

水産土木の現状と問題点

野 田 英 明

1. はじめに

世界の主要国が 200 海里経済水域をそれぞれの国に設定して自国の権益保全を図るようになって、わが国の遠洋漁業も多く of 制約を受け、今後の飛躍的な発展はほとんど期待できなくなってきた。こうした現状に伴って、沿岸漁場の再開発が動物性食糧の主要な供給源として見直されるようになるとともに、現在重大な転機に立っているわが国水産業の発展にも大きく寄与することが期待される。

わが国の 200 海里経済水域の広さはほぼ 450 万 km^2 であって、これはわが国の国土面積の約 12 倍に相当し、この中でも水深 200 m より浅い大陸棚のいわゆる沿岸海洋水域でも国土面積のほぼ 1.2 倍の 44 万 km^2 の面積となり、こうしたわが国周辺水域における水産資源の増大、安定化と高度利用がますます重要になりつつある。

水産業といっても遠洋漁業、沖合い漁業、沿岸漁業によって、その性格は大いに異なる。遠洋漁業は国際的な場での問題解決を必要とする。また、沖合い漁業は、中村¹⁾によると、資源変動の大きい多獲性魚（例えばマイワシ）に依存しているため、安定性に欠ける嫌いがあるが、それでも、わが国 200 海里内で年間 1000 万トン以上の漁獲を維持している。それでは問題がないかといえは、そうではなく、広域を回遊するため、燃料の消費、漁獲効率向上のための漁船の過剰装備、など生産コストの増大による経営の危機に直面しているといえる。

一方、沿岸漁業は、ベントス（底棲生物）食性、魚食性で寿命も長く漁獲管理のきわめて重要な魚種を対象としているが、乱獲による資源の減少、自然海岸や干潟の喪失、水質の悪化等により、生産量の減少をきたしている。表-1 は鳥取県の名産である「松葉ガニ」（ズワイガニ）の年度別漁獲量を示すものであって、昭和 40 年前後を中心にそれ以後年々漁獲量の減少していることがわかる。漁獲技術の進歩は漁獲量を飛躍的に増大させたが、資源管理を怠った乱獲が沿岸漁業の衰退を一層はやめることになった典型的な一例である。従来の資源管理は漁獲禁止区域や禁止期間の設定という比較的消極的なものであった。しかしこうした対応には自ずから限界があり、有限な資源・漁場の保全と高度利用が重要な鍵となる。その一つの対策として、獲る漁業から資源を培養する漁業への転換が図られるようになってきた。とくに、国の施策として、沿岸漁場整備開発事業、水産種苗を生産放流する栽培事業、沿岸漁業構造改善事業などの沿岸漁業振興策が積極的に実施されてきた。

さらに、近年における水産業の果たすべき基本的役割を踏まえ、かつ多用化しつつある国民の海に対するニーズと水産業の直面する諸課題に対応しつつ、水産業を核とする沿岸域及び沖合い水域の総合的な整備開発の新たな展開方向を見いだすという観点からマリノーション構想が具体化してきた。

ここでは、このマリノーション構想の概要を説明するとともに、これに伴う土木技術的諸問題、例えば、沿岸漁場整備開発や構造改善に関する諸問題について解説する。

表-1 ズワイガニ漁獲量

年 度	年間漁獲量(トン)
39	4,835
44	4,405
45	4,785
47	3,983
48	2,675
50	1,216
53	945
55	903
57	594
58	648
59	429

2. マリノベーション構想²⁾

2.1 本構想の概要

マリノベーション構想はわが国の水産業が社会・経済全体の中で果たすべき役割として、1) 水産物の安定供給、2) 効率的漁業の実現、3) 沿岸地定住圏の形成及び4) 海の文化の継承、の四つの課題を取り上げ、各々の役割毎に当面する諸問題と基本的課題、及びそれに対応した施策の実現を図ろうとするものである。これらの課題を具体的に示すとつぎようになる。

1) 水産物の安定供給

わが国の漁業生産量は、昭和40年代後半に1千万トンを超え、その後もわずかに増加しているが、昭和50年代初期の200海里漁業水域制度の導入により、米・ソをはじめとする諸外国の200海里水域に依存する遠洋漁業の生産は最近の10年間にほぼ半減しており、今後さらに厳しい状況となることが予想される。つぎに、現在600万トンに及ぶ沖合い漁業は、従来から資源水準の変動がきわめて大きく、安定的な供給と漁業経営の安定を阻む大きな要因となっている。さらに、沿岸漁業は需要の強い中高級魚介類を中心に生産量の増大を図っているが、養殖業が昭和58年に初めて100万トンの生産量を超えたものの、近年生産が伸び悩んでいる。

一方、今後ますます増大する水産物需要に対し、高い自給率を維持しながら、消費者のニーズにあった高品質の水産物を安定的に供給することがきわめて重要になってくる。そのためには、需要動向に即したわが国周辺水域における資源の増大、安定化と高度利用が基本的な課題となっている。したがって、

- a) 沿岸海域における増養殖場等の総合的な漁場の整備開発による生産力の増強、
- b) 沖合い資源の安定生産のための漁場整備による沖合い水域の新たな開発利用、
- c) 人工衛星を利用した漁場探査システム等の海洋新技術の総合開発、
- d) 未利用資源の高度利用とその加工技術・流通に関する総合開発、
- e) 需要の動向に即した流通・加工の拠点機能の強化を図るための漁港整備、

等の施策を展開する必要がある。

2) 効率的漁業の実現

わが国の漁業は海岸線約5kmごとに点在する漁村を拠点として発展してきたが、近年における生産コストの上昇と魚価の停滞の中で漁業経営は全般に悪化の傾向にある。こうした現状を打破して、水産物を適正な価格で供給できるようにするためには、低コストで効率的な生産を実現し、経営体質を強化する必要がある。効率的生産の実現は、水産物が国内における競合食品に対して競争力を強め、かつ市場を確保するとともに、国際競争力を強化し、自給力を確保する上でもきわめて重要である。

こうした問題に対する技術的課題は、

- a) 資源の科学的かつ合理的な利用・管理手法の確立による資源管理型漁業の実現、
 - b) 未利用砂泥域の整備開発や地域特性を生かした栽培漁業の推進による新漁場空間、新資源の創出、
 - c) 沖合い自動式定置網等の装置型・省力型漁法のような新漁労技術や漁海況予報技術の総合開発、
- であり、今後急速な発展が予想されるハイテクノロジーやリモートセンシング技術等を積極的に水産分野に導入して、資源管理型漁業を推進する必要がある。

3) 沿岸域定住圏の形成

わが国には約1千の沿海市町村と約7千の漁業集落があるが、近年における沿岸漁業の伸び悩み、漁業就

業者の高齢化等から多くの地域では漁村社会の活力が低下しつつある。これらに対応するためには、漁業の担い手を育成するとともに、遠洋漁業等からの離職者や高齢漁業者をも吸収できる漁村社会の活性化と沿岸地方定住の推進を図る必要がある。したがって、水産業を基幹産業とする沿岸地域における定住条件を整備するためには、

- a) 沿岸域における需要に適した魚介類の計画的・効率的な生産のための増養殖場等の生産基盤の整備、
- b) 漁業者の高度技術、経営意識の教育・研修等による漁業の担い手の育成、
- c) 離岸型漁港、多層型漁港施設による用地創出、漁村 CATV 等による生活環境の整備、
- d) 高齢漁業者のための生きがい漁業と就労の場の確保、地域特産物加工等による地場関連産業振興のための付加価値の増大、

などの総合的施策が必要である。なお、漁協やそれに関連したグループが漁業生産のみならず、各々の地域の実体に即した生活改善、漁業後継者の育成、水産物の消費拡大等に取り組むことによって、沿岸定住圏を活力のあるものにすることができる。

4) 海の文化の継承

わが国は伝統的にみて海洋国家であり、歴史的にも文化的にも海と密接な関わりをもつ「海の文化」が各地方において継承されてきている。こうした観点から沿岸域をみると、海洋レクリエーションも単なるレジャーとしての側面に注目するのではなく、沿岸の自然環境や地方の漁業文化とのふれ合いによって、伝統的に継承されてきた「海の文化」の一環として積極的にとらえる必要がある。

このためには、

- a) 漁業者・地域住民の連帯による沿岸漁場環境監視システムの整備を主体としたきれいな海づくり、
- b) 都市住民による稚魚の体験放流、体験漁業の実施、レクリエーション需要の増大に応えるための諸施設の整備、

等の施策によって、水産業を主体としつつも、海洋レクリエーション活動に欠くことのできない沿岸の自然環境の保全によるきれいな海づくりと伝統的な漁業文化や魚食文化を取り入れた「海の文化の継承」策を展開して、第三次産業的な性格を水産業にももたせて多角化する必要がある。

2・2 地域類型（タイプ）別開発構想

本構想の基本は水産業を核とした新しい地域づくりであり、また海域と陸域の一体的な整備開発が可能な地域を対象としている。したがって、湾や灘など海域として一定の広がりを持ち、かつ陸域としても社会・経済的に一定のまとまりをもつ地域毎に、海域の特性、立地条件などの自然条件および地域水産業の特性等の社会・経済的条件に関する地域特性を勘案して各種の開発構想が策定されることが望まれる。

以上の考え方に基づいて、マリノベーション構想ではつぎに述べる四つのタイプの開発構想が立案されている。すなわち、

- 1) マリン・コンビナート構想
大規模水産都市の整備と沖合い資源増大・安定化
- 2) マリタイム・ヴィレッジ構想
純漁村地域における「つくり育てる漁業」と生活環境整備の推進
- 3) マリン・テク構想
水産分野へ先端技術を導入するための研究開発
- 4) マリン・カルチャー構想
「海の文化の継承」と漁場環境の保全

である。これらのタイプ別開発構想の位置づけは表－２に示されるようである。

マリン・コンビナート構想

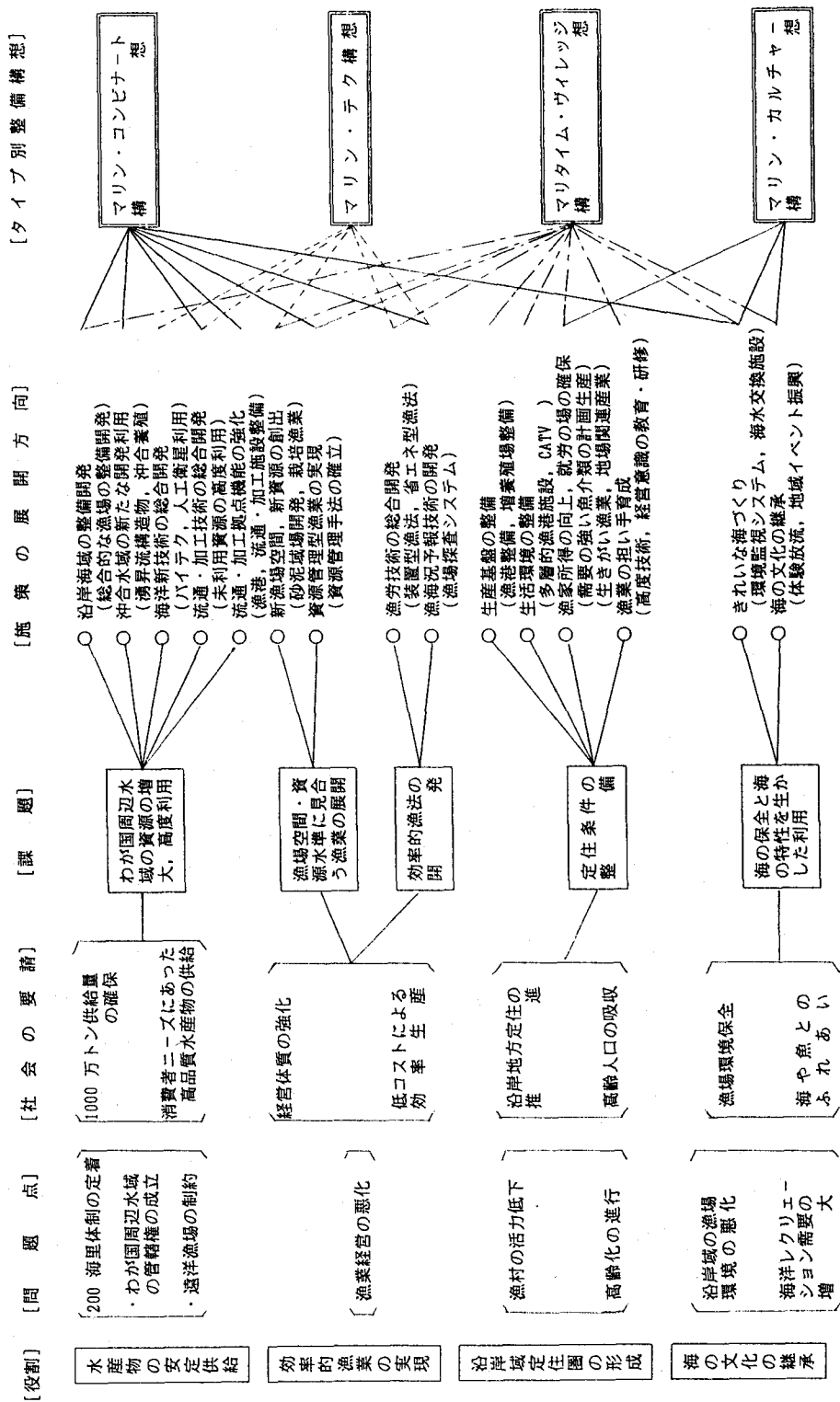
沖合資源の大量水揚げに、主として依存している大規模な水産都市では、沖合い漁業資源の増大・安定化を図るために、新技術を導入するとともに、沖合漁場の施設整備を進める。一方、陸域では、加工基地のネットワーク造りや加工製品の生産・流通の合理化、水産関連産業の振興を図り、水産業の中心基地として発展するための条件を、周辺地域をも含めて整備する。これらの具体的内容を説明すると下表のようになる。また、図－１はマリン・コンビナート構想をイメージしたものである。

項 目	内 容	施 設
(1) 沖合水域の新たな開発利用	沖合漁業資源を安定的に生産するための沖合い漁場の整備及び沖合い海上漁業基地等を整備する。また、効率的な漁場探査、資源管理を行うための情報システム整備を行う。	・浮魚礁 ・湧昇流発生構造物 ・天然礁の補強改良 ・沖合養殖場 ・沖合海上漁業基地 ・遠隔離島漁港 ・漁場探査衛星
(2) 沿岸陸域の高度整備	新しい加工、流通施設の立地のため、用地の造成を主体とした漁港の整備及び水産都市の象徴、市民の憩いの場としての公園、広場の整備。	・各種漁港施設 ・水産公園
(3) 流通・加工技術の総合開発	消費地・産地における流通情報の収集及び提供のための施設整備、水温流通・輸送システム等新流通システムの整備、その他消費拡大を図るための施設の総合的整備。	・流通情報ネットワーク ・水温流通輸送システム ・魚PRセンター ・産地直送センター
	活魚、多獲性魚、冷凍品等の流通の合理化を図るための施設及び加工技術の進展、消費者ニーズの変化に対応した加工施設の整備。	・活魚空輸施設 ・多獲性魚流通施設 ・冷凍品流通センター ・新製品新素材加工場 ・冷凍製品加工場

マリタイム・ヴィレッジ構想

漁業にのみ依存している漁村地域では、消費者のニーズにあった高品質でかつ多品目の魚介類を供給できるように、その地域独自の計画生産と地域の特性にあった「つくり育てる漁業」を中心とした資源管理型漁業を強力に推進し、漁業所得の増大を図る必要がある。とくに、新技術を導入して、漁場及び漁港施設等の基盤整備を行うことが重要である。さらに、漁業の担い手の育成、高齢化した労働力に適した就労の場（例

表-2 マリノベーション構想の概要



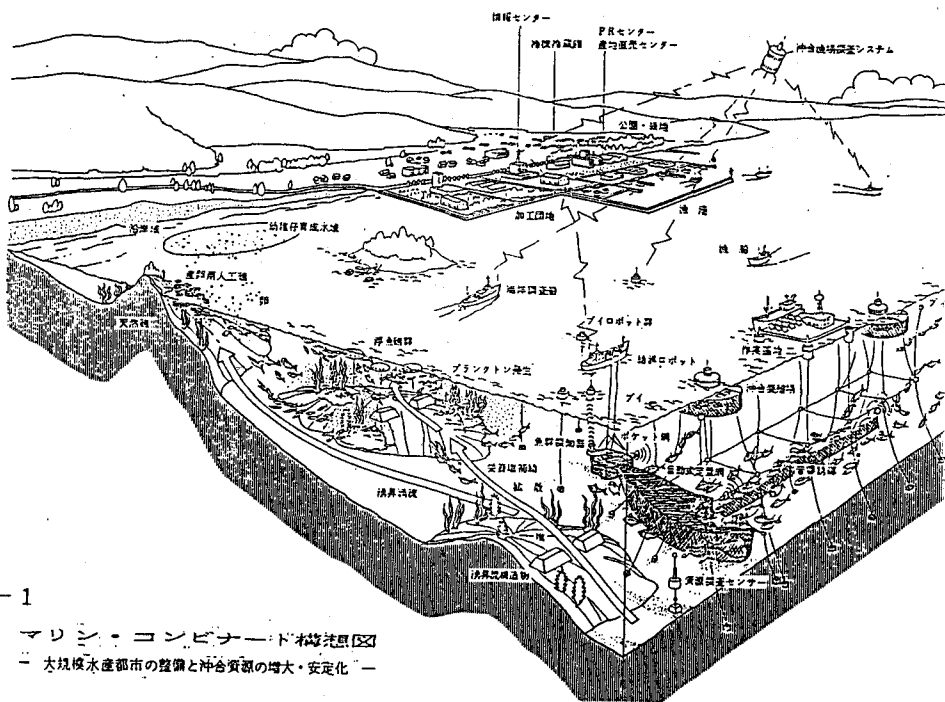


図-1

マリ・コンビナード構想図

— 大規模水産都市の整備と沖合資源の増大・安定化 —

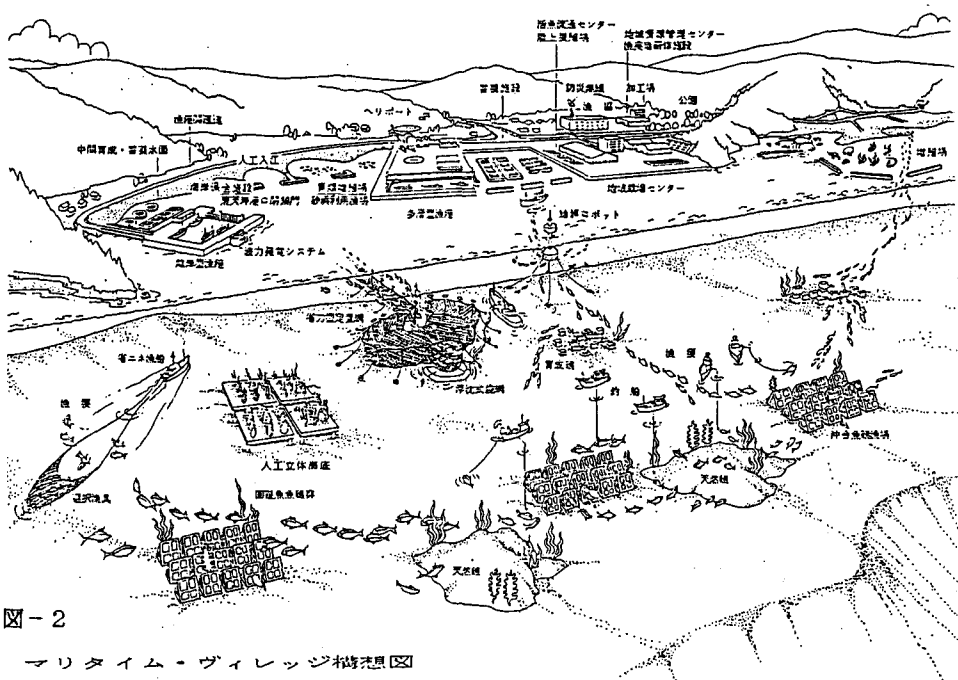


図-2

マリタイム・ヴィレッジ構想図

— 純漁村地域でのつくり育てる漁業と生活環境整備の推進 —

例えば、地場加工等）を確保するとともに、狭あいな土地と過密な居住空間を改善して生活環境の総合的整備を行うことも必要である。

こうした施策によりわが国沿岸漁業の大部分を占める漁村地域を活性化するとともに、地方中核都市と有機的な連携を図って、定住条件の向上に資する。

本構想の具体的内容は下表に示すようであり、図－２はそのイメージを示すものである。

項 目	内 容	施 設
(1) 新漁場空間，新資源の創出	変動する資源・海況に左右される漁業から管理し計画的に生産する漁業へ転換するために，ア)地域の中高級魚種の種苗生産，中間育成，放流の推進，イ)未利用漁場の整備開発，ウ)総合的な漁場整備開発と資源管理型漁業の定着	・地域栽培漁業センター ・中間育成水面 ・砂泥域漁場開発 ・人工干潟・藻場 ・地域資源管理センター ・沿岸，沖合養殖場
(2) 生産基盤の整備	地域の漁業形態に適した漁港施設の整備，波力発電等のローカルエネルギーシステムと漁場整備と組み合わせた多目的漁港施設整備の実施。	・離岸型漁港 ・多層型漁港 ・多目的外郭施設 ・漁港内中間育成水面
(3) 漁家所得の向上	需要の強い中高級魚介類の計画的生産。	・蓄養施設
(4) 漁業の担い手育成	漁業者の経営意識向上，高度技術習得のための研修・訓練，地域の研究グループの活動促進。	・漁業者研修施設
(5) 生活環境整備	用地の造成，再開発を基本とした，ア)道路，下水道等の公共施設，イ)公園，運動場等の整備により，漁村の安全かつ快適性の向上，生活環境の向上，地域コミュニティの活性化	・人工地盤 ・漁業関連道，上下水道 ・漁村ＣＡＴＶ ・公園，運動場 ・防災対策施設
(6) 就労の場の確保	高齢者の生きがい漁業，地場水産関連産業の掘り起こし。	・省力型定置網 ・特産品加工施設

マリン・テク構想

水産技術の研究開発のために，地方における核を形成しようという構想である。とくに，水産分野に，リモートセンシング，バイオテクノロジー等の先端技術を導入して，海洋環境の調査，水産資源の調査・管理，漁労技術に関する研究開発を推進し，マリノーション構想全体の具体化に必要な基礎的並びに総合的研究開発を実施できるようにする。さらに，このような研究開発を有効に推進するためには生物系及び工学研究

分野の有機的連携を図るとともに、国、地方および民間における各機関の役割分担を明確にすることも重要である。

これらの具体的説明は下表のようであり、図－３はその具体的な構想図である。

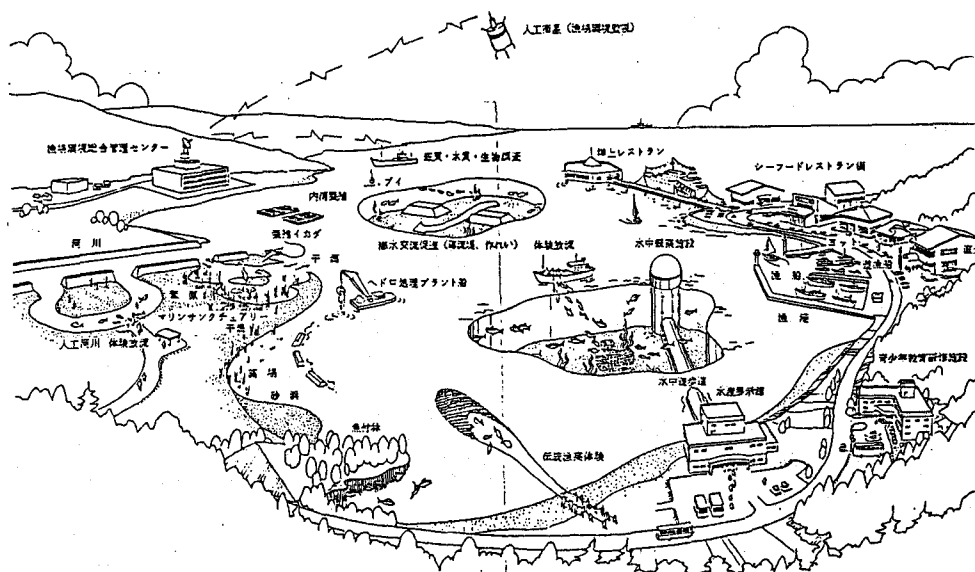
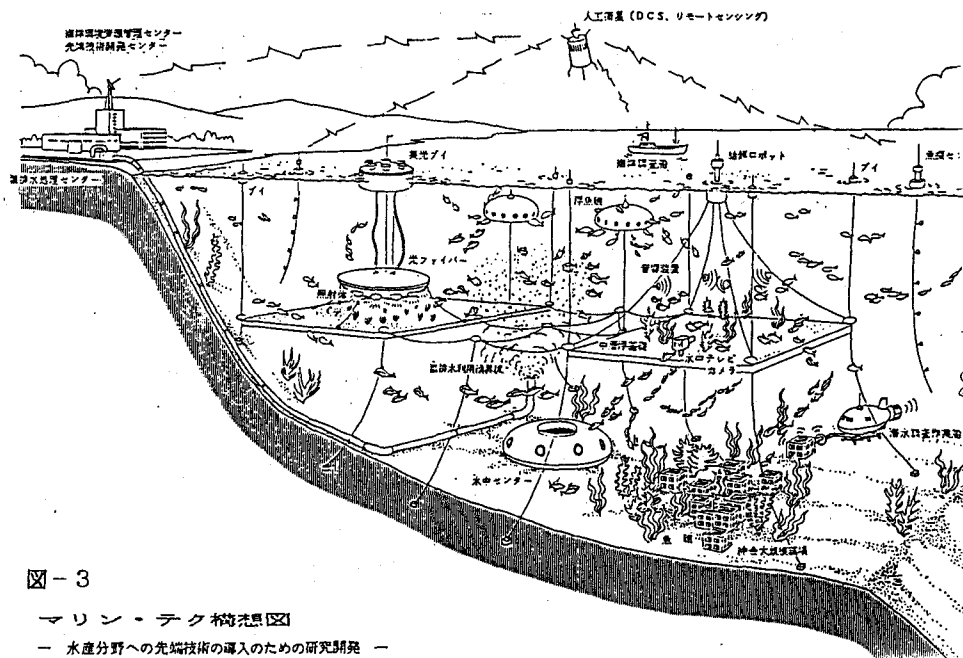
項 目	内 容	施 設
(1) 海洋新技術の総合開発	リモートセンシング、バイオテクノロジー、ニューメディア、新素材、マイクロエレクトロニクス等の先端技術を利用して、海洋環境の調査、水産資源の調査に関し、水産技術のハイテク化を総合的に進める核を整備する。	・先端技術開発センター (バイテク、擬似海底、人工湧昇流、漁業用新素材) ・海洋環境・資源管理センター、DCS,LUT,潜水調査作業船)
(2) 流通・加工技術の総合開発	ニューメディア、マイクロエレクトロニクスを利用して、水産物流通に関する各種情報システムの整備開発。 バイオテクノロジー等を利用した水産加工技術開発の推進。	・情報システム開発センター ・加工技術開発センター
(3) 漁労技術の総合開発	漁船、漁具、漁法の省エネ化、省コスト化。省力化、計画的生産のための魚礁の計画的配置等による装置型漁法の開発。	・漁労技術開発センター

マリン・カルチャー構想

わが国の周辺水域において、豊かな海と魚と海に親しむレクリエーションの場を確保するためには、古来から漁場利用を通じて海の管理に当たってきた漁業者のみならず、地域や都市住民も含めて、「きれいな海づくり」を推進することが今後の課題である。さらに、各地方で伝承されてきた漁業文化や魚食文化はわが国の貴重な文化遺産であり、「海の文化」として継承されていくことが重要である。

本構想の具体的内容は下表のようであり、また図－４はこの構想図の一例を示したものである。

項 目	内 容	施 設
(1) きれいな海づくり	漁場環境の監視、調査、被害防止、環境水準（汚染）、汚染の原因に関する調査、観測。漁民、住民も参加できる体制。	・調査船、ブイ、飛行機、人工衛星ネットワーク
	漁場機能の回復 土木（海水交換、対流発生）、生物（藻	・導流堤の設置、作れいによる海水交流



項 目	内 容	施 設
(1) のつづき	類、プランクトン、ベントス) に対する各方面からの保全施策――きれいな海づくり。	・揚水による攪拌 ・生物的赤潮防除関連施設
	漁場保全に関する啓発 漁業者、地域住民の連帯による漁場保全意識の高揚	・きれいな海づくり運動
(2) 海の文化の継承	漁業とのふれあい 実際の漁業の一端に触れることにより漁業のもつ役割、水産資源保護の重要性を認識してもらう。	・稚魚、稚貝、河川魚等の放流体験 ・観察魚礁、水中観察施設
	海の自然、漁業文化とのふれあい 地域イベントの振興、魚食文化の啓蒙普及 青少年や都市住民が海や魚に親しむための教育・研修を通じ、海の文化の歴史の継承を図る。	・マリンサンクチュアリ（干潟、藻場） ・魚付林遊歩道 ・水産展示館 ・シーフードレストラン街 ・青少年教育研修施設 ・遊漁用漁港・魚礁 ・海洋釣り施設

3 人工魚礁

マリノバージョン構想において、人工魚礁は主要な構造物の一つである。図-5は人工魚礁の設置状況を模式的に示したものであって、この図から明らかなように人工魚礁は、ごく浅海の水深 2～3 m から水深 100 m あるいはそれ以上の深海まで設置され、またその種類も底設魚礁や浮魚礁、築礁、延縄式増殖施設、沖合養殖イケース等の設置がすでに具体化されつつある。海洋土木工学の立場からすれば、これらの構造物の安全性や性能を評価するとともに、それ

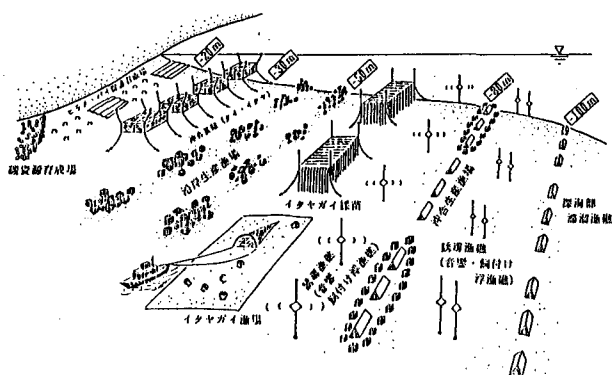


図-5 魚礁の設置状況図

らの機能や最適配置条件について、水産工学や生態学の研究者と協同して、各種魚類にとって最適環境条件となるように環境を改造することが重要である。さらに、マリノバージョン構想以外にも、各省庁で各種の海域利用開発構想が進められているため、これらとの競合、調整の問題も今後多くなることが予想される。したがって、ここでは現状における人工魚礁に関して得られている知見について説明し、海域利用開発構想

をたてる場合の一助にしたい。

3・1 底設魚礁

底設魚礁は、沈設魚礁とも言われ、海底に地形的変化を与えて魚類の蛸集、増殖さらに培養を図る構造物である。

天然魚礁には魚群が集まることが昔からよく知られていた。人工魚礁はこうした経験に基づいて、はじめのうちは沈船、古タイヤ、古バスなどを海底に沈めて利用してきた。しかし、近年の人工魚礁の材質はコンクリートばかりでなく、鋼やプラスチック、タイヤその他耐久性のある構造物であれば良いということから、大きさ、形状等非常に変化に富んだものとなっている。

こうした人工魚礁が沈設されると、その魚礁には多種に及ぶ魚類の蛸集がみられ、魚礁を摂餌、逃避、休息、産卵など魚類のもつ本能的欲求の処理場として利用するようになる。しかしながら、魚礁に集まる魚類の生態は魚種の相違、成長段階の差、さらに魚礁周辺域の物理化学的あるいは生物学的環境条件の変化などの要因に関係し、きわめて複雑である。

魚礁に集まる魚類の分布³⁾

瀬戸口ら³⁾によると、魚礁やその周辺域に集合し分布する魚類は120種以上はあるとされており、これらの魚類の多くは、魚礁に対してある定まった位置関係（定位）を保持する行動がみられる。集合した魚類は一般的に魚礁周辺の水域空間を活動の場としているので、この水域空間を鉛直及び水平方向に区分してその分布を説明する。

1) 鉛直方向の分布

図-6は魚類が魚礁に定位行動をとるときの分布を分類したものである。

タイプIは、魚が魚礁内部や側面にあつて、魚礁に体の大部分もしくは、一部分を接触させている魚種であり、アイナメ、カサゴ、メバル、ハタ、タコ、オコゼなど主に岩礁性の魚類であるが、種類としてはそれほど多くない。

タイプIIの魚は魚礁の直近にあるが、体を魚礁に接触させず魚礁の周囲を遊泳する魚種及び魚礁周辺の海底に定位する魚種である。このタイプの魚類は種類も多く、かつ生態的にも回遊性、定着性、岩礁性、砂泥質性など多様であり、代表種としてはマダイ、イシダイ、イサキ、メバル、ヒラメ、カレイ類、アマダイ、ソイ、イシナギ、メジナ、イシモチ、カワハギ類、ヤリイカなどである。

タイプIIIの魚は魚礁上の水域空間にあつて、魚礁から離れた表・中層域に滞遊する主として回遊性魚類であり、ブリ、ワラサ、イナダ、ヒラマサ、カンパチ、ソーダカツオ、マアジ、マサバ、ウルメイワシ、カタクチイワシ、コノシロ、サクラマス、ボラ、スズキなどである。

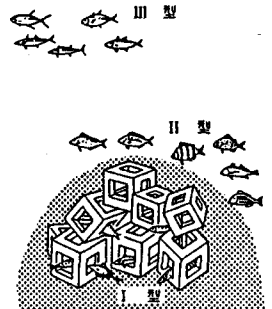


図-6 魚種の定位

2) 水平方向の分布

魚礁を中心とした魚類の水平方向における定位行動を明確にすることは、魚礁に集合する魚類に対して魚礁効果の及ぶ範囲を知ることになり、きわめて重要である。従来の研究によると、魚礁効果の及ぶ範囲はタイプIおよびIIの魚類では概ね 200 m以内、タイプIIIでは概ね 300 m 以内であるとされている。

魚礁機能に関する研究成果の一例

魚礁周辺には潮汐流、海流その他の流動環境があり、流動環境の変化に対応した魚群の来遊、離散が経験的知見として認められている。安永⁴⁾は魚礁の周辺で生じる流況の変化と魚群の集散に関する実験を行い、魚礁機能について検討している。ここではこの実験結果ならびに松見ら⁵⁾の魚礁周辺における流況に関する研究の結果をも示して、説明しよう。

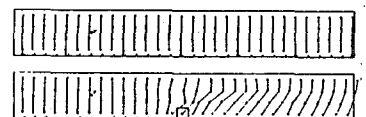


図-7 模型水路の流速分布

図-7は流速 30 cm/sec の一様流による水路中の流速分布を示すものであって、図中の上段は模型魚礁のない場合、下段は模型を設置した場合の流況を示している。模型の周辺、とくに後半部には模型魚礁による縮流効果によって流速が増加する部分と模型の障壁効果によって流速が減少し、逆流する部分が生じている。図-8はこの水路中にイシダイを収容した場合の区画別の滞留頻度を示している。この図からわかるように、最上段の流速 0 cm/sec の非流水時では魚礁模型の前後部に平均して分布しているのに対して、他は、魚礁の後半の緩流部分に偏在する傾向が認められる。一方、流れに対する魚の行動の基本的性状として、走流性が認められている。魚は側線で感知された流れ刺激に応じて上流方向に頭部を向け、流速が小さいうちは遡上、後退を繰り返すが、流速の増大にともなって、多くの場合上流部に定位する。流速がさらに大きくなると、上流での定位が次第に困難となり、後方へ押し流されるようになる。この限界の流速を耐泳限界流速といい、従来の研究によると、魚の全長の約3倍の値であることがわかっている。いま、体長 30 cm の魚の耐泳限界流速は、90 cm/sec となるが、沿岸部でこのような大きな流速は潮流の影響を強く受ける水域以外通常生じる頻度は小さい。したがって、流速が大きくなると耐泳限界流速以下の緩流部分を求めて魚礁に滞留すると解釈するのは早計であろう。いずれにせよ、流動環境下において魚礁へ魚が蟄集する行動を明らかにするために魚礁周辺における水理機構と魚の遊泳行動自体を詳細に検討する必要がある。

松見ら^{5), 6), 7)}はこれらの問題を検討するために、波や流れによる魚礁周辺の流況について実験的に検討するとともに、数値解析をも試みて魚礁周辺の流れの状況を把握し、さらにこれに作用する流図体力をも評価してきた。

図-9は直方体魚礁モデルにおける流況を模式的に示したものであって、魚礁背後に卓越渦および後流渦領域の発生することが実験的に確かめられている。図-10は有孔魚礁（空隙率 43%）周辺の流況を示す数値解析および実験結果の一例であって、図中の横軸は魚礁中心から流下方向への距離を魚礁モデルの高さ a で無次元化した値であり、矢印はそれぞれの位置における流向とその長さで最大流速で無次元化した流速を示し、黒丸は渦系の存在位置を表している。なお、図中の実線は計算結果から判定した後流渦領域を示し、破線は実験結果である。とくに、渦系の存在位置に着目すれば、渦系が魚礁背後の一箇所に集中することおよび魚礁の孔からの流れが認められないことなどは実験の結果ともよく一致していることがわかる。さらに、図-11は群

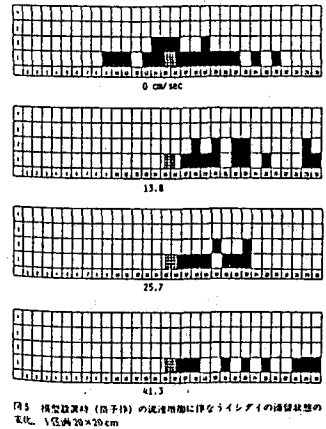


図-8 イシダイの滞留頻度

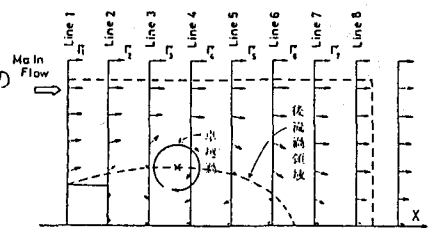


図-9 魚礁背後の流況模式

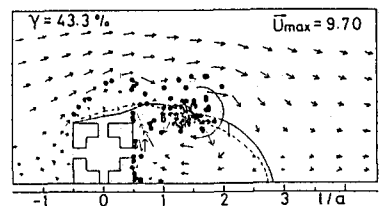


図-10 有孔魚礁周辺の流れ

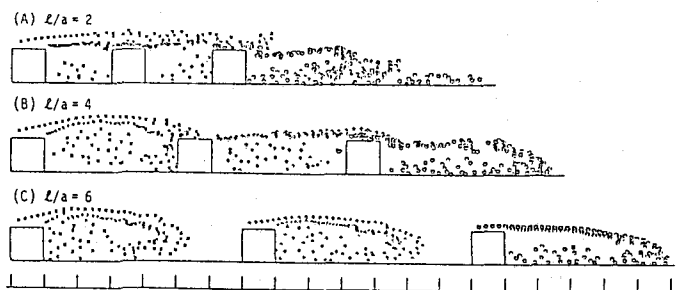


図-11 群体魚礁周辺の流れ

体魚礁周辺の流況を数値計算した結果の中で渦系パターンの魚礁間隔 1 による変化を示したものであって、同図 (C) のように間隔と高さの比が 6 にもなると、群体としての効果が失われることがわかる。

以上の結果からも明らかなように、魚礁背後に魚群が蟄集するとすれば、群体魚礁の最適配置間隔は流れの状況と魚の行動パターンから決定できることになる。

沈設魚礁の安全設計

沈設魚礁の安全設計については上北⁸⁾が詳しく解説している。ここでは沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針⁹⁾と上北の解説に基づいて魚礁の設計法の概略を説明する。魚礁の安全設計は、

- (1) 製作、転置、運搬及び沈設時の外力に対して破壊しないこと、
- (2) 沈設後の波、潮流などの流体力に対し、転倒、移動しないこと、
- (3) 漂砂や流砂現象によって洗掘、埋設が生じないばかりでなく、地盤支持力の不足によって沈下が生じないこと、

などについて検討する必要がある。

A) 沈設時の衝撃荷重

魚礁の設置方法には、海面から投下する方法とクレーン等で吊り下ろす方法があり、いずれの場合も海底に着地するときに大きな衝撃力を生じ、魚礁部材に最大の応力を与えることが多い。したがって、この着底時の衝撃力を外力として構造設計を行う。その結論は次のようである。すなわち、魚礁が海底に着底するときの衝撃力は、着底時慣性力が重力の k 倍になったとして静換算重量で求める。

まず最初、魚礁を海面から投下した場合を考える。いま落下物体及び海水の密度をそれぞれ、 σ および ρ 、落下物体の体積及び流れに垂直な遮蔽面積をそれぞれ V 及び A 、落体の海中における落下速度を v 、重力の加速度を g 、落体の抗力係数及び付加質量係数をそれぞれ、 C_D 及び C_M とすると、海中における落体の運動方程式は

$$\sigma V \frac{dv}{dt} + C_D A \frac{\rho v^2}{2} + C_M \rho V \frac{dv}{dt} = (\sigma - \rho) g V \quad (1)$$

となる。ところが、海中を落下中、落下速度が増加すると落体の水中重量と水の抵抗力が釣り合った状態となり、その後は落体の落下速度が一定になる。この速度を終端速度 v_c といい、式 (1) において $dv/dt=0$ とすれば、

$$v_c = \sqrt{\frac{2gV}{C_D A} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right)} \quad (2)$$

となる。式 (2) を式 (1) に代入し、初期条件 $t=0$ で落下高 $z=0$ 、 $v=0$ で式 (1) を解くと、落下速度は

$$v = v_c \cdot \tanh \left\{ \frac{g(\sigma/\rho - 1)t}{(\sigma/\rho + C_M)v_c} \right\} \quad (3)$$

$$z = \frac{(\sigma/\rho + C_M)v_c^2}{g(\sigma/\rho - 1)} \ln \cosh \left\{ \frac{g(\sigma/\rho - 1)t}{(\sigma/\rho + C_M)v_c} \right\} \quad (4)$$

式 (3) 及び式 (4) において t を消去し、 $z=h$ (水深) における落下着底速度を v_d とすると、結局、

$$v_0 = v_0 \left[1 - \exp \left\{ - \frac{2gh(\sigma/\rho - 1)}{(\sigma/\rho + C_n)v_0^2} \right\} \right]^{1/2} \quad (5)$$

となる。なお、クレーン等で吊り下ろす場合、着底速度は吊り下げ速度、クレーン船の動揺、施工条件を考慮して、 $v_0=1.0$ m/sec とするのが普通である。つぎに、魚礁の着底時における衝撃力について検討しよう。いま、衝突面の地盤反力を R とすると、着底時の運動方程式は

$$\sigma V(dv/dt) + C_0 A \rho v^2 / 2 + C_n \rho V(dv/dt) = (\sigma - \rho) g V - R \quad (6)$$

となる。さらに、地盤反力係数を K とし、着底による地盤の変位を ε とすると、

$$R = K \cdot \varepsilon^n \quad (7)$$

で示される。ここに、 n は定数であり、既設の魚礁の上に新しい魚礁が着底するとき、 $n=1$ 、海底が面形状のとき、 $n=2$ である。

式(7)を式(6)に代入し、 $d\varepsilon/dt=v$ を考慮して、 ε を 0 から ε_{max} まで積分すると、結局、

$$L \varepsilon_{max}^{n+1} - M \varepsilon_{max} - N = 0 \quad (8)$$

が、若干の近似の後に分得られる。ここに、

$$L = \frac{gK}{(n+1)w_0 V}, \quad M = g \left(\frac{w_0}{w_0} - 1 \right) - \frac{C_0 A}{4V} \cdot v_0^2$$

$$N = \left(\frac{w_0}{w_0} + C_n \right) \cdot \frac{v_0^2}{2}$$

である。ここに、 w_0 及び w_0 はそれぞれ魚礁及び海水の単位重量である。式(8)は ε_{max} に関する $(n+1)$ 次方程式となるので、 ε_{max} を求める際にはニュートンの漸近解法によるのが普通である。

ε_{max} が求まると式(7)より最大地盤反力 R_{max} を計算できる。上述したように、部材に加わる慣性力を外力として考えるため、着底時の衝撃力は単位重量が増大したとし、これを静換算重量 σ_0 で表すと、

$$\sigma_0 = k \cdot w_0 \quad (9)$$

となる。ここに

$$k = K \cdot \varepsilon_{max} / w_0 V \quad (10)$$

である。上の計算で、抗力係数 C_0 は 0.63 ~ 2.0、付加質量係数 C_n の値は 1.0 を、また地盤反力係数は $K = 5,000$ ton/m² が用いられている。

なお、既設の魚礁の上に重なる場合については、構造物設計指針に詳しいのでそれを参照されたい。

B) 沈設後における魚礁の安定

魚礁は、海底に沈設後も波や流れなどの外力を受けるので、魚礁の滑動や転倒に対して安定でなければな

らない。さらに、魚礁周辺の洗掘についても検討しておく必要がある。

1 設計波の諸元は信頼できる実測資料あるいは推算に基づく波浪データから求める。なお、対象とする海域において既に実施されている港湾・漁港等の事業がある場合にはその設計沖波が準用できる。次に、この沖波が当該水深に至るまでの屈折、回折、浅水変形を計算し、最も危険な波の有義波高 $H_{1/3}$ 及び有義波周期 $T_{1/3}$ を設計波とする。

2 設計流速 U_z は原則として、設置水深において最大流速が生じると考えられる季節に 15 日間以上の観測されたデータの 1 時間平均の最大値、あるいは潮と分解によって得られた各成分流速の合成値の最大値のうちいずれか大きい流速をとり、その 1.6 倍した値を設計流速とする。

3 魚礁に働く波力、潮流力：水深 h の海底面上に高さ d の魚礁が沈設されているとき、潮流の流速を U_0 、魚礁の頂面における波の水粒子水平速度及び加速度をそれぞれ u および du/dt とすると、魚礁に作用する合力 F は

$$F = (w_0/2g)C_D A(U_0+u)^2 + (w_0/g)C_H V \cdot du/dt \quad (11)$$

と表される。波のない場合には、 $u=0$ 、 $du/dt=0$ とおけるから、潮流力は

$$F = (w_0/2g)C_D A U_0^2 \quad (11)'$$

となり、また波力のみの場合には、式(11)において $U_0=0$ であるから、

$$u_m = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh(2\pi d/L)}{\sinh(2\pi h/L)}$$

とすると、 $F_D = (w_0/2g)C_D A u_m^2$ 、 $F_H = (2\pi w_0/gT)C_H V u_m$ を用いて

$$\begin{aligned} F_H > 2F_D & \quad F_{max} = F_H \\ F_H < 2F_D & \quad F_{max} = F_D + [1 + (F_H/2F_D)^2] \end{aligned} \quad (12)$$

となる。さらに、波と流れが共存する場合には、 $U_0/u_m = \alpha$ とすると、

$$F_{max} = [F_D(\alpha + \sin\theta)^2 - F_H \cos\theta]_{max} \quad (13)$$

によって、作用力の最大値を計算できることになる。

4 魚礁の滑動、転倒に対する安定：魚礁に作用する力を F_{max} 、海底面との摩擦係数を μ 、魚礁の空中重量を W とすると、滑動に対する安全率 S_F は、

$$S_F = \frac{\mu(w_0 - w_0)V}{F_{max}} = \frac{\mu W(1 - w_0/w_0)}{F_{max}} > 1.2 \quad (14)$$

である。また、魚礁に作用する力の作用点の海底面からの高さを h_0 、魚礁の転倒に対する回転中心（一般に力が作用する下流側海底面と交わる点）から魚礁重心までの水平距離を r_0 とすると、転倒に対する安全率は、

$$S_F = \frac{(W_0 - W_0)Vr_0}{F_{max} h_0} = \frac{W(1 - W_0/W_0)r_0}{F_{max} h_0} > 1.2 \quad (15)$$

で与えられる。

5 魚礁の洗掘，沈下埋没：楳木ら¹⁰⁾ は中空角型魚礁模型を用いて実験を行い，振動流における洗掘現象を検討している。とくに，角型魚礁の体積空隙率の変化と魚礁周辺に発生する縮流渦流に起因する局所洗掘の発生領域，砂移動と流況特性の関連性を明らかにしている。その結果を紹介すると，魚礁周辺の局所洗掘は流れが直角に当たる魚礁前面の下降流と前面における縮流の相互作用によって生じる外向きの流れに起因して砂が移動する。さらに隅角部に発生する鉛直渦流による砂の巻き上げによって隅角部で逆円錐型の洗掘孔を生じる。次に逆向きの流れによって若干の埋め戻しをともないつつ魚礁前面に広がっていく。図-11はこの様子を魚礁周辺の洗掘による地形変動として模式的に示したものである。この図からわかるように，魚礁が中空であるかないかによって洗掘形態が異なり，中空の場合洗掘の進行にともない魚礁底面の孔から砂が入り込み，魚礁が入り込んだ砂の山の上に乗る状態になる。また魚礁の最大沈下量，隅角部洗掘深さは kc 数，空隙率に関係することが明らかにされている。

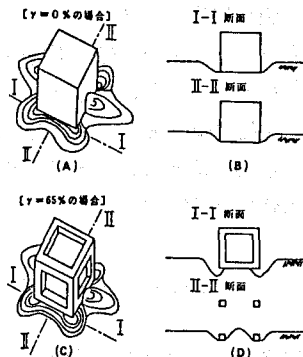


図-12 魚礁周辺の洗掘模式図

3・2 浮魚礁

図-5に示すように，浮魚礁は主として回遊魚を誘導するための誘導魚礁として，表中層に設置される。そのため設置される水深は 70 m より深く，誘導効果とともに集魚や滞留効果も認められている。浮魚礁の原型は山陰地方で古くから用いられてきた「シイラ漬」と呼ばれる漁法にヒントを得て考案されたようである。図-13は現在利用されている浮魚礁の一例を示したものであって，その構造は標識部，魚礁部からなり，魚礁部はさらに浮上部（魚礁本体，浮子体），係留索，アンカー及び連結部から構成されている。また主要部の材質はFRP，鋼材のような剛性のものあるいは漁網やロープからなる可とう性のものなど，その形状，構造も種々様々である。

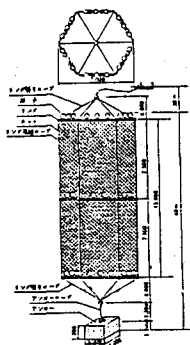


図-13 浮魚礁

小川¹¹⁾によると，昭和48年小名浜沖に設置された浮魚礁が低気圧による波浪で流失したこと，また昭和58～59年，高知沖で同様の施設もかなり流失していることが報告されている。¹²⁾ こうした事例をみると，浮魚礁については，波や流れによる設計外力の評価，設計計算法，生物付着による浮力の低下，繰返し荷重による部材の疲労，海水による腐食や劣化などなお未解決の問題が多い。浮魚礁の機能，とくに回遊資源に対する漁獲効果については北原ら¹³⁾ がくわしく検討しているが，紙数の関係からここでは省略する。図-13は鳥取県が設置した浮魚礁を示すものであって，直径 7 m 全長 15 m の網状円筒垂直型の浮魚礁で，その本体の形状を維持する主骨材リンクには鋼管を用い，防蝕のためポリエチレン樹脂の肉厚被覆を施し，その他の部材は合成繊維ロープ，網で構成されている。係留索はテトロンバラエイトであり，これを空中重量 25 ton のコンクリートアンカーに連結し，水深 70 m の位置に設置した。なおこの魚礁の天端深さは 15 m である。この浮魚礁の設計は潮流力に対して考慮されているが，波浪については特別の配慮が払われていない。

浮魚礁の安全設計

潮流力による浮魚礁の安全性は次のようである。すなわち、浮体の固有振動周期が波の周期に対して十分大きく共振しない場合、浮魚礁の傾斜角 ϕ は

$$\begin{aligned}\phi &= \tan^{-1}(F_0/N), \\ F_0 &= (w_0/2g)(\sum C_{Di}A_i)u_0^2 \\ N &= (w_0 - w_g)V\end{aligned}\quad (16)$$

ここに、 N ：余剰浮力、 w_0, w_g ：海水及び浮魚礁の単位重量、 C_{Di} ：各形状に応じた抗力係数、 A_i ：浮魚礁の流れに垂直な射影面積、 u_0 ：潮流流速であり、係留索に作用する張力 T_H は、

$$T_H = N/\cos\phi + F_{max}\quad (17)$$

であり、 F_{max} は式(11)'で与えられる。

一方、著者ら^{(14),(15)}は、浮魚礁の波による動的応答の問題を理論的並びに実験的に検討し、浮魚礁の波力に対する安全性についていくつかの提案を試みてきた。ここではそれらの成果を簡単に説明しよう。

図-14は浮魚礁の模式図とその座標系を示すものであって、海底の1点で係留された長さ L の円柱浮魚礁と、それに作用する流体力 F_H, F_v を表している。著者らは、浮体の余剰浮力が流体力の鉛直成分に比べて大きく、かつ浮体の運動が波の進行方向を含む2次元平面内に限られると仮定して、この問題を倒立剛体二重振子の二自由度系の振動問題として取扱い、点 P_1 回りの係留索角 θ_1 と点 P_2 回りの浮体回転角 θ_2 に関する2自由度系の定常強制振動を表す運動方程式を導き、 θ_1, θ_2 に対する強制振動の理論解を求めた。

さらに、浮魚礁に作用する波力の水平及び鉛直成分 F_H 及び F_v と浮体の回転運動による遠心力 F_c も求めた。すなわち、

$$\begin{aligned}F_H &= -(1+K_{v1})\rho DL_a u_m \omega \{\sinh k(L_a + \ell) - \sinh k\ell\} \sin \omega t \\ &\quad + C_D \rho DL_a (u_m^2/8k) \{\sinh 2k(L_a + \ell) + \sinh 2k\ell + 2k\ell\} \cos \omega t \\ F_v &= -(1+K_{v1})\rho DL_a (\omega/k) \{\cosh k(L_a + \ell) - \cosh k\ell\} \cos \omega t \\ F_c &= -(\rho_g + K_{v1}\rho)V(d\theta_1/dt)(L_a/2)\{1+(2\ell/L_a)\}\sin^2(\omega t - \phi_1) \\ &\quad -(\rho_g + K_{v2}\rho)V(d\theta_2/dt)(L_a/2)\sin^2(\omega t - \phi_2)\end{aligned}\quad (18)$$

と与えられる。ここに、 $u_m = \pi H/T \sinh kh$, $k = 2\pi/L$, $\omega = 2\pi/T$, D は円筒浮体の直径、 V は浮体容積、 ρ_g は浮体の密度、 ℓ は係留索長、 K_{v1} 及び K_{v2} はそれぞれ水平及び鉛直方向の付加質量係数、 H は波高、 L は波長、 T は波の周期、 h は水深、である。

以上の結果を利用すると、係留索長力 T_1 は力の釣合式から

$$T_1 = \{[F_v + (\rho_g - \rho)gV]^2 + F_H^2\}^{1/2} + F_c - (\rho - \rho_g)gV\quad (19)$$

のように得られる。図-15は波の1周期における表面波形 η 、係留索角 θ_1 、浮体回転角 θ_2 、係留索張力 T_1 の時間的変化を示した一例であり、実線が理論値、丸印が実験値を表している。なお、実験条件は、 $H/L = 0.023$, $h/L = 0.161$ であり、係留索角、浮体回転角にわずかな相違がみられるが、係留索張力は理論と

実験が非常によく一致していることがわかる。図-16は最大係留索張力の無次元値と波形勾配の関係を h/L の値をパラメータとして示したものであって、理論値と実験値がほぼ一致していることがわかる。

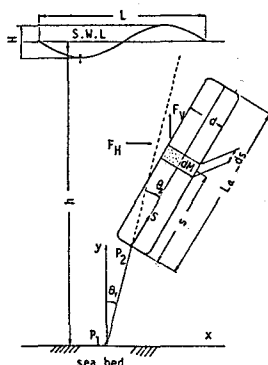


図-14 浮魚礁の座標系

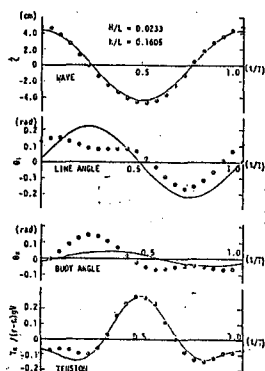


図-15 張力等の時間変化

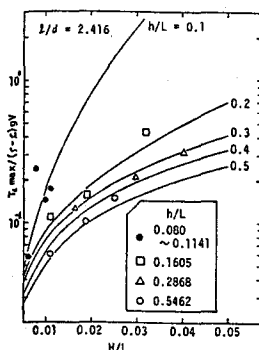


図-16 索張力と H/L との関係

4 おわりに

以上、マリノーション構想を中心に、水産土木の現状を述べてきたが、土木工学の中ではそれほど注目される分野でないため、土木技術者の関心も比較的低かったように思われる。しかしながら、民間企業等においても今日各種の魚礁を中心とした計画、建設の提案がなされるようになって、水産土木に関する関心もようやく高まってきたようである。著者も当初は鳥取県海岸におけるこの種の問題にやむを得ず取り組まざるを得なかった事情はあるにしても、実際に研究を始めると、未解決の課題が多く、また水産学、生態学の研究者等との協同研究、情報交換等をつうじて、土木技術者として未知の分野における多くの知見を得ることができた。

なお、研究はまだ緒についたばかりであり、魚礁の配置計画や海水制御の問題には触れることができなかった。さらに今後、各種の沿岸利用開発計画が実施されるようになってと思われるが、それらの調整には国土の総合開発計画にみられるような、沿岸海域の総合利用開発計画が必要になるとと思われる。

参 考 文 献

- 1) 中村 充：マリノーション計画における水産土木の課題，第33海講シンポジウム，1986, pp.29-37.
- 2) 東 諒：マリノーション構想（第二次基本構想案），水産土木，1986, Vol.22, No.1, pp.67-84.
- 3) 瀬戸口 明弘・庄司 泰稚：魚礁における魚群分布について，海洋科学，Vol.19, No.3, 1987, pp.153-158
- 4) 安永 義暢：魚礁に対する魚の反応，水産土木，海洋科学，Vol.19, No.3, 1987, pp.147-151.
- 5) 松見 吉晴・瀬山 明：群体魚礁周辺の流況特性について，第32回海講，1985, pp.652-659.
- 6) 榎木 亨・松見 吉晴：魚礁背後の流況特性について，第28回開講，1981, pp.387-391.
- 7) 榎木 亨・松見 吉晴・林 健児：有孔魚礁周辺の流況シミュレーション手法について，第29回海講，1982, pp.506-510
- 8) 上北 征男：人工魚礁の安全設計，海洋科学，Vol.19, No.3, 1987, pp.139-145.
- 9) 全国沿岸漁業振興開発協会：沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針，1984.
- 10) 榎木 亨・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回海講，

1984, pp.345-349.

- 11)小川 良徳：浮魚礁の歴史と開発研究の動向，OCEAN AGE,1981,July,pp.11-16.
- 12)池本 一・黒岩 隆：浮魚礁の施設構造面からみた問題点，水産土木，Vol.23,no.2,1987,pp.43-50.
- 13)北原 武・北沢 博夫・杜多 哲：人工魚礁の回遊資源に対する漁獲効果の算定について，水産土木，Vol.23,No.3,1987,pp.13-20.
- 14)松原 雄平・野田 英明：浮魚礁の実用化に関する研究，第29回海講，1982,pp.496-500.
- 15)松原 雄平・野田 英明：浮魚礁に作用する波力に関する研究，第31回海講，1984,pp.491-495.