

大型藻類のゾーネーションに関する研究

—アラメ・カジメの垂直分布と流動環境—

Study on the Zonation of Macro Algae :

Vertical Distribution and Current Environments in *Eisenia bicyclis* Setchell and *Eclonia cava* Kjellman

菅原顕人*・瀬戸雅文**・小松輝久*

Akihito Sugawara, Masabumi Seto and Teruhisa Komatsu

Seaweed forests composed of *Eisenia bicyclis* Setchell and *Eclonia cava* Kjellman are widely distributed along the coast of central Honshu Island, Japan, facing the Pacific Ocean. This study aimed to clarify a zonation of these plants and their causes. We measured their stipe and maximal blade lengths for one year and attaching force of their hold fast to a substratum in a field and a fluid force on them in a laboratory. They grew rapidly from winter to summer, and matured from summer to fall. We observed intraspecies and inter-species zonation. Attaching force of their hold fast depended on a condition of substratum surface. Under an oscillatory current, the dominant fluid force exerted on the plants was a drag force in a blade part but an inertial force in a stipe part.

Keywords: *Eisenia* and *Eclonia*, zonation, current, hydrodynamics

1. はじめに

アラメ *Eisenia bicyclis* Setchell・カジメ *Eclonia cava* Kjellman は太平洋沿岸の三陸以南より瀬戸内海沿岸の岩礁性浅海域に多くみられる典型的な大型藻類である。両種の分布が重なる海域では、アラメの垂直分布域が低潮線から水深10 m までであるのに対し、カジメでは水深4—25 m までであり、アラメの方がカジメより浅所に生育することが知られている^{1) 2)}。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育場として、さらには海水中に溶出した窒素やリンの固定など水質浄化面等、沿岸域の環境形成として重要な役割を担っている。しかし近年、沿岸域の開発にともなう埋め立てや「磯焼け」により藻場・海中林は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^{3) 4) 5) 6)}。

藻類の分布や生育・生残を制限する要因としては、光量、光質、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、光量、光質などの光環境とともに藻類の生残や形態、垂直分布に大きな影響を及ぼす重要な環境要素である。したがって、藻場を人工的に修復する場合には、現場の流動環境を把握し、移植した個体が流れによって流出しないような条件を満たす海域を探す必要がある。

そこで本研究では、典型的なアラメ・カジメの藻場が分布する神奈川県三浦半島三崎地先を調査現場として、アラメおよびカジメにゾーネーションがあるのかどうかを、また両種の生長と成熟について調べ、さらに基質への固着力を測定するとともに、藻体に作用する流体力を水理模型実験的手法をもとにモデル化した上で両者を比較することによって、両種の垂直分布と流動環境との関係について検討した。

2. アラメ・カジメの生長と成熟

アラメおよびカジメは太平洋沿岸に広く分布する大型多年生褐藻であり、その生活史⁷⁾ はコンブ目植物に多く見られる微視的配偶体と巨視的胞子体の異形世代交代である。アラメの胞子体はカジメと異なり2年目になると茎部が2叉に分岐し枝を形成する。両種の胞子体の寿命は4~6年であり、1歳~2歳にかけて茎長が指数的に増加する。生長期・成熟期は生育分布によって多少異なるが、主な生長期は冬から夏にかけて、成熟期は夏から秋にかけてであり、生長の極大期である夏に湿重量、葉面積とも最大となる^{8) 9)}。ここではまずはじめに、神奈川県三浦半島三崎地先のアラメ・カジメの生育深度と生長・成熟について現場調査した。

* 東京大学海洋研究所漁業測定部門

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

2.1 調査方法

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)には、平均水深約1.5 m にアラメ群落、約2.7 m に小型カジメ群落、約4.5 m に大型カジメ群落が分布している。潜水により、各群落ごとに10～13の2～4年目と思われる成体に、波浪などによる要因で個体が傷つくことを避けるため、茎部ではなく仮根部にプラスチック製のタグをつけて標識した。標識個体の茎長、枝長(アラメのみ)、最大葉片長の測定および成熟の観察を1996年9月から1997年10月まで毎月1回おこなった(ただし、1996年10月は台風による悪天候のため測定できなかった)。実験期間中に標識個体が消失した場合は、近くのほぼ同サイズの個体を選び新たに標識した。また、水温は現場観察時に各群落ごとに測定した。

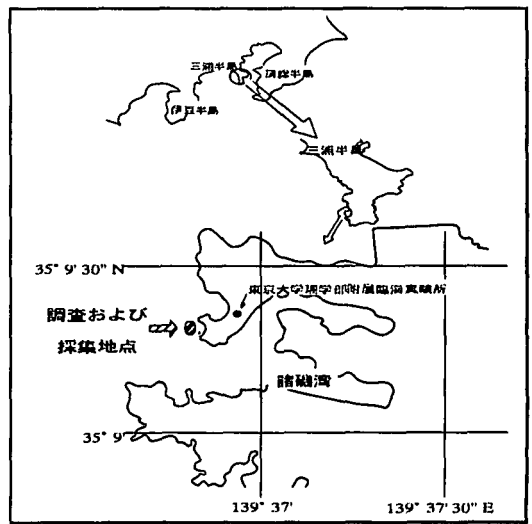


図-1 調査及び採集地点概略図

2.2 生育深度と生長・成熟

カジメの浅所群落と深所群落の茎長を比較すると明らかに異なっており、浅所群落は小型、深所群落は大型の成体から構成されていることが示された(図-2)。今後は便宜的に、カジメの浅所群落の個体を浅所カジメ、深所群落の個体を深所カジメとする。

アラメは茎長、枝長とも生長速度はあまり変化せず、ほぼ一定であった。カジメでは浅所カジメが深所カジメよりも1年を通して高い生長速度を示し、生長速度は12～8月にかけて大きかった(浅所カジメ: 1.33 cm/月、深所カジメ: 1.19 cm/月)。調査期間の約1年間で、アラメは茎長、枝長の合計が8.6 cm、浅所カジメは茎長が13.7 cm、深所カジメは9.7 cm 生長した(図-3)。

最大葉片長は、11～5月にかけて増加し、5～10月には減少する季節変動を示した。季節間で比較した最大葉片長の最大値と最小値は、アラメでは11月と5月で20.7 cm、浅所カジメでは11月と4月で22.1 cm、深所カジメでは12月と5月で26.9 cm の差があった(図-4)。

成熟葉、つまり子葉斑を形成した葉はアラメでは7～2月、カジメでは浅所、深所の個体とも7～11月の間に形成された(表-1)。

これらの結果から、三崎地先のアラメ・カジメは多少の違いはあるものの、冬から夏にかけての生長期と、夏から秋にかけての成熟期が認められた。また、本調査からもアラメはカジメよりも浅所に生育しており、さらに生育深度が茎長と密接に関係し、カジメにおいては浅所よりも深所の個体が長い茎部を有していることから、アラメ・カジメの種間あるいは種内においてゾーネーションがあることが確認された。生長が最も停滞する成熟期の後半である10

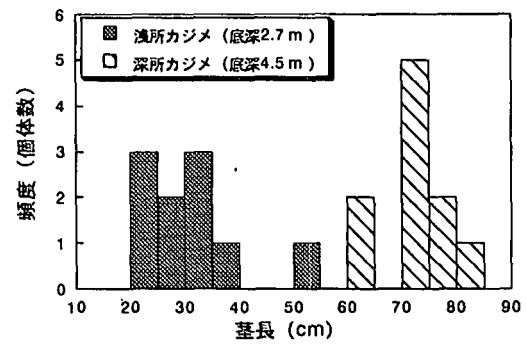


図-2 浅所カジメと深所カジメの茎長組成の比較

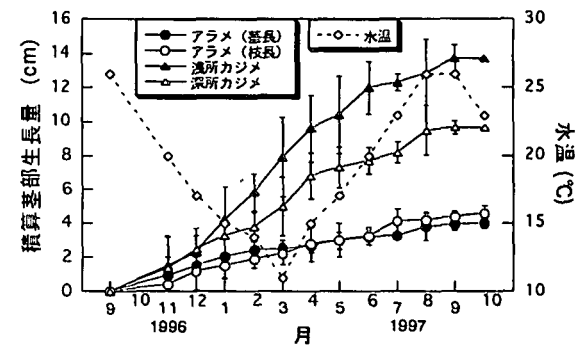


図-3 茎部積算生長速度と水温の変動
(平均値±標準偏差)

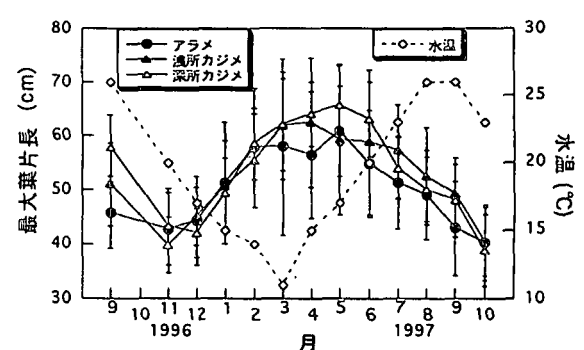


図-4 最大葉片長と水温の変動
(平均値±標準偏差)

表-1 成熟葉形成時期の比較

種名	開始	終了
アラメ	7月	2月
浅所カジメ	7月	11月
深所カジメ	7月	11月

～11月は、アラメ・カジメにとっては個体を維持する上で衰退期にあたり、この時期の流れに対する適応力を調べることは、個体の生残にとって非常に重要である。以下では、アラメ・カジメの流れに対する適応力として、引っ張り試験による藻体の固着力の測定と室内実験による藻体の流体力学的特性について調べた。

3. アラメ・カジメの固着力

3.1 測定方法

1997年10月28日に、アラメおよび浅所、深所カジメのそれぞれの群落内において、藻体の引き剥がしによる固着力の測定をおこなった。茎部から切断されるのか、基部から基質ごと剥がされるのかについても調べた。藻体の基部付近にロープを巻き付け、力量式置き針計のカギ部をそのロープに固定し、一人がそのロープがずれないように押さえ、もう一人が置き針計を水平方向に引くことにより藻体を引っ張った（図-5）。引っ張る方向は、卓越する波の進行方向とほぼ一致するようにした。各群落ごとに5個体ずつ引っ張り、基部から引き剥がされた個体については、さらに仮根部の状態を観察してその引き剥がされ方についても記録した。

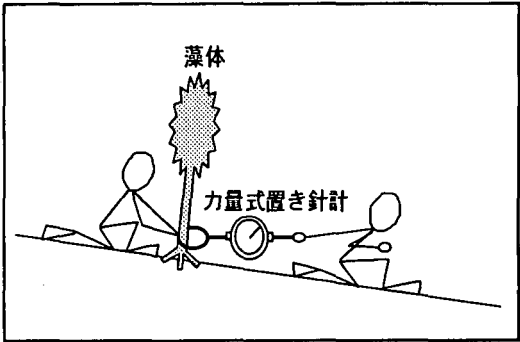


図-5 藻体の固着力の測定方法

3.2 固着力

固着力の強さは、平均値で見るとアラメで25.72、浅所カジメで31.80、深所カジメで35.80 kgf であった（図-6）。しかし値にはかなりのばらつきがあり、15.6～44.8 kgf の範囲内であった。

また剥がした個体の基部を調べると、基質の表面ごと剥がされた個体が多く、全体の53%（全15個体中8個体）であり、茎部から破断した個体はなかった（表-2）。

これらの結果から、得られた藻体の固着力は基質表面の強度を示しており、その強度は基質表面の状態（例えば石灰藻におお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。

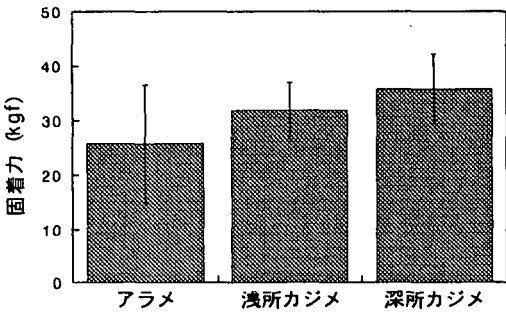


図-6 藻体の固着力の比較（平均値±標準偏差）

表-2 引き剥がされた藻体の基部の状態

引き剥がされ方	アラメ	浅所カジメ	深所カジメ
ほぼ基質ごと	3個体	3個体	4個体
一部仮根折れる	2個体	2個体	1個体
茎部から折れる	なし	なし	なし

4. アラメ・カジメの流体力学的特性

4.1 実験装置および方法

1997年11月11日に、アラメおよび浅所、深所カジメの各群落から藻体を採取し、北海道立中央水産試験場に急送した。供試藻体の諸元を表-3に示す。

流体力は、同試験場が有する大型振動流水槽（観測部長さ8.0 m、水路幅1.5 m、常用水深 1.0 m）を使用して計測した。本水槽は海水対応の鉛直循環式の回流水槽で、管路内部に配置された2対4基のインペラをコンピュータで制御することにより、流速-200～+200 cm/s の範囲で任意の流速条件（定常流、振動流など）を水路内に形成することができ

表-3 供試藻体諸元

測定項目	アラメ	浅所カジメ	深所カジメ
茎長 (cm)	15.0	31.0	63.5
茎径 (cm)	2.5	1.6	1.9
枝長 (cm)	11.0	—	—
最大葉片長 (cm)	38.0	30.0	34.0
基部湿重量 (g)	108.4	62.6	142.1
基部比重	1.127	1.077	1.084
葉部湿重量 (g)	206.1	55.75	118.84
葉部比重	1.075	1.083	1.076
葉部面積 (cm ²)	2249.9	971.9	241.6

る。計測では、水槽中央部に設置した三分力計のセンサー部に、仮根部を切り落とした莖部を円筒状のプラスチック製治具内にビニールテープで固定した上で上下逆向きに設置し、アラメについては二股の莖部が、カジメについては中央葉部が主流方向と垂直になるように配置した。水槽内に定常流（8.5～110.8 cm/s）および振動流（周期6.0～10.0秒、流速振幅2.4～59.8 cm/s）を発生させ、電磁流速計を用いて主流の流速変動も計測した（図-7）。また、振動流場における実験では 葉体部をすべて切断して莖部のみの計測もおこない、藻体の葉体部、莖部それぞれの流体力特性について検討した。なお、実験期間中の水槽内海水温は12.4～13.3℃ の範囲でほぼ一定であった。

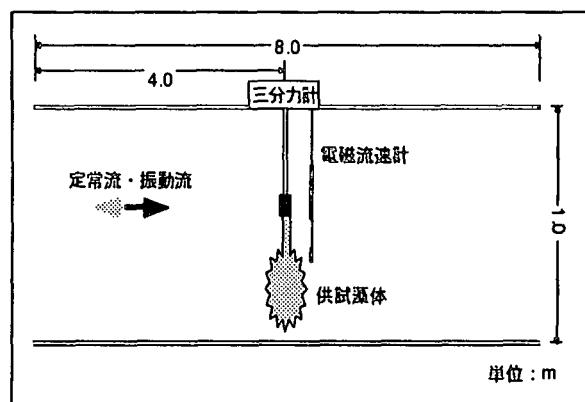


図-7 流体力測定実験概要図

4.2 葉体部に作用する流体力

定常流場でのアラメ、浅所カジメに作用する流体力（ F_d ）の主流流速（ u ）による変化を図-8に示す。ここでは深所カジメを用いての測定はおこなわなかった。ここで形態的特徴から、便宜的に莖部を円柱として近似し、抗力係数（ C_d ）を円柱の値（1.17）で与えて、同主流流速条件下における莖部の流体力を求め、それらを F_d から差し引くことにより葉体部のみに作用する流体力（ F_{dl} ）を算出した（図-9）。

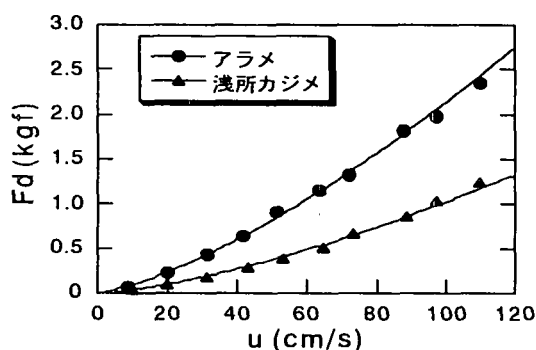


図-8 全抗力（ F_d ）の流速（ u ）による変化

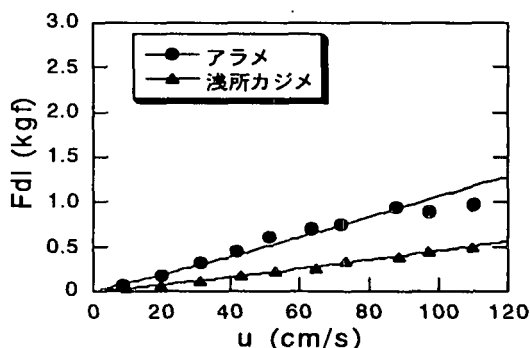


図-9 葉体部の抗力（ F_{dl} ）の流速（ u ）による変化

これらの計測データをもとに、葉体部の C_d 値を計算し、最大葉片長を代表長さとしてレイノルズ数（ Re ）で整理したものが図-10である。アラメ、浅所カジメとも C_d 値は Re 数に依存しながら0.03～0.04程度の値に収束し、同値は以前に著者らが計測したコンブ葉体の C_d 値とほぼ一致した¹⁰⁾。また C_d 値は Re 数の関数として同一曲線上で推移し、近似的に以下の式で表現できる。

$$C_d = 2358.4 Re^{-0.85}$$

なお、葉体部に作用する流体力は、アラメ、浅所カジメともに抗力成分が卓越していることが推察された。

4.3 莖部に作用する流体力

莖部はアラメ・カジメとも円筒状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、深所カジメの莖部に作用する最大流体力（ F_x ）と莖部を円柱として近似した場合の同振動流場における最大流体力（ F_c ）との比（ F_x/F_c ）を求め、莖径を代表長さとしてK.C.数で整理したものが図-11である。

これより、アラメ、浅所、深所カジメともにK.C.数

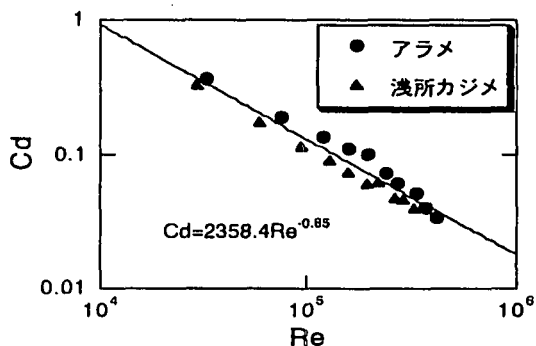


図-10 抗力係数（ C_d ）のレイノルズ数（ Re ）による変化

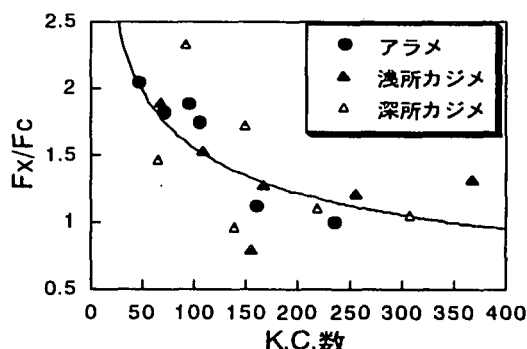


図-11 相対流体力（ F_x/F_c ）のK.C.数による変化

に依存しながらその比はほぼ1.0程度に収束することがわかった。つまり、非定常流場での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茎部を円柱として近似したものとほぼ同様になり、先の定常流場における茎部の流体力は円柱として近似したものをを用いて差し支えないことが示唆された。

4.4 作用流体力のモデル化

アラメ、カジメは茎部が葉体部と独立して発達しているため、本研究では藻体に作用する流体力を葉体部と茎部の作用流体力を加算することにより算出し、個々の相互干渉は無視した。アラメおよびカジメの形状特性値については、最大葉片長 (XL) および茎長 (XS) を代表長さとして表-4で近似的に表現できる。なお、アラメの枝部については茎部と同様な形状特性値を適用した。波浪にともなう藻体の揺動より茎部に生じる加速度および慣性力は、主流の加速度 (du/dt) と同位相で変動するものとして以下のように与えた。

茎部の加速度 = $2.29 \times 10^{-2} \times (du/dt)$

茎部の慣性力 = 茎部の加速度 × 茎重量

なお、茎部の比重については、すべての計測藻体の平均値としてアラメ、カジメともに1.096を使用した。

図-12は図-3、図-4で示した各藻体の月別生長状況の平均値をもとに、上記形状特性値を用いて、藻体に作用する最大流体力を計算したものである。計算に使用した波浪条件¹²⁾は、当該域に襲来する1年確率最大波の沖波条件 ($H_0=5.1\text{ m}$, $T=9.2\text{ 秒}$) をもとに、各藻体の生息水深における波高および底面流速を推算し使用した。これより、アラメ、カジメともに葉体部生長のピークを迎える4~5月に最大値、10~12月に最低値をとること、深所カジメが他と比較して大きな値を取りながら変動していることがわかる。図-13は、抗力成分について葉体部と茎部の作用流体力の月変化を示したものである。これより、深所カジメとアラメにおいて、葉体部の減耗が著しい10~12月にかけて茎部と葉体部の作用抗力が同程度まで達していることなどがわかり、形状の違いが流体力の変動から推察された。なお、質量力成分および慣性力成分については、いずれの月においても抗力成分の2~9%程度とオーダー的に無視できた。図-14は、藻体に作用する年最大流体力と図-6で示した藻体の固着力とを比較したものである。これより、いずれの藻体においてもほぼ年最大流体力を下限として固着力が表示され、波浪に伴う流体力が藻体の生息を規定していることが示唆された。

5. 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、アラメ・カジメのゾーネーションが流動環境とどのように関係しているのかを、生育分布 (深度) の現場調査をした上で、藻体の固着力および流体力学的特性から検討することであった。今回の結果からは、固着力が基質表面の状態に依存していること、流体力学的な特性はアラメ・

表-4 形状特性値

形状特性値	アラメ	浅所カジメ
葉面積	$1.56 \times XL^2$	$1.08 \times XL^2$
茎面積	$0.678 \times XS^{1.34}$	$0.507 \times XS^{1.31}$
茎体積	$0.360 \times XS^{1.67}$	$0.202 \times XS^{1.61}$

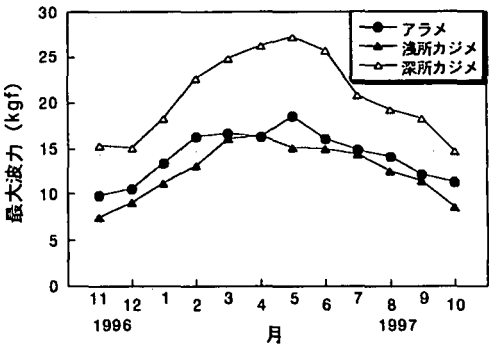


図-12 最大波力の月別変化

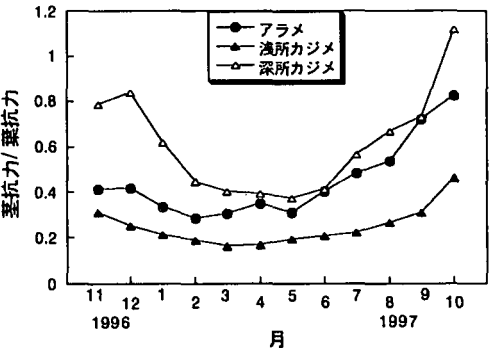


図-13 抗力の茎部と葉体部の割合

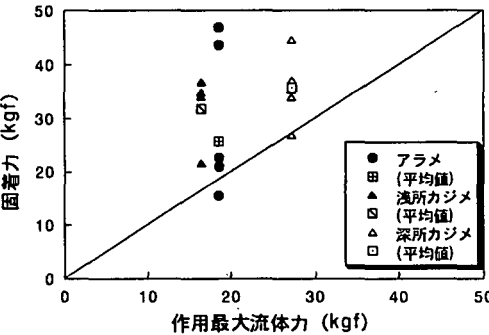


図-14 最大流体力と固着力の関係

カジメともほぼ同様の傾向を示すこと、また、モデル化から算出した藻体に作用する年最大流体力はほぼ固着力の下限にあることが明らかとなった。寺脇ら¹¹⁾によれば、藻体の固着力は生長段階、季節間で異なると言われていることから、特に初期段階である幼孢子体期までの間にアラメ・カジメのゾーネーションが決定されることが考えられる。今後は、幼孢子体から成体にいたるまでの固着力と流体力学的特性についての調査を進め、大型藻類の分布や生育・生残に関わる生態学的な知見を工学的に再評価していきたいと考えている。

6. 謝辞

毎月の潜水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をはじめ鈴木英雄技官、関本実技官、関藤守技官に、さらに流体力の実験にあたり、施設使用の便宜を図って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。また、研究上有意義な御助言と暖かい励ましを頂いた東京大学海洋研究所塚本勝巳教授に心から感謝申し上げます。

7. 参考文献

- 1) 喜田和四郎・前川行幸 1982. 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 3: 41-54.
- 2) 喜田和四郎・前川行幸 1983. アラメ・カジメ群落に関する生態学的研究Ⅱ. 熊野灘沿岸各地域における群落の分布と構造. 三重大水実研報 10: 57-69.
- 3) 中久喜昭 1980. 磯焼け漁場の海中林造成試験. 栽培技研 9: 25-30.
- 4) 山本秀一・児玉理彦・野口雄二・綿貫啓 1986. 相模湾西部海域におけるカジメ場造成試験. 水産土木 23: 13-18.
- 5) 北海道 1994. 海域特性総合利用技術開発調査報告書（磯焼けグループ）: 1-68.
- 6) 谷口和也 1996. 海中林造成の基礎と実践. 藻類 44: 103-108.
- 7) 寺脇利信 1993. 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: pp128-133.
- 8) 林田文郎 1977. 海中林構成種カジメの年齢と生長について. 日水誌 43: 1043-1051.
- 9) 谷口和也・磯上孝太郎・小島博 1991. アラメの2~4歳個体の生長および成熟についての観察. 藻類 39: 43-47.
- 10) 瀬戸雅文・水野武司・山田俊郎・梨本勝昭 1997. 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 44: 971-975.
- 11) 寺脇利信・川崎保夫・本田正樹・山田貞夫・丸山康彦・五十嵐由雄 1991. 海中林造成技術の実証 第2報 三浦半島西部でのアラメおよびカジメの生態と生育特性. 電力中央研究所研究報告 U91022: 1-69.
- 12) 神奈川県東部漁港事務所（財）漁港漁村建設技術研究所 1998. 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: 82.