

藻場基盤に作用する海藻經由の波力について

長谷川 寛

正会員 電力中央研究所 我孫子研究所 水理部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

藻場は年々、沿岸域の開発による埋立や水質悪化による成育不良などの理由により減少してきているが、近年、藻場基盤を造成する方法が各地で試みられている。しかし、このような藻場造成基盤は基盤材に海藻が着生すると海藻を經由した波力も基盤材へ働くため直接作用する波力のみで設計された基盤材重量では不安定になる可能性がある。本研究は比重が海水より重くヤシの葉に似たアラメとヤツデの葉に似たカジメおよび気胞を持ち海水より比重が軽いホンダワラを用いて、レイノルズ数が 10^4 程度の沈降実験、 10^5 程度の中型造波実験および上限が 2×10^6 の実規模大型造波実験により広範囲のレイノルズ数に対する3種類の海藻の抗力係数を明らかにし、海藻の着生を考慮に入れた藻場造成基盤材の所要重量の設計法について提案した。

Key Words: seaweed forest formation, wave force, armor block, hydraulic model test, anti-wave design

1. はじめに

藻場は食料の生産、魚介類の産卵場、保育場および餌の供給の場であり、また、海水に酸素を供給するため、海域の環境保全に重要な役割を有する。しかし、近年、沿岸域の開発による埋立、土砂流入による海水の透明度の低下、植食動物の摂餌圧の増大などにより藻場は減少している。

これに対処するために、最近、自然の海藻群落の周辺にコンクリートブロックや天然石の投入により藻場基盤を造成する方法が各地で試みられている。このような藻場造成用の基盤材の重量は基盤材に直接作用する波力に対して安定性を確保するように設計されてきたが、基盤材に海藻が着生すると海藻を經由した波力も基盤材へ働くため、基盤材に直接作用する波力に対する安定性のみで設計された重量では不安定になる可能性がある。

本研究は、海藻の波・流れに対する抗力係数を推定し、それから得られる海藻經由の波力を藻場基盤材の耐波浪安定設計に取り入れる手法を提案する。

2. わが国の藻場

(1) 海藻群落の分布

わが国の藻場は1973年以降、1年当たり約300ha減少し、1980年では約18万haである¹⁾。これは、わが国の陸地面積の約1/200で、沿岸長さ3万4000kmに対して約6mの帯状の幅に相当する。

このような藻場は図-1に示すように主に太平洋

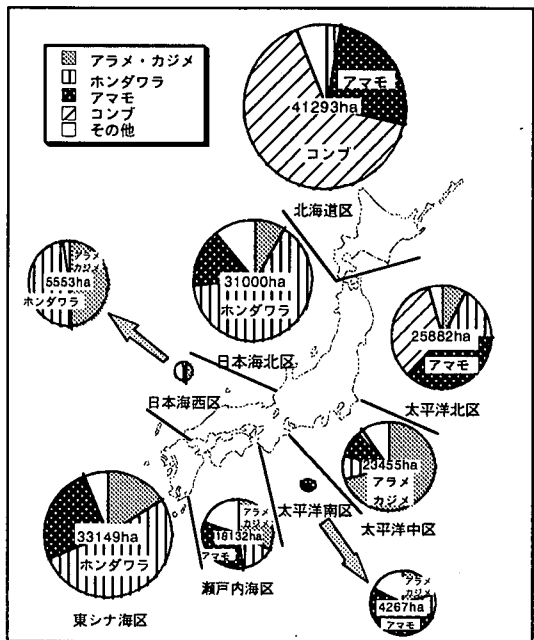


図-1 藻場の分布 (文献¹⁾のデータによる)

側沿岸の暖流域に形成されるアラメ・カジメ場とアマモ場、日本海側沿岸の寒流域に形成されるガラモ場とコンブ場に分類される。この中で、アラメ、カジメ場は水深20mまでの岩場に多く、アラメ類 (*Eisenia bicyclis*)・カジメ類 (*Ecklonia cava*) が密生し、アラメは長さが2m、カジメは3m位まで成長する。アマモ場は日本中の沿岸の水深5mまでの内湾域の砂地に多く、アマモ類 (*Zostera marina*) が

密生し最大2m位まで成長する。ガラモ場は水深20mまでの岩場に多く、ホンダワラ類 (*Sargassum fulvellum*) が密生し、長さが数mまで成長する。コンブ場は北海道沿岸の水深20mまでの岩場に良く見られ、コンブ類 (*Laminaria japonica*) が密生し、コンブは幅20~30cm、厚さ3mm、長さが4m位まで成長する²⁾。

(2) 藻場造成の現状

藻場の造成法は種苗や母藻を移植する生物的方法と藻場基盤を造成する工学的的方法の2種類に分けることができる。生物的方法には、延縄式施設に種苗糸を巻き付けたり母藻を挟む養殖方式や母藻をロープに巻き付けたり網袋に入れて吊るす母藻移植、種苗をブロックやスレート板に採苗し養成後海域に展開する種苗移植などがある³⁾。母藻移植法については、1984年頃から北海道日本海側のマコンブ漁場や土佐湾のカジメ漁場で行われている⁴⁾。

工学的的方法には海藻が付着する岩盤をチェーンなどで擦ったり爆破して基盤を更新する方法、海藻群落周辺にコンクリートブロックや天然石を投入し藻場基盤を造成する方法があり⁵⁾、チェーン振り法は1980年代から始まり、コンブ場で効果を上げている。また、アラメ・カジメが繁茂している海域では、古くから天然石が投入されていたが、1970年代頃からは各地で造成用コンクリートブロックを投入した試験が実施され成功を収めている^{6)・7)}。最近では、海岸侵食対策として施工される人工リーフや潜堤などに海藻が付着するのが見られ、藻場造成に効果が期待されている。

電力中央研究所(以下当所と称す)では、この中で基盤を造成する方法に着目し、1990年、砂地海底でのメンテナンスフリーの藻場造成を目指して、三浦半島の秋谷地先の水深11m地点に、遊走子が付着し易い形状を取り入れた平らなブロック藻場基盤と天然石を用いた藻場基盤を造成し、1997年現在、両藻場基盤とも海藻が繁茂している⁸⁾。

(3) 海藻經由の波力について

従来、藻場基盤材、潜堤や人工リーフなどに用いられるブロックや被覆石の重量は波による揚力を考慮した耐波浪安定性で設計されている。しかし、藻場基盤材となる被覆石に海藻が着生した場合、図-2に示すように、鉛直方向には被覆石に作用する揚力に、さらに海藻經由の鉛直波力が加わることになる。

本研究は海藻が付着することによって生じる波力を水理実験により明らかにし、藻場基盤材などの耐

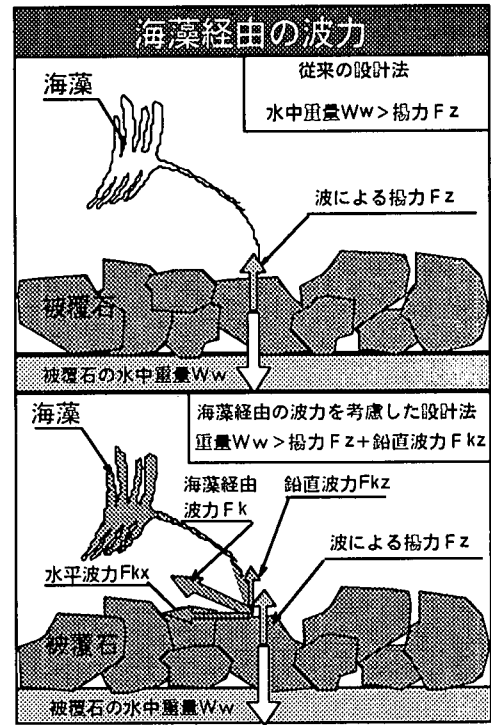


図-2 海藻經由の波力概念図

波浪安定設計に対して、動的挙動を考えずに藻場基盤材の所要重量に海藻經由の波力を加算する手法を提案するものである⁹⁾。そのため、図-3に示す研究の流れのように、式(1)で定義される海藻のレイノルズ数 Re (以後の Re も同様の定義とする)が 10^3 から 10^4 のオーダの範囲では沈降速度水槽実験、 10^4 から 10^6 のオーダの範囲では造波実験により海藻の茎部に作用する張力を測定し、それらから推定される抗力係数を用いて海藻經由の波力を推定することにした。

$$Re = u \ell / \nu \quad (1)$$

ここに、 u は波の軌道流速振幅または流れの流速、 ℓ は海藻の全長、 ν は海水又は水槽水の動粘性係数(約 $0.01\text{cm}^2/\text{s}$)である。

なお、沈降速度水槽実験と造波実験に用いた海藻は次の3種類とした。

- ①比重が海水より重く、その形状がヤシの葉に似たアラメ
- ②比重が海水より重く、その形状がヤツデの葉に似たカジメ
- ③海藻の葉自身に気泡を有し比重が海水より軽く、基盤からちぎれた場合海中表面を漂うホンダワラ

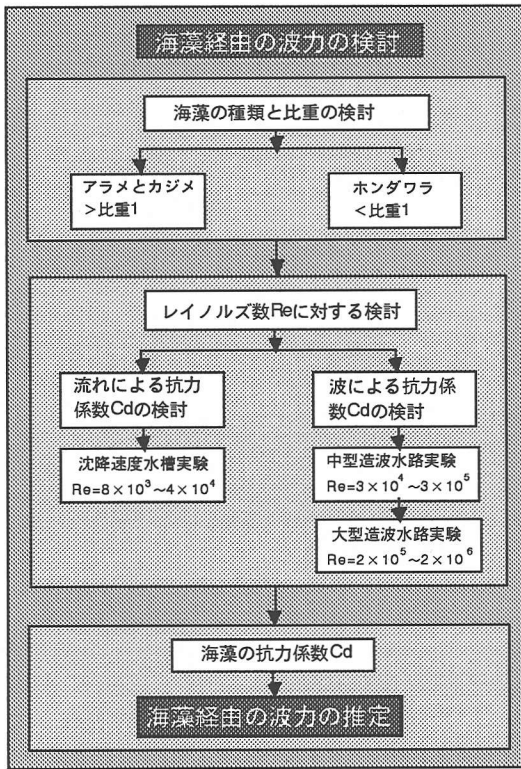


図-3 研究の流れ

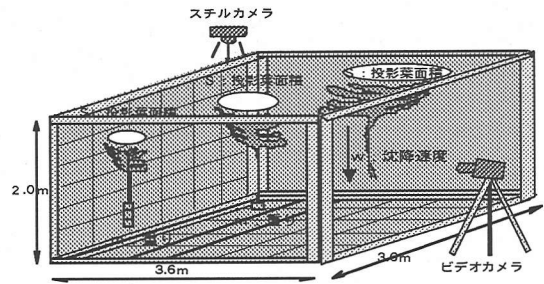


図-4 沈降速度実験の概

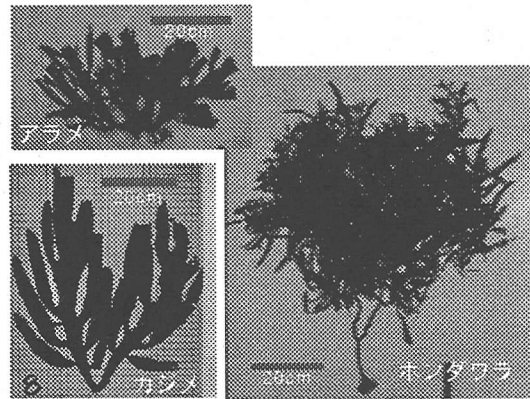


写真-1 海苔の写真

3. 流れ場における海苔の抗力係数

(1) 実験の概要

a) 実験の方法

沈降速度水槽実験は流れに対する海苔の抗力係数を推定するために行った。実験は図-4に示すように水を満たした長さ及幅が3.6m、高さ2mのガラス張り水槽の上面から海苔を落下させて行い、海苔根部に重さ16~440gの錘を付けることにより海苔個体の沈降速度 w を数cm/sから35cm/sまで変化させた。同時に、水槽の上面と側面からステルカメラとビデオカメラにより落下状況を記録し、写真と静画像から抗力係数の算定に必要な海苔の投影葉面積 S (cm²)を推定した。なお、展開葉面積 A (cm²)は実験前に写真-1のように、アラメとカジメについては海苔の葉を開いた状態、ホンダワラについては自然に置いた状態で撮影し、スキャナー・画像処理により測定した。

b) 実験に用いた海苔諸元

アラメやカジメの海苔は三浦半島の西海岸(神奈川県秋谷地先海域)において根ごと採取して、海水

表-1 沈降速度実験に用いた海苔の諸元

海苔名	本数	海苔の全長	展開葉面積	葉長	空中重量	錘り
	n	l (cm)	A (cm ²)	l_1 (cm)	M (gf)	m (gf)
アラメ	2	48.0	868.0	48.0	148.0	0~72
カジメ*	11	55.0	872.0	41.0	75.0	0
カジメ	2	48.0	1096.0	48.0	216.0	0~72
ホンダワラ	4	73.0	1884.0	49.0	720.0	0~440

*は錘り無し実験に用いたカジメの諸元。記号上部の-は各海苔諸元の平均値を示す。

を満たした水槽に入れ当所(千葉県我孫子市)へ運搬した。沈降実験に用いた海苔は、表-1に示すように根から葉の先端までの全長平均 \bar{l} が48cmのアラメ2個体、全長平均 \bar{l} が54cmのカジメ13個体、全長平均 \bar{l} が73cmのホンダワラ4個体とした。また、表中にはそれらの海苔の展開葉面積、葉長(葉柄から葉先端までの長さ)、重量の平均値および錘の最大値を示す。カジメは13個体の内2個体は錘を付けて沈降速度を測定したが、それ以外の海苔個体は錘を付けず海苔個体自身の沈降速度を測定した。これらの沈降実験におけるレイノルズ数は $8 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4$ で比較的小さな範囲である。

表-2 海藻葉面積収縮率と抗力係数の例示

海藻名	全長 ℓ (cm)	展開葉面積 A (cm ²)	空中重量 M (gf)	重り m (gf)	水中重量* M _w (gf)	沈降速度 w (cm/s)	収縮率 S/A	投影葉面積 S (cm ²)	抗力係数 Cd	レイノルズ数 Re
カジメK1	50.0	1180.0	222.0	0.0	22.2	7.5	0.72	846.4	0.90	3.77E+04
				18.0	37.9	13.4	0.56	660.3	0.62	6.72E+04
				36.0	53.6	19.1	0.45	526.3	0.55	9.56E+04
				72.0	85.0	26.5	0.34	399.9	0.59	1.33E+05
アラメA1	60.0	785.0	125.0	0.0	12.5	6.9	0.74	579.6	0.90	4.12E+04
				18.0	28.2	16.1	0.50	393.9	0.54	9.68E+04
				36.0	43.9	20.2	0.43	335.8	0.63	1.21E+05
				72.0	75.3	33.9	0.27	208.2	0.62	2.03E+05
ホンダワラH1	75.0	2243.0	900.0	36.0	20.2	4.2	0.81	1808.4	1.26	3.12E+04
				130.0	102.1	10.9	0.59	1318.0	1.29	8.15E+04
				230.0	189.3	15.3	0.49	1095.2	1.45	1.15E+05
				440.0	372.4	27.5	0.33	736.1	1.31	2.06E+05

*M_wは錘0の場合海藻のみの水中重量、錘0以外は錘を付けた海藻の水中重量

(2) 実験の結果と考察

a) 海藻の葉面積収縮率

沈降実験に用いた海藻3種類で個体数19本の内、アラメ、カジメ、ホンダワラの各1例について展開葉面積および沈降速度に応じた投影葉面積の実験結果を表-2に示す。また、実験結果に基づいて、沈降速度に対する収縮率S/A（投影葉面積Sと展開葉面積Aの比）を図-5と図-6に示す。

図-5によるとアラメのS/Aはカジメより若干高いが、平均的にはアラメ・カジメの沈降速度wに対するS/Aは式(2)で表わすことができる。また、ホンダワラのS/Aは図-6のように式(3)で表わすことができ、流速が50cm/s以上になると、アラメ・カジメより収縮率は小さくなる。これから、抗力係数の計算に用いる投影葉面積Sは式(2)と式(3)で近似することにする。海藻はこのように、波高が高く波れが速くなるに従って、自然に投影葉面積を小さくさせることにより、波や流れに対して流体力を軽減している。

アラメ・カジメの収縮率

$$S/A = 0.9 \times \text{EXP} \{-w/20 \text{ (cm/s)}\} + 0.1 \quad (2)$$

ホンダワラの収縮率

$$S/A = 0.8 \times \text{EXP} \{-w/15 \text{ (cm/s)}\} + 0.2 \quad (3)$$

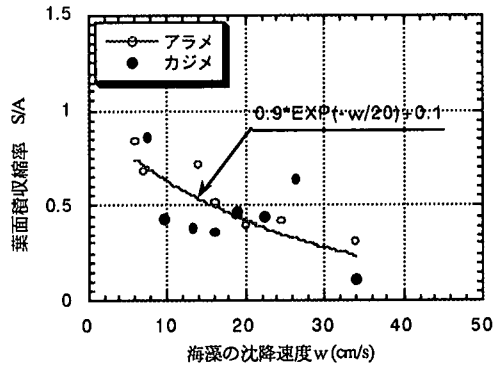


図-5 アラメとカジメの葉収縮率

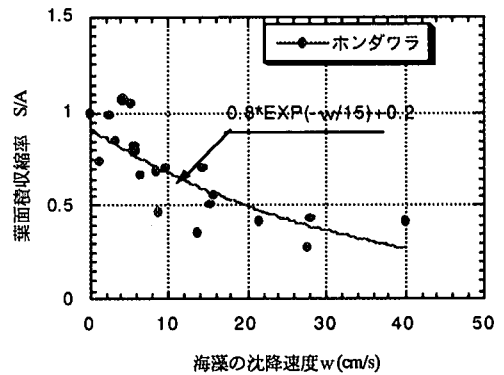


図-6 ホンダワラの葉収縮率

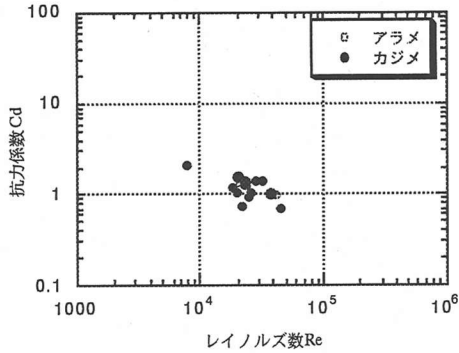


図-7 アラメとカジメの抗力係数

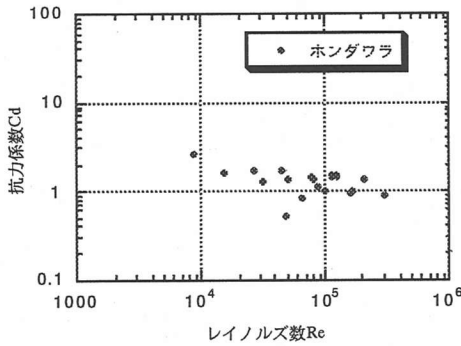


図-8 ホンダワラの抗力係数

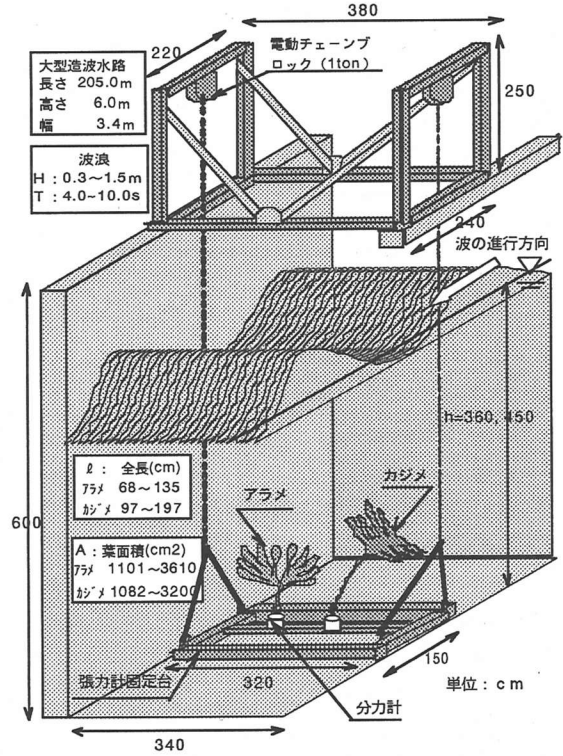


図-9 大型造波水路実験の概要

b) アラメ・カジメとホンダワラの抗力係数

沈降実験から得た沈降速度、海藻の水中重量および投影葉面積から式(4)により3種類の海藻の抗力係数を計算した。

$$Cd = (2gM_w) / (w_0 S w^2) \quad (4)$$

ここに、 g は重力の加速度、 M_w は海藻の水中重量(ホンダワラの場合は鉛直上向きの中重量)と錘りの水中重量の和、 w_0 は流体の単位体積重量、 S は海藻の投影葉面積、 w は沈降速度である。

図-7と図-8はアラメ、カジメ、ホンダワラの抗力係数の計算結果をプロットしたものである。これらの図によると、アラメ・カジメとホンダワラの抗力係数 Cd は約1.0付近に分布している。

ただし、ホンダワラについては気泡があり浮力を有するので、その水中重量は展開葉面積に応じて補正をする必要がある。そのため、ホンダワラの浮力については展開葉面積、錘および沈降速度の関係から沈降速度が0となる時の展開葉面積と錘の関係から、本実験の範囲では展開葉面積 1000cm^2 当たりの浮力は 5gf と見込まれた。

4. 造波水路実験による海藻の抗力係数

(1) 実験の概要

a) 実験の方法

海藻が受ける波力については図-9に示すように当所の大型造波水路(長さ205m、幅3.4m、深さ6.0m)および中型造波水路(長さ50m、幅0.9m、高さ1.2m)を用いて造波実験を実施した。実験に用いた海藻は海水を満した水槽に一時保存し、実験時に水槽から随時取り出し、海藻の全長 l (cm)や展開葉面積 A (cm^2)などを測定した。その後、張力計測台に固定した鉛直・水平の2成分力計に試験海藻を取り付け、電動チェーンブロックにより淡水を満した水路の底に降ろして、波浪を作用させ波力を測定した。ただし、海藻を淡水中に入れると、浸透圧により葉に水泡が発生するため、海藻1個体についての波力実験は1日で終了するようにした。これらの造波実験では、中型造波水路実験のレイノルズ数が $3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5$ 、大型造波水路実験ではレイノルズ数が $2 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$ の範囲であり、沈降実験よりレイノルズ数が2桁大きい実験である。

表-3 造波実験に用いたアラメとカジメの諸元

海藻名	水路	本数 n	全長	展開葉面積	葉長	質量	全長/水深
			ℓ (cm)	A (cm ²)	ℓ ₁ (cm)	M (g)	ℓ/h
アラメ	大型	27	103.0	2296.0	70.0	515.0	0.15~0.38
	中型	21	44.0	504.0	39.0	43.0	0.43~1.68
カジメ	大型	22	156.0	1730.0	58.0	477.0	0.22~0.55
	中型	21	38.0	348.0	34.0	20.0	0.33~1.30

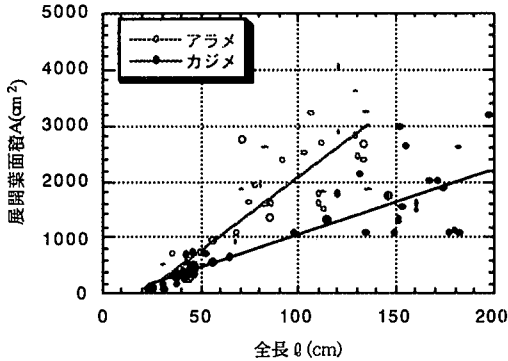


図-10 アラメとカジメの全長と葉面積

b) 実験に用いた海藻諸元

造波実験に用いた海藻はアラメ48個体およびカジメ43個体で、それらの全長ℓ, 展開葉面積A, 葉長ℓ₁, 空中重量M, 全長/水深比ℓ/hの平均値を表-3に示す。海藻の全長と葉面積の関係は図-10に示す通りである。これによると、海藻の全長と葉面積はほぼ比例し、アラメの展開葉面積A (cm²)は全長ℓ (cm)に対して20cm×ℓ, カジメは全長ℓに対して10cm×ℓであり、アラメは同一長さのカジメより葉面積が約2倍である。造波水路別に見ると、大型造波水路ではアラメ27個体で全長平均ℓが約1m, カジメ22個体でℓが約1.6m, 中型造波水路ではアラメ22個体でℓが約45cm, カジメ21個体でℓが約40cmである。水深hに対する全長ℓの比ℓ/hは大型造波実験ではℓ/hが0.15~0.55であり、海藻のほとんどが水深の半分以下に水没しているが、中型造波実験ではℓ/hが0.33~1.68であり、その内アラメとカジメ12個体の全長は水深より長く、先端が水面付近に漂う実験である。

c) 波浪条件

造波実験に用いた波浪は規則波とした。水深, 周期, 目標波高条件は表-4に示す通りである。海藻1個体に対して、大型造波水路では水深hが4.0mと3.6m, 周期Tが4, 6, 8, 10s, 波高Hを30, 60, 90, 120, 150cmを組み合わせた全37ケース, 中型造波水路では水深hが70cmと40cm, 周期Tが1.5, 2.0, 2.5, 3.0s, 波高Hを10, 15, 20cmを

表-4 造波実験の目標波浪条件

水路	周期 T(s)	水深h=4.0m						水深h=3.6m					
		波高H(cm)						波高H(cm)					
		30.0	60.0	90.0	120.0	150.0	30.0	60.0	90.0	120.0	150.0		
大型	4.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	6.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	8.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△13a
	10.0	○	○	○	△10b	-	○	○	○	○	○	-	-
中型	周期 T(s)	水深h=70cm						水深h=40cm					
		波高H(cm)						波高H(cm)					
		10.0	15.0	20.0				25.0	30.0	35.0			
中型	1.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	2.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	2.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

△の後の数字は実際に測定された波高

組み合わせた24ケースとした。なお、○は実験した波浪条件, △の後の数字は実際に測定された波高である。

(2) 実験の結果と考察

a) 波動場における海藻の挙動

波動場における海藻の挙動は図-11に示すように水粒子の流速とともに水面が静水位より高い場合は岸方向へ、静水位より低い場合は沖方向へ向き、波の水位変動とともに弧を描きながら運動を繰り返す。このような運動中における葉の投影面積は水面が山部と谷部における最大流速で最も伸びきって最小となり、その後、静水位まで下降および上昇する時、徐々に膨らんで大きくなり展開葉面積に近づく。海藻はこのように波形の山部と谷部の最大流速に対して伸び、波形が静水位付近に達する時、流速が小さくなり、膨らむといった運動を繰り返す。

b) 海藻の波力

一般に、物体に作用する波力Fは、式(5)に示すように波の流速uの2乗と物体の面積Sに比例する抗力および加速度dw/dtと物体の体積Vに比例する慣性力の和として表すことができる¹⁰⁾。

$$F = (w_0 C_d S u^2 + 2 w_0 C_m V dw/dt) / 2 g \quad (5)$$

ここに、Sは投影葉面積, uは水平流速, Vは葉の体積, gは重力の加速度, w₀は流体の単位体積重量, C_dは抗力係数, C_mは質量力係数である。また、波力の時系列は、慣性力が大きい場合、水面変位およびそれと同位相の流速の位相は加速度の位相と90度異なり、水平波力と水面変位のピーク値のずれが大きくなる。

しかし、造波実験における海藻の波力は図-12-(1) (大型水路)と図-12-(2) (中型水路)に示すように、水面変位と水平波力のピーク値間の位相差εはほとんどなく、慣性力は十分小さいと考

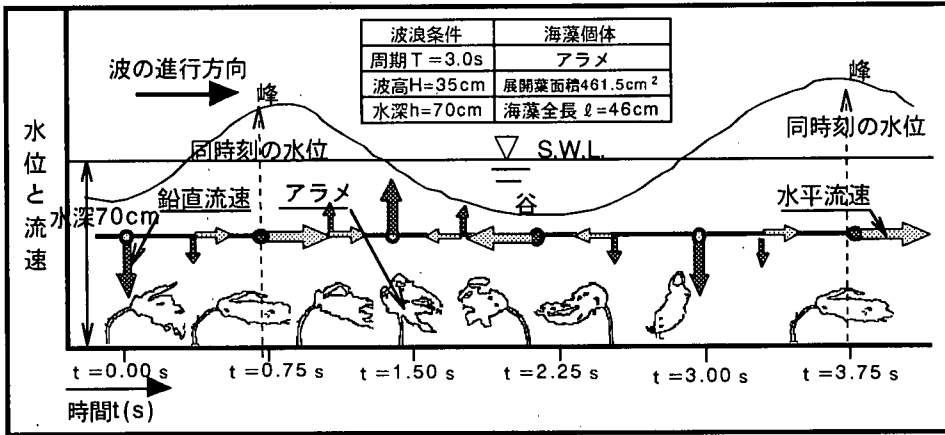


図-11 海藻の挙動

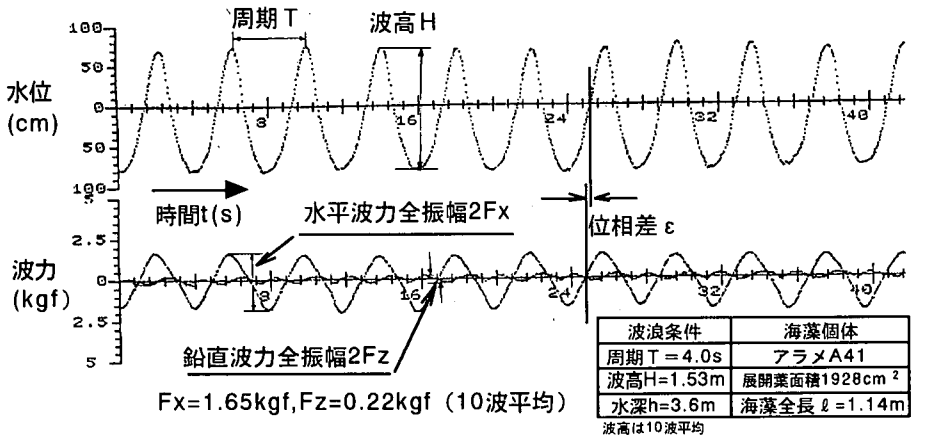


図-12- (1) 張力の時系列 (大型造波水路実験)

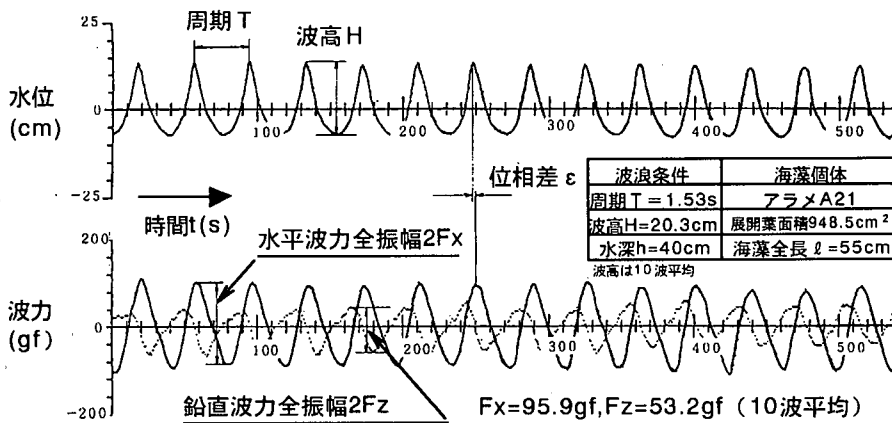


図-12- (2) 張力の時系列 (中型造波水路実験)

えられる。従って、造波実験で測定された波力データは式(5)の慣性力を無視することができ、葉の面積と流速の2乗に比例する抗力であると言える。

一方、水平波力と鉛直波力の位相関係は理論的には水平流速は鉛直流速より位相が90度遅れるため、それに伴う水平波力の位相も90度遅れる。図-12-(1) (大型実験, $\ell = 1.14\text{m}$, $h = 3.6\text{m}$, $\ell/h = 0.32$) では、海藻は完全に水没する実験のため、水平波力と鉛直波力の位相関係は理論と同様の傾向が見られる。

しかし、図-12-(2) (中型実験, $\ell = 55\text{cm}$, $h = 40\text{cm}$, $\ell/h = 1.38$) の海藻の全長が水深より長い実験条件では、水平波力の位相は理論とは逆に鉛直波力より進んでいる。このように、海藻經由の鉛直波力の位相は、 ℓ/h の大きさにより水平流速より進んだり遅れたりするので、被覆石の所要重量算定では、安全側の設計として、被覆石に作用する鉛直波力と海藻經由の波力が同位相になると考え単純に加算することにする。

c) アラメとカジメの抗力係数

造波実験によるアラメ・カジメの波力測定結果の一例を表-5に示す。表中で、水平波力と鉛直波力は図-12-(1)あるいは図-12-(2)の時系列波力データからそれぞれのピーク値の10波平均とし、これを海藻經由の水平波力 F_x と鉛直波力 F_z の振幅とした。波力比 F_z/F_x はこれらの鉛直波力 F_z と水平波力 F_x の比である。一方、抗力係数の計算に必要な流速は、水平波力と同じ位相の水平流速とし、微小振幅波理論より導かれる式(6)¹⁰⁾を用いることにする。

$$u_p = \{\pi H \cosh(2\pi d/L)\} / \{\text{Tsinh}(2\pi h/L)\} \quad (6)$$

ここに、 u_p は海藻全長の中心点の最大水平流速振幅、 H は波高、 h は水深、 d は代表流速計算点の底面からの高さ($d = \ell/2$ または $h/2$ の小さい方)、 L は波長、 T は周期である。

ただし、最大水平流速振幅 u_p は海藻が大きくなると海藻に作用する流速計算点の取り方により大きく変化するため、ここでは、代表流速計算点における海底面からの高さ d は海藻の全長が水深を越える場合は水深の半分、また、海藻の全長が水深以下の場合には全長 ℓ の1/2として、式(6)で海藻中心点の最大水平流速振幅 u_p を計算することにする。

抗力係数 C_d は式(6)の海藻全長の中心点の最大水平流速振幅 u_p 、最大水平流速発生時の葉面積収縮係数を沈降実験時のそれと同一と見なして流速に応じて収縮させた投影葉面積 S および分力計で測

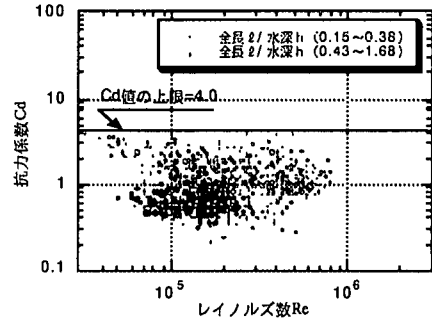


図-13 アラメの抗力係数

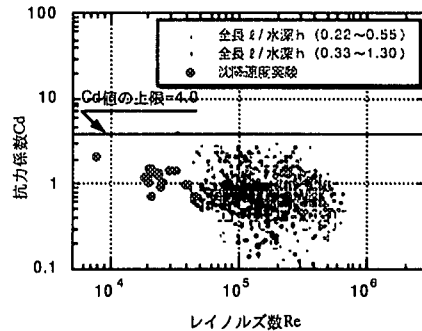


図-14 カジメの抗力係数

定された F_x を式(7)に代入して計算した。

$$C_d = (2gF_x) / (w_0 S u_p^2) \quad (7)$$

ここに、 g は重力の加速度、 w_0 は海水の単位体積重量、 S は投影葉面積である。

以上の計算結果に基づいて、レイノルズ数に対する抗力係数の変化を図-13および図-14に示す。なお、図-14には沈降実験によるカジメの抗力係数もプロットしてある。これらの図を見ると、アラメ・カジメの抗力係数はレイノルズ数に依存せず、 C_d はほぼ1.0付近に分布している(アラメの平均 $C_d = 1.05$, 標準偏差 $\sigma = 0.63$, ポイント数874, カジメの平均 $C_d = 0.85$, $\sigma = 0.50$, ポイント数959)。基盤材の所要重量の設計ではこのような平均的な C_d を用いると設計条件に対して余裕がなく転動などが考えられるので、 C_d の分布の上限を包絡する値として約4.0を採用することとする。また、アラメとカジメの差は見られない。しかし、中型実験の抗力係数は大型実験より小さい値に分布している。これは、中型実験に使用した海藻の全長は水深より長い実験ケースが半分程度あり、その条件では、海藻の葉の

表-5 造波実験による海藻の抗力係数算定例

実験ケース	葉全長	展開葉面積	周期	波長	波高	流速 u_p	収縮率	投影葉面積	レイノルズ数	波力比	水平力	抗力係数
	l (cm)	A (cm ²)	T (s)	L (cm)	H (cm)	(cm/s)	S/A	S (cm ²)	Re	F_z/F_x	F_x (gf)	C_d
アラメLA03	70.0	1863.0	10.0	6439.6	28.2	19.6	0.40	746.9	1.37E+05	0.28	202.0	1.39
大型造波水路 水深450cm					63.0	43.7	0.19	354.1	3.06E+05	0.20	450.5	1.31
					91.3	63.3	0.13	249.2	4.43E+05	0.17	593.0	1.16
					105.6	73.2	0.12	224.6	5.13E+05	0.20	555.0	0.90
カジメLK16	171.0	2010.0	5.9	3260.0	53.1	38.2	0.22	439.5	6.53E+05	0.19	452.5	1.39
大型造波水路 水深360cm					82.1	59.0	0.14	285.1	1.01E+06	0.17	718.5	1.42
					111.0	79.8	0.12	230.8	1.36E+06	0.19	1029.0	1.37
					143.5	103.2	0.11	210.3	1.78E+06	0.18	1422.5	1.25
アラメMA02	43.0	275.1	1.5	261.4	9.6	20.4	0.39	106.7	8.79E+04	0.45	11.0	0.48
中型造波水路 水深40cm					14.7	31.4	0.27	73.3	1.35E+05	0.24	19.3	0.52
					19.9	42.5	0.20	53.8	1.83E+05	0.24	24.0	0.48
カジメMK01	45.0	733.5	2.4	747.3	17.9	30.5	0.27	200.9	1.37E+05	0.16	84.1	0.88
中型造波水路 水深70cm					30.9	52.4	0.16	116.0	2.36E+05	0.15	123.7	0.76
					38.9	66.0	0.13	95.0	2.97E+05	0.18	152.3	0.72

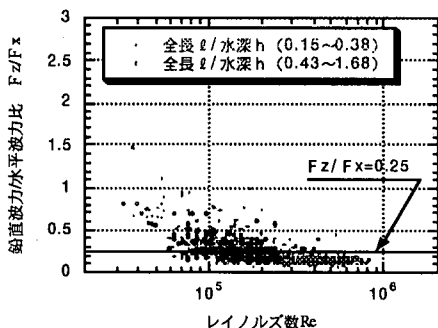


図-15 アラメの波力比

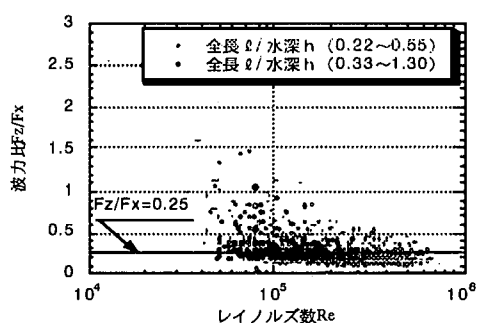


図-16 カジメの波力比

先端部は水面付近に漂う形になり、そのためその部分には極めて小さい波力しか作用しないとと思われる。なお、浅野ら¹¹⁾は造波実験によりポリプロピレン製の人工海藻群落に対する C_d を推定し、本研究の $C_d=1.0$ より小さい値の0.5を得ている。これは収縮しない人工海藻の投影葉面積は実物の海藻を用いた本研究の投影葉面積より大きくなり、そのため C_d 値が小さくなると考えられる。

d) アラメとカジメの波力比

海藻経由の波力を考慮した藻場基盤材の所要重量を算定するために海藻経由の鉛直波力の推定が必要である。鉛直波力は前項(3)で述べたように、水平波力 F_z 、水平方向の投影葉面積 S および式(8)の鉛直流速 v_p から C_d を求め、式(9)より求めることができる。しかし、図-12に示すように最大鉛直流速が生じる時、鉛直方向の投影葉面積は不安定になるため、本研究では図-15と図-16に示すようにアラメとカジメの波力比 F_z/F_x から、最大水平流速振幅に対する海藻経由の鉛直波力 F_z を推定することとする。

すなわち、これらの図から、広範囲のレイノルズ数に対して、アラメ・カジメの F_z/F_x はアラメが平均0.25(標準偏差 $\sigma=0.15$)、カジメが平均0.28($\sigma=0.20$)であるが、特に Re が 2×10^5 以上では、アラメ・カジメともデータのバラツキが非常に小さくなり、概ね1/4に収斂している。この $F_z/F_x=1/4$ と水平流速に対するアラメ・カジメの上限の抗力係数 $C_d=4.0$ から、海藻経由の波による鉛直波力 F_z は式(10)のように表わされ、水平流速 u_p とそれによる投影葉面積 S を代入することにより計算できる。

$$v_p = [\pi H \sinh\{2\pi(\ell/2)/L\}] / \{T \sinh(2\pi h/L)\} \quad (8)$$

$$F_z = (C_d w_0 S v_p^2) / (2g) \quad (9)$$

$$F_z = (w_0 S u_p^2) / (2g) \quad (10)$$

ここに、 g :重力の加速度、 w_0 :海水の単位体積重量、 S :投影葉面積、 u_p :代表計算点の最大水平流速振幅、 v_p :代表計算点の最大鉛直流速振幅である。

表-6 海藻經由の波力の検討

検討項目	水深	周期	波長	葉全長	展開葉面積	波高	底面流速	代表点流速	投影葉面積	海藻波力	被覆石風圧*	海藻/被覆石	
	h(m)	T(s)	L(m)	ℓ(m)	A(m ²)	H(m)	u _d (m/s)	u _p (m/s)	S (cm ²)	Fz(kgf/本)	Fw(kgf)	Fz/Fw	
(1) 水深の検討	5.0	10.0	67.6	1.00	0.20	3.00	1.96	1.96	200.1	3.92	7.6	0.514	
アラメの場合	8.0	10.0	92.3	1.00	0.20	3.00	1.65	1.65	200.5	2.78	2.7	1.023	
	10.0	10.0	92.3	1.00	0.20	3.00	1.28	1.28	202.9	1.71	0.6	2.819	
(2) 周期の検討	10.0	6.0	48.4	1.00	0.20	3.00	0.93	0.93	217.3	0.96	0.1	11.122	
アラメの場合	10.0	10.0	92.3	1.00	0.20	3.00	1.28	1.28	202.9	1.71	0.6	2.819	
	10.0	15.0	144.1	1.00	0.20	3.00	1.40	1.40	201.7	2.01	1.0	1.996	
(3) 波高の検討	10.0	10.0	92.3	1.00	0.20	3.00	1.28	1.28	202.9	1.71	0.6	2.819	
アラメの場合	10.0	10.0	92.3	1.00	0.20	4.00	1.71	1.71	200.3	3.00	3.4	0.881	
	10.0	10.0	92.3	1.00	0.20	6.00	2.57	2.57	200.0	6.73	38.7	0.174	
(4) 全長の検討	10.0	10.0	92.3	0.50	0.08	3.00	1.28	1.28	81.2	0.68	0.6	1.127	
アラメの場合	10.0	10.0	92.3	1.00	0.20	3.00	1.28	1.28	202.9	1.71	0.6	2.819	
	10.0	10.0	92.3	2.00	0.50	3.00	1.28	1.29	507.3	4.28	0.6	7.071	
	10.0	10.0	92.3	1.00	0.20	3.00	1.28	1.28	202.9	1.71	0.6	2.819	
(5) 種類	アラメ	10.0	10.0	92.3	1.00	0.20	3.00	1.28	1.28	202.9	1.71	0.6	2.819
の検討	カジメ	10.0	10.0	92.3	1.00	0.10	3.00	1.28	1.28	101.5	0.85	0.6	1.410
	ホンダワラ	10.0	10.0	92.3	1.00	0.22	3.00	1.28	1.28	440.3	3.70	0.6	6.117
(6) 設計条件	10.0	10.0	92.3	2.00	0.50	10.00	4.28	4.29	500.0	46.88	830.4	0.056	
	14.0	14.0	156.1	2.00	0.50	14.00	5.29	5.29	500.0	71.52	2975.0	0.024	
	16.0	16.0	191.9	2.00	0.50	16.00	5.73	5.73	500.0	83.88	4807.5	0.017	

注：*は波の直接作用のみを考慮した従来方式の被覆石所要水中重量

5. 海藻經由の波力を考慮した基盤材の設計法

(1) 海藻經由の波力

被覆石に海藻が着生した場合の1本当たりの海藻經由の波力は式(10)により推定することができる。表-6は海藻1本当たりの海藻經由の波力について水深、周期、海藻の全長、波高などを変化させて式(10)により計算した結果の一例である。また、参考として、被覆石に作用する波力をShore Protection Manual¹²⁾に準拠した式(11)により試算し併記した。

$$Fw = (\gamma_r \cdot u_0^6) \{g^3 \cdot (S_r - 1)^3 \cdot Fr_c^6\} \quad (11)$$

ここに、Fwは波の直接作用のみを考慮した従来方式の被覆石所要水中重量、 γ_r は被覆石の単位体積重量、gは重力の加速度、 u_0 は底面最大水平流速振幅、 S_r は被覆石の比重、 Fr_c は被覆石の安定係数¹³⁾($Fr_c=1.42$)である。

図-17は表-6の計算結果に基づいて、海藻經由の鉛直波力をプロットしたもので、図(1)は3種類の海藻の全長に対する鉛直波力である。これにより、同一全長に対して、展開葉面積が大きいホンダワラ、アラメ、カジメの順に波力が大きい。図(2)は全長1mのアラメに対して、水深、周期および波高などの設計条件を変化させて鉛直波力を計算し、その結果をプロットしたものである。これから、海藻經由の波力は流速の2乗に比例するため、

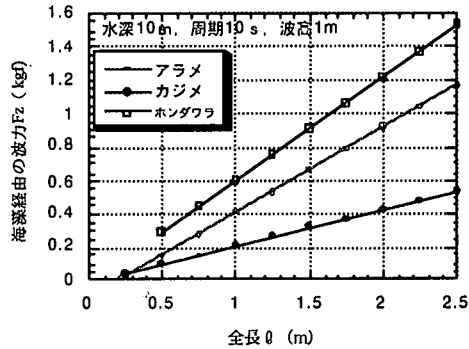


図-17-(1) 海藻の全長に対する波力

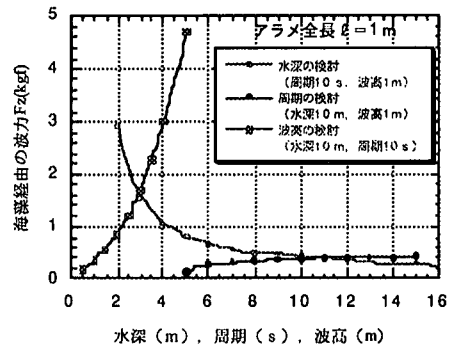


図-17-(2) 水深、周期、波高に対する波力

浅い水深、長い周期、高い波高程大きくなることが判る。図(3)は周期10sに対して、海藻が最大に成長した場合(アラメ=2m、カジメ=3m、ホン

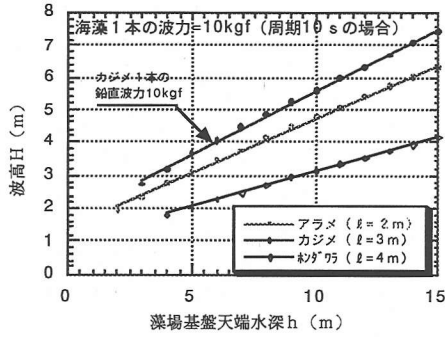


図-17-(3) 10kgf/本の波力となる水深と波高の関係

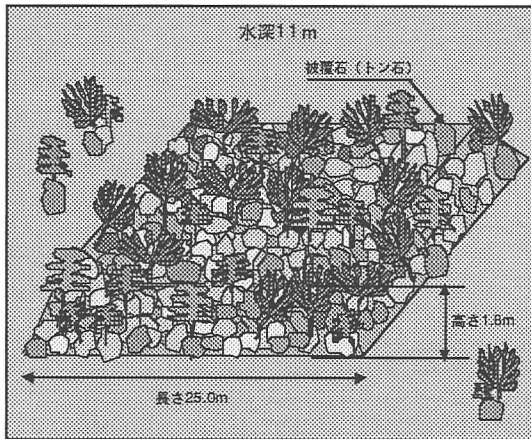


図-18 設計例

ダワラ=4 m)で鉛直波力が10kgfとなる基盤天端水深と波高を計算した結果をプロットしたものである。これによると、水深10mで10kgfの鉛直波力が生じる波高は、ホンダワラでは約3 m、アラメでは約5 m、カジメでは約5.7mである。また、水深が浅くなる程、10kgfの鉛直波力が生じる波高は低くなるため、このような水深が浅い場所に藻場基盤を造成する場合、海藻經由の波力を考慮する必要があると考える。

(2) 藻場基盤の設計例

当所では磯焼けや埋立などで失われた藻場を他の場所に修復・造成することを目指し、1989年10月、三浦半島西岸の秋谷地先海域において、水深3.9mにアラメ場基盤、水深11mにカジメ場基盤として図-18に示す高さが1.8mの被覆石による藻場基盤を施工した¹⁴⁾。

藻場基盤材の所要重量は海藻經由の波力を考慮した設計とし、図-19に示すフローにより計算した。

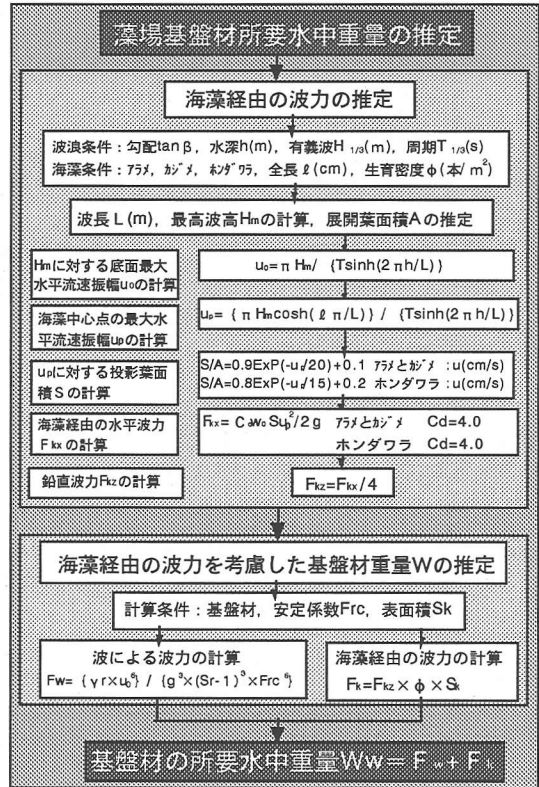


図-19 設計の流れ

設計条件は当海域の調査から得られた海底勾配1/30、周期11.5s、換算沖波7.6m、潮位はH.W.L.+1.50m、M.W.L.+0.93mを用いて、表-7-(1)に示すように合田の碎波帯内の波高の推定図¹⁵⁾から藻場設置水深の最高波高Hmを求め、それを用いて式(6)で与えられる藻場基盤上の底面最大水平流速振幅Uを計算した。また、付近海域の海藻の群落調査¹⁴⁾から、アラメは全長が131~162cm、生育密度は22本/m²、カジメは全長が167~199cm、生育密度は12本/m²を得、計算では全長と生育密度の大きい値を採り、アラメの場合、全長1.7m、生育密度22本/m²、展開葉面積0.4m²、カジメの場合は全長2m、生育密度12本/m²、展開葉面積0.22m²とした。被覆石の表面積は重量500kgの球(直径70cm)とし、その球の上面から2/5の高さまで海藻が付着すると仮定し、その表面積に生育密度を考慮して海藻經由の波力を推定した。その計算結果を表-7-(2)に示す。

これによると、H.W.L.時、アラメとカジメ1本に作用する波力はそれぞれ約23kgf、約16kgfであるが、海藻生息密度を考慮して全海藻の波力を計算すると、アラメ場の場合、海藻波力は1本当たりの波力23

表-7-(1) 海藻經由の波力を考慮した藻場基盤材重量の試算(流速の計算)

沖波高	周期	沖波長	勾配	波形勾配	潮位	設置水深	マウンド高	水深	波長		最高波高		底面流速振幅
H_0 (m)	T(s)	L_0 (m)	$\tan \beta$	H_0/L_0	D.L.(m)	D.L.(m)	r(m)	h(m)	L(m)	h/H_0	H_m (m)	H_m/H_0	u_0 (m/s)
7.6	11.5	206.3	0.02	0.04	1.50	3.90	1.80	3.60	67.1	0.47	4.20	0.55	3.34
7.6	11.5	206.3	0.02	0.04	0.93	3.90	1.80	3.03	61.7	0.40	3.42	0.45	2.98
7.6	11.5	206.3	0.02	0.04	1.50	11.00	1.80	10.70	111.4	1.41	8.74	1.15	3.73
7.6	11.5	206.3	0.02	0.04	0.93	11.00	1.80	10.13	108.7	1.33	8.51	1.12	3.75

表-7-(2) 海藻經由の波力を考慮した藻場基盤材重量の試算(所要重量の計算)

沖波高	周期	設置水深	代表点流速	海藻名	全長	展開葉面積	投影葉面積	海藻波力/本	海藻密度	付着表面積	海藻波力	被覆石波力	所要水中重量
H_0 (m)	T(s)	D.L.(m)	u_0 (m/s)		l (m)	A(m ²)	S(cm ²)	Fz(kgf)	本/m ²	(m ²)	Fk(kgf)	Fw(kgf)	Ww(kgf)
7.6	11.5	3.9	3.35	アラメ	1.70	0.40	400.0	22.9	22.0	0.616	310	188.4	498.8
7.6	11.5	3.9	2.99	アラメ	1.70	0.40	400.0	18.3	22.0	0.616	248	95.1	342.6
7.6	11.5	11.0	3.73	カジメ	2.00	0.22	220.0	15.6	12.0	0.616	116	363.0	478.5
7.6	11.5	11.0	3.76	カジメ	2.00	0.22	220.0	15.9	12.0	0.616	117	378.6	495.8

(kgf) × 海藻生育密度22(本/m²) × 被覆石の付着可能面積(m²) = 約310kgf, カジメの場合は約116kgfとなり, 被覆石に作用する波力の1.5~2倍となる。従って, 海藻經由の波力を考慮しない設計による被覆石の重量では海藻が付着した場合不安定になると考えられる。この地点での海域では海藻經由の波力を考慮した被覆石所要重量は約500kgfであるが, 実際の基盤造成用の被覆石にはトン石を採用した。

1990年9月, 伊豆大島波浮では最大有義波高7.7m, 周期11.9s, 最高波高13.1mが観測され¹⁶⁾, 当地点では大島波浮の約8割程度の波高が来襲した⁸⁾と考えられるが, トン石の藻場基盤は安定であった。藻場基盤上のカジメは順調に生育し, 8年経過後も写真-2(全長1.7~2.0m)のように繁茂している。

なお, 海藻の固着力を現地の海底でバネ秤により調べた結果, 成長期のアラメやカジメの固着力は25kgf以上であり, 設計条件では海藻は藻場基盤から剥離することはないと考えられる。また, アラメとカジメの生育密度は, アラメの場合は, 牡鹿半島では10~18本/m², 志摩半島では15本/m², カジメの場合は, 伊豆半島では10本/m², 土佐湾では21~27本/m²であり¹⁷⁾, 三浦半島秋谷地先海域の生育密度とほぼ同程度である。一方, 茎や枝の一部がちぎれ魚類の産卵場や稚魚の生育場となる流れ藻の大分を構成するホンダワラについては, 固着力, 生育密度とも未調査のためデータが入手できなかった。今後, 調査をする必要がある。



写真-2 海藻生育状況

6. まとめ

海藻を用いた沈降実験と造波実験により波力の計測により以下の知見を得, 海藻の着生を考慮に入れた藻場造成基盤材の所要重量の設計法について提案した。

(1) 海藻は波高が高くなるに従って葉の投影面積を小さくし, 波力を軽減する。

(2) レイノルズ数が $10^4 \sim 10^6$ の範囲では海藻の抗力係数Cdは約1.0である。また, 鉛直波力振幅は水平波力振幅または最大波力の1/4程度である。

(3) 海藻經由の上向き波力の最大値は水平流速振幅とそれに応じた海藻の投影葉面積から式(10)で与えられる。

謝辞：本研究の全般について大阪市立大学教授小田一紀博士から適切なご指導・助言を頂いた。また、とりまとめに当たり当所の研究参事鹿島遼一氏から助言を頂いた。当所の丸山康樹博士および(株)DCCの五十嵐由雄氏には海藻波力のデータの使用をご快諾頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境庁：藻場の分布状況 環境庁編，1982.
- 2) 大野正夫：21世紀の海藻資源－生態機構と利用の可能性－，緑書房，pp3～30，1996.
- 3) 寺脇利信，後藤弘，本多正樹：海中林造成技術の実証－第1報 技術動向の文献・事例調査，電力中央研究所調査報告U91021，38p.，1991.
- 4) 大野正夫：藻場造成の現状と課題－①コンブ科海藻を中心として，水産の研究，7巻，5号(36)，pp.44～48，1988.
- 5) 大野正夫：藻場造成の現状と課題－②コンブ科海藻を中心として，水産の研究，8巻，1号(38)，pp.44～49，1989.
- 6) 藻場・海中林：日本水産学会，恒星社厚生閣，163p，1981.
- 7) 水産庁：最新版つくる漁業，社団法人資源協会，pp.694～720，1983.
- 8) 川崎保夫，寺脇利信，長谷川寛，平口博丸ら：海中林造成技術の実証－第3報 三浦半島西部における造成技術－，電力中央研究所研究報告U91023，37p.，1991.

- 9) 長谷川寛：二枚貝の生息環境を改善する離岸潜堤の設計法，土木学会海洋開発論文集，1997.
- 10) 例えば堀川清司：海岸工学，東京大学出版会，pp.89～90，11p.，1985.
- 11) Toshiyuki.Asano, Hiroshi.Deguchi, and Nobuhisa.Kobayashi : Interaction between water waves and vegetation, *Proc. the 23rd International Conf. on Coastal Engrg.'92*, pp.2710～2723., 1992.
- 12) SHORE PROTECTION MANUAL : U.S..ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER , VOLUME II , pp.249～253, 1984.
- 13) 長谷川寛：海底放水管の被覆工に関する設計手法の提案，電力中央研究所研究報告U90014，43p，1990.
- 14) 長谷川寛，平口博丸，寺脇利信，川崎保夫：海中林の造成基盤設計について，土木学会，海洋開発論文集，Vol.8，pp.379～384，1992.
- 15) 合田良實：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，pp.55～70，1990.
- 16) 波浪観測資料：運輸省港湾技術研究所資料，N0.721，N0.745，N0.770，N0.796，1992～1995.
- 17) 寺脇利信，川崎保夫，本多正樹ら：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U91022，69pp.，1991.

(1998.7.22受付)

WAVE FORCE THROUGH SEAWEEDS ON COVER LAYER MATERIALS OF ARTIFITIAL SEAWEED BED

Hiroshi HASEGAWA

Seaweed forests are important as spawning ,nursery and food supplying areas for fishes and shells. The natural seaweed forests have been decreasing in recent years resulted from reclamation and water quality deterioration, etc. Thus a number of trials to construct artificial seaweed forests have been done near various natural forests with concrete blocks or natural stones. This report describes the method to determine the wave force on the individual seaweed body on the basis of a series of experiments including a large wave flume experiment. The report also proposes to take this force into consideration for the design of the required weight of the cover layer blocks for an artifitial seaweed forest bed.