

大型藻類のゾーネーションに関する研究Ⅳ. —アラメ・カジメ 1 齢個体に作用する流体力と 流動環境—

STUDY ON THE ZONATION OF MACROALGAE IV. FLUID FORCES
ON ONE-YEAR OLD PLANTS OF *Eisenia bicyclis* Setchell AND *Ecklonia cava* Kjellman
AND CURRENT ENVIRONMENTS

菅原顕人¹・小松輝久²・瀬戸雅文³

Akihito SUGAWARA, Teruhisa KOMATSU and Masabumi SETO

¹農博 東京大学大学院農学生命科学研究科特定研究員 海洋研究所行動生態計測分野
(〒164-8639 東京都中野区南台1-15-1)

²農博 東京大学助教授 海洋研究所行動生態計測分野 (〒164-8639 東京都中野区南台1-15-1)

³正会員 水産博 北海道立中央水産試験場水産工学室 (〒046-8555 北海道余市郡余市町浜中町238)

Seaweed forests of *Eisenia bicyclis* Setchell and *Ecklonia cava* Kjellman are broadly distributed along the rocky coastal area of central Honshu Island, Japan, facing the Pacific Ocean. We aimed to clarify a process of zonation that are consisted of the two plants. We measured attaching force of holdfast of one-year old plants to the substratum in a field and fluid forces on the plants in a laboratory. Attaching forces of the holdfasts depended on a condition of substratum surface. Dominant fluid force exerted on one-year old plants was a drag force different from adult plants because of little development of stipe part. One-year old plants have attaching forces greater than the maximum fluid forces in situ estimated by the model.

Key Words : *Eisenia* and *Ecklonia*, zonation, current environments, fluid force, one-year old plants

1. はじめに

アラメ *Eisenia bicyclis* Setchell・カジメ *Ecklonia cava* Kjellman は、太平洋に面する常磐から南四国までの岩礁性浅海域に多く見られる典型的な大型藻類である^{1)・2)・3)}。両種の分布が重なる海域では、アラメの分布深度が低潮線から水深10m程度までであるのに対し、カジメでは水深25m程度までである⁴⁾。このようにアラメがカジメより浅所に生育し、両種が等深線に沿って帯状の分布、ゾーネーション (Zonation) を形成することが知られている^{5)・6)}。藻場・海中林とよばれるこれらの群落は、直接的にはウニ・アワビ・サザエなどの植食動物の餌料として、間接的には魚類の産卵場や幼稚仔の保護育成場として、更には海水中に溶出した窒素やリンの吸収など水質浄化面等、沿岸域の環境形成に重要な役割を担っている。近年、藻場は沿岸域の開発にともなう埋め立てや「磯焼け」によって著しく減少してきており、環境と調和した海岸施設の設計や自然環境の修復を目的として藻場造成技術が検討さ

れ、アラメ・カジメ藻場についても各地での造成事業が始まっている^{7)・8)・9)}。しかし、これらの事業は必ずしも成功しているわけではない。これは、藻類の生残に不可欠な生息条件についての生態学的な基礎的知見が不足しているためと考えられる。

藻類の分布や生育・生残を制限する要因としては、光量、水温、基質、波浪といった物理的要因、栄養塩といった化学的要因、食害といった生物的要因が上げられる。これらの中で、波浪などの流動環境は、藻類の生残、形態、垂直分布に大きな影響を及ぼす重要な環境要素である。

著者らはこれまで、アラメ・カジメ藻場の修復・造成に必要となる、1) これらの成体および幼体の固着力と波浪に伴い藻体に作用する流体力との関係^{10)・11)}、2) 群落の垂直分布と光環境条件およびこれらの種の光合成速度との関係について¹²⁾明らかにしてきた。しかし、アラメ・カジメの形態が幼体から成体に変化する時期にあたる1齢から2齢未満の個体については未だ明らかになっていないので、それらの形状特性や基質への固着力の測定、水理実験によ

る1 齡個体に作用する流体力の測定を通じて、アラメ・カジメの初期生育段階における作用流体力と流動環境との関係について検討することにした。

表-1 アラメ・カジメの幼体，1 齡個体，成体の形状特性（葉部に対する茎部の比）の比較（平均値±標準偏差）。

茎部／葉部	幼体	1 齡個体	成体
湿重量／湿重量	0.21±0.11	0.15±0.07	0.65±0.20
茎長／最大葉長	0.24±0.15	0.69±0.06	1.04±0.43

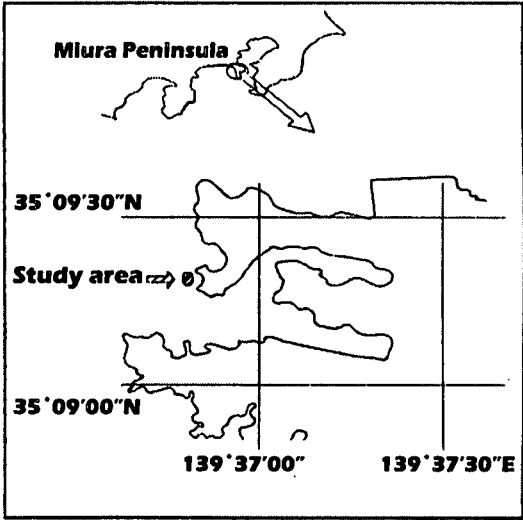


図-1 調査および採集地点。

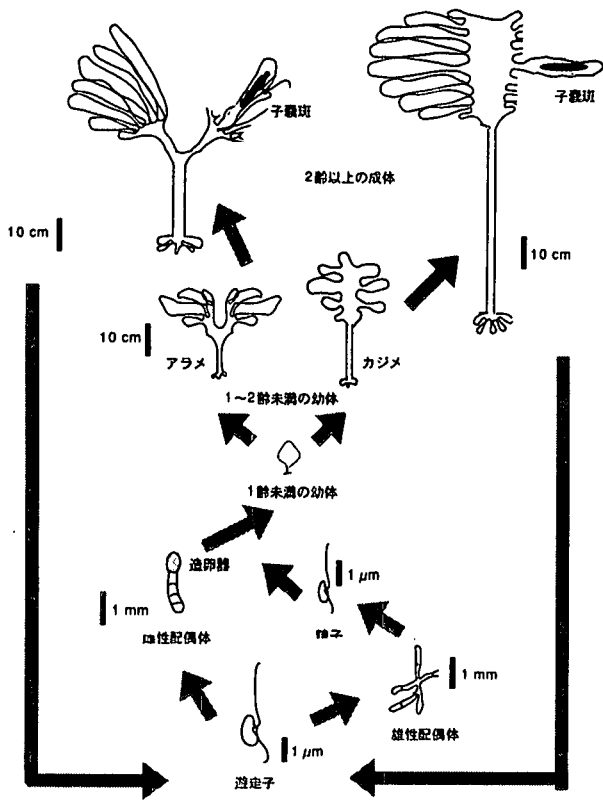


図-2 アラメ（左側）とカジメ（右側）の生活史と形態の変化。遊生子から雌雄の配偶体の形成，1 齡未満の時期はアラメ・カジメともほぼ同じ形態であるので，一緒に示してある。

2. アラメ・カジメ 1 齡個体の固着力

(1) 測定方法

2000年10月21日に，神奈川県三浦市の東京大学理学部附属臨海実験所地先（図-1）に分布する，アラメ・カジメ幼体を対象とした実験をおこなった．底深が1.5mにアラメ群落が，2.7m（浅所型），4.5m（深所型）にカジメ群落が分布している．各群落において，それぞれ10個体の幼体について，藻体の基部付近に細いロープを固縛し，卓越する波向方向に引っ張り，力量式置き針計で水平固着力を計測した．さらに，それらの形状特性や藻体の基部から引き剥がされた坂根部の状況についても記録した．

(2) 1 齡個体の形状特性

1 齡個体の形状は，アラメ・カジメともに葉部は単葉から側葉が形成される時期にあたり，茎部が発達しはじめ，アラメでは茎部の枝分かれが見られる点特徴的である（図-2）．本研究の固着力測定に用いたアラメ・カジメの1 齡個体について幼体および成体と比較すると，葉部に対する茎部の湿重量では葉部が増加するために幼体よりも小さくなる（表-1）．また，1 齡個体の最大葉長に対する茎長の比は，幼体と成体の中間の値になっている．

(3) 固着力

1 齡個体の固着力の強さは，平均値で見ると，アラメで5.8kgf，浅所カジメで4.4kgf，深所カジメで4.8kgfと必ずしも水深には依存していなかった（図-3）．また，値にはかなりのばらつきがあり，標準偏差を考慮すると3～8.5kgfの範囲内であった．

さらに引き剥がした個体の基部の接地面を調べると，ほとんどの個体において基質の表面ごと，あるいは一部とともに剥がされており，仮根あるいは茎部が破断された個体は全く認められなかった（表-2）．

これらの結果から，得られた1 齡個体の固着力は基質表面の強度を示しており，その強度は幼体や成体の場合と同様に基質表面の状態（例えば石灰藻に覆われているかどうかなど）に依存しているものと考えられた．

表-2 アラメ、浅所カジメ、深所カジメを引き剥がした時の基部の接地面の状態.

基部の剥離状態	アラメ	浅所カジメ	深所カジメ
接地面が全基質表面を含む	7個体	8個体	6個体
接地面が一部基質表面を含む	3個体	2個体	4個体
仮根または基部の破断	0個体	0個体	0個体

表-3 流体力測定実験に供したアラメ、浅所カジメ、深所カジメの各部位の諸元.

測定項目	アラメ	浅所カジメ	深所カジメ
茎長 (cm)	10.5	13.8	15.6
茎部径 (cm)	1.0	1.0	1.0
枝部長 (cm)	0.8	-	-
最大葉長 (cm)	15.0	22.0	21.0
葉面積 (cm ²)	296.5	836.6	790.2
茎部湿重量 (g)	5.6	10.1	11.2
葉部湿重量 (g)	24.9	110.6	80.6

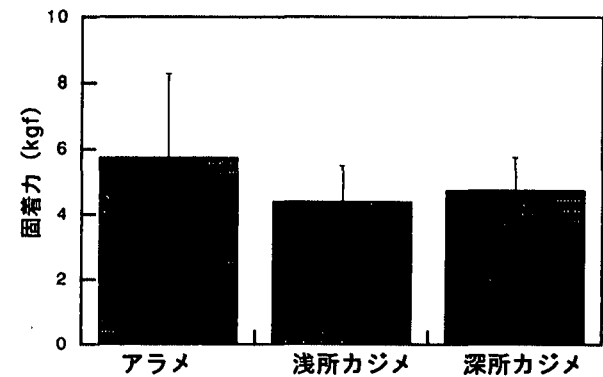


図-3 アラメ、浅所カジメ、深所カジメ基部の固着力 (平均値±標準偏差: Kg_f) .

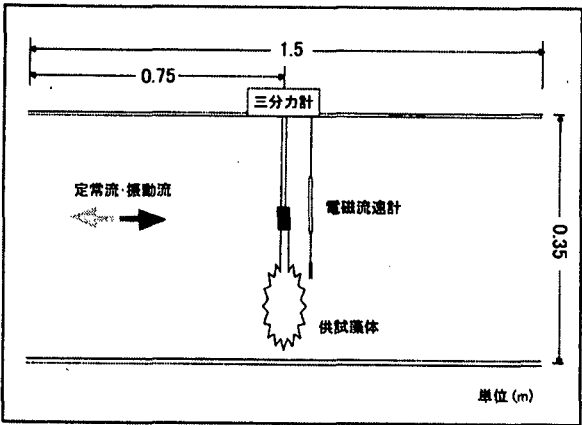


図-4 流体力測定実験の概要を示した図.

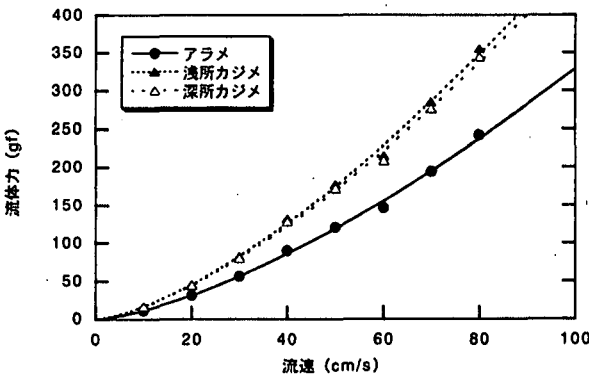


図-5 定常流場における1齢個体の葉部に作用する流体力. アラメ (黒丸印), 浅所カジメ (黒三角), 深所カジメ (白抜三角) .

3. アラメ・カジメ1齢個体の作用流体力

(1) 実験および方法

2000年9月に、アラメおよび浅所、深所カジメの各群落から1齢個体を採取し、北海道立中央水産試験場において測定をおこなった。供試藻体の諸元を表-3に示す。

流体力は、同試験場が有する海水対応の鉛直循環式小型振動流水槽（観測部長さ1.5m，常用水深0.35m）で計測した。1齢個体は、水槽中央上部に設置した三分力計のセンサー部に付着物を除去した坂根部ごと上下逆向きに固定し、中央葉部が主流方向に対して垂直となるように配置した（図-4）。水槽内に定常流（0.10～0.80ms⁻¹）および振動流（周期6.0～10.0s，流速振幅0.10～0.80ms⁻¹）を発生させ、同時に電磁流速計を用いて主流の流速変動も記録した。なお、実験期間中の水槽内海水温は、19.0～19.5℃の範囲内でほぼ一定であった。

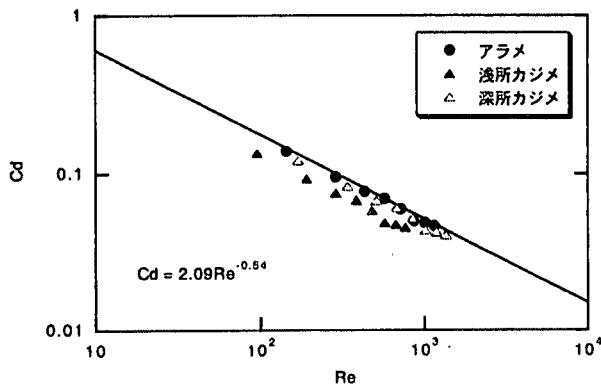


図-6 1 齢個体の葉部の抗力係数のレイノルズ数による変化。アラメ（黒丸印），浅所カジメ（黒三角），深所カジメ（白抜三角）。

(2) 葉部に作用する流体力

定常流場でのアラメ，浅所カジメ，深所カジメに作用する全流体力および葉部に作用する抗力の主流流速による変化は，2 齢以上の成体の場合と同様でほぼ流速に比例していた。そこで，形態的な特徴から便宜的に基部を円柱として近似し，抗力係数 (C_D) を円柱の値 (1.17) とし，実験を行った主流流速条件下における基部の抗力を求め，それらを全流体力から差し引くことにより葉部のみに作用する流体力 (F_{DL}) を求めた (図-5)。これらの計測データをもとに，葉部の C_D 値を計算し，最大葉片長を代表長さとしたレイノルズ数 (Re) で整理したものが図-6である。アラメ，浅所カジメ，深所カジメとも C_D 値は Re 数に依存しながら 0.04~0.05 程度に収束した。この値は，コンブ葉体の値とほぼ一致した¹³⁾。また， C_D 値は Re 数の関数として次式で近似できた。

$$C_D = 2.09Re^{-0.54} \quad (1)$$

なお，葉部に作用する流体力は，アラメ，浅所カジメ，深所カジメともに抗力成分が卓越していた。

(3) 茎部に作用する流体力

上述したようにアラメ・カジメの基部は円筒型の形態を有している。そこで，振動流場におけるアラメ，浅所カジメ，深所カジメの基部に作用する最大流体力 (F_x) と基部を円柱として近似した場合の最大流体力 (F_c) との比 (F_x/F_c) を求め，茎部径を代表長さとして $K.C.$ 数で整理した (図-7)。

その結果，アラメ，浅所カジメ，深所カジメともに $K.C.$ 数に依存し， $K.C.$ 数が増加すると F_x/F_c は 1.0 程度に収束した。このことは，非定常流場での

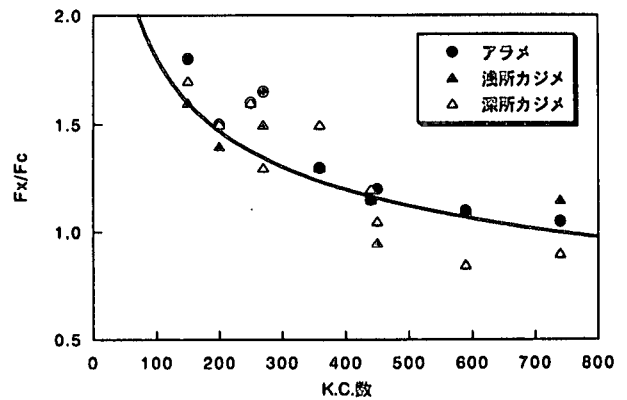


図-7 振動流場における 1 齢個体の茎部の最大作用流体力 (F_x) と基部を円柱形状で近似した場合の最大作用流体力 (F_c) の比 (F_x/F_c) の $K.C.$ 数による変化。

茎部に作用する流体力は，直接流体より受ける抗力や質量力に比べて，揺動に伴い発生する慣性力が卓越するが，定常流場に近づくにつれて円柱モデルとして近似したものとほぼ同様になることを示している。したがって，流速が大きく，周期が大きい $K.C.$ 数がおおよそ 250 以上の振動流場では，円柱形状の抗力係数 ($C_D=1.17$) および付加質量係数 ($C_{MA}=1.0$) を適用しても差し支えないことが明らかとなった。

(4) 作用流体力のモデル化

1 齢個体の葉部では作用流体力としては抗力が卓越しており，(1) 式で表した C_D を用いて次式で葉部作用流体力 (F_L) が求められる。

$$F_L = (C_D \rho A u^2) / 2g \quad (2)$$

1 齢個体の茎部の作用流体力 (F_s) は，最大流速および周期が大きく $K.C.$ 数がおおよそ 250 以上の振動流場において基部を円柱形状に作用する流体力と近似してよい。そこで， $C_D=1.17$ および $C_{MA}=1.0$ として，(3) 式で F_s が求められる。

$$F_s = (C_D \rho A u^2 + 2(C_{MA} + 1) \rho V du/dt) / 2g \quad (3)$$

最大流体力 (F) は葉部と茎部の作用流体力を加えて (4) 式で求めることができると仮定する。

$$F = F_L + F_s \quad (4)$$

2 齢以上のアラメやカジメの場合と同様に¹⁰⁾，このモデルで求めた作用流体力と振動流場での実験で得られた実測値とはアラメ，浅所カジメ，深所カジメともよく一致し，実用的モデルであることが示された。

そこで、モデルを用いて現場で予想される1齢個体に作用する年最大作用流体力と実測した固着力との関係について検討した。計算には、固着力を調べた個体の葉面積、茎長、茎部径、枝部長を使用して作用流体力を求めた(表-4)。また、波については、当該海域に襲来する1年確率最大波の沖波条件(沖波波高 $H_o=5.1\text{m}$, 周期 $T=9.2\text{s}$)¹⁴⁾をもとに得られるアラメ、浅所カジメ、深所カジメの生育水深における波高および底面流速を使用した。

現場での予想される1齢個体に作用する年最大流体力は、アラメで2.4~4.8kgf、浅所カジメで2.8~4.3kgf、深所カジメで3.2~4.7kgfとなった。これらの値と各個体基部の固着力の実測値と比較した(図-8)。その結果、年最大流体力が基部固着力を上回り、1年確率最大波によって基質から引き剥がされる個体は、アラメで0個体、浅所カジメで1個体、深所カジメで2個体であった。このように、現場での1齢個体のアラメ、浅所カジメ、深所カジメの基部固着力は、2齢以上の成体¹⁰⁾や1齢未満の幼体¹¹⁾と同様に、1年最大確率波によって個体が受ける年最大作用流体力とほぼ同じかそれを上回る安全側にあることが示された。

表-2 アラメ、浅所カジメ、深所カジメを引き剥がした時の基部の接地面の状態。

	アラメ	浅所カジメ	深所カジメ
葉面積 (cm ²)	250.0~485.6	268.4~438.8	305.0~450.0
茎長 (cm)	11.5~13.0	13.0~22.0	14.0~28.0
枝長 (cm)	0.5~1.0	—	—
茎部径 (cm)	0.8~1.2	0.8~1.2	0.7~1.2

4. おわりに

流動環境が海藻の分布や生育・生残に及ぼす影響を把握することは、藻場の造成適地選定をする上で非常に重要である。本研究では、これまでに得られた成体および幼体に関する知見に加えて、幼体から成体に移行する1齢個体の固着力および流体力学的特性を検討した。今回の結果から、アラメ、浅所カジメ、深所カジメ1齢個体は成体や幼体と同じように藻体の基部の固着力は基質表面の状態に依存していること、また、幼体から成体に移行するアラメ・

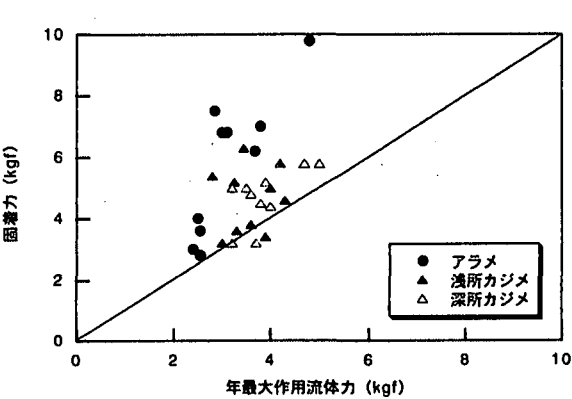


図-8 アラメ(黒丸)、浅所カジメ(黒三角)、深所カジメ(白抜三角)の1齢個体に作用する推定された年最大作用流体力と実測された固着力の比較。

カジメ1齢個体では、流体力学的な特性は兩種ともほぼ同様であることが明らかとなった。今後はアラメとカジメの発育過程における流体力学的特性について現在までに得られた結果を総合的に考察し、流動環境がアラメ・カジメのゾーネーションとどのように関係しているかを解明していきたいと考えている。

謝辞：現場調査および試料の採集にあたり、種々の御支援、御協力を頂いた東京大学理学部附属臨海実験所の森沢正昭所長、関本実技官、関藤守技官に、さらに流体力測定の実験にあたり御協力を頂いた北海道立中央水産試験場水産工学室の小林敏規室長をはじめ、職員各位に厚く御礼申し上げます。なお、この研究は笹川科学研究助成および文部省科学研究費により実施したものである。

参考文献

1) 神田千代一：暖海産昆布科植物の遊走子培養に就いて、服部報公会研究報告，第8巻，pp. 317-343，1936。
2) 新崎盛敏：アラメに就いて，藻類，第1巻，pp. 9-13，1953。
3) 川嶋昭二：日本産コンブ類図鑑，北日本海洋センター，札幌，1979。
4) 寺脇利信：藻類の生活史集成第2巻，褐藻・紅藻類，堀輝三編，内田老鶴圃，pp. 133-134，1993。
5) 喜田和四郎，前川行幸：アラメ・カジメ群落に関する生態学的研究-I，志摩半島御座岬周辺における群落の分布と構造，三重大水実研報，第3巻，pp. 41-54，1982。
6) 喜田和四郎，前川行幸：アラメ・カジメ群落に関する生態学的研究-II，熊野灘沿岸各地域における群落の分布と構造，三重大水実研報，第10巻，pp. 57-69，1983。
7) 中久喜昭：磯焼け漁場の海中林造成，栽培技研，第9巻，pp. 25-30，1980。

- 8) 山本秀一, 児玉理彦, 野口雄二, 綿貫啓: 相模湾西部海域におけるカジメ場造成試験, 水産土木, 第23巻, pp. 13-18, 1986.
- 9) Anon.: 海域特性総合利用技術開発調査報告書(磯焼けグループ), 北海道, 68pp., 1994.
- 10) 菅原顕人, 瀬戸雅文, 小松輝久: 大型藻類のゾーネーションに関する研究Ⅰ, アラメ・カジメの垂直分布と流動環境, 土木学会海洋開発論文集, 第14巻, pp. 29-34, 1998.
- 11) 菅原顕人, 小松輝久, 瀬戸雅文: 大型藻類のゾーネーションに関する研究Ⅲ. アラメ・カジメ幼体に作用する流体力と流動環境, 海洋開発論文集, 第16巻, pp. 351-355, 2000.
- 12) 菅原顕人, 小松輝久, 瀬戸雅文, 佐藤博雄: 大型藻類のゾーネーションに関する研究Ⅱ, アラメ・カジメの垂直分布と光環境, 土木学会海洋開発論文集, 第15巻, pp. 141-145, 1999.
- 13) 瀬戸雅文, 水野武司, 山田俊郎, 梨本勝昭: 縦スリット型藻礁の水理特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 971-975, 1997.
- 14) Anon.: 平成9年度三崎漁港修築事業(県単)二町谷海外地区整備調査報告書, 82pp., 1998.