

# ミティゲーションの調査分析と沿岸域環境管理の枠組の提案

磯 部 雅 彦\*

## 1. はじめに

ミティゲーション(環境緩和)は, アメリカにおいて制度化されている環境管理手法である。このシステムには日本における自然環境の維持・増進にも役立つ要素が含まれているものの, そのままの形で導入には無理があり, またアメリカにおいてもミティゲーションだけで十分な環境対策となっているわけでもない。したがって, ミティゲーションにおける概念や知識・技術を要素分析的に把握し, 総合的な環境管理の中で再構成することによって, その内容を活かしていくのがよいと思われる。そこで本研究では, まず, アメリカにおけるミティゲーション制度の最新動向について, ミティゲーションバンキングを中心に調査分析した結果を述べる。

また, 日本の沿岸域環境の管理においては, 干潟を含む砂礫浜や泥浜の保全が最重要事項の1つであることから, アメリカにおける砂浜の管理の考え方や現状を紹介するとともに, 日本における砂浜・干潟の造成例を若干レビューする。

最後にこれらを念頭に置いて, 沿岸域環境の総合的管理の枠組みについて考察し, その基本構造を提案するとともに, その中に海岸工学における個々の要素技術・研究を位置づけ, 将来の方向性を提案する。

## 2. アメリカにおけるミティゲーションの動向

### (1) ミティゲーションの評価

ミティゲーションの定義はアメリカ環境保全審議会(Council on Environmental Quality, CEQ)によって5項目が与えられている。また, ミティゲーション制度を実施するための, 環境庁とアメリカ陸軍の合意メモ(EPA and US Army, 1990)によれば, 埋立行為などを行う場合の悪影響を, まずできるだけ回避し(avoid), 次に最小化し(minimize), さらに残る悪影響の代償措置を行う(compensate)ことになっている。しかし, 実際には代償措置(compensatory mitigation)の部分が単にミティゲーションと呼ばれることが多い。本論文ではこの代償措置の部分を取り扱うが, 代償措置には, 創造(crea-

tion), 修復(restoration), 増強(enhancement)があり, これらを環境創出と呼ぶことにする。なお, 代償措置で特殊な場合には, 保存(preservation)も行われている。

磯部(1996)に紹介したように, ミティゲーションの成功率は低い, カリフォルニア沿岸保全事業団(California State Coastal Conservancy)がウェットランドの修復そのものを目的として行った事業では, 成功率が6割に達している。このような報告から, ミティゲーションの改善策として期待されているのがミティゲーションバンキングである。

### (2) ミティゲーションバンキング

ミティゲーションバンキングは, 小規模なミティゲーションを多数行う代わりに, まとまった大規模なミティゲーションを行うことにより, 成功率を高めようとするものである。

ミティゲーションバンクが環境創出をあらかじめ実施することによってクレジットを獲得し, それを多数の小規模な開発主体に売却することになる。ミティゲーションバンキングに関しては様々な議論が行われてきた(Lewis, 1992; Kusler and Lassonde eds., 1992)。この制度の利点として, 1)大規模で集約的環境創出の方が, 質の高い環境ができる, 2)また, 経済的である, 3)専門的知識・技術を用いることにより, 環境創出の質が高くなる, 4)事後のモニタリングが行いやすい, 5)開発に先立つ事前の環境創出となるため, 失敗のリスクが低い, などがある。欠点としては, 1)オフサイト(開発影響と代償措置の場所が異なる)で, アウトオブカインド(開発影響と代償措置の生物種が異なる)のミティゲーションとなる, 2)開発者にとっては環境問題を金銭で解決できるので, 開発を助長することになる, などがある。

メリーランド州, フロリダ州, ミネソタ州では規則の整備を含めて, ミティゲーションバンキングが進められている。フロリダ州を例にとると, 州法において, 1993年にミティゲーションに関する条文をウェットランドから水資源の章へ移すとともに, ミティゲーションバンキングを積極的に奨励する方針をとった。行政規則により, 州全体を流域単位に分割し, 開発を行う際にそれぞれの内部におけるクレジットを用いることができるように

\* フェロー 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科

することで、流域単位での環境保全を図っている。

IWR (1994) には、1992 年 7 月時点までのミティゲーションバンクを調査した結果がとりまとめられている。その時点で存在したバンクは 46 件であり、それらの規模は 10 ha 未満や 10~100 ha で約 3/4 を占める。バンクが存在する 17 州のうち、カリフォルニア州が最大で 11 件、フロリダ州は 8 件を数えているが、これらは 1980 年代の開発圧力が高かったためであり、他の州では 4 件以下となっている。また、75% 近くのバンクは州の道路局、港湾管理者、地方自治体によるもので、公共事業に対するミティゲーションのためのものである。クレジットを一般に売却するためのバンクとしては、民間に 1 件、公共・非営利団体のもので 3 件のみであったが、調査時点で提案されている 64 件のうちでは、クレジット販売を行うものが、民間で 15 件、州・地方自治体で 17 件あった。

IWR (1996a) はさらに 1995 年夏時点で、クレジットの商業取引を行うミティゲーションバンクを対象に調査したところ、稼働中が 24 件、提案・計画中が 53 件で、合計 77 件あった。その主な分布は、大西洋側南部に 23 件、大西洋側北部に 17 件、太平洋側南部に 12 件となっている。この中では、ミティゲーションバンキングの規則を整備した 3 州やカリフォルニア州に多く、制度の整備が推進力となっているといえる。

### (3) 環境評価手法

ミティゲーションにおいては、代償措置によって創出される環境が、開発などによって悪影響を受ける環境に比べて、定量的に等しいかそれ以上であることを評価する必要がある。このためには、環境の評価手法が不可欠であり、種々の方法が開発されている (IWR, 1994)。大別すれば、1) 面積 (Acreage) のように単純な指標、2) Habitat Evaluation Procedure (HEP) が特定の生物種のみを対象とするように、限定的な指標、3) Wetland Evaluation Procedure (WET) やそれから発展した Hydrogeomorphic Assessment (HGM) が水資源・洪水調節機能や生物の多様性と量などを含むように、広範囲の指標、4) 専門家が経験に基づいて評価する Best Professional Judgment (BPJ) などがある。

#### a) HEP

HEP は魚類野生生物保護局 (Fish and Wildlife Service) が開発した環境評価手法であり (USFWS, 1980)、まず生態系を代表する生物を何種類か抽出し、理想的な環境条件のもとでの密度に対してどの割合で生息する (と予想される) かを指標化したものを生息場適合度指数 (Habitat Suitability Index, HSI) とする。抽出されたすべての生物についての HSI を、対象となる面積に対して積算したものを Habitat Unit (HU) として、評価指標に用いる。ロングビーチ港のピア J の埋立の代償措置とし

てアナハイム湾での修復を行ったときの表が Knatz (1987) に報告されている。

HEP においては、環境創出を行った場合の HSI を予測する必要がある。オリジナルの HEP によれば、個々の生物種ごとに水質と底質の条件から HSI を評価するためのモデル、すなわち生物種モデルを用いることになっている。図-1 には、メキシコ湾ヒラメ (Gulf Flounder) の例が示されている (Enge and Mulholland, 1985)。ヒラメの生息密度が、水温、塩分濃度および溶存酸素 (DO) に代表される水質と、粒径に代表される底質によって決定するというモデルである。それぞれの適合度 (Suitability Index) は、塩分濃度について図-2 に示すように、0 から 1 までの値をとるように評価されている。その上で、図-1 中の式にしたがって、HSI を求める。このような生物種モデルは塩性湿地に対して数種類ある。

ここでみられるように、環境評価においては、生物の生息という複雑な事象を、その生息環境となる物理・化学的な環境条件の関数として関係づけることになる。現状ではデータの不足のため、精度に問題があるものの、将来の方向性を示すものであろう。

#### b) HGM

HGM は陸軍工兵隊によって開発された湿地帯 (wetland) の評価手法であり、水理、生態を含む湿地帯の多様な機能を、水理・地形学に基づいて評価するために開発された。評価対象となる機能は、塩性水際線帯湿地 (tidal fringe wetland) に対しては、水理・地形学的機能として

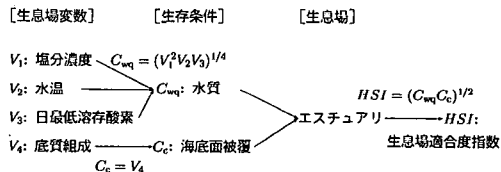


図-1 HEP におけるヒラメの生息場適合度指数 (HSI) の評価モデル

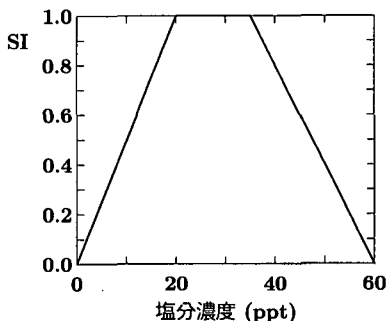


図-2 HEP におけるヒラメモデルでの塩分濃度の適合度指数 (SI) の評価例

高潮減衰機能、栄養塩・有機炭素交換機能、粒子沈殿機能、および生息域機能として植生維持機能、定住性遊泳生物利用機能、移住性遊泳生物利用機能、遊泳生物餌場機能、野生生物生息機能である。これらが水理学・地形学的変数や植生などの生態的変数から、それぞれ0から1の間で評価される。しかし、それらは性質の異なるものであることから、集計して総合点にすることは考えられていない。

HGMにおいては、物理・化学的条件に加えて、植生などが独立変数に用いられているが、予測評価においてはさらにこれらを物理・化学的条件からどのように予測するかが問題となろう。

c) 環境評価手法の適用例

環境評価手法のどれを適用するかについては、一定した基準があるわけではなく、ケースごとに決められる。しかし、代償措置では主に生物生息の補償が行われることや、結果が1価関数となって代償措置の必要面積が一義的に決定するという特徴から、HEPが用いられることが多い。図-3は、前述の1992年調査でのミティゲーションバンキング46件のうちの評価手法別件数を示したものである。HEPとならんでAcreageが多いのは、小規模なバンクにおける評価での煩雑さを避けるためであると考えられる。

また図-4は、代償措置の面積と開発影響を受ける面積との比、すなわちミティゲーション比率を示しているが、最低が1:1である。ミティゲーションバンキングでは、環境創出の成功が確認されたものに比べて、施工直後などで成功の判定が難しい時点ではミティゲーション比率を大きくすることにより、失敗による損失リスクを補っている。一般に、ミティゲーション比率は修復、創造、増強の順に上昇する。たとえば、EPA第IV地域のガイドライン案では、詳細な情報が得られない場合には、修復で2:1、創造で3:1、増強で4:1、保存で10:1とするとしている (IWR, 1994)。

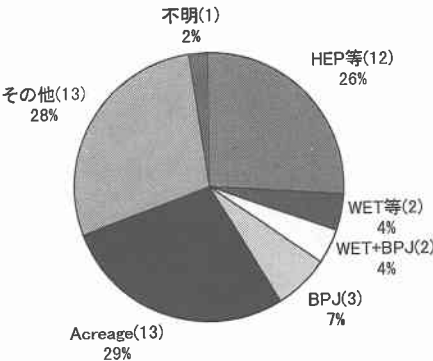


図-3 ミティゲーションバンキングで用いられた環境評価手法の分布

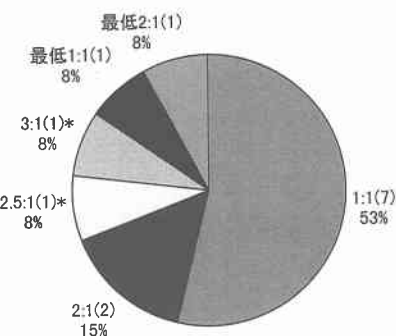


図-4 Acreageによるミティゲーション比率

(4) ミティゲーションの事例

ここでは、ミティゲーションにおける環境評価や環境創出技術に関する資料が多く得られたパティキトスラグーンを中心に、ミティゲーションの事例を紹介する。

Appy (1991)によれば、ロサンゼルス港では2020年完成を目指して、2020プランと呼ぶ大規模な港湾機能の拡張工事を行っている。この中でピア300および400を合わせて約300haの埋立が行われることになるが、この環境影響に対するミティゲーションクレジットを得るために、約240haのパティキトスラグーンの増強が行われることになった。設計に際しては、主に表-1に示す3種類の代替案が検討された。環境影響評価書 (City of Carlsbad and US Army Corps of Engineers, 1990)を見ると、タイダルプリズムを十分にとってインレットの閉塞を避けること、現状の生息域の変更を避けること、生息域の多様性を確保すること、などから修正B案が採用されている。そして、施工計画においては、浚渫砂を太平洋に面した海岸の養浜砂として有効利用するために、浚渫・投入の手順が決定された。このプロジェクトの施工は1997年1月に完了した。

このプロジェクトによるミティゲーションクレジットの評価はHEPを用いて行われた。しかし、生物種モデ

表-1 パティキトスラグーンの増強の代替案

| 領域区分     | 標高                | 単位     | 代替案        |            |            |
|----------|-------------------|--------|------------|------------|------------|
|          |                   |        | A          | B          | C          |
| 潮下帯      | (<-0.5 m MLLW)    | (ha)   | 76         | 60         | 46         |
| 潮間帯      | (-0.5~1.2 m MLLW) | (ha)   | 49         | 58         | 68         |
| 塩性湿地     | (1.2~2.1 m MLLW)  | (ha)   | 64         | 65         | 72         |
| 遷移帯      | (>2.1 m MLLW)     | (ha)   | 15         | 15         | 15         |
| 営巣地      | (=3.2 m MLLW)     | (ha)   | 13         | 13         | 13         |
| 合計       |                   | (ha)   | 241        | 241        | 241        |
| 勾配       |                   |        | 1/10~1/320 | 1/10~1/320 | 1/10~1/360 |
| タイダルプリズム |                   | (万 m³) | 184        | 170        | 159        |

ルを使わずに、専門家が付近のラグーンとの比較などを行うことによって、経験に基づいて HSI を評価するものであり、修正 HEP と呼ばれている。この方法は、先行事例であるアナハイム湾での修復事業に使われたものであり、担当者によれば、より多くの生物種を評価対象とする事ができるという利点を有している。

この他の最近のミティゲーションの事例として、ボラスチカウェットランドの修復事業がある。このウェットランドは農地や宅地開発と石油掘削によってウェットランドとしての機能を失ったのであるが、ロサンゼルス・ロングビーチ港の拡張事業の代償措置として 560 ha の修復事業が進められている。この事業では、表土を掘削して海水が導入されるが、その資金を港湾管理者が州政府に拠出し、それを修復事業に使うという補償金の支払の形式になっている。

ミティゲーションにおける代償措置とならんで、単独の環境修復事業が行われていることも見逃せない。サンフランシスコ湾に面するソノマペイランドでは、浚渫土砂を利用して地盤沈下した 480 ha のウェットランドに土砂を投入し、所定の水深を取り戻すようにしている。その際、ウェットランド内部に波除堤として機能する半島状の堤防を設けてフェッチを短くし、波による底質の巻き上がりを避けるようにするとともに、所用水深の最後の 1 フィートは自然の土砂の堆積を待つような設計にしてある。なお、環境修復事業では、その便益費用比によってその妥当性を示す努力がなされているが、経済的手法を用いてもまだ確立された手法とはなっていない。

このような事例を技術的側面から総合すると、環境創出の設計に際して、特に、底質粒径を含めた地形を自然の外力によって安定的に創り出すことが最重要事項であることが理解できる。

### 3. アメリカにおける海岸保全

ここで、アメリカでの砂浜の管理を概観する。アメリカにおいては、1972 年に制定され、その後強化されてきた沿岸域管理法に基づいて、各州が沿岸域管理計画を策定している。たとえば、フロリダ州の沿岸域保護法 (Coastal Zone Protection Act of 1985) では、「沿岸域は生態系、および公共の健康、安全、福祉に重要な役割を果たす」とした上で、「沿岸域が高潮に対する第 1 の防護線になり、デューン (砂丘) が防災機能を果たしている、構造物の設置が危険を増加させ社会的費用を増す可能性がある」と記述されている。これを受けて、できるだけ海岸構造物の設置を避け、養浜などによる海岸保全を実施している。そこでは、砂浜-砂丘システムを一体的に捉え、砂丘に植栽し、立入禁止にして保護し、それによって防災、砂浜維持、生態機能維持に対する効果を

表-2 アメリカの海岸侵食と陸軍工兵隊による対策状況 (km)

| 地 域               | 海岸線全延長  | 海岸侵食   |       | 対策<br>施工済 | 未施工<br>調査等 |
|-------------------|---------|--------|-------|-----------|------------|
|                   |         | 有意     | 深刻    |           |            |
| 大西洋岸北             | 13,870  | 12,000 | 1,760 | 125       | 639        |
| 大西洋岸南<br>・メキシコ湾岸東 | 23,530  | 4,540  | 1,580 | 172       | 329        |
| メキシコ湾岸中央          | 3,120   | 2,540  | 50    | 11        | 0          |
| メキシコ湾岸西           | 4,030   | 580    | 160   | 7         | 13         |
| 五大湖岸              | 5,920   | 2,030  | 350   | 24        | 3          |
| アラスカ              | 76,120  | 8,210  | 160   | 0         | 0          |
| 太平洋岸北             | 4,570   | 420    | 110   | 0         | 0          |
| 太平洋岸南             | 2,910   | 2,490  | 130   | 24        | 100        |
| ハワイ               | 1,500   | 180    | 50    | 0         | 0          |
| 合 計               | 135,570 | 32,990 | 4,350 | 363       | 1,086      |

得るとともに、維持される砂浜をレクリエーションなどに利用するという方針がとられている。また、インレットにおいて、土砂収支計画を策定するようにしていることは、合理的な海岸管理に不可欠な要素である。また、カリフォルニア海岸法 (California Coastal Act of 1976) にも同様の趣旨が見られる。

表-2 は、アメリカの地域ごとの海岸線延長、および侵食を受けている海岸線と陸軍工兵隊による対策の状況についてとりまとめたものであるが、対策の内容を調べると 1960 年代から 1970 年代にかけて海岸保全における養浜の事業費が構造物建設費を上回るようになった (IWR, 1996 b)。このようなことから、砂浜地形を保存するという方針が理解される。

### 4. 日本における砂浜・干潟の造成事例

日本でも砂浜や干潟が造成されている。東京湾内での幕張、検見川、稲毛、船橋、葛西、金沢八景での養浜や、広島五日市の人工干潟を見ると、定量的なデータは得られないものの、海浜地形が侵食されずに安定化している海岸で、ベントスを始めとする生物の生息が多い傾向が見うけられる。

### 5. 沿岸域環境管理の枠組

以上のように、沿岸域環境を考える上では、地形の安定性を代表とする物理・化学的条件が基礎となっていることが理解できる。このような認識に立って、沿岸域環境管理の枠組みを考察する。

環境とは、主体が認識できるすべてのものであり、単に生物・生態系のみならず、防災、および利用を含めて 3 つのカテゴリーが沿岸域では考えられる。これらの 3 カテゴリーは互いに相容れないように見えるが、海岸地形や、気象・海象・地象、大気質・水質・底質などの共通した基盤条件の上に成り立つものであり、図-5 およ

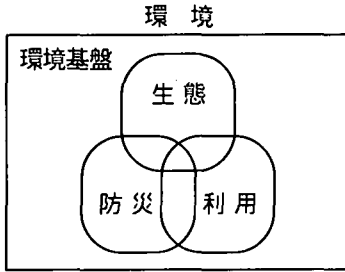


図-5 環境の基本構造

表-3 沿岸域環境の構成

| 環境基盤                       |    | 海岸形態 (岩礁海岸・砂礫海岸・泥浜海岸), 地形<br>気候 (気象, 大気質, 光, 音, 臭い)<br>水圏 (海象, 水質, 海底地形, 底質)<br>地圏 (地象, 底質, 地下水, 地表水)                                                                                                                                        |
|----------------------------|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 環<br>境<br>カ<br>テ<br>ゴ<br>リ | 生態 | 生態系 (物質・エネルギー循環)<br>プランクトン, ベントス, 魚類, 鳥類, 哺乳類, 海<br>草, 海藻, 海浜陸上植物                                                                                                                                                                            |
|                            | 防災 | 海岸侵食<br>波浪・高潮, 風, 洪水<br>地震・津波                                                                                                                                                                                                                |
|                            | 利用 | 交通 (港湾, 漁港, 空港)<br>エネルギー基地 (発電所, エネルギー備蓄基地)<br>資源 (石油・鉱物資源, 波・潮汐・潮流・温度差エ<br>ネルギー)<br>水産業 (漁場, 養殖場), 農業 (農地)<br>工業 (工場), 商業 (オフィス), 都市 (住宅)<br>レクリエーション (海水浴, 潮干狩, 釣り, 散策,<br>観光見物, サーフィン, ヨット・ボート, キャ<br>ンプ, サイクリング)<br>空間 (廃棄物・建設残土・浚渫土砂処理) |
| 総合環境                       |    | ランドスケープ (景観)                                                                                                                                                                                                                                 |

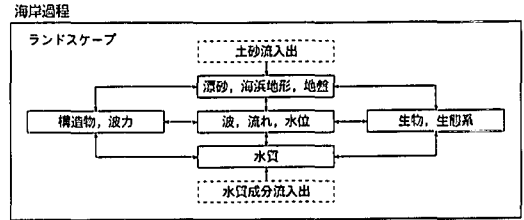


図-6 海岸過程の構成

また、ミティゲーションに関しては、沿岸域の環境基盤の維持・創出によって環境容量を増大させ、その一部を将来の開発・防災のためのミティゲーションクレジットとすることにより、生態・防災・利用のすべての面の増進を実現していくことができる。そのためには、国などがミティゲーションバンキング的な沿岸域の環境創出を進めるための制度も必要となろう。

### 参 考 文 献

- 磯部雅彦 (1996): 米国のミティゲーションの動向と日本への適用における課題, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1156-1160.
- Appy, R. G. (1991): Enhancement of subtidal and intertidal estuarine habitats in southern California, Proc. Japan-U.S. Symp. on Artificial Habitats for Fisheries, pp. 259-268.
- City of Carlsbad and U. S. Army Corps of Engineers (1990): Batiquitos Lagoon Enhancement Project Final EIR/EIS.
- Enge, K. M. and R. Mulholland (1985): Habitat suitability index models: Southern and Gulf flounders, Biological Rep. 82 (10.92), Fish and Wildlife Service, US DOI, 25 p.
- EPA and US Army (1990): Memorandum of agreement between the Environmental Protection Agency and the Department of Army concerning the determination of mitigation under the Clean Water Act Section 404(b) (1) guidelines, Wetlands Deskbook, Environmental Law Institute, Washington, D. C., pp. 331-336.
- IWR (1994): Wetland Mitigation Banking, IWR Rep. 94-WMB-6, Institute for Water Resources, 178 p.
- IWR (1996 a): Commercial Wetland Mitigation Credit Ventures: 1995 National Study, IWR Rep. 96-WMB-9, Institute for Water Resources, 45 p.
- IWR (1996 b): Analysis of the U.S. Army Corps of Engineers Shore Protection Program, IWR Rep. 96-PS-1, Institute for Water Resources.
- Knatz, G. (1987): Offsite habitat mitigation banking: The port of Long Beach experience, Proc. Coastal Zone '87, pp. 2530-2543.
- Kusler, J. A. and C. Lassonde eds. (1992): Proc. National Wetland Symposium, Effective Mitigation: Mitigation Banks and Joint Projects in the Context of Wetland Management Plans, 220 p.
- Lewis, R. R. (1992): Why Florida needs mitigation banking, National Wetlands Newsletter, Vol. 14, No. 1, p. 7.
- USFWS (1980): Habitat Evaluation Procedures (HEP), ESM 101, 102, 103, US Fish and Wildlife Service, Dept. of Interior, Washington D. C., 158 p.

び表-3にあるように、それは環境基盤と呼ぶべきものである。そして、これらは水、土砂、栄養塩、汚濁物質などの収支のバランスの上に成立するものであり、たとえば地形に対しては河川や海岸を含む流砂系における土砂収支のバランスを確保する必要がある。環境基盤の質を向上させることによって、生態、防災、利用のすべての可能性を高める、言い換えれば環境容量を増大させることが、海岸環境管理においてまず第一に考えられるべきであろう。

そして生物・生態系を考える場合、生物そのものを人為的に制御することは難しいことから、HEPにみられるように、物理・化学的な生息条件と生物生息との関係を明らかにして、生息条件を制御していく必要がある。図-6は、物理・化学的条件と生物・生態系との関係の構造を模式的に示したものであり、右側の3つの矢印の関係を明らかにし、地形、波・流れ、水質を制御しながら、好ましい生態環境を創り出していくという方向が、生態系に対する有力なアプローチの方法であり、これに沿った研究が必要となろう。