本研究では、このメソコスム実験水槽において、アマモ生育・光量・水質について約1年間の調査を行い、アマモの生育に及ぼした影響について水質と光環境の観点から検討を行う。次に、アマモの生育限界を示す指標として、生物量維持光量の概念を示し、メソコスム実験水槽における調査結果および既往の知見より、その有効性を検証する。最後に、メソコスム実験水槽におけるアマモ生物量変動解析を行い、約1年間におけるアマモの生長について考察を行う。

2. メソコスム実験水槽のシステムの概要とアマモに関する基礎知識

2.1 メソコスム実験水槽と稼働システムの概要

(1) メソコスム実験水槽の概要

メソコスム実験水槽は、沿岸域における生態系を介した有害化学物質や重金属の挙動（物質の流れ）を解明する事を目的として造られた。アマモは、沿岸域の代表的

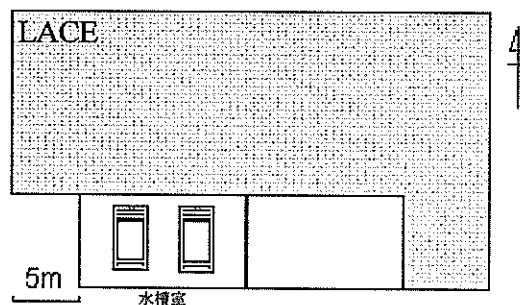


図-1 LACEと水槽の平面図

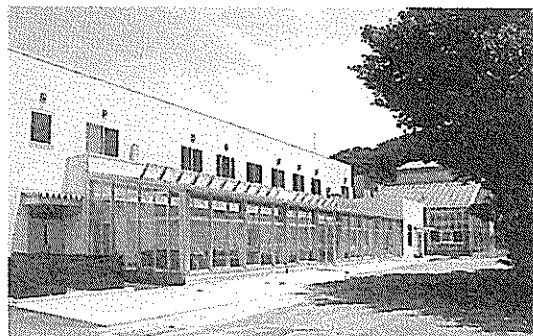


写真-1 LACE外観（南西方向から撮影）

な大型海草であり有害化学物質や重金属を蓄積する性質を有していることから（Francois（1989）、Williams（1994））、これらの沿岸生態系への取り込みの主要な起点の一つであると考えられる。このことから、沿岸域における有害化学物質や重金属の挙動解明の第一段階として、実験水槽にはアマモ場のメソコスムが創り上げられた。ここで、メソコスムとは自然の一部を隔離した実験生態系の事であり、メソコスムを用いた実験によって、環境条件を単純化し生態系の中で起こる現象を理解しやすくすることができる（西條・坂本（1993））。また当研究所では、すでに干潟実験施設におけるメソコスム実験（細川ら（1996）、桑江ら（1997））の技術蓄積があることから、メソコスム実験の手法を取り入れた。

(2) メソコスム実験水槽のLACE内配置

メソコスム実験水槽はLACE（Laboratory for Coastal Ecotoxicology、沿岸化学物質メソコスム実験施設）内に位置している（LACEの詳細については付録Aに記す）。太陽光が水槽の光源となっているため、LACE建物の南側に水槽を配置し、全面ガラス張りの構造となっている（図-1、写真-1）。実験水槽は2基あり、その内の1基（西側）にアマモを移植し、もう1基（東側）にはアマモを移植せず、アマモのないリファレンス水槽として稼働している。本研究においてはアマモを移植した実験水槽のみ

を対象とすることから、以下、アマモを移植したメソコスム実験水槽の事を単にメソコスム実験水槽と呼ぶ。

(3) メソコスム実験水槽の基本構造

メソコスム実験水槽の平面図および側面図を図-2に示す。水槽はFRP製であり、造波装置と消波工が設置されている。水槽東側のみに覗き窓が設けられており、朝日が覗き窓から水槽内に入射する構造となっている。泥は3m×2m×0.4mの容積で敷き詰めた。

(4) 取水から排水までの海水循環構造

海水の取水からメソコスム実験水槽への導水、排水までのフローを図-3に示す。取水は既設の干潟実験施設

(細川ら(1996), 桑江ら(1997))と同様に久里浜湾から行っているが、干潟実験施設よりも深い位置に取水口があることから、塩分が安定した海水がメソコスム実験水槽へ供給される。取水後の海水は、処理を行わず直接もしくは濾過槽を経由して貯水槽に導水される。貯水槽は1基のメソコスム実験水槽に対して1基と濾過海水を貯めるためにもう1基設けている。濾過槽を経由しなかった海水のみが直接メソコスム実験水槽へ導水される。メソコスム実験水槽からの排水は沈澱処理槽を経由して行われる。メソコスム実験水槽から貯水槽へ海水を戻すことによって海水交換率を低くする事も可能である。メソコ

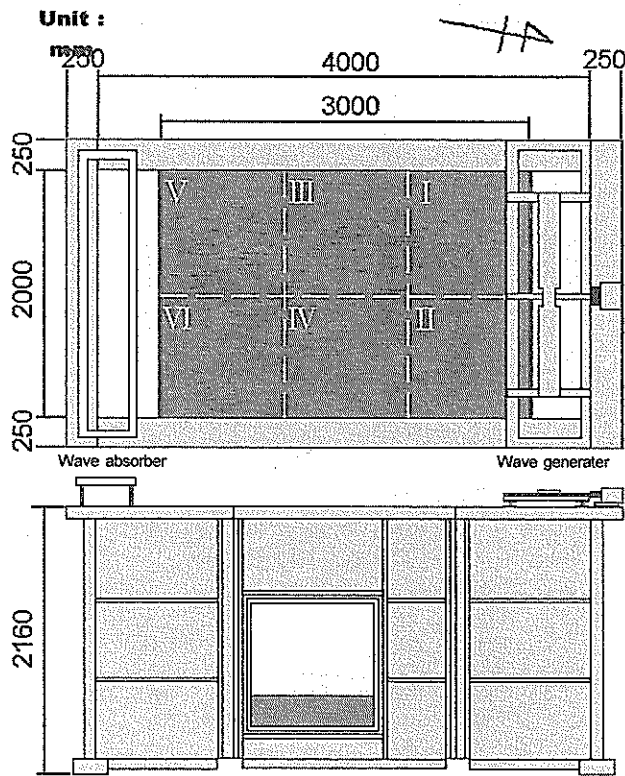


図-2 メソコスム実験水槽 (上段: 平面図, 下段: 側面図)
水槽内を平面図のように6分割して調査を行った。

表-1 メソコスム水槽本格運転の方法

温度	無制御
光	無制御 (水槽の形状による光分布あり)
海水	未処理
生物・水質調整	なし
潮汐	周期 12.4hr, 振幅 0.25m (水深 0.5-1.0m)
波	周期 2.0s, 波高 5-7cm 程度
海水交換率	一潮汐当り約 24%



写真-2 アマモ移植作業風景

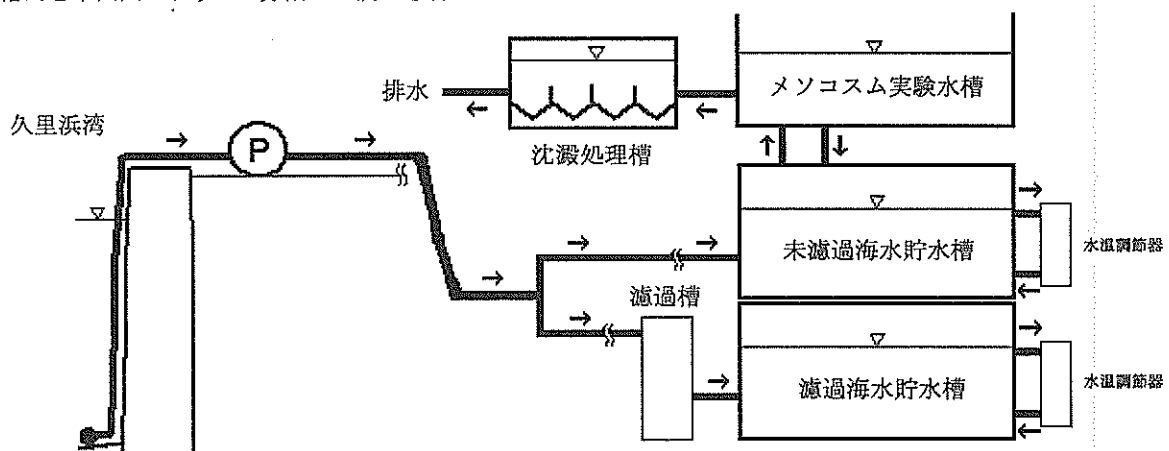


図-3 メソコスム実験水槽海水循環フロー図

スム実験水槽から貯水槽および沈澱処理槽への海水配分率を調整する事によって海水交換率を設定している。水温は、貯水槽に取り付けられた水温調節器によって調節できるが、本実験においては調節は行っていない。

その他、詳細については付録Bに示す。

2.2 メソコスム実験水槽の本格運転までの経緯

メソコスム実験水槽の本格運転までの経緯を以下に示す。底泥には、東京湾中ノ瀬航路の浚渫土（砂質土、 $d_{50}=0.13\text{mm}$ ）を1年間仮置きしたものを用いた。

- 2003年12月5日 浚渫土搬入後、水槽に50cmの厚さで敷き詰め、水槽を濾過海水で満たす。
- 2004年1月22日 バイブレーターを用い、底泥中の空気を抜く。
- 2004年2月29日 神奈川県横須賀市走水海岸でアマモを地下茎の2,3節程度の所で切断し、採取する。同日中に水槽へ200本移植する。アマモの成体をガラス棒に結着させ、成体移植を行う。移植作業風景を写真-2に示す。移植後は、アマモ以外の生物がいない状態で養生する事を目的とし、濾過海水で運転を行う。
- 2004年4月7日 濾過海水による養生運転から、未処理海水による本格運転に切り替える。本格運転の方法については表-1に示す通りである。

2.3 アマモ生態の基礎

(1) はじめに

アマモ (*Zostera marina*) は砂泥質の沿岸域に生息する海草であり、単子葉類オモダカ目ヒルムシロ科アマモ属に属する海産頭花植物である。アマモが形成する藻場はアマモ場と呼ばれ、魚介類の産卵・育成の場としての水産的な価値が高い事が指摘されている。しかし、アマモ場は沿岸域に分布する事から人間活動の影響を受けやすく、瀬戸内海のアマモ場では1945年以降に大規模な衰退・消滅が見られた事が報告されている(川端(1996))。

(2) アマモ部位の名称

アマモの部位名称を図-4(電力中央研究所(1984))に示す。アマモの成体は、地上部と地下部に分類できる。地上部は葉と葉鞘、地下部は地下茎と根毛により構成されている。繁殖方法としては、地下茎を生長させて分枝させる栄養株による方法と花枝を形成して種を作る生殖株による方法の2つがある。

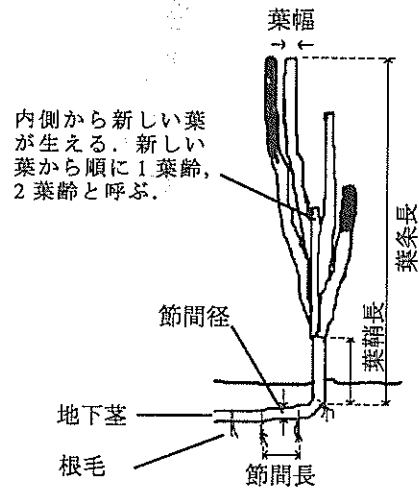


図-4 アマモ部位の名称(電力中央研究所(1984))

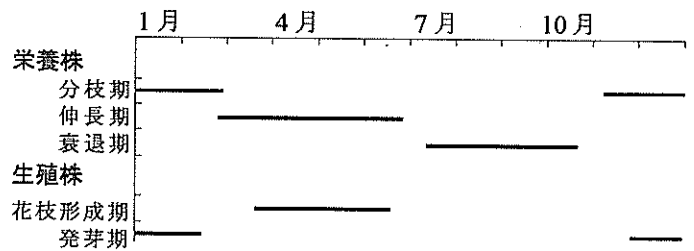


図-5 アマモの生活史(川崎(1987), 島谷ら(2002))

(3) アマモの生活史

川崎(1987)や島谷ら(2002)が報告したアマモの生活史を図-5に示す。アマモの生活史は、地域の環境に応じて生長過程が多少異なる事から、一概には示されないが、我が国では概ね図-5の生活サイクルで説明できるものと考えられる。

3. 水温・光環境がアマモの生育に及ぼす影響についての検討

3.1 アマモ生育調査の概要

(1) 調査の目的

メソコスム実験水槽においては、アマモが主要の一次生産者として単純化されており、生態系外の物質を生態系内に取り込む重要な起点となっている。アマモが物質を取り込む速度や量については、アマモの生育特性に深く関係すると考えられる事から、アマモの生育についての情報が重要となる。よって、アマモ生育および生育に影響を及ぼす水質、光量について調査を行った。

(2) 調査方法

メソコスム実験水槽の本格運転開始から、アマモ生育、

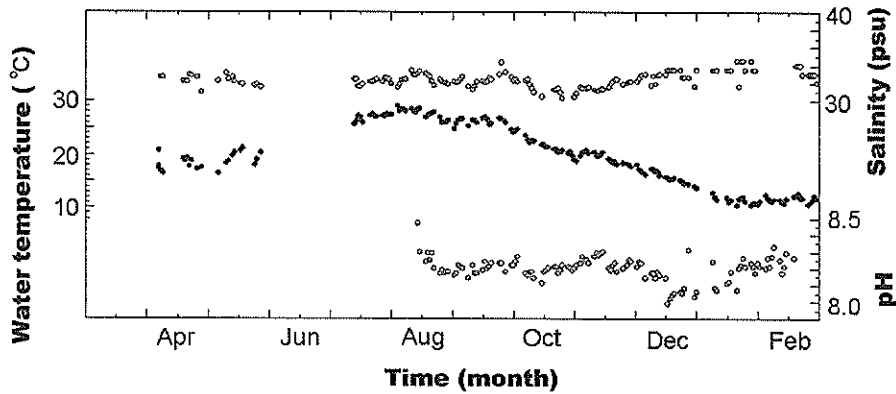


図-6 水質の年変動

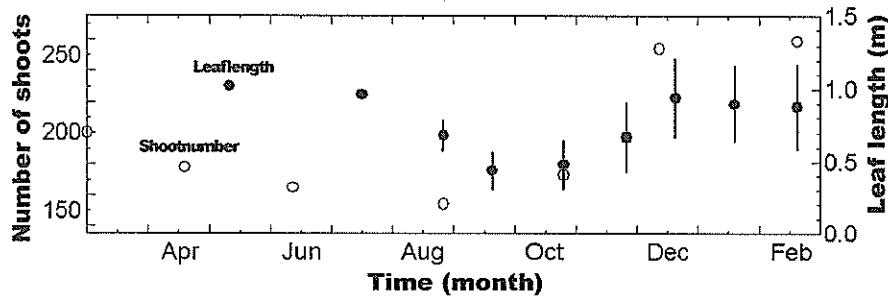


図-7 アマモの全株数と葉条長の年変動 (Error barは標準偏差を示す。ただし、5月と7月は除く。)

水質、光量について調査を行った。水質に関しては、多項目水質計を用いて、主に水温・塩分・pHについて毎朝計測した。アマモ生育調査と光量調査については、すでに図-2で示したブロックI~VI毎に行った。アマモ生育調査は、株数・葉条長・花枝数の各項目について計数・計測を行った。株数は生長点を確認できれば1本とした。葉条長は図-4の通り定義されるが、ここでは、3葉齢の葉について泥表面から葉先までの長さを測定した。各ブロックについて3本の株を無作為に選び平均したものを各ブロックの葉条長とした。花枝については穂を付けた株を1本と定義した。株数、葉条長についてはそれぞれ2ヶ月間隔、1ヶ月間隔で計数・計測を行い、花枝については花を咲かせた4月の1ヶ月のみについて計数した。光量調査は、超小型メモリ照度計(アレック電子, MDS-Mk V/L)を泥面から25cmの高さに設置し、行った。器械は照度計であるが、計測値をPAR (Photosynthetically Active Radiation, 光合成有効放射)に換算した。計測は2004年12月と2005年1月, 3月に行った。

3.2 水温がアマモの生育に及ぼす影響

(1) 水質の季節変化

移植後1年間における水質(水温・塩分・pH)の変化を図-6に示す。久里浜湾には平作川が接続しているが、

メソコスム実験水槽の塩分・pHの年間変動は小さい。海水の取水口が久里浜湾海底に位置している事から、干潟実験施設での塩分変化(桑江ら(1997))に比べて安定していると考えられる。塩分変化については、川崎ら(1988)が示す生育好適塩分(17-34)の範囲で変動している。一方、水温は季節的な変動が大きく、10°Cから30°Cの範囲で変動している。

(2) 全株数・葉条長の季節変化

図-7に全株数、葉条長の季節変化を示す。株数、葉条長は、水温と同様に、季節的な変動が大きい。特に、水温が25°C程度以上続く7-9月にかけて葉条長が急激に短くなっており、季節的消長が明確に現れている。一方、株数、葉条長ともに、10-12月にかけて増加している。これらの傾向は、図-5で示したアマモの生活史の傾向と概ね一致している。

3.3 光環境がアマモの生育に及ぼす影響

(1) 光の平面分布

a) 水槽内におけるPARの平面分布

IからVIにおける日積算PAR ($\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$)と計測期間の平均を表-2に示す。

表-2より、それぞれのブロックの日積算PARは、晴天時と曇天時で大きく異なっている。曇天時における日積

表-2 メソコスム実験水槽泥表面における日積算 PAR (n.d. は欠測を意味する.)

	I	II	III	IV (mol m ⁻² day ⁻¹)	V	VI	Incident radiant flux	Temperature (°C)
曇天	04/12/09	1.76	1.67	1.84	1.91	1.57	1.49	7.76
	04/12/12	1.63	1.79	1.68	1.68	1.48	1.50	5.39
	05/01/23	1.06	1.09	1.27	1.14	1.09	1.13	n.d.
	05/01/26	1.25	1.47	1.35	1.54	1.32	1.38	n.d.
	05/03/22	1.54	1.47	1.69	1.53	1.96	2.03	8.90
	05/03/23	1.35	1.51	1.78	1.61	2.09	2.07	6.81
晴天	04/12/10	4.34	5.10	3.94	4.90	2.86	2.86	19.45
	04/12/11	4.19	4.24	3.95	4.70	2.55	2.61	19.60
	05/01/22	4.39	4.28	4.26	5.85	2.38	3.01	n.d.
	05/01/30	4.65	3.82	5.43	8.00	2.93	3.02	n.d.
	05/03/19	9.44	9.23	10.74	10.04	5.41	5.39	39.57
	05/03/21	9.11	12.79	11.90	10.61	4.50	6.30	41.08
平均	05/12/09-12	2.98	3.20	2.85	3.30	2.12	2.11	13.05
	05/01/22-30	3.39	3.30	3.48	4.22	2.38	2.52	n.d.
	05/03/18-25	5.31	5.99	6.43	5.93	4.24	4.72	25.42

算PARは、すべてのブロックで2.0mol m⁻² day⁻¹程度以下である。一方、晴天時には2.5mol m⁻² day⁻¹程度以上であり、かつ、光量に平面的な分布が生じている事が分かる。曇天時と晴天時で光環境分布に差が生じる理由は次のように考えられる。すなわち、晴天時には直進性の高い直射日光が入射するため、水槽の壁や覗き窓の影響を強く受けて光環境に分布が生じるが、曇天時にはメソコスム実験水槽に届く太陽光は主に散乱光となり、光環境に分布を生じない。実際に、南側に位置し、水槽壁の影響を強く受けるVとVIでは日積算PARが低い、覗き窓側に位置するIVでは、朝日の影響を受けて他のブロックに比べて若干高くなっている。期間平均の日積算PARより、VとVIは他のブロックに比べて3割程度以上低く、光量の供給が低い事が分かる。

b) 直射日光の到達時間の平面分布

水槽内における光環境の平面分布を詳細に検討する。ここでは、曇りの影響を考えず、泥面に直射日光が当たる時間を直射日光の到達時間と定義し、最大の到達時間に対する割合を直射日光の到達時間割合として解を求める。計算方法は次の通りである。

太陽光と地球の運動から、LACEの位置における太陽の相対運動を考え(図-8(a), (b), (c)), 太陽の高度と日の出・日の入りの時間、太陽の方向を式(1)~式(5)で求めた。

$$\theta = \frac{\theta_{\max}}{\cos \pi - \cos \alpha} (\cos t - \cos \alpha) \quad (\text{when } \alpha < t < 2\pi - \alpha) \quad (1)$$

$$\theta = 0 \quad (\text{when } t < \alpha \text{ or } 2\pi - \alpha < t)$$

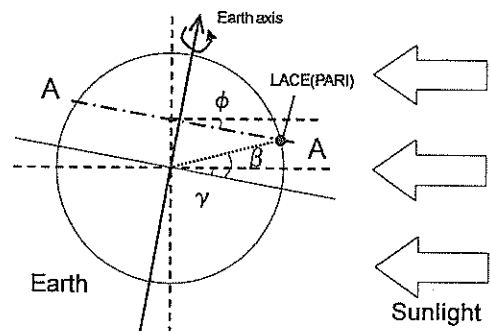


図-8 (a) 緯度と太陽光入射角の関係

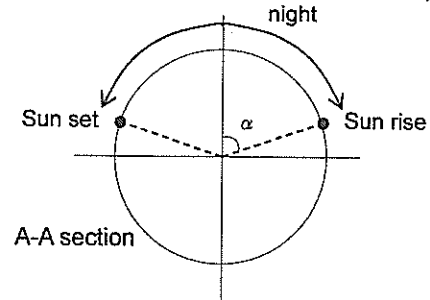


図-8 (b) 緯度 β における昼夜の関係

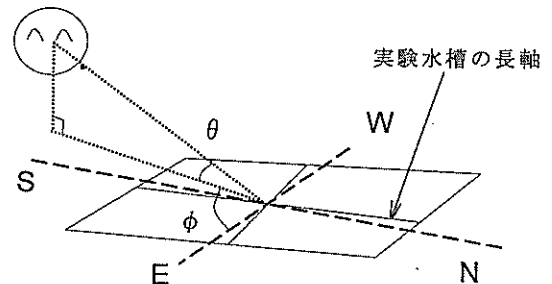
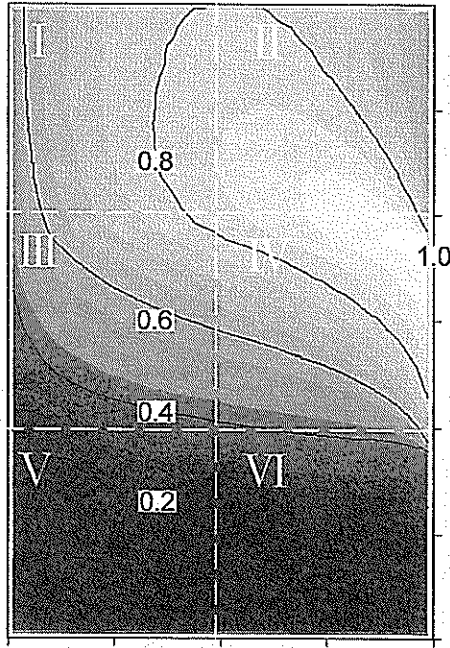
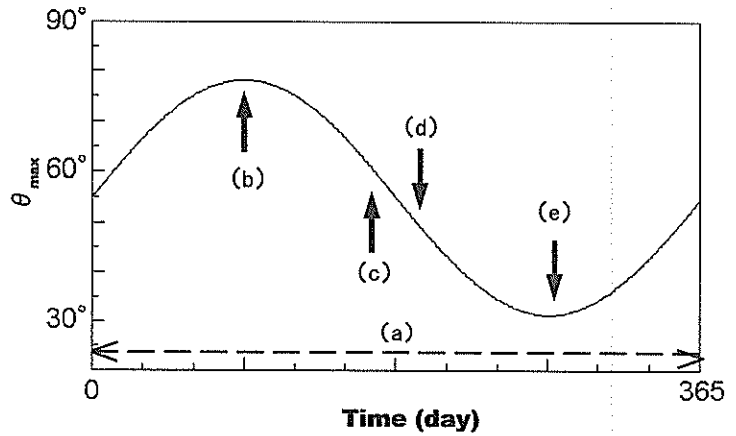


図-8 (c) 太陽高度と水平方向の角度

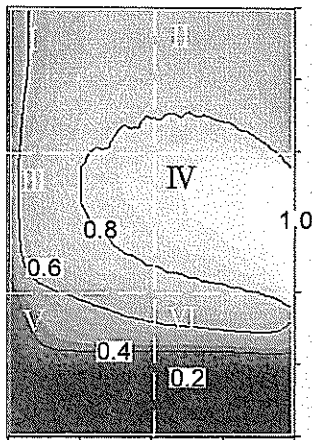


(a) 一年間を通じた直射日光の到達時間割合分布

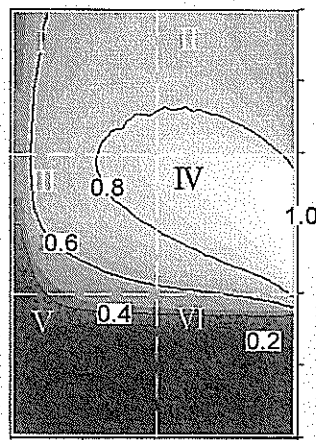
図-9(a)-(f) 直射日光の到達時間割合と計算対象期間の説明
(南中高度の変化により、水槽壁によって作られる影や覗き窓から入射する太陽光の分布が変化する)



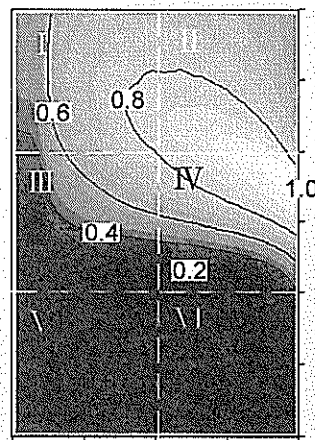
(f) 南中高度の年変動 (横軸は春分を起点とした)



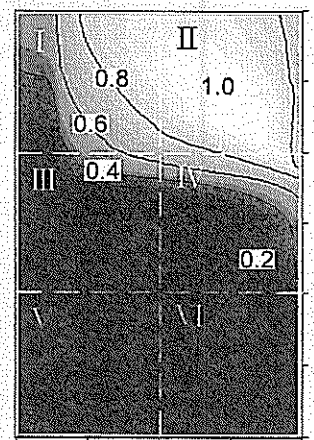
(b) 夏至における到達時間割合



(c) 春分もしくは秋分から約1ヶ月夏至よりにおける到達時間割合



(d) 春分もしくは秋分から約1ヶ月冬至よりにおける到達時間割合



(e) 冬至における到達時間割合

$$\theta_{\max} = \frac{\pi}{2} - \beta + \gamma \quad (2)$$

$$\alpha = \arccos(\sin \beta \tan \gamma) \quad (3)$$

$$\gamma = \gamma_{\max} \sin\left(2\pi \frac{t_{\text{year}}}{365}\right) \quad (4)$$

$$\phi = \frac{\pi}{2} \cos t \quad (5)$$

ここに、 θ : 太陽の高度、 θ_{\max} : 太陽の南中高度、 t : 時刻 (24時間が 2π)、 t_{year} : 春分を0とした日にち、 α : 日の出時刻 (日の入時刻は $2\pi - \alpha$)、 β : 対象とする場所の

北緯、 γ : 太陽光と赤道のなす傾き (ただし、 $\gamma_{\max} = 23.4^\circ$)、 ϕ : 対象場所における太陽の平面的な角度である。図-8(c)と図-2を組み合わせる事によって、水槽壁によって作られる影や覗き窓からの太陽光の入射を考えて、底泥表面における直射日光の到達時間を求める。ここで、式(6)のように最大到達時間で正規化した到達時間割合を求める。ただし、水深を0.75m、水の屈折率を1.33とした。また、水槽の軸の傾きは反時計回りに 10° である。

$$\Pi(x, y, z) = \frac{1}{t_{l_{\max}}} \int_p \int_{\text{day}} \delta(\theta, \alpha, \phi, x, y, z) dt dt_{\text{year}} \quad (6)$$

ここに、 t_p : 計算対象とする期間、 $t_{l_{\max}}$: t_p における直射日光の最大到達時間、 δ : δ 関数 (底泥表面に直射日

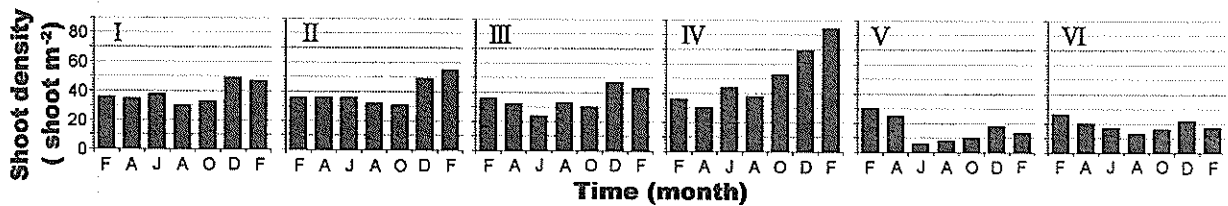


図-10 ブロック毎における株密度の年変動(2004.2-2005.2)

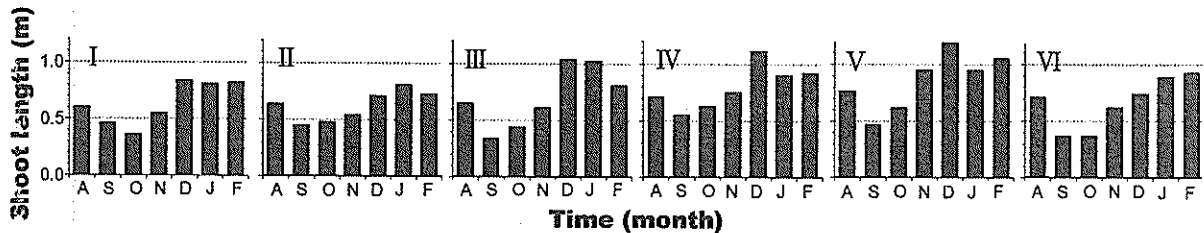


図-11 ブロック毎における葉条長の年変動(2004.8-2005.2)

表-3 移植から1年後における株密度変化率

I	II	III	IV	V	VI	Average
1.31	1.53	1.19	2.33	0.43	0.65	1.30

光が当たる場合は1, 当たらない場合は0となる), x , y , z : 水槽を基準とした局所座標系である。

計算結果を図-9(a)から図-9(f)に示す。図-9(a)は一年間を通じた直射日光の到達時間割合, 図-9(b)から図-9(e)は季節変化に伴う直射日光の到達時間の変化を示している。図-9(f)は季節ごとの南中高度である。

図-9(a)より, メソコスム実験水槽の泥表面における直射日光の到達時間は, 大きく分けて2つの特徴がある事が分かる。すなわち, 南側に位置するVとVIでは水槽の壁が日陰を作るために到達時間割合が極端に低くなり, 一方で覗き窓側に位置するIVでは, 覗き窓からの太陽光入射の影響を受けており, 覗き窓において到達時間割合が最大値を示し, I, IIへ向かって高い到達時間割合の範囲が舌状に分布している。図-9(b)~図-9(e)および図-9(f)より, 季節変化に伴って南側の壁によってできる影の範囲が大きく変化しており, 水槽内における光環境は季節によって大きく異なる事が明らかとなった。

(3) 株密度・葉条長・花枝率の平面分布

IからVIにおける株密度の変化を図-10に示し, 移植後と1年後における株密度変化を表-3に示す。図-10および表-3より, 水槽の南側に位置するVとVIの株数は1年をかけておおむね減少傾向にある事がわかる。一方で, 覗き窓側に位置するIVの株数は2004年8月から2005年2月にかけて増加傾向にあり, 1年間で株密度は倍以上になっている。このような株密度変化の平面的な傾向の違いは, 図-9(a) - (e)に示した直射日光の到達時間の平面分布の傾向と定性的によく一致しており, 水槽内における株密度変化には光環境が大きな要因となっている

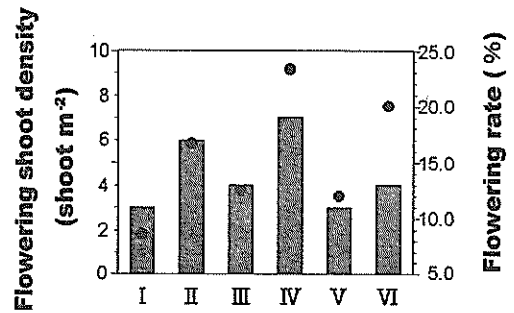


図-12 花枝数と花枝率の分布(棒が花枝数, ●が花枝率)

事が示唆された。一方で, 図-11より, 葉条長の変動には平面的に有意な差は見られない(付録C参照)。また, 図-12より, 花枝率(平均15.5%, 標準偏差5.5%)についてもIVで若干高くなっているが, 差は確認できない。

(4) 考察

寺脇・玉置(2003)は, 透明な円筒形的水槽を用いたアマモ培養実験を行い, 光量を3%もしくは1%カットする事で株数の減少と葉条長の低下が生じ, 30%もしくは10%のカットでは株数, 葉条長ともに変化がなかった事を示している。一方, 本実験では, 直射日光の到達時間割合が低い場所では株密度の低下が見られるものの, 葉条長の変化にはその影響は見られなかった。これらの事実より, アマモにとって光量が不足した場合, まずはじめに株の増加に対して影響が現れる事が示唆される。

4. アマモ生育限界光量に関する検討とアマモ生物量の季節変動についての考察

4.1 アマモ生育限界光量に関する検討

(1) はじめに

植物の生育限界光量の指標として, 補償点光量の概念がよく用いられている。補償点光量とは, 植物の呼吸速

度と均衡するための光合成速度に必要な光量の事であり、短い時間スケールにおいて、植物が生物量を平衡状態に維持できる光量として考える事ができる。

アマモ場についての補償点光量の応用としては、例えば、 H_{comp} (光量が補償点光量を越える1日当りの時間) をアマモの生育限界の指標とした検討がある。Dennison (1987) は Woods Hole, MA (40° 31.5' N; 70° 40.5' W) のアマモ場における光量調査の結果を検討し、アマモの生育限界は H_{comp} が年平均で 12.3hr であるとしている。一方で、補償点光量を直接にアマモの生育限界の指標として用いた研究もある。例えば、Bach (1993) や Zharova et al. (2001) は、アマモ生物量変動解析モデルの中で、水中光量 ($\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$) が補償点光量 (日積算 ($\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$) に単位換算) を下回ると生長速度が 0 になるとしている。また、森田・竹下 (2003) は、全天日射量から推定した水中光量 ($\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$) から補償点光量 (日積算に単位換算) を差し引いた光量を純光合成光量と定義し、アマモ場における純生産を簡易に評価できるとしている。以上のように、補償点光量は、アマモの生育限界を評価する有効なツールとして、様々な形で用いられている。

本節では、メソコスム実験水槽内において見られたアマモ生育の違いを簡易な指標で表現する事を試みる。ただし、長い時間スケールにおけるアマモ生物量の平衡状態を表現するため、補償点光量とは異なり、1日当りの光合成量と消費量の釣り合い状態を意味する日補償点光量を示す。次に、アマモは生長の過程において頻繁に葉を更新し、古くなった葉を脱落させる事から、1日当りの光合成量と呼吸量に加え、葉の脱落量を考慮に入れた釣り合い状態を表す生物量維持光量を示す。これらの指標のアマモ生育限界としての有効性をメソコスム実験水槽における結果と照らし合わせる事で検討する。

(2) 解析方法

アマモ群落に適用可能なアマモ生物量変化式を応用する事で日補償点光量および生物量維持光量を示す。アマモ生物量変化式は、基本として今村ら (2004) のモデルを用いる。また、今回定式化する葉の脱落速度モデルも用いる。

a) アマモ群落における生物量変化式と光合成モデル・呼吸モデル

今村ら (2004) はアマモの生物量変化式を式 (7) のように示している。

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P_{gross} - R_C - D_b + A - D_i \quad (7)$$

ここに、 S : 群落における単位面積当りのアマモ生物量 (gC m^{-2})、 Δt : 1hr、 P_{gross} : 光合成速度 ($\text{gC m}^{-2} \text{hr}^{-1}$)、 R_C : 呼吸速度 ($\text{gC m}^{-2} \text{hr}^{-1}$)、 D_b : 葉の脱落速度 ($\text{gC m}^{-2} \text{hr}^{-1}$)、 A : 加入速度 ($\text{gC m}^{-2} \text{hr}^{-1}$)、 D_i : 死亡速度 ($\text{gC m}^{-2} \text{hr}^{-1}$) である。光合成速度と呼吸速度については式 (8) および式 (9) で示される。

$$P_{gross} = \int_0^z \frac{\Phi_T (KI)^2}{\Psi_T + \Omega_T KI + (KI)^2} dF_z \quad (8)$$

$$R_C = r_{fT} S_f + r_{sT} S_s \quad (9)$$

ここに、 Φ_p 、 Ψ_p 、 Ω_p : 種や葉の性質で決まる光合成係数であり同じ葉でも季節によって変化する係数 (単位はそれぞれ $\text{gC m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 、 $\mu \text{mol}^2 \text{m}^{-4} \text{s}^2$ 、 $\mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 I : 光量 (PAR: $\mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 K : 葉の吸光係数、 F_z : 群落上面から深さ z までの積算葉面積指数 ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)、 r_{fT} : 葉部単位重量あたりの呼吸速度 ($\text{gC gWW}^{-1} \text{hr}^{-1}$)、 r_{sT} : 地下茎部単位重量あたりの呼吸速度 ($\text{gC gWW}^{-1} \text{hr}^{-1}$)、 S_f : アマモ場の葉部重量 (gWW m^{-2})、 S_s : アマモ場の地下茎部重量 (gWW m^{-2}) である。 S 、 S_f 、 S_s の関係は式 (10) で示される。 F_z については、式 (11) で表すことができるものとした。 S_f については、本多ら (2004) が油壺湾のアマモについて示した相対成長式から求めた。 Φ_p 、 Ψ_p 、 Ω_p 、 r_{fT} 、 r_{sT} はそれぞれ、式 (13) から式 (17) で示される。式 (8)、式 (9) および式 (13) から式 (17) については本多 (1995) を参照されたい。

$$S = S_f + S_s = (1-r)S + rS \quad (10)$$

$$dF_z = \frac{S_f}{\rho} \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{length_n} dz \quad (11)$$

$$S_f = D_s \cdot W_{LS} = D_s \cdot \alpha N^\beta (100 \cdot length_b)^Y \quad (12)$$

$$\Phi_T = f(T) \cdot \Phi_{T_0} \quad (13)$$

$$\Psi_T = f(T) \cdot \Psi_{T_0} \quad (14)$$

$$\Omega_T = f(T) \cdot \Omega_{T_0} \quad (15)$$

$$f(T) = \frac{e^{-E_{Ap}/RT}}{1 + e^{(-\Delta H_p^0 + T\Delta S_p^0)/RT}} \left\{ \frac{e^{-E_{Ap}/RT_0}}{1 + e^{(-\Delta H_p^0 + T_0\Delta S_p^0)/RT_0}} \right\}^{-1} \quad (13)-(15)'$$

$$r_{fT} = A_f e^{-E_{Af}/RT} \quad (16)$$

$$r_{sT} = A_s e^{-E_{As}/RT} \quad (17)$$

表-4 解析に用いるパラメータと出展

Parameter	Unit	Model value	Source
K	—	0.4	今村ら (2004)
C	—	0.0	
ρ	gWW m ⁻²	図-13	今村ら (2004)
A_f	gC m ⁻² hr ⁻¹ gDW ⁻¹	486.6	今村ら (2004)
A_s	gC m ⁻² hr ⁻¹ gDW ⁻¹	46.32	今村ら (2004)
E_{Ap}	J mol ⁻¹	61.55	今村ら (2004)
E_{Arf}	kJ mol ⁻¹	34.51	今村ら (2004)
E_{Ars}	kJ mol ⁻¹	32.06	今村ら (2004)
ΔH_p^0	kJ mol ⁻¹	537.1	今村ら (2004)
ΔS_p^0	J mol ⁻¹ K ⁻¹	1772	今村ら (2004)
Pc	day	12.3	Hauxwell (2003)
葉の乾燥重量に 対する炭素含有率 Rc_f	%	35.2	今村ら (2004)
地下茎の乾燥重量に 対する炭素含有率 Rc_s	%	28.1	今村ら (2004)
葉の乾燥歩留まり Rd_f	%	16.75	今村ら (2004)
地下茎の乾燥歩留まり Rd_s	%	$17.0 - 4.4 \sin \frac{M - 0.3}{6} \pi$	今村ら (2004)

表-5 それぞれの光合成係数 (今村ら (2004))

		6月	8月	11月	1,2月
T_0	°C	20.1	27.9	17.2	9.9
	K	293.3	301.1	290.4	283.1
Φ_{T_0}	gC m ⁻² hr ⁻¹	0.2638	0.3736	0.3196	0.1884
Ψ_{T_0}	μ mol ² m ⁴ s ⁻²	287.5	69.43	357.6	278.0
Ω_{T_0}	μ mol m ² s ⁻¹	30.79	71.60	38.71	35.75

ここに、 r : アマモの葉部重量と地下茎部重量の合計に対する地下茎部重量の割合 (現存量における比率であり、後述の生産力の配分比率とは異なる)、 ρ : 単位葉面積あたりの重量 (gWW m⁻²)、 $length_n$: n 葉齢の葉の葉条長 (m)、 c_n : アマモ 1 株に対する n 葉齢の葉の光合成寄与に関する係数、 Ds : 株密度 (shoot m⁻²)、 W_{LS} : 1 株当りの葉部重量 (gWW shoot⁻¹)、 α 、 β 、 γ : 比例係数でそれぞれ 3.15×10^{-3} 、1.15、1.31、 Φ_{T_0} 、 Ψ_{T_0} 、 Ω_{T_0} : 基準となる光合成係数、 T : 水温 (絶対温度 K)、 T_0 : 基準となる水温、 z : アマモ群落の上面からの深さ、 R : 気体定数 (8.315 J mol⁻¹ K⁻¹)、 E_{Ap} : 光合成速度に関わる活性化エネルギー (J mol⁻¹)、 E_{Arf} : 葉部の呼吸速度に関わる活性化エネルギー (J mol⁻¹)、 E_{Ars} : 地下茎部の呼吸速度に関わる活性化エネルギー (J mol⁻¹)、 ΔH_p^0 : 酸化還元酵素の変性に伴う標準エンタルピー変化 (J mol⁻¹)、 ΔS_p^0 : 酸化還元酵素の変性に伴う標準エントロピー変

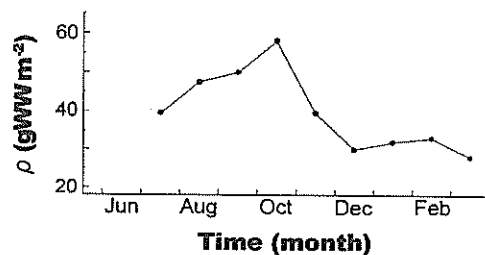


図-13 単位葉面積あたりの重量 (今村ら (2004))

化 (J mol⁻¹ K⁻¹)、 A_f : 葉部単位乾燥重量あたりの呼吸係数 (gC m⁻² hr⁻¹ gDW⁻¹)、 A_s : 茎部単位乾燥重量あたりの呼吸係数 (gC m⁻² hr⁻¹ gDW⁻¹) である。

b) 葉の脱落速度の定式化

葉の脱落速度は、式 (7) において 1 株についての生物量平衡状態を仮定した場合、式 (18) のように表現する事ができる。

$$0 = P_{gross} - R_C - D_b$$

$$0 = P_{net} - \dot{D}_b$$

$$D_b = P_{net} \tag{18}$$

この状態は、1 株における葉の新旧生え替わりが釣り合った状態を示している。ここで、新しい葉は常に一定の葉間期で生えるものと仮定すると、葉の脱落速度も式 (18) より一定の葉間期に反比例すると考えられ、式 (19) の

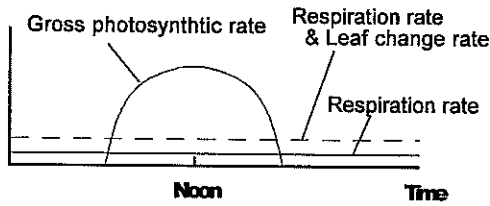


図-14 解析モデルの概念図

ように定式化できる。

$$D_b = P_{net} = Cb_N / Pc \quad (19)$$

ここに、 P_{net} : 純生産速度 ($gC m^2 hr^{-1}$), Cb_N : N葉齢の葉の炭素重量 ($gC m^2$), Pc : 葉間期 (hr) である。

c) 日補償点光量と生物量維持光量の計算方法

日補償点光量と生物量維持光量は、式 (20) および式 (21) の釣合い関係式で求める事ができる。ただし、光量の時間分布と鉛直分布については式 (22) で定義した。式 (23) より群落上面における日補償点光量もしくは生物量維持光量を計算できる。

$$g_e(I, T) = \int_{day} \{P_{gross}(I(t, z, F_z), T) - R_C(T)\} dt = 0 \quad (20)$$

$$g_e(I, T) = \int_{day} \{P_{gross}(I(t, z, F_z), T) - R_C(T) - D_b\} dt = 0 \quad (21)$$

$$I = I_0 \cdot \frac{\theta(t)}{\theta_{max}} \cdot e^{-C \cdot z - K \cdot F_z} \quad (22)$$

$$I_{lim} = \int_{day} I_0 \cdot \frac{\theta(t)}{\theta_{max}} dt \quad (23)$$

ここに、 I_{lim} : 日補償点光量もしくは生物量維持光量 ($mol m^2 day^{-1}$), I_0 : 南中時 (正午) における群落上面の光量 ($\mu mol m^2 s^{-1}$), C : 消散係数である。各パラメータは表-4, 表-5, 図-13の通りである。ただし、Nは5とし、 c_n についてはn=1-4は1/4, n=5は0とした。また、rは0.5と仮定した。解析モデルの概念図を図-14に示す。

(3) 解析結果

メソコスム実験水槽を想定したアマモ生物量における日補償点光量と生物量維持光量の計算結果と表-2に示した日積算PAR (obs) のうち2004年12月と2005年1月の結果とを図-15に示す。ただし、計算結果は光合成係数が求められている1・2月, 6月, 8月, 11月において、 T_0 から5℃の幅の範囲について示した。また、参考としてDennison (1987) の補償点光量とMarsh et al. (1986) の補償点光量 (森田・竹下 (2003) によって得られた近似解) も示す。ただし、単位は日積算PARに換算した。

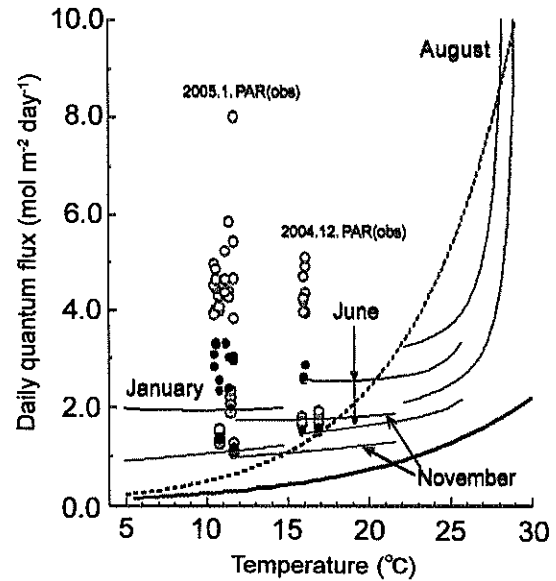


図-15 日補償点光量と生物量維持光量の計算結果

- 生物量維持光量, — 日補償点光量
- Marsh et al. (1986), Dennison (1987)
- I - IVにおける PAR (obs)
- V・VIにおける PAR (obs)

表-6 2004年10月から2005年2月における株密度変化

I	II	III	IV	V	VI
1.42	1.77	1.43	1.59	1.30	1.06

この2つの補償点光量は光合成速度と呼吸速度の釣合いを示した補償点光量であるが、それぞれBach (1993), 森田・竹下 (2003) によって日積算PARとして用いられている。表-6には、I - VIにおける2004年10月から2005年2月の株密度変化を示す。

図-15と表-6より、Dennison (1987) とMarsh et al. (1986) の補償点光量に比べて日補償点光量および生物量維持光量はメソコスム実験水槽におけるアマモの生育をよく表現している。2004年10月から2005年2月にかけての株密度変化が小さいV - IVにおいては、PAR (obs) は曇天時に1-2 $mol m^2 day^{-1}$ 程度で分布し、晴天時でもせいぜい2-3 $mol m^2 day^{-1}$ 程度で分布している。また、PAR (obs) は常に生物量維持光量の近傍で分布している事から、V - VIにおける生物量変化は小さい事が表現できていると考えられる。一方で、2004年10月から2005年2月にかけての株密度変化が大きいI - IVにおいては、曇天時のPAR (obs) はV - IVと同様の傾向を示すものの、晴天時には生物量維持光量より2 $mol m^2 day^{-1}$ 程度 (日補償点光量より3 $mol m^2 day^{-1}$ 程度) 以上大きい4-6 $mol m^2 day^{-1}$ に分布している。これより、I - IVでは十分な光量が供給されている事が表現できていると考えられる。

(4) 考察

アマモの株数は、3.3で示した通り、IVでは2004年8月から翌年2月にかけて著しい増加が起こり、I-IIIでも10月から翌年2月にかけて増加した。また、図-5で示した生活史からも2004年10月から翌年2月にかけて分枝期・発芽期である事が分かる。すなわち、アマモ場が生長するためには、この時期が生物量を増やすために重要な時期であり、光環境がアマモ場にとって好適に保たなければならない。本節で示した日補償点光量と生物量維持光量は、特にこの時期において、生育限界光量としての表現性が高い事がメソコスム実験水槽における調査結果より示された。また、メソコスム実験水槽における結果だけでなく、川端(1996)が示す秋から冬におけるアマモ場造成のための必要光量(1.5mol m⁻² day⁻¹)とも概ね一致しており、結果として川端が示した値を理論的に考察できたものと考えられる。

日補償点光量と生物量維持光量の比較について、以上の考察からは議論する事はできないものの、生物量維持光量の方が葉の脱落量を考慮に入れている点において合理的であり表現性が高いものと判断できる。

4.2 解析モデルを用いたメソコスム実験水槽におけるアマモ生物量変動の考察

(1) はじめに

既に示した通り、メソコスム実験水槽における光環境分布はアマモの株密度変化に影響を及ぼしていると考えられる。ここでは、アマモ移植後の2004年5月から2005年2月についてアマモ生物量変化解析を行い、メソコスム実験水槽における生物量変化の考察を行う。

(2) 解析方法

解析には、既に示した式(7)～式(19)を用いる。ただし、式(19)は、式(24)より近似的に求める。biomass₃は3葉齢の葉の湿重量であり、先に示した相対成長式を用い、式(25)で求める。

$$\begin{aligned}
 D_b &= \frac{Cb_N}{Pc} \\
 &\cong Cb_3 \frac{length_5}{length_3} \frac{1}{Pc} \\
 &\cong biomass_3 \frac{Rd_f}{100} \frac{Rc_f}{100} \frac{length_3 (t_{year} - (N-3) \cdot Pc / 24)}{length_3 (t_{year}) \cdot Pc}
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$biomass_3 = \alpha \cdot \{ (N-2)^\beta - (N-3)^\beta \} \cdot (100 length_3)^\gamma \tag{25}$$

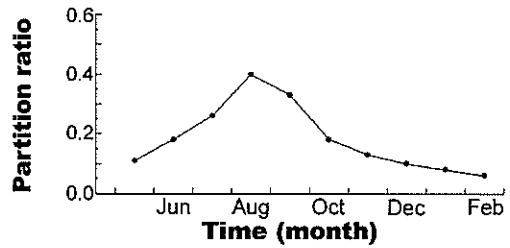
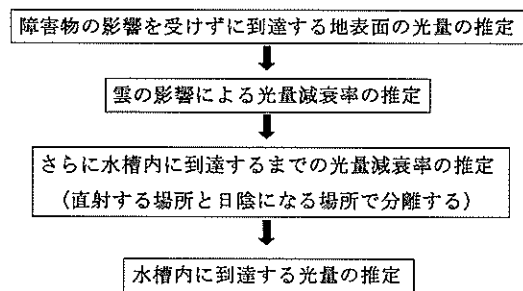


図-16 総生産力に対する地下茎部への配分比率 (本多ら(2004))

(a) フロー図



(b) 概念図

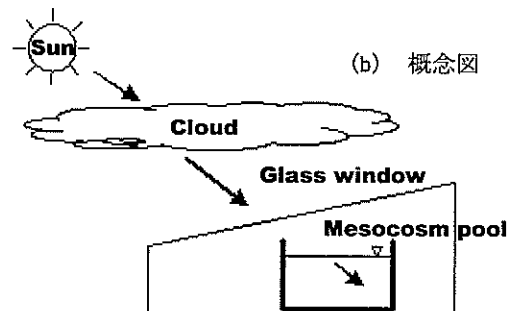


図-17(a), (b) メソコスム実験水槽に入射する光量の推定フロー図と概念図

(3) 解析条件

本解析では、光量と水温のみが解析条件として与えられる。ただし、栄養塩などの他の因子は無視できるものとした。水温は日変動を考慮に入れず、図-6の測定値を与えた。欠測値については前後のデータより線形補間で求めた。光量については後述する推定値を与える。光合成による生産は、総生産力に対する地下茎部への生産力の配分比率(図-16, 本多ら(2004))より、葉部・地下茎部へ分配した。

(4) 水槽内における光量の推定

水槽内における光量推定方法のフローを図-17に示す。

a) 地表面に到達する光量の推定方法

地表面に到達する光量は式(26)で表される。地上部における光量の測定値を参考に、I_Dを2000 μmol m⁻² s⁻¹とした。晴天時の南中高度における光量の観測値と推定値の比較を図-18に示す。これより、再現性は高いと判

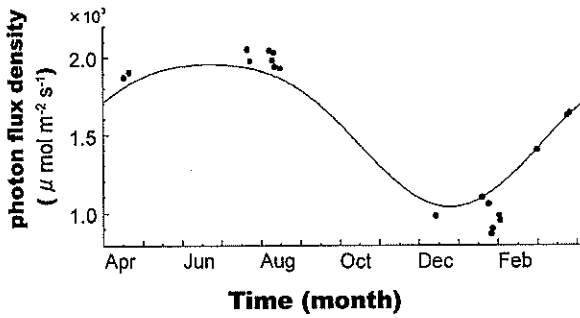


図-18 晴天時の南中高度における光量の再現結果

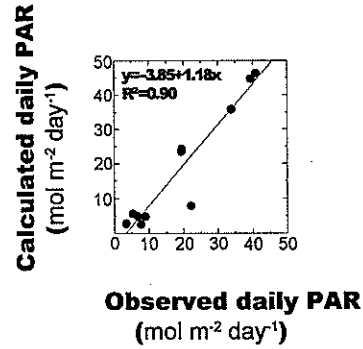


図-19 LACE屋上における光量の再現結果

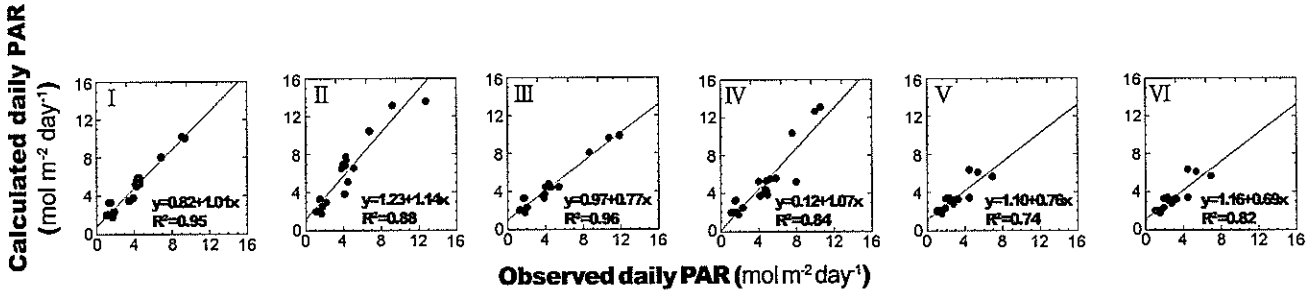


図-20 水槽内における光量の再現結果

断した。

$$I_H = I_D \sin \theta \quad (26)$$

b) 雲の影響による光量減衰率の推定

雲の影響を受けた後の光量は、気象庁が発表している日照時間(時間毎に10段階で表した指標:気象統計情報, 気象観測(電子閲覧室))を用いて式(27)で表す。表-2の期間にLACEの屋上で測定した日積算PAR(obs)との比較を図-19に示す。ここでも、観測値をおおむね再現できていると判断できる。

$$I_A = I_H (0.1 + 0.9R_{cr}) \quad (27)$$

ここに、 R_{cr} :気象庁発表の日照時間であり、0.0から1.0までの0.1刻みの指標である。

c) 水槽内に到達するまでの光量減衰率の推定

雲の影響を受けて減衰した光量は、水槽までに到達する第一段階として、水槽を覆うガラス窓によって反射・減衰される。次に水面において反射・減衰され、更に屈折して入射してアマモに到達する。ここでは、これら一連の反射・減衰の過程を簡単に一つの減衰率で表現できるものとし、式(28)で表す。水槽壁の影響を受けない場合は式(28)よりアマモに直接入射する光量を求める。

$$I_W = I_D \sin \theta (0.1 + 0.9R_{cr}) R_w \quad (28)$$

ここに、 R_w :雲の影響を受けた後、ガラスと水面によって反射・減衰されてアマモに到達するまでの光の減衰率

であり、0.7とした。

次に、水槽壁による光の遮蔽効果を考える。3.3において考察した通り、曇天時は散乱光の入射のみであると考えられる事から、水槽壁による光の遮蔽効果の係数は R_{cr} に乗すればよいものと考えられる。水槽壁の影響を受ける場所では式(29)で光量を求められるものとする。

$$I_W = I_D \sin \theta (0.1 + 0.9R_{wall} \cdot R_{cr}) R_w \quad (29)$$

ここに、 R_{wall} :壁による直射光・反射光の遮蔽率であり、0.079(壁の影響を受けない場合は1.0)とした。表-2の期間の水槽内における日積算PAR(obs)と推定値との比較を図-20に示す。これより、III、V、VIの推定結果はやや劣るものの、概ね再現できている事から、以上の推定方法を用いて解析を行う。

(5) アマモの葉に付着する藻類による光減衰の影響

メソコスム実験水槽の本格運転開始後間もなく、アマモの葉は大量の付着藻に覆われた。原因は、葉上動物の加入よりも早く藻類がメソコスムへ加入したためであると考えられる。藻類は、写真-3に示すように、5月中旬は大量に付着した。その後、夏までに徐々に付着藻は解消された。

光は、水面上から浮遊物を含んだ海水を介して、アマモ近傍までPLW(Percent Light through the Water)と呼ばれる透過率で到達する。水面上から付着藻類を介したアマモまでの透過率はPLL(Percent Light at the Leaf)と呼ばれている(Kemp et al. (2004))。PLLは付着藻類の



写真-3 アマモの葉に付着する藻類 (5月10日)
花枝は伸長が早いので、花枝には付着藻は確認できないが、周りの草体には大量の付着藻類 (茶色に見える) が確認できる。

生物量によって指数関数的に低下するとされている。本解析においても付着藻を考慮に入れ、 PLL/PLW を先に示した光量推定式に乗ずる必要がある。しかし、今回は付着藻類の生物量を測定していないため、付着藻類の影響期間は写真から判断し、その程度については trial and error で求めた。解析に用いる PLL/PLW を図-21 に示す。

(6) 解析結果および考察

PLL/PLW を含むケースと含まないケースで解析した結果を図-22 (a)-(d) に示す。また、水槽覗き窓からの太陽光の入射の影響について検討するため、覗き窓があるケースとないと仮定したケースで解析した。その結果を図-23 (a), (b) に示す。

a) 伸長期 (-7月) における葉部生物量変動

この時期は、北半球において光量が大きくなる事 (図-18) から、アマモに限らず植物の生長時期であり、 PLL/PLW を考慮に入れない解析結果においても急激に葉部生物量が増加している事が分る。しかし、観測結果ではほとんど変化が観られなかった。この原因は、先に示した通り、本格運転開始後に急激に加入した付着藻の影響であったり、移植の後遺症 (生産力が地下茎の修復に使用されたため) であつたりするものと考えられる。一方、 PLL/PLW を考慮に入れることで、解析結果は概ね観測結果を説明する事ができた。

b) 衰退期 (7月-10月) における葉部生物量変動

衰退期については、よく再現できている。この時期は、水温上昇 (図-7) による呼吸量の増加が主な原因であると考えられるが、その他、総生産力の地下茎部への配分比率上昇 (図-16) や葉部重量あたりの葉面積低下 (図-13 の逆数) も葉部重量の衰退を再現できた要因となつてい

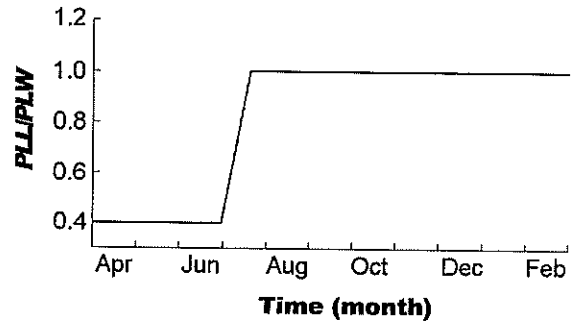


図-21 付着藻類を介した PLL

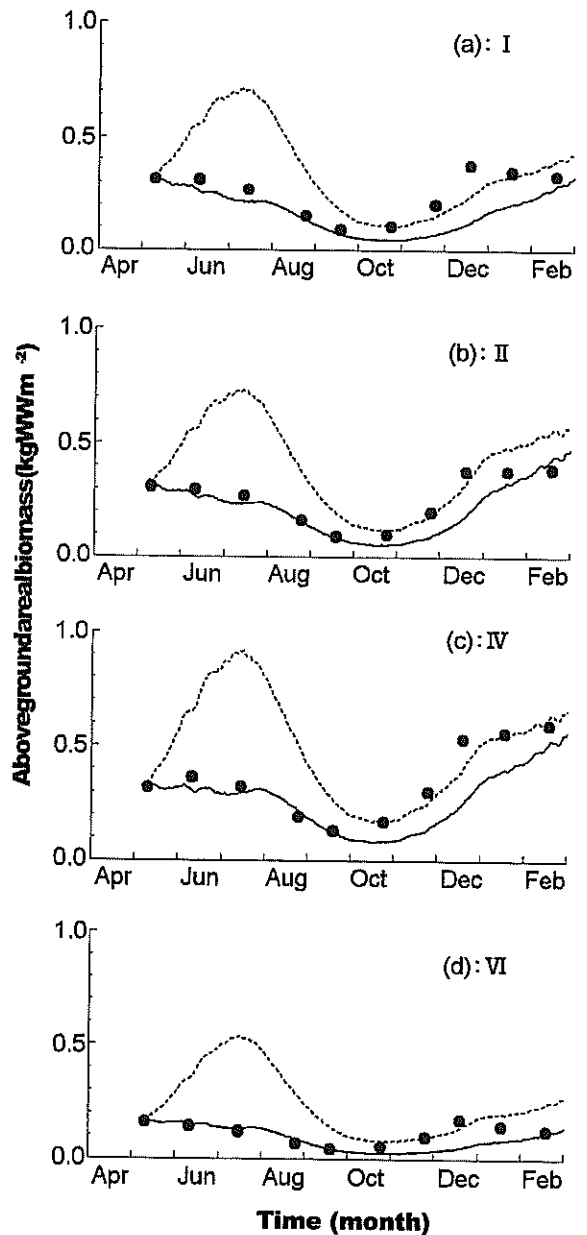


図-22 (a)-(d) 解析結果 (アマモ葉部の生物量変動)
— PLL/PLW を考慮に入れた解析結果
--- PLL/PLW を考慮に入れない解析結果
● 観測結果

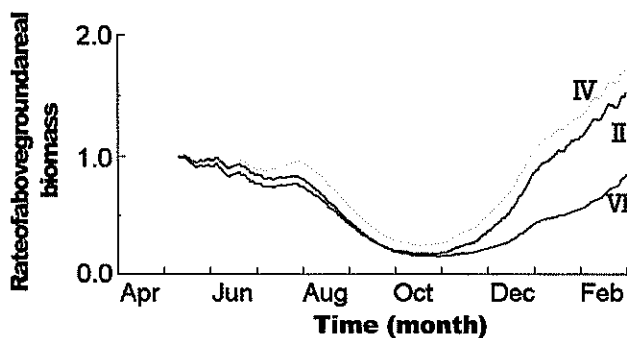


図-23(a) 葉部生物量変動率（覗き窓からの太陽光入射あり）

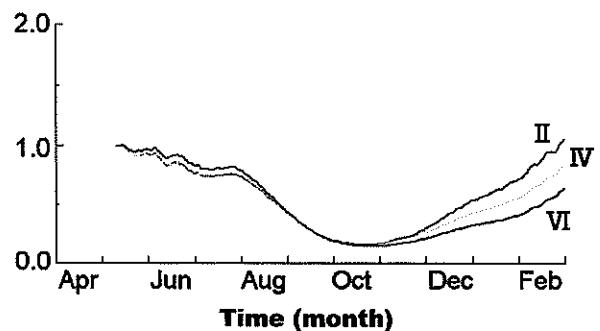


図-23(b) 葉部生物量変動率（覗き窓からの太陽光入射なし）

る。ここに、衰退期における総生産力の地下茎部への配分比率の上昇の原因は、地下茎部の生産力に対して、葉部生産力が衰退した事による（本多ら（2004））。一方、葉部重量あたりの葉面積低下の理由については、明らかではない。今回の調査では、これらのパラメータについての測定は行っておらず、検証する事はできない。

c) 分枝期・発芽期（10月-）における葉部生物量変動

この時期における葉部生物量増加の要因は、衰退期と全く逆の現象によるものである。

d) 覗き窓からの太陽光入射の影響

図-23(b)より、覗き窓からの太陽光入射がない場合はIIの葉部生物量変動率が他のブロックに比べて高くなっている事が分かる。ここで、覗き窓からの太陽光入射の影響が加わると（図-23(a)）、IVの葉部生物量変動率はIIに対して大きくなる。これは、3.3で示したIVにおける株密度の増加をよく説明している。

e) 葉の脱落速度に関する考察

本研究では葉の脱落速度は葉間期に比例するものと仮定し、かつ葉間期は常に一定であると仮定した。しかし、Dennison & Alberte (1985) は、Woods Hole, MA (40° 31.5' N; 70° 40.5' W)における現地調査より、 H_{sat} （光量が飽和光量を越える1日当りの時間）が短くなれば葉の形成速度（葉間期の事）は遅くなる事を明らかにしている。この事実を考慮に入れて葉の脱落速度モデルを再構築すれば、推定精度の更なる向上が期待できると思われる。

f) 解析の応用性に関する考察

本研究に用いたパラメータは、ほとんどが今村ら（2004）、本多ら（2004）による神奈川県三浦市油壺湾に生息するアマモ場についての調査結果、もしくは室内実験結果を用いた。一方、メソコスム実験水槽（港湾空港技術研究所内：横須賀市）および実験水槽のアマモの採取場所は、同県横須賀市走水海岸である。これらはすべ

て、ほぼ同緯度に位置しており、アマモの生育環境に大きな違いはないものと考えられる。よって、本研究における解析では、主に今村ら（2004）や本多ら（2004）によって得られたパラメータを用いても問題ないと考えた。しかし、解析対象とする場所とパラメータが得られた場所がアマモの生育環境条件において大きく異なる場合は、十分に注意して解析する必要がある。すなわち、アマモに限らず植物もしくは生物は、その生育環境のレベルもしくは年変動に対応した体内リズム（ここでは解析対象とした時間スケールからサーカニユアリズムが適当）を有していると考えられる事から、生育環境を理解した上で解析を行わなければ、実現象と全く異なった解を得る結果になると予想されるため、十分な注意が必要である。

5. おわりに

本研究によって以下の事が明らかになった。

- ①アマモ場を想定したメソコスム実験水槽において約1年間の調査を行ったところ、水温が高くなる夏季に葉条長が短くなり、秋から冬にかけて水槽内の全株数が増加した。株密度は、太陽光が入射しやすい覗き窓近くで秋から冬にかけて株密度が急激に増加し、水槽壁の影になりやすい部分ではあまり変化が見られなかった。
- ②アマモ場の生育限界光量の指標として、葉の脱落速度の効果を考慮に入れた生物量維持光量を提案し、その有効性について、メソコスム実験水槽における調査結果ならびに既往の文献を参考に検証を行った。この結果、生物量維持光量は、特に、秋から冬にかけてのアマモの生育限界光量として有効な指標となる事を示した。
- ③アマモ生物量変化式を用いて、メソコスム実験水槽におけるアマモの葉部生物量変動について再現計算を行

った。この結果、アマモの葉に付着する藻類の影響を示す透過率(PLL/PLW)を考慮に入れることで良好な再現結果を得た。

(2005年5月13日受付)

謝辞

本研究の遂行にあたり(財)電力中央研究所の本多正樹氏、今村正裕氏、(株)東京久栄の森田健二氏ならびに(独)水産総合研究センターの寺脇利信氏から貴重なご意見を頂いた。また、東京工業大学大学院の阿部尚人氏からは貴重な資料を提供して頂いた。メソコスム実験水槽における調査にあたっては、旧沿岸生態研究室(現沿岸環境領域)の諸氏に多大なるご尽力を頂いた。研究のまとめにあたっては、内村真之特別研究員から助言を頂いた。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 今村正裕・本多正樹・松梨史郎・川崎保夫(2004):アマモ場生態系モデルの構築とその適用, 電力中央研究所報告U03063, 22p.
- 海の自然再生ワーキンググループ(2003):海の自然再生ハンドブック-その計画・技術・実践-第3巻藻場編, 国土交通省監修, ぎょうせい, 110p.
- 川端豊喜(1996):生物機能による環境修復-水産におけるBioremediationは可能か-, 日本水産学会監修, 恒星社厚生閣, pp.79-93.
- 川崎保夫(1987):アマモへの温度の影響Ⅲ, 昇温によるライフサイクルの変化, 電力中央研究所報告U87046, 24p.
- 川崎保夫・飯塚貞二・後藤弘・寺脇利信・渡辺康憲・菊池弘太郎(1988):アマモ場造成法に関する研究, 電力中央研究所報告U14, 231p.
- 桑江朝比呂・細川恭史・古川恵太・三好英一・木部英治・江口菜穂子(1997):干潟実験施設における底生生物群集の動態, 港湾技術研究所報告, 第36巻, 第3号, pp.3-35.
- 桑江朝比呂(2005):造成された干潟生態系の発達過程と自立安定性, 土木学会論文集, No.790/VII-35, pp.25-34.
- 西條八束・坂本充(1993):メソコスム湖沼生態系の解析, 名古屋大学出版会, 346p.
- 島谷学・中瀬浩太・岩本裕之・中山哲蔵・月館真理雄・星野高士・内山雄介・灘岡和夫(2002):興津海岸におけるアマモ分布条件について, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1161-1165.
- 寺脇利信・玉置仁(2003):お掃除フリーの海藻栽培水槽の試み, 5.海草アマモの生育, 海苔と海藻, No.65, pp.23-27.
- 電力中央研究所(1984):電源立地点の藻場造成技術の開発第1報アマモの移植適期について, 電力中央研究所報告U484011, 23p.
- 細川恭史・桑江朝比呂・三好英一・室善一朗(1996):干潟実験施設を用いた物質収支観測, 港湾技術研究所資料, No.832, 22p.
- 本多正樹(1995):遷移確率に基づく光合成速度モデルの開発-光・温度-光合成速度モデルの誘導と藻類を用いた検証-, 電力中央研究所報告U95021, 16p.
- 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, 11p.
- 森田健二・竹下彰(2003):アマモ場分布限界水深の予測評価手法, 土木学会論文集, No.741/VII-28, pp.39-48.
- 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, Vol.65, pp.31-50.
- Dennison, W. C., Alberte, R. S.(1985): Role of daily light period in the depth distribution of *Zostera marina* (eelgrass), Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.25, pp.51-61.
- Dennison, W. C.(1987): Effect of light on seagrass photosynthesis, growth and depth distribution, Aquatic Botany, Vol.25, pp.15-26.
- Francois, R., Short, F. T., Weber, J. H.(1989): Accumulation and persistence of tributyltin in eelgrass (*Zostera marina* L.), Environmental Science Technology, Vol.23, pp.191-196.
- Hauxwell, J., Cebrian, J., Valiela, I.(2003): Eelgrass *Zostera marina* loss in temperate estuaries: relationship to land-derived nitrogen loads and effect of light limitation imposed by algae, Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.245, pp.59-73.
- Kemp, W. M., Batiuk, R., Bartleson, R., Bergstrom, R., Carter, V., Gallegos, L., Hunley, W., Karrh, L., Koch, E. W., Landwehr, J. M., Moore, K. A., Murray, L., Naylor, M., Rybicki, N. B., Stevenson, J. C., Wilcox, D. J.(2004): Habitat requirements for submerged aquatic vegetation in Chesapeake Bay: water quality, light regime, and physical-chemical factors, Estuaries, Vol.27, No.3, pp.135-150.
- Marsh, J. A., Dennison, W. C., Alberte, R. S.(1986): Effects

of temperature on photosynthesis and respiration in eelgrass (*Zostera marina* L.), J. Exp. Mar. Biol. Ecol., Vol.101, pp.257-267.

Williams, T. P., Bubb, J. M., Lester, J. N.(1994): Metal accumulation within salt marsh environments: a review, Marine Pollution Bulletin, Vol.28, No.5, pp.277-290.

Zharova, N., Sfriso, A., Voinov, A., Pavoni, B.(2001): A simulation model for the annual fluctuation of *Zostera marina* biomass in the Venice lagoon, Aquatic Botany, Vol.70, pp.135-150.

付録A LACE 紹介

付録 A.1 港空研におけるLACE整備までの経緯

(1) 背景

沿岸域は陸域の影響を受けやすいため、沿岸域の底泥には多くの有害な化学物質が蓄積する傾向にある。特に港湾域は、様々な有害化学物質の発生源が周囲にあり静穏で閉鎖的な水域であることから、有害化学物質を底泥に蓄積しやすい特徴を有しており、深刻な汚染が懸念されている。例えば、底泥においてダイオキシン類が150pgTEQ g⁻¹を超えれば、何らかの処理を行う必要があるとダイオキシン類に関する環境基準において示されているが、すでにいくつかの港湾域において基準を超える場所が報告されている。また、港湾域特有の有害化学物質として、かつて船底塗料として広く使われた有機スズがある。TBT(トリブチルスズ)をはじめとする有機スズは、巻貝などに対していわゆるインボセックスなどの障害があることが科学的につきとめられている。しかしながら、陸水に比較して沿岸域における有害化学物質汚染の実態は必ずしも明らかではなく、ましてや生態系やヒトに及ぼす影響の評価も定まっていない。

以上の問題も含め、沿岸域における有害な化学物質については早急に解決しなければならない課題が山積みである。この課題についてまとめると、以下の4点が挙げられる。

- ・沿岸域における有害化学物質汚染の実態は未解明な部分が多く、化学物質の蓄積メカニズムを解明する必要がある。
- ・廃棄物の海洋投棄に関するロンドン条約の96年議定書発効に伴い、浚渫土砂について一般廃棄物と同様の安全性の判定基準が求められる。また、生物試験法を用いた検定法の開発が求められる。
- ・有害化学物質の底泥から生態系への取り込み過程のメ

カニズムや生態系に及ぼす影響が未解明である。加えて、微量でも世代を超えた長期的な毒性を有する環境ホルモンの沿岸生態系もしくはヒトに対するリスクについて不明確である。

- ・環境基準を超えた底泥の安全な処理・処分の詳細な方法が解決されていない。

これらの課題解決を主要な目的として、沿岸域の底泥に含まれる有害化学物質の問題を総合的に取り扱う事が可能な研究施設としてLACEが2003年に整備された。

(2) 研究の方向性

施設整備当初から研究項目を以下の3つに大別して研究を行っている。

- a) 内湾域底泥における有害化学物質汚染の実態把握
- b) 有害化学物質の分布と輸送に関するモデル化及び将来予測
- c) 食物連鎖を通じた生物への化学物質移行過程及び生態影響の評価

付録 A.2 LACEが有する機能の詳細

LACEの各階平面図を図-Aに示し、以下に各部屋の名前を示す。各部屋の機能等、特記事項については各項目の下段に記す。

【2階】

- ①データ解析室
- ②実験施設管理室
- ③化学実験室

ドラフトチャンバーおよびクリーンベンチを備えており、化学分析の前処理や化学実験を行う事ができる。また、各種分析装置を備えており、海水・底泥・生物について様々な分析が可能である。主な分析装置は、以下の通りである。

- ・水銀計測装置
(日本インスツルメンツ社 マーキュリー/SP-3D)
- ・栄養塩測定装置(BRAN LUEBBE社 TRAACS 800)
- ・全有機炭素分析装置(島津製作所 TOC-5000A)
- ・微量全窒素分析装置(三菱化学 TN-100)
- ・分光光度計(島津製作所 UV-2450)
- ・粒度粒径測定装置
(BECKMAN COULTER社 MALTISIZER TM3)

など

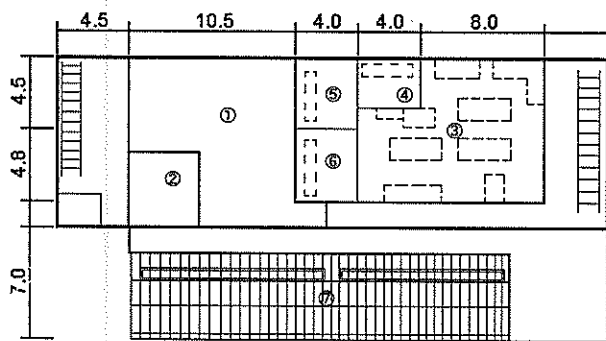
④薬品計量室

薬品について管理または計量を行う。

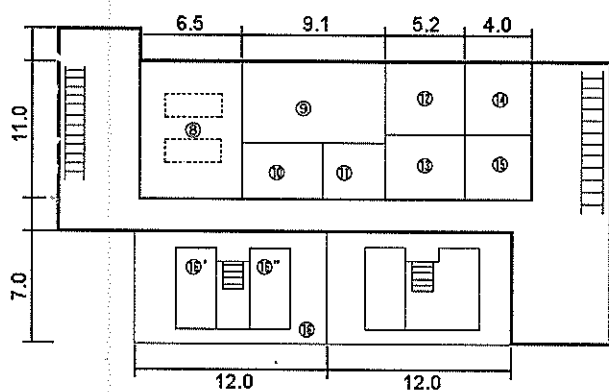
⑤元素分析室

元素分析室では、環境中に含まれる有機スズ化合物などの超微量な有機金属化合物を測定する事が可能なGC/

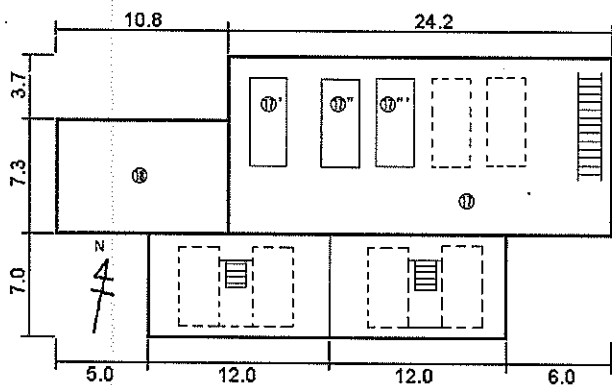
Unit:m



(a) 2階 (化学実験室, データ解析室等)



(b) 1階 (水槽室, 制御室, 生物実験室等)



(c) 地下室 (貯水槽, 濾過槽)

図-A(a)-(c) LACE内の各階平面図

ICP-MS (写真-A.1, GC: Agilent社 6890N, ICP-MS: Agilent社 7500シリーズ) を備えている。

GC/ICP-MSを用いると, 同一のサンプルから一度にトリブチルスズ, ジブチルスズ, モノブチルスズなどの有機スズ化合物濃度を測定することができる。また, ICP-MSのみの使用により, 同一のサンプルから一度に数十項目に及ぶ無機及び有機重金属濃度を測定することも可能である。堆積物や海水・生物試料についてこれらの分

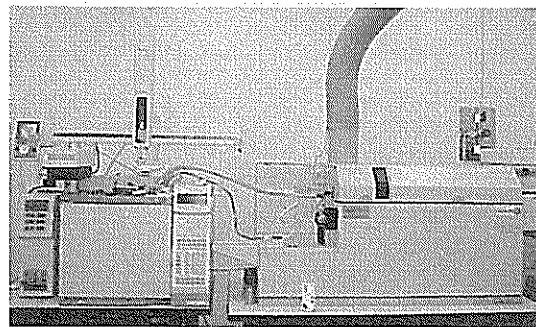


写真-A.1 超微量元素分析装置 (GC/ICP-MS)

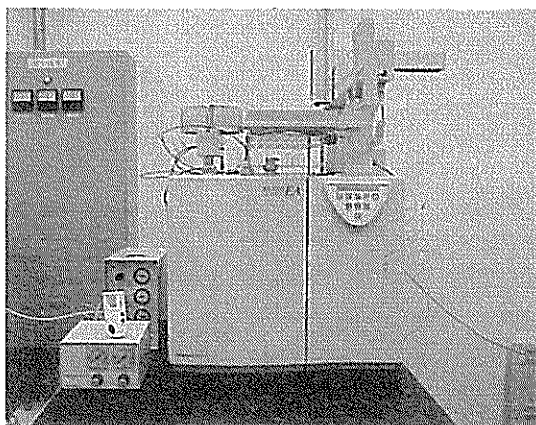


写真-A.2 安定同位体分析装置

析を行い, 底泥中の物質が物理的な作用や生物による摂取を経て, 環境中に移行する過程を調べる予定である。

⑥同位体分析室

安定同位体分析装置 (写真-A.2) は元素分析装置 (Thermo Electron社 FLASH EA1112), インターフェース (Thermo Electron社 ConFlo III), 質量測定装置 (Thermo Electron社 DELTA plus Advantage) から構成されており, 安定同位体を含む元素について定量分析を行う事ができる。

堆積物中に含まれる有害化学物質および内分泌攪乱化学物質は, 食物連鎖を経るうちに濃縮されながら最終的には高次の捕食者 (例えば, 鳥, 大型肉食魚, 人間) に集積すると考えられるが, その詳細なプロセスは未解明である。食物連鎖を解析する手法として, 近年, 生物体内中の窒素や炭素の安定同位体比から捕食・被食関係を定量的に解析する方法が注目されている。例えば, ある動物体内の窒素安定同位体 (^{15}N) 濃度は, その餌中の同位体濃度よりも平均3パーミル程度高濃度になり (重い元素ほど蓄積されやすい), 結果として栄養段階が高い生物ほど高濃度になる事を利用するものである。この原理を用いれば, 様々な生物サンプル中の炭素・窒素の安定同位体比から, 食物連鎖の詳細なつながりが解明できる

ことになる。同一のサンプルに対して、有害化学物質と安定同位体比を同時に分析することにより、有害化学物質の生物濃縮効果の特性を検討することができ、将来の有害化学物質の管理基準を考える際に極めて有用な情報を与えるものと期待される。

⑦メソコスム実験水槽室天窓

【1階】

⑧生物実験室

メソコスム実験水槽室に隣接して設けられており、実験水槽から得られたサンプルを速やかに処理できる。また、現地調査より得られたサンプルの仕分けや分類などの作業も行う。

⑨資材室（資料室）

⑩集中制御室

メソコスム実験水槽および貯水槽への海水の給排水システムを集中管理しており、実験水槽の稼働条件や系内への海水導水もしくは系外への海水排水の制御を行う。

⑪電源室

⑫観測機材室1

現地観測用の計測機材を保管している。

⑬観測機材室2

現地観測用の計測機材を保管し、機材やその他の工作を行う事も可能である。

⑭観測準備室

⑮データ収集室

⑯メソコスム実験水槽室

メソコスム実験水槽室には、4基の実験水槽を配置するスペースが用意されており、2005年6月現在では2基のメソコスム実験水槽が稼働している。水槽室は、太陽光を取り入れるためにガラス張りとなっており（写真-1）、蓄熱を避けるため、天窓の開閉ができる構造となっている。

⑯'メソコスム実験水槽（No.1：アマモ水槽）

メソコスム実験水槽（No.2）との連結運転が可能であるが、2005年6月現在では各々の水槽を独立させた単独運転で稼働させている。詳細については付録Bに記す。

⑯"メソコスム実験水槽（No.2：リファレンス水槽）

メソコスム実験水槽（No.1）と同様の運転条件で稼働させている。

【地下室】

⑰地下室

地下室には濾過海水貯水槽1基、各メソコスム実験水槽用貯水槽2基が設置されている。貯水槽は、硬質発泡ウレタン（25mm厚）が内蔵されたパネルの組み立て式構造となっており、外気から断熱されている。それぞれの

貯水槽には、水温調節器（形式：熱交換プレート+ヒートポンプ型）が備えられ、夏季（気温25℃）で20-30℃、冬季（気温10℃）で10-20℃の範囲で水温コントロールする事ができる。また、それぞれの貯水槽に備え付けられたエアレーション装置から高純度窒素ガスもしくは高純度酸素ガスを送り込む事で、海水中DO濃度の調整も可能である。

⑰'濾過海水貯水槽

久里浜湾から取水されて濾過槽を経由した濾過海水は、濾過海水貯水槽へ導水される。濾過海水は、主に、化学実験室もしくは生物実験室において使用される。アマモ移植後の養生の際にも使用した。

濾過槽は、砂濾過装置（濾材：精製珪砂2層、白色珪砂3層の計5層構造）およびフィルター装置（濾材：PP製カートリッジ型フィルタ9本組み）から構成されている。

⑰"メソコスム実験水槽（No.1）用貯水槽

久里浜湾から取水した未処理海水を貯水し、メソコスム実験水槽（No.1）へ供給している。また、循環運転時の海水もここに戻される。

⑰"'メソコスム実験水槽（No.2）用貯水槽

⑰"と同様である。

⑱配管ピット

【配管材】

給排水には塩化ビニル製の配管材を用い、保温材としてグラスウールを使用している。

付録B メソコスム実験水槽についての補足

メソコスム実験水槽は全面FRP製であり、図-A(b)で示した平面配置となっている。水槽内の温度上昇を抑制するため、2基の実験水槽が一对となって地下埋め込み式となっている。水槽の側面には覗き窓を設け（図-2）、側面からの観察を可能としている。写真-3のように水槽内を写真撮影する事もできる。

一对の実験水槽は、図-B.1に示す通り、1つの海水循環システムで制御されている。line-1からline-4のバルブを開閉操作する事で、2基の実験水槽間の海水交換が可能となり、連結型の実験系として稼働する事ができる。それぞれの実験水槽を、例えば干潟・藻場と想定する事で、2つの場の相互作用に着目したメソコスム実験系とする事ができる。2基の実験水槽をそれぞれ独立運転する場合は、line-1からline-4を常時閉めた状態となる。本実験ではそれぞれ独立系として稼働させ、No.1をアマモ水槽、No.2をリファレンス水槽としている。

メソコスム実験水槽では、その特徴を生かすため、生

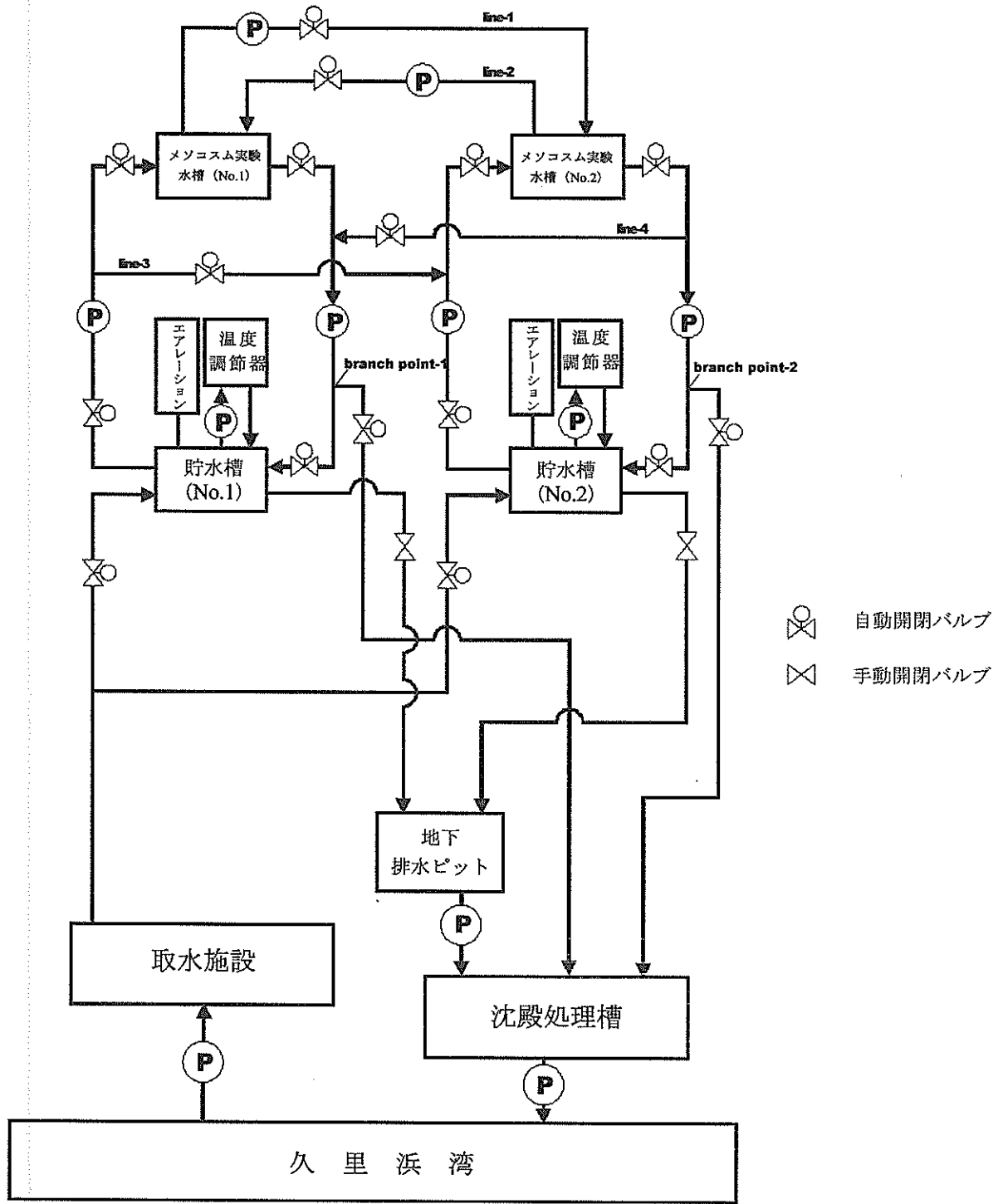


図-B.1 海水循環の配管系統図

Unit : mm

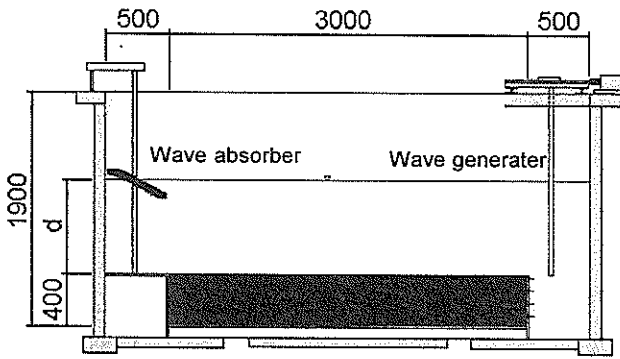


図-B.2 メソコスム実験水槽断面図

物加入に対して十分な配慮をする必要がある。桑江(2005)は、干潟実験施設における干潟メソコスム実験で、マクロベントスや魚類などの大型生物の加入が制限された事から、現場造成干潟に比べて生態系の発達が遅れた事を指摘している。メソコスム実験水槽においても干潟実験施設と同様であり、実験水槽への大型生物の供給は幼生や卵のみに期待せざるを得ない。海水交換率はこれらの供給速度を決定する事から、実験水槽を生態系メソコスムとして発達させる重要な要因となる。メソコスム実験水槽における海水交換率は集中制御により自由に設定可能なシステムとなっており、1潮汐当りの海水交換率は式(B-1)で設定できる。参照として図-B.2にメソコスム実験水槽断面図を示す。

$$\alpha_r = \frac{\alpha_m \cdot S_{meso} \cdot (d_{max} - d_{min})}{V_{meso_{max}} + V_{reserv_{max}}} \quad (B-1)$$

α_r : 海水交換率, α_m : 海水排水率 (branch point-1 および branch point-2 が分岐点となる), S_{meso} : メソコスム実験水槽の表面積 ($8m^2=4m \times 2m$), d_{max} : メソコスム実験水槽の最大水深 (設定自由: 本実験では 1.0m), d_{min} : メソコスム実験水槽の最低水深 (設定自由: 本実験では 0.5m), $V_{meso_{max}}$: メソコスム実験水槽の最大水深時の実験水槽における海水容量 ($8.5m^3$), $V_{reserv_{max}}$: メソコスム実験水槽の最大水深時の貯水槽における海水容量 ($8.1m^3$) である。本実験においては α_m を 1.0 と設定し、1 潮汐当りの海水交換率を 0.24 とした。

実験水槽には造波装置と消波装置が備え付けられている(図-B.2参照)。造波装置はピストン式で、周期0.5-2.0sの範囲で設定する事ができる。造波板を水槽軸方向に変位させる事で波を造る。消波装置はウレタン浮力型で波エネルギーを吸収する。

潮汐は正弦カーブとして制御されており、任意の振幅および周期を与える事ができる。実験水槽に付属してい

表-C 分散分析表

変動要因	平方和	自由度	平均平方	F ₀
季節変動 (A)	43700	6	7283	14.5
ブロック間変動 (B)	9203	5	1841	3.67
交互作用 A × B の変動	6633	30	221.1	0.44
水準内変動	42088	84	501.0	-

るフロート式水位センサーで実験水槽内の水位を監視しながら自動開閉バルブで給排水量を制御している。水位センサー内に生物が加入した場合はフロートに対して障害となり、異常な水位変動を引き起こす原因となるため、水位センサー内は定期的な監視が必要である。

付録C 葉条長季節変動のブロック間の違いによる影響についての検定

葉条長季節変動のブロック間の違いによる影響について、以下のような仮説を立てて検定を行った。2元配置の分散分析手法を用い、F検定を採用した。分散分析表を表-Cに示す。

仮説1: 葉条長の季節変動とブロックの違いには交互作用はない

仮説2: 月毎の葉条長母平均に差はない

仮説3: ブロック間の葉条長母平均に差はない

ここで、有意水準1%とした場合

$$(F_{0'}^A)_{A \times B} = 0.44 \leq F_{(30,84)}(0.01) = 1.96$$

$$(F_{0'}^A) = 14.5 \geq F_{(6,84)}(0.01) = 3.06$$

$$(F_{0'}^B) = 3.67 \geq F_{(5,84)}(0.01) = 3.27$$

以上の結果、仮説1は有意水準1%で棄却されず、葉条長の季節変動とブロック間の違いには交互作用がない事が示された。一方、仮説2および仮説3は棄却され、それぞれの母平均に差がある事が示唆された。ただし、有意水準5%とした場合、

$$(F_{0'}^A) = 14.5 \geq F_{(6,84)}(0.05) = 2.22$$

$$(F_{0'}^B) = 3.67 \leq F_{(5,84)}(0.05) = 2.34$$

となり、仮説2は有意水準5%でも棄却されるものの、仮説3は棄却されない。これより、有意水準5%とすればブロック間の母平均には差がない事が示された。

以上より、メソコスム実験水槽における葉条長の変動は平面的な影響は小さく、季節的な影響を強く受けていると言える。

港湾空港技術研究所資料 No.1108

2005. 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 有限会社つばさ印刷技研

Copyright © (2005) 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。