

増養殖場造成における水工学的諸問題

上 北 征 男

1. まえがき

沿岸域は、地形の複雑さと共に栄養塩の豊富な海域が形成されているため、高級有用魚介類の生息、再生産の場として重要な場である。

日本の漁業は、戦後沖合から遠洋へと漁業資源を求め漁場の開発を行ない、日本人の蛋白摂取量の50%を占める動物性蛋白を供給してきた。しかるに、近年200海浬経済水域の定着化に伴い、その動物性蛋白である漁業資源の確保が困難になりつつある。一方、日本の200海浬経済水域は、国土面積の約12倍、世界各国に比較しても第4位の広大な面積を有し、この水域での漁業資源の安定的確保の技術的可能性の追求は、動物性蛋白の確保また漁業の省エネ化を推進する上で早急に解決しなければならない課題である。このような背景の中、日本の水産は、資源培養・管理型漁業に転向するための研究が進められている。

資源培養型漁業は、栽培漁業のように積極的に資源をふやそうとする方法で、図1に示すように、① 種苗生産技術、② 生物環境評価技術および、③ 環境制御技術の3本の柱で構成される。また一方、資源管理型漁業は、網目規制や選択漁法などの漁獲制限および漁獲禁止水域の設定、漁場の交番使用などによる資源保護を目指すもので、前記の積極的なもの

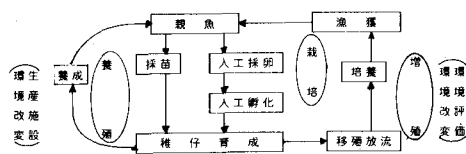


圖 1 栽培漁業

栽培漁業技術における種苗生産技術は、温度刺激、塩分刺激、ホルモン刺激などの人工的産卵および孵化の促進、産卵後の稚仔生育に必要な珪藻、ワムシなどの飼料の増産技術などの開発を行ない健全な種苗を確保する技術である。また生物環境評価技術は、水産生物の生育のための好適な環境条件を明らかにすることを目的とし、水産と土木を結びつけるジョイントとなる重要な部門で、実験計画法、確立過程、多変量解析等の統計的手法を用いた最適環境の分析・評価手法、魚類の流れ・波などに対する走性、耐流性など物理的環境に対する水産生物の行動生態などが含まれる。環境制御技術は、大きく環境水理、環境改変技術および漁場施設に分けられる。環境水理は、水産環境としての水分子など海水の溶存物質そのものの挙動を解明する海水の交流・交換、密度流、内部波（内部潮汐を含む）、温排水、溶存懸濁水など水質に関する水理である。環境改変技術は、水産生物の最適条件がわかれば、そのような環境に改変し、造成する技術である。代表的事例を次に挙げる。

湾口改良，新水道開削：この工法は，閉鎖性湾の海水交流・交換を増大を目的とする。湾口が小さ過ぎたり，流水抵抗が大きい場合には，潮汐流による湾口からの流出入量が小となる。また湾口が大き過ぎる場合は流速が小となり，湾奥に水が滞流する。このようなとき，湾口を適正な大きさに改良，あるいは湾奥に新しく通じる水道を設けて湾内水と外海水との交流を大にする。

潮流制御：この工法は，湾内の海水の実質交換量を増大する。また浮遊幼生の移動制御を目的とする。往復潮流が卓越する場合の一方向流成分を助長するために一方に流れ易く，逆方向に流れにくいような導流堤を配置するもので，流速が早い場合に効果的である。導流堤の水質改善効果は，順逆流の流量係数差によって評価される。

作れい工（ミオ筋工）：この工法は，干潟部，極浅海部の海水交流・交換の増大および底着性魚介類の幼稚仔の沈着・生育の好適な場の造成のための底質改良を目的とする。干潟域にミオを掘削することによってミオ部の流速を増大し，平面的な流れ分布を破壊すると共に，沖合水を奥部へ，また奥部の水を沖合へすみやかに流動させ，干潟域の海水交換を増大する（干潟作れい工）。また密度成層をなしている湾に作れいし，重い外海水をミオ沿いに導水，底層水を通じて湾の海水交換を助長する（密度流作れい工）。砂泥干潟にミオを掘削して流速の局所的増大を図り，泥分の掃流を促進して底質を改良する（底質改良）。

波による海水導入：この工法は，平磯岩盤に作れいし，波エネルギーを利用して海水の流動環境を改善する。藻場造成，増殖場，保育場に利用される。これは，V字型に波を収束し，越波またはラジエーションストレスで水位上昇を起させ，ミオ部末端出口との水位差を与えてミオ内に所定の流速，流量を生起させる。

循環流発生工：この工法は，流れ，波の場に設置して循環流を発生し，一般流から独立した水塊をつくり，幼生，流れ藻，栄養塩等懸濁物質の拡散を抑える（波浪潜堤）。また海底堤防の流れに直角に設置し，その背後に出来る鉛直循環流の拡散抑止機能を利用する（潮流潜堤）。これらはいずれも魚介類の幼稚仔保育場，藻場造成に利用される。特に波浪潜堤は，潜堤上での碎波による波エネルギーを流れに変えることを利用し，潜堤上で岸向きに，潜堤両サイドの深場から沖向きの流れを発生させて水平循環流をつくる。

付着基質工：この工法は，アワビ・サザエ・ウニ・ナマコ等の魚介類の稚仔の着底場，育生場造成およびコンブ・ワカメ等海藻の増殖，飼料藻場造成用付着基質として設置される。アワビ・サザエ・ナマコ等の増殖には，潜堤と組み合わせて設計する事が多く，離岸潜堤の岸側に投石あるいはコンクリートブロック等の付着基質を設け波浪による基質の安定を図ると共に潜堤周辺の循環流形成による浮遊幼生の着底を促進する。コンブ・ワカメ等の増殖・飼料藻場造成には，砂浜の漂砂帯などに付着基質としてコンクリートブロック，ネトロンパイプ等を設置する。また波のはげしい転石帯などで付着基質を補充し，離岸堤による波浪制御を行って付着基質の安定を図り藻場造成を行う。

離岸堤：この工法は，海岸侵蝕防止などに一般に使用されているが水産の立場から前述の藻場造成の

ための付着基質の安定、稚貝等の打ち上げ防止および突堤と組み合わせた T 型堤による人工ポケットビーチの造成に用いられ、二枚貝、ヒラメ等の底棲魚類の生息のための底質制御、稚仔の拡散制御に用いられる。人工ポケットビーチの形成は従来の海岸保全の立場とは異なり離岸堤間隔を大とする必要があり対象生物種の要求水深の関係から検討が必要となる。

動力利用工法：この工法には、エアレーション、底層悪水排除および底層導入などがある。一般に内湾漁場の底面には、養殖残餌、糞、プランクトン遺骸などが沈積し、海水中の溶存酸素によって酸化される。海水中の溶存酸素は、大気中からの溶入、植物プランクトンによる光合成により表層・上層で生産され鉛直混合によって底層に補給される。しかるに密度成層などが発達すると鉛直輸送がなくなり、また海水交換も一般には底層まで及ばないため底層に無酸素水塊が形成される。これを防止するための工法として利用される。エアレーションは、中層または底層から気泡幕を放出し、成層を破壊すると共に底層水を表層まで湧昇させ溶存酸素の増大を図る。また潮汐流との相乗作用によって海水交換を増大する。底層の悪水排除および底層への海水導入は、いづれも無酸素水塊として形成されつつある底層水をポンプによって抜きとるか、もしくは溶存酸素の豊富な外海水を底層に導入して溶存酸素を補給する方法で潮汐流などの自然エネルギーが利用出来ない場合に用いられる。海の中での底層悪化の速度は、急激に生じるものではなく数十日のオーダーで水質成層が形成されるため導入すべき水量（ポンプ容量など）も水質形成を短時日に解消するものでなく、底質悪化速度に応じて改善が行なわれる程度とする必要がある。

その他、岬、礁などの周辺での海洋観測結果から海底堤防による地形に起因した湧昇流の発生を助長する構造物の開発研究、内部波、地形波などが漁場形成に及ぼす影響について調査研究が進められている。

漁場施設は、増養殖漁場の施設、基盤に関する技術で、水産生物の養殖を対象にイケス、筏式垂下施設、延縄施設、養殖池などの生産施設、突堤、離岸堤、浮消波工など養殖場造成のための基幹となる施設および人工魚礁（浮魚礁を含む）、築磯、人工干潟、人工藻場（海中林造成のための延縄施設を含む）、中間育成場、魚道など主として水産生物増殖のための基幹となる施設がある。

2. 水産生物と海的环境

海は長期的には拡散系にあり、水塊が混じり合いながら新しい水塊を生成している。一方水産生物のほとんどは、1腹から数十万から億単位の卵を産卵し、発生初期にはほとんど浮遊期を過ごし稚仔となり親に成長するが生長途中での死亡、食害による減耗および漁獲にも十分に種を保存している。このことは海の流動拡散に適応した生態といえ、特に発生初期に浮遊期を持つことは海の拡散特性に適応し、海的环境の多様性に依存しているためであろう。このような水産生物の特性を利用して計画生産を図るためには、拡散を抑制し、好適環境を持つ造成場に誘導・定着させることにより生残量を一桁またはそれ以上に上げることは可能である。このことは、卓越年級群の存在からも裏付けられる。一概に生残・生息に好適な場といっても生物種により異なり、魚と環境との対応を捉えることが重要となる。1～2の

事例を示す。

＜クルマエビ放流環境の分析＞

クルマエビは、種苗生産後体長 10 mm 程度迄はタンクの中で立体的に培養されるがそれ以上になると底棲生活に移行すると共に飼料となる生物も変化する。そこで 10 mm 程度で自然の海の中に放流し、初期減耗を少なくする技術として人工干潟が考えられた。人工干潟の造成環境は、天然干潟への放流時の生残の良否環境の分析および人為的に条件を与えられた人工干潟の放流稚仔の生残と環境因子から分析される。

目的変数 (y) に生残率をとり、 y の増大への環境因子 (x_i) の寄与率を評価する。この評価手法として重回帰分析、主成分分析、クラスター分析などの統計的手法が用いられるが、ここで問題となるのは説明変数となる環境因子 (x_i) の選び方で、これには生物学的予見が必要である。この一つの方法として生物研究者を含めて y と x_i との対応を判断するために、目的変数 y の大中小区分に対応する環境因子 x_i の大中小区分を作成し、主要因子を抽出する (要因抽出法)。この方法は多変量解析の一手法であるが、むしろ統計処理をする前の前処理にかかわる手法であり、この方法で適正な因子 x_i が抽出されて初めて重回帰分析となり、主成分分析法が有効な手段となる。

クルマエビの放流後の生残と主な環境因子について要因抽出のため表にしたのが表 1 である。表 1 から稚仔の歩留りの㊤区画と小の区画の環境因子を対比すると、稚仔の歩留りと正の相関があるのは浸透量と地盤高であり負の相関にあるのは、COD、全硫化物、0.074 mm 以下の浮遊砂量である。

詳しく比較すると前述の条件を満足しているが稚仔の歩留りが㊤となったり小となったりする区画がある。2-1, 1-2 区画で、2-1 区画は地盤高が中段 (平均潮位) であるにもかかわらず㊤となっている。このことは中段の他の 2-2, 2-3, 2-4 および㊤の他の区と比較すると、0.074 mm 以下の浮遊砂 (浮泥) 量が小でなければならず、また浸透量が大きくあることが必要である。また 1-2 は、地盤高の条件は満足しているが全硫化物が多いこと、1 日の地盤変動量が大きかったために㊤とならなかったものと推定される。このような考察の結果から㊤となるための条件をさらに考察すると、放流直後の生残に係する好適な環境は、① 0.074 mm 以下の浮泥量が 5 % 以下 (小)、② 地盤高さは平均潮位以上 (中) で小潮平均満潮位 以下、③ 干潮時の浸透量が大きく、浸出は不可、④ 全硫化物は 0.04 mg/g 以下 (小)、⑤ COD は 0.75 mg/g 以下 (小)、⑥ 珪藻細胞数は、 $300 \times 10^3 / 1 \text{ cm} (12.55 \text{ cc})$ 以上でこれ以上はあまり関係ない、⑦ 1 日間の地盤変動量は 15 mm 以上 (大) であってはならないなどが判る。

放流後 2 週間目の生残数と環境因子の関係は、表 1 と同じような表を用いて求められ、稚エビの生息数の大なる区画と小なる区画の特性を対比しながら考察し、大となるための条件をみると、① 0.074 mm 以下の浮遊砂量は小、② 地盤高は平均潮位以上、③ 間隙率は 35 % 以上、④ COD は 2.0 mg/g 以下、⑤ 1 ヶ月の地盤変動量は 70 mm 以下、⑥ 全硫化物は 0.04 mg/g 以下となる。

放流 2 日後と 2 週間後を比較すると、地盤高、0.074 mm 以下の浮遊砂量、全硫化物は同じ条件、

表1 稚エビ播殖歩留りと環境因子のランキング（人工干潟，放流1日後，昭和47年度）

No.	稚えびの生息数	放流1〜2日間	浸透量	1ヶ月間の地盤変動量	1日間の地盤変動量	付着珪藻細胞数	有機炭素	酸化還元電位O・R・P	C・O・D	全硫化物	全浮遊砂量	0.074以下の浮遊砂量	中央粒径	ふるい分け係数	間隙率	地盤高
1-3	⊗(⊗)	中	小	小	小	小	小	大	小	小	大	小	大	中	大	大
4	⊗(⊗)	大	中	小	小	小	小	大	小	小	大	小	大	中	大	大
2-1	⊗(⊗)	大	中	中	中	中	大	小	小	小	小	小	中	大	中	中
1-2	大(大)	大	中	大	小	小	小	大	小	中	中	小	中	小	大	大
2-2	大(中)	中	小	中	大	中	中	大	中	中	中	小	小	小	大	中
4	大(中)	中	中	小	小	中	中	中	中	中	小	大	大	中	中	中
1-1	中(小)	大	大	大	中	小	中	中	小	大	中	中	大	大	中	大
2-3	中(中)	小	小	小	大	中	中	中	中	大	中	小	大	大	大	中
3-1	中(小)	小	小	大	大	大	中	小	大	大	小	大	大	大	中	小
3-3	中(小)	小	中	中	大	大	中	小	大	中	小	大	大	中	小	小
3-2	小(小)	小	大	中	中	大	大	大	中	小	小	大	中	小	小	小
3-4	*小(小)	小	大	⊗	小	大	大	小	大	大	小	中	中	大	中	小
大	$5.0 \leq \leq 19.9$	0.12 $\leq$	70 $\leq$	15 $<$	60 $<$	4.0 $<$	375 $<$	2.0 $<$	0.075 $<$	25 $\leq$	5.0 $\leq$	0.7 $<$	2.5 $<$	40 $<$	M・S L $<$	
中	$2.0 \leq \leq 4.9$	0 $<$	60 $\geq$	7 $\leq \leq 15$	50 $\leq \leq 60$	1 $< \leq 4.0$	300 $\leq \leq 375$	0.75 $\leq \leq 2.0$	0.04 $\leq \leq 0.075$	15 $\leq \leq 25$	2.0 $\leq < 5.0$	0.6 $\leq \leq 0.7$	2.0 $\leq \leq 2.5$	35 $\leq \leq 40$	M・S L	
小	≤ 1.9			7 $>$	4.0 $<$	1.0 $\geq$	< 300	< 0.75	< 0.04	< 15	< 2.0	< 0.6	< 2.0	< 35	M・S L $<$	
特大	20.0 $\leq$				1 $< \leq 4.0$											

* () は干出時にプールへの稚エビの寄せ集め効果を考慮して，各区画全面積あたりの生息尾数に換算したときのランクで以下のようにとる。

⊗=10,000尾/区画以上，大=2,000〜10,000尾/区画，中=1,000〜2,000尾/区画，小=1,000尾/区画以下

地盤変動量が1日当たりが1ヶ月当りに変り，新しく間隙率に加わり，浸透量がなくなっている。また，CODは範囲が中以下となっている。

これらの結果から，生存密度100尾/m²，歩留り80%を満足させる主要環境因子として，干潟地盤高，底質（平均，粒径，間隙率，含泥率），COD，珪藻細胞数等があり，他に制限因子として，干潟塩素量（9%以上），全硫化物（0.04mg/g以下）などが抽出された。

<内部波と魚道形成>

隠岐の島前湾は無潮点であるにもかかわらず，湾口での上層・下層での流入出が大きいことが云われている。中村はこの現象を内部波の打ち上げによって生じていると説明している。すなわち，対島暖流が図2に示す隠岐海嶺を迂回する流速は潮汐流と合成され早くなったり遅くなったりする結果，水深150m以下に存圧する日本海固有冷水を30m程度吸い上げたり下げたりして図2右図にみられるように冷水塊の前線は陸棚に打ち上げる。図3は打ち上げ部先端を音波探知器で計測した結果で，波高数10m，波長数100m〜数100kmとスケールが大きい。このように海中の密度成層面に発生する波は内部波と云われ，潮汐に起因して生じる内部波を内部潮汐という。この現象は海の流動環境に重要な役

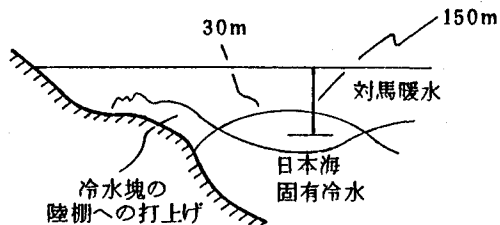
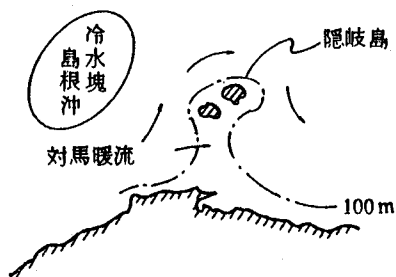


図2 対馬暖流によって発生する島根沖冷水塊の昇降とこれによって発生する内部成層面の波動

割を果している。隠岐島前湾は、図2、図4にみられるように対島暖流が島根沖冷水塊上流を流れ、その過程で発生する内部波が打ち寄せる位置にある。中村は、島前湾への内部波すなわち重い底層水の進入経路を知るために内部波の屈折図を描き、図4に示している。この図に島根県水産試験場が体長46.5cmのマダイにピンガーを取り付け、その移動経路を追いかけた位置を重ね合わせてみると図5の・印にみられるようにマダイの移動経路と屈折図とがよく一致することを明らかにしている。

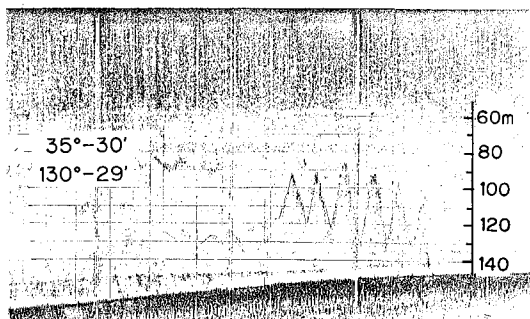


図3 冷水塊の陸棚への打上げ
(内部潮汐波前線の打上げ)

また、鳥取県水産試験場が鳥取県気高海岸で標識放流したマダイが対島暖流にのって東の方に移動し、県北から京都丹後海域で魚獲された報告をもとにマダイは40m水深を東に移動すると報告している。ところが漁師は、マダイは海岸線に直角にサシ潮に乗って沖から岸にくるのを刺網で漁獲すると云う。この直交する移動経路を解釈するために内部波の観点を持ち込み、中村は図5に示す解釈を示した。すなわち、当海域は水深50m付近から陸棚斜面となり、この水深上下附近に温度躍層を持つ。この底層の冷たい水が内部波として斜面上を遡上すれば、温度に敏感なマダイは内部波のフロントに追われて岸に向かい漁業者の主張が説明出来る。また内部波のフロントが消滅あるいは引き波となると、マダイは40m水深を中心に分散しつつ海流の向きに支配されて西から東へ移動し、水試の調査結果を裏付ける。このように内部波の概念とマダイの行動生態を考慮すると漁業者の言葉と水試の調査結果の相矛盾する事柄がうまく説明出来るとしている。

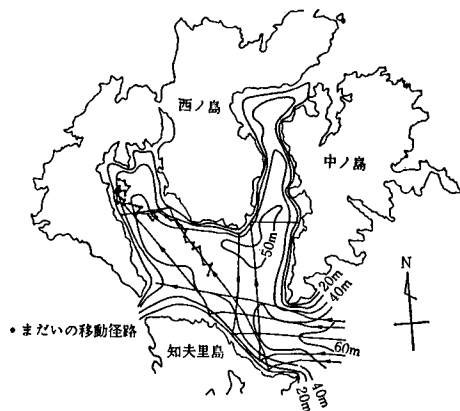


図4 内部波の屈折図とマダイの移動経路

このように、マダイが内部波のフロントに追われることがわかれば、マダイの漁場および漁場造成適地が環境の面から追求することが可能となる。中村は、以上の事柄をもとに、図6に示すように海底の丘や屋根の上、また微地形として図7に示すように内部波のフロントを擾乱させ、蛸集ダイを包み込んでしまうような複雑な礁や、凹地が造成適地として

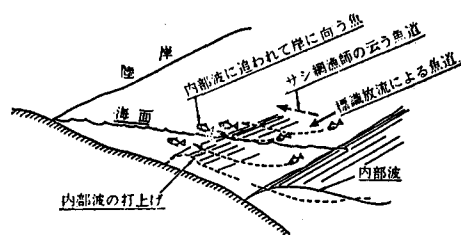


図5 内部波とマダイの魚道

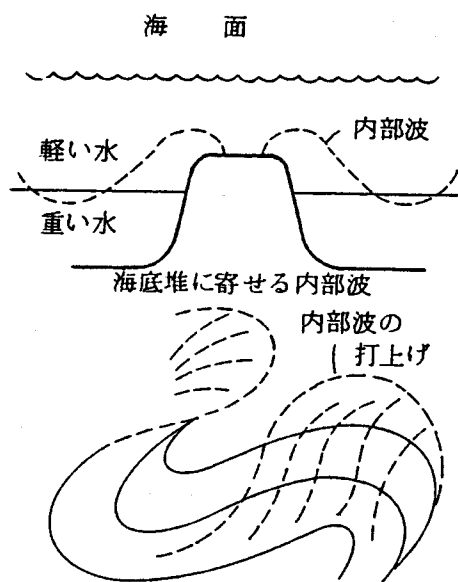


図6 内部波とマダイの漁場形成

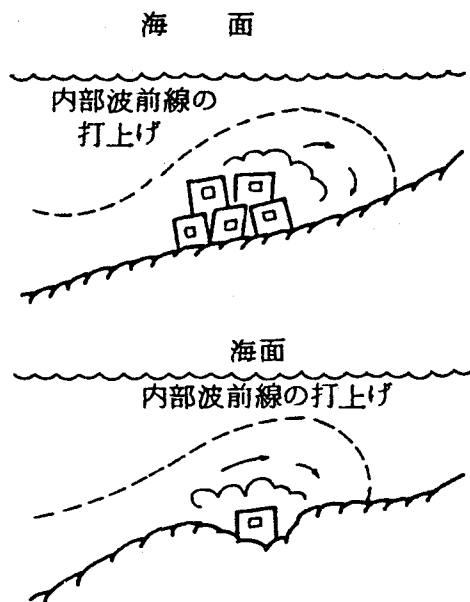


図7 タイの棲所と微地形

良いとしている。

一例をマダイの行動と内部波のフロントの挙動との対応で示したが、このように魚と環境を正しく捉えることは、漁場および漁場造成適地などの選定に非常に重要であることが分かる。

3. 海水の流動環境制御工法

漁場環境は大別して水環境と底環境に分けられる。両者は独立して環境を形成しているのではなく、海底地形や礁によって流れ環境が影響を受け、その流れ環境によって海底々質が影響を受ける。したがって漁場環境を改善するには、前述1で述べた種々の工法によって流れ環境を改善することによって底質環境を改善することになる。これらの工法は、当初養殖場の水質改善という形で研究されてきたが最近増殖場造成のための拡散抑止、底質改善などにも応用、利用開発されてきた。ここでは、水産土木技

術として当初開発されてきたものは、1974年の当夏期講習会で中村が講義されたものを参照していただくことにして、その後開発されてきたものについて略述する。

(1) 湾に河川水が流入する場合の閉鎖性湾の海水交流

閉鎖性湾の湾内に河川水が流入する場合の湾口からの海水交流量の算定法について、中村ら⁷⁾は次のように示している。

図8のように、内水面積 S 、外海との交流断面積 A を持つ湾に、流量 q_r の河川が流入する。計算の仮定として、

- ① 内水面を水平または単節セイシュとする。
- ② 内湾への流入水エネルギーは内水位および熱損として消費され反射を生じない（非共振系の仮定）。

- ③ 外海水位の変動は正弦曲線し、

$$h = \frac{\zeta}{2} \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (\zeta : \text{外海潮位差}) \tag{1}$$

で示す。
このとき、内水面と外海との流出入量 q は、(2) 式で示される。

$$q = \pm c A \sqrt{2 g |h - h'|} \tag{2}$$

ここに、 c : 交流口の流量係数、 h, h' : 外海、内湾の水位、 g : 重力の加速度、 A : 交流口の基準面積。

流量係数 c は、実用上摩擦、流入・流出の損失水頭を考慮して(3)式で示される。

$$c = \left[f_e \left(\frac{A}{A_e} \right)^2 + f_0 \left(\frac{A}{A_0} \right) + \Sigma \frac{2 g n^2 l}{R^{4/3}} \left(\frac{A}{A_l} \right)^2 \right]^{-1/2} \tag{3}$$

ここに、 f_e, f_0 : 流入、流出損失係数でほぼ0.4, 0.1をとられる。 A_e, A_0, A_l : 流入点、流出点、区間 l の通水断面積、 l : 区間長、 R : 径深、 n : manning の粗度係数。

天然の湾口での流量係数 c は調査結果から、実用上

$$c = \left[1.4 + 0.02 \frac{1}{d^{4/3}} \right]^{-1/2} \tag{4}$$

が用いられる。ここに、 l : 湾口水道の長さ、 d : 湾口水道部の平均水深。

また、内湾への流出入流量の連続方程式は、河川流量 q_r があるとして、(5) 式で示される。

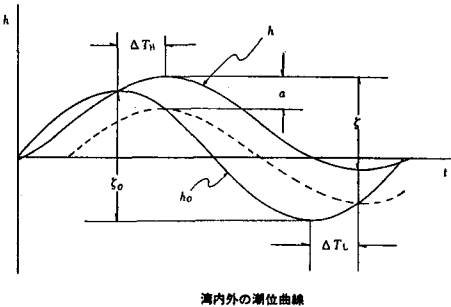
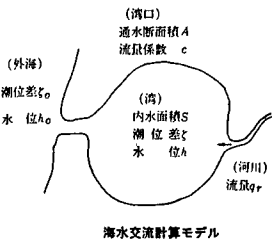


図8 計算モデル

$$S \frac{dh'}{dt} = q + q_r \quad (5)$$

①の仮定から、湾奥への伝達時間 t_l に生ずる湾口水位変化を ε とすると

$$\varepsilon = \left. \frac{dh'}{dt} \right|_{\max} t_l = \frac{\pi \zeta'}{T} t_l$$

1 干満の流入流出量 Q を、内水面積と干満差 ζ' の積で与えるための換算水面積 S を、平均内湾水面積 $\bar{S}$ を用いて定義すると

$$Q = S \zeta' = \bar{S} \zeta' - \bar{S} \varepsilon$$

よって

$$\left. \begin{aligned} S &= \bar{S} \left(1 - \frac{\pi t_l}{T} \right) \\ t_l &= l / \sqrt{g d'} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、 T : 潮汐周期、 l' : 湾口から湾奥までの距離、 d' : 湾内の平均水深。

(1)、(2) 式を (5) 式に代入し、さらに無次元量 $t_0 = t/T$, $h_0 = h'/\zeta'$ を用いて整理すると、

$$\frac{dh_0}{dt_0} = \left[\left(\frac{AC}{S} \right)^2 \frac{g T^2}{\zeta'} \right]^{1/2} \sin 2\pi t_0 - 2 h_0 \left] + \frac{q_r T}{S \zeta'} \quad (7)$$

を得る。(7) 式の厳密解を求めることは困難であるので、数値計算を行ない、図 9、図 10 に示す湾内外の潮位差比および一潮当りの海水交流量を図示している。

(2) 内部潮汐による海水交流・交換

一般に長方形に湾入した湾(図 11 参照)では湾口に節を持つ固有振動周期を持つ。このような湾の湾口に潮汐振動のような強制振動が与えられ固有周期と同調すると、湾奥で大きな振巾となる。この現象は湾内部で密度成層がある場合、その成層界面でも生じ、内部潮汐と呼ばれる(図 11 下図)。中村らは、内部潮汐の計算法を以下のように示している。

① 内部界面波の固有振動周期

湾内内部界面波の固有振動周期 T_f は、湾内で節、

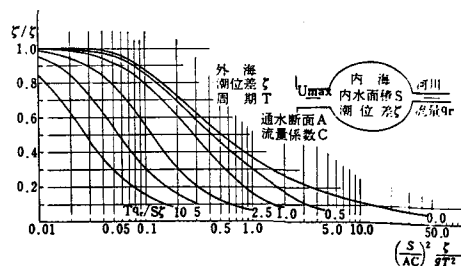


図 9 湾内外の潮位差比

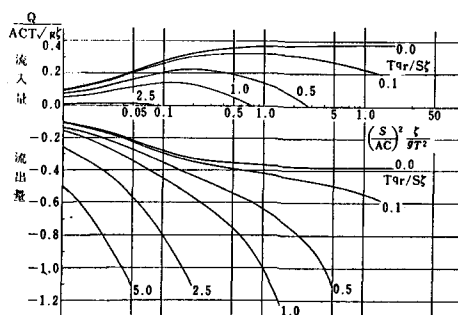


図 10 一潮当りの海水交流量

湾奥で腹となることから

$$T_f = \frac{1}{c} \cdot \frac{4a}{2m-1} \quad (8)$$

ここで、 c ：内部波の波速 ($c = \varepsilon g h_1 h_2 / (h_1 + h_2)$)、 a ：湾軸の長さ、 m ：振動の節数、 h_1, h_2 ：上層、下層の水の厚さ、 ε ：上層密度 ρ_1 と下層密度 ρ_2 差比 ($\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$)、 g ：重力の加速度。

普通、湾口にのみ節を持つ単節 ($m=1$) の振動で内部波の挙動が顕著で、 $m=3$ 以上は内部波の影響はなく一様密度の挙動となる。

② 内部界面波の振巾

湾口 $x=a$ に潮汐などの強制振動 ζ_t が作用したとき湾奥からの距離 x 点の振動 ζ は、

$$\left. \begin{aligned} \zeta_t &= A_t \cos \frac{2\pi t}{T} \\ \zeta &= \frac{\cos \left[\frac{(2m-1)\pi}{2} \cdot \frac{T_f}{T} \cdot \frac{x}{a} \right]}{\cos \left[\frac{(2m-1)\pi}{2} \cdot \frac{T_f}{T} \right]} \zeta_t \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

となる。ここに、 A_t ：湾口における内部界面波振巾、 T ：湾口での潮汐などの強制振動周期。

ε は 0.001 のオーダーの量であるので、波速 c は表面潮汐の波速の数10分の1となり、表面潮汐、内部潮汐が同時に同調することはない。

③ 内部界面波による上・下層の流れ

単節あるいは双節の内部潮汐が卓越するような場合には、表面潮汐は共振しないので湾口と湾奥の表面振巾は同じと考える。このとき x 点の流量 q 、流速 u は、

<下層>

$$q_2 = \frac{4aA_t \sin \frac{2\pi t}{T} \sin \frac{(2m-1)\pi T_f \cdot x}{2aT}}{(2m-1)T_f \cos \frac{(2m-1)\pi T_f}{2T}} \quad (10)$$

$$u_2 = \frac{q_2}{h_2 + \zeta}$$

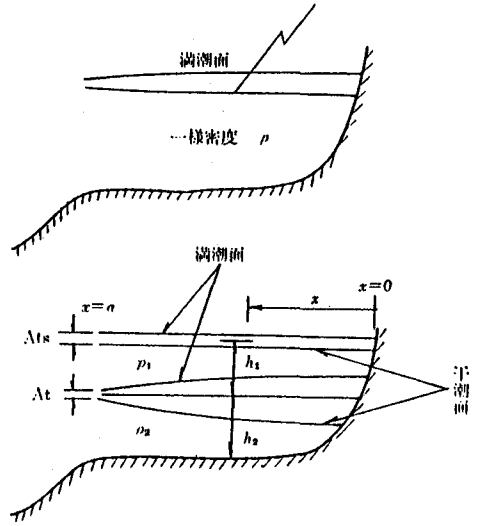


図 11 湾の水面および内部界面振動

<上層>

$$q_1 = 4 a \sin \frac{2 \pi t}{T} \left[\frac{A_{ts}}{(2m-1)T_{fs}} \cdot \frac{\sin \frac{(2n-1)\pi T_{fs} \cdot x}{2aT}}{\cos \frac{(2n-1)\pi T_{fs}}{2T}} - \frac{A_t}{(2m-1)T_f} \cdot \frac{\sin \frac{(2m-1)\pi T_f \cdot x}{2aT}}{\cos \frac{(2m-1)\pi T_f}{2T}} \right] \quad (11)$$

$$u_1 = \frac{q_1}{h_1 + \zeta_s - \zeta}, \quad \zeta_s = \frac{\cos \frac{(2n-1)\pi}{2} \cdot \frac{T_{fs}}{T} \cdot \frac{x}{a}}{\cos \frac{(2n-1)\pi}{2} \cdot \frac{T_{fs}}{T}} \zeta_{ts} \quad (12)$$

ここに、 T_{fs} ：表面長波の固有振動周期 ($T_{fs} = 4a / \{(2n-1)\sqrt{g(h_1+h_2)}\}$)、 n ：表面長波の節数 (通常 $n=1$)、 ζ_{ts} ：湾口での長面潮汐 ($\zeta_{ts} \doteq A_{ts} \cos \frac{2\pi}{T} t$)、 ζ_s ：湾奥からの距離 x 点での表面潮汐。

4. 増養殖のための生産施設

生産施設の種類については、1.で概略した。ここでは、それらの内現在最も多く用いられ水産の生産施設として重要な人工魚礁の工学技術について述べる。人工魚礁には、海底に設置される沈設型魚礁と海表面または海中の所定の水深に本体を設置し係留索によって海底のアンカーに係留される浮魚礁がある。両者の防災保全上検討すべき工学技術の内容は根本的に異なり、前者では着底時の衝撃力による破壊に対する安全性、沈設後の安定、洗掘埋没対策などである。後者では、係留力、付着生物による流体力増加の見積り方などがある。

(1) 沈設魚礁

沈設時の着底衝撃力は、魚礁が海底に接触してから地盤の最大変位を生じるまでの運動方程式(13)式と地盤反力(14)式を用いて求める。

$$\sigma V \frac{dv}{dt} = (\sigma - \rho) V - C_D A \frac{\rho v^2}{2} - C_{MA} \rho V \frac{dv}{dt} - R \quad (13)$$

$$R = K_R \varepsilon^n \quad (14)$$

ここで、 σ 、 ρ ：魚礁、海水の密度、 V ：魚礁の実容積、 A ：流れに当る遮影面積、 C_D 、 C_{MA} ：抗力係数、付加質量係数、 v ：着底後の速度、 K_R ：地盤反力係数、 ε ：地盤の変位。

いま、 $v = d\varepsilon/dt$ 、 $dv/dt = d^2\varepsilon/dt^2$ を用いて(13)式を整理する。

$$\left(\frac{\sigma}{\rho} + C_{MA} \right) \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{C_D A}{2 V} \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)^2 + \frac{K_R}{\rho V} \varepsilon^n = g \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \quad (15)$$

(15) 式は非線型微分方程式なので、(13)、(15) 式が力の釣合式であることを考慮し、両辺に $d\varepsilon$ をかけてエネルギー式として積分する。積分範囲は $\varepsilon = 0$ から最大変位 ε_m までをとる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_{MA} \right) \int_0^{\varepsilon_m} \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} d\varepsilon + \frac{C_D A}{2 V} \int_0^{\varepsilon_m} \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)^2 d\varepsilon \\ & + \frac{K_R}{\rho V} \int_0^{\varepsilon_m} \varepsilon^n d\varepsilon = g \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \int_0^{\varepsilon_m} d\varepsilon \end{aligned} \quad (16)$$

(16) 式の各積分項を必要に応じて次の置換をして求める。

$$d\varepsilon = v dt$$

$$\varepsilon = 0 \text{ で } t = 0, \quad v = v_0$$

$$\varepsilon = \varepsilon_m \text{ で } t = \Delta T, \quad v = 0$$

(16) 式左辺 2 項は、 v の時間的変化がわからないと積分出来ないが、この項は衝突時間中に水の抗力のした仕事で他の項に比して微小のため、計算に当っては v を線型近似して $v = v_0 (1 - t/\Delta T)$ として与え、

$$\begin{aligned} \int_0^{\varepsilon_m} \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)^2 d\varepsilon &= \int_0^{\Delta T} v^2 \cdot v dt = \int_0^{\Delta T} v^3 dt \\ &= v_0^3 \int_0^{\Delta T} \left(1 - 3 \frac{t}{\Delta T} + 3 \frac{t^2}{\Delta T^2} - \frac{t^3}{\Delta T^3} \right) dt \\ &= \frac{1}{4} v_0^3 \Delta T = \frac{1}{2} v_0^2 \varepsilon \end{aligned}$$

と近似して求めた。このとき(16) 式は、

$$\frac{K_R \varepsilon_m^{n+1}}{(n+1) \rho V} - \left[g \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) - \frac{C_D A}{4 V} v_0^2 \right] \varepsilon_m - \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_{MA} \right) \frac{v_0^2}{2} = 0 \quad (17)$$

となる。(17) 式を解いて ε_m を求め、これを(14) 式に代入して最大衝撃力を求めるが、衝撃時の重力加速度が k 倍になるとした(18) 式を用いると便利である。

$$k = \frac{K_R \varepsilon_m^n}{\sigma_c V} \quad (18)$$

地盤反力 K_R の値については、角型魚礁の空中落下実験時の部材歪および加速度の測定および発生クラック厚と鉄筋付着応力の計算から、地盤面への着地のとき $n = 2$ として $K_R = 300 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ (砂地盤)を得ている。

設置後の滑動転倒などの安定問題は、既存の設計法に準じているが、その際の設計流速の与え方に未

解明の部分が多いが、現時点では、中村が提案し、武内が現地調査からその妥当性を検討した次の方法を用いている。

中村によると、海洋の変動流速 u_i の合成値 U は

$$U^2 = \sum_i u_i^2 + \sum_{i \neq j} u_i u_j \cos \theta_{ij}$$

で示され、等方性乱流では、右辺第2項は零であるので両辺に $\rho/2$ を乗じて

$$\frac{\rho U^2}{2} = \sum_i \frac{\rho u_i^2}{2} = \sum E_i \quad (19)$$

とし、エネルギースペクトルの合成値から設計流速 U が求めることが出来るとしている。すなわち、海洋乱流では、コルモゴロフの $-5/3$ 乗則が成り立ち慣性領域のエネルギーが、潮流・海流等の外部エネルギーを受ける流れ、これは、調和分解等で推算される平均流 U_0 を示すが、この U_0 のエネルギーの1.5倍あることから、 U は U_0 の $\sqrt{1+1.5} \approx 1.6$ 倍の値をとっている。

洗掘埋没については、樁木等¹⁹⁾の研究があるが、その対策工法についても定性的配慮に止まり、定量的設計法の確立は今後の研究に待たれる。また魚礁周辺での水理構造についても、樁木ら^{16), 17)}、松見ら¹⁸⁾、杜多らの研究があるが、これらの研究の進展は、魚礁と魚の蟄集の関係解明に基礎的データを与えるものと期待される。

(2) 浮魚礁

浮魚礁の係留力については、木村^{20), 21)}、松原ら²²⁾、神山等の研究がある。木村、松原らは、係留力を求めるに際し、係留索に作用する流体力や係留索の弾性を無視して取り扱ってきた。神山は、様々な波浪条件下での浮体部と係留索からなる浮魚礁を剛体と多くの質点から構成されるとして扱い係留力、浮体運動について数値解析を行った。ここでは、神山の方法について紹介する。

浮魚礁のモデルを図12に示す。また、解析にあたり次の仮定を置いている。

- ① 魚礁本体（浮体部）は剛体とする。
- ② 係留索は質点のない円柱体と質量のもつ質点が連結されたものとする。
- ③ 円柱体は質点を中心に自由に回転する。
- ④ 外力としての波には微小振巾波を考え、浮体による擾乱はないものとする。

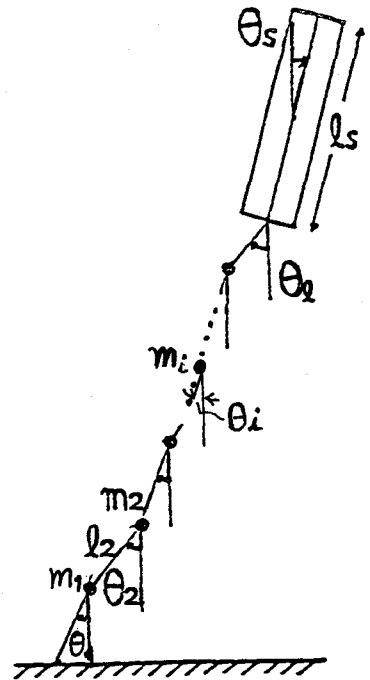


図12 浮魚礁モデル

⑤ 浮体部と各質点には、モリソン式で表わされる流体力が作用する。

質点 i と $i-1$ を結ぶ円柱体に働らく張力を T_i とすると質点の運動方程式は、

$$m\ddot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{T}_{i+1} - \mathbf{T}_i + \mathbf{F}_i \quad (20)$$

剛体の要素 j については、質量中心を $\mathbf{r}_G$ とし、 $\mathbf{r}_j = \mathbf{r}_G + \mathbf{r}_j'$ と置く。並進と回転運動の方程式は、

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{\mathbf{r}}_G &= -\mathbf{T}_l + \sum_j \mathbf{F}_j \\ \frac{d}{dt} \sum_j m_j \mathbf{r}_j' \times \dot{\mathbf{r}}_j' &= -(\mathbf{r}_l - \mathbf{r}_G) \times \mathbf{T}_l + \sum_j \mathbf{r}_j' \times \mathbf{F}_j \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

で示される。図 12 に示すように θ_i をとると、質点 i の運動方程式は、

$$\begin{aligned} l_i \ddot{\theta}_i &= \frac{T_{i+1}}{m_i} \sin(\theta_{i+1} - \theta_i) - \frac{T_{i-1}}{m_{i-1}} \sin(\theta_i - \theta_{i-1}) \\ &\quad + f_{ix} \cos \theta_i - f_{iy} \sin \theta_i \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} -l_i \dot{\theta}_i^2 &= \frac{T_{i+1}}{m_i} \cos(\theta_{i+1} - \theta_i) - T_i \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_{i-1}} \right) \\ &\quad + \frac{T_{i-1}}{m_{i-1}} \cos(\theta_i - \theta_{i-1}) + f_{ix} \sin \theta_i + f_{iy} \cos \theta_i \end{aligned} \quad (23)$$

剛体と係留索の連結部 l の運動方程式は、

$$\begin{aligned} l_l \ddot{\theta}_l &= \frac{L_l^2}{2I_{se}} T_l \sin 2(\theta_s - \theta_l) - \frac{T_{l-1}}{m_{l-1}} \sin(\theta_l - \theta_{l-1}) \\ &\quad + f'_{lx} \cos \theta_l - f'_{ly} \sin \theta_l \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} -l_l \dot{\theta}_l^2 &= -T_l \left\{ \frac{1}{M_{se}} + \frac{1}{m_{l-1}} + \frac{L_l^2}{I_{se}} \sin^2(\theta_s - \theta_l) \right\} \\ &\quad + \frac{T_{l-1}}{m_{l-1}} \cos(\theta_l - \theta_{l-1}) + f'_{lx} \sin \theta_l + f'_{ly} \cos \theta_l \end{aligned} \quad (25)$$

となる。また剛体の回転についての運動方程式は、

$$I'_{se} \ddot{\theta}_s = -L_l T_l \sin(\theta_s - \theta_l) - N'_{se} \quad (26)$$

となる。ここに、 l_i 、 m_i ：要素 i の長さ、有効質量、 $\mathbf{f}_i = \frac{\mathbf{F}_i}{m_i} - \frac{\mathbf{F}_{i-1}}{m_{i-1}}$ 、 I'_{se} 、 M_{se} ：剛体の実質的

慣性モーメント、質量、 $\mathbf{f}'_i$ ：外力の増分、 N'_{se} ：外力により剛体に働らくモーメント、 L_l ：剛体とロープ連結部から重心までの長さに対応する量

解析は、(23)、(25)式から張力 T_i 、 T_l について求め、(22)、(24)、(26)に代入、2階連立微分方程式を求め解析する。数値計算はルンゲ=クッタ=ギル法が用いられている。

計算結果の一例を示す。計算条件は、浮体部長さ 20 m、係留索長 80 m、水深 100 m とし、浮体部の有効質量 1,414 kg、有効慣性モーメント 9,948 kgm^2 、余剰浮力 1,571 N である。結果を図 13～図 15 に示した。図から、係留索張力は波周期と対応し、周期が短くなるに従い最大張力は増大する傾向にあり、最大張力のピークは浮体の首振り運動との共鳴に対応する。余剰浮力が小さいと、波高が大きくなると最小張力は 0 となり、その時係留索はタワミを生じてそのタワミがなくなる時は図 14 に示すように衝撃力が生じる。浮魚礁の固有周期が波の周期に近づくと浮魚礁は波に共振するが、係留索に作用する衝撃力は、最小張力と関係し、共振現象とは結びつかない。図 15 にみられるように、浮魚礁本体は連結部を支点とし波周期の倍周期の振動をすることなどが明らかとなった。このことは従来係留索に作用する流体力を無視した計算法を一步進め、浮魚礁の運動を動的に把えて現象をシミュレーション可視化の行ったことは、今後の設計法の確立に大きな方向を示唆している。

5. あとがき

水産土木が扱ってきた研究の一端を紹介した。今後益々多様化する海の高度利用の中で水産開発の重要性は益々増大するであろう。生物の行動生態と環境制御技術はまだ未知の問題が多く、また、養殖施設など水産施設にも科学的根拠を持った工学技術がようやく着手されたばかりで、新しい技術開発が望まれる。最後に今後技術開発が期待される課題

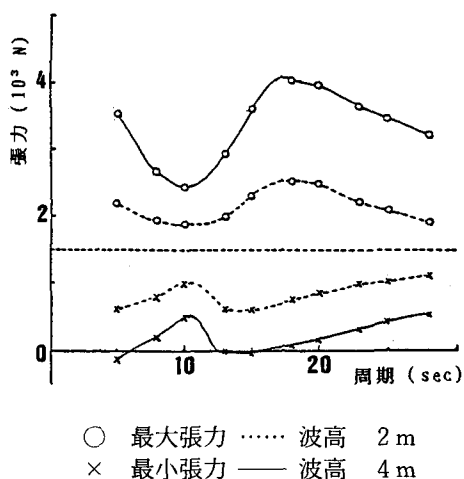


図 13 波周期と係留索張力

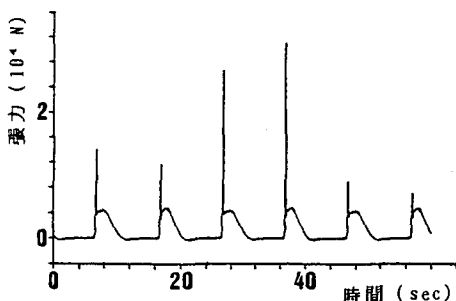
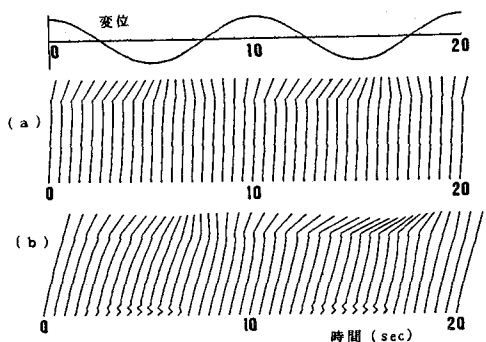


図 14 係留索張力の時間変化



(a) 波高 6.0 m, (b) 波高 10.0 m

図 15 浮魚礁運動の時間的変化

について述べる。

1. 資源安定化技術：海底堤防，海底半島，湧昇流発生構造物などにより，海水の湧昇や混合域形成による漁場環境の造成を行ない，その水産的意味を解明し，環境造成による資源管理を行なう。
2. 砂浜域開発：増殖場拠点としての人工入江，人工砂洲，人工トラフ，人工砂堆，人工藻場，人工干潟などの技術開発。
3. 収獲漁場施設の装置化：積極的採捕が可能な漁礁形式の開発，蛸集魚モニタリング装置の開発などによる計画的採捕機能を持つ増殖施設の技術開発。
4. 大水深漁場の利用技術：耐波・耐流沖合養殖施設の開発，採海用中層基礎の開発研究。

参 考 文 献

- 1) 中村 充：水産土木学，漁場造成・海洋環境エンジニアリング，INA 時事工業通信社，昭54.12.
- 2) 沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針，昭和59年度版，財団法人全国沿岸漁業振興開発協会，昭60.3.
- 3) 中村 充：沿岸漁業の開発と防災，水工学シリーズ74-13-5，土木学会水理委員会，'74.7.
- 4) 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，第15巻，第2号，1978.2，p.116～124.
- 5) 中村 充：栽培漁業と水産土木，土木学会誌，1976.8，p.38～41.
- 6) 中村 充：生物と海の環境，水工学シリーズ78-13-7，土木学会水理委員会，1978.7.
- 7) 中村 充・萩野静也：海水交流に関する研究，第23回海岸工学講演会論文集，1976.
- 8) 中村 充・萩野静也：作れい効果に関する調査研究，作れい工の水理特性について，浅海漁場開発事業作れい効果調査報告書，水産庁，農業土木試験場，'77.
- 9) 戸原義男他：有明海のり漁場を中心とした浅海域増殖場の水理について，九大農学部附属水産実験場業績，No.2，1980.
- 10) 中村 充・乃万俊文：波浪エネルギーによる海水導入に関する研究，農業土木試験場報告，第15号，1977.
- 11) 杜多 哲・中村 充・乃万俊文：波による循環流工に関する実験的研究，水産工学研究所報告第2号，1981.
- 12) 上北征男：水産増殖施設の水力学的研究，水産工学研究所報告3号，昭57.3，p.67～100.
- 13) 中村 充・上北征男・飯野達夫：海中落体の着底衝撃に関する研究，第22回海岸工学講演会論文集，1975.
- 14) 秀島好昭・上北征男：人工魚礁の着底衝撃力に関する研究(Ⅱ)，水産工学研究所報告4号.
- 15) Makoto Nakamura：Evolution of Artificial Fishing Reef Concepts in Japan, Bulletin of

Marine Science 37(1), 1985, p.271～278.

- 16) 榎木 享・後野正雄：人工魚礁の背後流況変化の数値シミュレーションについて，第26回海岸工学講演会論文集，1979，p.673～672.
- 17) 榎木 享・松見吉晴：魚礁背後の流況特性について，第28回海岸工学講演会論文集，1981，p.387～391.
- 18) 榎木 享・松見吉晴・林 健児：有孔魚礁の流況の数値シミュレーション手法について，第29回海岸工学講演会論文集，1982，p.506～510.
- 19) 榎木 享・松見吉晴・北口雅章：魚礁周辺の局所洗掘とその対策工法について，第31回海岸工学講演会論文集，1984，p.345～344.
- 20) 木村晴保：浮魚礁係留のための浮体に働く波力と係留張力の基礎的研究，農業土木試験場報告16号，1977.
- 21) 木村晴保：波によって生じる浮魚礁の係留索張力，第25回海岸工学講演会論文集，1978，p.612～616.
- 22) 松原雄平・野田英明：浮魚礁の実用化に関する研究，第29回海岸工学講演会論文集，1982，p.496～500.
- 23) 中村 充：増養殖技術の現状と展望，昭和60年度増養殖場の施工・積算法講習会テキスト，昭和61年3月，p.105～111.