

## 須藤英雄先生の思い出



平成26年11月18日、須藤英雄先生がお亡くなりになりました。先生は2000年～2007年にかけて日仏海洋学会長を務められ、学会運営に多大の貢献をなされました。また、1999年には先生の長年にわたる「北西太平洋および日本海の深層循環に関する研究」に対して学会賞が授与されています。

このように優れた業績を上げられた先生に、私は東京水産大学（現東京海洋大学海洋科学部）の大学院在学中に直接指導を受け、学位を授けられました。教え子の一人として、先生の思い出を振り返りたいと思います。

私は修士課程では、吉田次郎先生の下で回転水槽を使った深層循環の研究をしていました。そのため、須藤先生とはゼミや講義でお話を伺うことはあっても、直接研究の話をすることはなく、雲の上の人という感じでした。

ところが、ある日の夕方、先生が実験室にひょっこり訪ねてこられたことがありました。実験装置のことなど、細々としたことを説明した記憶がありますが、先生のご専門が深層循環であったのに、なぜその時に、現実の海での深層循環やその力学について議論しなかったのかと、今でも悔やまれます。

博士課程に進学すると、日本海固有水に関するテーマを頂き、本格的に須藤先生の指導を受けるようになりました。先生の指導は手取り足取りといったものではなく、大まかな研究方針を示した後は、自分でいろいろと試してみなさい、という感じでした。ただし、観測データの処理や統計のとりかたについては、非常に細かい指導を受けました。先生は興奮するとどもる癖があるのですが、解析結果を一目見て「こ・これはおかしい」と言われ、チェックし直すと、必ず間違いがありました。今から考えると、先生は大洋の断面図・平面図を何百枚と手描きされていたため、海洋物理学的な洞察と相まって、海の構造やデータの質について並々ならぬ直感が備わっていたのだと思います。まさに、descriptive physical oceanographerの凄みを実感しました。また、こちらの話がつまらないとすぐに居眠りをされてしまい、「ああ、またやってしまった」と反省することしきりでした。

先生のご業績に関して忘れられないのは、当時、H. Stommelに心酔して彼の論文を読みあさっていた私は、絶対地衡流速を算出するための $\beta$ -spiral法に関する最初の文献（Stommel and Schott, 1977）に先生の論文が引用されているのを見つけて、びっくりしたことです。しかも、“Sudo (1965) used this relation in a form vertically integrated to the Ekman layer as a top boundary condition, ...”とあり、 $\beta$ -spiralの基となる考えを先生が提示されていたことがわかります。現在では $\beta$ -spiral法が使われることはほとんどありませんが、その思想はC. Wunschのinverse methodや今日のデータ同化につながっていることを考えると、今さらながら先生の先見の明に脱帽する次第です。

勉強以外では、先生は鉄道に造詣が深く、どんな遠方への出張も鉄道で往復されていたことが印象的でした。私も鉄道趣味だったので、研究室のコンパの折などに鉄道の話で盛り上がったことが楽しく思い出されます。学位取得後も公私にわたりお世話になり、ご自宅近くの喫茶店で奥様を交えて歓談したことなど、懐かしい思い出です。

最後になりましたが、須藤先生、長い間、ご指導ありがとうございました。改めて、先生のご冥福をお祈り致します。



## 海藻着床具を用いる移植用アラメの種苗栽培法の開発

田 関<sup>1)</sup>・成瀬 香<sup>2)</sup>・岡本峰雄<sup>3)</sup>・鴨下真吾<sup>4)</sup>・山崎幸夫<sup>5)</sup>・松井俊幸<sup>5)</sup>

### Development of seedling cultivation methods for transplantation of *Eisenia bicyclis* using seaweed settlement devices

Kuo TIAN<sup>1</sup>, Kaori NARUSE<sup>2</sup>, Mineo OKAMOTO<sup>3</sup>, Shingo KAMOSHITA<sup>4</sup>,  
Yukio YAMAZAKI<sup>5</sup>, Toshiyuki MATSUI<sup>5</sup>

**Abstract** : We developed a slag-ceramic seaweed settlement device (SSD) to obtain seedlings of young *Eisenia bicyclis* (Kjellman) Setchell for transplantation. Experiments were performed with SSDs in an indoor tank at the Ibaraki Prefectural Fisheries Center. Each SSD was composed of a plate to settle the seaweed and two spacers on the underside of the plate with a hole in their centers. The spacers were designed to provide clearance when SSDs were fixed closely together (500–700 SSDs/m<sup>2</sup>) on a rack (or grating) to settle zoospores of *Eisenia bicyclis* released from their mother plants. *Eisenia* settlements on the top surfaces of SSD grew well in comparison with those on side surfaces. After sporophytes grew to visible size, their growth became faster, and small *Eisenia* grew thickly on SSDs. To prevent the rapid decline in *Eisenia* numbers as a result of competition, units of SSDs were separated and re-bound using bamboo rods with a clearance of 5–9 cm, and re-fixed on racks with 1.5–7 cm clearance (100–200 SSDs/m<sup>2</sup>). SSDs contained a mean of nine 8-cm *Eisenia*, and six 14-cm *Eisenia* and several large *Eisenia* with pinnae (mean 10 cm stipe, 8 pinnae, and 23 cm longest pinna) between 6 months and 14 months after settlement. It is verified that SSDs for transplantation with several types of *Eisenia* growing on them were produced.

**Keywords** : *Eisenia bicyclis*, seaweed settlement device, slag-ceramic

### 1. はじめに

日本の藻場は、沿岸域開発などで減少してきた (KOMATSU, 1997. 向井, 2008)。近年は海面水温

の上昇によって、藻類と生息場をめぐって競合するサンゴが北上しており、藻場の減少の度を速めている (野島・岡本, 2008. 岡本, 2008. 谷口, 2008)。藻類のなかでも多年生のアラメやカジメは典型的な海中林を形成し、豊かな生態系が形成されていた (谷口, 2008)。減少するアラメやカジメ藻場を再生させる試みは、海藻礁の設置、投石、母藻の投入、ロープや小型基盤に栽培した海藻の移植など、種々行なわれてきた (谷口, 1996. 清水, 2002. 荒武, 2009. 木村・山内, 2009. 桐山, 2009. 田井野, 2009. 木下, 2009)。

著者らは、多年生藻場 (アラメやカジメ) の再生には、海藻が育った着床具を海中の岩盤等に確実に固定し、その一部が死亡したら着床具の交換を行う、継続管理型の再生技術が必要と考えている。またアラメの着生・栽培・移植を効率的に行うには、海藻専用の着床具が必要と考え、2003

- 
- 1) 浙江海洋学院水産学院  
浙江省舟山市臨城新区長崎島海大南路1号
  - 2) 国際学院中学校高等学校  
〒362-0806 埼玉県北足立郡伊奈町小室 10472
  - 3) 東京海洋大学  
〒108-8477 港区港南 4-5-7 (連絡先)
  - 4) 茨城県庁農林水産部  
〒310-8555 水戸市笠松町 978-6
  - 5) 茨城県水産試験場  
〒311-1203 ひたちなか市平磯町三ツ塚 3551-8
- \* 連絡先：岡本 峰雄  
〒108-8477 港区港南 4-5-7 東京海洋大学  
Tel 03-5463-0489  
E-mail: okamotom@kaiyodai.ac.jp

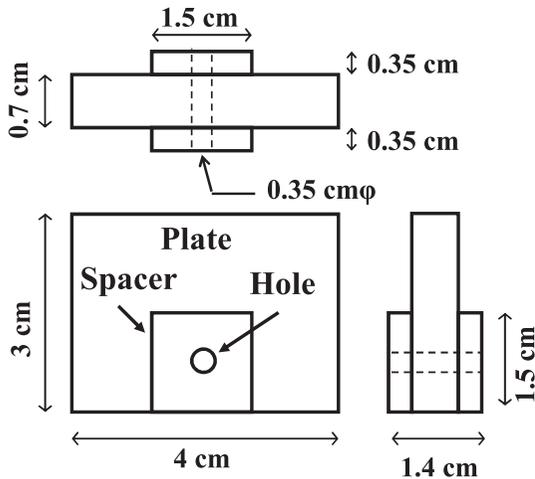


Fig. 1. Size of seaweed settlement device (SSD)

年から 2009 年に、アラメ・カジメの幼体移植のために、着床具を用いる種苗栽培法の開発実験を行なった (田 他, 2013)。その結果、スラグセラミック製のサンゴ着床具 (OKAMOTO *et al.*, 2008) を用いることで、シュロ縄や樹脂ロープと同様、浸漬処理を行なうことなく、室内水槽でアラメの遊走子を着生させ、幼体まで栽培することができた。また、栽培上の 2 つの問題点も明らかになった。一つは、着床具を密に配置したままアラメの栽培を続けると、仮根が伸びて隣の着床具やそこに育つアラメの仮根と絡み、複数の着床具が結合して外せなくなったこと。もう一つは、アラメの成長につれて葉体が密生して光量不足や生育障害が起き、着床具に育つアラメの株数が減少していったことである。

本研究では、海藻着床具の開発、海藻着床具へのアラメ遊走子の着生部位と成長、密に配置した着床具に均等に遊走子を着生させる方法、多数のアラメが育った着床具を得るための着床具の間隔広げ、に関して行なった実験結果について報告する。

## 2. 材料および方法

### 2.1 海藻着床具

サンゴ用のスラグセラミック着床具を用いたアラメ着生実験の結果、アラメの遊走子を着生させる部分 (着床板) の要求性能は次のようであった。「浮泥がない場合は着床板は水平が良い。着床板に浮泥が堆積する場合は、着床板は鉛直方向あるいは斜めにする必要がある。着床板には溝などの着生面積を増やすための加工は不要で、平板の

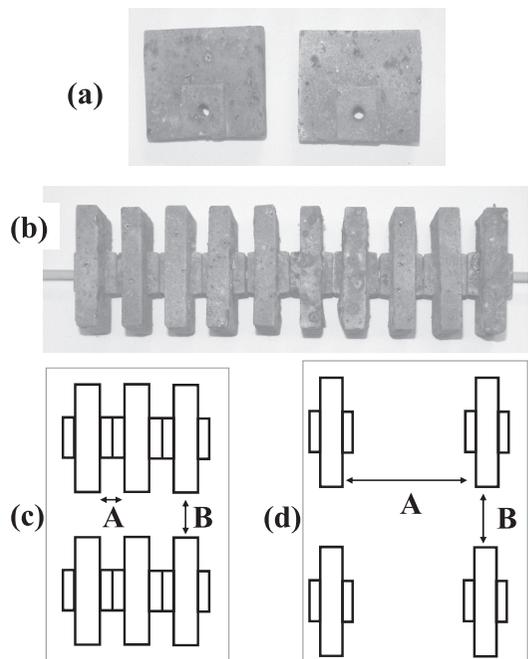


Fig. 2. Slag-ceramic seaweed settlement device (SSD). (a) Side view of SSDs, (b) Bird's eye view of SSD unit: 10 SSDs were connected by bamboo rod 3 mm in diameter, (c) Arrangement of SSD units on rack for the settlement of *Eisenia bicyclis* zoospore. Clearances of each plate of SSD unit (A) was 0.7 cm, and clearance between each SSD units (B) was 1.5–2 cm, (d) Separation of SSDs on rack. Clearances of each plate of SSD (A), and clearance between each units (B).

ままで良い」(荒川・松生, 1990. 荒川・森永, 1994. ROEROE *et al.*, 2013. 田 他, 2013)。こうした着床板を有した着床具を製作するには、その他、次の 3 点の配慮が必要である。(1) 遊走子の着生を水槽で効率的に行なう上で、狭い面積に多数配置できる形状であること、(2) 日照部に着生した遊走子がアラメの幼体に成育するので、着床具は上下に重ねず、一層配置で用いること、(3) 着床具を海藻礁や岩盤に固定するうえで、運搬や固定が容易であること。

これらをもとに、Figs. 1, 2 に示した海藻着床具 (Seaweed Settlement Device; SSD) を開発した。海藻着床具は平坦な着床板 (Plate. 幅 4 cm, 高さ 3 cm, 厚さ 0.7 cm) の両面下部にスペーサ (Spacer. 1.5 cm × 1.5 cm, 厚さ 0.35 cm) を設け、その中央には直径 0.35 cm の穴 (Hole) をあけた。スペーサと着床板からなる海藻着床具の重量

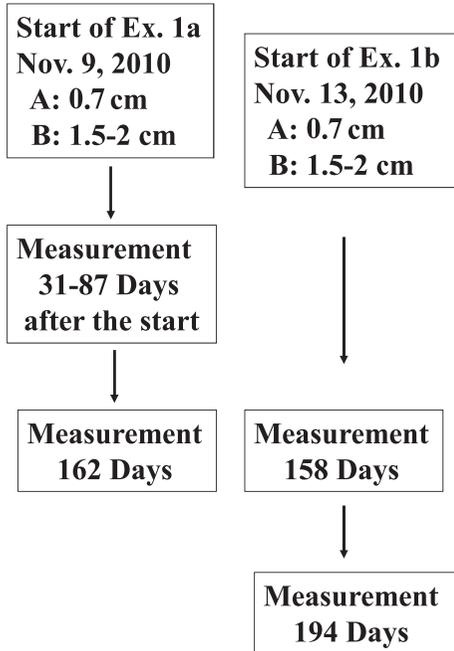


Fig. 3. Diagram of Experiment 1.

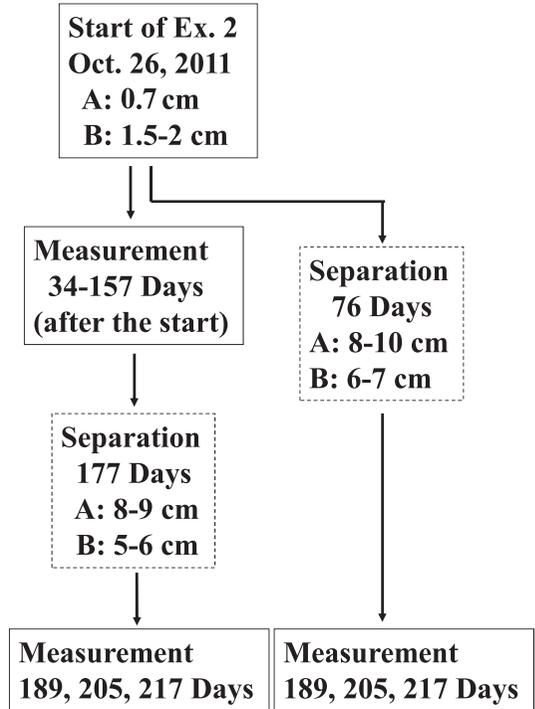


Fig. 4. Diagram of Experiment 2.

は約 16 g である。遊走子を着生させる際は、海藻着床具は立てて [Fig. 2(a)], 竹ヒゴなどで連結して束にし [Fig. 2(b)], それを架台上に密に配置して用いる [Fig. 2(c)]。スパーサは連結時に着床板間に 0.7 cm の隙間を作り, 着床具の上面だけでなく側面にも遊走子が着生できるようにした。海藻礁などに着床具を固定する際は, 上面に直径 3-3.3 mm の穴をエアドリルで空け, 着床具を横向きにして釘を打ち込んで固定する。着床板の有効着生面積は, 板の上面, 広い両側面 (スパーサ部を除く), 狭い両側面で, 約 26.5 cm<sup>2</sup> である。

製造法はサンゴ着床具 (田 他, 2013) と同様で, 製鋼スラグとアルミドrossを混ぜて金型プレス成型し, 酸化焼成した。それによって, 酸化鉄とアルミニウムが高温で爆発的に燃焼し (テルミット反応), 同時に不純物が気化して微細な多孔質 (直径 3~10 μm) の強靱な陶器となる。なお海藻着床具の寸法には焼成によってバラツキ (±1 mm 以下) が生じる。

## 2.2 実験方法

2010 年~2012 年に, 茨城県水産試験場 (以下, 茨城水試) の屋内水槽で実験を行った。屋内水槽の建物 (約 15 m×30 m) には, 実験に用いた 4t

水槽が 32 基配置され, その他, 6 基の 6t 水槽や通路や資材置き場が設けられている。建物は骨組みが角材でつくられ, 区画の仕切り壁はない。屋根には半透明の樹脂製波板, 外壁には半透明の FRP 製波板が張られ, 自然採光であった。明るさは水槽の場所によって異なるが, 概ね太陽光照射度の 30~40% となっていた。夜間作業用の蛍光灯はあるが, 生物飼育専用の照明は設置されていない。

2010 年の実験 1 (1a, 1b) では, 開発した海藻着床具へのアラメの着生部位と生育状況を調べた。2011 年の実験 2 では, 遊走子を海藻着床具に均一に着生させる方法と, 着床具上に生育したアラメの個体数の変化を調べ, 海藻着床具の間隔を広げる時期を検討した。2012 年の実験 3 では, 実験 1, 2 で得られた実験結果をもとに, 移植用アラメ種苗を得るための手順を確認するために, 再度実験を行なった。

Figs. 3-5 に, 実験 1 から実験 3 の流れを示した。遊走子の着生を行った実験開始日 (Start), 実験開始後の計測を行った日 (開始後の日数: Days after the start), 着床具の間隔を広げた日 (開始後の日数: Separation) と広げた着床具の

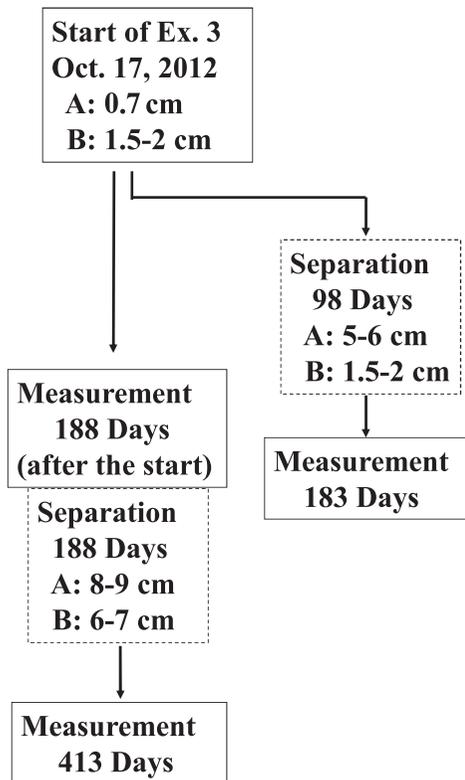


Fig. 5. Diagram of Experiment 3.

隙間および着床具束の間隔を示した [Fig. 2(d)] ; A : 海藻着床具の着床板間の距離 (cm)。B : 海藻着床具の束間の距離 (cm)。なお実験開始日の海藻着床具の間隔は、実験 1 から実験 3 ともに共通であった [Fig. 2(c)。A : 0.7 cm, B : 1.5-2 cm]。

### 2.2.1 実験 1

海藻着床具は 10 個をアルミ線 (園芸用銅メッキ。太さ 2.5-3 mm) で束にし、両端に結び目を作った。ステンレス架台 (1 m × 0.6 m, 高さ 0.15 m) を 4 基用い、それぞれに樹脂製スノコ (30 cm × 24 cm, 高さ 1 cm) 7 枚をプラスチックバンドで固定し、その上に着床具を 40 束 (400 個) ずつ、束間の間隔が 1.5-2 cm になるよう固定した (Fig. 6)。

2010 年 11 月 9 日 (Experiment 1a) と 11 月 13 日 (Experiment 1b) の 2 回にわたって実験を行なった。11 月 9 日に、清掃した屋内 4t コンクリート水槽 (内寸 : 3.5 m × 1.3 m, 深さ 0.9 m) に濾過海水を満たし、架台 2 基を設置した。架台は、4 個の樹脂製フロート (東京化研。FLOTON

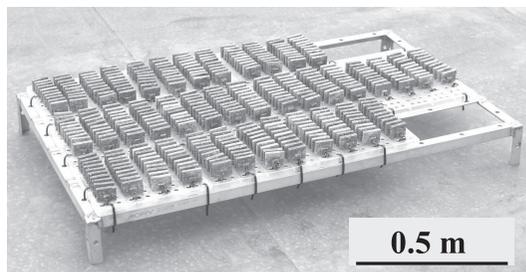


Fig. 6. Stainless steel rack (1 m × 0.6 m, 0.15 m in height) held 40 units (each 10 SSDs) of seaweed settlement devices (SSDs) on Experiment 1.

K-10Z. L201 mm × 189 mm φ) を 4 隅から浮かせ、海藻着床具上面の水深が 0.2 m になるよう設置した。着床具や架台を海水に漬けて洗浄するため、約半日、海水を掛け流しエアレーションを行なった。同日、ひたちなか市平磯漁港で成熟したアラメ 15 個体を採取し、遊走子が放出されやすいように、2 時間半の陰干しを行なった。その後は遊走子が着生しやすいように、止水状態にした実験水槽に 15 個体のアラメを投入した。15 個体の成熟アラメは翌朝取り除き、濾過海水のかけ流し (100-120 ℓ/min) とエアレーション (100-120 ℓ/min) を行なってアラメ遊走子の栽培を開始した。実験開始後 10, 22, 31, 41, 49, 59, 70, 87 日目に着床具を 2 束 (20 個) ずつ採取し、架台や海藻着床具に着生した珪藻類を柔らかい刷毛で除去し栽培を続けた。研究室に持ち帰った海藻着床具 2 束は、アラメの生育状況の観察や生育密度の計測を行った。海藻着床具に着生したアラメが孢子体に成長しても、個体数の目視計数が難しかった 31~49 日目は、デジタル顕微鏡 (Keyence 製 VH-5500, ×100-1000) で計測した (以後、顕鏡計数)。海藻着床具ごとに、着床板の上面中央 (Upper surface) と、2 側面上部 (Higher side surfaces. 3-5 mm from the top) について、Fig. 7 に点線で示した測線 (Measurement lines) で、任意に 10 ヶ所ずつを選んでアラメを計数し、計測対象面積 (観察倍率で異なる) から上面と側面上部の密度 (個体/cm<sup>2</sup>) を求め、着床具 1 束 (SSD-A と SSD-B, 各 10 個) ごとの平均密度 (個体/cm<sup>2</sup>) を求めた。アラメ孢子体が目視できる (数 mm 以上) ようになった 59 日目以降は、顕鏡計数をやめて目視計数を行った。海藻着床具ごとに上面 (2.8 cm<sup>2</sup>) と 2 側面上部 (8 cm<sup>2</sup>) の生育密度 (cm<sup>2</sup>) を求め、1 束ずつの平均密度 (個体/cm<sup>2</sup>) を求めた。その後、実験開始後 162 日目 (2011 年 4 月 20 日) に海藻着床

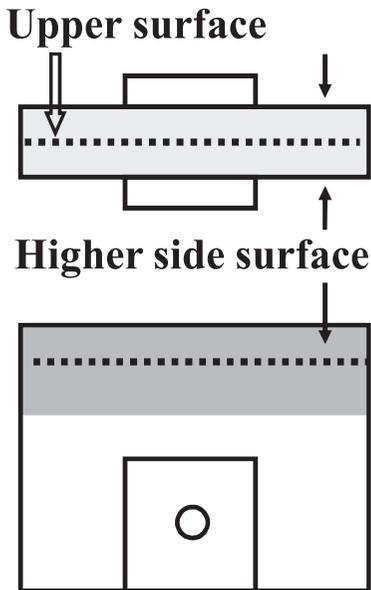


Fig. 7. Measurement lines (dotted line) of minute *Eisenia bicyclis* (<3–4 mm) using digital microscope, and measurement places of larger *E. bicyclis* at upper surface (painted out light, 2.8 cm<sup>2</sup>) and two higher side surfaces (painted out light dark, 4 cm<sup>2</sup>each) of seaweed settlement device (SSD) on Experiment 1.

具 2 束を採取し、生育していたアラメ胞子体の個体数とサイズの計測を行った (Fig. 3)。

2010 年 11 月 13 日 (Experiment 1b) に、前述の 11 月 9 日から実験を開始した水槽とは別の水槽を用いて、架台 2 基を設置し、11 月 9 日開始の実験と同じ方法でアラメ遊走子の着生と栽培を行なった。この実験 1b では、架台や海藻着床具の清掃は断続的に行ない、実験開始後 158 日目 (2011 年 4 月 20 日) に海藻着床具 2 束 (着床具 20 個)、194 日目に海藻着床具 121 個のアラメの計測を行なった (Fig. 3)。

## 2.2.2 実験 2

20 本の竹ヒゴ (直径 3 mm, 長さ 0.9 m) に海藻着床具 40 個ずつ、また 10 本の竹ヒゴに海藻着床具 50 個ずつを通し、それらを 30 本の角棒上 (2 cm×3 cm, 長さ 0.9 m) に、着床具 10 個ずつが連結するようにプラスチックバンドで両端を締めて固定した。樹脂製グレーチング 2 基 (Daikure Co., Ltd. 0.9 m×0.9 m, 厚さ 0.04 m。以下、架台) に、それぞれ角棒 15 本 (海藻着床具 40 個 10 本, 50 個 5 本。海藻着床具 650 個)

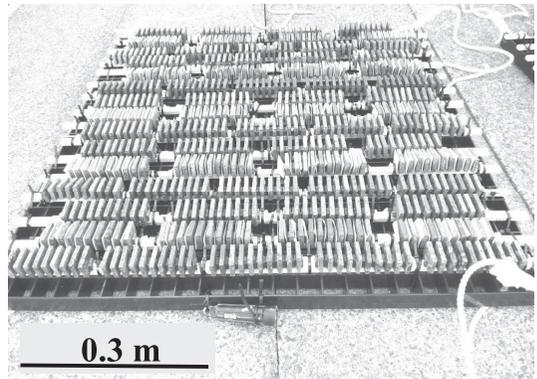


Fig. 8. Plastic grating (Rack, 1 m×0.9 m, 0.04 m in height) held 65 units (each 10 SSDs) of seaweed settlement devices (SSDs) on Experiment 2.

を固定した (Fig. 8)。2011 年 10 月 26 日に、屋内 4t 水槽に濾過海水を満たし、2 基の架台を水深 0.3 m に垂下し、約半日、海水を掛け流しエアレーションを行なった。架台には水温計 (Onset, HOBO U22-001) を設置し、1 時間ごとに計測した。また遊走子を着生中に、海藻着床具に着生した遊走子数の目安を知るため、白色の樹脂紙 (株式会社クレハ製、ポリグリコール酸 (PGA) 樹脂膜, 100 g/m<sup>2</sup>) を 4 cm×3 cm に切って架台の四隅と中央に鉛直向きに取り付けた。同日、千葉県富津市竹岡海岸で成熟したアラメ 13 個体を採取し、茨城水試に運び、約 2 時間の陰干しを行なった。子嚢斑のない葉体は除き、子嚢斑のある部分だけを切り取って着生実験に用いた。水槽の水量は成熟した母藻を投入する前に約 1/3 とし、母藻投入後は、概ね 10 分ごとに、バケツで遊走子密度が濃いであろう下層の海水をすくって着床具上にゆるやかかけ、架台上のアラメは位置を交換した。また母藻投入 30 分後から 30 分ごとに 2 枚の樹脂紙を採取し、デジタル顕微鏡 (×1,000) でそれぞれ 10 ヶ所ずつをランダムに観察し、着生した遊走子の密度を測定した。実験開始の 3 時間半後にアラメを水槽内からとり除いた。その後、水槽を満水にし、実験 1 と同様の量で、濾過海水のかけ流しとエアレーションを再開した。

実験開始から、約 2 週間ごとに、架台や海水着床具を刷毛で清掃するとともに、30 個 (ないし 20 個) ずつ採取した。研究室へ持ち帰った海藻着床具は、実験開始後 34 日目に採取したのから、上面 (Upper surface) と 4 側面からスペーサ部を除いた場所 (Four side surfaces excluding spacer, Fig. 9) に生育したアラメ胞子体の

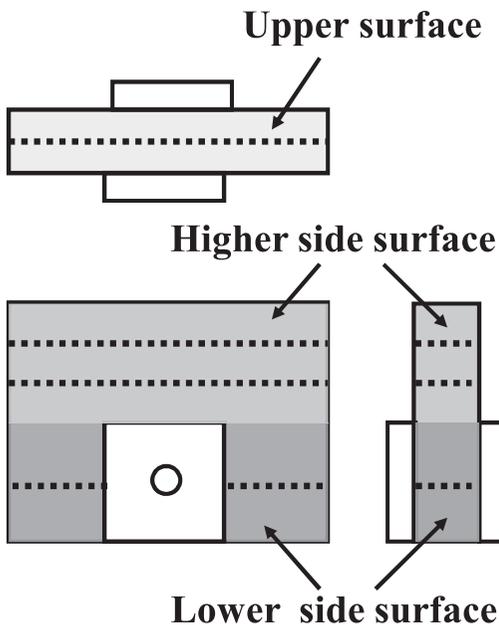


Fig. 9. Measurement lines (dotted line) of minute *Eisenia bicyclis* (<3–4 mm) using digital microscope, and measurement places of larger *E. bicyclis* at upper surface (painted out light dark. 2.8 cm<sup>2</sup>), higher side surfaces (painted out light dark. 14.1 cm<sup>2</sup>), and lower side surfaces exclude spacer (painted out dark. 9.6 cm<sup>2</sup>) of seaweed settlement device (SSD) on Experiment 2.

密度をデジタル顕微鏡で調べた。アラメが目視できる大きさに達した 61 日目以降は、デジタル顕微鏡計数（以下、顕鏡計数）に加え、目視計数も行なった。顕鏡計数は、Fig. 9 に示したように海藻着床具を上面（Upper surface）、側面上部（Higher side surfaces）、側面下部（Lower side surfaces）の 3 区画にわけ、(1) 上面に 1 測線、(2) 側面上部に着床板を 2 周する 2 測線（上面から約 5 mm 下及び約 10 mm 下）、(3) 側面下部のスペース部を除いた 1 測線（上面から約 22.5 mm 下）、で行なった。各測線上を顕微鏡の観察画面が重ならないように少しずつずらし、30~70 画面のアラメを数えた。着床具ごとに 3 区画の個体数の平均密度（個体/cm<sup>2</sup>）を求め、さらに計測した着床具（n=30 または n=20）の平均を求めた。目視計数を始めてからは、まず全長 3~4 mm を超えたアラメ胞子体の目視計数を行った。海藻着床具の着生面を、上面（2.8 cm<sup>2</sup>）、側面上部（14.1 cm<sup>2</sup>）、側面下部（9.6 cm<sup>2</sup>）の 3 区画に分け（Fig. 9）、ピンセットで採取して計数

した。その後、残った微細なアラメ胞子体の顕鏡計数を行なった。

実験開始時の密な間隔のままアラメを栽培した海藻着床具は、76 日目または 177 日目に間隔広げを行った。実験開始後 76 日目には、海藻着床具 80 個を 8 本の竹ヒゴに各 10 個ずつ並べ（Fig. 4. Separation. A : 8–10 cm）、それを 8 本の角棒に固定し、架台に間隔を広げて取り付け（B : 6–7 cm）、栽培を続けた（Fig. 4）。実験開始後 177 日目まで密間隔のまま栽培していた海藻着床具 401 個は、全体にアラメ胞子体の数が減少し、またアラメが育った着床具は 338 個（生残率 84.2%）に減っていた。そのなかで複数の大きめのアラメが育った着床具 90 個を選び、9 本の竹ヒゴと角棒に間隔を広げて固定し、架台に取り付け（A : 8–9 cm. B : 5–6 cm）、栽培を続けた。時期を変えて間隔を広げた海藻着床具は、それぞれ同じ一列の 10 個ずつを計測対象とし、実験開始後 189, 205, 217 日目にアラメ胞子体の個体数とサイズを計測した（Fig. 4）。

### 2.2.3 実験 3

着床具は 10 個を竹ヒゴ（直径 3 mm）に通して連結し、プラスチックバンドで両端を締めて束にした。これを、角棒（2 cm×3 cm、長さ 0.9 m）に 3~5 束固定し、実験 2 で用いたのと同じ架台 2 基に着床具 61 束（610 個）ずつを固定した。

2012 年 10 月 17 日に、屋内水槽に濾過海水を満たし、架台 2 基に各 4 個のフロートを付け、着床具上面が水深 0.3 m になるように設置し、約半日、海水を掛け流しエアレーションを行なった。架台には水温計（Onset. HOBO U22-001）を設置し、1 時間ごとに計測した。同日、平磯漁港でアラメ 15 株を採取し、3 時間の陰干しの後に、子嚢斑がある大きな側葉のみ 233 枚を切り取った。実験 2 と同様に、水槽の海水を減らして止水状態でアラメの成熟した葉部を投入して適時緩やかに海水の攪拌を行って遊走子を着生させた。また遊走子を着生中に、実験 2 と同様に樹脂紙を用い海藻投入後 60, 120, 180 分に 2 枚の樹脂紙を採取し、デジタル顕微鏡（×1,000）でそれぞれ 10 ヶ所ずつをランダムに観察し、遊走子密度を測定した。その後アラメを取り除いて水槽を満水にし、実験 1, 2 と同様にアラメ遊走子の栽培を行った。以後は約 2 週間ごとに海藻着床具の清掃とサンプリングを行なった。

実験開始後 98 日目、アラメ胞子体が目視で確認できた海藻着床具 451 個を選び、竹ヒゴと角棒を用いて 15~16 個ずつ間隔を広げて固定し（A : 5–6 cm）、それら 15 組ずつを 2 基の架台に固定

Table 1. Temporal changes in mean densities (ind./cm<sup>2</sup>) of *Eisenia bicyclis* grew on upper surface and two higher side surfaces of two units of seaweed settlement devices (SSDs. Units-A, and-B. Each 10 SSDs) after the start of Experiment 1 on November 9, 2010.

| Days after<br>the start | SSD-A         |                      | SSD-B          |                      |
|-------------------------|---------------|----------------------|----------------|----------------------|
|                         | Mean (±SD)    |                      | Mean (±SD)     |                      |
|                         | Upper surface | Higher side surfaces | Upper surfaces | Higher side surfaces |
| 31*                     | 16.1 (15.6)   | 106.4 (94.8)         | 0              | 1.5 (3.0)            |
| 41*                     | 2.5 (4.3)     | 55.5 (58.1)          | 0              | 1.2 (3.0)            |
| 49*                     | 0.4 (0.7)     | 3.4 (5.2)            | 0.2            | 0.4 (0.6)            |
| 59**                    | 1.5 (2.1)     | 2.7 (4.1)            | 0.2            | 0.6 (1.6)            |
| 70**                    | 0.2 (0.4)     | 2.3 (3.4)            | 0              | 0                    |
| 87**                    | 0             | 0                    | 0              | 0.5 (0.9)            |

\*Observed by digital microscope. \*\*Visual observation

し (B: 1.5–2 cm) 栽培を続けた。残った 642 個の着床具は、実験開始時の密な配置のまま栽培を続けた。実験開始後 183 日目 (2013 年 4 月 18 日) に、98 日目に間隔を広げた着床具に生育したアラメの株数とサイズの計測を行った。密間隔の着床具は 188 日目にアラメの株数とサイズの計測を行なった。また同日、密間隔のまま 188 日間栽培を続けた 642 個の着床具から、生育状況の良いアラメが育った着床具 244 個を選び、3 基の架台に間隔を広げて固定した (A: 8–9 cm. B: 6–7 cm)。実験開始 413 日目 (2013 年 12 月 4 日) に、188 日目に間隔を広げた着床具 244 個に育ったアラメの、個体ごとの茎の長さ、側葉の数、側葉の最大長を計測した。

### 3. 結果

#### 3.1 実験 1

2010 年 11 月 9 日に開始した実験 (Fig. 3, Ex. 1a) では、10 日目、全長約 10  $\mu$ m の配偶体を確認した。22 日目には 30–50  $\mu$ m の孢子体を確認、41 日目には 100  $\mu$ m を超えるものを多数確認した。59 日目には最大で約 10 mm となり目視観察が可能となった。実験開始後 31 日目から 87 日目まで行った、海藻着床具 2 束 (1 束 10 個. SSD-A, SSD-B) の観察では、アラメ孢子体の平均密度 (個体/cm<sup>2</sup>) は、Table 1 に示したように、束ごとのバラツキが大きかった。実験開始後 31 日目の観察では、1 束 (SSD-A) は上面と側面上部にそれぞれ平均 16.1 個体、106.4 個体であったが、もう 1 束 (SSD-B) は、上面が 0、側面上部が 1.5 個体であった。その後は個体数が激減し

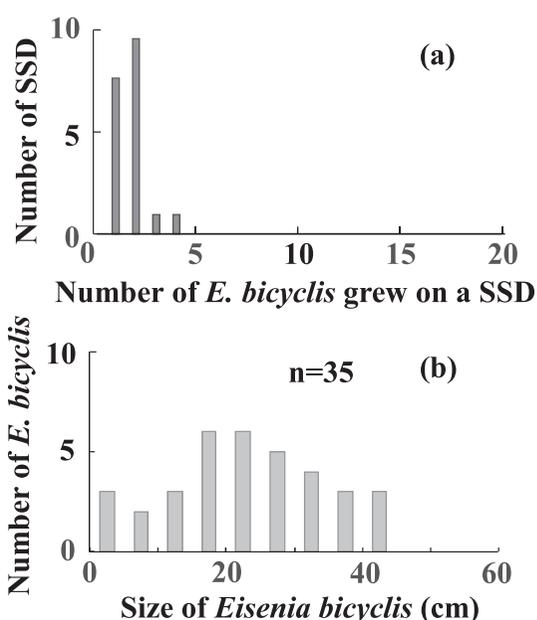


Fig. 10. Number (a) and size (b) of *Eisenia bicyclis* grew on 20 SSDs 162 days after the start of Experiment 1a on November 9, 2010. Thirty five *E. bicyclis* grew on 20 SSDs.

た。実験開始後 162 日目に採取した 2 束の着床具には、Fig. 10(a) に示したように、20 個全てに 1–4 個体/SSD (平均 1.8 個体、標準偏差  $\pm$ 0.8 個体、計 35 個体) のアラメが生育していた。また Fig. 10(b) に示したように、サイズは 5–43 cm

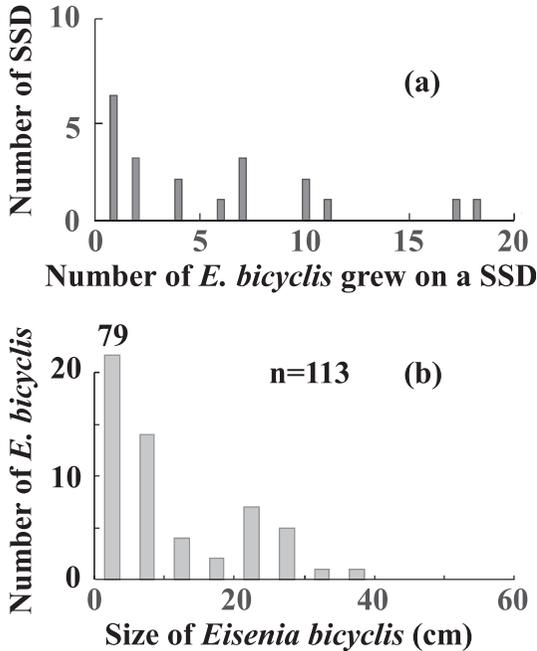


Fig. 11. Number (a) and size (b) of *Eisenia bicyclis* grew on 20 SSDs 158 days after the start of Experiment 1b on November 13, 2010. One hundred and thirteen *E. bicyclis* were grew on 20 SSDs.

(平均 24 cm ± 標準偏差 11 cm) で、15~35 cm の範囲にピークがあった。

11月13日に実験を開始した (Fig. 3, Ex. 1b) 海藻着床具は、着生 158 日後に採取した 2 束の着床具全てにアラメが生育していた。Fig. 11(a) に示したように、総数は 113 個体で、着床具ごとの生育数は 1~18 個体/SSD (平均 5.7 個体、標準偏差 ± 5.3 個体) であった。サイズは Fig. 11(b) に示したように、1~40 cm (6.8 cm ± 8.9 cm) であった。アラメの半数以上は 1~2 cm と小さく、10 cm 以下のアラメが 80% を越えていた。着床具ごとのアラメの生育状況には大きなバラツキがあった。アラメ 10 個体以上が育った着床具 5 個についてみると、大きい 3 個体 (20, 22, 26 cm) と 10 cm 以下 7 個体、大きい 2 個体 (15, 29) と 6 cm 以下 8 個体、5 cm 以下 11 個体、大きい 2 個体 (24, 40) と 10 cm 以下 15 個体、16 cm が 1 個体と 6 cm 以下が 17 個体、であり、これらで半数以上の 66 個体 (11 cm 以上 20 個体のうち 8 個体) を占めていた。また 194 日目に着床具 121 個の計測を行った結果、Fig. 12 に示したように、105 個の着床具 (生残率 86%) に 456 個体のアラメが生育していた。アラメが育っていた着床具

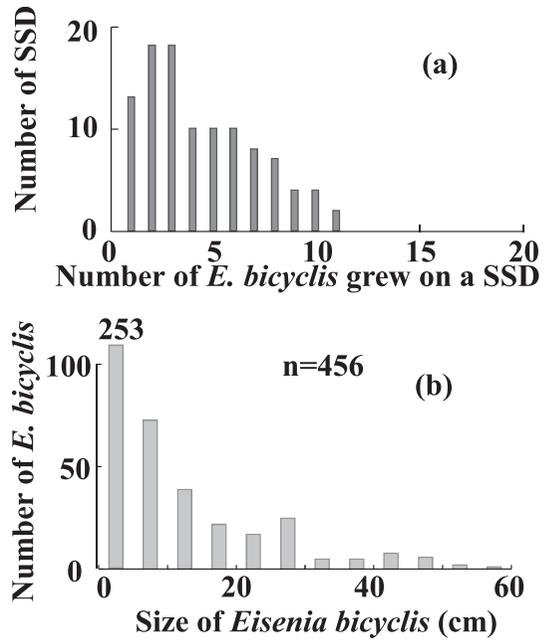


Fig. 12. Number (a) and size (b) of *Eisenia bicyclis* grew on 105 SSDs 194 days after the start of Experiment 1b on November 13, 2010. Four hundred and fifty six *E. bicyclis* grew on 105 SSDs.

(n=105) の、着床具ごとの生育数は 1~11 個体/SSD (4.4 個体 ± 2.8 個体)、サイズは 1~57 cm (10.3 cm ± 12.0 cm) であった。アラメは 158 日目 [Fig. 11(b)] よりも成長していたが、10 cm 以下のものが 72% を占め、着床具ごとの個体数と成長には大きなバラツキがみられた。着床具は遊走子着生時の密な配置のまま、アラメ葉面の密生状態が続いていたため、生育状態の悪い個体や葉体の上部が傷んだ個体が多かった。アラメの仮根は Fig. 13 のように長く育ち、着床具の側面上部から上面に広がって絡み合い、隣接した着床具まで広がっていた。そのため茎の最下部は概ね着床具の上面に位置するようになっていた。

## 3.2 実験 2

### 3.2.1 密に配置した着床具でのアラメの栽培

実験開始 (2011 年 10 月 26 日) から 220 日目までの日平均水温を Fig. 14 に示した。開始日は 18.3°C で、13 日目には低下を始め、50 日目に 12.0°C、105 日目に 9.1°C となった。120 日目には 12°C まで上昇したが再び低下し 140 日目には 8.0°C となり、以後は徐々に上昇した。

水槽にアラメの母藻を投入した後、30, 60, 90,

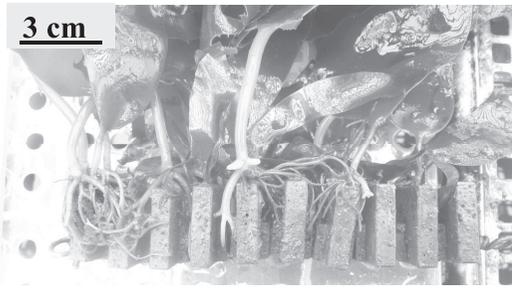


Fig. 13. Side view of a unit of seaweed settlement devices (SSDs) 194 days after the start of Experiment 1: growing sticking roots of *Eisenia bicyclis* twined around SSDs.

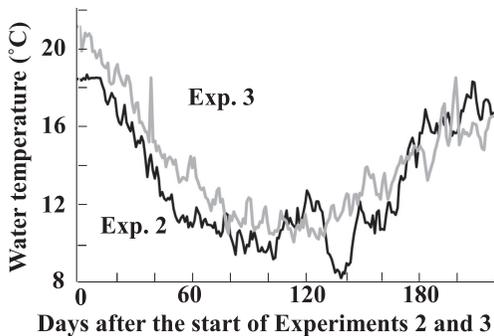


Fig. 14. Mean daily water temperature after the start of Experiment 2 (Dark lines) on October 26, 2011 on, and of Experiment 3 (light lines) on October 17, 2012.

120 分目の樹脂紙へのアラメ遊走子の着生密度 [ind./cm<sup>2</sup>, 平均個体数×10<sup>3</sup> (±標準偏差×10<sup>3</sup>)] はそれぞれ, 6.3 (±5.1), 9.9 (±5.9), 9.6 (±3.9), 9.6 (±3.7) であった。実験開始後 21 日目, 着床具に胞子体を確認した。34 日後には最大で約 0.5 mm の胞子体が成育し [Fig. 15(a)], 50 日後には最大で約 5 mm のアラメが着床具上面に密生していた [Fig. 15(b)]。60 日目には大きなアラメは約 15 mm に成長した [Fig. 15(c)]。

着床具の 3 部分 (上面 Upper surface, 側面上部 Higher side surface, 側面下部 Lower side surface. Fig. 9) に育った, 顕鏡計数アラメの密度 (cm<sup>2</sup>) を, Fig. 16 (a-c. 黒丸) に示した。実験開始後 34 日目から 157 日目まで, 上面が高く [Fig. 16(a)], 側面上段 [Fig. 16(b)], 側面下段 [Fig. 16(c)] の順に低くなっていた。上面は

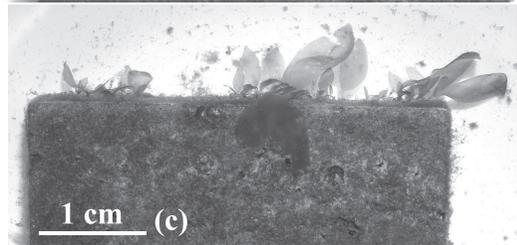
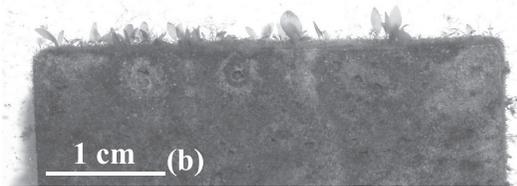
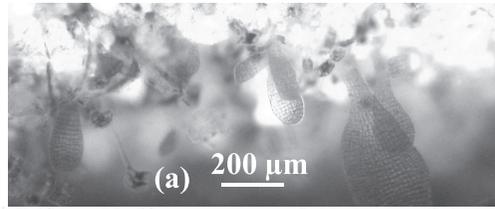


Fig. 15. Growth of sporophyte *Eisenia bicyclis* after the start of Experiment 2. (a) 34 days, (b) 50 days, and (c) 60 days after the start.

34 日目が平均 69 個体 (±71 個体) と最も高く, 50~76 日は減少して 31~33 個体 (±16~25) で推移し, 91 日目以降は急速に減少したが, 157 日目でも 0 個体にはならなかった。側面上段は, 34 日目が最大 (16 個体±23) で, 61 日目までに概ね 1/10 に減少 (1.4±1.9) したが, 76 日目には再度増加し, 91 日目には 34 日目の約半分 (8.6±5.3) まで高くなり, 105 日目には低下 (4.6±2.1) を始め, 141 日以降はほぼ 0 個体となった。側面下段は, 34 日に 2.7 個体 (±3.9) で, 側面上段と同様に, 61 日目 (0.6±1.2) まで減少したが, 再び増加して 91 日には平均 3.4 個体 (±3.3 個体) と最大になり, 以後は減少し 141 日目以降は見られなくなった。

目視計数のアラメ (3~4 mm 以上) は, Fig. 16 (a-c. 白丸) に示したように, 61 日目から計測できるようになった。上面は 76 日目に 19 個体 (±13 個体) と最大になり, 128 日目の 12 個体 (±8.0) までは徐々に減少して以後は急減した。側面上段は, 上面より 10 日以上遅い 91 日目に 3.3 個体 (±1.0) と最大となり, 以後は上面よりも減少が速く 128 日目には殆んど確認できなくなった。側面下段は側面上段と同様, 91 日目に 0.7

Table 2. Mean numbers (ind./cm<sup>2</sup>) and mean lengths of *Eisenia bicyclis* grew on the same 10 SSDs after the start of Experiment 2 on October 26, 2011. Ten SSDs were bound as unit, and 65 units were fixed on a plastic grating (0.9 m×0.9 m), then units of SSDs were separated and re-fixed widely (80 SSDs/grating) on a grating 76 days after the start.

| Days after the start | No. of <i>Eisenia</i> on a SSD |            | Length of <i>Eisenia</i> (cm) |             |
|----------------------|--------------------------------|------------|-------------------------------|-------------|
|                      | Range                          | Mean (±SD) | Range                         | Mean (±SD)  |
| 189                  | 1–15                           | 6.9 (4.1)  | 1–49                          | 13.4 (10.7) |
| 205                  | 1–14                           | 5.6 (3.5)  | 1–37                          | 14.9 (8.4)  |
| 217                  | 1–14                           | 5.9 (3.5)  | 3–36                          | 13.9 (7.9)  |

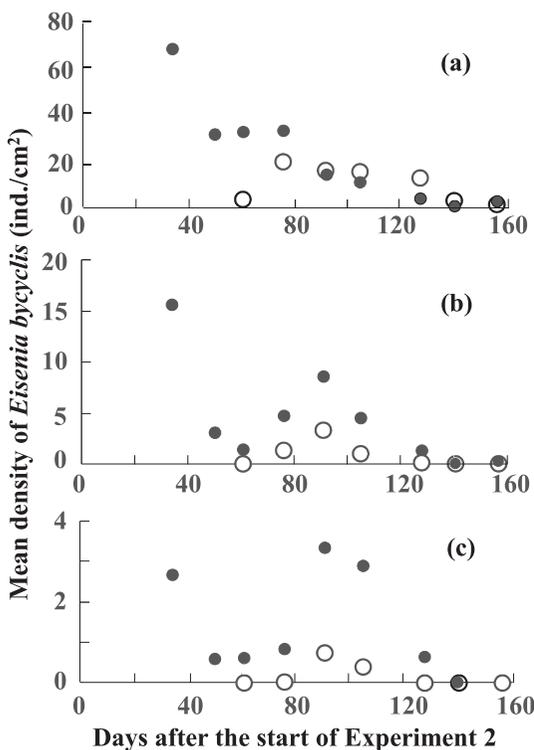


Fig. 16. Temporal changes in mean density (ind./cm<sup>2</sup>) of minute sporophyte *Eisenia bicyclis* (<3–4 mm). Painted circle) observed at four measurement lines by digital microscope and shown at three places of seaweed settlement devices (n=30 or 20), and the mean density of visible *Eisenia bicyclis* (Open circle) grew on three measurement sites of seaweed settlement devices (n=30 or 20), observed after the start of Experiment 2 on October 26, 2011. (a) Upper surface, (b) Higher side surface, and (c) Lower side surface.

個体 (±1.0) と最大になり, 105 日目には 0.4 個体 (±0.6) と減り, 以後は観察できなかった。なお, 側面上部と側面下部で 91 日目にピークとなった顕鏡計数のアラメが, 目視計数のアラメの増加に寄与した様子は見られなかった。

### 3.2.2 着床具の間隔広げ

実験開始後 76 日目に間隔を広げた時の着床具は, 上面に平均 19 個体/cm<sup>2</sup> (標準偏差±13 個体) の目視計数できたアラメが密生し [Fig. 16(a)], 顕鏡計数のものは減少途上 (33 個体/cm<sup>2</sup>±20 個体) であった (Fig. 9)。側面には少数の目視計数できたアラメが育ち始め, 顕鏡計数のアラメは一度減少した後, 再度増加中であった。実験 76 日目に間隔を広げた着床具は, 189, 205, 217 日目に, 同じ 10 個の着床具に育ったアラメ胞子体の計測を行った (Table 2)。217 日目, アラメは平均 5.9 個体/SSD (標準偏差±3.5 個体) が生育し, 平均サイズは 13.9 cm (±7.9 cm) であった。実験開始後 177 日目に間隔を広げた着床具は, 密に配置した状態で長く置かれたため, 10–20 cm の大きなアラメが数個体しか生育せず, 小さな個体が少数育った状態であった。アラメが育っていない着床具も 15.8% に達していた。その中から, 比較的生育状況が良いものを 90 個選んで間隔を広げた。実験開始後の 177 日目に計測対象の着床具を 10 個選んだが, Table 3 に示したように, アラメの斃死が続き, 217 日目にはアラメが育った着床具は 6 個となり, 平均 1.8 個体/SSD (±2.2 個体), 平均サイズは 15.3 cm (±8.2 cm) であった。

実験 2 では, 開始後 76 日目に着床具の間隔を広げることで, 217 日目に, 平均サイズ 13.9 cm (±7.9 cm) のアラメが平均 5.9 個体 (標準偏差±3.5 個体) 育った移植用種苗を得ることができた。

Table 3. Mean numbers (ind./cm<sup>2</sup>) and lengths of *Eisenia bicyclis* grew on the same 10 SSDs after the start of Experiment 2 on October 26, 2011. Ten SSDs were bound as unit, and 65 units were fixed on a plastic grating (0.9 m×0.9 m), then units of SSDs were separated and re-fixed widely (80 SSDs/grating) on a grating 177 days after the start.

| Days after the start | No. of <i>Eisenia</i> on a SSD |            | Length of <i>Eisenia</i> (cm) |             |
|----------------------|--------------------------------|------------|-------------------------------|-------------|
|                      | Range                          | Mean (±SD) | Range                         | Mean (±SD)  |
| 189                  | 0-9*                           | 2.4 (2.5)  | 3-36*                         | 15.9 (14.8) |
| 205                  | 0-7**                          | 1.8 (2.2)  | 1-37**                        | 16.2 (8.4)  |
| 217                  | 0-7**                          | 1.8 (2.2)  | 3-36**                        | 15.3 (8.2)  |

Number of SSD with growing *Eisenia*: \*9, \*\*6

Table 4. Comparison of numbers of *Eisenia bicyclis* grew on two group of SSDs on Experiment 3 started on October 17, 2012. Fixed closely: 642 SSDs had been cultivated closely on the gratings until 188 days after the start and measured on the day. Re-fixed widely: 451 SSDs that had been cultivated closely until 98 days after the start, then measured 183 days after the start.

| No. of <i>Eisenia</i> | Fixed closely |      | Re-fixed widely |      |
|-----------------------|---------------|------|-----------------|------|
|                       | No. of SSDs   | %*   | No. of SSDs     | %*   |
| 0                     | 38            | 5.9  | 18              | 4.0  |
| 1-5                   | 193           | 30.1 | 138             | 30.6 |
| 6-10                  | 202           | 31.5 | 149             | 33.0 |
| 11-15                 | 126           | 19.6 | 84              | 18.6 |
| 16-20                 | 57            | 8.9  | 36              | 8.0  |
| 21-25                 | 23            | 3.5  | 15              | 3.3  |
| 26-30                 | 3             | 0.5  | 9               | 1.9  |
| 31-35                 |               |      | 2               | 0.4  |
| Total                 | 642           |      | 451             |      |

\*Percentage show the composition of all SSDs

### 3.3 実験3

2012年10月17日の実験開始から220日目までの日平均水温をFig. 14に示した。開始日の水温は20.9°Cと高く、100日目でも11.0°Cを超え、最低水温は115日目の10.0°Cであり、以後は上昇した。2010年の実験2とくらべると、110日目まで継続して水温が平均1.6°C高かった (t-test.  $p < 0.001$ )。しかしそれ以降 (110日目から200日目) は両年ともに変動が大きく、2012年が平均0.8°Cほど高かった ( $p = 0.03$ )。

水槽にアラメの母藻を投入した後、60, 120, 180分後の樹脂紙へのアラメ遊走子の着生密度 [ind./cm<sup>2</sup>, 平均個体数×10<sup>4</sup> (±標準偏差×10<sup>4</sup>)]

はそれぞれ、1.1 (±0.5), 5.7 (±3.6), 3.0 (±1.1)であった。実験開始からの着床具配置のまま (以下、密間隔) 栽培した着床具642個に育ったアラメを188日目に計測し、着床具ごとのアラメの個体数をTable 4 (Fixed closely), また全てのアラメのサイズ組成をTable 5 (Fixed closely)に示す。実験開始後98日目、アラメが目視確認できた着床具451個を架台2基 (225個と226個) に間隔を広げて栽培し (以下、広間隔), 183日目に計測した、着床具ごとのアラメの個体数をTable 4 (Re-fixed widely) に、また全てのアラメのサイズ組成をTable 5 (Re-fix widely) に示す。密間隔の着床具は、642個中604個にアラメ

Table 5. Comparison of length (cm) of *Eisenia bicyclis* grew on two groups of SSDs on Experiment 3 started on October 17, 2012. Fixed closely: 642 SSDs had been cultivated closely on the gratings until 188 days after the start and measured on the day. Re-fixed widely: 451 SSDs that had been cultivated closely until 98 days after the start, then measured 183 days after the start.

| Total length of<br><i>Eisenia</i> (cm) | Fixed closely         |      | Re-fixed widely       |      |
|--|-----------------------|------|-----------------------|------|
|  | No. of <i>Eisenia</i> | %*   | No. of <i>Eisenia</i> | %*   |
| 1-5                                    | 4146                  | 76.7 | 1858                  | 46.9 |
| 6-10                                   | 744                   | 13.8 | 1112                  | 28.0 |
| 11-15                                  | 256                   | 4.7  | 463                   | 11.7 |
| 16-20                                  | 143                   | 2.6  | 262                   | 6.6  |
| 21-25                                  | 72                    | 1.3  | 138                   | 3.5  |
| 26-30                                  | 29                    | 0.5  | 83                    | 0.21 |
| 31-35                                  | 13                    | 0.2  | 26                    | 0.7  |
| 36-40                                  | 5                     | 0.1  | 17                    | 0.4  |
| 41-45                                  | 1                     | —    | 6                     | 0.2  |
| 46-50                                  | 1                     | —    | —                     | —    |
| 51-55                                  | 1                     | —    | —                     | —    |
| Total                                  | 5411                  |      | 3965                  |      |

\*Percentage show the composition of all *Eisenia*

が育ち（生残率 94.0%），また広間隔の 451 個中 433 個にアラメが育っていた（96.0%）。密間隔の着床具（ $n=604$ ）のアラメの個体数は 1~27 個体/SSD（計 5,411 個体。平均 9.0 個体，標準偏差  $\pm 5.7$  個体），サイズは 1~52 cm（ $4.5 \text{ cm} \pm 5.09 \text{ cm}$ ）であった。広間隔の着床具（ $n=433$ ）で，着床具あたりのアラメの生育数は 1~35 個体/SSD（計 3,965 個体， $9.2 \text{ 個体} \pm 6.1 \text{ 個体}$ ），サイズは 1~44 cm（ $8.1 \text{ cm} \pm 6.9 \text{ cm}$ ）であった。広間隔の着床具では，密間隔にくらべてアラメのサイズが大きかった。密間隔では，5 cm 以下の個体が 76.7% を占め，広間隔では 6~25 cm の個体が，密間隔の 2 倍以上に増えていた。密間隔と広間隔では，個体数に有意差はなかったが（ $t$ -test,  $p=0.590$ ），サイズには有意な差があった（ $p < 0.001$ ）。

実験開始後 188 日目に間隔を広げた 244 個の着床具には，413 日目（2013 年 12 月 4 日），220 個（生残率 90.2%）の着床具に 606 個体のアラメが生育していた。中央葉は発達していたが，側葉が育ったものは末枯れが始まったものも多かった。生長については，側葉があるものは茎長，側葉数，最大側葉長を，側葉のないものは茎長と葉長求め

た。アラメの 497 個体（79.4%）には側葉が育ち，109 株には側葉は見られなかった。着床具（ $n=220$ ）あたりのアラメは 1~8 個体/SSD（平均 2.8 標準偏差  $\pm 1.6$ ）であった。

側葉の育った 497 個体は，Tables 6, 7 に示したように，茎長 1~39 cm（ $10.7 \text{ cm} \pm 7.0 \text{ cm}$ ），側葉数 1~17 枚（ $8.0 \text{ 枚} \pm 3.6 \text{ 枚}$ ），最大側葉長 1~57 cm（ $23 \text{ cm} \pm 14 \text{ cm}$ ）であった。側葉が無い 108 個体は，茎長 1~7 cm（ $2.0 \text{ cm} \pm 1.1 \text{ cm}$ ），全長（茎長+葉長）3~45 cm（ $16.3 \pm 8.2$ ）であった。側葉が育ったアラメで大きなものは，Fig. 17 のように仮根が着床具を完全に包みこんでいた。

実験 3 では，密配置のまま栽培して 188 日目に平均 9 個体/SSD（ $\pm 5.7$  個体），平均サイズ 4.5 cm（ $\pm 5.1 \text{ cm}$ ）の種苗，98 日目に間隔を広げて 183 日目に 9.2 個体/SSD（ $\pm 6.1$  個体），平均サイズ 8.1 cm（ $\pm 6.9 \text{ cm}$ ）の種苗，さらに密配置のまま栽培して 188 日目に間隔を広げ，417 日目の 2.8 個体，[側葉の育ったアラメ（90.2%。平均茎長 10.7 cm，平均側葉数 7.9 枚，平均最大側葉長 22.8 cm）または側葉の無いアラメ（9.8%。平均茎長 2.0 cm，平均全長 16.3 cm）] などの各種の移植用種苗を得ることができた。

Table 6. Length of stipe and number of pinna of 497 *Eisenia bicyclis* grew on SSDs 413 days after the start of Experiment 3 on October 17, 2012

| Length of stipe (cm) | No. of pinna |     |     |       |       |       | Total |
|----------------------|--------------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
|                      | 1-3          | 4-6 | 7-9 | 10-12 | 13-15 | 16-18 |       |
| 1-5                  | 54           | 62  | 21  | 6     |       |       | 143   |
| 6-10                 | 9            | 45  | 62  | 35    | 5     |       | 156   |
| 11-15                | 2            | 5   | 21  | 32    | 14    | 3     | 77    |
| 16-20                | 2            | 5   | 17  | 42    | 7     | 3     | 76    |
| 21-25                |              |     | 5   | 17    | 3     |       | 25    |
| 26-30                |              | 1   | 1   | 5     | 6     | 1     | 14    |
| 31-35                |              |     |     | 3     | 2     |       | 5     |
| 36-40                |              |     |     |       | 1     |       | 1     |

244 SSDs from 604 SSDs that had been fixed closely until 189 days after the start, then 244 SSDs with *Eisenia bicyclis* were separated and re-fixed widely. 413 days after the start, 606 *Eisenia bicyclis* (497: with pinna, 109: no pinna) grew on 220 SSDs.

Table 7. Lengths of stipe and lengths of the longest pinna of 497 *Eisenia bicyclis* grew on SSDs 413 days after the start of Experiment 3 on October 17, 2012.

| Length of stipe (cm) | Length of the longest pinna (cm) |       |       |       |       |       | Total |
|----------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                      | 1-10                             | 11-20 | 21-30 | 31-40 | 41-50 | 51-60 |       |
| 1-5                  | 87                               | 47    | 8     | 1     |       |       | 143   |
| 6-10                 | 15                               | 70    | 42    | 23    | 6     |       | 156   |
| 11-15                | 3                                | 14    | 21    | 23    | 11    | 5     | 77    |
| 16-20                | 2                                | 9     | 20    | 28    | 15    | 2     | 76    |
| 21-25                |                                  | 1     | 7     | 11    | 3     | 3     | 25    |
| 26-30                |                                  | 1     | 3     | 7     | 2     | 1     | 14    |
| 31-35                |                                  |       | 1     | 2     | 2     |       | 5     |
| 36-40                |                                  |       |       | 1     |       |       | 1     |

244 SSDs from 604 SSDs that had been fixed closely until 189 days after the start, then 244 SSDs with *Eisenia bicyclis* were separated and re-fixed widely. 413 days after the start, 606 *Eisenia bicyclis* (497: with pinna, 109: no pinna) grew on 220 SSDs.

#### 4. 考察

スラグセラミック製の海藻着床具を用いて3回の実験を行い、以下の結果が得られた。

##### 4.1 実験1の問題点

今までのサンゴ用着床具を用いた実験（田 他、

2013）では、遊走子放出用のアラメの止水状態の水槽への投入を約3時間とし、その後はアラメを取り除き、濾過海水かけ流しとエアレーションを行なった。

11月9日と13日の2回の実験は、海藻着床具の設置水深は今までと同じ0.2mで、今までは着

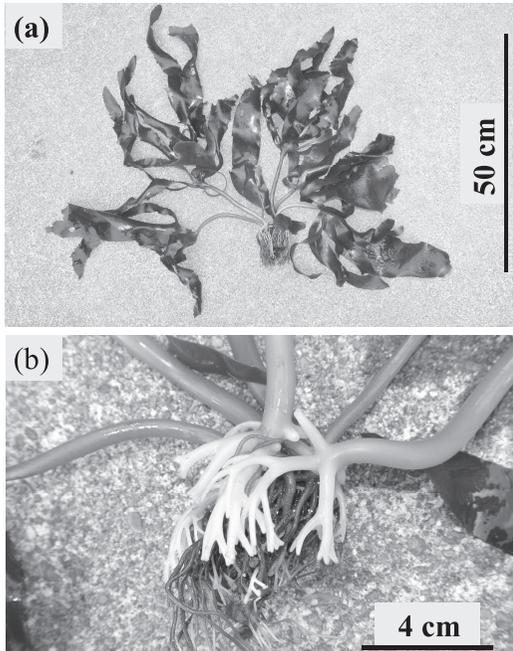


Fig. 17. Example of a seaweed settlement device 413 days after the start of Experiment 3 on October 17, 2012: SSDs were fixed closely until 189 days after the start, and then separated and re-fixed on rack widely. (a) Seven *Eisenia bicyclis* with pinnae, (2) growing sticking roots covered on a SSD.

生約3時間後にアラメを回収していたものを、アラメの投入時刻が遅かったことから、照明の暗い室内での母藻回収を延期し、翌朝回収（+約10時間）とした。11月9日に成熟葉を投入した場合には、遊走子着生数が全体的に少なく着床具間で着生数がばらばらであったため、少数のアラメが大きく生長した。11月13日に成熟葉を投入した場合には、着生数がそれより多く、着生数がばらばらであったため、多数のアラメが小さなまま密生した着床具と少数のアラメが大きく育ったものが混在したと考えられた。

この実験により、(1) アラメ遊走子を全ての着床具に均等に着生させること、(2) 着床具1個に大きなアラメを多数育てることが課題となった。

#### 4.2 遊走子着生法の改善

シュロ縄や細いロープを用いた遊走子着生（関山 他, 1998）は、それらを遊走子液の中で揉むなどして繊維間に遊走子を絡めて着生できる。しかし、平らに密に配置する海藻着床具はそうした

処理はできない（Figs. 6, 8）。架台に配置した海藻着床具は上面が平らなため、葉体が上面を覆った場合、遊走子の着生は阻害される。従来のサンゴ着床具は、円盤型の着床板を鉛直向きにして着生を行なったため、葉体に覆われても、それと密着するのは円盤の最頂部のみで、遊走子が拡散できる空間は確保され、着生数のバラツキが問題にならなかったと推測される。

全ての海藻着床具にアラメ遊走子を均等に着生させるため、(1) 子嚢斑を持たないアラメの葉は水槽に入れない、(2) 海水の遊走子密度を高め、(3) 止水状態でも多少の攪拌を行ない、(4) 投入した葉が同じ場所に留まらないよう適時場所を移動させた。

その結果、実験2では、実験開始後34日目から開始した着床具の観察により、着生密度は高いことが確認できた。同様の着生方法で行なった実験3については、密に配置したままの着床具642個を188日目まで栽培しても、アラメが生育した着床具は94%であった。アラメの生育数は着床具（ $n=604$ ）あたり平均9.0個体/SSD、平均サイズ4.5cmで、小さなアラメが多数育った状態を実現できた。

#### 4.3 着床具間隔を広げる時期

2011年の実験2で得た着床具上面、側面上部、側面下部の顕鏡計数アラメの密度（ $\text{cm}^2$ ）の推移と、目視計数アラメの3部分の生育数（Fig. 16）から、アラメが目視計数できた61日目（上面：2.7個体/ $\text{cm}^2$ ）には、顕微鏡でのみ計数可能なアラメも多数生育し（上面：32個体/ $\text{cm}^2$ ）、目視計数アラメの個体数は増加期にあった。このことから、着床具の間隔を広げるのはこの時点から行えると考えられる。数は76日目（上面：19個体/ $\text{cm}^2$ ）にピークとなり、128日目（上面：12個体/ $\text{cm}^2$ ）までは少しずつ減り、以後は減少速度を速めた。また実験開始後177日目まで密間隔で配置した着床具には、大きなアラメは数株以下しか育っていなかった。さらに338個の着床具から、比較的生育状況の良いものを90個選んで177日目に間隔を広げて計測対象を10個選んだが、アラメの斃死が続き、217日目にはアラメが育った着床具は6個となった。アラメの生育状況が悪化し始める時期に着床具の間隔を広げても、手遅れである。このことから、密間隔に配置した海藻着床具に着生したアラメの栽培は、128日目までが適切である。

実験2の密間隔の着床具は実験開始後177日目にアラメの株数が減少し、葉体が傷んだものも多かったが、実験3では、密間隔188日目のものに

も小さなアラメが広間隔同様に多数（全長は小さいが）、育つという違いがあった。このように2011年は着生実験開始後76日目と177日目の2回、2012年は、98日目と188日目の2回、着床具間隔を広げたが、両年とも最初の間隔広げ（76日目、98日目）では良好な結果が得られた。それに対し、約半年密間隔で栽培したあとの間隔広げ（177日目、188日目）では、アラメの個体数と葉状部長には大きな相違があった。この原因は、Fig. 14に示したように、実験開始後110日目までの水温が、実験3のほうが実験2よりも、平均1.6°C高かったためと考えられる。アラメは水温が高くなると成長が遅くなることから知られている（馬場、2010）。このため実験2では、実験3よりもアラメの成長が早く、競合による株数の減少が、より早く起きたものと推察される。以上のように、海藻着床具の間隔を広げる時期は、遊走子着生後の日数のみで判断するのではなく、着床具上面のアラメが目視観察できるようになってから、ピークを過ぎて、ピーク時の約半数以下になる前に行なうことが重要であろう。実験2, 3で行なったように、1度の着床具の間隔広げで、大きさの異なった移植用アラメを得ることができた。ちなみに、仮根が着床具を完全に包みこんだ状態（Fig. 17）で海藻礁に釘で固定しても、下側のスペーサ部の仮根がつぶれるのみで、アラメ自体を傷つける恐れは少ない。ただし、アラメがこのサイズまで成長すると、現在の海藻着床具の穴（直径3.5 mm）で使用できる釘は約3 mmφまでと細いため、着床具の固定強度の確保が難しい。海藻着床具の穴を直径5.5 mmまで広げれば、約5 mmφまでの太い釘を用いて確実に固定できる見通しが得られた。

#### 4.4 まとめ

スラグセラミック製の海藻着床具を開発し水槽でアラメの遊走子着生を試みた。着床具の上面が平面であるため、アラメの葉体が上面を覆うと、放出された遊走子が拡散するのに必要な空間が閉ざされ、着生数に大きなばらつきが生じた。そこで子囊斑のない葉体は除き、また子囊斑のある部分だけを切りとって、着生に用いた。着生中は水量を減らし、適時、遊走子密度が高いと思われる下層の海水をバケツすくって着床具上にかけ、また着床具上のアラメを適時移動させた。その結果、全ての着床具にほぼ均等にアラメを育てることができた。栽培中に、着床具の上面、側面上部、側面下部に育った若い胞子体の密度を顕微鏡で計数し、アラメが目視できる大きさに成長した後は、目視での計数も加えた。その結果、着床具上面に

着生した遊走子は側面のものより順調に生育し、側面に着生したものは胞子体への成長が遅くなることがわかった。密に固定した着床具の間隔を広げる期間は、着床具上面のアラメが目視できる大きさに生長した時から、ピークを過ぎて、ピーク時の約半数以下（ないし数十株以下）になる前に行なえばよい。遊走子着生後6ヶ月～14ヶ月の間には、8 cmのアラメが9個体育った着床具、14 cmのアラメが6個体育ったもの、側葉が育った大きなアラメ2.8個体のものなど、さまざまな移植用種苗（着床具）を生産できる見通しが得られた。

#### 謝辞

本研究を行なうにあたり、長期間の実験にご支援・ご協力を賜った茨城県水産試験場の皆様、千葉県竹岡天羽漁協の石井登参事、また東京海洋大学修士課程の院生及び卒論生の石本大樹、松本雄二、滝沢孝介、阿部知佳子、今井彩乃氏ほか多くの方々、またアラメ遊走子の着生方法やアラメの育成方法について、東京海洋大学大学院教授荒川久幸博士にご指導を賜った。これらの多くの方々に深謝する。

#### 引用文献

- 荒川久幸、松生治（1990）：褐藻類カジメ・ワカメの遊走子の沈降速度および基質着生に及ぼす海中中粒子の影響。Nippon Suisan Gakkai. 56, 1741-1748.
- 荒川久幸、森永勤（1994）：褐藻類ワカメ・カジメ遊走子の着生率と基質傾斜の関係。Nippon Suisan-gakkai. 60, 461-464.
- 荒武久道（2009）：クロメの分布と藻場造成—宮崎県沿岸。カジメ属の生態学と藻場造成（能登谷正浩編）。恒星社厚生閣。東京。116-140.
- 木村創、山内信（2009）：藻場造成の現状と問題点—和歌山県沿岸。カジメ属の生態学と藻場造成（能登谷正浩編）。恒星社厚生閣。東京。53-71.
- 岡本峰雄（2008）：さんご礁。消える日本の自然（鷲谷いづみ編）。恒星社厚生閣。東京。88-97, 194-205.
- OKAMOTO, M. S. NOJIMA, S. FUJIWARA and Y. FURUSHIMA（2008）：Development of ceramic settlement devices for coral reef restoration using in situ sexual reproduction of corals. Fish Sci. 74, 1245-1253.
- 木下順司（2009）：人工リーフへのカジメ藻場移植と群落の拡大に関する研究。水産工学。45, 169-178.
- 桐山隆哉（2009）：カジメ類の分布変化—長崎県沿岸。カジメ属の生態学と藻場造成（能登谷正浩編）。恒星社厚生閣。東京。93-115.
- 関山重信、松本正喜、川嶋之雄、栗原智明、西尾四良、澤田貴義（1998）：藻類。46, 1-9.

- KOMATSU, T. (1997): Long-term change in the *Zostera* bed area in the Seto Inland Sea (Japan), especially along the coast of the Okayama Prefecture. *Oceanological Acta*. **20**, 209–216.
- 清水浩視 (2002): 大型藻類の種苗生産. 藻場再生技術の開発. *技術開発ニュース*. **98**, 11–12.
- 田井野清也 (2009): カジメ・クロメの藻場造成—高知県沿岸. カジメ属の生態学と藻場造成 (能登谷正浩編). 恒星社厚生閣. 東京. 72–92.
- 谷口和也 (2008): 海中林. 消える日本の自然 (鷺谷いづみ編). 恒星社厚生閣. 東京. 98–104, 210–218.
- 谷口和也 (1996): 海中林造成の基礎と実践. *藻類*. **44**, 103–108.
- 田 闊, 岡本峰雄, 鴨下真吾, 岩田至 (2013): アラメ・カジメの幼体移植のための着床具を用いる種苗育成法の開発. *La mer*. **51**, 105–118.
- 野島哲, 岡本峰雄 (2008): 造礁サンゴの北上と白化. *日本水産学会誌*. **74**, 884–888.
- 向井宏 (2008): 海岸. 消える日本の自然 (鷺谷いづみ編). 恒星社厚生閣. 東京. 68–75, 170–181.
- 馬場将輔 (2010): 室内培養によるアラメ配偶体と幼孢子体の生育に及ぼす温度と光量の影響. *海生研研報*. **13**, 75–82.
- ROEROE KA. M. YAP and M. OKAMOTO (2013): Development of new assessment methods for *Acropora* coral recruitment using coral settlement devices and holes of marine block. *Fish Sci*. **79**, 617–627. DOI 10.1007/s12562-013-0632-7

受付: 平成 26 年 1 月 14 日

受理: 平成 26 年 9 月 10 日

# Parameterization of the eddy diffusivity due to double diffusive convection

Haruka NAKANO<sup>\*1)</sup>, Keishi SHIMADA<sup>2)</sup>, Masao NEMOTO<sup>\*3)</sup> and Jiro YOSHIDA<sup>\*4)</sup>

**Abstract** : The turbulent energy dissipation rates  $\varepsilon$  in the western North Pacific Ocean were observed using a microstructure profiler at 49 casts, and the measured values were converted into diffusivities of heat  $K_T$  and salt  $K_S$ . We obtained a new relationship between the Richardson number  $R_i$  and the buoyancy Reynolds number  $R_{eb}$ , which enables us to use  $R_i$ , instead of  $R_{eb}$ , as an indicator for distinguishing double diffusive convection from turbulence. We further obtained new relationships between  $K_S$ ,  $K_T$ ,  $R_i$  and the density ratio  $R_\rho$  by improving the parameterization proposed by KIMURA *et al.* (2011).

**Keywords** : eddy diffusivity, double diffusive convection, Richardson number

## 1. Background

How can we estimate the eddy diffusivity from general hydrographic observation data? If we can estimate the eddy diffusivity, the knowledge contributes to elucidate modification processes of water masses and to improve large-scale general ocean circulation models (*e.g.* BRYAN 1987; GARGETT and HOLLOWAY 1992).

GARGETT and HOLLOWAY (1992) used different diffusivities for heat and salt in GFDL ocean general circulation model. This difference in diffusivities between heat and salt is produced by double diffusive convection. Their results showed a formation of salinity

minimum in the upper ocean. TALLEY and YUN (2001) investigated modification processes of water mass in the perturbed region between the Kuroshio and Oyashio. They showed that double diffusive convection and cabbeling increase its density. These processes should have effects on producing water mass having salinity minimum called NPIW (North Pacific Intermediate Water).

In the upper ocean, however, turbulence and double diffusive convection can co-exist. As a result, it is arduous to distinguish the role of double diffusive convection from that of turbulence. Thus, INOUE *et al.* (2007) discussed this point in detail. They conducted microstructure observations focusing on eddy diffusivities of salt  $K_S$  and heat  $K_T$  in the perturbed regions where turbulence and double diffusive convection both contribute to mixing. They proposed a simple eddy diffusivity model to account properly for activity of turbulence and double diffusive convection. They also used the combination of the buoyancy Reynolds number  $R_{eb}$  and the density ratio  $R_\rho$  which enables us to distinguish double diffusive convection from turbulence. When  $R_{eb}$  is below 20 and  $R_\rho$  is between 0.5 and 2.0, they suggested that double diffusive

---

1) Corresponding Author,  
Email: d132007@kaiyodai.ac.jp  
Telephone and Fax: 03-5463-0459

2) Oceanographic Observation Center,  
Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato, Tokyo 108-8477, Japan  
Email: kshima0@kaiyodai.ac.jp

3) Email: nemoto@kaiyodai.ac.jp

4) Email: jiroy@kaiyodai.ac.jp

\* Course of Applied Marine Environmental Studies,  
Graduate School of Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato, Tokyo 108-8477, Japan

convection should prevail.

$R_{eb}$ , however, must be calculated from the energy dissipation rate obtained by direct micro-structure measurements. Therefore,  $R_{eb}$  cannot be used commonly in the parameterization of eddy diffusivity and many researchers considered the effect of double diffusive convection by using  $R_\rho$  only. For example, TOYAMA and SUGA (2012) found that salt finger or turbulence contributed to the formation and maintenance of central mode water. They only used  $R_\rho$  to discuss the effects of double diffusive convection. From the point of view of micro-scale mixing studies, their study was not completed because the density ratio indicates activity of double diffusive convection and can not discriminate that from turbulence. The effect of double diffusive convection was not evaluated clearly. Inaccuracy of the mechanism for the formulation and maintenance of central mode water remains to be solved. If we have other indicators which can distinguish double diffusive convection from turbulence, such indicators enable researchers to evaluate the effect of micro-scale mixing precisely. Thus, we need other parameters calculated from general hydrographic measurements to distinguish double diffusive convection from turbulence.

In this context, following LOZOVATSKY and FERNANDO (2012) which discussed the relationship between the Richardson number  $R_i$  and  $R_{eb}$  in the atmosphere in the Salt Lake City, we evaluate  $R_i$  whether it could be used instead of  $R_{eb}$  in the ocean (when  $R_i$  is below 0.25, turbulence occurs (e.g., THORPE 2005)).

$R_i$  and  $R_\rho$  are also used in parameterizations of eddy diffusivity. For example, KIMURA *et al.* (2011) proposed eddy diffusivity parameterizations with  $R_i$  and  $R_\rho$  by the direct numerical simulation. They directly simulated salt finger convection in fine grids by changing  $R_\rho$  and  $R_i$ . They considered some cases whether the field is statically stable or not. They obtained relationships among  $K_s$ ,  $K_T$ ,  $R_i$  and  $R_\rho$ ; however the parameterizations were not evaluated by observation data.

Consequently, we focus on the Richardson number  $R_i$  calculated by CTD and LADCP (Lowered Acoustic Doppler Current Profiler)

data which are commonly used in hydrographic observations. Then, we discuss the relationship between  $R_i$  and  $R_{eb}$ . If we can use  $R_i$  instead of  $R_{eb}$ , it becomes easier to distinguish double diffusive convection from turbulence.

## 2. Analysis method

Our observations were conducted in the R/V Hakuho-maru of the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) during three periods, namely, Nov. 2005 (KH05-4 cruise), May 2007 (KH07-1 cruise) and Oct. 2008 (KH08-3 cruise) (Fig.1). We obtained energy dissipation rates  $\epsilon$  to estimate eddy diffusivities using a microstructure profiler called TurboMAP (Turbulence Ocean Microstructure Acquisition Profiler). It has two shear probes, and one fast response thermistor, and 49 casts were conducted. TurboMAP was dropped freely down to a depth of about 600 db. CTD (SBE) and LADCP observations were also conducted simultaneously at each TurboMAP station.

### 2.1. Identification of double diffusive convection

We calculated density ratio  $R_\rho$  and Turner angle  $T_u$ . First,  $R_\rho$  is defined as

$$R_\rho = \alpha \frac{\partial \theta}{\partial z} / \beta \frac{\partial S}{\partial z}, \quad (2.1)$$

where  $\alpha$  is the thermal expansion and  $\beta$  is the haline contraction coefficients, respectively.  $\partial \theta / \partial z$  and  $\partial S / \partial z$  are the mean vertical gradients of potential temperature and salinity, respectively. Then,  $T_u$  is defined by  $R_\rho$  as

$$T_u = \tan^{-1} \frac{R_\rho + 1}{R_\rho - 1}. \quad (2.2)$$

Salt finger convection is active when  $1 < R_\rho < 2$  ( $72^\circ < T_u < 90^\circ$ ). Diffusive convection is also active when  $0.5 < R_\rho < 1$  ( $-90^\circ < T_u < -72^\circ$ ). KANTHA *et al.* (personal communication) proposed to use 'Circle diagram' together with  $T_u$ . Using this diagram, we can easily judge whether double diffusive convection is active or not. We will use this diagram in the

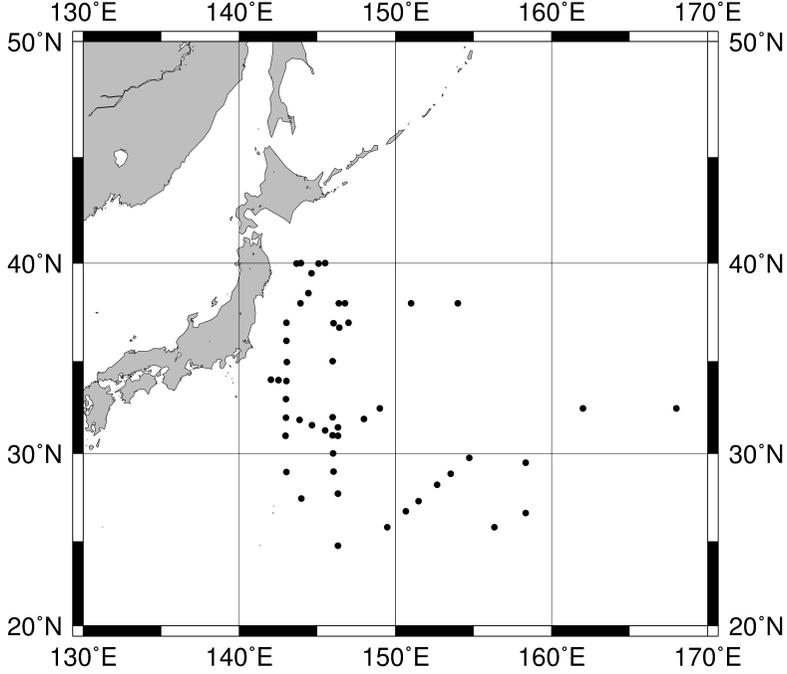


Fig. 1. A map of stations.

following section.

## 2.2. Energy dissipation rate

We obtained  $\varepsilon$ , following the relation obtained by OSBORN (1980),

$$\varepsilon = \frac{15}{2}\nu \overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial z}\right)^2}, \quad (2.3)$$

where  $\nu$  is the molecular viscosity ( $\sim 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s),  $\partial u'/\partial z$  is the vertical shear of the horizontal velocity fluctuations with the over bar denoting the ensemble average.

## 2.3. Eddy diffusivities

We estimated eddy diffusivities when double diffusive convection was active. Following INOUE *et al.* (2007), in order to distinguish double diffusive convection from turbulence, we used the buoyancy Reynolds number  $R_{eb}$  defined by

$$R_{eb} = \frac{\varepsilon}{\nu N^2}, \quad (2.4)$$

where  $N$  is the buoyancy frequency. When  $R_{eb}$  is below 20, double diffusive convection is effective to enhance mixing (e.g., PADMAN and DILLON 1987; GREGG, 1988; INOUE *et al.* 2007; KANTHA *et al.* (personal communication)). In the present study, when  $R_\rho$  is between 1 and 2, and  $R_{eb}$  is below 20,  $K_S^{SF}$  and  $K_T^{SF}$  are estimated by

$$K_S^{SF} = \left(\frac{R_\rho - 1}{1 - \gamma^{SF}}\right) \frac{\varepsilon}{N^2}, \quad (2.5)$$

$$K_T^{SF} = \left(\frac{\gamma^{SF}}{R_\rho}\right) K_S^{SF}, \quad (2.6)$$

(e.g. KELLEY 1986); when  $R_\rho$  is between 0.5 and 1, and  $R_{eb}$  is below 20, and  $K_S^{DC}$  and  $K_T^{DC}$  are estimated by,

$$K_S^{DC} = \gamma^{DC} R_\rho K_T^{DC} = \frac{\gamma^{DC}(1 - R_\rho)}{1 - \gamma^{DC}} \frac{\varepsilon}{N^2}, \quad (2.7)$$

$$K_T^{DC} = \frac{1}{1 - \gamma^{DC}} \frac{1 - R_\rho}{R_\rho} \frac{\varepsilon}{N^2}, \quad (2.8)$$

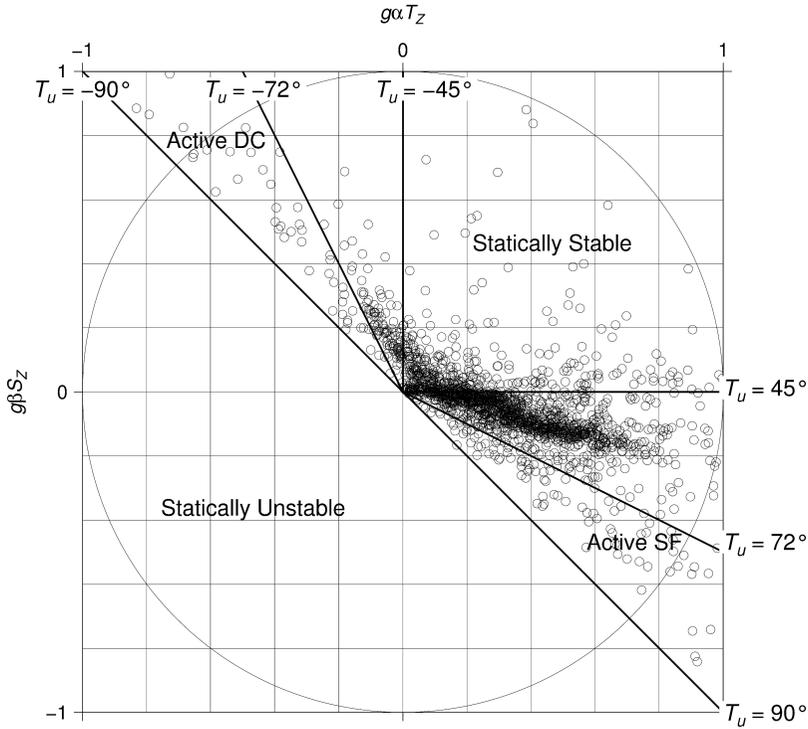


Fig. 2. Circle diagram. Vertical salinity gradient ( $g\beta S_z$ ) and temperature gradient ( $g\alpha T_z$ ) are taken in horizontal and vertical axis, respectively. Solid lines show the value of Turner angle. Small circles are observed layers.

(e.g. KELLEY 1984), where *SF* stands for Salt Finger convection, *DC* stands for Diffusive Convection,  $\gamma$  is the density flux ratio due to double diffusive convection defined by

$$\gamma = \frac{\alpha F_T}{\beta F_S}, \quad (2.9)$$

with  $\alpha F_T$  and  $\beta F_S$  the vertical density fluxes due to heat and salt, respectively, and related to  $R_\rho$  such that

$$\gamma^{SF} = \sqrt{R_\rho} (\sqrt{R_\rho} - \sqrt{R_\rho - 1}), \quad \text{KUNZE (1987),} \quad (2.10)$$

$$\gamma^{DC} = \frac{1/R_\rho + 1.4(1/R_\rho - 1)^{3/2}}{1 + 14(1/R_\rho - 1)^{3/2}}, \quad \text{KELLEY (1990).} \quad (2.11)$$

By the definition (OSBORN 1980), we

obtained eddy diffusivities due to turbulence as

$$K_\rho^{Turb} = K_T^{Turb} = K_S^{Turb} = \frac{Rf}{1-Rf} \cdot \frac{\epsilon}{N^2} = \Gamma \cdot \frac{\epsilon}{N^2}. \quad (2.12)$$

Here,  $Rf$  is the flux Richardson number assumed to be 0.17, then the mixing efficiency  $\Gamma$  becomes 0.2 for isotropic turbulence (SCHMITT *et al.* 2005). *Turb* stands for Turbulence. Hereafter, we use  $K_T^{Obs}$  as representation of  $K_T^{Turb}$ ,  $K_T^{SF}$  or  $K_T^{DC}$ .  $K_S^{Obs}$  also of  $K_S^{Turb}$ ,  $K_S^{SF}$  or  $K_S^{DC}$ . *Obs* stands for the observation value.

#### 2.4. The Richardson number

The Richardson number  $R_i$  was calculated using the buoyancy frequency  $N$  and the vertical shear of horizontal velocity  $S$ , both defined at 10 m vertical scale, such that

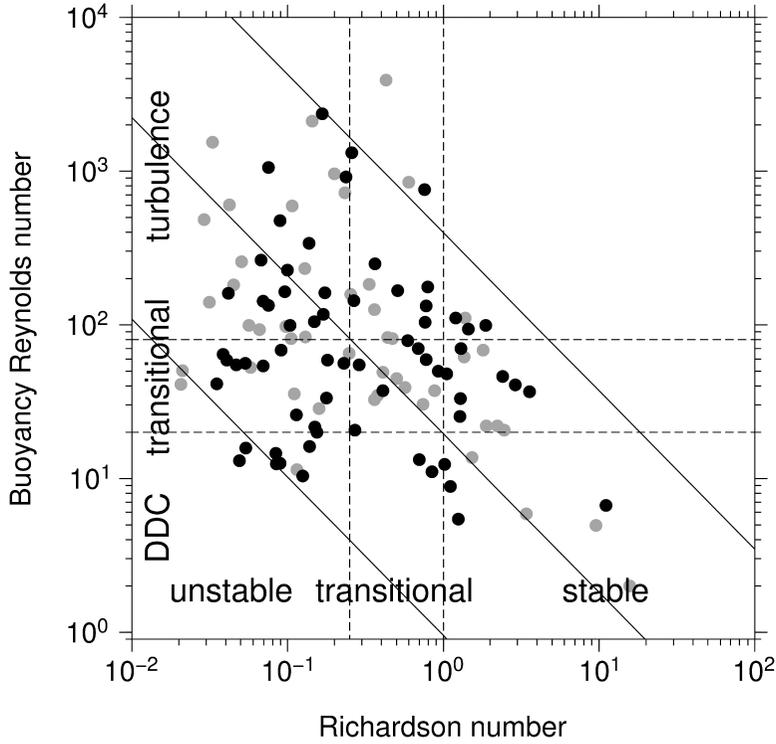


Fig. 3. Relationship between  $R_{eb}$  and  $R_i$  when double diffusive convection occur ( $0.5 \leq R_\rho < 1$ : gray,  $1 \leq R_\rho < 2$ : black). Middle solid line shows EOF first mode. Contribution of EOF first mode is 72%, and that of EOF second mode is 28%. The upper and lower limits indicate 95% confidence interval.

$$R_i = \frac{N^2}{S^2} = \frac{N^2}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}, \quad (2.13)$$

where  $u$  and  $v$  are horizontal velocities, respectively.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Activity of double diffusive convection

The circle diagram plot shows that double diffusive convection was not so active in our observation area (Fig. 2). The percentage of active double diffusive convection layer was about 10%. A large amount of data clustered in the weak SF ( $2 < R_\rho$ ) and DC ( $R_\rho < 0.5$ ) areas.

#### 3.2. Comparison of the Richardson number and the buoyancy Reynolds number

When double diffusive convection is active

( $0.5 < R_\rho < 2$ ), the relationship between  $R_{eb}$  and  $R_i$  (Fig. 3) is

$$R_{eb} = 19.5R_i^{-1.03}. \quad (3.1)$$

When  $R_{eb}$  is about 20,  $R_i$  is unity. This means that this value of  $R_{eb}$  indicates the possibility of the layer becomes whether stable or not. However, when we consider the flux Richardson number as a criterion of turbulence through the energy argument, the criterion of  $R_i$  should be 0.25. When we put this value into eq. (3.1),  $R_{eb}$  is about 80. By the histograms of  $R_i$  and  $R_{eb}$ , modes of  $R_i$  and  $R_{eb}$  take these values (Fig. 4).

Fig. 3 also indicates that even when the range of  $R_{eb}$  is between 20 and  $10^3$ , double diffusive convection should occur. In this range the turbulence should suppress the onset of double diffusive convection; however, TAYLOR

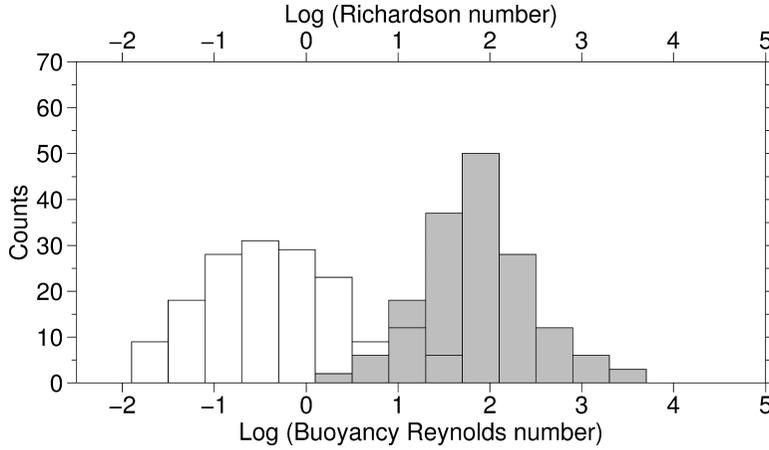


Fig. 4. Histograms of the Richardson number (white) and the buoyancy Reynolds number (gray).

(1991) showed that turbulence and double diffusive convection might co-exist under the same situation since salt finger convection appears rapidly after it is destroyed by turbulence. SMYTH *et al.* (2005) also indicated that values of  $K_S$  and  $K_T$  are different when  $R_{eb}$  is less than  $O(10^2)$ . Thus, when  $R_i$  is over 0.25 ( $R_{eb}$  is under 80),  $K_S$  and  $K_T$  should be affected by double diffusive convection. In the next section, we use  $R_i$  instead of  $R_{eb}$ .

### 3.3. Parameterization proposed by Kimura *et al.* (2011)

We compared  $K_S^{Obs}$  and  $K_T^{Obs}$  calculated in this study with those obtained by KIMURA *et al.* (2011) parameterizing eddy diffusivities by DNS with  $R_i$  and  $R_\rho$  (hereafter, we call this as DNS parameterization). DNS parameterizations are conducted in limited situations; therefore it cannot be applied to observational results. However, we adapted their functional form to our observation and tried to compare with microstructure data.

When  $1 < R_\rho < 2$ , DNS parameterizations for  $K_S$  and  $K_T$  are expressed as

$$K_S^{SF,DNS}(R_\rho, R_i) = 4.38 \times 10^{-5} R_\rho^{-2.7} R_i^{0.17}, \quad (3.2a)$$

$$K_T^{SF,DNS}(R_\rho, R_i) = 3.07 \times 10^{-5} R_\rho^{-4.0} R_i^{0.17}. \quad (3.2b)$$

When  $R_\rho$  becomes large,  $K_S^{SF,DNS}$  and  $K_T^{SF,DNS}$

become small. When  $R_i$  becomes large,  $K_S^{SF,DNS}$  and  $K_T^{SF,DNS}$  become large. When we put observed  $R_i$  and  $R_\rho$  into DNS equations (Fig. 5a, b),  $K_S^{SF,DNS}$  and  $K_T^{SF,DNS}$  (small black circles) are found to be smaller than  $K_S^{Obs}$  and  $K_T^{Obs}$  (large black squares with error bars). Particularly, if we applied DNS parameterization when  $R_\rho$  is under 5,  $K_T^{SF,DNS}$  is obviously underestimated because it becomes small rapidly due to the functional dependence of  $R_\rho$ . However, dependences on  $R_\rho$  of  $K_S^{SF,DNS}$  and  $K_T^{SF,DNS}$  are similar to  $K_S^{Obs}$  and  $K_T^{Obs}$  (Fig. 5a, b).

Here, the average value of the eddy diffusivity in the upper 1000 m is about  $(2-4) \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$  (WATERHOUSE *et al.* 2014). If we use ordinary functional form of  $K_T^{SF,DNS}$ , it becomes lower than the average value. This means that DNS parameterizations are not applied to oceanic data directly. Thus, we changed the functional form of  $K_T^{SF,DNS}$  to the same form as that of  $K_S^{SF,DNS}$  because the functional form of  $K_S^{SF,DNS}$  was good performer when we use DNS parameterization with  $R_\rho$  under 5 (Fig. 5a, b).

Then we calculated coefficients in order to fit to the observed values by following equations.

$$K_S^{Obs} = C^S R_\rho^{-2.7} R_i^{0.17}, \quad (3.3a)$$

$$K_T^{Obs} = C^T R_\rho^{-2.7} R_i^{0.17}, \quad (3.3b)$$

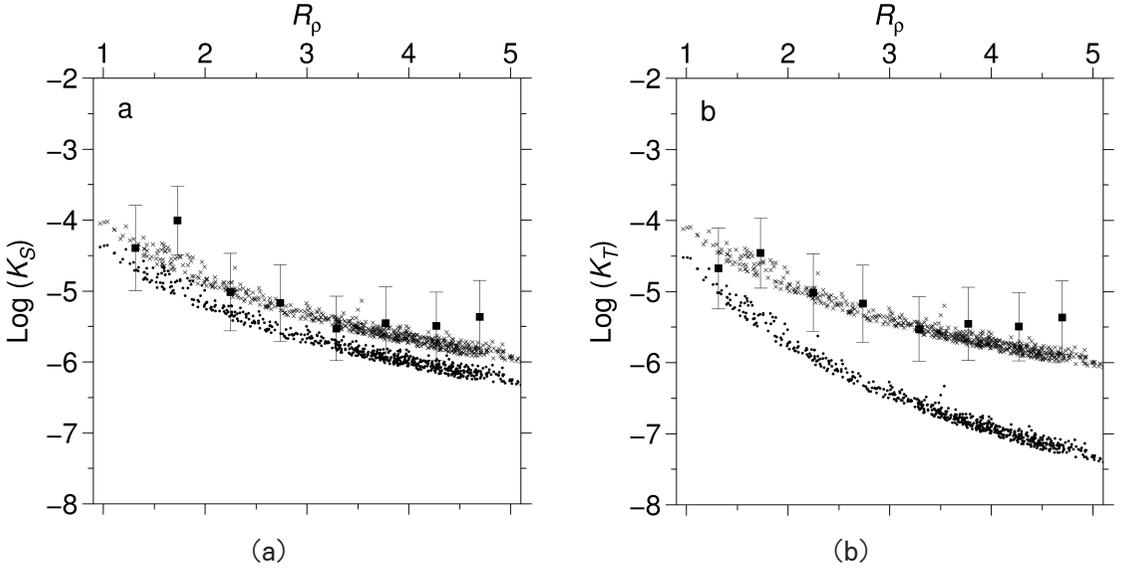


Fig. 5. Relationships between  $K_T$ ,  $K_S$  and  $R_\rho$ . Squares show the average of observation results, and vertical lines show error bars. Black circles show the original DNS results. Black crosses show the improved DNS results. (a:  $K_S$ , b:  $K_T$ ).

where  $C^S$  and  $C^T$  are the coefficients of each layers, and

$$K_S^{Obs} = AR_\rho^{-2.7}R_i^{0.17}, \quad (3.4a)$$

$$K_T^{Obs} = BR_\rho^{-2.7}R_i^{0.17}. \quad (3.4b)$$

Here,

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n C_i^S}{n}, \quad (3.5a)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n C_i^T}{n}, \quad (3.5b)$$

where  $n$  is a number of layers. Then, we can finally obtain the new relationships

$$K_S^{Imp}(R_\rho^{Obs}, R_i^{Obs}) = 9.35 \times 10^{-5} R_\rho^{-2.7} R_i^{0.17}, \quad (3.6a)$$

$$K_T^{Imp}(R_\rho^{Obs}, R_i^{Obs}) = 7.61 \times 10^{-5} R_\rho^{-2.7} R_i^{0.17}. \quad (3.6b)$$

We can confirm that improved DNS parameterizations agree fairly well with the observed results (Fig. 5a, small black crosses).

## 5. Conclusion

We have estimated and parameterized the eddy diffusivity. As a result, we have obtained a new relationship between the Richardson number  $R_i$  and the buoyancy Reynolds number  $R_{eb}$ , which enables us to use  $R_i$  as an indicator distinguishing double diffusive convection from turbulence instead of  $R_{eb}$ .

Likewise, new relationships of  $K_T$  or  $K_S$  focusing  $R_\rho$  and  $R_i$  have been determined by improving the DNS parameterization proposed by KIMURA *et al.* (2011). Thus, we can estimate the effect of salt finger convection by the fine scale parameter.

## Acknowledgments

We would like to express our gratitude to members of R/V Hakuho-maru of the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. A number of constructive comments on the manuscript by Drs. Y. Kitade, D. Hirano and T. Hibiya are greatly appreciated. Late Prof. Kawabe gave us tremendous supports to our observation. Thanks are extended to two anonymous reviewers who reviewed our manuscript carefully. This work was partly

supported by the Sasakawa Scientific Research Grant from The Japan Science Society.

## References

- BRYAN, F. O. (1987): Parameter sensitivity of primitive equation ocean general circulation models. *J. Phys. Oceanogr.*, **17**: 970–985.
- GARGETT, A. E. and G. HOLLOWAY (1992): Sensitivity of the GFD model to different diffusivities for heat and salt. *J. Phys. Oceanogr.*, **22**: 1158–1177.
- GREGG, M. C. (1988): Mixing in the thermohaline staircase east of Barbados, in *Small-Scale Turbulence and Mixing in the Ocean*, J. C. J. Nihoul and B. M. Jamart, Eds., Elsevier Oceanography Series, Vol. **46**. pp. 453–470.
- INOUE, R., H. YAMAZAKI, F. WOLK, T. KOHNO and J. YOSHIDA (2007): An estimation of the buoyancy flux for a mixture of turbulence and double diffusion. *J. Phys. Oceanogr.*, **37**: 611–624.
- Kantha, L, S. Carniel, M. Sclavo and A. Bergamasco (2013): On identifying double diffusive mixing in the ocean. (Unpublished manuscript)
- KELLEY, D. E. (1984): Effective diffusivities within oceanic thermocline staircases. *J. Geophys. Res.*, **89**: 10484–10488.
- KELLEY, D. E. (1986): Oceanic thermocline staircases. PhD Dissertation, Dalhousie University. 333 pp.
- KELLEY, D. E. (1990): Fluxes through diffusive staircases: a new formulation. *J. Geophys. Res.*, **95**: 3365–3371.
- KIMURA, S., W. D. SMYTH and E. KUNZE (2011): Turbulence in a sheared, salt-fingering-favorable environment: anisotropy and effective diffusivities. *J. Phys. Oceanogr.*, **41**: 1144–1159.
- KUNZE, E. (1987): Limits on growing finite-length salt fingers: a Richardson number constraint. *J. Mar. Res.*, **45**: 533–556.
- LOZOVATSKY, I. D. and H. J. S. FERNANDO (2012): Mixing efficiency in natural flow. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2013 371, doi:10.1098/rsta.2012.0213.
- OSBORN, T. R. (1980): Estimates of the local-rate of vertical diffusion from dissipation measurements. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**: 83–89.
- PADMAN, L. and T. M. DILLON (1987): Vertical heat fluxes through the Beaufort Sea thermohaline staircase. *J. Geophys. Res.*, **92** : 10799–10806.
- SCHMITT, R. W., J. R. LEDWELL, E. T. MONTGOMERY, K. L. POLZIN and J. M. TOOLE (2005): Enhanced diapycnal mixing by salt fingers in the thermocline of the Tropical Atlantic. *Science* **308**: 685–688.
- SMYTH, W. D., J. D. NASH and J. N. MOUM (2005): Differential diffusion in breaking Kelvin-Helmholtz billows. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**: 1004–1022.
- TALLEY, L. D. and J. Y. YUN (2001): The role of cabbelling and double diffusion in setting the density of the North Pacific intermediate water salinity minimum. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**: 1538–1549.
- TAYLOR, J. (1991): Laboratory experiments on the formation of salt fingers after the decay of turbulence. *J. Geophys. Res.*, **96**: 12497–12510.
- THORPE, S. A. (2005): *The turbulent ocean*. Cambridge University Press, 439 pp.
- TOYAMA, K. and T. Suga (2012): Roles of mode waters in the formation and maintenance of central water in the North Pacific. *J. Oceanogr.*, **68**: 79–92.
- WATERHOUSE, A., J. MacKinnon, J. Nash, M. Alford, E. Kunze, H. Simmons, K. Polzin, L. St. Laurent, O. Sun, R. Pinkel, L. D. Talley, C. Whalen, T. Huussen, G. Cater, I. Fer, S. Waterman, A. Naveira-Garabato, T. Sanford and C. Lee (2014): Global patterns of diapycnal mixing from measurements of the turbulent dissipation rate. *J. Phys. Oceanogr.*, doi:10.1175/JPO-D-13-0104.1 (in press).

*Received: July 29, 2014*

*Accepted: October 2, 2014*

## オウギガニヤドリムシの寄生が オウギガニの形態と Lipofuscin 蓄積に与える影響

渡邊隆司\*・横田賢史・浜崎活幸・Carlos A. STRÜSMANN・渡邊精一

### Effects of the parasite *Xantion spadix* on the accumulation of the age pigment lipofuscin and external morphology of the host, *Leptodius exaratus*

Ryuji WATANABE\*, Masashi YOKOTA, Katsuyuki HAMASAKI,  
Carlos A. STRÜSSMANN, Seiichi WATANABE.

**Abstract** : The present study aimed to clarify the parasitic effects of *Xantion spadix* on the host, *Leptodius exaratus*, especially on its external morphology and the ratio of accumulation of the age pigment lipofuscin (LF). The crabs were collected from May 2009 to April 2010 at rocky shores near Banda, Tateyama Bay, Chiba Prefecture. Parasitized males showed abdominal widening and chela miniaturization whereas females had abdominal slimming. Further, parasitized individuals of both sexes showed decreased LF accumulation. These results indicate that *X. spadix* infection affects the secondary growth of *L. exaratus*. The effects on the accumulation of LF indicate that parasitized individuals should be excluded from LF-based age estimation.

**Keywords** : morphology, growth, parasite, *Xantion spadix*, *Leptodius exaratus*, age pigment, lipofuscin

#### 1. 序論

オウギガニヤドリムシ *Xantion spadix* は等脚目ヤドリムシ亜目に属するカニヤドリムシ科の生物である。ヤドリムシ亜目は 1986 年の時点で約 500 種報告されている (Markham, 1986)。日本国内ではエビヤドリムシ科 Bopyridae, アミヤドリムシ科 Dajidae, カニヤドリムシ科 Entoniscidae, クリプトニスクス科 Cryptoniscidae, キプロニスクス科 Cyproniscidae, 及びフジツボヤドリムシ科 Hemioniscidae の 6 科 100 種あまりが報告されている (長澤, 1999; 齊藤ら, 2000)。そのうち約 90 種がエビヤドリムシ科であり, 短尾類を宿主とするものは 15 種が確認されている (溝口ら, 2002)。またカニヤドリムシ科についても日本からは短尾類または異尾類に寄生する 10

種が知られている (溝口ら, 2002)。オウギガニヤドリムシは房総半島から八重山列島, さらにインド・太平洋などの岩礁域やサンゴ礁などにみられる十脚類オウギガニ *Leptodius exaratus* に特異的に寄生する。カニヤドリムシ科の基本的な生活サイクルは椎野 (1964) が明らかにしており, 短尾類の体腔内から外界に向けて雌が育囊よりエビカリディア幼生を放出する。この幼生は中間宿主である橈脚類の側部に附着し, ミクロニスクス幼生に変態・成長後, クリプトニスクス幼生に変態し, 宿主の橈脚類から離れて遊泳し, 最終宿主である短尾類の体腔内に入り込み繁殖を行う。また, ヤドリムシ類では宿主特異性があり, オウギガニに寄生するものはオウギガニヤドリムシのみである。オウギガニを宿主とする寄生虫はこのオウギガニヤドリムシとオウギガニエラムシ *Grapsicephon rotundum* である。この 2 種については溝口ら (2002) が寄生によるオウギガニの形態変化について論じている。しかし, いずれの研究も詳細なデータは示されていない。また, 使

\*連絡先: 渡邊 隆司  
〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7  
東京海洋大学品川キャンパス  
E-mail: sinkaniwar@gmail.com

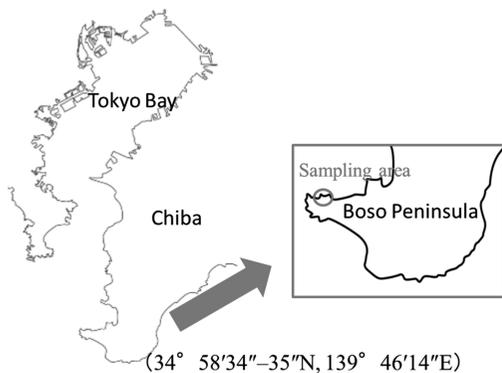


Fig. 1. Map showing the study site of Banda area ( $34^{\circ} 58'34''-35^{\circ} N, 139^{\circ} 46'14''E$ ) at Boso Peninsula, Chiba Prefecture, Japan.

用している標本に大型のものが見られないこともあり、生態学的知見は少ないと言える。本研究ではオウギガニの一年間のサンプルからオウギガニヤドリムシの寄生によるオウギガニの成長への影響を調べた。また、甲殻類の年齢指標として細胞質内の不飽和脂肪酸の過酸化によりリソソーム内に形成される不溶性蛍光色素 Lipofuscin が注目されている。リソソームによって細胞内消化された異物の残余物質であり、加齢性色素あるいは消耗性色素とも呼ばれる。肝細胞、心筋線維、神経細胞における固定性分裂終了細胞のリソソーム内に蓄積する (Sohal and Wolfe 1986; Terman and Brunk, 1998; 遠藤, 1991)。現在この Lipofuscin を年齢形質として、さまざまな種類の甲殻類の年齢群組成を推定する研究が行われている (Sheehy, 1990a, 1990b; 遠藤, 1991; Bluhm and Brey, 2001; Hartnoll, 2001; Kodama *et al.* 2005, 2006; Islam *et al.* 2007; Sheehy and Prior, 2008; Vogt, 2012)。また、オウギガニについても年齢形質としての有用性が示唆されている (渡邊ら, 2012)。本研究はオウギガニヤドリムシ寄生による最終宿主オウギガニの成長と Lipofuscin 蓄積への影響について報告する。

## 2. 材料と方法

### 2.1 標本の採取

2007年5月～2008年4月までの期間千葉県館山市の東京海洋大学水圏科学フィールド教育研究センター館山ステーション (坂田) 近郊の磯 ( $34^{\circ} 58'34''-35^{\circ} N, 139^{\circ} 46'14''E$ ) (Fig. 1) にて毎月大潮前後の干潮時にオウギガニの採集を行い、10%中性ホルマリンで固定後甲幅、甲長、鉗脚長、鉗

脚幅、腹節幅 (第5腹節幅)、湿重量の測定を行った。その後解剖により体腔内におけるオウギガニヤドリムシ寄生の有無を確認した。

### 2.2 寄生による形態と成長への影響

調査期間における3か月ごとの甲幅組成を作成し、寄生されたオウギガニのサイズを明らかにするとともに寄生率を算出した。また、正常個体と被寄生個体の甲幅に対する各部及び湿重量の関係を共分散分析 (ANCOVA) にかけて回帰直線の傾きを比較することにより寄生による成長への影響を検討した。なおオウギガニは鉗脚に左右性があるためサイズの大きい方の鉗脚の正常個体と被寄生個体について比較した。また、宿主に融合前の未成熟な雌が体腔内に見られた個体やオウギガニエラムシが寄生している個体については計測から除外した。

### 2.3 寄生による Lipofuscin 蓄積への影響

2007年6～8月に採集したオウギガニ標本より脳神経節を摘出し、渡邊ら (2012) と同じく脳神経節組織内の嗅葉神経細胞塊 (OLCM) における Lipofuscin 顆粒の面積比から Lipofuscin の蓄積量を測定した。オウギガニの Lipofuscin 蓄積量を被寄生個体と正常個体で比較を行い、オウギガニヤドリムシの寄生がオウギガニの Lipofuscin 蓄積に対する影響の有無を検討した。

## 3. 結果

### 3.1 野外調査結果

オウギガニは合計 533 個体採集された。そのうち正常個体の雄は 246 個体、雌は 219 個体だった。被寄生個体は 68 個体で、そのうち雄は 28 個体、雌は 40 個体だった。採集したオウギガニの甲幅・甲長・湿重量への影響を見ると正常個体の甲幅サイズは雄が 6.32～37.24 mm、雌が 9.17～31.45 mm、被寄生個体では雄が 9.68～23.88 mm、雌が 11.44～28.44 mm であった。甲長では正常個体で雄が 4.6～23.21 mm、雌が 6.15～19.82 mm、被寄生個体では雄が 6.51～15.58 mm、雌が 7.88 mm～18.49 mm であった。湿重量は正常個体では雄が 0.05～12.54 g、雌が 0.23～9.8 g、被寄生個体では雄が 0.25～4.13 g、雌が 0.46～6.33 g であった。

### 3.2 オウギガニヤドリムシの寄生状況

オウギガニヤドリムシの寄生率はオウギガニの繁殖期の初期である 2007年5～7月では雄 5.75%、雌 18.18%、全体では 10.00% となり年間を通して寄生率は最も低かった。繁殖期の後期で

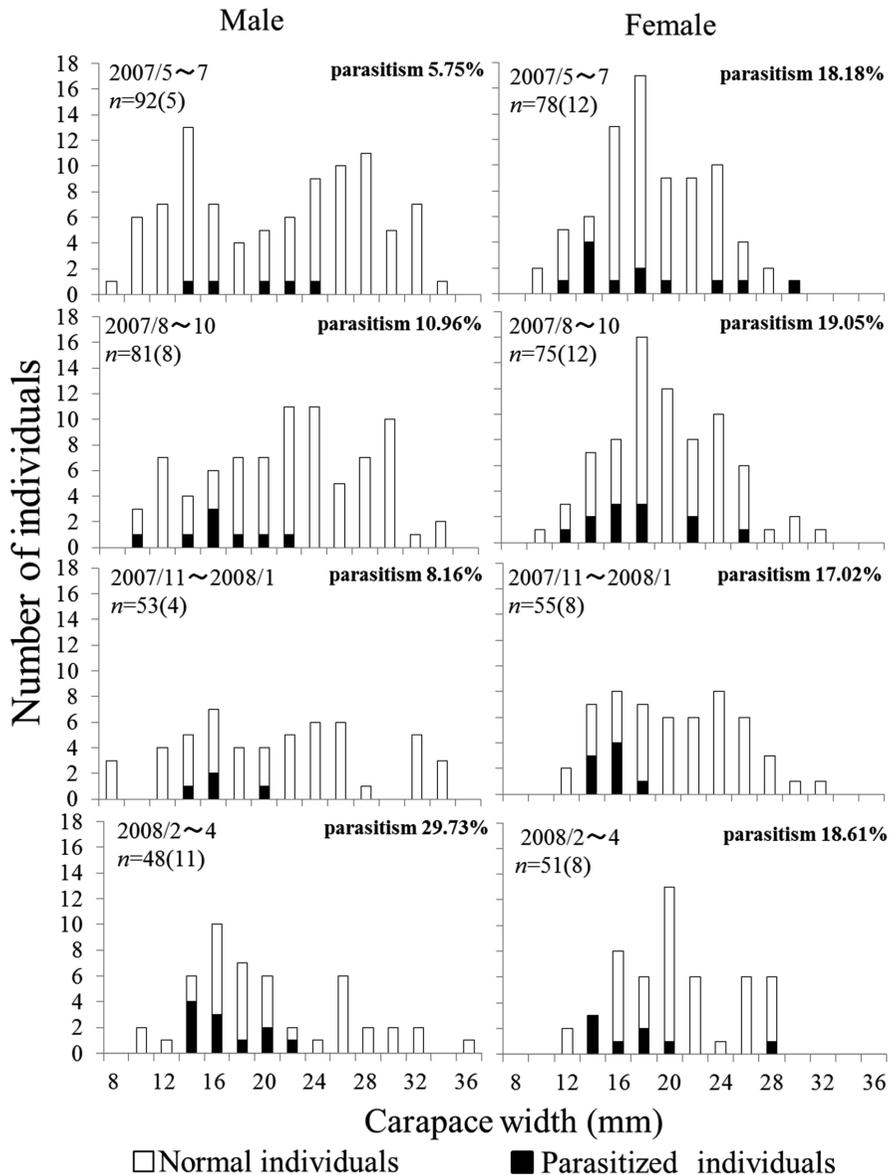


Fig. 2. Seasonal changes in size distribution of the crab, *Leptodius exaratus*. Shading indicates individuals parasitized by *Xanthion spadix*. “( )” are the number of female individuals

ある 2007 年 8~10 月では雄 10.96%, 雌 19.05%, 全体で 12.82%であった。冬季である 2007 年 11~2008/1 月では雄 8.16%, 雌 17.02%, 全体で 11.11%であった。春先になり徐々に気温が上がることでオウギガニが成長・成熟を始める 2008 年 2~4 月では雄 29.73%, 雌 18.61%, 全体で

19.19%と寄生率が最も高かった。甲幅組成を見ると被寄生個体は 20 mm 以下の小型個体に多く、春先を除き雄の寄生率は雌よりも低かった。また 26 mm 以上の大型サイズの被寄生個体は雌のみにもみられた (Fig. 2)。

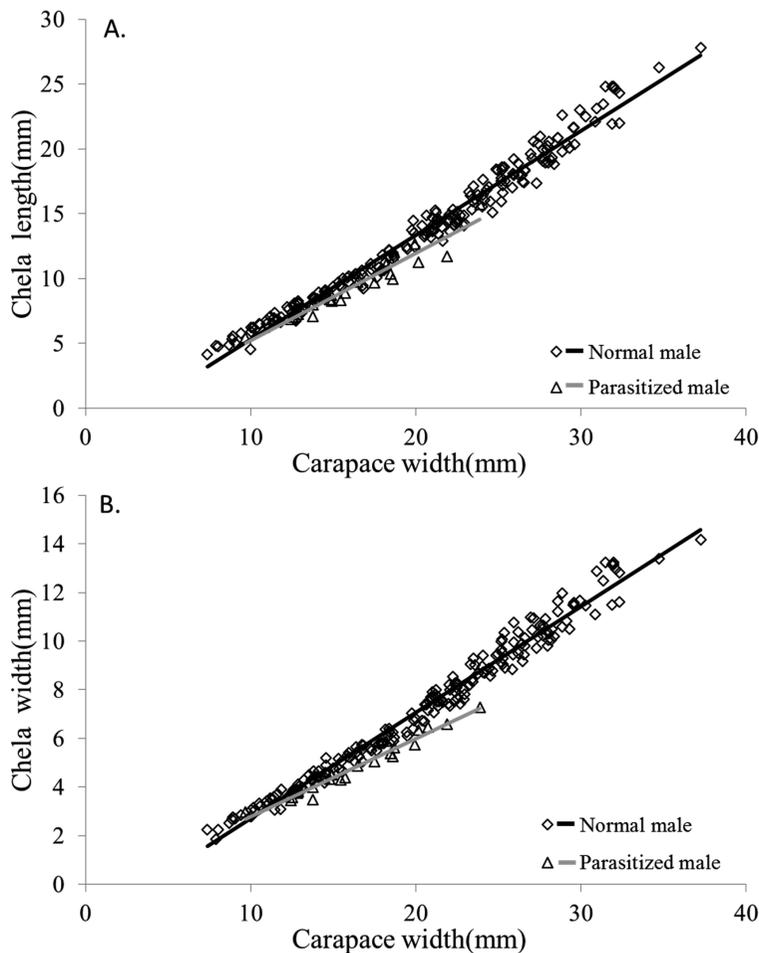


Fig. 3. Relationship of chela length (A) and width (B) on carapace width in normal and parasitized males of *Leptodius exaratus*.

### 3.3 寄生による形態・成長への影響

正常個体と被寄生個体における甲幅 (CW) と甲長 (CL) の関係式は, 雄では

$$CL = 0.608 CW + 0.889, R^2 = 0.996,$$

$$CL = 0.634 CW + 0.364, R^2 = 0.993$$

となり, 雌では

$$CL = 0.615 CW + 0.798, R^2 = 0.995,$$

$$CL = 0.625 CW + 0.504, R^2 = 0.994$$

であった。雌雄とも正常個体と被寄生個体に有為差は認められなかった (傾き: ANCOVA;  $P > 0.05$ )。

正常個体と被寄生個体における甲幅 ( $\log_{10}CW$ ) と湿重量 ( $\log_{10}WW$ ) の関係式は, 雄では

$$\log_{10}WW = 3.040 \log_{10}CW - 3.565, R^2 = 0.990,$$

$\log_{10}WW = 3.039 \log_{10}CW - 3.599, R^2 = 0.964$  となり, 雌では

$$\log_{10}WW = 2.888 \log_{10}CW - 3.374, R^2 = 0.972,$$

$$\log_{10}WW = 2.933 \log_{10}CW - 3.481, R^2 = 0.980$$

となり, 雌雄とも正常個体と被寄生個体に有為差は認められなかった (傾き: ANCOVA;  $P > 0.05$ )。

鉗脚への影響を見ると正常個体と被寄生個体における甲幅と鉗脚長 (Chl) の関係は (Fig. 3A), 雄では

$$Chl = 0.804 CW - 2.726, R^2 = 0.978,$$

$$Chl = 0.671 CW - 1.472, R^2 = 0.928$$

となり, 雌では

$$Chl = 0.647 CW - 0.700, R^2 = 0.973,$$

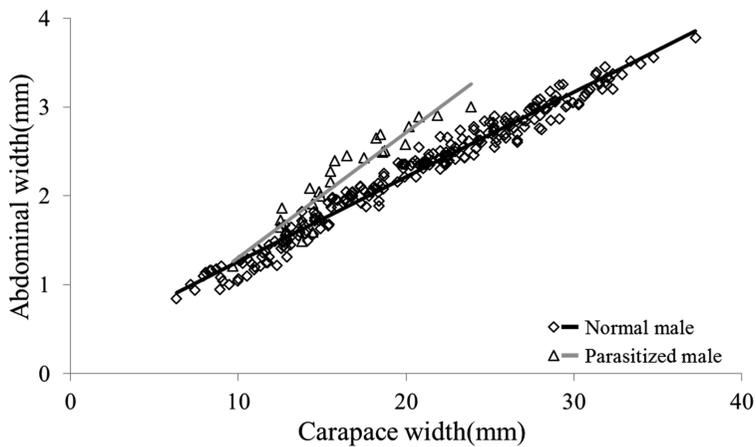


Fig. 4. Relationship of abdominal width on carapace width in normal and parasitized males of *Leptodius exaratus*.

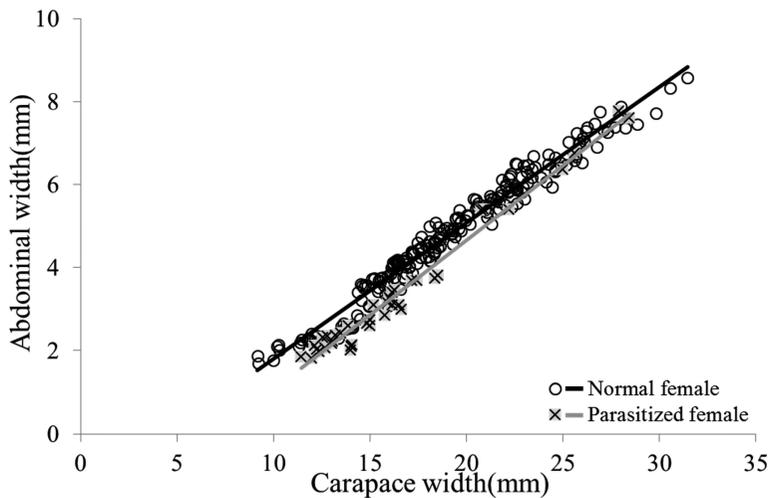


Fig. 5. Relationship of abdominal width on carapace width in normal and parasitized females of *Leptodius exaratus*.

$$\text{Chl} = 0.679 \text{ CW} - 1.686, R^2 = 0.969$$

となり雄の被寄生個体の鉗脚に発達不良がみられた (傾き: ANCOVA;  $P < 0.01$ )

正常個体と被寄生個体における甲幅と鉗脚幅 (Chw) の関係は (Fig. 3B), 雄では

$$\text{Chw} = 0.436 \text{ CW} - 1.654, R^2 = 0.980,$$

$$\text{Chw} = 0.320 \text{ CW} - 0.401, R^2 = 0.963$$

となり被寄生個体の鉗脚に発達不良がみられた (傾き: ANCOVA;  $P < 0.01$ )

雌では

$$\text{Chw} = 0.352 \text{ CW} - 0.721, R^2 = 0.966,$$

$$\text{Chw} = 0.358 \text{ CW} - 0.994, R^2 = 0.982$$

となり雌では寄生による影響は見られなかった (傾き: ANCOVA;  $P > 0.01$ )。

腹節を見ると, 甲幅と腹節幅 (AW) の関係は, 雄では

$$\text{AW} = 0.141 \text{ CW} - 0.100, R^2 = 0.883,$$

$$\text{AW} = 0.095 \text{ CW} + 0.310, R^2 = 0.974$$

となり被寄生個体の腹節幅が大きくなる傾向がみられた (傾き: ANCOVA;  $P < 0.01$ ) (Fig. 4)。

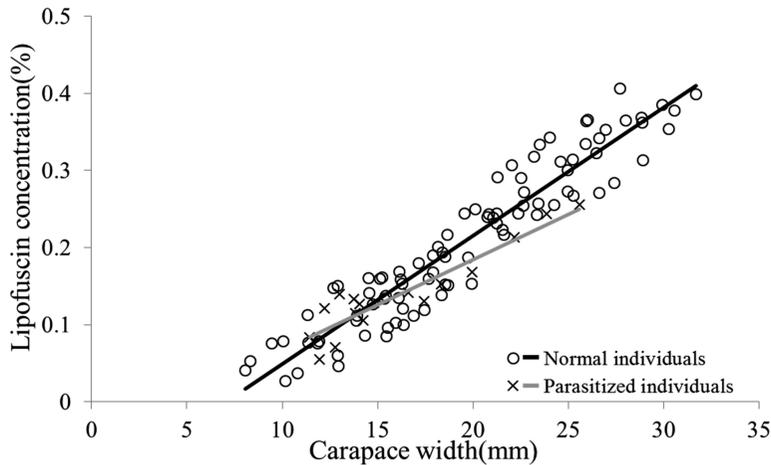


Fig. 6. Relationship of carapace width on lipofuscin accumulation in the olfactory lobe cell mass of normal and parasitized individuals of *Leptodius exaratus*.

雌では

$$AW = 0.328 CW - 1.478, R^2 = 0.968,$$

$$AW = 0.360 CW - 2.529, R^2 = 0.977$$

となり被寄生個体において 19 mm 以下の小型の個体のみ腹節幅の発達不良が見られたが 20 mm 以上の大型個体では正常個体との差が見られなくなった（傾き：ANCOVA;  $P < 0.01$ ）（Fig. 5）。

### 3.4 寄生による Lipofuscin 蓄積への影響

Lipofuscin 蓄積への影響を見るとオウギガニの被寄生個体及び正常個体の甲幅と Lipofuscin 蓄積量 (LC) の関係式は

$$LC = 0.017 CW - 0.120, R^2 = 0.895,$$

$$LC = 0.012 CW - 0.051, R^2 = 0.871$$

となり被寄生個体と正常個体との間に有意差が見られ、被寄生個体では甲幅に対し、Lipofuscin が少ないという結果が得られた（傾き：ANCOVA;  $P < 0.05$ ）（Fig. 6）。

## 4. 考察

### 4.1 オウギガニヤドリムシ寄生による形態・成長への影響

本研究の結果、オウギガニヤドリムシの寄生による影響を特に受けやすい部位は腹節と雄における鉗脚であった。他の部位および湿重量においては正常個体との明瞭な差はみられず甲のサイズや重さでは寄生の有無は判別不可能であると考えられる。オウギガニヤドリムシは寄生することで宿主の背甲の前胃域から肝域にかけて変形がみられ

るといわれている（溝口ら，2002）が、本研究で使用したオウギガニでは小型個体を除き変形は微々たる物であったため若年個体以外のオウギガニでは甲の形状からの寄生の有無を判別するのは難しいと考えられる。雄の鉗脚では寄生による成長の阻害が見られた。通常オウギガニは二次性徴に合わせて鉗脚の大型化が見られるが、被寄生個体では大型化への阻害が見られた。また、腹節をみると雄では腹節幅が大きくなる傾向が見られた。正常個体ではこのような腹節幅の拡大は雌のみに見られる特徴である。雌では腹節幅の成長に阻害が見られたが大型になるとともに正常個体との差は見られなくなっていった。オウギガニヤドリムシの雌は寄生後に宿主の生殖腺（造雄線を含む）を破壊し、その部位に卵嚢を形成する。一般的に甲殻類の雄では造雄線ホルモンによって雌化が抑制されることで雄としての形態形成が起こる。このことから被寄生個体の雄における形態変化は造雄線破壊による雌化であると考えられる（片倉，1985）。雌の腹節の成長不良については寄生による栄養不足であると考えられる。

### 4.2 寄生の季節性、宿主サイズとの関係、繁殖・生存率への影響

オウギガニヤドリムシの年間寄生率を見ると雌では季節による大きな変動は見られなかった。雄では春先の 2~4 月に高い寄生率が見られた。甲幅組成を見るとほとんどの月で雄よりも雌のほうが寄生率が高かったが 2008 年 2~4 月の気温上昇とともに前年度の個体群の成長が再開される時期

には雄の寄生率もまた高くなっていた。また、ほかの時期では総じて雄の寄生率が低いことからこの時期にオウギガニヤドリムシの寄生が行われているとともに寄生を受けた雄は短命であるものが多いのではないかと考えられる。一方雌では大型の個体においても被寄生個体が多く確認された。この原因としては寄生により生殖腺が破壊されたことにより抱卵ができないことが考えられる。抱卵が生体にかかる負荷は大きく、正常個体においても抱卵を行う雌のほうが短命であることが多い(渡邊ら, 2012)。被寄生個体の甲幅組成を見ると主な甲幅サイズは12 mm~22 mmのものが多いことから雌における大型個体を除き多くの被寄生個体が22 mm以上のサイズになれず死亡しているケースが多いと考えられる。被寄生個体の体内において雌のヤドリムシの新規加入が繰り返しているかは不明であるが大型の被寄生個体が雌のみ見られることからオウギガニの雌は体内におけるヤドリムシの寄生による個体の維持や卵嚢形成による消費に耐えられると考えられる。

#### 4.3 寄生による Lipofuscin 蓄積への影響

Lipofuscin の蓄積では甲幅 15 mm 程度の若年個体においては被寄生個体と正常個体の差はあまり見られないがそれ以上の甲幅の個体では正常個体より低い蓄積量を示していた。正常個体の Lipofuscin は雌雄差なく年間の蓄積量はほぼ一定であることが確認されている(渡邊ら, 2012)。また、Lipofuscin は高温下や過剰ストレスにより蓄積率上昇がみられ(遠藤, 1991)、栄養不足の個体においては Lipofuscin 蓄積量が少ないという結果が淡水産ザリガニの飼育実験にてえられている(Sheehy, 1990)。これらを踏まえて原因を考察すると3つの可能性が考えられる①被寄生個体は卵巣・精巣の破壊の結果繁殖活動に参加できないため、雄ならば闘争、雌ならば抱卵などを行なわなくなり正常個体で掛かるストレスが少ない。また、同じ理由によりエネルギーのロスが少なくなった結果、通常の成長が良くなるという可能性。②一部の寄生虫は宿主の行動を制御することがある。さらに Lipofuscin は脳神経内の活動が活発な部位に蓄積することから被寄生個体は正常個体と違う行動パターンで生活している可能性などが考えられる。③被寄生個体はヤドリムシの成長・抱卵・卵嚢形成などで多くのエネルギーを奪われていると考えられるため栄養不良の個体と同じ状態にある可能性がある。しかし、この原因を明らかにするには実際に被寄生個体と正常個体の生態に変化が見られるかを検証する必要がある。いずれにせよ本研究において宿主に対して強い影

響力を持つ寄生虫に寄生された生物は Lipofuscin による年齢推定を阻害する要因になると考えられる。本研究では時間経過により成長していく甲幅を比較対象として被寄生個体と正常個体の Lipofuscin 蓄積量の比較を行ったが甲幅などの体サイズは個体差が大きい。このため被寄生個体における Lipofuscin 蓄積量の低下を実証するには年齢を把握している宿主を使用した飼育実験が理想的である。しかし、内部寄生を行うオウギガニヤドリムシでは寄生するタイミングがつかめない上に寄生の有無を確かめるには解剖するしかないことなどからこの方法は非常に困難である。

#### 引用文献

- Bluhm, B. A., T. Brey, M. Klages, and W. E. Arntz (2001) : Occurrence of the autofluorescent pigment, lipofuscinin polar crustaceans and its potential as an age marker. *Polar Biology*, **24**, 642-649.
- 遠藤宜成 (1991) : 甲殻類の年齢を決める老化色素 Lipofuscin の利用. *化学と生物*, **29**, 237-239.
- Hartnoll, R. G (2001) : Growth in crustacea - twenty years on. *Hydrobiologia*, **449**, 111-122.
- Islam, M. S., K. Kodama and H. Kurokura (2007) : Preliminary assessment for age estimation of wild population of mud crab (*Scylla olivacea*) in Pak Phanang Bay, Thailand, using histologically quantified lipofuscin as age marker. *La mer*, **45**, 185-195.
- 片倉康寿 (1985) : 甲殻類の性決定因子—雄雄腺ホルモン. *科学と生物*, **23**, 309-310.
- Kodama, K., T. Yamakawa, T. Shimizu, and I. Aoki (2005) : Age estimation of the wild population of Japanese mantis shrimp *Oratosquilla oratoria* (Crustacea: Stomatopoda) in Tokyo Bay, Japan, using lipofuscin as an age marker. *Fisheries Science*, **71**, 141-150.
- Kodama, K., H. Shiraiishi, M. Morita and T. Horiguchi (2006) : Verification of lipofuscin-based crustacean ageing: seasonality of lipofuscin accumulation in the stomatopod *Oratosquilla oratoria* in relation to water temperature. *Marine Biology*, **150**, 131-140.
- Markham, J. C. (1975) : Bopyrid isopods infesting porcellaind crabs in the northwestern Atlantic. *Crustaceana*, **28**, 252-270.
- 溝口幸一郎, 逸見泰久, 山口隆男 (2002) : 短尾類に寄生するヤドリムシ類 (等脚目: ヤドリムシ亜目) の寄生状況と宿主に与える影響. *日本ベントス学会誌*, **57**, 79-84.
- 永沢和也 (1999) : 寄生性甲殻類. *日本における寄生生物学の研究* 第6巻. 財団法人目黒寄生虫館, 東京, pp. 163-168.

- 齋藤鴨宏, 伊谷行, 布村昇 (2000) : 日本産等脚類 (予報). 富山市科学文化センター研究報告, **23**, 11-107.
- Sheehy, M. R. J. (1990) : Individual variation in, and the effect of rearing temperature and body size on, the concentration of fluorescent morphological lipofuscin in the brains of freshwater crayfish *Cherax cuspidatus* (Crustacea; Parastacidae). *Journal of Comparative Biochemistry and Physiology*, **96A**, 281-286.
- Sheehy, M. R. J. (1990a) : Widespread occurrence of fluorescent morphological lipofuscin in the crustacean brain. *Journal of Crustacean Biology*, **10**, 613-622.
- Sheehy, M. R. J. (1990b) : Potential of morphological lipofuscin age-pigment as an index of crustacean age. *Marine Biology*, **107**, 439-442.
- Sheehy, M. R. J. and A. E. Prior (2008) : Progress on an old question for stock assessment of the edible crab *Cancer pagurus*. *Marine Ecology Progress Series*, **353**, 191-202.
- 椎野季雄 (1964) : 等脚類. 内田 亨 (編), 動物系統分類学 7 (上) : 節足動物 (1) 総説・甲殻類, 中山書店, 東京, pp. 193-217.
- Sohal, R. S. and L. S. Wolfe (1986) : Lipofuscin: characteristics and significance. In: Swaab, D. F., E. Fliers, M. Mirmirn, W. A. Van gool, F. Van Haaren, (eds.) *Progress in Brain Research*, vol. 70. Elsevier, Amsterdam, pp. 171-183.
- Terman, A., and U. T. Brunk (1998) Lipofuscin: mechanisms of formation and increase with age. *Acta Pathologica, Microbiologica et Immunologica Scandinavica*, **106**, 265-276.
- Vogt, G. (2012) : Ageing and longevity in the decapoda (Crustacea) : A review. *Zoologischer Anzeiger - Journal of Comparative Zoology*, **251** (1), 1-25.
- 渡邊隆司, 浜崎活幸, 横田賢史, Carlos A. Strüssmann, 渡邊精一 (2012) : Lipofuscin を年齢形質としたオウギガニの年級群推定. *Cancer*, **21**, 7-12.

受付 : 平成 26 年 7 月 31 日

受理 : 平成 26 年 11 月 29 日

資 料

## 第 52 卷第 4 号掲載欧文論文の和文要旨

中野知香・嶋田啓資・根本雅生・吉田次郎：二重拡散対流による拡散係数のパラメタリゼーション

二重拡散対流の存在可能性を表す無次元数として浮力レイノルズ数がある。しかしながら、浮力レイノルズ数は海洋微細構造観測によって得られる値であり、数値実験において二重拡散対流による鉛直渦拡散係数を与えるための指標として利用するには適さない。そこで、本研究では、北太平洋西部において海洋微細構造観測を実施し、水温及び塩分の鉛直渦拡散係数を算出した結果及び、CTD・LADCP 観測より得た結果より、新たな指標としてリチャードソン数を提案した。さらに、KIMURA *et al.* (2011) によって数値実験によって得られている鉛直渦拡散係数のパラメタリゼーションの式に海洋観測データを適用することで、そのパラメタリゼーションの改善を行った。

(\* 連絡著者 東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7 email : d132007@kaiyodai.ac.jp)

## 学 会 記 事

### 1. 幹事会議事録（第2回）

日 時：10月3日（金）10時00分～11時00分

場 所：東京海洋大学9号館203号室

参 加：小松、今脇、森永、吉田、河野、小池、荒川、  
内田、柳本

#### 1) 報告事項

①編集状況および9月にNo.3、12月にNo.4を出版について報告。（吉田）

②新賛助会員（株）セア・プラスの入会について。（荒川）

#### 2) 審議事項

①1985年から取り扱ひの無かった外貨預金を現金化し、学会予算へ編入することが提案され了承された。（荒川）

②第16回日仏海洋学シンポジウムについて

来年開催予定の第16回日仏海洋学シンポジウム開催について議論し、次のことを決めた。

時期：日本水産学会水産環境保全委員会から提案のあった来年秋の水産学会における仙台でのシンポジウム共催は、海洋学会と日程がかち合うことから、見送ることとし、水産学会と海洋学会の秋季大会終了後の10月中旬以降での開催について検討することとした。

場所：2012年に開催した日仏カキシポジウムと同じように、三陸のエクスカーションを行い、その後、仙台（もしくは塩竈）で1日シンポジウムを行い、移動（1日）、東京（日仏会館）で1日シンポジウムを行い、さらに岡山のエクスカーション（可能性）という日程について検討する。

内容：総会時に「沿岸から沖合の相互作用」の提案がエノック氏からあった。テーマについては会長がたたき台を作成する。

実行組織：委員長は小松会長として、幹事は組織委員会へ参加する。組織委員会および科学委員会の原案は会長が作成し、小池幹事から推薦された関哲夫会員を組織委員に、また組織委員および科学委員にフランス側も入れる。  
フランス側の窓口は現在JAMSTECに交換研究員として滞在しているエノック氏の予定。

予算：日仏会館研究助成（70万円）は会長が申請（10月31日締め切り）。笹川日仏財団は森永顧問が打診。

### 2. 幹事会議事録（第3回）

日 時：11月14日（金）10時00分～12時00分

場 所：東京海洋大学9号館203号室

参加者：小松、今脇、森永、吉田、小池、田中、荒川、  
内田

#### 1) 報告事項

①52巻3号発送済、4号は12月に発送予定（吉田）

②新入会員：寺内正会員 環日本海環境協力センター（紹介：小松会長）  
谷田学生会員（東大大学院農学生命科学研究科）

2) 議事録承認：第2回幹事会議事録を承認した。

#### 3) 審議事項：

①学会賞・論文賞の受賞者規定および選考に関するガイドラインについて

今脇顧問から「日仏海洋学会 学会賞・論文賞の選考に関するガイドライン」策定の説明があった。従来から運用されていたガイドラインの不明瞭な点や現実の日程と合わない点を修正し、今後本ガイドラインで運用することを承認した。日程に関して日仏海洋学会賞規定の一部（不相当・不明瞭な点）を改訂することにし、来年度の評議員会で提案する。

②第16回日仏海洋学シンポジウムについて次のことを決めた。

小松会長から日仏会館および笹川日仏財団の助成金申請書（案）が示され、内容を修正の上、両助成を申請することにした。

・開催時期：2015年11月下旬から12月上旬とした。

・シンポジウム開催場所：前半は塩釜あるいは仙台、最終日は日仏会館（東京）での開催を案とする。

・テーマ：“The sea under human and natural impacts: progress in oceanography and its contribution to the future Earth”とし、今後フランス側に提案する。

2014年11月中に今後の準備作業内容を抽出することとした。

東北で開催するシンポジウムについて、東北区水産研究所および東北大学の会員などを中心に協力を得ることにした。

#### ③その他

国立大学教育研究評価委員会専門委員および機関別認証評価委員会専門委員の候補者として、小松会長、吉田副会長、河野副会長を推薦することとした。

## 3. 新入会員

| 氏名    | 所属                              | 紹介者  |
|-------|---------------------------------|------|
| 寺内 元基 | 公益財団法人<br>環日本海環境協力センター<br>調査研究部 | 小松輝久 |
| 谷田 巖  | 東京大学大学院<br>農学生命科学研究科            |      |

## 4. 所属および住所変更

| 氏名   | 新しい所属先                 |
|------|------------------------|
| 中村 玄 | 東京海洋大学海洋環境学部海洋生物学講座 助教 |

## 5. 寄贈図書および資料

FRAN NEWS (水産総合研究センター); No.40  
 Ocean Newsletter (海洋政策研究財団); No.339-343  
 国立科学博物館研究報告 A 類 (動物学); 第 40 巻第 2 号-第 3 号, 増補 8  
 農工研ニュース (農村工学研究所); No.93  
 なつしま (JAMSTEC); 343  
 RESTEC News (一般財団法人リモート・センシング技術センター); 第 5 号  
 Techno-ocean News (テクノオーシャンネットワーク); No.54  
 農村工学研究所成果情報 (農村工学研究所); 平成 25 年度  
 Ocean Breeze (東京大学大気海洋研究所); 第 17 号

## 賛 助 会 員

|                 |  |
|-----------------|--|
| 株式会社 イーエムエス     | 兵庫県神戸市中央区東川崎町 1-3-3<br>神戸ハーバーランドセンタービル 13F |
| いであ株式会社         | 東京都世田谷区駒沢 3-15-1                           |
| 有限会社 英和出版印刷社    | 東京都北区中里 2-14-8 シャンボール駒込 101                |
| 公益財団法人海洋生物環境研究所 | 東京都新宿区山吹町 347 藤和江戸川橋ビル 7階                  |
| ケー・エンジニアリング株式会社 | 東京都台東区浅草橋 5-14-10                          |
| 信幸建設株式会社        | 東京都千代田区神田司町 2-2-7<br>パークサイド 18階            |
| JFEアドバンテック株式会社  | 兵庫県神戸市西区井吹台東町 7-2-3                        |
| 株式会社 セア・プラス     | 神奈川県横浜市緑区十日市場町 832-8                       |

# 日仏海洋学会入会申込書

(正会員・学生会員)

|                      |        |      |   |    |         |
|----------------------|--------|------|---|----|---------|
|                      | 年度より入会 | 年    | 月 | 日  | 申込      |
| 氏名                   |        |      |   |    |         |
| ローマ字                 |        | 年    | 月 | 日  | 生       |
| 住所 〒                 |        |      |   |    |         |
| 勤務先 機関名              |        |      |   |    |         |
| 電話                   |        |      |   |    | E-mail: |
| 自宅住所 〒               |        |      |   |    |         |
| 電話                   |        |      |   |    | E-mail: |
| 紹介会員氏名               |        |      |   |    |         |
| 送付金額                 | 円      | 送金方法 |   |    |         |
| 会誌の送り先 (希望する方に○をつける) |        | 勤務先  |   | 自宅 |         |

(以下は学会事務局用)

|    |    |    |     |    |
|----|----|----|-----|----|
| 受付 | 名簿 | 会費 | あて名 | 学会 |
|    | 原簿 | 原簿 | カード | 記事 |

入会申込書送付先：〒150-0013 東京都渋谷区恵比寿 3-9-25

(財) 日仏会館内

日 仏 海 洋 学 会

郵便振替番号：00150-7-96503