

第6章 扶壁付き衝立平板による湧昇流

1節 実用化に向けて

複列に衝立を海底に設置することで湧昇流の発生が可能であることが、理論的にも実験的にも確認された。前章で最も単純な構造としては、衝立の高さを幅の2倍とした単純な板が基本的形状となることが理解された。しかし、この形状を設計するに当たり衝立の補強のため扶壁を付ける必要がある。

そこで、扶壁をつけたことによる湧昇発生への影響を検討する必要があるが、扶壁を付けることで湧昇効果を増大させることを狙いとした扶壁付き衝立平板を検討した。

第2章で述べたように、扶壁を付けたことで湧昇効果の増大を見込めることが、可視化実験で明らかになっている。このタイプの模型を用いて第5章に準じて実験を行い、処理も同様に行って、基本形状との違いを明らかにする。

2節 水理実験

実験に用いた模型を図6.2.1に示す。上流側の衝立については、衝立の縦横は同じ大きさとし、扶壁は衝立の大きさと同じとして、中央部で衝立に接合する。横の扶壁長さの1/2が上流側、後流域側に突き出したことになる。下流側の構造は基本形状とし、幅は高さの2倍の大きさとした。実験は、水深を一定の21cmとし、流速も2.3cm/sと一定とした。実験条件は衝立間の距離を衝立高さの等倍から5倍まで、5cmから25cmまでの5段階とした。この実験条件を表6.2.1に示す。測定は、衝立から発生する湧昇流の高さを水路中央に置いたメジャーを用い、湧昇流の発生周期はストップウォッチで測定した。また、湧昇量は前章で述べたように下流側衝立直後に発生する湧昇量の面積を求めた。

表6.2.1 扶壁付き衝立平板の水理実験の実験条件と結果

Exp. No.	U_0	D*B	h	L	Experiment Results		
					H	T	V_u
MX21	2.3	5*5	21	5	11.4	5.8	66.94
MX22	2.3	5*5	21	10	16.0	7.1	86.20
MX23	2.3	5*5	21	15	16.0	9.34	93.68
MX24	2.3	5*5	21	20	14.5	8.22	124.60
MX25	2.3	5*5	21	25	14.0	11.33	94.4

U_0 : Mean velocity as cm/s in the channel

D: Height of a wall as cm

B: Wall width as cm

h: Water depth as cm

L: Interval length of two walls as cm

H: Upwelling height from the sea bottom to the top of upwelling as cm

T: The period of upwelling generation as second

V_u : Upwelling volume as cm^3 by unit width

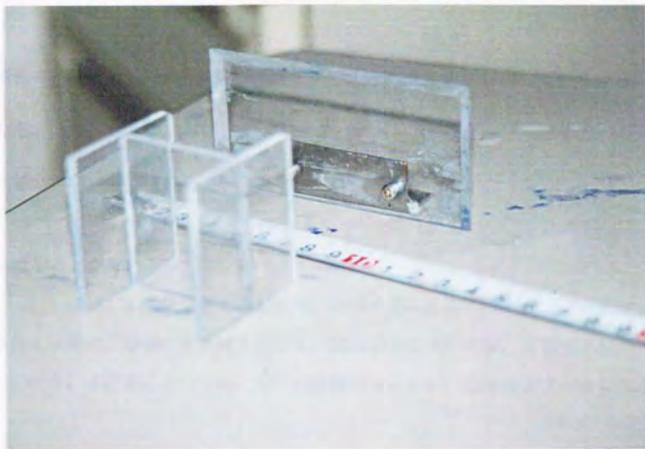


図6.2.1 扶壁衝立平板

3 節 湧昇特性

実験結果を5章で示した理論式に代入した。構造物の幅Bは、扶壁の幅は無視し、衝立の幅のみを採用した。

無次元湧昇高さと低下圧力エネルギーとの関係を図6.3.1に示す。図中の実線は前章のアスペクト比2の(5.17)式である。この図でバラツキはあるものの低下圧力エネルギーの変化に対して、湧昇高さは単一平板衝立より約1.2倍大きいことがわかる。

一方、発生周期と後流域容積の関係を図6.3.2に示す。実線で示すアスペクト比が2の場合に比べ、比例関係からずれて1/2乗に比例している。

図6.3.2の関係を式で示すと、(5.18)式に対応して実験式として

$$T = 3.3 (BL/DU)^{1/2} \quad (6.1)$$

を得る。

理論式(5.18)式と形が異なるのは、衝立から剥離する渦列が単純な平板衝立と大きく異なるためであろう。係数3.3は有次元である。

湧昇高さHについて、第5章の理論値を H_0 として、

$$H = 1.2H_s \quad (6.2)$$

湧昇量 V_s については、この H を用いて第5章で求めた理論式(5.19)式を用いる。

$$\text{すなわち、} \quad V_s = 2.1 \times 10^3 \frac{BDL \Delta h_p}{H} \quad (6.3)$$

湧昇流量 q は(6.1)、(6.3)式を用いて

$$q = V_s/T \quad (6.4)$$

として求めることができる。

(6.2)式、(6.3)式を実験値と比較した。結果を図6.3.3および図6.3.4に示す。それぞれ理論値を横軸に、縦軸に実験値を示した。湧昇高さについては、実験値と理論値はほぼ一致している。湧昇量については、若干理論値が大きい、ほぼ満足すべき関係を示している。

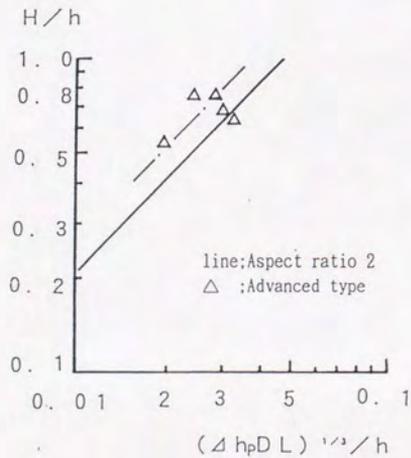


図6.3.1 湧昇流の無次元高さ

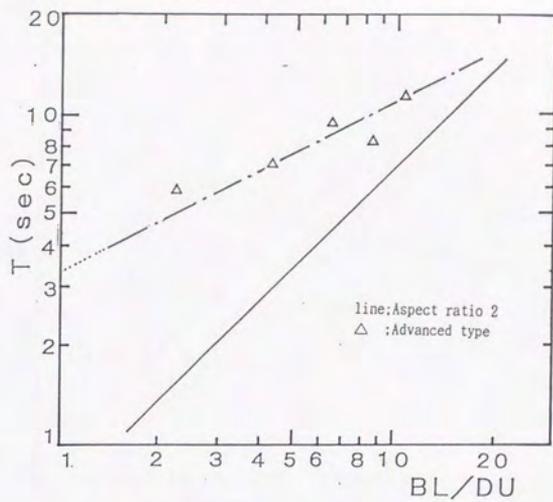


図6.3.2 湧昇流の発生周期

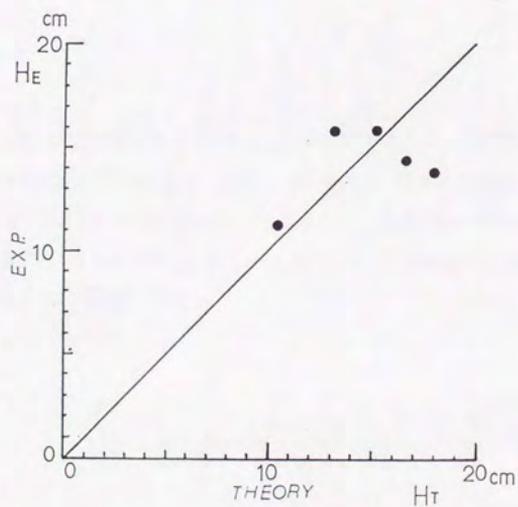


図6.3.3 湧昇高さの理論値と実験値の比較

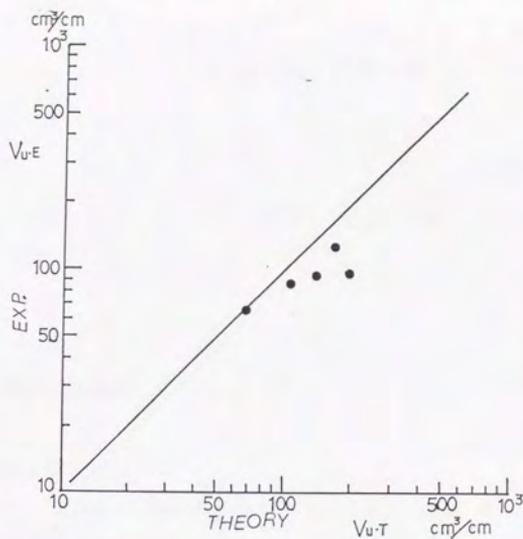


図6.3.4 湧昇量の理論値と実験値の比較

4節 まとめ

本章では、実用構造上の理由と可視化実験による湧昇効率の向上を意図して衝立板の両端に扶壁を設けた実験を行った。ここで発生している渦は、第5章の理論における後流剥離渦と若干異なっているが、定量化することを目的に、湧昇周期を除いて、第5章の理論値との対応を求めた。その結果(6.2)、(6.3)、(6.4)式を用いて実用値の計算を行うことができることが明らかになった。¹⁾

第7章 現地実験

1節 青森県今別地区

1.1 実験海域の位置と特性

本地区は、青森県今別町沖500m、水深20～27mの地点である。図7.1.1に本地域を示す。
この区域の特徴を列挙すると次のようである。

- ① コンブなど海藻のための岩礁付着基質に恵まれながら、海水中の栄養塩は乏しく磯焼け状を呈している。
- ② 海底地形は、岸側から沖に向かって尾根上に岩盤が張り出している。
- ③ 構造物設置場所における流れは、西北西流および東流が卓越していた。
- ④ 水質については、三厩湾側で津軽暖流系水、陸奥湾側で陸奥湾内系水であることが推察された。
- ⑤ 底質については、本区域の場合水深25m以深で砂礫、25m以浅で岩礁となっている。

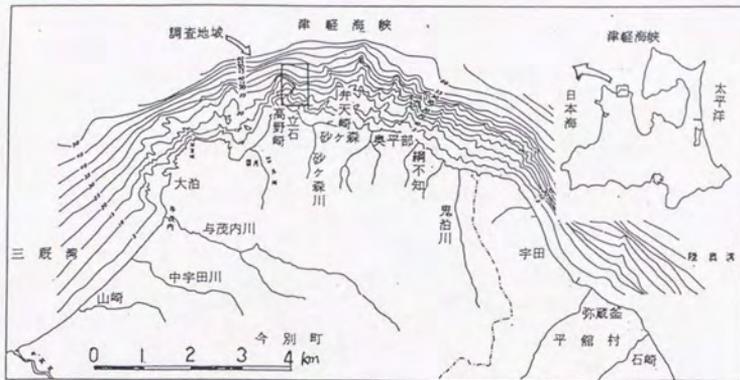


図7.1.1 実験海域

1.2 湧昇流発生構造物の形状および概念

設置される施設の形状を図7.1.2に示す。この施設を尾根状に張り出した地形の上流側に設置し、後部衝立板の機能は天然地形で代用させることとする。その状況を図7.1.3に示す。

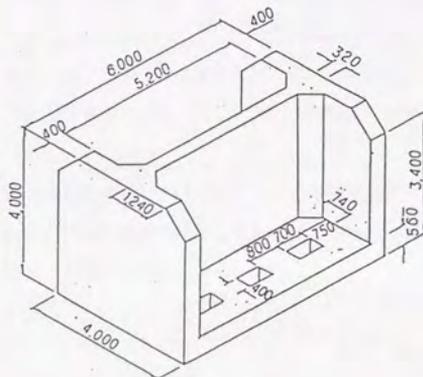


図7.1.2 湧昇流発生構造物 (71ton)

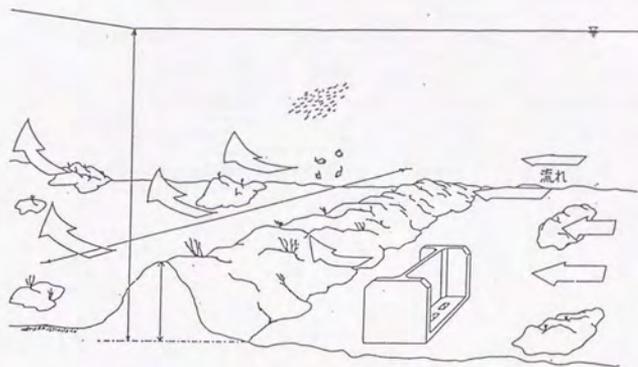


図7.1.3 湧昇流発生構造物機能概念図

1.3 調査項目と方法

調査は、施設設置前の事前調査、設置後の追跡調査を実施した。事前調査は、流況調査および水温・塩分調査、追跡調査は、流況、水質および生物調査を実施した。表7.1.1に調査項目を、図7.1.4に調査地点を示す。なお、流況調査と同様に、同一地点で水温・塩分の観測を行った。また、定点観測を補完するため、施設周辺部の流況を図7.1.5の配置でケープル式流速計を用いて移動測定した。また、流れの可視化を図り、図7.1.6に示す方法でビデオ撮影した。

水温・塩分調査は、流況調査における定点観測とほぼ同じ地点で流況と同一時刻に行った。栄養塩は、Z、C、X₂地点で海水を採水して行った。生物調査は図7.1.4に示したX₁～X₅の地点で主として植生、食藻動物の分布について行った。

表7.1.1 調査項目

分類	調査名	項目	目的	概要
事前調査	流況調査	流況調査	設置前の流れの把握	定点観測による乱れ測定
	水質調査	水温・塩分調査	上層・下層における分布状態	流況調査地点の同時観測
追跡	流況調査	海水混合効果調査	施設による混合効果の把握	定点観測による乱れ測定
		潮流調査	拡散係数把握のための恒流測定	定点観測
		流れの可視化調査	水理実験との比較	帆布を用いた可視化
調査	水質調査	水温・塩分調査	上層・下層における分布状態	流況調査地点の同時観測
		栄養塩調査	同上	施設周辺の海水取水
	生物調査	植生・食害動物調査	施設周辺のコンブの植生	生物分類

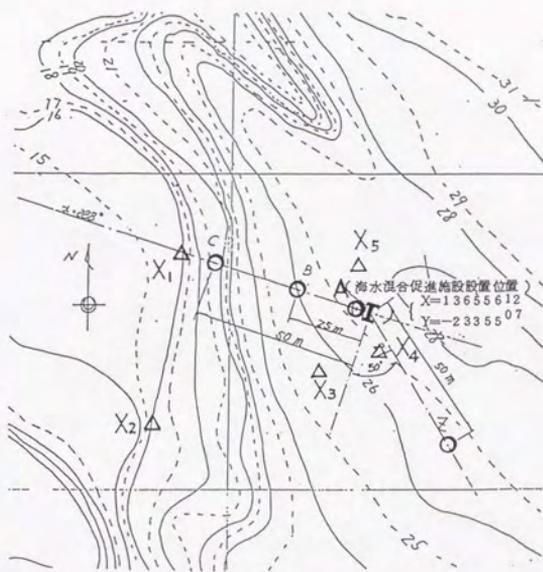


图7.1.4 調查地点

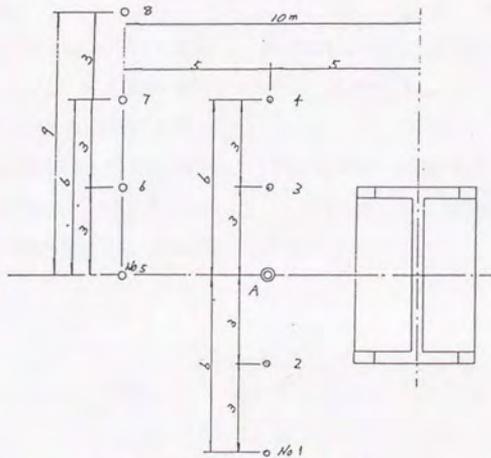


图7.1.5 移动式流速测定点

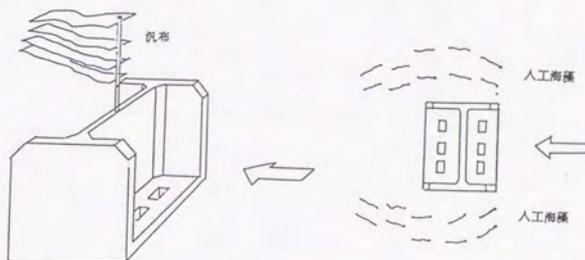


図7.1.6 流れの可視化方法

1.4 調査結果

1.4.1 事前調査

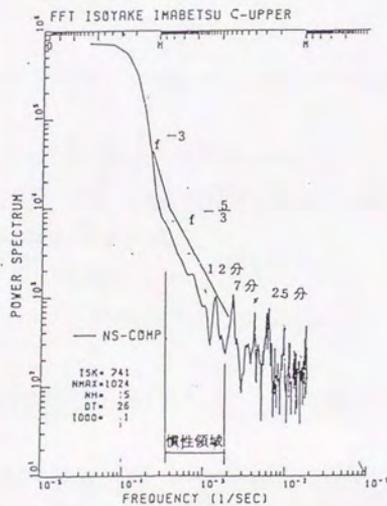
流況調査結果は最大流速を表7.1.2に示す。施設は流れに対しほぼ直角に設置したので、流況は施設法線方向と、それに対し直角方向の2成分に分解した。

流軸方向の流れの最大値を表7.1.2に示す。

表中 u は、法線方向の流れの大きさを表し、正側は尾根側（西北西方向）、負側は陸奥湾側（東南東方向）を示す。 u 方向の流れに着目して、西北西方向時の流速変化をスペクトル解析し、その周波数特性を検討した結果の一例を図7.1.7に示す。

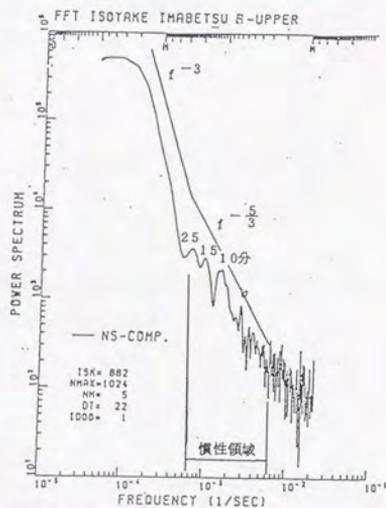
表7.1.2 観測期間中の最大流速

地点	層	施設の法線方向(u)	
		西北西方向	東南東方向
C	中	60 cm/s	-50 cm/s
	下	50	-55
B	中	42	-65
	下	38	-41
Z	上	46	-53



(a) C地点(海底上10m)

図7.1.7 流軸方向(西北西方向)時における周波数特性



(b) B地点(海底上12m)

図7.1.7 流軸方向(西北西方向)時における周波数特性

全体的な傾向としては、以下のようなことが明らかになった。

- ① 流軸(西北西)方向に比べ、それと直角方向(東南東)は乱れが大きい。
- ② C地点の流れはB地点より大きい。
- ③ 中層の流れは下層より大きい。
- ④ 水温は、いずれの地点でも同程度の値約7.8~8.2°Cを示しており、中下層の差も見られなかった。
- ⑤ 塩分についても水温の変化と似ており、約34~34.2の間で変化している。中下層の差もあまり見られない。
- ⑥ 図7.1.7よりC地点の場合、ピークを示す周波数は7分周期、12分周期の乱れであり、B地点の場合は25分、15分、および10分周期にピークが見られる。これらの周期からほぼ同一の乱れが伝搬したものと考えられる。パワースペクトルで浮力領域のような周波数の-3乗に比例する領域が観測されているが、密度成層は見あたらない。これは流れが斜面海底を這い上がる過程で大きなスケール(f が小)の渦が平均流に変換したためで、

表7.1.2に見るようにBより下流側のC点で流速が大となっていることから理解できる。

- ⑦ 図7.1.7でC点の $f^{-4/3}$ 領域がB点に比べ小さい。これはB地点に比べC地点の方が海底面による縮流効果で乱れが抑制されているためである。

1.4.2 追跡調査

(1) 流況調査

定点観測は、表7.1.3に示す内容で行った。

流速成分は、事前調査と同様に施設の法線方向を流軸、それと直角方向の2成分とした。

流軸（法線方向）の流れの最大値を表7.1.4に示す。

表7.1.3 測定内容

測点	水深	サンプリング時間	データ取得時間
A (-27)	海底より+5 m	2ヶ/1分	データ巻取り不良のため測定不能
	+12	1時間につき17分 2ヶ/1秒	9/4 9:30 ~ 9/7 12:30
	+19	2ヶ/1分	9/4 17:30 ~ 9/5 18:25
B (-27)	+5	1時間につき17分 2ヶ/1秒	9/4 9:30 ~ 9/7 12:30
	+12	同 上	同 上
	+19	同 上	同 上
C (-19)	+5	1ヶ/1分	9/4 17:30 ~ 9/7 12:49
	+10	1時間につき17分 2ヶ/1秒	9/4 13:30 ~ 9/7 13:30
	+14	2ヶ/1分	9/4 17:30 ~ 9/7 12:54
Z (-27)	+5	1ヶ/5分	9/4 14:10 ~ 9/18 22:00
	+12	2時間につき8.5分 2ヶ/1秒	9/4 13:30 ~ 9/19 13:30
	+19	1ヶ/5分	9/4 14:10 ~ 9/19 13:00
移動式 流速	+5, +8, +12	2H, 2分	9/6 7:30 ~ 13:00

表7.1.4 追跡調査期間中の最大流速

地点	層	- 施設の法線方向(u)	
		西北西方向	東南東方向
A	上	70.2cm/s	- 65 cm/s
	中	70	- 19
B	上	100	- 7
	中	65	- 20
	下	68	- 60
C	上	115	-118
	中	22	- 65
	下	71	- 70
Z	上	78	- 77
	下	63	- 37

全体の傾向としては以下のようなことが明らかになった。

- ① 上層の流れは下層に比べ大きい。
- ② A, B, Z点の流れはほぼ同じ傾向を示しているが, C点の流れは大きく異なっている。
- ③ 事前調査では西北西の乱れが, 東南東に比べ小さかったが, 追跡調査では両方向とも同程度に大きい。
- ④ 転流期間が短く, 速やかに流向が安定する。

一方, Z点における15日間連続観測から調和分析・恒流成分を求めた。結果を表7.1.5に示す。表は流軸方向の流れを正側としている。上下層ともO₁潮(主太陰日周潮), K₁潮(日月合成日周潮)が大きい。M₂潮(主太陰半日周潮)も大きい。概して日周潮が卓越している海域といえる。

恒流成分は, 上層で16.7cm/s, 下層で11.2cm/sと他の海域に比べ比較的大きい。海峡部の海流(津軽暖流)が大きく影響していると思われる。

次に, 移動式流速計によって測定された施設周辺域の流れ特性のうち, 各測点における平均流速および乱れ強度を表7.1.6に示す。水平方向の流れU₀は, 海底より高くなるにつれ大きくなるが, 鉛直方向の流れWは, 下層ほど大きい。

表7.1.5 Z点における流速の調和解析結果 ('85.9.4-9.19主軸方向)

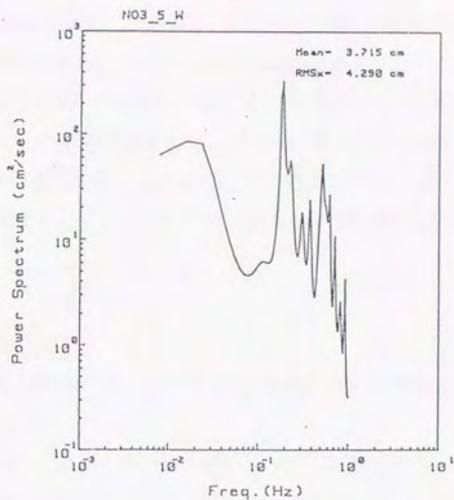
(a) Z点上層			(b) Z点下層		
成分	振幅(cm/s)	遅角(度)	成分	振幅(cm/s)	遅角(度)
K2	2.58	311.59	K2	0.56	242.31
M2	50.1	186.96	M2	10.2	216.27
N2	9.72	125.16	N2	1.98	203.36
NU2	1.90	133.46	NU2	0.39	205.10
MU2	1.20	279.19	MU2	0.25	235.54
S2	9.50	302.25	S2	2.07	240.36
T2	0.56	297.64	T2	0.12	239.40
R2	0.08	302.71	R2	0.02	240.45
L2	1.40	248.75	L2	0.29	229.18
O1	49.66	97.67	O1	10.44	82.45
Q1	9.63	91.93	Q1	2.03	80.87
P1	20.06	108.38	P1	5.20	85.39
M1	3.53	103.46	M1	0.74	84.04
J1	3.92	114.99	J1	0.83	87.21
K1	60.63	109.25	K1	15.71	85.63
S1	44.71	49.28	S1	11.95	23.76
M3	7.47	110.15	M3	0.49	59.44
N6	1.64	242.85	N6	1.86	225.14
M4	13.27	236.64	M4	5.27	221.74
S4	6.27	223.82	S4	6.53	181.54
MS4	0.92	244.64	MS4	2.17	120.20
2SM	1.62	165.89	2SM	1.54	178.53
恒流	16.75		恒流	11.21	

表7.1.6 移動式流速測定結果

(単位 cm/s)

測点	海底より+5 m				+8 m				+12 m			
	水平方向の流れU ₀		鉛直方向の流れW		水平方向の流れU ₀		鉛直方向の流れW		水平方向の流れU ₀		鉛直方向の流れW	
	平均	乱れ	平均	乱れ	平均	乱れ	平均	乱れ	平均	乱れ	平均	乱れ
No 1	1.37	2.46	4.2	4.71	1.35	2.59	4.1	5.33	1.97	2.13	3.4	5.2
2	2.27	2.21	3.9	5.51	2.21	2.91	4.2	3.57	2.41	2.27	4.9	3.1
3	2.25	2.32	3.7	4.29	2.54	5.09	7.9	2.39	2.85	3.09	2.8	3.66
4	1.45	4.11	16.4	2.42	2.66	1.84	2.4	3.67	2.53	1.38	0.5	3.12
5	1.53	2.34	9.4	3.37	1.87	3.27	8.4	4.08	2.17	2.13	4.3	2.92
6	1.69	2.14	4.0	4.09	2.11	1.85	6.8	3.14	2.15	2.55	5.8	3.57
7	2.07	1.85	3.3	3.71	--	--	--	--	2.05	2.41	3.9	2.46
8	1.12	4.2	14.7	2.24	1.93	2.79	6.5	3.53	2.27	1.61	2.3	3.26

ここで、スペクトル解析による流れの特性を検討する。図7.1.8に結果の一例を示す。



(a) 測点No.3 海底より5m

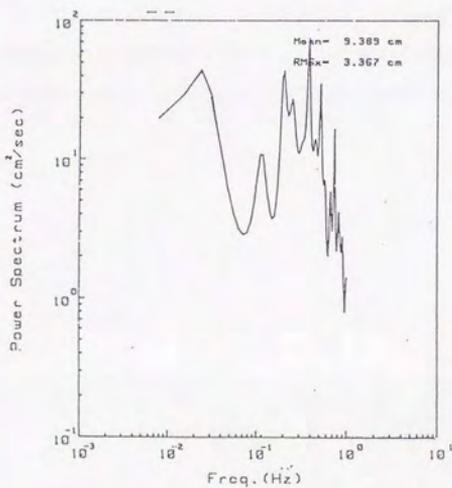


図7.1.8 施設周辺の乱れの周波数特性

結果として0.01~0.05Hzの周波数と0.2Hzの周波数の乱れに分解された。移動式流速の測定方法の問題の一つに波の影響がある。0.2Hzの乱れは現場の状況から考えて、波の周期(約5秒程度)とほぼ一致する。したがって、この移動式流速測定から得られた施設周辺で生じている流れの乱れ特性は、0.01~0.05Hzの周波数と考えられる。

次に定点観測から流軸方向の流速のスペクトル解析結果の一例を図7.1.9(a)~(d)に示す。なお、これらは電磁流速計で測定されたものである。この結果からも移動式と同様0.01~0.05Hzの乱れの周波数、および0.2Hzの周波数が現れている。

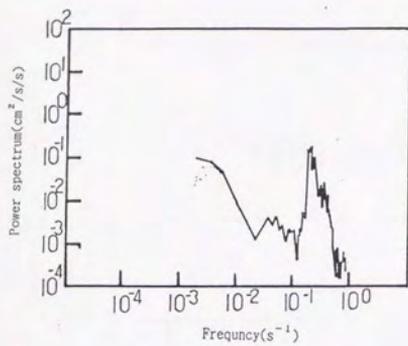
これらから、施設周辺では0.01~0.05Hz(周期20~50秒)の乱れが生じていると考えられる。

(2) 水質調査

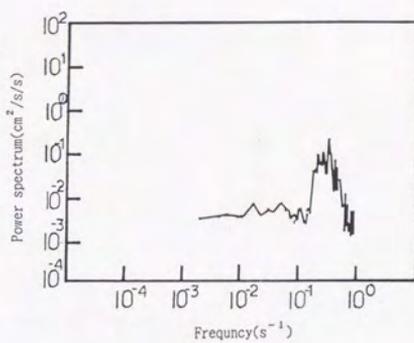
水温・塩分の定点観測は、表7.1.3で示した流況特性と同一時間にA、C、およびZ点で実施した。結果は、図7.1.10に示した。

A点上層では23.5~24.2°C、塩分33.5~33.7、C点上層では24.2~24.9°C、塩分33.5~33.8、下層では23.5~26.0°C、塩分33.6前後となっている。また、15日間観測のZ点では、上層の場合、23.5~25.5°C、塩分33.2~33.5、下層の場合23.5~26.0°C、塩分33.1~34.5とあまり変化がなかった。流況との関わりでは、転流時に一時期降温する傾向が見られた。これは、付近に冷水塊があり、密度流のようなさしこみがあったためと考えられる。

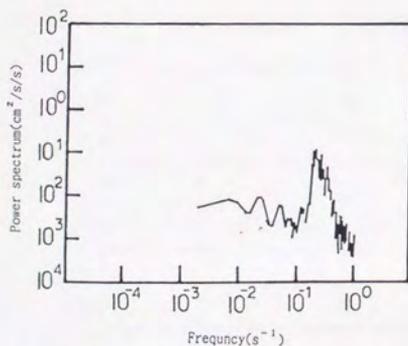
一方、鉛直分布の結果を図7.1.11に示す。鉛直方向の変化は朝方見られるが、日中では消滅する。



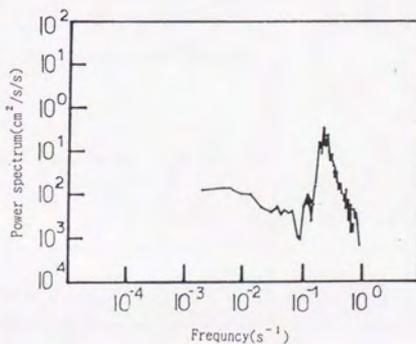
(a) A点中層



(b) B点中層

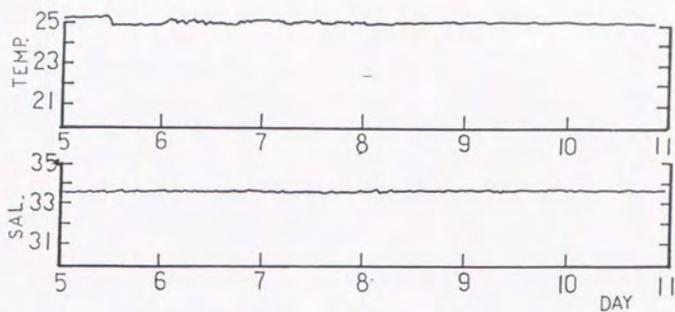


(c) B点上層

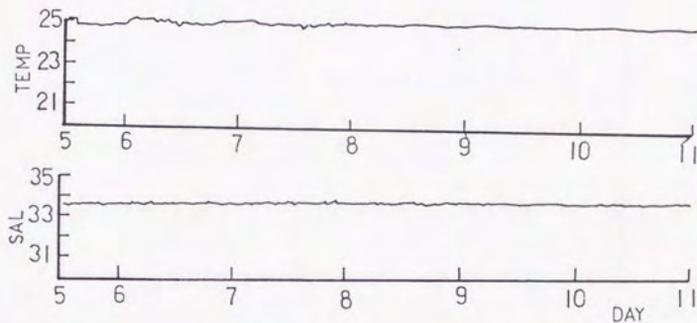


(d) B点下層

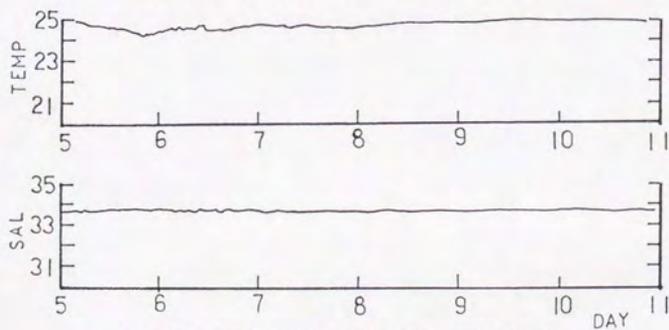
図7.1.9 定点観測から得られた流れの周波数特性 (9月4日17:30)



(a) A点上層9/4~9/7 (上段; 水温, 下段; 塩分)

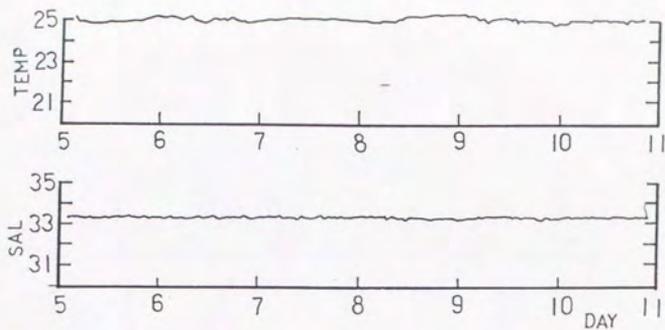


(b) C点上層9/4~9/7 (上段; 水温, 下段; 塩分)

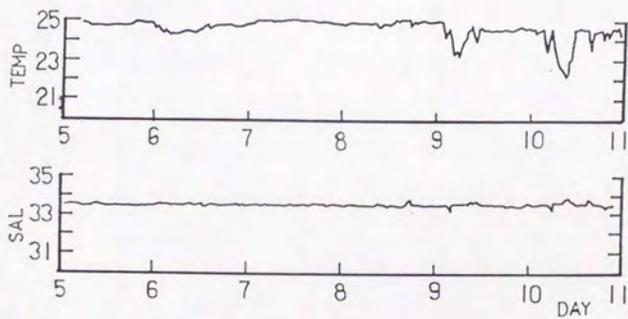


(c) C点下層9/4~9/7 (上段; 水温, 下段; 塩分)

图7.1.10 水温・塩分調査結果

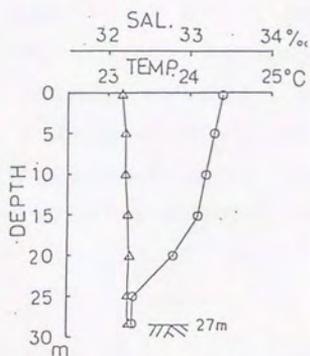


(d) Z点上層9/4~9/19 (上段; 水温, 下段; 塩分)

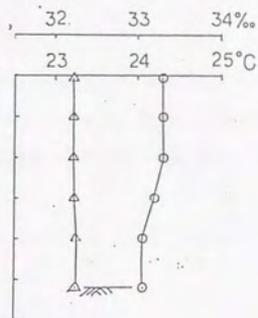


(e) Z点下層9/4~9/19 (上段; 水温, 下段; 塩分)

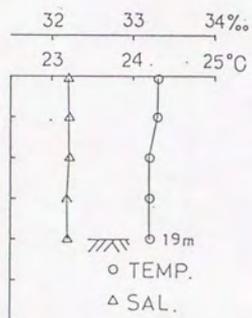
図7.1.10 水温・塩分調査結果



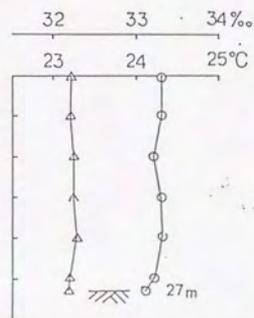
(a) A点



(b) B点



(c) C点



(d) Z点

図7.1.11 水温・塩分の鉛直分布 (9/7実施, ○; 水温, △; 塩分)

1.5 考察

1.5.1 施設設置による流れの乱れ特性

水平方向の乱れ成分の和を平均流速 U_z （Z点の平均流速）で無次元化した相対乱れ強度を図7.1.12に示す。図中には、追跡調査、事前調査の場所ごとの値を、またそのときの参照値としてZ点における相対乱れ強度の変化も表した。

設置前後の流れを比較すると、設置前の乱れはどの地点でも同程度の大きさを有していて、場所的違いはない。一方、設置後ではA点上層、C点上層・中層がZ点と同程度の乱れであるが、B点における乱れ、C点下層における乱れが大きい。設置前後を比較すると、明らかに設置後の乱れが大きいことがわかる。

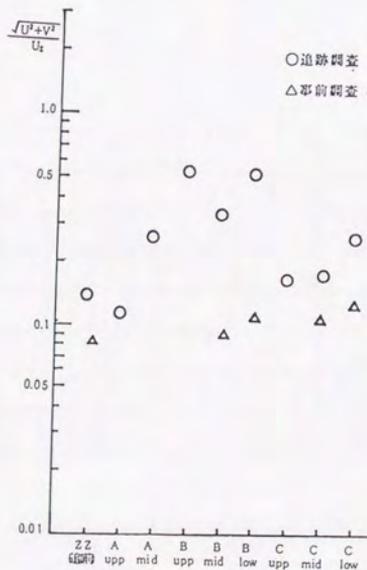


図7.1.12 地点別の相対乱れ強度

次に各地点間の流れの相互相関を計算した。計算結果の一例を図7.1.13に示す。計算は、ある周波数に対する相互相関係数を表すコヒーレンスを求めた。このコヒーレンスの値が高ければその周波数は相関が高いことを意味する。

図にはB点中層とC点中層の計算結果を示した。図からわかるように0.015Hzおよび0.03Hzと2つの周波数に高い相関が現れている。0.1Hz以上の高周波数帯は前述したように波の影響が現れている可能性が高いため無視した。

同様にして、他の2点間ごとについて種々の測定時間帯でコヒーレンスを求めた。それぞれの計算で相関の強く現れた周波数が数個現れた。それを抽出してプロットしたものが図7.1.14である。この結果0.01~0.03Hzに相関の高い周波数が多く現れている。C点中層とB点中層、下層の関係を見るとその傾向が強い。

以上のように0.01~0.03Hzの乱れが、B点中層・下層で現れていることが明らかになり、それがC点中層まで伝わっている。

乱れ強度の比較とこの周波数特性から、施設周辺で生じている乱れが明らかになった。

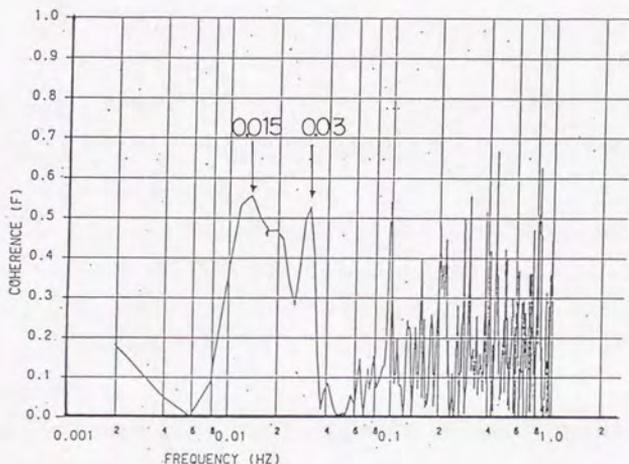


図7.1.13 相互相関係数 (B点中層-C点中層, 9/4.19:30観測)

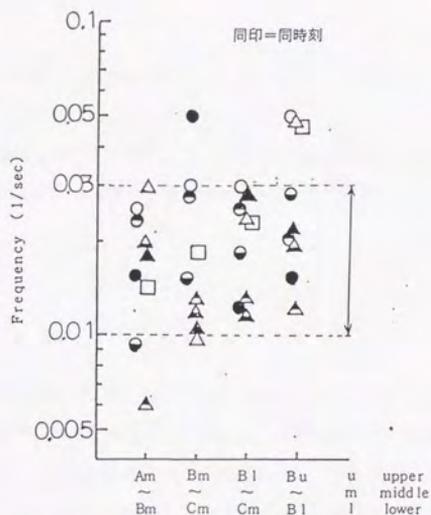


図7.1.14 各地点間の種々の時刻において見られた相互相関の高い周波数

1.5.2 理論値との比較

周波数特性が明らかになったことから、第6章で得られた実験式を用いて現地で発生している周波数について考察する。

(6.1) 式の関係について現地のスケールを代入する。すなわち、構造物の幅 $B = 6\text{m}$ 、高さ $D = 4\text{m}$ 、構造物間隔については下流側の構造物を地形で代用していることから地形のの違い上がりまでの長さとする。すなわち、測点Bまでの距離とすると、 $L = 25\text{m}$ 、流速は構造物至近で測定された結果を用いることとし、移動式流速測定で得られた表7.1.6のNo. 2, 3の平均流速 22cm/s を用いる。

結果として湧昇流発生周期43秒を得る。周波数では 0.023Hz となる。これは前項で得られた結果の $0.01 \sim 0.03\text{Hz}$ の周波数帯に一致する。

したがって、現地データから理論で得られた実験式を検証することができた。

このことから理論の現地への展開が可能となる。¹⁾

2 節 愛媛県日振島海域

2.1 実験海域の位置と特性

今回の事業で対象とした海域は、図7.2.1に示すように豊後水道東部に位置し、愛媛県地方では古来より宇和海と称している海域である。

基本的には黒潮の分枝流が流入、瀬戸内海の内海水が流出する海域である。しかし、佐田岬やリアス式海岸からの複雑な沿岸水の流出入、および多島海のため複雑な海水の動きを見せている。

2.2 調査概要

表7.2.1に事前調査および効果調査の項目および内容を示す。事前調査は構造物設置前の海洋環境を把握することを目的とした調査で、効果調査Ⅰは、構造物を設置した場合の海域へ与えるマクロな影響を把握することを目的とし、効果調査Ⅱは、湧昇流の効果を定量的に把握することを目的とした。ここでは主として効果調査Ⅱについて述べる。

調査地点を図7.2.2に示す。図中の太線はドップラー式流速計の測定にあたる航跡線を示した。調査に用いた主な計測機器の諸元・仕様を表7.2.2に示す。



図7.2.1 湧昇流発生構造物設置位置

表7.2.1 事前調査と効果調査項目

調査名	項目	内容	時期
事前調査	流水向・流速 水温 塩分 クロロフィル 動物プランクトン 底生生物	中層2ヶ所15昼夜観測 海水汲み上げ, STD 海水汲み上げ, STD ナンセンボルトによる各層採水 ナンセンボルトによる各層採水 丸特ネット鉛直曳き スミスマッキンタイアー採泥器	昭和62年8月 8月9日(満月) 8月16日(下弦) 8月24日(新月)
効果調査Ⅰ	流水向・流速 水温 塩分 クロロフィル 動物プランクトン 底生生物	中層2ヶ所15昼夜観測 海水汲み上げ, STD 海水汲み上げ, STD ナンセンボルトによる各層採水 ナンセンボルトによる各層採水 丸特ネット鉛直曳き スミスマッキンタイアー採泥器	昭和63年8月 8月12日(新月) 8月27日(満月)
効果調査Ⅱ	構造物周辺流況 湧昇流の把握 培養実験 魚影調査	3次元流速計の設置 構造物周辺のドップラー流速計による測定 表層, 中層, 下層水を用いた植物プランクトンの培養実験 構造物周辺の魚群探知機観測	昭和63年8月 昭和63年5月 昭和63年8月 昭和63年2~8月

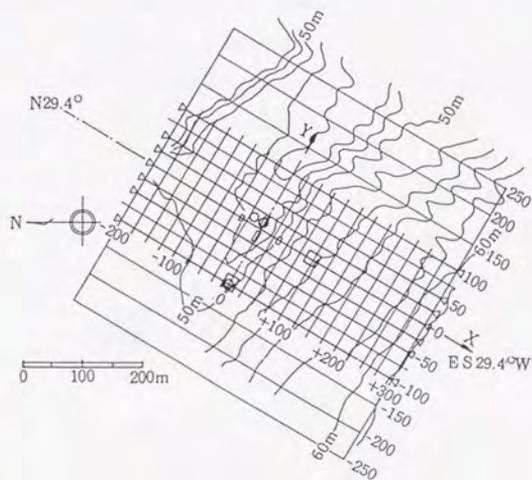


図7.2.2 調査範囲(図中太線:流速測定部, 細線部:魚影調査範囲,

□印:採水位置, ○印:流速計設置位置)

表7.2.2 主な測定機器の諸元・仕様

計測機名	諸 元	仕 様
電磁流速計	長さ 1 m 径 0.25 m 重量 8 kg	3次元 0~±3 m/s 精度 ±0.02 m/s 応答速度 0.1 sec
ドップラー式 流速計	センサー部長さ 1 m 船上にて電波測距儀 による誘導 F.D.記録	3次元 0~±3 m/s 任意の層で測定可能 精度 ±1% F.S 測定間隔 3 sec 平均化間隔 30 sec
魚群探知機	センサー部長さ 1 m 湿式記録	応答周波数 50 kHz

2.3 対象構造物

湧昇流発生構造物の設置は、昭和62年10月に行った。今回対象とした構造物の規模は、図7.2.3に示すように、S型；長さ10m、幅7.5m、高さ10m、L型；長さ20m、幅7.5m、高さ10mである。

構造物の法線方向は、事前調査で行った潮流調査からM₂分潮が当海域では卓越していることより、この分潮の長軸方向、流軸北北東29.4°と直角方向とした。また、S型とL型の間隔は、最も効率の良い湧昇流が発生すると考えられる間隔として35mとした。

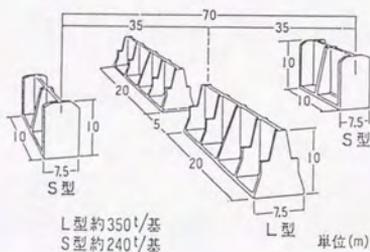


図7.2.3 湧昇流発生構造物の規模と配置

2.4 調査結果

2.4.1 構造物周辺の流況

構造物周辺の流れ構造を把握するため、応答性の良い電磁流速計を構造物直上および構造物の間に設置し、流速を測定した。また、構造物の影響を受けない地点にローター式流速計を係留し、10分間隔で流れを測定した。この平均的な流れの測定結果の一部を図7.2.4に示す。図中U, Vは図7.2.2に示したX, Y方向の流速成分である。この測定期間中で、U成分が正方向で比較的安定してかつV成分の小さい期間であるT1, T2期間を抽出した。これらの期間で流れを測定した。なお、それぞれのU成分の平均流速は、35, 27cm/sであった。

T1, T2期間中に測定された流速の経時変化を図7.2.5に示す。これらの流れについてスペクトル解析を行い、特徴的な乱れの発生周波数を抽出した。スペクトル解析の結果を図7.2.6に示す。

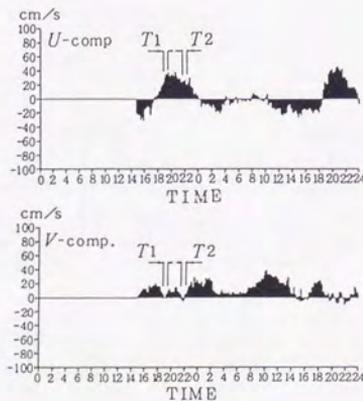
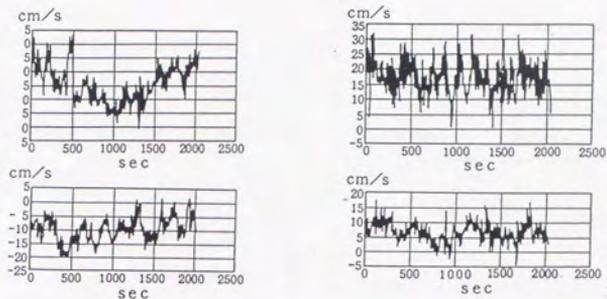


図7.2.4 乱れ計算に用いた期間 (T1, T2) における平均的流れ



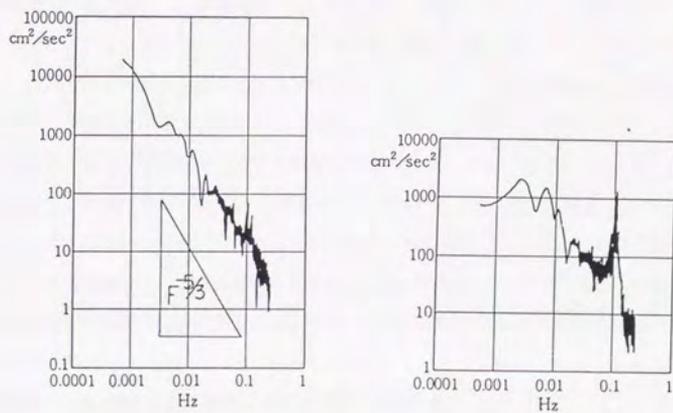
(a) 構造物間におけるV成分

(b) 構造物直上におけるW成分

図7.2.5 流れの変化(上段T1期間, 下段T2期間)

T1期間: 8月8日23時25分~23時58分

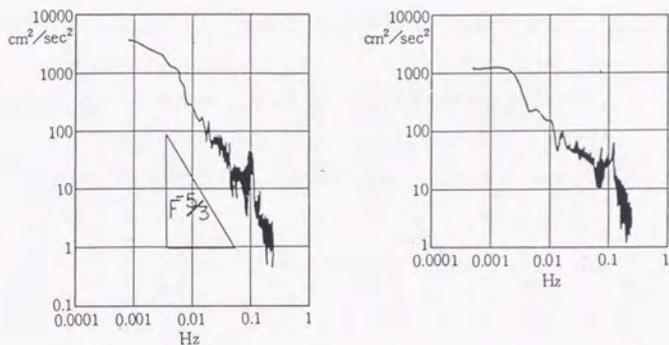
T2期間: 8月9日0時50分~1時23分



(a) 構造物間設置 V成分(T1期間)

(b) 構造物直上 W成分(T1期間)

図7.2.6 流れのパワースペクトル



(c) 構造物間設置 V成分 (T2期間) (d) 構造物直上 W成分 (T2期間)

図7.2.6 流れのパワースペクトル

構造物間隔の中間で測定した流速のスペクトル結果で、図中 (a) の T1 期間の場合、0.004Hz (250秒周期)、0.007Hz および 0.01Hz (130秒、100秒周期) に弱いピークが見られる。また、時期が異なる T2 期間の場合 (図中 (c))、ピークは見られない。一方構造物直上で測定した流速のスペクトル結果で、図の (b) では 0.0025、0.007 および 0.01Hz にピークが見られている。時期の異なる T2 期間の場合 (図中 (d)) にはピークが見られない。なお、T1 期間中で 0.1Hz に高いエネルギーを示しているが、波の影響と思われる。

これらの渦の周波数特性を用いて、構造物中間地点と構造物直上との流速の相互相関を求めた。前節と同様にコヒーレンスを計算した。結果を図 7.2.7 に示す。0.1Hz 以下の低周波数帯を見ると T1 期間では 0.0025Hz に弱い相関、0.025Hz、0.056Hz に比較的高い相関が見られる。T2 期間では 0.005、0.015、0.018、0.026、および 0.038Hz に相関が見られる。どちらの期間でも 0.025Hz 付近に共通して高い相関が見られた。

個々の流速値を用いた周波数分析では得られなかった乱れの特徴が、相関を求めることで明らかになった。

2.4.2 理論解との比較

これまでで乱れの周波数特性が明らかになったので、理論解(6.1)式に現地スケールを当てはめる。

構造物の幅 $B = 10\text{m}$ 、高さ $D = 10\text{m}$ 、構造物間隔 $L = 35\text{m}$ 、流速 $U = 35\text{cm/s}$ 、 27cm/s を(6.1)式に代入する。

結果として、湧昇流発生周期 $T = 33\text{秒}$ 、 37.57秒 。周波数に換算すると 0.03Hz 、 0.026Hz となる。前項で述べたように相関の見られた 0.025Hz 付近の周波数帯と一致する。

前節の青森県で実施した結果と同様、理論解が現地データによって検証できた。

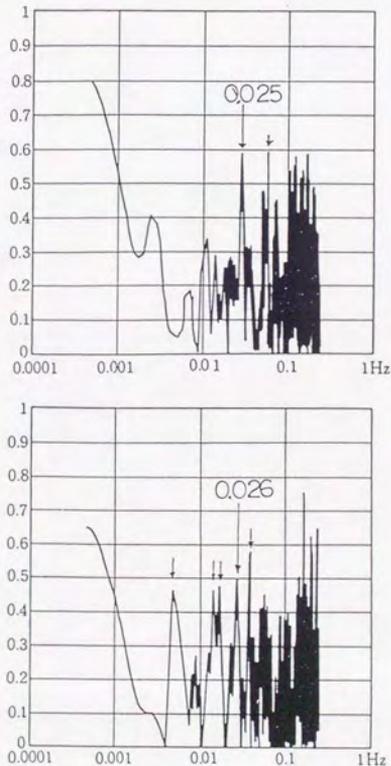


図7.2.7 構造物中間地点の流速V成分と構造物直上W成分の相互相関(コヒーレンス)

上段; T1期間, 下段; T2期間

2.4.3 湧昇流の直接観測

前節で確認された乱れは、下流側で上昇性の渦となって伝達されていく。下流側で平均的には鉛直上向きの湧昇流となっている。

このことを確かめるため、ドップラー式流速計を用いて構造物周辺の流速を最強流時に測定した。結果の一例を図7.2.8に示す。5月17日（大潮時）の南流における測定結果である。上段が観測層34mにおける平均流速分布を、下段は上段の破線部の観測測線における鉛直流速分布を示した。明らかに上向きの流速値が測定され、湧昇流が直接観測できた。

実線内における平面流速分布に着目して、連続式から鉛直流速を求めた。

連続式は

$$\text{div. } \mathbf{V} = 0$$
$$\frac{\partial W}{\partial Z} = - \left(\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} \right)$$

であるから、離散化させると、

$$\frac{W_{k+1} - W_k}{\Delta Z} = - \left(\frac{U_{k+1} - U_k}{\Delta X} + \frac{V_{k+1} - V_k}{\Delta Y} \right)$$

ここに、 k ; Z 方向の k 層。

したがって、

$$W_{k+1} = - \left(\frac{U_{k+1} - U_k}{\Delta X} + \frac{V_{k+1} - V_k}{\Delta Y} \right) \Delta Z + W_k$$

図に示した時刻における層別の W 成分は、上層より

$$W_1 = 0.79 \text{ cm/s}$$

$$W_2 = 1.34 \text{ cm/s}$$

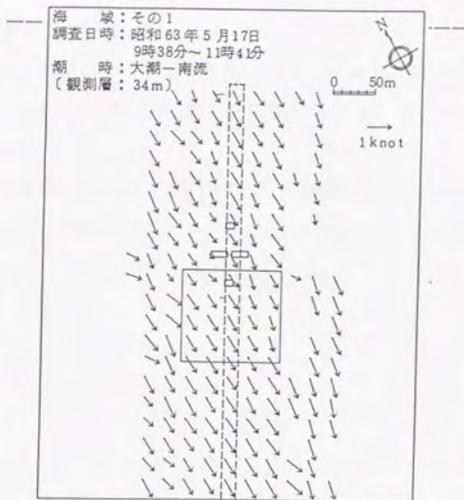
$$W_3 = 1.77 \text{ cm/s}$$

$$W_4 = 2.07 \text{ cm/s}$$

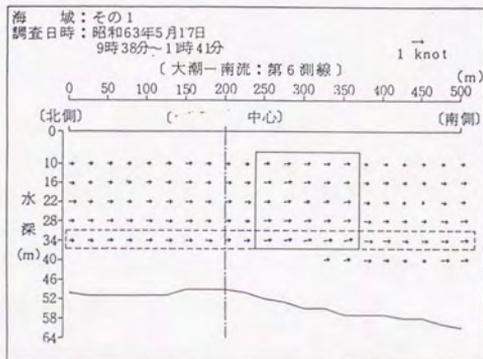
$$W_5 = 2.29 \text{ cm/s}$$

となる。

下層ほど上向きの流れが大きく、湧昇流の発生していることが窺われる。



(a) 観測層34mにおける平均流速分布



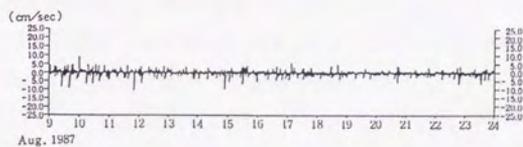
(b) (a) 図破線内鉛直流速分布

図7.2.8 ドップラー式流速計による流況測定結果

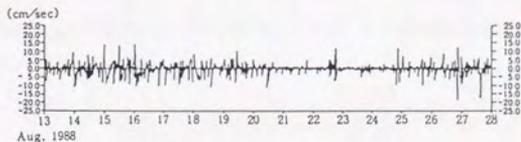
(昭和63年5月17日9時38分～11時41分)

さらに、構造物を設置前後の鉛直方向の流れがどのように変化したかを見るため平均流と乱れを分離した。乱れ成分について図7.2.9に示す。図の上段は設置前に行った流速測定
の鉛直方向の乱れ成分、下段は設置後の乱れ成分を示している。明らかに乱れが大きくな
っていることがわかる。

以上のように、構造物下流側における湧昇流は、上昇流として2cm/s程度を観測し、構
造物によって生じた乱れも下流側に伝わり、しかも鉛直方向で大きくなっていることが確認
された。²⁾



(a) 設置前 昭和62年8月調査



(b) 設置後 昭和63年8月調査

図7.2.9 湧昇流構造物設置前後の鉛直方向の乱れ

3節 まとめ

現地調査実験を2箇所で行う機会を得た。それぞれの地形条件を生かして小規模ながら構造物を設置し、湧昇流の発生について物理的、生物的調査を行った。

それぞれの調査結果を示すと次のようである。

3.1 青森県今別沖

青森県津軽半島先端に位置する今別町の浅海部の張り出しを利用して湧昇流発生構造物の実証実験を行った。

結果として以下のことが明らかになった。

- 1) 扶壁付き複列衝立の下流側構造物に地形を利用することができ、構造物と同様の効果を期待することができる。
- 2) 構造物の設置前に比べ設置後で乱れ強度は大きくなった。
- 3) 現地で発生している乱れの周波数特性は、 $0.01 \sim 0.03\text{Hz}$ であった。
- 4) 湧昇流の発生周期について理論解（実験式(6.1)式）に現地のスケールを当てはめたところ、 0.023Hz と現地で起きている現象と一致した。理論解が現地データで実証できた。

3.2 愛媛県日振島海域

湧昇流効果进行评估するために、流れと植物プランクトンの培養試験を重点に調査を行った。流れについては構造物によって発生した大規模な乱れ（渦）を周波数解析で確認し、下流側で湧昇流を見出すことに力点をおいた。また、下流側では、約 2cm/s 程度の湧昇流速が実測された水平流速から算出された。また、平均流からの乱れも構造物の設置によって増幅されていることが明らかになった。これらの調査結果から湧昇流発生構造物は、湧昇流の発生に十分機能していることが明らかになった。

湧昇流の発生周期について、現地データによって理論解を求めたところ、相互相関から得られた現地の周波数特性とよく一致した。理論を証明することができた。

第8章 結 言

本研究は漁場造成技術として重要な役割を担うであろう人工湧昇流について、計画設計のための定量式の理論的誘導と水理模型実験の相似則の検討を行ったものである。主な結果をまとめると次のようである。

1 節 渦の基本的性質

他の多くの地形性湧昇流研究と同様、本研究においても渦の特性を利用して湧昇流を発生させる。本研究で用いた渦の基本的扱いは次のようである。

- ① 渦の生成は湧昇流構造体表面の境界層内で行われる。
- ② 剥離後の渦は角運動量（従って循環 Γ ）を保存する。

渦の①②の性質より渦のスピンダウンによるエネルギー変化を求めることにより、

- ③ Γ を保存しつつ渦径が増大すると余剰エネルギーを生じ、これが渦端の底面境界層より水を渦内へ吸い込むことに用いられる。

この視点をを用い、以下の解析と実験的検証を行った。

2 節 人工岬

人工岬に見立てた平板の下流側に生じる渦管列の発生と湧昇流量について、次の結果を得た。

- ① 平板（岬）によって生成される剥離渦の強さ Γ 、空間スケール a （渦半径）、時間ス

ケールT（発生周期）を理論的に導き[(4.1)(4.12)(4.3)式]，これを実験によって検証し，満足すべき結果を得た。

- ② ①で求めた剥離渦のスピンダウンによる余剰エネルギー[(4.8)式]を求め，底層水の渦内への吸入湧昇流計算の理論式[(4.14)式]を求め，実験で検証した。
- ③ ①②における理論式は実験係数を含まずによく実験値を満足している。

3節 複列海底衝立構造物

海底に衝立平板を設置した場合に衝立板の後流域閉曲面から，間欠的周期的に湧昇流が発生する。これについて以下の解析を行った。

- ① 閉曲面を取りまく渦管の流下成長に伴い底面境界層より閉局面内の水を吸い出し，閉局面内に圧力低下エネルギーが蓄積し，これが限界低下圧で閉局面が破れ爆発的に開放され，湧昇流が起こる。
- ② ①を理論的に解析する。人工岬で求めた渦管の特性から，衝立平板後流域の圧力低下量 Δh_p を求め，これをパラメータとして湧昇高さ，湧昇量，間欠的湧昇周期，および湧昇流量の理論式[(5.10)(5.13)(5.11)(5.14)式]を導き，実験値と対比して理論の整合性を確かめた。また実験より実験係数を定め，実用式にまとめた。
- ③ 衝立の高さ，幅のアスペクト比を変えて実験し，アスペクト比2（幅/高さ）の場合が最も湧昇流量が大きい[表5.6.2]。
- ④ 実用上の構造的補強を考えて衝立平板の両側に扶壁を取り付けた構造物についても実験を行い，単一平板の理論式と対比して若干の式の変形で表現され，実用計算式[(6.1)(6.2)(6.3)式]を導いて実験値で検証した。

4節 現地実験

海底へ設置する複列衝立構造物について，青森県今別地区，愛媛県日振島海域で実証実験が行われた。後流域の流速連続観測より求めたスペクトル解析におけるエネルギー卓越周期が本理論による湧昇流発生周期に一致している。

5 節 相似則について

以上に述べた理論とその実証から渦の実験において

- ① 粘性は付着条件の生じる境界層内においてのみ影響が大きい。
- ② 渦管を取り囲む流体は非粘性流体と扱える。
- ③ 衝立平板後流域の爆発的湧昇は乱流であるが、そのパワースペクトルが周波数の $-5/3$ 乗である場合にはKolmogorovによる慣性小領域の渦であり、この渦は非粘性でエネルギー消費を伴わない。

いま、水産では広域漁場環境の造成技術として湧昇流構造物に着目している。本研究が水産資源の増殖に、漁業の安定生産に役立つことを期待する。

補 章 1. 人工湧昇流の生物調査

第7章現地調査で述べたように、2カ所の現地でそれぞれ生物調査を行っている。青森県の場合には、人工湧昇流の発生に主眼をおいたため、生物調査は補足的に行っているが、愛媛県日振島海域の場合は、継続的な調査を行い、今後の事業に資するデータ収集を行った。なお、調査方法については第7章で触れているので、ここでは調査結果について述べる。

1節 青森県今別地区

1.1 調査結果

(1) 栄養塩調査

栄養塩の分析結果を表補1.1.1に示す。全体的に均質な傾向が見られる。上下層の栄養塩の濃度の違いは見られない。表中の調査点は図7.1.4に示す。

これらの水質調査は、成層の発達した時期を考慮して行った。¹⁾しかし、結果的には10mより上層では水質の鉛直分布はほぼ均質であった。これに対し22m層では上層の約2~3倍の高栄養塩濃度が測定された。施設設置水深27mはやや浅いが、これは調査前に台風の通過があり、上層の水塊が十分混合され躍層が下方に移動してしまったためと考えられる。

表補1.1.1 栄養塩分析結果

調査点	Z(-22m)	Z(-15m)	Z(-8m)	C(-14m)	C(-5m)	X2(-14m)	X2(-5m)
T-N(mg/l)	0.115		0.057	0.082	0.083	0.052	0.051
NO ₄ -N(%)	0.030	0.013	0.017	0.020	0.015	0.052	0.015
NO ₃ -N(%)	0.005	0.004	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
NO ₂ -N(%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ケルゲル-N(*)	0.150		0.057	0.080	0.083	0.052	0.051
PO ₄ -P(%)	0.0007	0.0022	0.0007	0.0022	0.0000	0.0011	0.0018
T-P (%)	0.0078	0.0064	0.0074	0.0060	0.0067	0.0057	0.0071

(2) 生物調査

各測点における動植物の種類および湿重量を表補1.1.2に示す。測点X₁, X₁' , X₂およびX₂' では、アナメ、コザネモ以外の海藻はアナメとイガイに付着し、岩やサビ亜科上に付着が見られた。なお、殻状のイワノカワ科およびサビ亜科は、採取が困難なため潜水観察による被度(%)で表している。

測点X₁, X₁' , X₂およびX₂' における生物相の差は見られず、アナメ、サビ亜科、イガイ、マボヤおよびキタムラサキウニが卓越して出現していた。また、イガイ群集は瀬の上部に発達し、瀬の下部では観察されなかった。

一方、X₃およびX₄はマコンプ、ガゴメが優先し、X₁~X₂において卓越していたアナメ、イガイ、マボヤおよびキタムラサキウニが成育していないかまたは非常に少なかった。

表補1.1.2 各測点における動植物の種類および湿重量

○調査網にかける動植物の湿重量(g/50cm×50cm)・イワノカワリとアビダ科
 については標準水中に50cm×50cmの2メートル内の網を掛けた。

種名	学名	St. X ₁	St. X ₂	St. X ₃	St. X ₄	St. X ₅	St. X ₆
群生ダイソウ	Colonial diatoc						+
アオアオサ	Ulva pertusa						+
カシラサギ草の1種	Halopteris sp.					+	0.6 +
アミシダゲ草の1種	Distyria sp.	+	+				
クマリ	Sporobolus esoperius						+
マコソバ	Laminaria japonica						232.0 224.1
ゴボノ	Kiellmaniella crassifolia						0.3 270.4
アナノ	Acanthaceae	108.1	11.3	56.8	109.4		
アサギ	Sargassum horneri						0.2 0.4
フナノリ	Scinaria japonica						0.7
マクサ	Gelidium amansii		+				
イワノカワリ(※)	Squamariaceae	+	+	+	5		
アビダ科(※)	Melobesioideae	90	80	90	90	5	10
トサカモドキ草の1種	Callophylla sp.						+
カイノリ	Gelidium intermedia						+
ウツナソウ	Chaetia parvula						+
カヌイトダ草の1種	Callithamnion sp.			+	+		
カサツバ	Griffithsia japonica						+
ハネイサ	Ceramium japonicum				+	+	
イボス草の1種	Ceramium sp.				+		
エゴノリ	Campylaspora hysanoides				+	+	
アサギ	Microcladia clesana				+	0.1	+
ベニノリ草の1種	Hypocleonus sp.				+		
ヌメシロノリ	Necoblastia japonica						0.2
ウスベニ	Sorella repens						+
カサツバノリ	Acrosorium uncinatum					+	+
シマツバ	Heterosiphonia pulchra				+		+
イトダ草の1種	Polysiphonia sp.				+	+	0.1 +
ソソ草の1種	Laurencia sp.	0.2	0.1	0.6	0.5		+
コサネ	Symbiodia parvantioides	0.1					+
ヒメコサネ	Symbiodia pennata				+	+	+
タシノハ	Caecilonium flaccidum						+
オキナワツバ	Strombocentrotus nudus	107.4	122.1	132.6	57.2		
イガイ	Mitilus coruscus		1675	1994			
アサギ	Halocynthia roretzi	1405	353	122	722		

+ : 0.1g 未満

1.2 流れの生物に対する効果

今回の調査は、流れ、水質および生物調査を同時期に行った。特に混合効果を見出すために水質に関して躍層の発達している時期を考慮した。しかし、調査前の台風通過で躍層が下方に移動し、施設の湧昇機能を評価するには適切なデータはなかった。

一方、対象とするコンブは、岩礁には見られず、むしろ施設周辺に多く見られた。種々の因子が考えられるが、水質もその一つとしてあげられる。すなわち、岩礁における水質よりも施設周辺の水質の方が好適だったと考えられる。これは、この海域では夏期において躍層が発達して下層の水塊がより低温（コンブにとっての好適水温）であることを裏付けている。

また、食害もコンブの成長に影響する因子の一つである。岩礁域ではムラサキウニが大量に生息していた。これは発芽したコンブがただちに摂餌されてしまうことを意味している。このため、底層の好適水塊を上層と混合させ発芽条件を整えたとしても摂餌圧対策が必要となる。今回の調査は3月に設置し、その半年後の9月に調査を行ったものである。

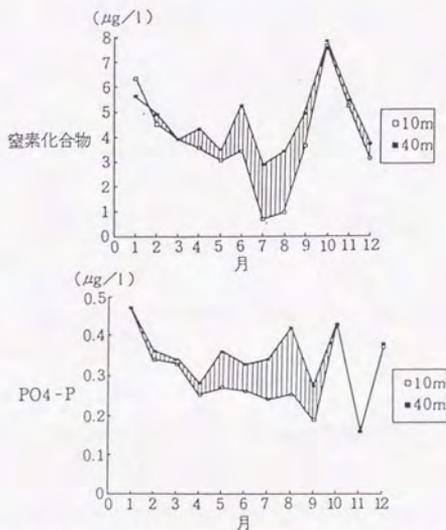
したがって、施設による生物効果を見出すためには年間を通じた調査が必要である。

2節 愛媛県日振島海域

2.1 海域の概要

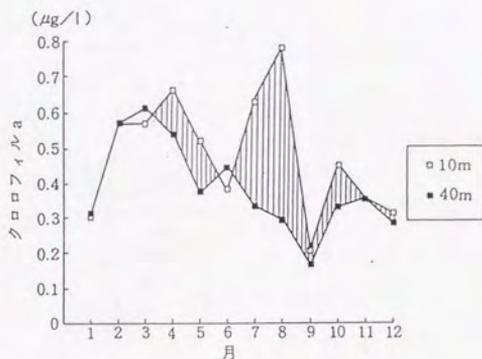
湧昇流構造物の目的は底層の栄養水塊を有光層に湧昇させ、広域漁場形成を意図するものである。当海域の栄養塩分布を調べる。²⁾

窒素化合物と PO_4-P の栄養塩の経月変化を図補1.2.1に示す。どちらも1月から9月にかけて徐々に値が低くなり、下層水の値が上層水に比べ大きくなる。また、6月から9月にかけて上層、下層の差が広がる。特に7、8月には、窒素化合物の場合上層で極めて値が低くなる。10月になると上下層とも値が大きくなり、秋期特有の水塊の混合期の現象と理解される。



図補1.2.1 窒素化合物、リン酸態リンの経月変化（昭和61年観測）

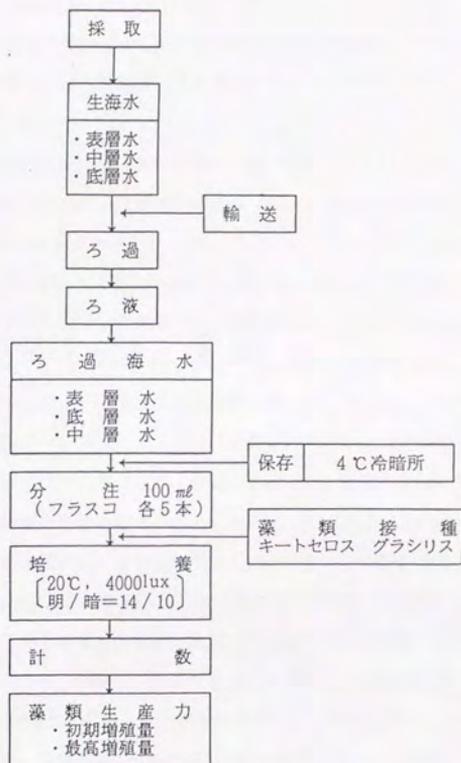
このような水質環境に対し植物プランクトンの活性を表すクロロフィル a の水深10m, 40mにおける経月変化を図補1.2.2に示す。水深10mにおけるクロロフィル a の濃度は4月と8月にピークを示し、一般にいわれるような春秋期のピーク（大ブルームの発生）に対し、秋期の発生期がここでは早い。また、7、8月の上層と下層の濃度差が大きい。植物プランクトンの増殖は、栄養塩濃度特にリン酸態リンの濃度に支配されるといわれている。図補2.1に示したように、これらの時期の栄養塩濃度は表層では極端に小さいので、これらが制限因子となっているようである。



図補1.2.2 クロロフィル a の経月変化（昭和61年実施）

2.2 現地海水による培養実験

植物プランクトンの培養実験は、採取した試水は無菌状態にし、予め培養した植物プランクトンを接種し、藻類の増殖量から試水のもつ藻類生産力（AGP: Algal Growth Potential）を測定する方法を用いた。この実験フローを図補1.2.3に示す。



図補1.2.3 植物プランクトンの培養実験フロー（AGP法）

2.3 培養実験結果

この培養実験は、湧昇流の直接的効果としてあげられる植物プランクトンの増加を実験室内で確かめることにある。すなわち、現地海水を直接用いて一次生産量の増加に対する水質の寄与を把握することにある。この海水は、湧昇流の生じている構造物下流側の上中下層水および構造物の影響のないと考えられる海域で採水した。

採水時期は、密度躍層の発達していると考えられる8月を選んだ。また、実験は、実際

の海域に似せるため流水式の培養が妥当であるが、試水の量が限られているため止水式の培養とした。

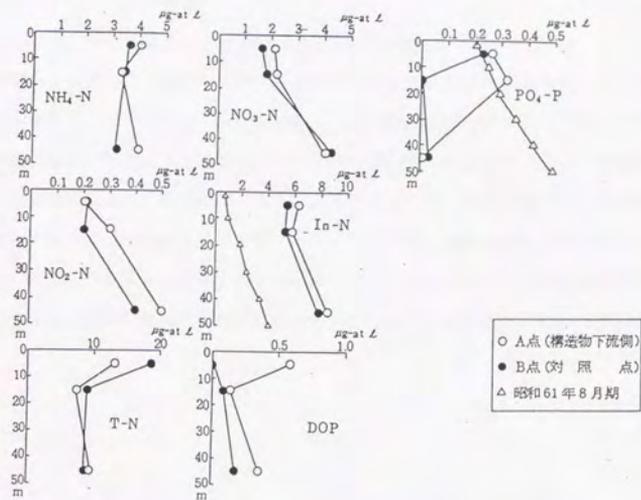
培養に供した藻類は、*Chaetoceros gracilis* (キートセロスグラシリス) で、大きさは6~12 μ m、北方性の種類である。対数増殖期の単位細胞当たりの乾燥重量およびクロロフィルaの含有量は、実測の結果、それぞれ 3×10^{-8} mg/cell, 4~6.1 $\times 10^{-7}$ mg/cellであった。初期濃度は 3×10^3 cells/mlとした。

培養実験に供した試水の水質分析結果を図補1.2.4に示す。なお、図中には図補.2.1で示した水質結果を併記した。窒素化合物では、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ が水深が深いほど高い。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ は、沖合い海域では1%にすぎないといわれている。この海域では $\text{NH}_4\text{-N}$ がこれら3態窒素の50%以上を占めている。 Inorg.-N で昭和61年調査と比較すると今回の調査の場合、非常に高い値を示すと同時に、表層底層の値の差が小さいことがわかる。

一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の場合、構造物下流側の中層と対照点の中層では値に大きな差がある。昭和61年度調査では、水深が深くなるほど値が大きくなるのに対し、今回では値が極めて小さい。理由が不明だが、栄養として生物に摂取されたといった生物的要因も考えられる。

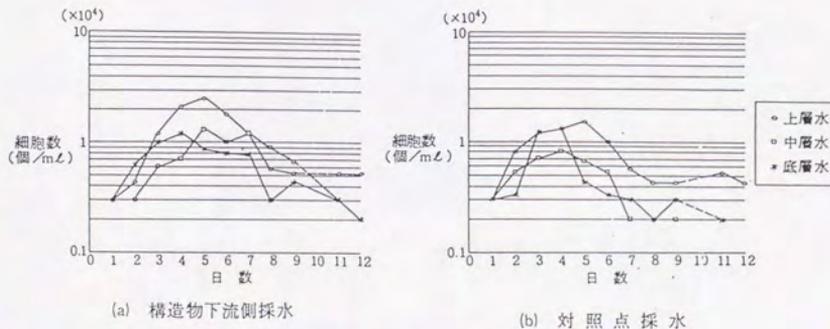
このような水質の試水を用いて培養実験を行った。結果を図補1.2.5に示す。表層水の場合、4日目で増殖細胞数が極値を示したのに対し、底層水では2~3日で極値となっている。また、表層水が増殖細胞数の方が底層水に比べ大きい。底層の場合、細胞の取り込み栄養塩濃度が低い(特に $\text{PO}_4\text{-P}$)、増殖が早い段階で終了したと考えられる。表層、底層の混合域と考えられる中層水の場合、構造物下流側では、4日目で極値となり、3日間ほど同じ値を示している。対照点では3日目に極値となり、時間の経過とともに減少する。前者の方が $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が高いために、増殖量に違いが現れたと考えられる。

以上のように、水質の違いで増殖量に違いが現れることがわかり、表層底層水の水質の違いがある場合、これらの水塊を混合させることで水質が変化し、増殖に影響することが明らかになった。すなわち、上下混合の促進という湧昇流の効果が明確になった。



図補1.2.4 培養実験に供した試水の水質 (昭和63年8月12日採水)

(図中, Inorg. -N = $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$)

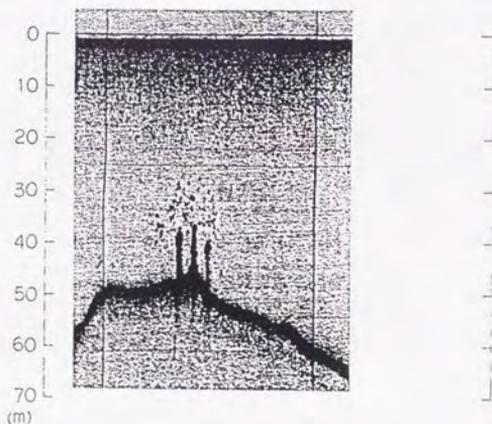


図補1.2.5 植物プランクトンの培養実験結果

2.4 集魚状態

1) 船上魚群探知機による観測

魚探調査結果の一例を図補1.2.6に示す。5月と8月に行った調査すべてにわたり、同様の影像が映し出された。この魚群の魚種は不明だが、魚礁性の比較的高い魚種（たとえばⅢ型³⁾に属するアジ、サバ、ブリ、ヒラマサ等）あるいは動物プランクトンと考えられる。これらの魚種は音波刺激や流れ刺激に反応するといわれていることから、この構造物によって生じた大規模な乱れが集魚に寄与していると考えられる。また、魚礁など構造物周辺では小型アミ類のような動物プランクトンも多く集まっている事例が多く報告されている。この影像が動物プランクトンと考えると、前項で述べた植物プランクトンの増殖過程から論じられる食物連鎖がこの構造物周辺で構築されていることも考えられる。

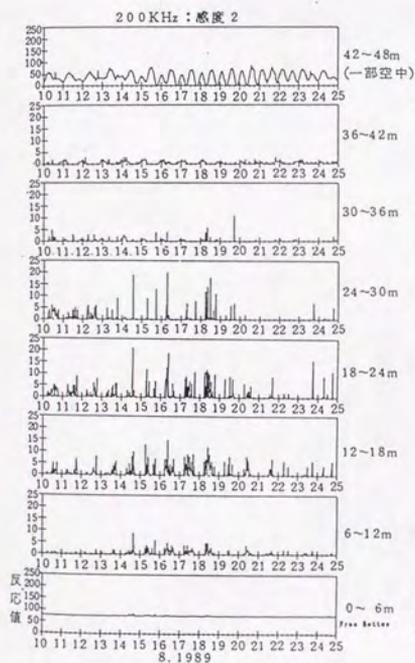


図補1.2.6 魚探影像記録（昭和63年5月9日11時～11時40分）
（中央の3本の柱が構造物、その上部の黒点が魚影）

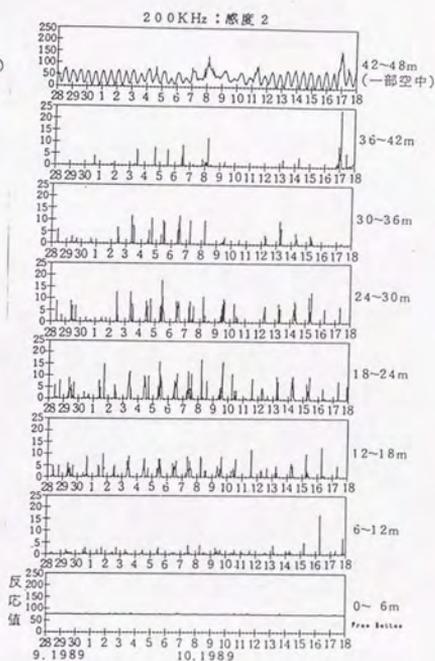
2) 海底設置型魚群探知機による観測

海底設置型魚群探知機を用いて、魚群反応の時間変化を観察した。魚群探知機（協和商工（株）製DFL-1、50kHz・200kHz同時発射）は、構造物間の水深47mの位置に設置し、15昼夜測定した。この装置は、独自に開発されたもので、30分毎に32秒間2種類の超音波を交互に発射し、6m水深帯毎の反射値を記憶させるものである。結果を図補1.2.7(a)(b)に示す。(a)は夏期の測定、(b)は秋期の測定を示した。横軸は経過日時、縦軸は水深をブロックに分割し、ブロック毎の反応強度を示した。強度が高いほど、その水深帯で魚群が網集したと判断できる。なお、海底上6m、海面下6mについては、測定器の特性上信頼できるデータではないので、以下の解析から除外する。この観測結果を用いて、時間帯による層別（水深）魚群出現頻度分布図を作成した。この図を図補1.2.8に示す。これを見ると8月は夕方から早朝にかけて表層域（水深15m以浅、図中30-42m）で、昼は底層域（水深25m以深、図中6m-18m）から中層域（水深15-25m、図中18-30m）に魚影の出現頻度が高く、昼夜で出現頻度の高い層が逆転している。9・10月の場合、夜間には魚群がほとんど見られず、昼間の底層域に魚群の出現頻度が多く見られている。特に10から12時にかけて出現のピークが見られ、この時間帯の前後から離れるにしたがって魚群出現頻度が小さくなる。

出現率を全出現回数を全測定回数で除したものと定義した場合、夏期の8月、9・10月のそれぞれの魚群出現率は19%、11%であった。8月のほうが2倍近く多いことがわかった。

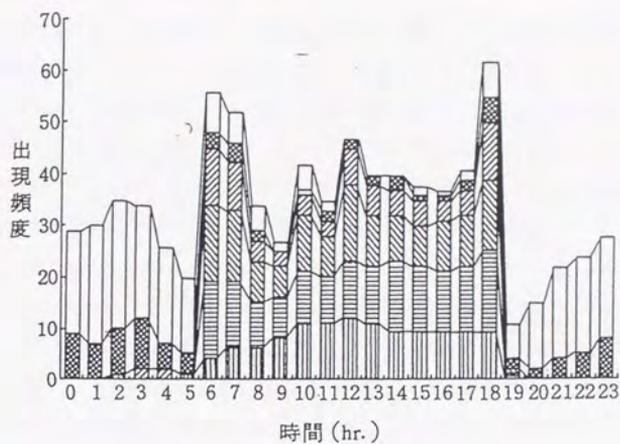


(a) 8月10日~8月24日

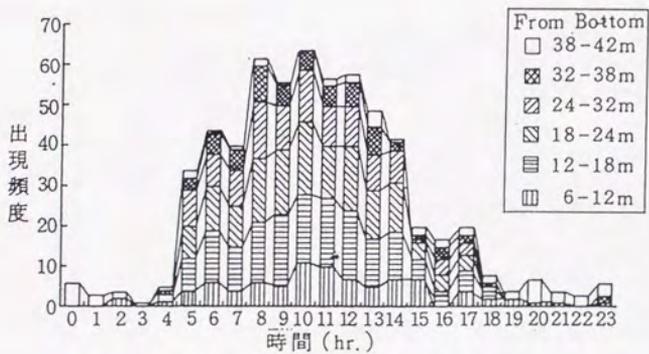


(b) 9月27日~10月18日

図補1.2.7 湧昇流発生構造物近傍における魚群出力結果



(a) 8月10日~8月24日



(b) 9月27日~10月18日

図補1.2.8 時間帯による層別魚群出力頻度

3) 試験操業および水中ビデオ撮影

(社) マリノフォーラム 21 によって現場周辺で巻き網による試験操業が行われ、網集した魚種の特定が行われた。⁴⁾ 試験操業は中型巻き網漁船(15ト)によって構造物周辺潮下側で、漁獲された魚種を表補1.2.1に示す。夜間操業を行った8月8日ではイワシ類、アジ、サバ、タチウオ等9種類、朝方はウマズラハギ、チダイの2種類が漁獲された。特にウマズラハギは大きな群を成していた。前述した魚探結果と対比すると、昼間はハギ類、夜間はイワシ、アジ、サバ類と思われる。それぞれの胃内容物について調べると、マサバ、シイラ、タチウオ等の体重100グラム以上の魚にはキビナゴ等の小魚が主体で、キビナゴ等の小魚には主要餌料生物といわれる橈脚類等の動物プランクトンの個体数が多かった。橈脚類は特に植物プランクトンを食するものが多かったことより、構造物周辺での生態系をうかがうことができた。漁獲量の最も多かったウマズラハギでは付着生物の介形目(ウミホタルなどの海産発光動物)の個体数が多かった。また、橈脚類等の動物プランクトンや端脚類(クラゲ等)、あるいは稚魚等多種多様な生物を食し、当初見込んでいたような付着生物のみを餌とはしていないことが明らかになった。

表補1.2.1 試験操業結果

第1回試験操業 8/8 22:00~8/9 5:00 (操業結果)					第3回試験操業 9/25 22:00~24:00 (操業結果)				
種類	量 (kg)	尾数	平均体重 (g)	平均体長 (cm)	種類	量 (kg)	尾数	平均体重 (g)	平均体長 (cm)
ウルメイワシ	20.0	600	33.3	14.8	タチウオ	1.0	9	107.8	60.0
マイワシ	10.0	116	86.7	22.8	ケンサキイカ	0.5	20	50.0	18.0
マアジ	8.0	143	56.0	16.4	ミナミハタンボ	0.03	1	30.0	12.0
マサバ	40.0	345	114.7	22.9					
ケンサキイカ	5.0	500	10.0	12.0	合計		約1.5		
カマス	2.0	24	85.0	24.5					
タチウオ	7.0	39	174.4	67.6					
シイラ	8.0	23	346.4	40.7					
合計	約100.0								
第2回試験操業 8/31 7:00~9:00 (操業結果)					第4回試験操業 10/19 6:30~7:10 (操業結果)				
種類	量 (kg)	尾数	平均体重 (g)	平均体長 (cm)	種類	量 (kg)	尾数	平均体重 (g)	平均体長 (cm)
ウマズラハギ	500.0	3,220	155.2	24.1	タチウオ	0.7	3	240.0	80.0
チダイ	2.0	7	248.9	24.2					
合計	約502.0				合計		約0.7		

水中ビデオ撮影は、構造物付着生物状況および集魚状況把握のために行った。L型1基を鉛直方向に4層に区分し、構造物表面からカメラを約1m離して撮影した。底版部では付着生物は見られず、上部に向かうにしたがってフジツボが多く見られた。水深が50mと深く、光の届く有光層の限界に近い場合、底版と上端では環境に違いがあることで生物層の違いが見られたと考えられる。また、上端部にカメラを固定し、昼間の1時間撮影を行った。ウマズラハギの群が遊泳していることが映し出され、試験操業結果と一致した。

3節 まとめ

愛媛県日振島海域で行った調査では、植物プランクトンの培養実験から、増殖は水質に大きく関わり、今回の場合 PO_4 -Pの濃度が影響することが明らかになった。したがって、表底層の水質の違いがある場合の湧昇流の効果が明確になる。

さらに、魚影調査から植物プランクトンの増殖を窺わせる魚影記録が現れたことより、構造物周辺での食物連鎖の構築がうかがわれた。

海底設置型魚群探知機の測定結果から季節変化はあるが、日中では底層域から中層域に魚影が見られ、夜間は表層域に出現することがわかった。試験操業の結果、魚探に現れている魚種は、日中はウマズラハギ、夜間はイワシ類、アジ類とわかった。

以上のように、それぞれ調査から一応の効果を見出すことができたが、永続的な効果については不明である。また、それぞれの関連性については触れることができなかった。なお、愛媛県の調査は、この後水産庁の外郭団体である(社)マリノフォーラム21によって継続調査が行われている。

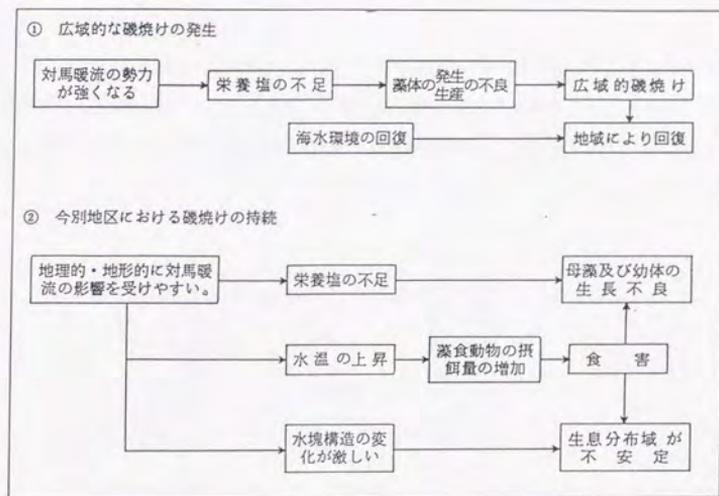
補章 2. 湧昇流発生構造物による漁場造成の提言

本研究に係わる湧昇流発生構造物の実海域実験を第7章に述べた。その目的は青森県今別地区では磯焼け対策としての適用であり、愛媛県日振島海域では新たな広域漁場環境の創出による漁場造成である。この実海域実験結果を用いて、湧昇流発生構造物活用例を提示する。

1節 磯焼け海域漁場造成への適用

1.1 磯焼け現象

磯焼け現象は、岩礁性の海域で大型海藻の生育が全くなく、岩面や転石表面が無節石灰藻と呼ばれる白色の被覆藻で覆われ、あたかも石灰を塗布した感のある海域である。生産性に乏しくわずかに瘦せウニやアワビが生息する。磯焼け現象の整理をすると図補2.1.1のようである。



図補2.1.1 磯焼け現象の整理

大型海藻の生育は、栄養塩の供給、適水温、付着生物、波浪・流動環境などと競合植物、藻食動物など、有機・無機環境の総合条件によって定まる。図補2.1.1で対馬暖流は貧栄養塩であり、その勢力の大きい場合には藻体の発育が阻止され、広域に磯焼けが生じる。一度磯焼けが発生すると環境が回復しても、摂餌圧の相対的増大や遊走子の流亡などで回復しないのが通例である。回復は残存藻場から外縁的に生じるので、全滅した藻場や広域の磯焼けでは人為的な藻場の手法が必要となる。水温の上昇は藻食動物の摂餌量の増大となり、特に冬季コンブの発芽幼芽期の水温上昇は大きな食害を生じる。また水塊構造の変化率は藻類に影響し、潮流による水温の日周変動は大きな影響をもつ。

1.2 湧昇流発生構造物の機能と磯焼け対策

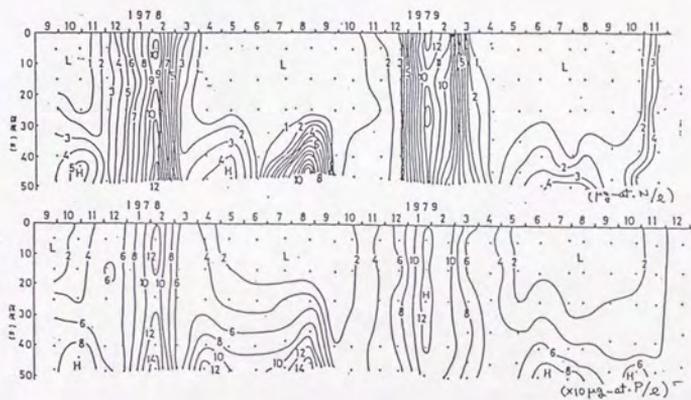
前述のように磯焼け対策には栄養塩と水塊水温の安定が無機環境として重要である。湧昇流発生構造物は下層の栄養水を湧昇して栄養塩を補給し、さらに下層の安定した水温・水質水塊を供給することで磯焼けの原因を排除することができる。その上で、投石、コンクリートブロック等の付着基質の設置、母藻移植や遊走子撒布などの造藻、植食動物の駆

除等の生物対策を併用する。

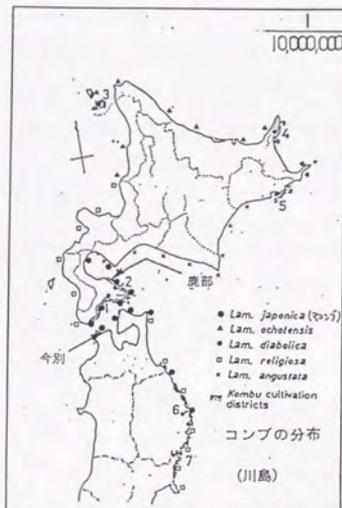
1.3 湧昇流発生構造物の設置

先ず、栄養塩の豊富な層を確認し、設置水深を決定する。栄養塩の分布状態については、できる限り長期的なデータの収集が必要であり、特に夏期の成層期における富栄養層の確認が重要である。図補2.1.2に北海道鹿部沖の硝酸態窒素、リン酸態リンの年変化を示した。

13



図補2.1.2 北海道鹿部地先における硝酸態窒素、リン酸態リンの年変化
(上段:硝酸態窒素, 下段:リン酸態リン, 単位: $\mu\text{g-at/l}$, 但しリンは $\times 10$, 縦軸:水深 m, 横軸:時期 1977年9月~1979年11月)



図補2.1.3 今別地区、鹿部地区の位置²⁾

なお、鹿部地区は、図補2.1.3に示す位置で、本来であれば当該地区、もしくは隣接する海域のデータであることが必要である。

これによると3～10月に水深30m以深に高い濃度の水塊が確認できる。このように栄養塩の豊富な層を見つけることによって、構造物の設置水深が決定できる。次に構造物によって混合水塊がどの水深まで持ち上げられ、生物相に影響するかを調査検討しなければならない。

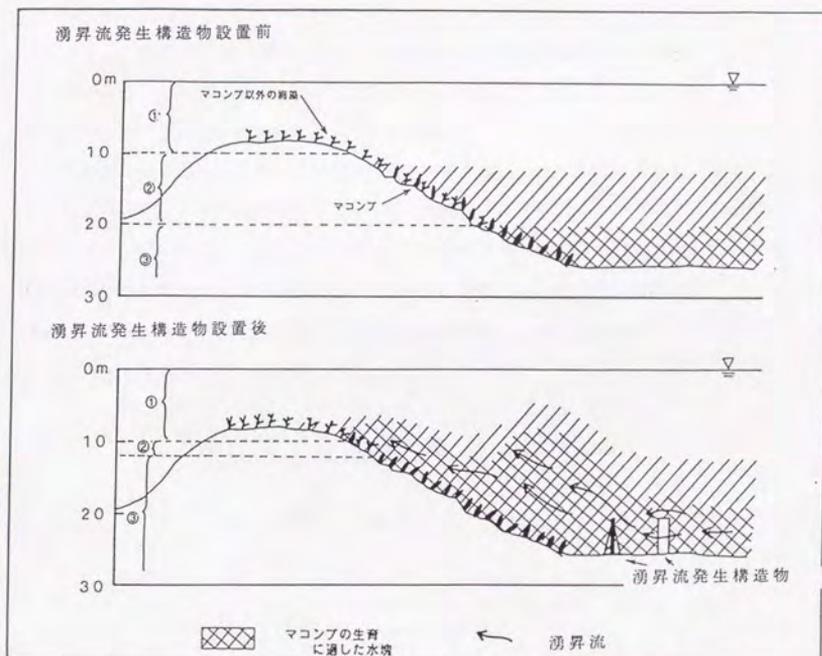
この影響範囲は、地形、深度勾配、構造物の規模、流況、栄養塩の濃度などにより決定する。そして、湧昇した水塊がコンブの成長、生育に好適な条件を満たしていれば、生態的適域を広げ、漁場が形成される。

図補2.1.4に漁場造成の概念図を示した²⁾。図中②の地帯は、水塊が不安定なため、ホンダワラ類、その他の海藻とマコンブの混成地帯となっている所である。この②の地帯にマコンブの生育に適した水塊を湧昇流発生構造物によって与えれば、マコンブの生育域は、

水深約10m付近まで造成できるものと考えられる。

構造物を設置する場所の地形は、平坦で設置作業の容易な場所がのぞまれる。また、本研究では自然の尾根を利用して湧昇流を発生させたが、尾根のような場合、地形的特性を生かすだけでなく、付着基質として利用することも調査、検討する必要がある。

造成域の事前調査（水質、影響範囲の底質分布状態、地形など）、水理模型実験により混合水域の影響範囲を十分に検討し、漁場造成域の面積を決定することがのぞましい。



図補2.1.4 湧昇流発生構造物による漁場造成の概念図

- 図中 ①の地帯は、ホンダワラ類、その他の海藻の優先地帯
②の地帯は、ホンダワラ類、その他の海藻とマコンブの混成地帯
③の地帯は、マコンブの優先地帯

1.4 投石による付着基質の設置

投石により付着面を与える漁場利用の有効性は、

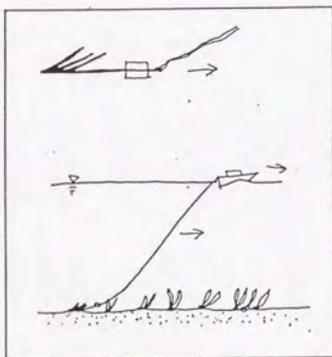
- ① 未利用の砂礫地帯を有効的に利用できる。
- ② 藻食動物の生息密度が少ないため、新たに付着面を与える場合、その駆除が容易である。
- ③ 岩礁爆破などに比べ、経済的である。
- ④ 漁法的に採取が容易である。(たとえば、マッケ引き漁法など；図補2.1.5)

などがあげられる。

設置する水深は、コンブの分布状態を把握し、コンブの優先域となっている水深帯に投入する必要がある。また、波動による埋没、散逸なども考慮しなければならない。

石材の形状についても埋没、流失、反転がなく、安定したもの、また漁法（マッケ引き）面からの採取の容易な形状を検討する必要がある。

マッケ引き漁法の有効性は、新付着面付与を容易に行えるという点にもある。石材ブロック等の付着基質を海底に設置すると経時的に海藻の遷移が起り、やがては周辺漁場の植生に戻ることが知られている。この場合は基質に対する方策がなされなかったために遷移が起るが、このマッケ引き漁法を行うことで、基質である石材を反転させ、コンブの付着を促進させると同時に既成の雑海藻の生育を抑止し、コンブを優先種として維持していくことができるものとして期待できる。



図補2.1.5 マッケ引き漁法の作業略図

1.5 漁場利用・管理方法の検討

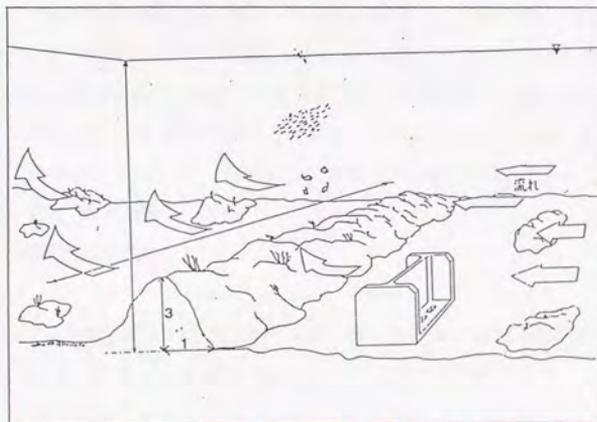
湧昇流発生構造物は、自然環境を改善することが目的である。構造物を設置する前に、生物、物理、化学的環境を経時的に調査し、十分に把握することが必要である。これらの結果を吟味し、設置場所（水深、地形など）、構造物の規模が決定されれば、この構造物は半永久的に利用される。

その後の管理は、流れを利用した構造物のため、付着した海藻類、動物の除去、台風時など大時化の後の構造物の保全などを行う必要がある。

付着面付与は、海藻の遷移のために石材を投入したまま数年間放置すると、周辺の植生に戻ってしまう。このため、敷設した後の管理が重要となる。マッケ引き漁法によると収穫と基質面付与が同時に行われる。ただし、コンブの植生が無くなってしまった場合には、収穫が行われなため、石材が放置されることになる。このような場合でも遊走子の放出される時期にはマッケ引きを行い、石材の耕耘を行うことが漁場の維持・管理に必要なことである。

また、藻食動物（今別の場合、キタムラサキウニ、エゾバフソウニなど）による食害を防止する必要がある。これについては、人為的に藻食動物の密度を低下させ、摂餌強度を低位に保つことなどの対策が必要である。

地形を利用した構造物の設置概念図を図補2.1.6に示す。地形を利用する場合には、勾配は1:3（水平方向：鉛直方向）以上の急峻な形状を必要とする。



図補2.1.6 地形を利用した構造物の概念図

2 節 湧昇流発生構造物による広域漁場の造成

2.1 湧昇流漁場造成の考え方

湧昇流発生構造物は、底層の富栄養水塊を有光層に湧昇させ、植物による光合成を促進し基礎生産力を増大させることを主目的とし、それ自体魚礁効果はあるものの、他の漁場造成手法と組み合わせて用いる。図補2.2.1に考え方の一例を示す。

2.2 湧昇流発生構造物の効果

湧昇流発生構造物の効果は以下のようである。

(1) 直接の魚礁効果

湧昇流発生構造物自体が海中における各種の刺激環境を創出して、魚礁漁場を形成する。

(2) 基礎生産力の増大による広域漁場の形成

底層の富栄養水塊を有光層へ湧昇させ、植物プランクトンを有機物生産者とする食物連鎖によって広域に良好漁場を形成する。その内容は以下のようである。

- ① 植物プランクトン→動物プランクトン→プランクトン食性魚→魚食性魚というプランクトン食性系食物連鎖の各過程による漁場の形成。人工魚礁漁場と併設。
- ② プランクトン、ネクトン（泳力のある生物）の死骸や排泄物等の沈殿、流れ環境の多様化によるデトリタスの集積やD O供給などによるベントスの増殖、これによるベントス食性系食物連鎖の各過程による漁場の形成。人工魚礁漁場と併設。
- ③ 湧昇影響内の藻場造成による採藻、植食生物の増殖、および稚仔魚の藻場保育場による増殖。築磯等藻場造成事業との組み合わせ。前節の磯焼け対策もこれに含まれる。
- ④ 浮遊性稚仔魚の餌料環境の改善による増殖。マダイ、ハタ、メバル、オコゼ等岩礁性の魚も浮遊卵を生み、稚仔魚期は上層を浮遊する。これに餌料プランクトンを供給する。産卵礁や中層藻場などと組み合わせる。
- ⑤ 未来課題へのアプローチ

イワシ、サバ、サンマ等の多獲性魚資源は、資源管理による安定生産や予測さえも困難である。これは産卵海域の環境特に餌料プランクトンの濃密過疎に支配されるからで、沖合いプランクトンは消長が激しい。稚仔魚発生海域の餌料プランクトンの安定増殖は、多獲性魚の安定生産技術につながる。

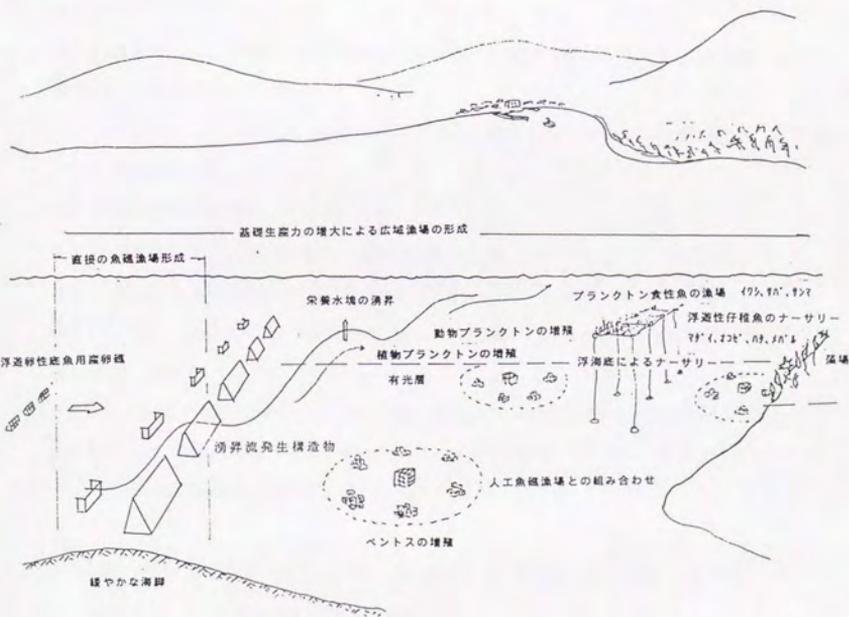
2.3 立地条件

湧昇流発生構造物に底層流エネルギーを活性化して湧昇を起こし、底層栄養塩水を有光層に到達させるものであるから、次の条件が必要である。

- ① 表層に対し底層栄養塩濃度が大きいこと。
- ② 底層流速が大きいこと、すなわち、なだらかな海脚の上部、平坦な海底で天然では乱れの少ない場所。
- ③ 密度成層の小さい海域（密度成層の大きい場所は改めて設計する）。

2.4 総合評価

漁業生産効果、基礎生産効果を見積もり、投資効率（30年償却）は満足させる必要がある。魚礁漁場、増殖場事業ともシステムの組み合わせることによって、より有効な事業とすることができる。このことはまた、底層栄養塩を湧昇によって食物連鎖に取り組みことは、地球環境保全（CO₂のCを固定、富栄養化改善）にも寄与する。



図補2.2.1 湧昇流発生構造物による広域漁場の形成

参考文献

第1章

- 1) Ryther, J. H. ; 1969, Photosynthesis and fish production in the sea, Science, 166, 72-76.
- 2) 那須敬二; 漁場の海洋環境, 海洋開発第4巻水産資源の開発, 佐々木忠義監修, p112, 昭和45年, 海洋開発出版センター.
- 3) 大竹臣哉; 人工の湧昇流, 地球にやさしい海の利用5章, 隆島史夫・松田皎編, p76, 1993, 恒星社厚生閣.
- 4) 吉田耕造; 沿岸湧昇, 沿岸海洋研究ノート, 11(2), 127-142, 1974.
- 5) 吉田耕造; 湧昇, 海洋物理学15章, 寺本俊彦編, 131-160, 1974, 東京大学出版会
- 6) Jones, B. H. and Halpern, D. : Biological and physical aspects of a coastal upwelling event observed during March-April 1974 off northwest Africa, Deep Sea Research, Vol. 28A, 71-81, 1981.
- 7) Leo Nykjær and Lieve Van Camp: Seasonal and international variability of coastal upwelling along northwest Africa and Portugal from 1981 to 1991, Journal of Geophysical Research, 99(C7), 14197-14207, 1994.
- 8) Prellar, R. and O'Brien, J. J. : The influence of bottom topography on upwelling off Peru, Journal of Physical Oceanography, Vol. 10, 1377-1398, 1980.

- 9) 中村 充; 漁場造成のための内部波エネルギーによる湧昇流の利用, 沿岸海洋研究ノート, 15(2), 116-124, 1978.
- 10) 高橋正征・市村俊英・中村善生・松生洽・安岡善文・宮崎忠国; 遠隔計測による伊豆大島沖の渦湧昇流計測Ⅱ, 冬季の性状, 日本国土海洋総合学術診断技術報告集, 34-47, 1981.
- 11) Fukusawa M.; On the distribution of isothermal layers in the vicinity of the shoal, Kokusho-sone, Journal of Oceanography, Soc. Japan, 39, 15-21, 1983.
- 12) 中村 充・上北征男・木村晴保・藤井泰司・大竹臣哉; 礁による流動環境に関する研究, 第27回海岸工学講演会論文集, 522-526, 土木学会, 1980.
- 13) 和田耕造・中嶋靖・梅沢信敏・武内智行・桑原伸司; 浚渫土砂により形成されたマウンドの湧昇流発生機構とその魚礁効果, 第35回海岸工学講演会論文集, 772-776, 土木学会, 1988.
- 14) 大竹臣哉; 湧昇流の発生施設の開発と実証実験について, (社)全国沿岸漁業振興開発協会, 昭和63年度中央講習会, 41-70, 1988
- 15) 緒方源信・長田利彰・山田賢司・梶田剛; 人工湧昇流発生装置に関する研究—人工構造物の設計について—, 西部造船学会会報, 82, 141-154, 1991.
- 16) 鈴木達雄; 3次元物体背後の湧昇渦に関する研究, 水産工学, 29(1), 23-30, 1992.
- 17) 細野誠一・佐久田昌昭・高木儀昌・川島伸介; 人工湧昇流発生構造物による新漁場の造成, 第8回海洋工学シンポジウム, 1988.
- 18) 山越康行・明田定満・鈴木四郎・前田久明・宮島省吾・申鉉秀; 洋上型深層水利用装置の実海域動揺計測について, 平成3年度日本水産工学会学術講演会論文集, 日本水産工学会, 99-100, 1991.
- 19) 池田俊介・武若聡・二瓶泰雄・秋山信義; 各種構造物による湧昇流の発生に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 39(2), 896-900, 1992.
- 20) 浅枝隆・中井政則・玉井信行・堀川清司; V字形構造物による上昇流, 土木学会論文集, 423, 83-90, 1990.

第2章

- 1) 中村 充・上北征男・木村晴保・藤井泰司・大竹臣哉；礁による流動環境に関する研究，第27回海岸工学講演会論文集，522-526，土木学会，1980
- 2) 上北征男・中村 充・渡義治・森井伸正・大竹臣哉・統辰之介；湧昇流制御構造物の開発に関する実験的研究，第10回海洋開発シンポジウム論文集，142-147，1985
- 3) 清水虎重・有富範伊・森井伸正・葛原徹・大竹臣哉・今村均・中瀬浩太；大規模渦発生礁の研究（その2）-基本形状と配置間隔-，五洋建設技術研究所年報，13，21-30，1984
- 4) 糸洸長敬・大竹臣哉・中村 充・向井雅志；岬による剥離渦の形成とそのSpin Downによる湧昇流，水産工学，30(2)，113-118，1993
- 5) 有富範伊・森井伸正・葛原徹・大竹臣哉；大規模渦発生礁の研究（その3），五洋建設技術研究所年報，14，39-46，1985

第3章

- 1) たとえば木村竜治；地球流体力学入門，p247，東京堂出版，1990.
- 2) たとえば今井功；流体力学（前編），p429，裳華房，1976.
- 3) たとえば谷一郎編；流体力学の進歩乱流，p269，丸善，1980.
- 4) 武内智行；茨城県中部沿岸海域における底層流速の変動特性，水産工学研究所報告，8，59-80，1987.

第4章

- 1) 流れの可視化学会編；新版流れの可視化ハンドブック，朝倉書店，pp157-198，1986.
- 2) 瀬戸雅文・糸洸長敬・中村 充・田北博司；平板の背後に形成される後流域より発生する質量力，海岸工学論文集，38，pp.666-670，1991
- 3) 神元五郎；水力学Ⅱ，応用力学講座4-B，共立出版，pp273-280，1957.
- 4) 日本流体力学会編；流体力学ハンドブック，丸善，pp46-47，1987.
- 5) 糸洸長敬・大竹臣哉・中村充・向井雅志；岬による剥離渦の形成とそのSpin downによ

る湧昇流, 水産工学, 30(2), 113-118, 1993.

6) Tsuchiya, K. : Cloud features association with mesoscale phenomena during cold seasons revealed by meteorological satellite pictures, The Geophysical Magazine, Vol.37, No.1, pp49-94, 1974.

7) 西村司: 鳴門の渦潮...宇宙からその謎を追う..., 山文社, p41, 1986.

第5章

1) 緒方源信・長井利彰・山田賢司・梶田 剛: 人工湧昇流発生装置に関する研究—人工構造物の設計について—, 西部造船会会報, 82, 141-154, 1991.

2) 鈴木達雄: 3次元物体背後の湧昇渦に関する研究, 水産工学, 29(1), 23-30, 1992.

3) 浅枝 隆・中井正則・玉井信行・堀川清司: V字型構造物による上昇流, 土木学会論文集, 423(II-14), 83-90, 1990.

4) 池田俊介・武若 聡・二瓶泰雄・秋山信義: 各種構造物による湧昇流の発生に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第39巻, 896-900, 1992.

5) 清水虎重・有富範伊・森井伸正・葛原徹・大竹臣哉・今村均・中瀬浩太: 大規模渦発生礁の研究(その2)—基本形状と配置間隔—, 五洋建設技術研究所年報, 13, 21-30, 1984

6) 大竹臣哉・糸洲長敬・中村充・今村均: 複列衝立構造物による人工湧昇流(その2)—アスペクト比による効果の違い—, 平成7年度日本水産工学会学術講演会論文集, 9-12, 1995.

7) 瀬戸雅文・糸洲長敬・中村 充・田北博司: 平板の背後に形成される後流域より発生する質量力, 海岸工学論文集, 38, 666-670, 1991.

8) 大竹臣哉・糸洲長敬・中村 充: 複列衝立構造物による人工湧昇流の発生機構, 水産工学, 31(3), 181-187, 1995.

第6章

- 1) 大竹臣哉・糸洲長敬・中村充・今村均；複列衝立構造物による人工湧昇流（その2）
ーアスペクト比による効果の違いー，平成7年度日本水産工学会学術講演会論文集，9-12，
1995.

第7章

- 1) 上北征男・浅岡邦一・森井伸正・大竹臣哉；湧昇流発生構造物の開発に係わる実験的
研究，海岸工学講演会論文集(33)，342-346，1986.
- 2) 大竹臣哉・今村均・松井巨光・近藤浩右；マリテックス実証事業現地調査，五洋建設
技術研究所年報，18，29-36，1989.

補章 1.

- 1) 水産庁・海上保安庁水路部・建設省国土地理院；磯焼け地域沿岸漁場開発計画調査報
告書，343，昭和61年3月.
- 2) 大竹臣哉・今村均・松井巨光・近藤浩右；マリテックス実証事業現地調査，五洋建設
技術研究所年報，18，29-36，1989.
- 3) 小川良徳；魚礁と網集魚，「人工魚礁」，佐藤修編，恒星社厚生閣，32-45，1984.
- 4) (社) マリノフォーラム21；平成2年度人工湧昇流発生技術の開発研究報告書，平
成3年3月

補章 2.

- 1) 水産庁・海上保安庁水路部・建設省国土地理院；磯焼け地域沿岸漁場開発計画調査報
告書，343，昭和61年3月.
- 2) Kawashima S. ; Kombu Cultivation in Japan for human foodstuff, Jap. J. Phycol,
vol. 32, 1984.
- 3) 1) と同じ

添付図表一覧

— 図 —

第 1 章

- 図 1. 1. 1 風成湧昇流発生海域
- 図 1. 1. 2 日本周辺海域で見られる地形性湧昇流発生海域
- 図 1. 2. 1 エクマン輸送の模式図
- 図 1. 2. 2 オレゴン沖の湧昇の模式図
- 図 1. 3. 1 伊豆大島沖で観測された地形性湧昇
- 図 1. 3. 2 北海道苫小牧沖人工堆積物の形状
- 図 1. 4. 1 各種の人工湧昇流発生構造物

第 2 章

- 図 2. 1. 1 山口県汐巻礁の海底地形
- 図 2. 1. 2 St. B における流向・流速、水温・塩分の連続観測記録
- 図 2. 1. 3 山口県汐巻礁に見られる流れのパターン
- 図 2. 1. 4 流速のパワースペクトル
- 図 2. 2. 1 現地モデル
- 図 2. 2. 2 模型 A, B の流速分布
- 図 2. 2. 3 模型 A, B の乱れ強度分布
- 図 2. 2. 4 乱れのスペクトル解析
- 図 2. 2. 5 実験に用いた各種構造物

- 図2.2.6 乱れ強度分布 q/U_* の鉛直分布
- 図2.2.7 断面総乱れ強度 A の水平分布
- 図2.2.8 形状の違いによる乱れ強度分布の鉛直分布
- 図2.2.9 切り欠きを考慮した形状の乱れ強度鉛直分布
- 図2.2.10 配列効果に関する実験
- 図2.3.1 湧昇流発生構造物
- 図2.3.2 湧昇流発生状況
- 図2.3.3 トレーサーによる瞬間流速分布
- 図2.3.4 平均流速ベクトル
- 図2.4.1 岬周辺の流線
- 図2.4.2 岬から発生した剥離渦

第3章

- 図3.4.1 海洋乱流中のスペクトル

第4章

- 図4.2.1 実験水槽
- 図4.3.1 岬周辺の流れの可視化（表中層と下層の流跡線）
- 図4.3.2 岬周辺の流れの可視化（中層にできた剥離渦）
- 図4.3.3 剥離直後の流れの様子，図4.3.2の岬先端を拡大したもの
- 図4.3.4 岬後流域における海水交換の模式図
- 図4.3.5 水深の異なる位置での染料濃度の経時変化
- 図4.4.1 岬周辺の流れのモデル
- 図4.4.2 渦径の増大によるエネルギーの変化
- 図4.5.1 剥離渦の径 a の剥離時間後の変化
- 図4.5.2 境界層厚さ δ と岬長さ l との関係
- 図4.5.3 ポテンシャル理論から導いた岬にそう流速 U_x/U_* の岬方向 (x/l) の分布
- 図4.5.4 レイノルズ数毎の境界層厚さの変化
- 図4.5.5 ポテンシャル理論から導いた岬に入り込む流れによる岬先端の境界層厚さ
- 図4.5.6 剥離渦の発生周期の実験値 (T_e) と理論値 (T_s) の比較

図4.5.7 Γ (循環定数)の実験値 (Γ_e)と理論値 (Γ_t)の比較

図4.7.1 岬先端から発生する剥離渦のストローハル数

図4.7.2 鳴門海峡で見られた渦の発生

第5章

図5.2.1 実験水槽

図5.3.1 平板から発生した渦管列

図5.3.2 湧昇流発生状況

図5.3.3 平板周辺の水利構造

図5.5.1 圧力低下エネルギーの実験値と理論値

図5.5.2 湧昇高さの理論値と実験値

図5.5.3 無次元湧昇高さ

図5.5.4 湧昇流発生周期

図5.5.5 湧昇流量の算出方法

図5.5.6 湧昇流量

図5.5.7 湧昇水塊中の速度の時間変化とそのエネルギースペクトル

図5.6.1 圧力低下エネルギーの実験値と理論値

図5.6.2 無次元湧昇高さ

図5.6.3 湧昇流発生周期

図5.6.4 湧昇流量

第6章

図6.2.1 扶壁衝立平板

図6.3.1 湧昇流の無次元高さ

図6.3.2 湧昇流の発生周期

図6.3.3 湧昇高さの理論値と実験値

図6.3.4 湧昇量の理論値と実験値の比較

第7章

図7.1.1 実験海域

図7.1.2 湧昇流発生構造物

図7.1.3 湧昇流発生構造物機能概念図

図7.1.4 調査地点

図7.1.5 移動式流速測定点

図7.1.6 流れの可視化方法

図7.1.7 流軸方向時における周波数特性

図7.1.8 施設周辺の乱れの周波数特性

図7.1.9 定点観測から得られた流れの周波数特性

図7.1.10 水温・塩分調査結果

図7.1.11 水温・塩分の鉛直分布

図7.1.12 地点別の相対乱れ強度

図7.1.13 相互相関係数

図7.1.14 各地点間の種々の時刻において見られた相互相関の高い周波数

図7.2.1 湧昇流発生構造物設置位置

図7.2.2 調査範囲

図7.2.3 湧昇流発生構造物の規模と配置

図7.2.4 乱れ計算に用いた期間における平均的流れ

図7.2.5 流れの変化

図7.2.6 流れのパワースペクトル

図7.2.7 構造物中間地点の流速V成分と構造物直上W成分の相互相関

図7.2.8 ドップラー式流速計による流況測定結果

図7.2.9 湧昇流発生構造物設置前後の鉛直方向の乱れ

- 表 -

第 2 章

表 2. 2. 1 実験条件

表 2. 2. 2 各種の海底構造物形状に関する実験条件

表 2. 3. 1 実験条件

第 4 章

表 4. 2. 1 実験条件

表 4. 5. 1 渦の発生周期 T と渦径 a の実測値

表 4. 5. 2 Γ (循環定数) と発生周期 T の実験値と理論値の比較

表 4. 5. 3 海水交換量の理論値と実験値

第 5 章

表 5. 2. 1 実験条件および実験結果

表 5. 6. 1 アスペクト比を変えた場合の実験条件と実験結果

表 5. 6. 2 アスペクト比 λ の違いに対する各係数値の違い

第 6 章

表 6. 2. 1 扶壁付き衝立平板の水理実験の実験条件と結果

第 7 章

表 7. 1. 1 調査項目

表 7. 1. 2 観測期間中の最大流速

表 7. 1. 3 測定内容

表 7. 1. 4 追跡調査期間中の最大流速

表 7. 1. 5 Z 点における流速の調和解析結果

表 7. 1. 6 移動式流速測定結果

表 7. 2. 1 事前調査と効果調査項目

表 7. 2. 2 主な測定機器の諸元・仕様

Study on Artificial Upwelling due to the Spin down
of Separated Vortices.

-The Development of an Upwelling Generating Structure for Fisheries-

Upwelling areas of abyssal circulation due to heat and salt convection, upwelling areas caused by a compensation flow of Ekman transport due to wind, and upwelling areas due to the wake of an island, cape or complex sea bed (this upwelling is called "upwelling based on landform") have a large productive capacity for organisms, and is largely concerned for a buffer of the global environmental change because of its contribution to the vertical circulation of heat or matter.

In recent years, it has become increasingly popular to develop an obstacle for generating an upwelling to make this natural function artificially. This study has researched as a series of development and research of a technique to create fishing grounds to generate an artifi-

cial upwelling, to assist with the recovery and creation technique of the environment of ecosystems at the same time.

In the first chapter, conventional research and the problem points are discussed. First, a wind-driven upwelling is introduced as a research result of oceanographers. This upwelling is generated as a compensation flow due to offshore Ekman transport when winds along the left of a coast blow for a long time because Ekman transport should move the water mass to the right of the wind in the northern hemisphere. The examples of the most famous upwelling areas in the world are introduced.

Secondly, the areas generating an upwelling based on landforms are introduced. Takahashi et al. have observed an upwelling as the state of vortices generated in the wake area of the IZU- OSHIMA island complex and the increase of chlorophyll-a (an indicator of phytoplankton) in this area. Also the upwellings observed in the area of Kokusho-Sone off Kagoshima Prefecture, Shiomaki-sho off Yamaguchi Prefecture and an artificial upwelling based on a mound created by dredging sand off Tomakomai harbour, Hokkaido Prefecture are introduced and are utilized as good fishing grounds.

There are many sorts of upwelling generating structures. A mechanism of generating an upwelling is mainly the use of the generation of a Karman vortex, a self-propulsive force due to a vortex pair with opposite circulation, a property of vortex tube in wake of an underwater structure, and an application of spray. In these studies upwellings have

been observed and quantified in a visualized experiment with a hydraulic model under the same horizontal and vertical scales. As the scale is very small in any experiments, an estimation of the similarity to a prototype, especially the viscosity has been needed.

In the second chapter, the progress of this study is discussed with the passage of time. This study had been started when the investigation and research of Shiomaki-sho reef off Yamaguchi Prefecture, in the Japan sea, was carried out as the project research for controlling the sea by the Science and Technology Agency in 1978. Shiomaki-sho reef has twin peaks 4 km apart and a vertical direction to the current direction. Behind this reef a strong upwelling is generated. This phenomena was analyzed as the upwelling due to a vortex pair with the opposite circulation that have an axis to a flow axis made by a pressure difference between a strong current in the peak interval and a stagnation area behind the reef.

This research has been examined by a hydraulic model experiment and been continued as visualized experiments to develop a more effective and small structure with the opposite T type, opposite Y type, I type, mound type, etc. The experiments have been done under 2-dimensions structure set widely on the bed in the channel. 3-dimensions that are set it on a part of bed in the channel, and under setting 2 structures parallel on the bed. As a result, it was observed that the most effective structure for producing an upwelling was to set 2 opposite T

type structures parallelly. Also experiments on separated flat vortices (Z axis vortices) have been done for investigating the basic character of vortex tubes, because vortex tubes can be used to observe these phenomena. And it could be observed that the upwelling due to the sucking up of bottom water into vortex tubes from bottom boundary generate under spin down of separated vortices.

In the third chapter, a similarity law of vortex motion, especially the viscosity effect is considered. In oceanography, regular vortex under an approximation of geostrophic current can ignore the viscosity and only deal with the bottom boundary layer on the bottom. The flow in the boundary layer can be solved by a perturbation method. This flow has a vertical component of direction, suck up bottom water into the vortex, and the vortex diameter is increased by this solution. It is important to generate the spin down of the vortex in an inviscid fluid. The famous theorem, "Helmholtz's theorem on vortex", on the conservation of vortex that a vortex is hard to generate and vanish indicates to be conserved a circulation on angular momentum of a vortex in fluid. This indicates that the fluid around separated vortices in this study can be dealt with as inviscid fluid. The vortex in the inertia sub-range can be dealt with as an inviscid fluid on an irregular vortex. Energy spectrum of this vortices can be shown as Kolmogorov's $-5/3$ th power theory. This above matter is examined by theoretical and experimental methods in the following chapters.

In the fourth chapter, the motion of vortex tubes generated in the downstream side of a vertical plate termed an artificial cape is shown and quantified by an analysis as follows.

- ① A vortex generated in the boundary layer of a vertical plate(cape).
- ② The vortex after separation is conserved an angular momentum (circulation).
- ③ The theoretical solution can be obtained under conditions which ignore the vorticity in flow (inviscid flow) to one in the boundary layer or the one of separated vortices as follows.
- ④ The strength of circulation Γ ,space scale a (vortex radius), and a time scale T (generation period) on the separated vortex generated by a vertical plate (cape) can be solved theoretically from the boundary layer developed along the plate and verified by experimental results.
- ⑤ The separated vortex generated by ④ may be spin down increasing the vortex diameter under flowing down. When the rotation energy of the separated vortex is calculated under the conservation of angular momentum of vortex, surplus energy may be achieved. This energy can be used to suck up bottom water into a vortex as an upwelling. This theory can lead to a theoretical formula, compared, and verified the solutions with the experiment on upwelling discharge by sucking up.
- ⑥ Though the theoretical formulae in ④ and ⑤ do not involve an experimental coefficient, it was satisfied with the value of experi-

ments. The conditions in ①, ②, and ③ can be regarded as the theory.

In the fifth chapter, an upwelling generated by a wall placed on the sea bottom is examined. The generation mechanism of an upwelling can be studied from a visualized experiment in steady flow as follows.

① A wake with a closed surface of a wall is covered due to vortex tubes generated from edges of the wall. When those vortex tubes are growing up under flowing down, vortex tubes suck out the water in the wake from the bottom boundary. At this time, the pressure in the wake is dropping. The energy of dropped pressure accumulates in the closed wake. When this energy reaches the limit of pressure dropped, the closed wake is broken. The energy in the wake is released impulsively and the upwelling is generated at the same time. In this case of parallel walls, the upwelling is generated efficiently because the flow direction is corrected upward due to the wall of being set on the downstream side.

② The phenomena of ① is theorised. The pressure drop head Δh_p in the wake behind the wall is shown from a characteristics of vortex tubes examined in the fourth chapter. When this value can be adopted as a parameter, the height of the upwelling H , upwelling volume V_u is shown. On the other hand, an equation to find the time T (intermittently upwelling generation period) required to reach the limit of a pressure head loss could be led from the change of a wake volume V and the velocity sucking out of the wake.

The above equations are compared with the solutions from values of the experiment and ascertained by adjustment of the theory. Furthermore, the practical equations are rearranged from determining the experiment coefficient due to the experiments.

- ③ Analyses of the energy spectrum were performed from the velocity at the time of the intermittently upwelling was generated. It was ascertained that a gradient of the energy spectrum vs the frequency is nearly $-5/3$ th power. This gradient indicates a turbulent flow within the inertia sub-range at the time upwelling generation. It can be considered that skeleton structure of upwelling is shown as an inviscid flow and then leveled with peripheral water due to the viscosity.
- ④ When the aspect ratio of height to width of the wall is changed due to the various experiments, the wall of the aspect ratio 2 generated the largest volume of upwelling.

In the sixth chapter, the experimental results of structural reinforcement due to installed counterforts in both side of the wall is discussed. The experimental results are compared with the theoretical solutions in the fifth chapter and can be expressed due to a few transformations of the equation. The practical equation on intermittently the period of the upwelling, the height of the upwelling, the volume of the upwelling, the averaged upwelling velocity could be achieved and, compared with the experimental values, and found the satisfactory results.

In the seventh chapter, the experiment in site under setting upwelling generation structure with the counterforts developed in the sixth chapter is discussed. This investigation can be used to start to be adopted as a new fishing ground creation technology of the Fisheries Agency. This project was carried out as a counterplan to the syndrome of vanishing seaweed called " ISO-YAKE " off Imabetu, Aomori Prefecture and as a pilot enterprise of upwelling for a fishing ground creation off Hiburi-shima island, Ehime Prefecture. It was found that the excellent period of the energy spectrum was in accordance with generation period of upwelling due to this theory and the energy spectrum distribution in upwelling turbulent area was shown as vortices in inertia sub-range.

Now, upwelling generation structures are aimed as the new technology for the creation of wider fishing ground in fisheries. It is expected to be useful for the propagation of marine resources and stable production of fisheries based on this study.

資料編

資料1. 人工岬後流域における染料の濃度変化（実験No. は表4.2.1参照）

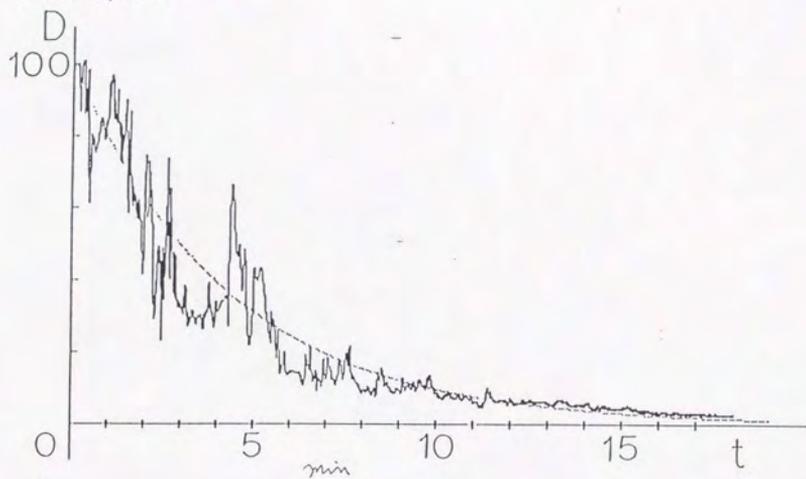
資料2. 人工岬後流域における剥離渦の時間変化

資料1. 人工岬後流域における染料の濃度変化：

(実験No. 表4.2.1参照)

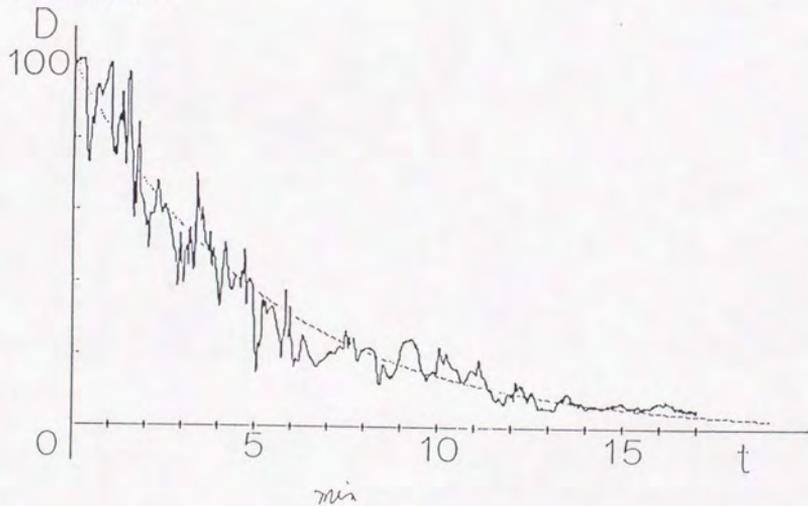
CASE 1

$$Y=100 \cdot \exp(Q \cdot T)$$



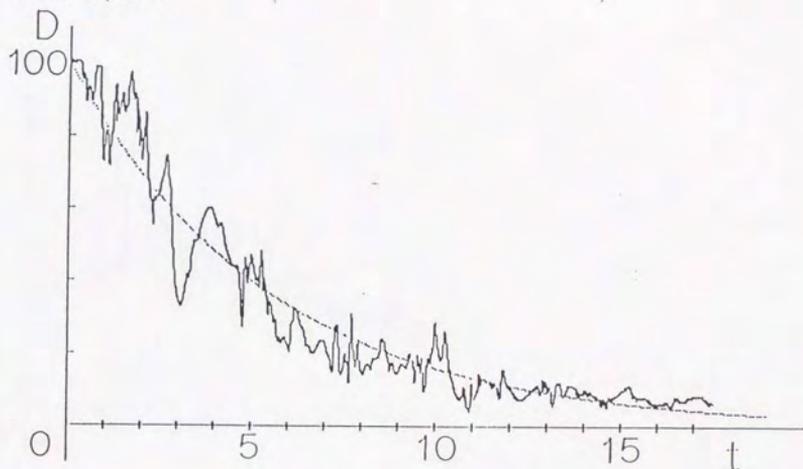
CASE 2

$$Y=100 \cdot \exp(Q \cdot T)$$



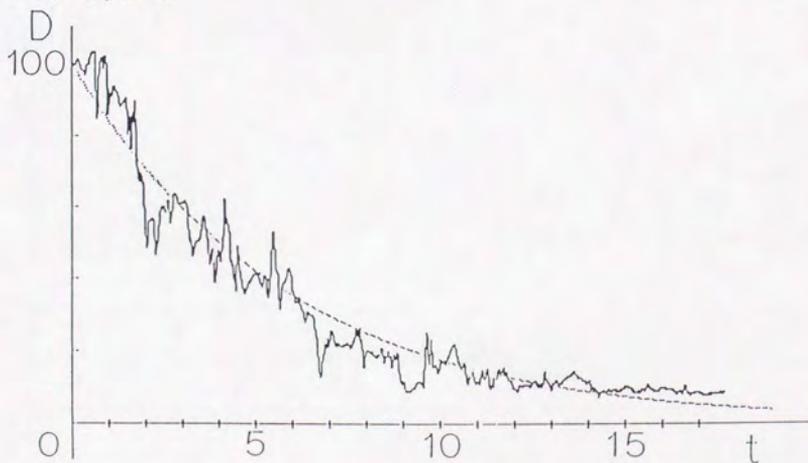
CASE 3

$$Y=100 \cdot \exp(Q \cdot T)$$

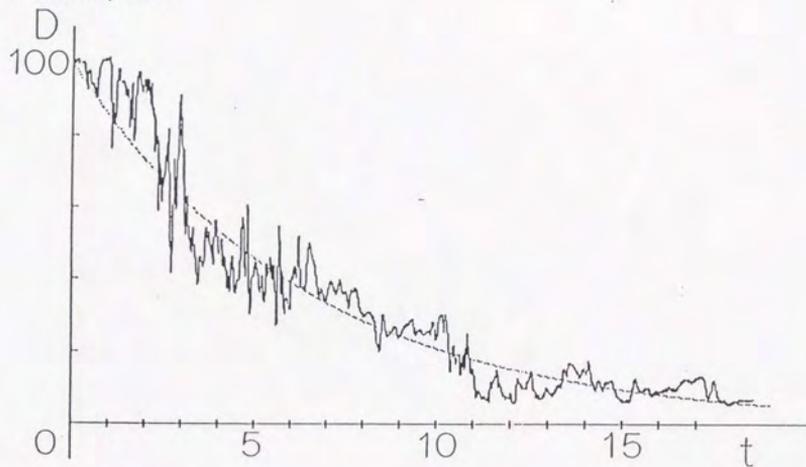


CASE 4

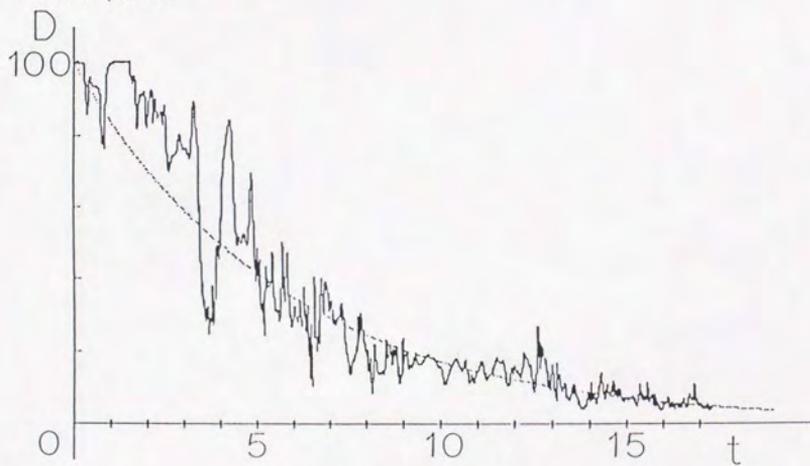
$$Y=100 \cdot \exp(Q \cdot T)$$



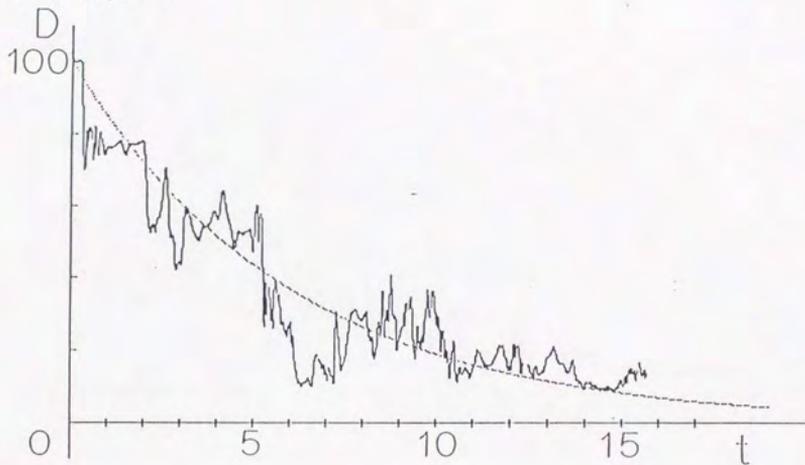
CASE 5
 $Y=100 \cdot \exp(Q \cdot T)$



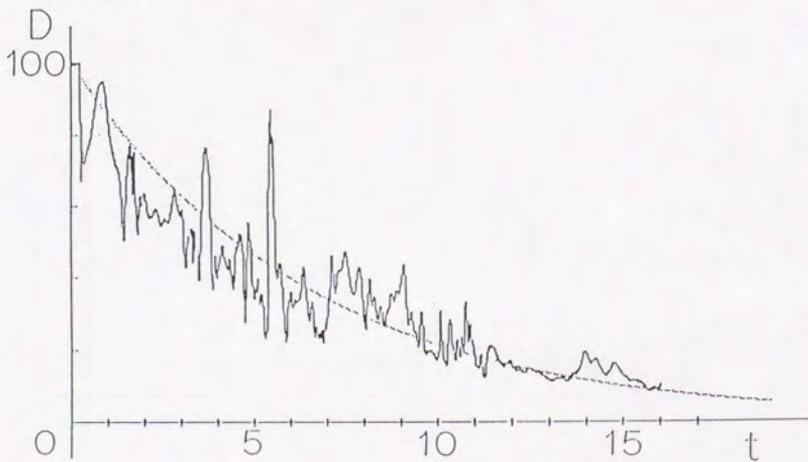
CASE 6
 $Y=100 \cdot \exp(Q \cdot T)$



CASE 7
 $Y=100 \cdot \exp(Q \cdot T)$

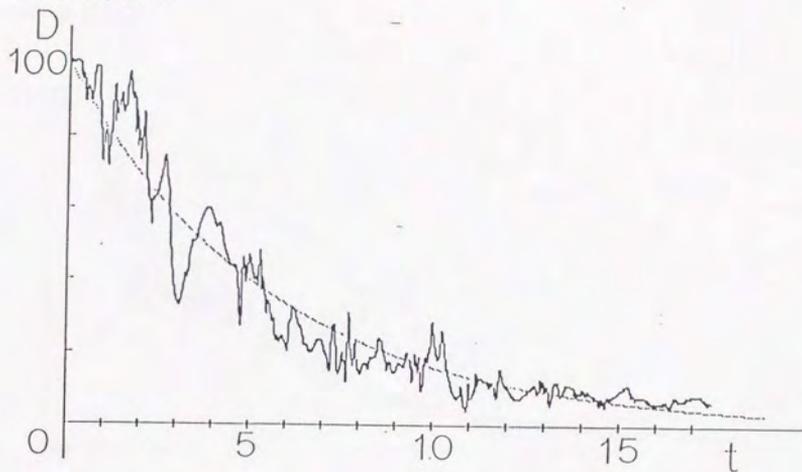


CASE 8
 $Y=100 \cdot \exp(Q \cdot T)$



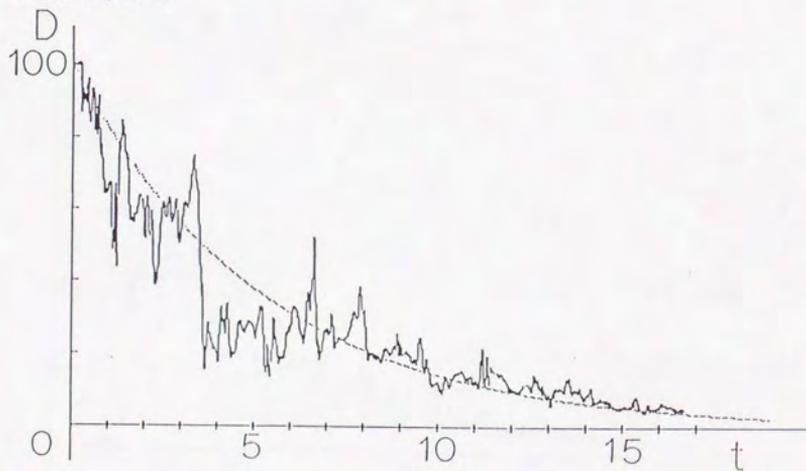
CASE 9

$$Y=100 \cdot \exp(Q \cdot T)$$

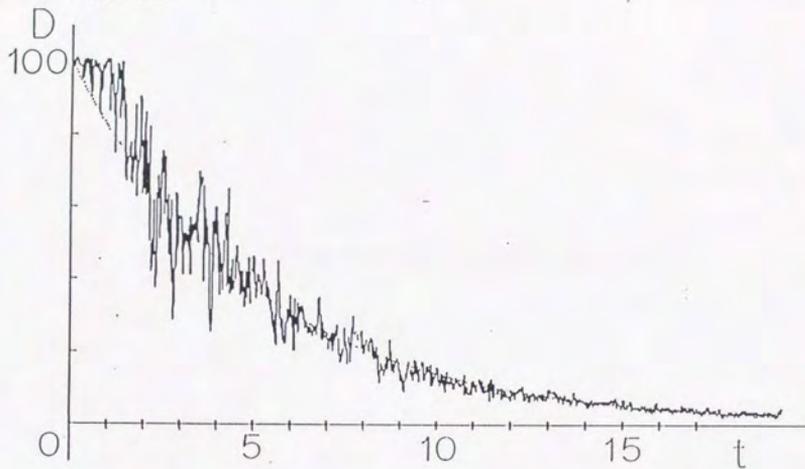


CASE 10

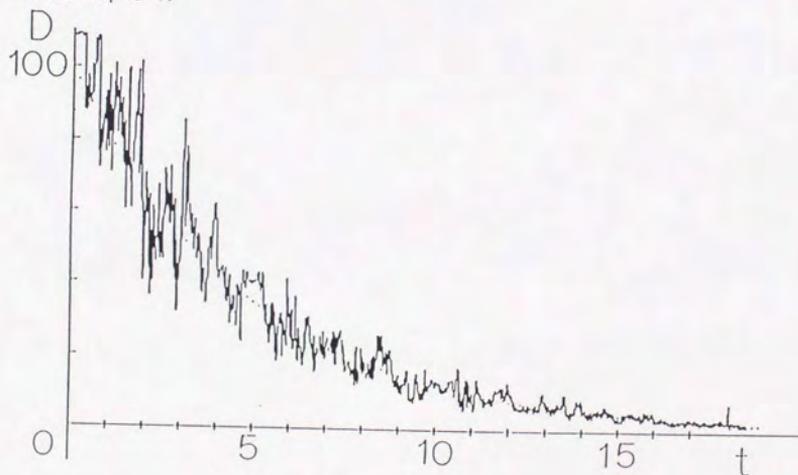
$$Y=100 \cdot \exp(Q \cdot T)$$



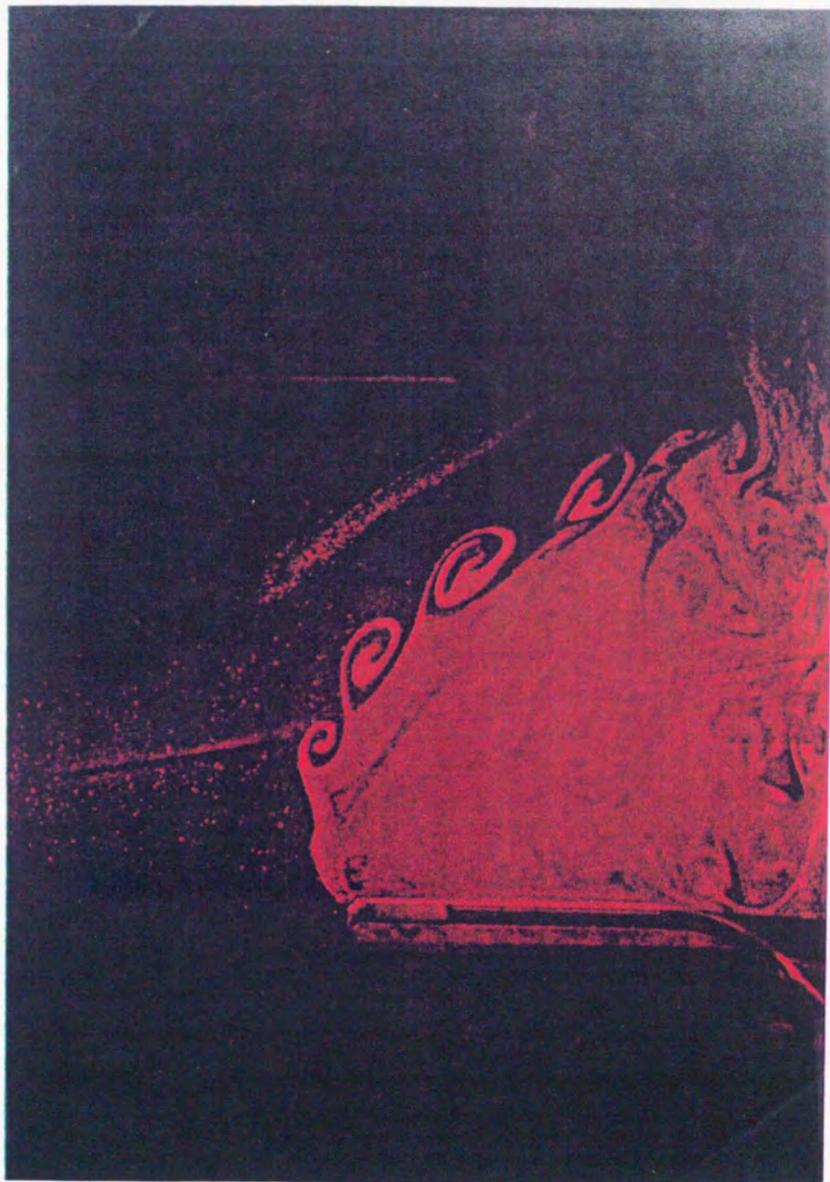
CASE 11
 $Y=100 \cdot \exp(Q \cdot T)$



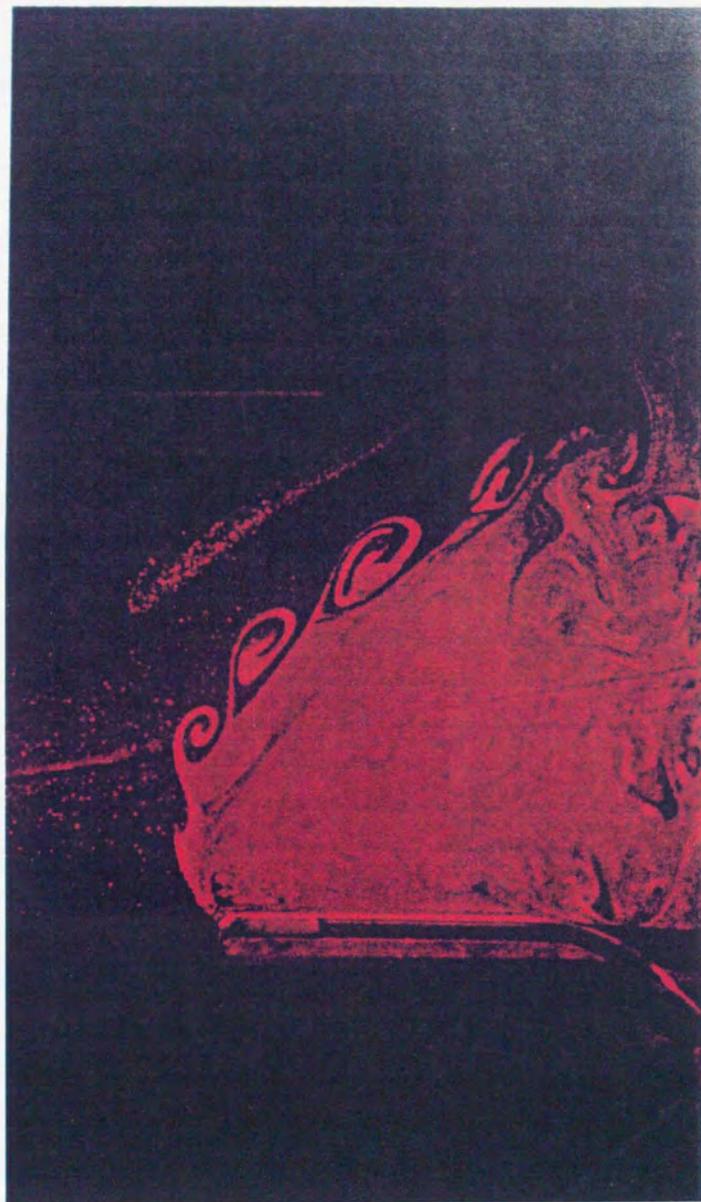
CASE 12
 $Y=100 \cdot \exp(Q \cdot T)$



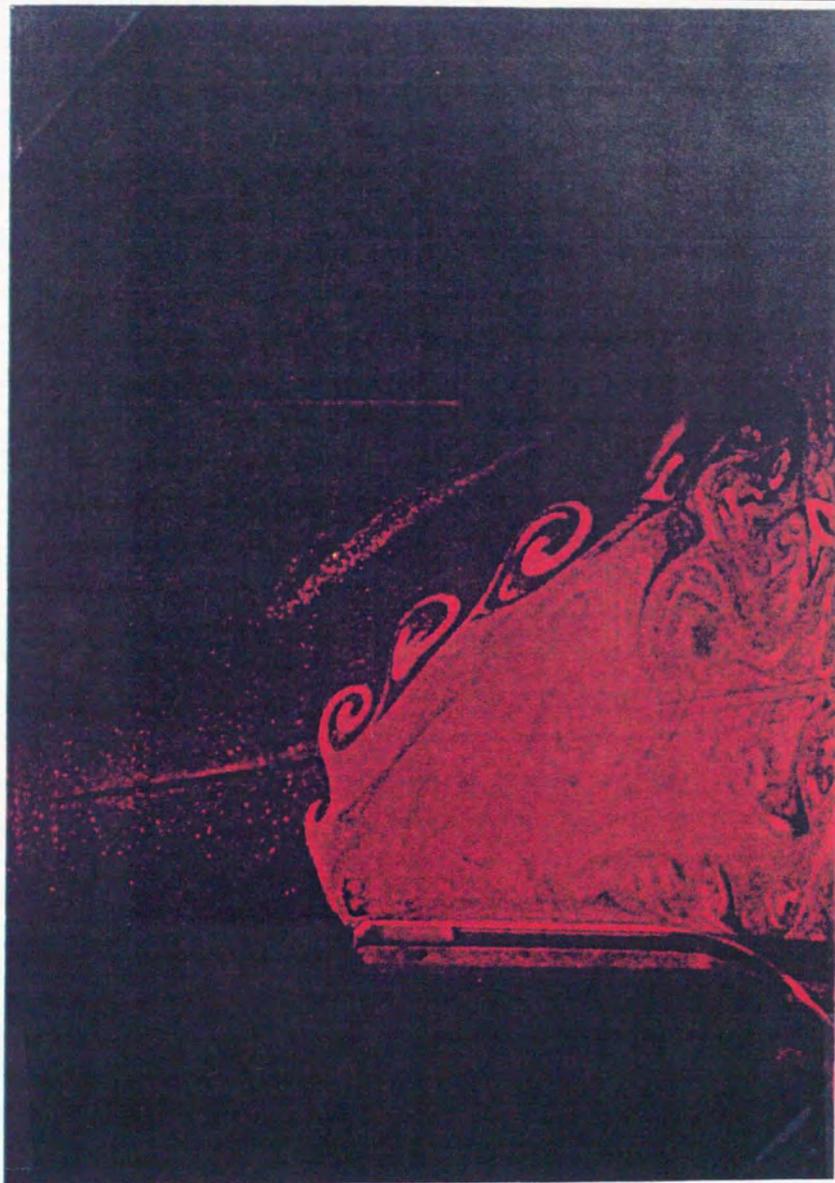
資料2. 人工岬後流域における剥離渦の時間変化



時間 $t = 0 \text{ sec}$



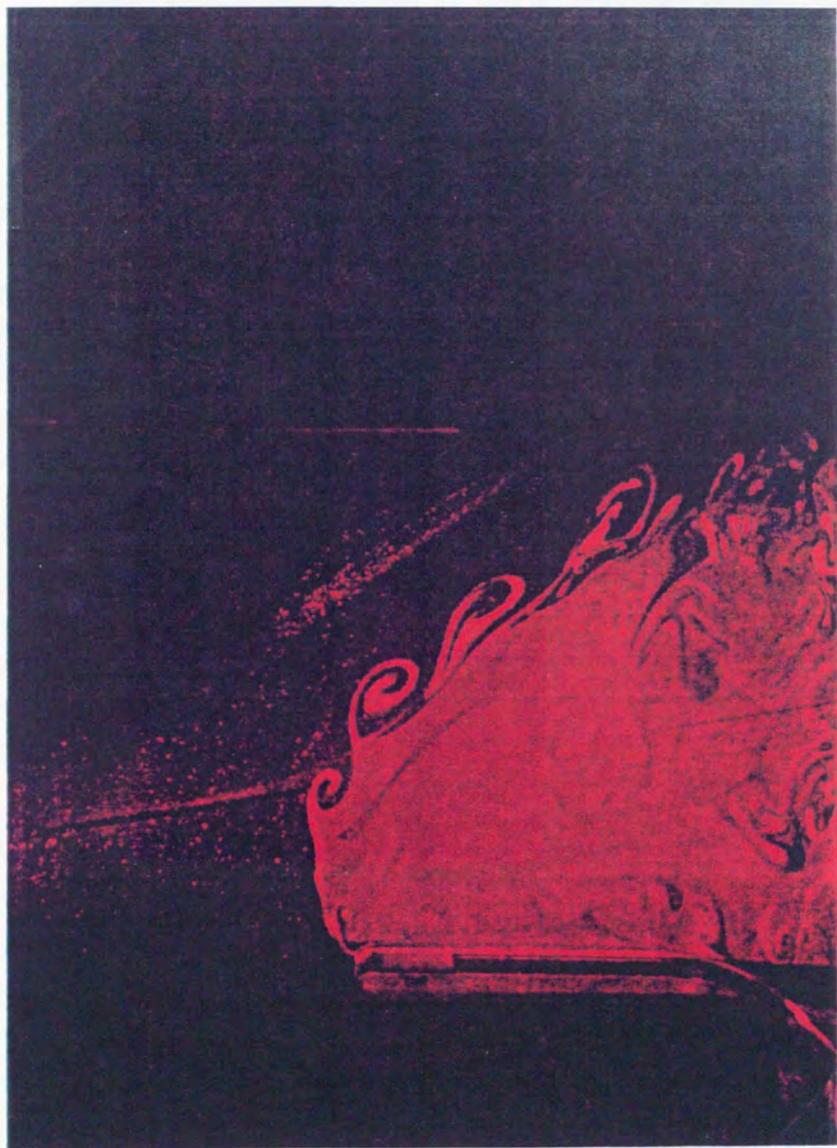
時間 $t = 1\text{sec}$

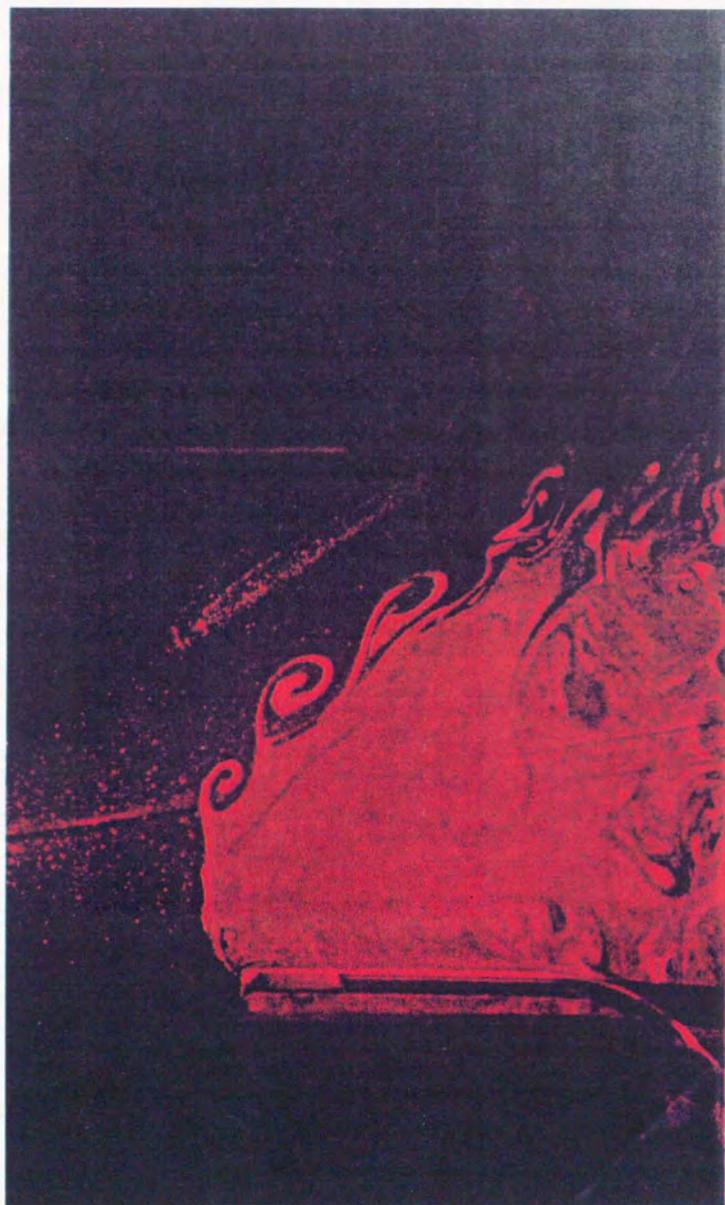


時間 $t = 2\text{sec}$



時間 $t = 3\text{sec}$





時間 $t = 5\text{sec}$

謝 辞

本研究は、筆者が東京水産大学大学院修士課程の中で環境流影に関する研究を始めたことが発端である。環境流影とは、表底層水の鉛直混合によって新たな水塊が発生し、次の混合を受けるまで継続する。このため速度場の流影と区別してこの語を用いたものである。

当時は高度成長時代のつけでもあり、その終焉に起こった公害問題に多くの大学で環境工学が創設され、さらにいわゆる200海里問題の浮上と、沖縄海洋博に代表される海洋開発ブームが起こり海洋への国民的関心が高まった時でもあった。

このような中で水産庁の沿岸漁場整備開発事業が正にスタートする時でもあった。海中に生態環境を創造するという事業を国家が行うことはわが国が初めてである。この事業の先導的立場におられ、当時水産工学研究所水産土木工学部長で(その後同所所長、東水大教授を経て現在福井県立大学生物資源学部教授)研究の第一線に立たれていた中村充博士に薫陶を受ける機会に恵まれた。

本研究は、この生態環境工学という新しい分野を切り開く先生の姿に啓発されたものであり、会社の中でその必要性を説き、社内研究、現地実験を進める一方、理論化について終始各方面の先生からご教示を賜りながら進めたものである。

本研究をまとめるに当たり、終始熱心なご指導、討論ならびにご教示を賜った東京大学農学部教授中村良太博士、またご助言をいただいた東京大学農学部助教授島田正志博士、農学部久保成隆博士に深謝申し上げます。また、東京大学工学部教授玉井信行博士には貴重なご示唆をいただきました。ここに、深謝申し上げます。さらに、各章の実験、まとめに際し、終始有益なご助言とご指導を賜りました中村充先生ならびに東京水産大学海洋生産学科助教授系列長敬博士に感謝申し上げます。

本研究の多くは、五洋建設株式会社で在職中に行いました。技術研究所所長はじめ職員の方々には多くのご協力・ご支援をいただきました。殊に森井伸正氏、近藤浩右氏、今村均氏には絶大なるご協力をいただきました。また、現地調査にあたり、当時水産工学研究所室長(現同所所長)上北征男博士には、ご支援ならびに励ましをいただきました。青森県今別地区の調査は、(社)全国沿岸漁業振興開発協会より、また愛媛県日振島海域の調査は、愛媛県水産局よりご協力を賜りました。ここに記して謝意を表する次第です。

