

# 波浪による海藻の流失に関する研究

実施機関及び担当者：水産工学研究所 水産土木工学部

漁場水理研究室 川俣 茂

環境分析研究室 木元 克則

調査実施年度：7～9年度

## 緒言

コンブ類、アラメ・カジメ類、ホンダワラ類等の大型海藻の増養殖を図る際に、波浪による海藻の流失が問題になるが、その知見はほとんどない。波浪による海藻の流失に関連して沿整事業で問題となる事項としては、①藻場造成に適した流動環境の評価および波浪制御の計画・設計、②海藻自体に働く力と転倒モーメントを考慮した着生基質の安定計算、③海藻が生育環境に適応することを考慮した、安全な移植技術の確立と流動場の評価が挙げられる。

従来の研究（例えば Carrington<sup>1)</sup>）では一般に、海藻が波浪によって流失するか否かの判断を、海藻を付着面に沿う方向にばね計りで引張って測定される最大力（破壊強さ）と、流水水槽などで決められる抗力-流速関係式から算出される流失限界流速（抗力=破壊強さとなる流速）に基づいて行ってきた。しかし、生物学的には海藻の形態と流動耐性は成長段階だけでなく生育場所の流動環境に応じて変化することがいくつかの海藻で知られているし、また工学的には波動下の海藻に働く流体力は流速成分の抗力だけでなく流体の加速度成分、すなわち付加質量力も無視できないこと、および海藻が変形することによって流体力と基部におけるモーメントまたは応力が変化することなどの複雑な現象が関与しており、従来のような単純な手法で予測することに問題があった。しかし、波浪による海藻の流失に関する研究は我が国では皆無に近く、その予測手法に至っては手つかずの状態であった。このような状況の中で、大型海藻の増養殖技術を確立するために、本研究では以下の課題に取り組んだ。

- I アラメを例として、波浪による流失実態の解明、
- II 波動下で揺動する海藻の基部に働く力とモーメントを推定するための大型海藻の運動シミュレーションモデルの開発、
- III マコンブを対象として、海藻の流動耐性に及ぼす流動環境の影響の解明、
- IV マコンブを対象として、流動耐性の発現に必要な流動の期間の解明。

以下、これらの課題ごとに調査方法および結果を報告する。

## I アラメの流失実態

### 緒言

アラメは宮城県以南の本州太平洋岸に広く分布する多年生大型褐藻である。本種は低潮線から水深の約8～9m以浅の波当たりの強い岩礁に生育し、強固な付着器と1本の比較的太い莖状部で岩盤から立ち上がって葉状部を支持する構造を持ち、波に対する抵抗力が最も強い大型海藻の一つと考えられる。しかし、明らかに波力によって脱離したとみられるアラメが海岸に打ち上げられたり、海底を漂流していたりするのが観察されてきた。アラメの流失実態に関する調査は皆無で、流失原因もほとんど明らかになっていないことから、本調査では海岸に打ち寄せられたアラメを1年間にわたり調査し、アラメの流失原因を検討した。

## 調査方法

1995年4月～1996年3月に、銚子半島の最東端に位置する鹿島海岸において、打ち寄せられたアラメの数量、形態および流失部位を調べた。調査区域に選んだ海岸は、平均汀線延長約180mの陸の突出部に当たり、アラメが最もよく打ち寄せられる場所である。調査区の沖(東)側と北方の銚子漁港の防波堤までの約1kmの区間には平磯が広がり、南側には犬吠埼までの約1kmの間には砂浜がある。この平磯は、平均海底勾配約1/100の緩傾斜面で、突出した岩盤が点在し、暗礁、転石帯および砂底が混在した、極めて複雑な地形となっている。

アラメの調査では、ほぼ毎週1回、調査区の海岸に打ち寄せられた全てのアラメ藻体を採集し、その全部または本数が30本を超えた場合には無作為抽出した30本について、付着動物や砂礫が付着した部位を除いた湿重量、茎状部の下端における長径と短径、茎長、枝長、および腐朽の程度を測定した。当地区では最大で2m、月平均で約1.5mの潮位差があるが、1週間のうちで、日中に潮位が最も下がる時に調査を実施した。岸に打ち寄せられたアラメには、全体的または部分的に傷んだものも多く見られたが、藻体全体が変色した“枯死”した個体は少なく、傷みの主因は陸への打上げによる乾燥であると考えられた。このことから、調査を日中の最干潮時に行うことによって、打上げによるサンプル数の減少を最小限度に食い止められたと考えられた。

なお、計測したアラメ藻体は、二重計測がないようにするために全て浜に引き上げて海へ戻らないようにした。

## 調査結果

### 1) 波高および水温の経時的変化

観測期間に銚子漁港と名洗漁港の沖合(水深約25m)で観測された沖波有義波高の平均と、犬吠埼の汀線際で犬吠埼マリパーク(株)によって毎日午前7時30分に測定されている水温の経時的変化を図1.1に示す。ここで、図中の波高は、漂着アラメの調査を実施した時からその前の調査までの間に観測された最大波高を示している。5～6月に波高が4mを超える激浪があったが、その後は、静穏な日が続き、波高は大型の台風が襲来した9月17日までほぼ1～2mであった。この台風に起因する波高は最大で7.7mに達し、既存の資料<sup>2)</sup>からみて観測史上最大級のものであった。これ以降の調査間隔毎の最大波高は、11月に4mを超えたことがあったが、概ね3m前後であった。水温は8月下旬に最高の24℃に、また2月下旬～3月上旬に最低の6℃になった。

### 2) 漂流アラメの挙動と考察の前提

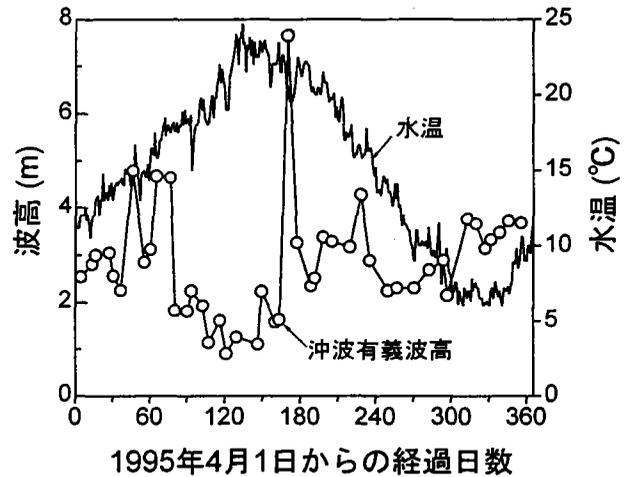


図1.1 沖波有義波高および水温の経時的変化

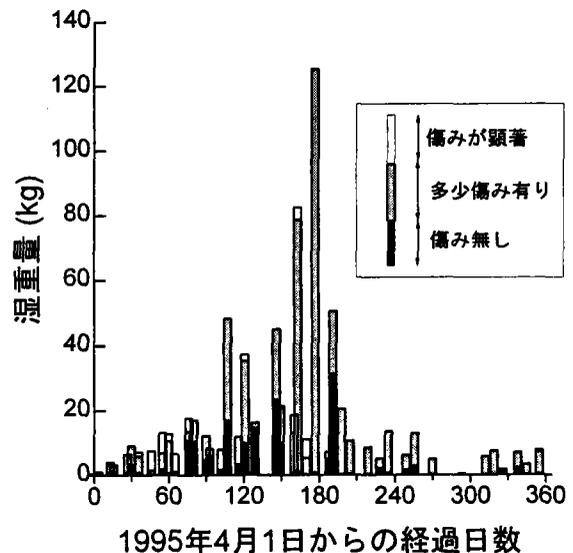


図1.2 計測したアラメの湿重量の経時的変化

図1.2に観測されたアラメの総湿重量変化を示す。この図より、“少し傷み有り”（局所的な傷み）および“傷み無し”に分類された藻体が、前回の調査日から当日までに沖の平磯で脱離したアラメの量を反映していると仮定して以下の解析を行った。調査地区の周辺では岸へ打ち寄せられたアラメは年間を通じて調査地区以外ではほとんどみられなかったこと、および調査地区周辺の沿岸が極めて開放的であることから、漂流しているアラメは急速に消失すると推察されることから、上記の仮定は概ね妥当であると思われる。しかしながら、基盤から離れた藻体が、どのくらいの間調査地区周辺の沿岸に留まり、どのような時間の遅れと割合で海岸へ打ち寄せられるかは、調査結果の考察で重要となるので、分かった点を以下のとおり予め述べておく。

9月17日の台風によって、非常に多くのアラメが基盤から離れたことは、図1.2および後に示す図からも明らかである。しかし、その翌日の調査ではあまり多くの漂流個体は発見されず、大量の藻体が観察されたのは、その翌週の9月25日になってからであった。また、6月上旬～中旬に波高4.6mの大きな波があったが、明らかに波によって流失したと思われるアラメが多く打ち上がったのは、その約1ヶ月後であり、その間の波高はほとんど2m以下であった。これらの事実から、激浪の直後に流出した海藻が岸へ打ち寄せられることは少なく、波高が低下した後に岸へ徐々に打ち寄せられると推察される。

### 3) 流失形態

流失したアラメは、大別すると、完全な藻体を有するもの、茎状部の下部（仮根）がほとんどないか全くないもの、および茎状部の分叉部で切れた葉状部を主体とする藻体に分類された。これらの流失形態をそれぞれ剥離型流失、切断型流失、および先端部流失と呼んで区別すると、1年間の合計（表1.1）から、切断型流失が全標本の約60%と最も多く、次いで剥離型流失が約30%と多く、先端部流失は10%以下と少なかった。さらに剥離型流失藻体を詳しく分類すると、仮根に海綿や穿孔性巻貝などの動物または礫や岩石片を着けたものと、付着物がないものに分けられた。前者は明らかに波力によって基面から剥がされたものであり、剥離型流失個体の51%がその形態であった。また、切断型流失個体では、仮根の痕跡があるものが75%を占め、切断型流失は主として仮根と茎状部との接合部で生じていたことは明らかであった。

切断型流失と剥離型流失の発生数の経時的変化を図1.3に示す。ここで、年齢査定指標となる<sup>3)</sup>分叉（枝）長を5cm（およそ満2年に相当）を目安にしてアラメ個体を若齢群と成体群に区

表1.1 “少し傷み有り”と“傷み無し”に分類された漂着アラメの流失形態別の年合計数量。  
()内は%を示す。

流失形態	本数	湿重量 (kg)
剥離型流失	191 (29.9)	161.7 (23.7)
切断型流失	399 (62.5)	488.4 (71.6)
先端部流失	48 (7.5)	32.2 (4.7)
合計	638 (100.0)	682.3 (100.0)

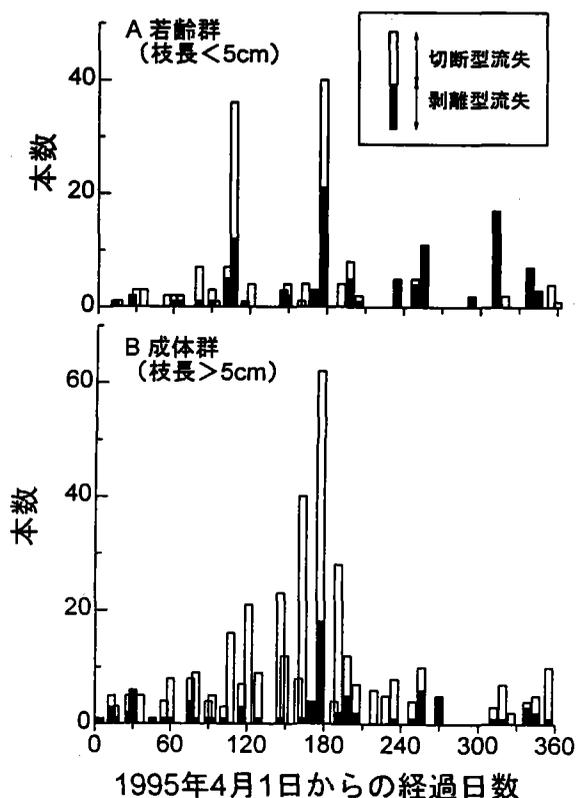


図1.3 剥離型および切断型流失の発生数の経時的変化

分して示した。若齢群についてみると、流失個体は9月と7月に圧倒的に多く、次に2月と12月に多かった。その流失形態については、秋～冬に剥離型流失の割合が高く、逆に春～夏には切断型流失の割合が高くなった。一方、成体群では、流失個体数は春から台風襲来時まで増加し、それ以降急激に減少して11～3月には低水準で安定的に発生していたことが分かる。また、その流失形態については、剥離型流失個体は大型の台風の襲来後の調査（9月25日）以外には少なく、その大部分が切断型流失であった。

剥離型流失には、1個の個体が単独で脱離する場合と、近接する複数の個体の仮根が塊となって基盤から剥がれる場合とがある。剥離型流失個体をこの二つに分類すると、後者の形態の割合は、成体群では48%であったのに対して、若齢群では74%と高かった。このことから、若齢個体は、流体抵抗が小さく、単独では流失し難いが、大型個体の付着器の上に加わった場合に、その大型個体の剥離型流失に伴って流失することがあるといえる。

#### 4) 年齢および体長別の流失形態の変化

枝長分布を流失形態別に図1.4に示す。枝長3cm未満の若齢個体では剥離型流失の発生率が高く、枝長2cm（推定年齢満1年）未満の幼体では切断型流失のそれを大きく上回った。しかし枝長5cm以上の成体では、切断型流失の発生率が剥離型流失の発生率の3～4倍と明らかに高くなった。

枝長5cm以上の成体について茎長分布を流失形態別に図1.5に示す。剥離型流失の発生数は、茎長15～20cmと40～45cmにピークがみられるが、切断型流失では全体的に25～30cmにモードを持つ凸型の分布を呈した。図中に台風襲来後の9月18日と9月25日に観察されたアラメを黒塗で示した。明らかに、台風時の極大波は、茎長40cm以上の大型の個体、特に茎長40～45cmの個体群を選択的に剥離・流失させたが、切断型流失にはそのような選択性はないことがわかる。

#### 考察

調査地区におけるアラメの流失は、主として仮根と茎状部との接合部での切断によって発生し、残り30%程が付着部の剥離によって発生していた。

アラメの茎状部の基部は、流体力による応力が最大になる部位である。しかし、アラメの茎状部の破壊強度は非常に大きく（1～4MN/m<sup>2</sup>）、茎状部の基部をロープで引張ると茎状部は破壊されずに付着部が剥がれることから、波力による単調な引張りでは茎状部が破壊されることはほとんどあり得ないと考えられる。従来、大型海藻の茎状部の破壊の原因として、ウニによる食害または砂礫の

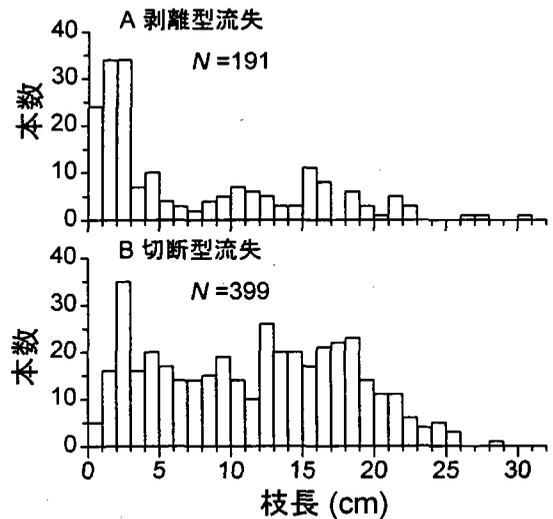


図1.4 流失形態別の枝長分布

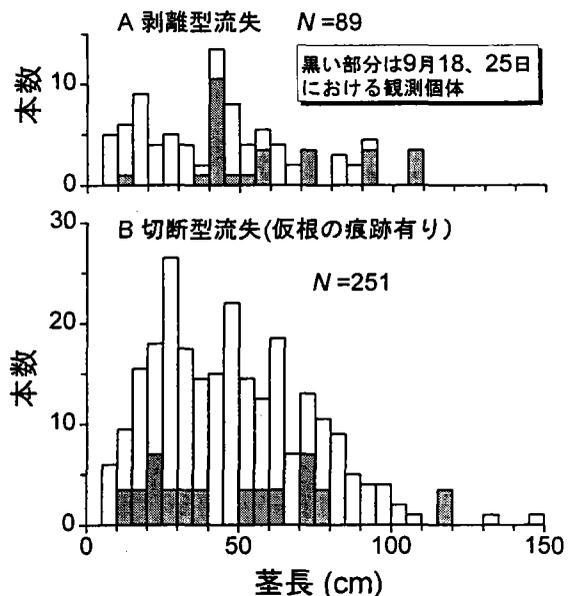


図1.5 成体群の流失形態別茎長分布

衝突による摩耗<sup>4)</sup>、および疲労破壊<sup>5)</sup>が上げられている。本調査でも摩耗によると思われる茎状部の損傷例が観察された。本調査地区のように漂砂の影響が強い平磯海岸では摩耗による損傷率が高いことが予想される。また、大型海藻の疲労破壊については、茎状部の形がアラメに類似した海藻 *Durvillea antarctica* で波による繰返引張りによって茎状部に亀裂が入って破断することが明らかになっているが<sup>6)</sup>、研究はほとんどなされていない。

アラメの剥離型流失の原因については、調査結果は基質の劣化がその主因であることを示唆した。従来、大型海藻が付着器から脱離する原因として、付着生物の上に大型海藻が生育し、付着生物ごと剥がれる場合があることが指摘されてきたが<sup>6)</sup>、このような流失はアラメの剥離型流失の半数を占め、アラメの分布域が他の生物との付着場所を巡る競争によって影響されている実態が明らかになった。

## II 大型海藻の運動シミュレーション

### 緒言

藻場造成における着生基質の安定重量を算定したり、大型海藻がどの程度の波によって流失するかを判定したりするためには、大型海藻の基部に働く力やモーメントの推定が必要である。しかし、大型海藻の運動は非定常性が強く、また大きな撓みを伴う非線形性の強いものであるために、その定式化は極めて難しく、その推定手法は確立されていない。本研究では、剛体-回転ばね系<sup>7)</sup>によって波動中で揺動する大型海藻の運動シミュレーションモデルの開発を試みた。

### 海藻の運動モデル

モデルでは、藻体を基盤から角度 $\theta_0$ で立ち上がった1本の柔軟な片持ち梁と仮定する。海藻の伸縮は曲げに対して無視できるので、図2.1に示すように藻体を $N$ 個の剛体のセグメントに分割し、各セグメント間に配置した回転ばねによってその曲げ運動を表現する。この回転ばねは、回転角 $\theta_i$ の差に比例する曲げモーメント $M_b$ を発生する。すなわち

$$M_b = k_i(\theta_i - \theta_{i-1} - \phi_i). \quad (2.1)$$

ここに、 $\phi_i$ は中立角である。また、回転ばねのばね定数 $k_i$ は藻体の曲げ剛性との間に次の関係がある。

$$k_i = EI_i / l_i, \quad (2.2)$$

ここに、 $E$ は藻体のヤング率、 $I_i$ と $l_i$ は各々第 $i$ セグメントの断面2次モーメントと長さである。また、モデルでは、各セグメントに働く浮力、慣性力、流体力はその先端に集中的に作用するとする。

以上により、海藻の運動は、一般化座標 $\theta_1, \dots, \theta_N$ を用いて、Lagrangeの運動方程式

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_r} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_r} + \frac{\partial U}{\partial \theta_r} = Q_r, \quad (r = 1, \dots, N) \quad (2.3)$$

によって表される。ここに、 $t$ は時間、 $T$ および $U$ は各々系全体の運動エネルギーとポテンシャルエネルギー、 $Q_r$ は第 $r$ セグメントに働く非保存力(流体力)である。第 $i$ セグメントの力の作用点

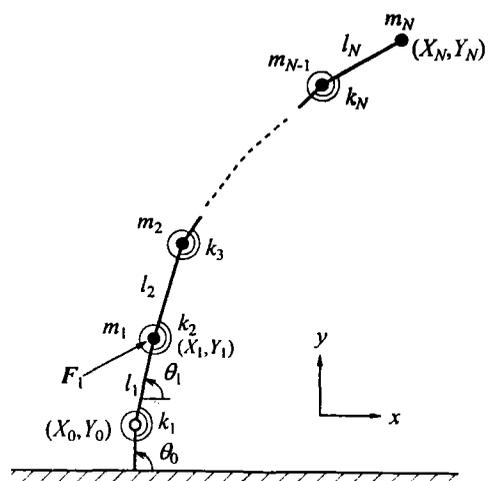


図2.1 海藻のモデルと記号

$$X_i = (X_i, Y_i) \text{を} \left. \begin{array}{l} X_i = X_0 + \sum_{j=1}^i l_j \cos \theta_j \\ Y_i = Y_0 + \sum_{j=1}^i l_j \sin \theta_j \end{array} \right\}, (i = 1, \dots, N) \quad (2.4)$$

で表すと、全運動エネルギー  $T$  は、

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i (\dot{X}_i^2 + \dot{Y}_i^2) \quad (2.5)$$

となる。ここに、 $\dot{\phantom{x}}$  は  $d/dt$ 、 $m_i$  は第  $i$  セグメントの質量である。また、 $U$  はばねの歪みエネルギーと浮力に対する位置エネルギーの和として

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N k_i (\theta_i - \theta_{i-1} - \phi)^2 + (\rho_a - \rho_s) g \sum_{i=1}^N V_i \sum_{j=1}^i l_j \sin \theta_j \quad (2.6)$$

で表される。ここに、 $\rho_a$  と  $\rho_s$  は海藻と海水の密度、 $g$  は重力加速度、 $V_i$  は第  $i$  セグメントの体積である。セグメントに作用する流体力ベクトル  $F_i$  を  $(F_i^x, F_i^y)$  で表すと、仮想仕事の原理より、非保存力  $Q_r$  は

$$Q_r = - \left( \sum_{i=r}^N F_i^x \right) l_r \sin \theta_r + \left( \sum_{i=r}^N F_i^y \right) l_r \cos \theta_r \quad (2.7)$$

となることが導かれる。また、流体力  $F_i$  については、セグメントに対する相対的な流速の法線方向ベクトル  $\mathbf{u}_{ni}$  と接線方向ベクトル  $\mathbf{u}_{ti}$ 、および相対的な流体の加速度の法線方向ベクトル  $\mathbf{a}_{ni}$  を用いて、近似的に次式で与えられるとする。

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_{di} + \mathbf{F}_{ai} \quad (2.8)$$

および、

$$\mathbf{F}_{di} = \frac{1}{2} \rho_s C_d A_{pi} |\mathbf{u}_{ni}| \mathbf{u}_{ni} + \frac{1}{2} \rho_s C_f A_{pi} |\mathbf{u}_{ti}| \mathbf{u}_{ti} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{F}_{ai} = \rho_s C_a V_i \mathbf{a}_{ni} + \rho_s V_i \ddot{\mathbf{u}}_i \quad (2.10)$$

ここに、 $C_d$  および  $C_f$  はセグメント面が流れに垂直および接線方向に向いている場合の抗力係数、 $A_{pi}$  はセグメントの輪郭形状面積、 $C_a$  は付加質量係数、 $\mathbf{u}_i$  は流速ベクトルである。式(2.9)、(2.10)では、抗力  $\mathbf{F}_{di}$  を、文献<sup>9)</sup>に倣って圧力抵抗と摩擦抵抗の和として表し、また付加質量力では接線方向の成分は小さいとして無視し、法線方向成分のみを考慮している。

### 数値計算方法

式(2.3)に式(2.4)～(2.10)を代入して整理すると、マトリックス形式の運動方程式

$$\{A\} \{\ddot{\theta}\} = \{f\} \quad (2.11)$$

が得られる。ここに、 $\{A\}$  は質量マトリックス、 $\ddot{\phantom{x}}$  は  $d^2/dt^2$ 、 $\{\ddot{\theta}\}$  は  $\{\ddot{\theta}_1, \dots, \ddot{\theta}_N\}^T$ 、 $\{f\}$  は  $\theta$  および  $\dot{\theta}$  を含む拡張された外力ベクトルである。波動下の海藻の運動は、適当な初期条件から式(11)を時間積分することによって求められるが、ここではその時間積分スキームとしてNewmark- $\beta$ 法<sup>9)</sup>を用いた。

### パラメータの決定

#### 1) ヤング率 $E$

ヤング率  $E$  は、通常、引張り試験で計測されるが、海藻の場合には材料をつかむ部分が潰れたり滑ったりするために、引張り試験の適用は難しい。そこで、試料(茎部)が水平になるようにその基部を固定した状態で先端に重りをぶら下げ、そのときの撓みが、以下の静的モデルの計算値に一

致するようにヤング率を求めた。

この場合にも図2.1と同じ系を用いれば、質量 $M$ の重りを垂下したときの定常解はLagrangeの未定乗数 $\lambda_i, \mu_i$ を含む、次の連立方程式より得られる。

$$\frac{\partial U_s}{\partial q_j} + \sum_{i=1}^N \left[ \lambda_i \frac{\partial}{\partial q_j} (X_i - X_{i-1} - l_i \cos \theta_i) + \mu_i \frac{\partial}{\partial q_j} (Y_i - Y_{i-1} - l_i \sin \theta_i) \right] = Q_{s,j}, \quad (j = 1, \dots, 5N) \quad (2.12)$$

ここに、 $q_j, Q_{s,j}$ および $U_s$ は各々、未知変数ベクトル、外力ベクトルおよびポテンシャルエネルギーで

$$\{q_j\} = \{X_1, Y_1, \theta_1, \lambda_1, \mu_1, \dots, X_N, Y_N, \theta_N, \lambda_N, \mu_N\}^T \quad (2.13)$$

$$\{Q_{s,j}\} = \{0, 0, 0, 0, 0, \dots, 0, -Mg, 0, 0, 0\}^T \quad (2.14)$$

$$U_s = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N k_i (\theta_i - \theta_{i-1} - \phi_i)^2 + \sum_{i=1}^N m_i g Y_i \quad (2.15)$$

で表される。式(2.12)に式(2.13)~(2.15)を代入すれば、 $5N$ 個の非線形連立方程式が得られるが、定常解は方程式の線形化によって<sup>10)</sup>求められる。

## 2) 葉状部の摩擦抗力係数

流体力の諸係数は、正確には藻体の動的な形状によって変化する。しかし、モデル計算上で最も重要となる流体力が最大となるときには、非常に柔軟な葉状部は流れの方向になびいているので、そのときの力（摩擦抗力）を適正に表現できるようにすれば、途中の変形過程でのモデリングに多少の不備があっても満足な結果が得られると期待される。ここでは、このような考えに基づき、摩擦抗力係数 $C_f$ として、定常流の中でなびかせた葉部の全抗力 $D$ から次式によって求めた値を用いた。

$$D = (1/2) C_f \rho_s A_p U^2, \quad (2.16)$$

ここに、 $U$ は流速、 $A_p$ は葉面積である。

## 適用例

以下にアラメへの適用例を述べる。

### 1) パラメータの測定

千葉県銚子市沿岸の平磯でアラメの成熟個体を採取し、茎状部のヤング率と葉状部の流体力を測定した。ヤング率の測定では、仮根と葉状部を切り取った茎状部を用い、その下端を水平に固定した状態で、分叉部の基部に紐を結びつけて重りを垂下して、そのたわみ量を測定した。次に、先に示した静的モデルでその変位に一致するヤング率を適当な値を代入して探索した。この計算では、茎状部の茎径を楕円と仮定して（このために、長径が鉛直方向になるように茎状部を固定して、たわみ試験を行った）、長さ方向に5cm毎に測定した短径と長径からスプライン補間した値で断面2次モーメントを与え、また $M=0$ のときの形状から中立角 $\phi$ を求めた。

曲げ試験の結果と静的モデルによる計算結果を対比した例を図2.2に、またそれによって得られたヤング率を表2.1に示す。表には、 $N=50$ とした場合の推定値を示したが、茎長の短い試料No.1~4では $N=25$ にしても誤差は4%以下であった。しかし、茎長が長かった試料No.5では $N$ が小さ過ぎる（セグメント長が長過ぎる）と誤差が大きくなり、また、曲げが大きくない場合には、誤差によってヤング率が大きくなるようであった。ただし、たわみがある程度大きければ、ほぼ同じ結果が得られ、回転ばねを用いたモデルが大きなたわみを適正に表現できることが分かった。

流体力の測定では、回流水槽（観測部断面：幅2.0m×水深1.1m）の定常流の中で、アラメの分叉部より下の部位を切除した藻体試料に、張力計を取り付けた紐を結んで、抗力と流速との関係を調べた。用いたアラメは、9月上旬に採取した大型の個体で、年齢的にも季節的にも葉状部の重量

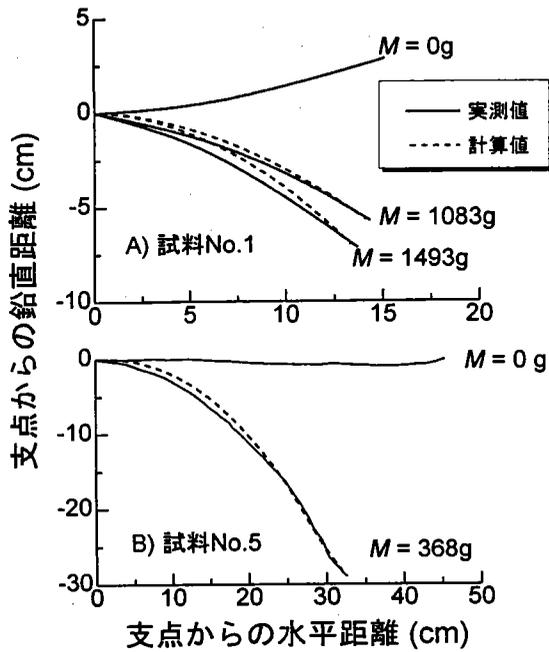


図2.2 アラメの茎状部のたわみの実測値と計算値との比較例

抗力を推定する式として次式が得られた。

$$D = 9.07U^{1.50}, \quad (r = 0.991) \quad (2.17)$$

ここに、 $U$ の単位はm/sである。さらに、流水中での葉状部の広がり具合からアラメの葉状部の輪郭形状面積を長さ0.5×幅0.3 mとして次式を得た。

$$C_f = 0.118U^{-0.50} \quad (2.18)$$

アラメの葉状部は、コンブのように単葉ではなく、掌状に延びた多数の側葉から成るので、正確なモデル化は困難である。しかし、葉状部が極めて柔軟で、素早く流れの方向へなびいてしまうので、一枚一枚の側葉をモデル化せずに、実用的な手段として以下のような簡略化を行った。すなわち、同じ形状・物性の側葉が幅方向へ並んで、前述した葉状部の輪郭形状面積を形成し、モデルでは一枚の側葉の運動を計算するが、茎状部との結合部にはその枚数分の力が作用するとする。

### (2) 計算例

構造を単純して、表2.2に示す条件で計算して得られた、藻体の運動(図2.3)と基部に働く力とモーメント(図2.4)を例示した。

図2.3は、初期条件の影響が無くなった後の形状を、藻体の先端に印を付けた1周期内の時間で示している。この場合には、分割数 $N$ を70からその半分にしてもほとんど同じ結果が得られることが分かる。また、仮想的な葉が巻くような状態から伸びたり、2次元的に見て輪ができた状態になっても、葉の先端がそのまま輪が縮まる方向ではなく、解ける方向へ動いたりすることが適正に表現できている。付着基部に働く力および曲げモーメントについては、実測によ

表2.1 アラメの茎状部のヤング率

試料番号	茎長 (cm)	茎径 <sup>注1)</sup> (mm)	垂下物の質量 $M$ (kg)	ヤング率 $E$ (MN/m <sup>2</sup> )
1	19.0	26.60	1.083	9.8
2	12.2	20.35	1.083	10.4
3	19.0	19.16	1.083	5.8
4	18.7	18.40	1.493	5.7
5	60.0	21.55	1.083	13.4
			1.493	13.3
			1.083	11.0
			1.493	10.3
			0.368	21.6
				20.5 <sup>注2)</sup>
				19.3 <sup>注3)</sup>

注1) 茎径は長さ方向に5cm毎に、短径と長径を測定した平均値を示す。

注2)  $N = 100$ のときの値。

注3)  $N = 200$ のときの値。

が最大に達した代表的な藻体であると考えられた。測定の結果、アラメ成熟個体の葉状部に働く摩擦

表2.2 アラメのモデルパラメータと計算条件

部位	パラメータ
藻体	$N = 70$ or $35$ , $\rho_a = 1080$ kg/m <sup>3</sup> , $E = 10$ MN/m <sup>2</sup>
茎部	長さ20 cm × 径2 cm の円柱, $\theta_0 = \pi/2$ $C_d = 1$ , $C_f = 0$ , $C_a = 0.5$
葉部	幅3cm × 長さ50cm × 厚1mmの葉10枚, $C_d = 2$ , $C_f = 0.118U^{-0.50}$ , $C_a V_i = \pi(\text{葉幅})^2 l_i / 4$
流体の条件	$\rho_s = 1025$ kg/m <sup>3</sup> , 水深 $h = 4$ m, 波高 $H = 1$ m, 波の周期 $T_w = 8$ s, $x, y$ 方向の流速 $u, v$ は微小振幅波理論より次式で与えた。
	$u = \frac{\omega H \cosh [k_w(h+y)]}{2 \sinh(k_w h)} \cos \phi_w,$
	$v = \frac{\omega H \sinh [k_w(h+y)]}{2 \sinh(k_w h)} \sin \phi_w,$
	$\phi_w = k_w x - \omega t$
	ここに、 $k_w = 2\pi/L$ ( $L$ : 波長)、 $\omega = 2\pi/T_w$ 。

る検証が必要であるが、計算結果からみると、 $x$ 方向の力 $F_x$ が支配的であり、またこの条件下では $F_x$ が極値に達したときには葉が伸びきっていることが分かる。また、 $F_x$ の最大値8.41 Nは、底面最大流速(0.913 m/s)と、定常流中における葉状部の摩擦抗力の式(17)から求められる値7.91 Nと大差がないこと、および曲げモーメントの最大値1.05 Nmは、その定常流中の抗力と茎長から単純に求められる値1.58 Nmに比べて小さく、アラメが柔軟にたわむことによってモーメントを減少させていることが分かる。

### 考察

波の場で揺動運動する海藻の運動シミュレーション手法として、回転ばねを用いたモデルを開発し、計算に必要な弾性係数などの諸係数を求める方法を提示した。数値シミュレーションの妥当性については、検証実験が必要であるが、計算例の結果は、このモデルが波動下での藻体の揺動運動を適正に表現できる可能性を示した。

このシミュレーション手法により、沿整事業の設計・計画で大型海藻と転石の流体力の合力および転倒モーメントを考慮した安定重量の算出と、藻場造成適地判定基準としての波浪による海藻の流失限界の予測が可能になる。また、本研究ではアラメへの適用事例しか示していないが、この手法は原理的にあらゆる形態の大型海藻に適用出来る。

現在の沿整構造物設計指針では、石材にかかる流体力しか考慮していないため、石材の安定所要重量が経験的に適当と考えられる大きさよりも著しく小さくなることがあるが、ここで示した手法により海藻の流体力も考慮できるので、そのような問題は解決される。しかし、その場合には実務計算で石材に及ぼす藻体の流体力をどのように決めるかという新たな問題が予想される。すなわち、流体力を単純に(海藻1本の流体力の最大値)×本数としてよいか、また本数を何本にすればよいかという問題である。例えば、転石1個に数十本以上のコンブが生えることがあるが、密生による“陰の効果”を無視して単純に(単独で生育する藻体の流体力)×本数で流体力を評価すると、過大な推定になる危険性がある。海藻が密生する場合を設計条件とする際には、陰の効果を検討が必要になるだろうが、今後の課題として残された。

最後に、開発したモデルにも実用上、残された問題があることを述べておく。回転ばねを用いたモデルでは藻体を完全な弾性体と仮定しているが、実際の藻体は粘弾性体である。2次元造波水槽においてビニール管の疑似藻体を用いたモデルの検証実験を行ったが、その結果、特に碎波点付近で流速が急激に変化する場合には海藻の曲げ変形はモデルの予想より明らかに起こり難くなることが分かった。これはビニール管が粘弾性体であるために、変形速度に比例して変形に対する抵抗力が働くためと判断された。藻体も明らかに粘弾性体であるので、現在のシミュレーション手法で計算すると藻体の曲げ変形を過大に推定し、その結果として力とモーメントを過小評価してしまう。粘弾性挙動を表現する方法には、回転ばねの回転角速度に比例した抵抗を発生するダッシュポットの導入する方法が

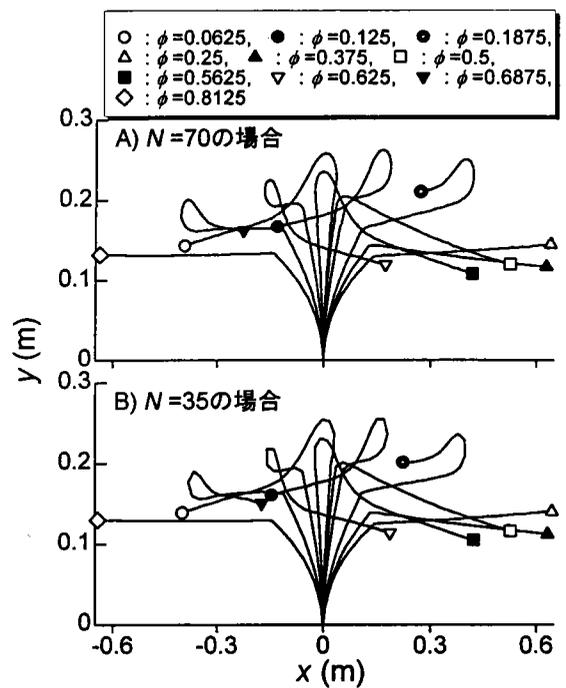


図2.3 アラメの運動の計算結果

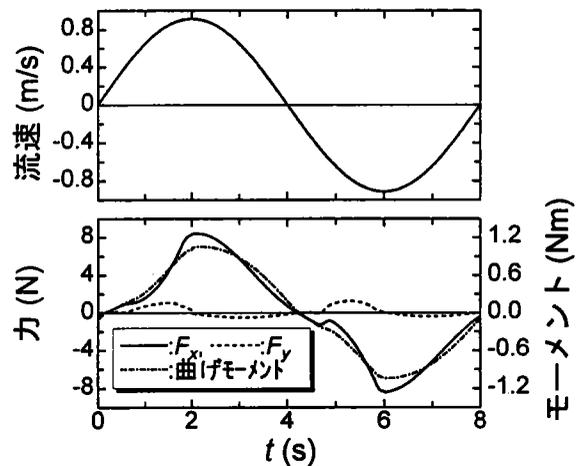


図2.4 基部における力( $F_x$ ,  $F_y$ )、曲げモーメントおよび $x$ 方向流速の時間変化

あるが、この点の改良は別途引き続き行う予定である。

### Ⅲ マコンブの流動環境への適応と波浪による流失

#### 緒言

海藻の形態は生育場所の流動環境によって著しく変化することが知られている<sup>11)</sup>。ここでは先に述べた海藻の流失限界がこのような流動環境への適応によって変化することを示すために行った、コンブを用いた実験について述べる。

また、海藻の流動環境への適応は、コンブ海中造林の移設技術に関連しても重要な現象であることを付言しておく。従来から、アワビ・ウニへの餌料海藻の供給手段として、コンブの延縄式養殖施設<sup>12)</sup>が有効な技術として紹介されてきた。しかし、多くの事例から、延縄式施設は耐波性が悪く、波の影響が強い場所での維持・管理が困難であることが分かり、現在では延縄式施設の利用は波浪の影響が弱い水深の深い所や湾奥に限られている。一般に、アワビ・ウニ漁場は波当たりの比較的強い浅い所にあるので、そのような場所では養殖したコンブを餌として有効利用することが出来ない。そこで、コンブが成長してから施設を漁場となる浅い水深へ移設する方法がいくつかの地先で試みられてきた。しかし、移設後にコンブが短期間に波によって流失してしまうという問題に直面している。著者らは、この流失原因はコンブの流動耐性が流動の弱い所では発達しないことにあると考えた。沿岸水質環境の悪化や地球温暖化に伴い、大型海藻が減少しつつあり、海中造林の必要性が今後、高まることが予想される。このような海中造林施設の移設技術の確立のためにも、海藻の流動環境への適応の解明は重要であると考えられる。

#### 調査方法

宮城県牡鹿半島太平洋側の鮫浦湾において、波浪の影響が比較的弱い湾奥の地点 (St.1、水深約5m) と比較的強い湾口近くの地点 (St.2、水深約9m) でマコンブを養殖し、以下の移植実験と室内実験を行った。養殖は、1995年12月22日にマコンブの種苗糸を十文字に巻き付けた塩化ビニール樹脂製付着板 (120×120×10mm) 10枚を周囲に固定した鉄枠 (外寸: 100×25cm) を、両地点の水面下2mに2基ずつ水平に係留して開始した。

#### 1) 斜面への移植実験

1996年5月29日、養殖したコンブを付着板に着生させたまま、St.2の近くの斜面に移植し、その後の流失状況を調べた。この実験に用いた付着板には最初、少なくとも100本以上のコンブが付着器を絡ませるようにして密生していたが、計数を容易にするため、はさみでコンブを基部から切除して19~27本/付着板に間引いた。間引き後、コンブの本数と総湿重量を測定するとともに、無作為に10本のコンブを選び、葉長と葉幅を測定した。その結果を表3.1に記す。以上の作業を船上で行い、コンブが痛まないように速やかに移植を行った。移植水深は約2、4および6mとし、各水深ごとに両養殖場所の付着板を各々2枚ずつアンカーボルトを用いて岩盤に固定した。

表 3.1 1996年5月29日、斜面に移植したコンブの葉長と葉幅 (n = 10)

付着板 No.	養殖場所	葉長(m) 平均±SD	葉幅(cm) 平均±SD
S1	St.1	1.81±0.40	9.22±1.50
S2	St.1	1.84±0.47	9.07±1.65
S3	St.1	1.86±0.20	8.23±1.49
S4	St.1	1.58±0.40	7.80±1.60
S5	St.1	1.31±0.42	6.77±1.71
S6	St.1	1.56±0.47	8.52±3.15
E1	St.2	2.60±0.76	7.28±2.25
E2	St.2	3.81±0.52	12.43±1.85
E3	St.2	2.81±0.59	9.44±2.81
E4	St.2	2.26±0.80	6.74±2.03
E5	St.2	2.02±0.31	6.72±2.05
E6	St.2	3.79±0.45	9.96±1.55

移植斜面は平均勾配2/5程の海岸の張出し部にあり、汀線付近にはアラメが生えていたが、それ以深の岩盤は磯焼け状態で、多少のエゾアワビと多くのキタムラサキウニが観察された。このため、移植日およびその後の潜水調査では、コンブが食害されないようにするために、周辺からウニとアワビを排除した。

## 2) 流動観測

流速計を水面近くに長期間係留することが困難であったため、コンブの生育期間の流速の時間変化をSt.2の海底（以下、参照点という）に固定した超音波式2次元流速計（鶴見精機、AICM-2F）によって観測し、養殖施設での流速については、1997年1月24日から約20日間、流速計をSt.1と2の養殖水深にも同時に1台ずつ係留して得られる、両養殖施設と参照点での流速の関係から推定することとした。これらの流速観測では2時間毎に0.5s周期で512個のサンプリングを行い、解析では間欠計測データごとに絶対流速の平均 $U_{abs}$ と、周期3~25sのフーリエ成分から得られる2乗平均流速 $U_{ms}$ （以下、波動流速という）を求めた。

移植斜面の波動流速については、流速計3台を用いた上記観測期間に、プラスチック板に接着した難溶性の石膏半球（径50mm；吉野石膏製焼石膏、特級とハイストーンHLPを4対1の割合で混合したものに30%の水を加えて型枠に流し込んで製作）を、移植斜面の3水深に1個ずつ固定してその溶解量から $U_{abs}$ の期間平均を推定した。また、この調査では同時に石膏の溶解量と絶対流速との関係式を決定するため、3台の流速計にも石膏半球を1個ずつ取り付け、石膏半球を交換して7日間の測定を2回実施した。

移植斜面の波動流速については、流速計3台を用いた上記観測期間に、プラスチック板に接着した難溶性の石膏半球（径50mm；吉野石膏製焼石膏、特級とハイストーンHLPを4対1の割合で混合したものに30%の水を加えて型枠に流し込んで製作）を、移植斜面の3水深に1個ずつ固定してその溶解量から $U_{abs}$ の期間平均を推定した。また、この調査では同時に石膏の溶解量と絶対流速との関係式を決定するため、3台の流速計にも石膏半球を1個ずつ取り付け、石膏半球を交換して7日間の測定を2回実施した。

## 3) 水槽実験

1996年5月30日、両養殖場所から取り上げた各々6枚、計12枚の付着板を、コンブを前述と同様にして25本/枚程に間引いた後、北海道余市町の中央水産試験場に急送し、6月3~7日に同試験場が有する大型回流水槽（観測部：長さ8m×幅1.5m×水深1.0m）を用いてコンブの耐振動流実験を行った。実験では、回流水槽の観測部中央の底面に付着板を固定し、所定の振動流を与えてコンブの流失状況を観察した。発生させた振動流速は周期12.8sの規則的な正弦波で、その流速振幅を0.4~0.7m/sから段階的に最大1.1m/sまで増加させた。各流速振幅を与える時間については、最初2時間としたが、コンブは10分ほどで流失しなくなったことから最終的には20分とした。

## 調査結果

### 1) 移植コンブの残留

移植したコンブの残留状況を表3.2に示す。移植5日後に実施した最初の追跡調査で、湾奥のSt.1で養殖したコンブは、波動流速が最も弱い水深6mでは大部分残っていたが、波動の影響が強い水深2および4mではほとんどすべてが剥がれて流失し、残留していた2本も葉状部の基部（長さ20cm程）しか残っていなかった。また、St.1で養殖したコンブは移植水深6mでも数量とも減少し続け、約2ヶ月後にはすべて流失した。

これに対して、波当たりが比較的強いSt.2で養殖したコンブは、少なくとも移植後12日まで、波

表 3.2 斜面に移植したコンブの残留状況

付着板 No.	移植水深 (m)	5月29日		6月3日		6月10日		6月21日		8月9日
		総重量 (kg)	本数	本数	総重量 (kg)	本数	総重量 (kg)	本数	本数	
S1	2	4.0	19	0	0	0	0	0	0	
S2	2	4.4	20	2	1	1	0	0		
S3	4	5.2	23	0	0	0	0	0		
S4	4	3.0	14	0	0	0	0	0		
S5	6	3.0	16	15	0.9	10	0.5	0+(8)	0	
S6	6	3.9	19	17	1.5	16	1.4	0		
E1	2	7.8	25							
E2	2	8.5	23	23	6.1	23	3.7	17+(5)	15+(4)	
E3	4	5.0	23	23	3.6	21	3.4	20+(3)	20	
E4	4	3.7	25	24	2.3	25	2.4	24+(1)	22	
E5	6	3.5	27	26	1.9	26	2.0	25+(1)	23	
E6	6	6.3	21	21	4.4	21	4.3	19+(2)	14	

注) ()内の数字は葉長が約10cm以下になったコンブの本数

移植斜面は平均勾配2/5程の海岸の張出し部にあり、汀線付近にはアラメが生えていたが、それ以深の岩盤は磯焼け状態で、多少のエゾアワビと多くのキタムラサキウニが観察された。このため、移植日およびその後の潜水調査では、コンブが食害されないようにするために、周辺からウニとアワビを排除した。

## 2) 流動観測

流速計を水面近くに長期間係留することが困難であったため、コンブの生育期間の流速の時間変化をSt.2の海底（以下、参照点という）に固定した超音波式2次元流速計（鶴見精機、AICM-2F）によって観測し、養殖施設での流速については、1997年1月24日から約20日間、流速計をSt.1と2の養殖水深にも同時に1台ずつ係留して得られる、両養殖施設と参照点での流速の関係から推定することとした。これらの流速観測では2時間毎に0.5s周期で512個のサンプリングを行い、解析では間欠計測データごとに絶対流速の平均 $U_{abs}$ と、周期3~25sのフーリエ成分から得られる2乗平均流速 $U_{rms}$ （以下、波動流速という）を求めた。

移植斜面の波動流速については、流速計3台を用いた上記観測期間に、プラスチック板に接着した難溶性の石膏半球（径50mm；吉野石膏製焼石膏、特級とハイストーンHLPを4対1の割合で混合したものに30%の水を加えて型枠に流し込んで製作）を、移植斜面の3水深に1個ずつ固定してその溶解量から $U_{abs}$ の期間平均を推定した。また、この調査では同時に石膏の溶解量と絶対流速との関係式を決定するため、3台の流速計にも石膏半球を1個ずつ取り付け、石膏半球を交換して7日間の測定を2回実施した。

## 3) 水槽実験

1996年5月30日、両養殖場所から取り上げた各々6枚、計12枚の付着板を、コンブを前述と同様に25本/枚程に間引いた後、北海道余市町の中央水産試験場に急送し、6月3~7日に同試験場が有する大型回流水槽（観測部：長さ8m×幅1.5m×水深1.0m）を用いてコンブの耐振動流実験を行った。実験では、回流水槽の観測部中央の底面に付着板を固定し、所定の振動流を与えてコンブの流失状況を観察した。発生させた振動流速は周期12.8sの規則的な正弦波で、その流速振幅を0.4~0.7m/sから段階的に最大1.1m/sまで増加させた。各流速振幅を与える時間については、最初2時間としたが、コンブは10分ほどで流失しなくなったことから最終的には20分とした。

## 調査結果

### 1) 移植コンブの残留

移植したコンブの残留状況を表3.2に示す。移植5日後に実施した最初の追跡調査で、湾奥のSt.1で養殖したコンブは、波動流速が最も弱い水深6mでは大部分残っていたが、波動の影響が強い水深2および4mではほとんどすべてが剥がれて流失し、残留していた2本も葉状部の基部（長さ20cm程）しか残っていなかった。また、St.1で養殖したコンブは移植水深6mでも数量とも減少し続け、約2ヶ月後にはすべて流失した。

これに対して、波当たりが比較的強いSt.2で養殖したコンブは、少なくとも移植後12日まで、波

表 3.2 斜面に移植したコンブの残留状況

付着板 No.	移植水深 (m)	5月29日		6月3日		6月10日		6月21日		8月9日
		総重量 (kg)	本数	本数	総重量 (kg)	本数	総重量 (kg)	本数	本数	
S1	2	4.0	19	0	0	0	0	0	0	
S2	2	4.4	20	2	1	0	0	0	0	
S3	4	5.2	23	0	0	0	0	0	0	
S4	4	3.0	14	0	0	0	0	0	0	
S5	6	3.0	16	15	0.9	10	0.5	0+(8)	0	
S6	6	3.9	19	17	1.5	16	1.4	0	0	
E1	2	7.8	25							
E2	2	8.5	23	23	6.1	23	3.7	17+(5)	15+(4)	
E3	4	5.0	23	23	3.6	21	3.4	20+(3)	20	
E4	4	3.7	25	24	2.3	25	2.4	24+(1)	22	
E5	6	3.5	27	26	1.9	26	2.0	25+(1)	23	
E6	6	6.3	21	21	4.4	21	4.3	19+(2)	14	

注) ()内の数字は葉長が約10cm以下になったコンブの本数

動が最も激しい水深2mでもすべて残留し、葉長が10cm以上あったコンブの残留率（但し、流失した付着板E1を除く）は約2ヶ月後の調査でも約80%と湾奥で養殖されたコンブに比べて明らかに高かった。また、一般にコンブの湿重量は5～6月に最高に達した後、先枯れによって減少するが、St.2で養殖されたコンブは本数が多少減少したにもかかわらず、移植水深4mと6mでは移植後23日でもほとんど同じ水準を維持していた。

## 2) 波動流速

3台の流速計を同時に用いて得られたSt.1と2の養殖水深における波動流速 $U_{rms}$ と参照点における波動流速との関係式として次の回帰式が得られた。

$$\text{St.1: } \ln(U_{rms} \text{ at St.1}) = 0.571 + 0.830 \ln(U_{rms} \text{ at reference site}), (SE = 0.217, r = 0.867, n = 362)$$

$$\text{St.2: } \ln(U_{rms} \text{ at St.2}) = 1.180 + 0.705 \ln(U_{rms} \text{ at reference site}), (SE = 0.087, r = 0.970, n = 246)$$

ここに、流速の単位はcm/sである。また、コンブの養殖期間に計測された参照点での波動流速の頻度分布を図3.1に示す。St.1と2の波動流速は上記の回帰式によって参照点の波動流速から推定できたので、St.1と2の波動流速がこれらの回帰式の推定値とその標準誤差 SE を各々平均と標準偏差とする正規分布に従うと仮定して、移植前のコンブが受けた波動流速の頻度分布を参照点での波動流速の実測値から推定した。その結果、得られた養殖期間におけるSt.1と2の波動流速の頻度分布を図3.1中の実線と破線で示した。St.1と2における波動流速の差は波の条件にあまり依存せず、ほぼ一定でSt.2の波動流速の方が平均で約4cm/s高く、また移植前のSt.1と2のコンブが受けた最多頻度の波動流速は各々7と11cm/sであった。

次に移植斜面での波動流速を推定する。図3.2に示すとおり石膏の初期質量  $m_i$  と浸漬時間  $t$  (hr)後の残量  $m_r$  から定義される溶解速度  $F = [1 - (m_r/m_i)^{1/3}] / t$  は、流速計による絶対流速の総平均と極めて密接な線形関係にあり、図中の回帰式を用いて石膏の浸漬期間における移植斜面での絶対流速の平均を推定した(表3.3)。移植水深2、4および6mでの絶対流速の平均は、波が強くなると水深による相対的な差異が減少する傾向がみられたが、各々参照点での値のおよそ3倍、2倍および1.5倍であった。これらの倍率が一定で、流速振幅がレイリー分布に従うと仮定すれば、有義流速振幅(1/3最大流速振幅の平均)  $U_s$  は  $U_s = 2U_{rms}$  となり、また、移植実験期間における参照点での波動流速の最大値が25cm/sであったことと  $U_{abs}/U_{rms} \approx 0.9$  の関係があったことから、水深2、4、6mに移植されたコンブが受けた有義流速振幅の最大値は各々1.5、1、0.8m/s程と推定される。

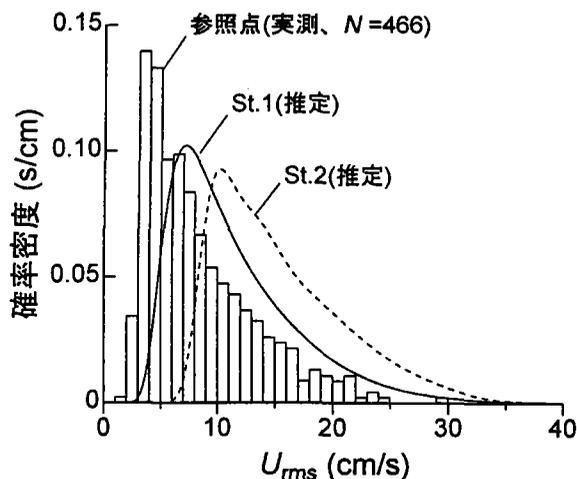


図3.1 養殖期間における波動流速の発生頻度分布

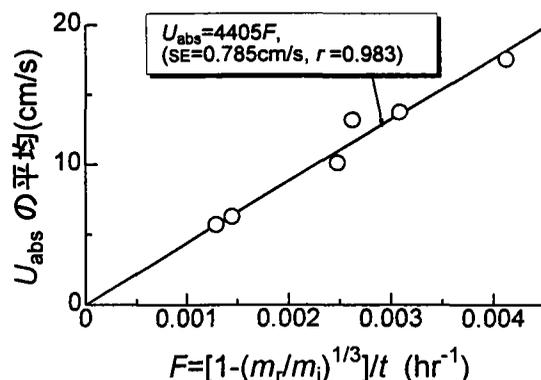


図3.2 絶対流速の平均と石膏減少速度Fとの関係

表 3.3 石膏半球による移植斜面における絶対流速の推定

調査期間	設置水深 (m)	$F \times 10^3$ ( $\text{hr}^{-1}$ )	$U_{abs}$ (cm/s)	参照点との $U_{abs}$ 比
1997年1月24日～1月31日	2	3.72	16.4	2.87
	4	2.99	13.2	2.31
	6	2.14	9.4	1.65
1月31日～2月7日	2	>5.93	>26.1	>1.98
	4	5.03	22.2	1.68
	6	4.00	17.6	1.33

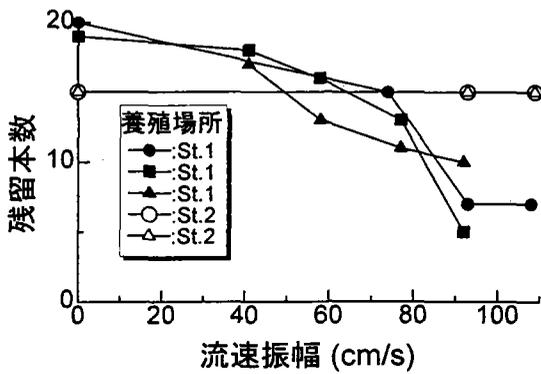


図3.3 流速振幅とコンブの残留本数

### 3) コンブの流失限界流速

回流水槽で実施した養殖コンブの耐振動流試験の結果を図3.3に示す。水槽の故障により十分なデータが得られなかったが、この結果から湾奥のSt.1で養殖されたコンブは流速振幅が0.5m/s程でも付着器から剥離・流失し、0.8~0.9m/s程で半減したのに対して、St.2の養殖コンブは装置性能限界に近い1.1m/sでも全て残留した。St.1の養殖コンブがかなり流失した0.8~0.9m/sの流速は前述したように水深の最も深い移植場所でも生じたと推定され、現場での流失状況に一致した。

### 4) 波浪環境による形態の相違

生育環境による形態的相違を明らかにするため、道中央水試へ輸送した前記のコンブについて、形態測定を行った。図3.4に幅が最も広い部位における葉厚と葉幅との関係を、また図3.5に縁辺部と中帯部との長さの比と葉厚との関係を示す。縁辺部と中帯部の長さの比とは、葉状部の縁辺にみられる波状の縮れの度合を表すための指標で、先枯れ部分を除く葉状部の両縁辺と中帯部を細長く切り、その長さを測って求めた。St.1のコンブはSt.2のものに比べて葉厚の割に葉幅が広く、また縁辺部の縮れが著しいことが分かる。

### 5) 付着力

上記の形態測定と同時に、コンブの付着力を測定した。付着力は、付着板を鉛直に固定して、垂れ下がったコンブの茎部にビニールテープを用いてぶら下げた容器に水を少量ずつ注ぎ込んで、コンブが剥がれ落ちたときの重量として求めた。

図3.6に付着力と付着器の湿重量との関係を示す。波当たりが弱いSt.1で生育したコンブの付着力は付着器の発達に無関係にほぼ一定の低い水準にあったが、St.2で生育したコンブの付着力は付着器が未発達の段階から比較的大きく、また付着器が発達によって明らかに増加した。

また現場においても、1996年6月21日、最大張力を測定できる置き針付ばね秤を用いて斜面に移植したコンブ、St.1と2の養殖コンブ、および鮫浦湾内のSt.1と2の中間の波打ち際 (St.3)

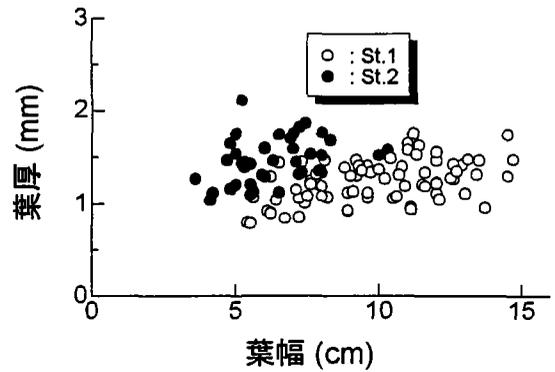


図3.4 コンブの葉厚と葉幅との関係

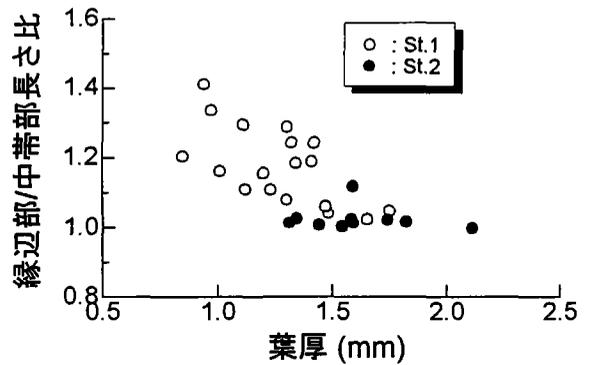


図3.5 縁辺部と中帯部の長さ比

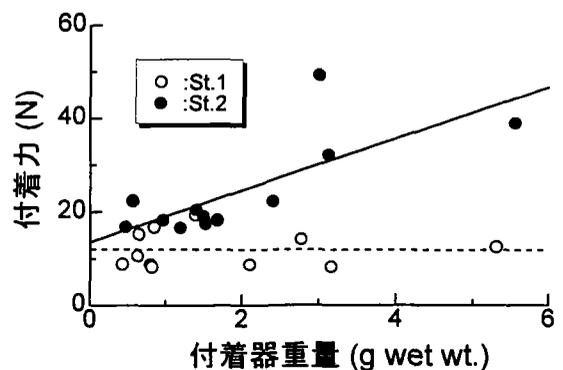


図3.6 付着力と付着器重量との関係

に自生していたコンブの付着力を測定した（表3.4）。生育場の流動が強いほど付着力が強く、また流動が緩やかなSt.1で養殖されたコンブでは、移植によって付着力が若干増加したことが分かる。

### 考察

海藻の流動耐性が生育場所の流動環境に応じて変化することが、コンブを用いた実験によって定量的に示された。このことから、IIで述べた海藻の流失限界の推定では海藻の流動環境への適応を考慮して藻体の標本採取を行い、付着力や流体力を測定する必要があること、および海中造林施設の移設では生育場所での流動が弱い場合には流動耐性が発達せずに流失の可能性があることが注意事項として上げられる。

表3.4 コンブの付着力試験結果(1996年6月21日)

コンブ	測定値(N)	平均 ± 標準偏差(N)
付着板 E2	77.5	61.3
	45.1	-
付着板 E3	44.1	40.4±7.0
	50.0	
付着板 E4	33.3	39.7±2.9
	34.3	
付着板 E5	38.2	39.7±2.9
	44.1	
付着板 E6	40.2	24.5±5.8
	36.3	
付着板 S5	18.6	24.5±5.8
付着板 S6	32.4	
	22.6	
St.1の養殖 コンブ	(n=8)	16.4±5.7
St.2の養殖 コンブ	(n=10)	49.1±16.3
St.3の天然 コンブ	(n=10)	19.9±7.5

### 摘要

マコンブの養殖実験により以下の事項が明らかになった。

- 1) 流動の弱い所で成長したマコンブは、①付着力が弱く、剥がれやすい、②葉体の縮れが著しく、葉幅が広く流体力を受けやすい、③葉厚が薄く、切れやすいという特徴を示す。
- 2) 生育場の2乗平均流速の頻度分布のモードが7cm/sでは、付着力は有意に発達せず、コンブは振幅0.4m/sの弱い振動流でも流失し始め、振幅0.8~0.9m/sで半減したのに対して、そのモードが11cm/sの環境下で生育したコンブでは、付着力の有意な発達がみられ、流速振幅1.1m/sの強い振動流中でも全く流失しなかった。また、この流動耐性は、付着力の増加だけでなく、葉厚の増加による葉体の強度の増加と、葉幅と葉状部の縮れの減少によってもたらされる。
- 3) 波動の弱い所で生育させたコンブを波動の強い所へ移植すると、流失の可能性がある。

## IV マコンブの流動耐性の発現に要する期間

### 緒言

IIIの課題において、コンブを流動の弱い所でロープ養殖すると、コンブの流動耐性が十分に発達しないために、移設に伴う流失の可能性が高くなることが明らかになった。しかし、コンブが成長しきらないうちに施設を移設すれば、コンブの流動耐性が発現し、波による流失の危険性が低下すると期待される。そこで、流動が比較的強い所への移設を、成長段階のどの時点で行えば、コンブの流動耐性が発現されるかを野外実験によって調べた。

### 調査方法

IIIの調査と同じ、鮫浦湾湾奥のSt.1で延縄式ロープで養殖したマコンブを、湾口近くのSt.2へ1ヶ月毎に移植し、移植時期による形態の変化を調べた。1997年1月20日、マコンブの種苗糸を約20cm間隔でロープに巻き付けて養殖を開始し、2月25日、3月28日、4月22日および5月30日に、約1mの長さに切り取ったロープを、St.2の水面下2mに係留された鉄枠(幅1m×長さ2m)に固定・移植して

いき、6月25日にすべてのコンブを取り上げて水産工学研究所へ持ち帰り、付着力と流体力の測定を行った。また、上記調査日には、St.1で養殖されていたコンブ1株をロープにつけたまま研究所へ持ち帰り、付着力および形態（付着器重量、茎径、茎長）の測定を行った。

また、超音波式2次元流速計（鶴見精機、AICM-2F）を両地点に係留し、生育場の流速の連続観測を行った。

### 調査結果

#### 1) 移植コンブの残留と成長

移植時に葉長が大きい方から30本のコンブに標識を付けて、その後の残留を調べたが、いずれの時期に移植したコンブもすべて残留していた。St.2とSt.1における流動の差は2乗平均流速で4cm/sであったが、この程度の流動の増加では流失は起こらないと考えられる。

図4.1に移植したコンブの大きさの変化を示す。密植のため、成長は良くなく、また株によって成長が異なることに注意しなければならないが、葉長、葉幅は、移植時期に依らず4～5月で最大に達し、また葉厚は6月下旬まで増加を続けていたことが分かる。

#### 2) 付着力

成長に伴うSt.1の養殖コンブの付着力の変化を図4.2に、また6月25日に取り上げた移植コンブの付着力を図4.3に示す。これらの図より、付着力は流動の弱いSt.1ではあまり増加しないが、波動の比較的強いSt.2への移植期間が2ヶ月程あれば、付着力は有意に発達し、十分な流動耐性が獲得されると推察される。

#### 3) コンブの流失限界流速

6月25日に取り上げたコンブに対して行った、定常流中における流体力の測定の結果を図4.4に示す。測定では、回流水槽（観測部：幅2m×水深1.1m）を用い、コンブをつけたままの状態に養殖ロープの両端に張力計を取付け、流れの中でそれをなびかせて流体力を測定した。1本当たりのコンブに掛かる流体力は、移植時期が早いコンブほど大きくなったが、その主な原因は、移植時期が早いほどコンブの葉面積が大きかったためと考えられる。図中の回帰式と図4.3の付

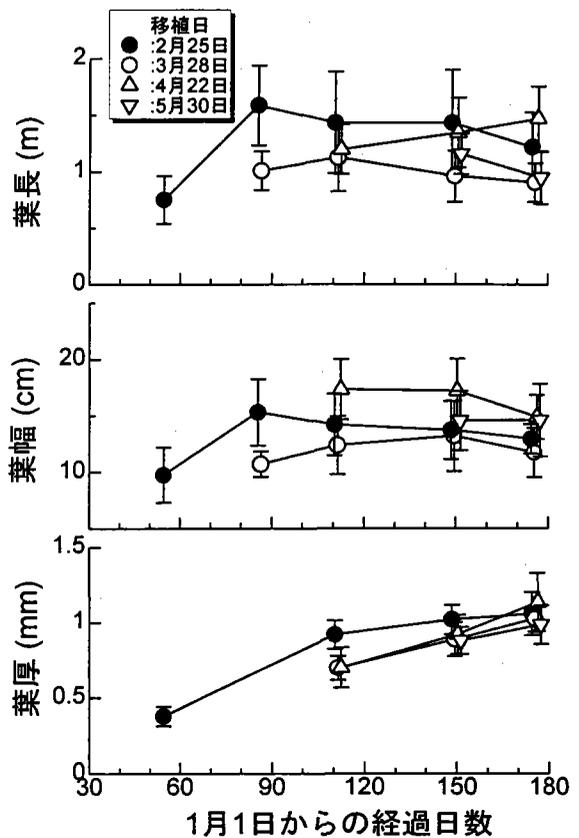


図4.1 移植コンブの葉状部の経時変化

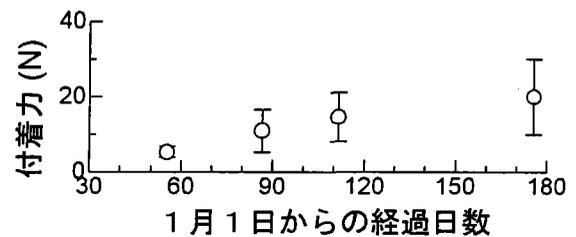


図4.2 St.1で養殖したコンブの付着力の変化

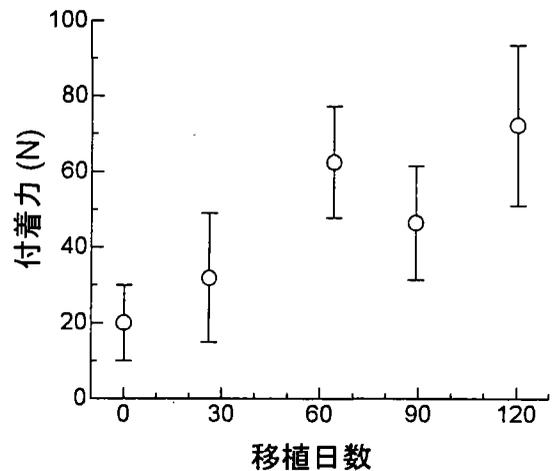


図4.3 6月25日に取り上げたコンブの付着力と移植日数との関係

着力より単純に推定されるコンブの流失限界流速はいずれの移植期間でも10m/sを超えており、予想を大きく上回った。

### 考察

実験の結果、St.2の程度の流動の中でコンブを2ヶ月ほどの養生すれば、十分な流動耐性の発達が見られることが分かった。この期間(4月22日からの55日間)にSt.2で計測された波動流速 $U_{ms}$ の平均は14.7cm/s、モードは11~12cm/sであり、この値はⅢの課題で得られた値とほぼ同じであった。従って、2乗平均流速で11cm/s程の流動があれば、コンブは流失することなく、付着力を次第に発達させ、2ヶ月ほどで幼葉期からその場所で生育させたのと同程度の付着力に達すると考えられる。

また、流失限界流速については、定常流中では付着力の最も弱かったSt.1のコンブでも約1.6m/sの速い流れに対しても全く流失しなかった。しかし、St.1のコンブが流速振幅1.6m/sの波動流速中で耐えられないことは、養殖ロープを水中から引き揚げたときにコンブが容易に脱落してしまったことやⅢで述べた振動流中での耐流試験結果からもほとんど明らかである。この差異は、コンブに働く外力が定常流中では単調な引張であるのに対して、波動流速中では引張り、ねじれ、曲げによる様々な応力が繰返し作用し、しかも藻体が撓んだ状態から緊張状態になる瞬間に衝撃的な力が発生することによると考えられる。いずれにしても、これらの事実からⅡの課題で述べた海藻の運動シミュレーションによる応力解析が重要な手段になると判断される。

### まとめ

海藻の流失限界の予測手法は、藻場造成技術の確立のために必要不可欠の技術である。従来、流失限界の推定が海外の研究者によって試みられてきたが、その多くは定常流中で得られた抗力と流速との関係式と現場での引張試験による付着力から求めるものであった。しかし、この調査によって、波浪に対する流失限界は、このような単純な方法による予測値より著しく小さくなることが明らかになった。その原因としては、海藻の揺動運動に伴う動的な応力の変動によって剥離が発生しやすくなることが考えられた。従って、妥当な推定値を得るためには、海藻の運動シミュレーション手法が極めて有効であると考えられる。ここで開発した計算手法については、解決すべき問題が残されているが、従来、不可能であった大変形を伴う藻体の曲げ運動を適正に表現できることが確認された。

また、海藻の流失限界流速は付着力と流体力が生育場所の流動環境によって有意に変化することから流動環境に依存することが明らかになった。従って、付着力と流体力の測定では生育場所の流動を考慮して海藻の標本採取を行う必要がある。

さらに、波浪による海藻の流失実態を調べた結果、海藻の流失は付着器の基質から剥離だけでなく、茎部の切断や基質の強度劣化による基質の破壊によって、少なからず生じていることが明らかになった。そのような場合の流失には、漂砂による摩耗や他の付着生物との競合などの要因が関わっている可能性が高く、多面的な検討が必要であると考えられた。

### 文献

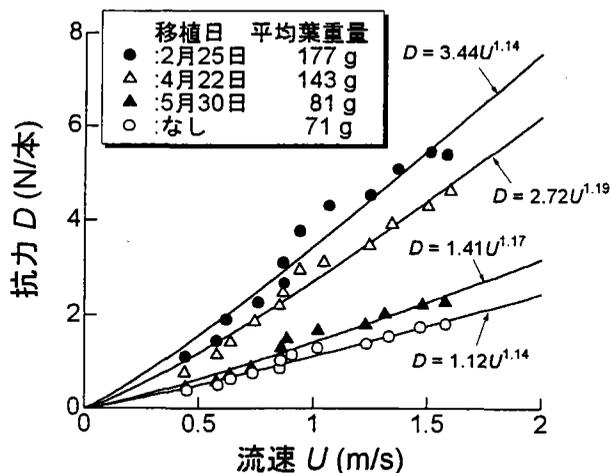


図4.4 6月25日に取り上げたコンブの1本当たりの平均抗力

- 1) Carrington, E., 1990. Drag and dislodgment of an intertidal macroalga: consequences of morphological variation in *Mastocarpus papillatus* Kützing. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 139, pp.185-200.
- 2) 間辺本文・山本正昭：漁港沿岸における波浪観測統計. 水産工学研究所技報（水産土木），9，pp.1-133，1987.
- 3) 谷口和也・加藤忠彦，1984. 褐藻類アラメの年齢と生長. 東北水研研報，46，pp.15-19.
- 4) Koehl, M.A.R. and S.A. Wainwright, 1977. Mechanical adaptations of a giant kelp. Limnol. Oceanogr. 22, pp.1067-1071.
- 5) Santelices, B., J.C. Castilla, and P. Schmiede, 1980: Comparative ecology of *Lessonia nigrescens* and *Durvillea antarctica* (Phaeophyta) in central Chile. Mar. Biol. 59, pp.119-132.
- 6) Dayton, P.K., 1973. Dispersion, dispersal, and persistence of the annual intertidal alga, *Postelsia palmaeformis* Ruprecht. Ecology 54, pp.433-438.
- 7) Friedland, M.T. and M.W. Denny: Surviving hydrodynamic forces in a wave-swept environment: Consequences of morphology in the feather boa kelp, *Egregia menziesii*(Turner). J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 190, pp.109-133, 1995.
- 8) 中嶋俊夫・元良誠三・藤野正隆，1981. 係留浮体の運動を考慮した係留ラインの動的挙動について. 日本造船学会論文集，150，pp.266-277.
- 9) 鷲津久一郎・宮本博・山田嘉昭・山本善之・川井忠彦，1983. 有限要素法ハンドブックⅡ，応用編，pp.29-44.
- 10) 中桐滋，1992. 計算力学とCAEシリーズ11，離散化モデルと構造シンセシス. 培風館，pp.157-162.
- 11) Gerard, V.A and K.H. Mann, 1979. Growth and production of *Laminaria longicruris* (Phaeophyta) populations exposed to different intensities of water movement. J.Phycol. 15, pp. 33-41.
- 12) 菊地省吾・浮永久・秋山和夫・鬼頭均，1974. 江ノ島実験漁場における造林実験および造成効果調査. 浅海域における増養殖漁場の開発に関する総合研究. 東北区水産研究所，pp.14-21.