

沿岸海域の生物資源持続性の評価：太田川—広島湾流域圏の環境と生物資源の遡及的アプローチによる試み

藤井直紀^{†1}・上 真一

Assessment of Bioresource Sustainability in Marine Coastal Waters: An Attempt Based on Retrospective Studies in the Area of Ohta River Catchment and Hiroshima Bay

Naoki FUJII¹ and Shin-ich UYE

Many enclosed coastal seas are environmentally deteriorated with concomitant decrease in fisheries production and need a proper management to aim the sustainability of bioresources therein. This study has two objectives: one is to establish proper criteria to indicate the sustainability of bioresources and the other is to actually assess the sustainability for Hiroshima Bay. We examined the historical changes in environment of the catchment area of Ohta River, a major river flowing into Hiroshima Bay, in particular, nutrient (*i.e.* N and P) loads into the bay were considered. We also collected long-term data on the diversity of inter- and sub-tidal invertebrates and fisheries and aquaculture production in Hiroshima Bay. Due to increased anthropogenic activity, both N and P loads increased from the 1960s to 1980s, and accordingly the eutrophication of Hiroshima Bay was proceeded. Reduction of P load was effective since the 1980, but there is no sign of decrease in N load. The water quality (*i.e.* transparency and nutrient concentrations) and sea bottom environment (*i.e.* ignition loss and sulfide content) in Hiroshima Bay were the worst during the 1970s, and there has been no significant recovery since then. Annual landings from fisheries and aquaculture decreased temporarily in the 1970s, and receded further in the 1990s. Both the diversity in feeding habit of fisheries animals and in species composition of inter- and sub-tidal invertebrates decreased steady from the 1970s. Based on such retrospective data, we proposed three criteria for the assessment of bioresource sustainability: 1) productivity, 2) efficiency, and 3) stability of bioresources or ecosystem. An integration of these criteria revealed that the sustainability of bioresource in Hiroshima Bay was highest in the middle and late 1960s. Then, the sustainability was gradually deteriorated and the worst in the 1990s.

Key words: Bioresource sustainability, Ohta River, Hiroshima Bay, Nutrient loads, Fisheries and aquaculture

はじめに

日本の代表的な閉鎖性海域である瀬戸内海は、1960年以降の経済成長に伴う産業活動の活発化や人口増加により、陸域からのチッソ (N) やリン (P) などの栄養塩や有機物の負荷量が増大し、1970年代をピークに急激な富栄養化が進行し、赤潮の多発やお化けハゼなどの奇形魚の出現が起こった (柳, 1988; 門谷, 1996)。このような事態を改善するために、「水質汚濁防止法」(1971年施行) や「瀬戸

内海環境保全臨時措置法」(1973年施行, 1978年には「瀬戸内海環境保全特別措置法」として恒久法化) が制定され、水質改善に向けた汚濁物質の総量規制や指導が実施された。しかし、瀬戸内海全体で見ると水質汚濁の回復状況は今でもはかばかしくない (柳, 2000)。また、瀬戸内海の漁獲量は1960年の30万トンから次第に増加し、1980年代前半には40万トンを超えた。しかしそれ以降は減少し続け、1998年には25万トンにまで減少した。以上の事実は水質規制のみに依存していても水質の改善や漁獲量の回復が望めない瀬戸内海の現状を示しており、より積極的な環境保全・創造施策を導入する必要性が出てきた。「瀬戸内海環境保全特別措置法」に基づく「瀬戸内海環境保全基本計画」の変更が2000年に閣議決定され、その中には積極的な環境保全・環境修復の考えが盛り込まれている。

2003年4月22日受付, 2003年8月29日受理

¹ 広島大学大学院生物圏科学研究科 〒739-8528 東広島市鏡山 1-4-4

Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University, 1-4-4, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8528, Japan

[†] medusae@hiroshima-u.ac.jp

同時に、瀬戸内海のように閉鎖性の強い沿岸域の環境保全や水産業の回復を図るには、生物資源の持続性を目指す海陸一体の総合環境管理が重要な課題となってきた。「持続性」は現代のキーワードであるにも関わらず、海洋の生物資源の持続性を評価し、判定するための基準は確立されておらず、評価方法を早急に確立する必要がある。そのためには、適切な評価指標の選定と、その指標の特性を解明しておくことが重要である。適切な指標により生物資源持続性を評価する手段として、富栄養度や汚濁度が異なる海域間で環境、海洋生物資源を相互に比較する方法が考えられる。本邦の代表的な内湾の地形や環境を比較したシップ・アンド・オーシャン財団(2002)の「海の健康診断」はその一例である。また、ある特定海域内での環境と生物資源の変遷を遡及的に検討する方法も存在する。柳・藤井(2000)は、表層栄養塩濃度、底層溶存酸素、干潟・藻場の面積、海岸線の割合を組み合わせた総合指標を考案し、広島湾の生態系の変遷を評価した。

本研究では、瀬戸内海で最も閉鎖性の強い内湾の一つである広島湾を対象として、そこでの環境と生物資源の変遷を遡及的に調査することにより、生物資源持続性を評価するための指標の構築を提案し、それらに基づき評価を行うことを目的とした。広島湾は周辺の国立、県立の水産・環境分野の試験研究機関により古くから調査・観測が行われており、比較的長期間にわたって環境や漁獲量などのデータが蓄積されている利点がある。生物関係のモニタリング調査も多く、例えば広島湾東部の海岸における海岸動物の種類数(藤岡, 2000)、広島湾奥部に位置する元宇品の海藻の種類と分布の変遷(田中ら, 1996)、太田川感潮域の貝類の出現種と分布(新川, 1992a, b)に関する研究などがある。広島湾の生物資源持続性を評価するには、当然隣接する陸域の人間活動によるインパクトを考慮に入れる必要がある。そこで本研究では太田川集水域と広島湾を含む太田川—広島湾流域圏を対象空間とした。

方法および資料収集

太田川は広島県西部を貫流する一級河川であり、幹川流路延長は103 km、流域面積は1710 km²で広島市など2市5郡の行政区を流れ広島湾北部に注ぐ(Fig. 1)。広島湾は面積が約1000 km²のおおよそ楕円形の湾であり、その南部と東部は島で囲まれ、柱島水道と音戸の瀬戸を通じて安芸灘へ、諸島水道や大島瀬戸を通じて伊予灘へと通じている。広島湾内の海水滞留時間は約3ヵ月、海水の90%が交換するのに要する時間は約7ヵ月であり(上嶋ら, 1984)、瀬戸内海でも最も閉鎖性の強い海域の一つである。平均水深は湾北部で17.7 m、湾南部で29.9 mである(木村, 1975a)。

太田川—広島湾流域圏は、1960年代初めから広島市を中心として造船業、機械工業、自動車製造業などが発達し、高度経済成長の波に乗り西日本有数の工業地帯として成長

した。1973年の第一次石油ショック以後も第三次産業が発達した。中国自動車道、山陽自動車道、山陽新幹線、広島空港(現在は広島西飛行場)、港湾などの交通ネットワークが徐々に整備され、広島市は中国地方の行政・経済・文化の中核機能性を持つようになった(北川, 1991)。このような社会状況の移り変わりの中で、太田川集水域と広島湾沿岸陸域の人口は1947年の約90万人から、高度経済成長期に急増して1970年には132万人、1980年には154万人となった。それ以降人口増加率は低下し、2000年の国勢調査では167万人となっている。

太田川—広島湾流域圏の環境の変遷とそれに伴う広島湾内での生物資源持続性評価のために、本研究ではそれらに関係する可能な限り多くの要因について、可能な限り過去に遡って収集することに努めた。本流域圏内での人間活動による環境の変遷を捉えるために、多くの要因の中から特に主要栄養塩のNとPに注目し、太田川集水域から広島湾へのこれらの負荷量、広島湾海水中の濃度の経年変動などを既報データを基に調査し、必要に応じて推定を試みた。広島湾の生物資源に関する項目として、最も長期間にわたりデータが蓄積されている漁獲量、養殖量、海岸動物出現数の経年変動を利用した。また、必要と思われるその他の項目も利用した。本稿で利用した各項目とそれらのデータの由来を以下に示す。太田川の全チッソ(TN)、全リン(TP)濃度は広島県(公共用水域の水質測定結果1976–1996)、流量は建設省河川局(流量年表, 1971–1998)を利用した。太田川流域下水道からのTN、TP負荷量は広島市(広島市下水道局, 1969–1996)の資料を利用した。広島湾の年平均TN、TP濃度は広島県(公共用水域の水質測定結果, 1976–1996)の9定点水柱平均値、年平均溶存態無機チッソ(DIN)、溶存態無機リン(DIP)濃度は広島県水産試験場(広島県水産試験場報告, 1971–1998)の7定点水柱平均値、透明度は大内(2001)を利用した。広島湾の夏季(7–9月)底層溶存酸素濃度は広島市水産振興協会(広島市水産振興協会事業報告書, 1983–1996)、海底の年平均全硫化物量、強熱減量は広島県(公共用水域の水質測定結果, 1976–1996)を利用した。広島湾の漁獲量、養殖量は中国四国農政局広島統計情報事務所(広島県農林水産統計年報, 1960–1998)、海岸動物の種類数は藤岡(2000)を利用した。

結果

太田川集水域からのN、P負荷量

1976年以降太田川最下流点の大芝水門(Fig. 1)においてTN、TPの濃度が2ヶ月毎に測定されており、それらに河川流量を乗じることにより広島湾へのN、P負荷量を推定した(Fig. 2)。TN濃度は1976年に0.7 mg・l⁻¹であったが、次第に上昇して1984年に最高値1.1 mg・l⁻¹を記録した。その後低下に転じ、1990年以降0.7 mg・l⁻¹を下回っている。

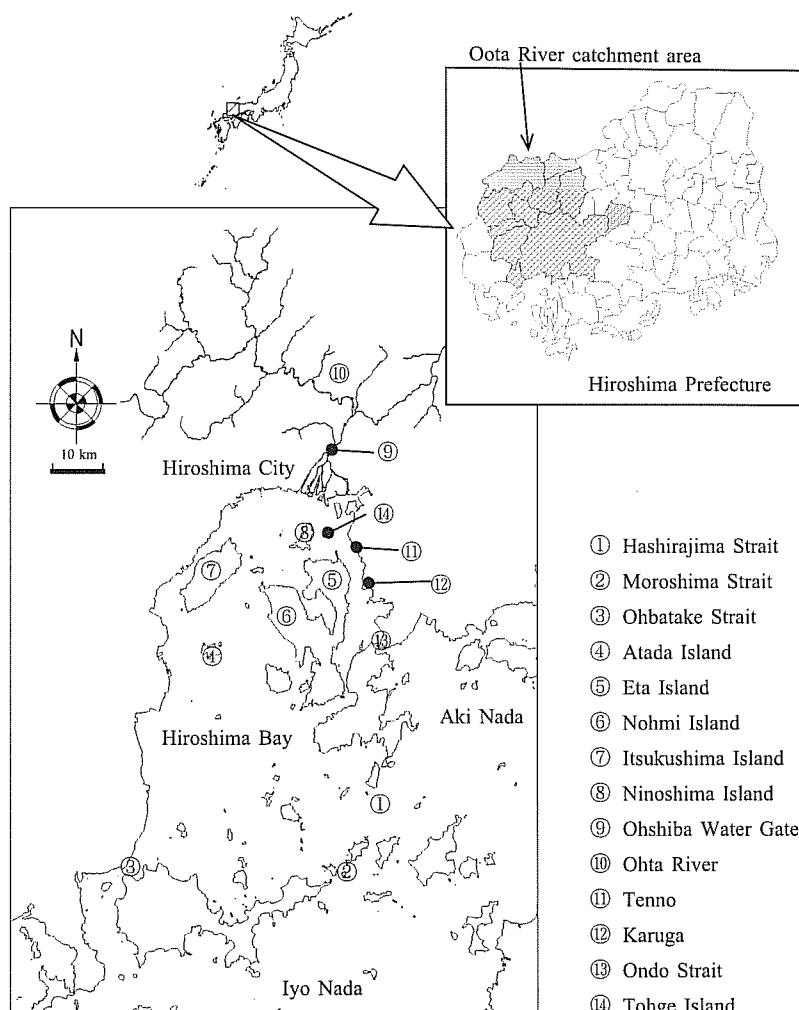


Figure 1. Maps of Hiroshima Prefecture with local governments corresponding to Ohta River catchment area (shaded area) and of Hiroshima Bay with locations of observation and sampling stations.

N 負荷量は 1980 年代前半に全体的に高く (1980–1985 年の平均値 $6.4 t \cdot day^{-1}$) その後減少して、1996 年には $2.9 t \cdot day^{-1}$ にまで低下した。

河川水中の TP 濃度は 1977 年までは低かったが、1978 年に $0.07 mg \cdot l^{-1}$ に増加し、その後 1984 年まで平均 $0.07 mg \cdot l^{-1}$ と高いレベルで推移した。1980 年から第一次の P 削減指導が実施され、1985 年には第二次、1990 年には第三次の削減指導により TP 濃度は減少し続け、1995 年には $0.02 mg \cdot l^{-1}$ に減少した。それに伴い 1985 年まで高かった P 負荷量も減少し、1995 年には最低値の $0.11 t \cdot day^{-1}$ にまで低下した。

N, P の負荷量の低下には太田川流域下水道の整備による貢献が大きい。下水道整備は 1961 年から開始され、次第に下水処理場の数は増加し、1981 年からは集水域最大の処理能力を有する広島市西部浄化センターが運用を開始した。以後、河川水由来の N, P 負荷量よりも下水道由来

の負荷量が相対的に増加した (Fig. 2)。下水道由来の N 負荷量は年々上昇し、1996 年では河川水由来の負荷量の 2.3 倍となっている。下水道由来の P 負荷量は 1985 年以降は平均 $0.5 t \cdot day^{-1}$ の低いレベルにあるが、近年徐々に増加傾向を示しており、1996 年の P 負荷量は河川水由来の負荷量の 3.7 倍に相当している。

太田川河川水及び流域下水道の両者からの合計負荷量の変動を見ると (Fig. 2)、N 負荷量は 1976 年の $6.6 t \cdot day^{-1}$ から 1983 年まで増加傾向を示し、その後は平均 $9.2 t \cdot day^{-1}$ のほぼ横ばいで推移している。一方、P 負荷量は 1976 年の $0.8 t \cdot day^{-1}$ から 1980 年の $1.6 t \cdot day^{-1}$ まで増加し、1985 年に $0.7 t \cdot day^{-1}$ まで低下した後は平均 $0.6 t \cdot day^{-1}$ で一定している。合計負荷量における N, P のモル比 (N/P) は、1976 年から 1984 年までは平均 14.2 であったが、1985 年以降は平均比 33.0 へ増大した。これは P が選択的に削減指導の対象となったために起こったことで、一般に植物プランクトン

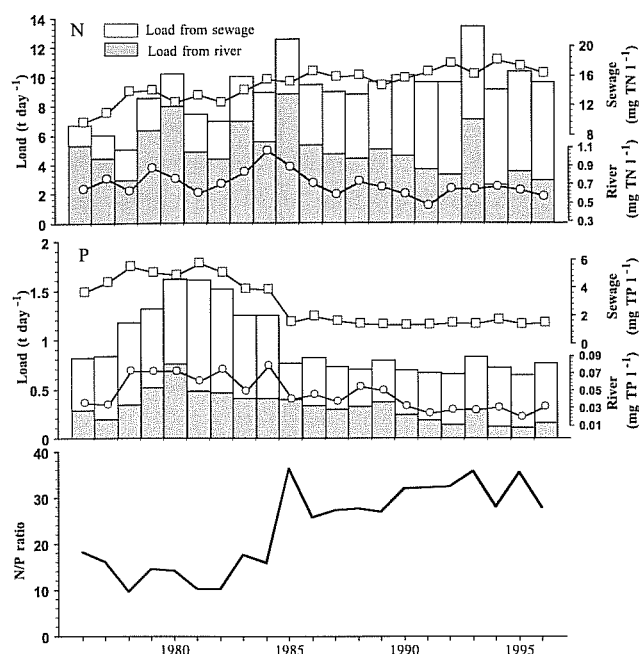


Figure 2. Temporal variations in annual average concentrations of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in Ohta River water and in sewage treatment discharge, and nitrogen (N) and phosphorus (P) loads from Ohta River catchment area. Bottom panel shows the variation in molar N/P ratio in the load.

が取り込むN/P比であるRedfield比の16よりはるかに大きな値となっている。

1975年以前のN、P流入負荷量の推定

前述のTN、TP濃度データは、公害発生の頻発など瀬戸内海の環境悪化が顕著となった1976年以降得られたものであり、1975年以前には系統だったデータは存在しない。しかし、瀬戸内海での富栄養化が急速に進行し始めたのは1960年代後半であるので、1960年まで遡及して太田川集水域からのN、P負荷量の推定を試みた。

太田川河川水中のTN、TP濃度は、流域の人口と正相関すると仮定した。下水道整備が不十分であった1976年から1981年までの期間は、流域人口当たりの平均TN濃度 ($0.7 \times 10^{-7} \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{person}^{-1}$) を求め、それに流域人口と河川流量を乗じることで太田川河川水由来のN負荷量を算出した。流域人口は5年毎の国勢調査結果 (広島県, 2002) に基づき、その間の変化は直線的であると仮定した。また、1970年以前の河川流量データは存在しないので、1971年から1998年までの流量 ($D, \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$) (建設省河川局, 1971–1998) と広島市の年間降水量 ($R, \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$) (広島地方気象台, 1960–1998) の関係式, $D = 14.9R + 348.0$ ($r^2 = 0.79$), から推定した。河川水由来のP負荷量もN負荷量と同様の方法で推定したが、その場合P削減指導実施前の1976年から1979年までの流域人口当たりの平均TP濃度

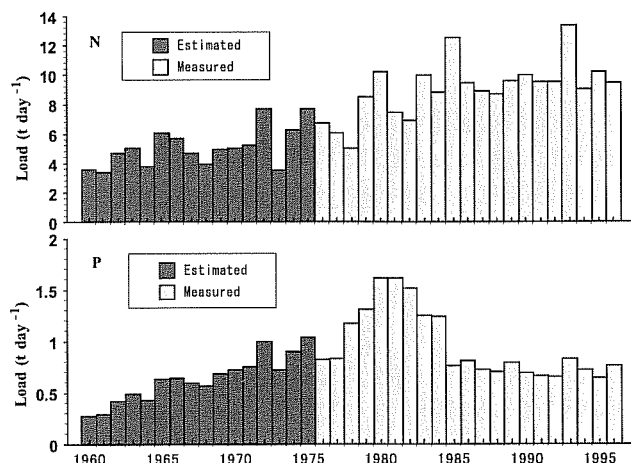


Figure 3. Temporal variations in nitrogen and phosphorus loads from Ohta River catchment area. Loads between 1960 and 1975 are estimated and those after 1976 are actually measured.

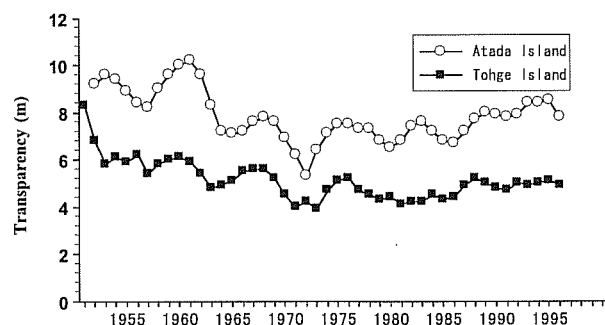


Figure 4. Temporal variations in transparency (*i.e.* Secchi Desk depth) at stations near Atada and Tohge Islands in Hiroshima Bay (from Ohuchi, 2001).

($5.8 \times 10^{-8} \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{person}^{-1}$) を基準とした。

流域下水道由来のN負荷量として、1970年から1975年までは既報データが存在するのでそれらを用いた。下水処理が開始された1961年から1969年まではデータが存在しないので、1960年は負荷量0とし、その後負荷量は直線的に増加したと仮定した。またP負荷量として1975年は既報データを用い、1961年から1974年までは直線的に増加したと仮定した。

Fig. 3に示すように、太田川集水域からのN、P負荷量は共に1960年から1975年まで徐々に増加する結果となった。木村 (1973, 1974, 1975b) は、1955年から1973年までの18年間の広島湾奥部海域に流入するN、P負荷量を原単位法を用いて算出しており、本研究で推定した増加パターンは木村が示した増加パターンとほぼ同様であった。

広島湾の水質・底質環境

太田川集水域から広島湾へ流入するN、P負荷量の増加に伴って、Fig. 4に示すように広島湾における透明度は低下

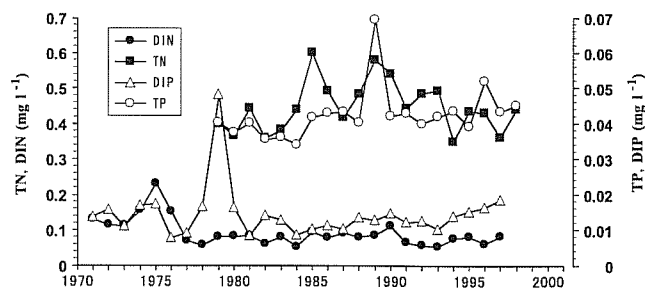


Figure 5. Temporal variations in annual average concentrations of total nitrogen (TN), dissolved inorganic nitrogen (DIN), total phosphorus (TP) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) in Hiroshima Bay.

した(大内, 2001). 透明度は水質の総合指標となり(吉田, 2000), また測定方法が簡単なことから1951年から観測されている。峠島定点は広島湾北部に, 阿多田島定点は湾南部に位置するため(Fig. 1), 常に後者の方が高い値を示している。阿多田島定点での透明度は1952年に9.2mであったが, 周期的変動を伴いながら1972年には5.3mにまで低下した。同様に峠島定点では1951年の8.3mから1973年の3.9mに低下した。これらのことは広島湾が1960年代に急速に富栄養化したことを示すものである。阿多田島定点では近年透明度に回復の兆しが見られ, 1996年には7.8mとなったが, 峠島定点では回復はほとんど見られず, 広島湾北部の水質は改善していない。

広島湾の海水中のDIN, DIP濃度は1971年から, TN, TP濃度は1979年から定期的に観測されている(Fig. 5)。1971年に $0.13 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であったDINは, 1975年に $0.23 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ の最高濃度を記録した後, 1977年には $0.07 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ にまで減少した。その後は平均 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 前後で推移している。TNは1980年の $0.37 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ から1985年の $0.60 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ にまで増加したが, それ以降は減少傾向を示している。DIPは1975年まで $0.015 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 前後であったが, 1979年に $0.048 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ のピークを示した。1981年から1993年までは平均 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ で推移したが, それ以降わずかながら上昇傾向が認められる。TPは1989年に突発的に $0.069 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ まで急増したが, それ以外は平均 $0.043 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ でほぼ横ばいである。太田川集水域から広島湾へのP負荷量は1985年以降顕著に減少しているが(Fig. 2), 広島湾の海水中のDIP, TP濃度には全く改善の兆候が見られない。

広島湾の底質環境要因として, 1970年以降1~3年間隔で観測された広島湾北部の7定点の平均強熱減量と全硫化物量, 広島湾北部1定点で測定された底層水中の溶存酸素濃度をFig. 6に示す。強熱減量は変動を伴いながら平均12.5%で推移している。一方, 全硫化物量は1978年まで平均 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ と高かったが, 1980年以降平均 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ の低いレベルで推移している。しかし, この値は水産用水基準である $0.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ を越えており, 依然として広島湾北部

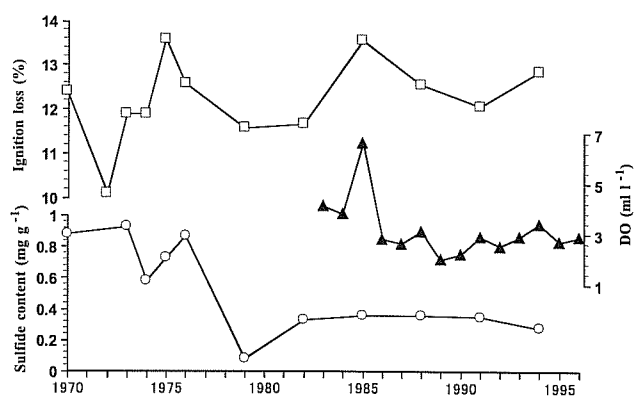


Figure 6. Temporal variations in ignition loss and sulfide contents in the bottom sediments of Hiroshima Bay, and dissolved oxygen concentration (DO) at the bottom layer of northern Hiroshima Bay.

の底質は大型ベントスの棲息には不適な環境のままである。夏季底層の溶存酸素濃度は1985年に $6.6 \text{ ml} \cdot \text{l}^{-1}$ の高い値を示したが, その後は約 $2.5 \text{ ml} \cdot \text{l}^{-1}$ 前後の低いレベルで推移しており, 底棲魚類などの棲息に不適な状態となっている。湯浅ら(1995)も広島湾の底層貧酸素水塊の形成は1960年半ばから慢性化していると述べており, 今回ここに示したデータから判断しても, 広島湾の底質環境は富栄養化が最も顕著であった1970年代前半以降ほとんど改善が見られない。

広島湾の漁獲量, 養殖量, 海岸動物出現種類数

広島湾の年間総漁獲量は1970年前半に一時的に低下したが, 1960年以降平均約 $12 \times 10^3 \text{ t}$ を維持している(Fig. 7)。しかし, 1988年に最高値 $17 \times 10^3 \text{ t}$ を記録した後は近年減少傾向が続いている。食性別に分類すると(多々良, 1981), 1970年代からカタクチイワシやサバ類などの動物プランクトン食性魚類の漁獲量が増加し, 1980年代半ばからマイワシやコノシロなどの植物プランクトン食性魚類の増加が目立つようになった。一方, デトライタス食性のアサリなどの貝類やナマコ類の漁獲量は1980年以降急速に減少した。アサリは1972年には $14 \times 10^2 \text{ t}$ の漁獲量があったが, 埋立による干潟の消失などによって1998年には81tにまで減少し, ナマコも1974年には $14 \times 10^2 \text{ t}$ あった漁獲量が, 1998年には405tにまで減少した。魚食性魚も徐々に減少しており, 特にエソやサワラの漁獲量が減少した。一方, ベントス食性魚はほぼ一定の漁獲量を維持しているが, そのうちマダイ, エイ, カサゴは1980年中頃まで増加し, その後減少した。クロダイは1979年以降増加傾向にある。エビ・カニ食性のマダコの漁獲量はほぼ一定している。クルマエビの漁獲量は1970年より放流事業が行われているにもかかわらず増加せず, ガザミも1987年以降放流事業が行われているにもかかわらず減少した。

漁獲物組成の多様性の経年変動をみるために, 食性別の

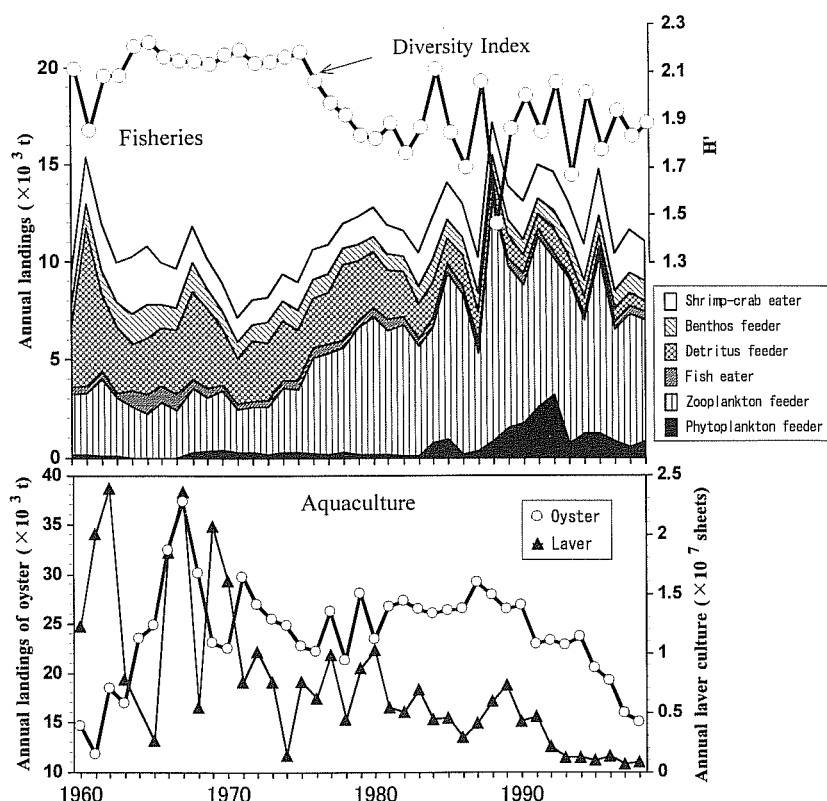


Figure 7. Temporal variations in annual landings from fisheries, oyster culture and laver culture in Hiroshima Bay. Diversity index (H') of fisheries animals is also determined based on their feeding habits.

多様度指数 H' (Magurran, 1988) を算出した (Fig. 7). 但し H' は下式から計算した.

$$H' = \sum_{i=1}^s (n_i/N) \log_2 (n_i/N)$$

ここで, S : 食性グループ数, N : 年間総漁獲量, n_i : i 食性グループの年間漁獲量である. H' は 1965 年から 1975 年までの 10 年間は平均 2.1 であったが, 以降低下し 1988 年には最低値 1.5 となった. 1980 年代後半以降, H' は年により大きく変動している. これらのことは食性を基準にすると, 広島湾の漁獲物組成の多様性が失われつつあることを示している.

広島湾では国内最大規模のマガキ養殖が行われている. 1960 年以降のマガキ養殖量の経年変動を Fig. 7 に示す. 養殖量の中には養殖筏から落ちたマガキを拾う漁業である「落ちガキ拾い」や「採貝」による量も含めた. 養殖方法が簡易垂下式から筏垂下式に移行するにつれてマガキ養殖量は急速に増加し, 1968 年に 37×10^3 t の最高値を記録した. しかし, その直後の 1969~1970 年にはシャトネラ赤潮やカサネカンザシの付着による被害や台風の被害を受け, 養殖量は約 22×10^3 t にまで急減した. その後, マガキ排泄物による底質悪化などの漁場老化の問題が指摘されたが (楠木,

1981), 筏数の増加や筏の移動などにより 1987 年まで 25×10^3 t 前後の養殖量を維持していた. しかし漁場環境の慢性的な悪化に加えて, 1991 年の台風 19 号による被害, また 1995 年のヘテロカプサ赤潮による大量斃死などにより, 養殖量は 1998 年には約 15×10^3 t にまで落ち込んだ.

広島湾では太田川河口域地先を中心として, 1970 年代までノリ養殖が盛んに行われてきた (Fig. 7). 芽痛み病のために養殖量が低下した年もあったが, 2000 万枚を越えて出荷していた. しかし, 1970 年代以降埋立による漁場の減少や全国的なノリの生産過剰が原因して, 広島湾のノリ養殖経営体数は急激に減少し, 1998 年ではわずか 83 万枚の養殖量である.

藤岡 (2000) は, 呉市狩留賀と天応 (Fig. 1) において夏季大潮干潮時に出現した海岸動物 (海綿動物, 原索動物, 節足動物, 棘皮動物) の種類数を 1960 年からほぼ毎年調査し, 36 年間の変化をまとめた (Fig. 8). 両地点とも 1960 年代の出現種類数は 50 種近くあったが, その後急減し 1975 年には狩留賀で 27 種, 天応で 23 種となった. 以後徐々に種類数は減少し, 1991 年には両地点とも最低の 13 種となった. 特に節足動物と棘皮動物の減少が顕著であり, 前者は 1960 年代の約 1/5 のレベルに, 後者は約 1/3 のレベルにまで減少した. しかし, 1995 年以降出現種類数に回復

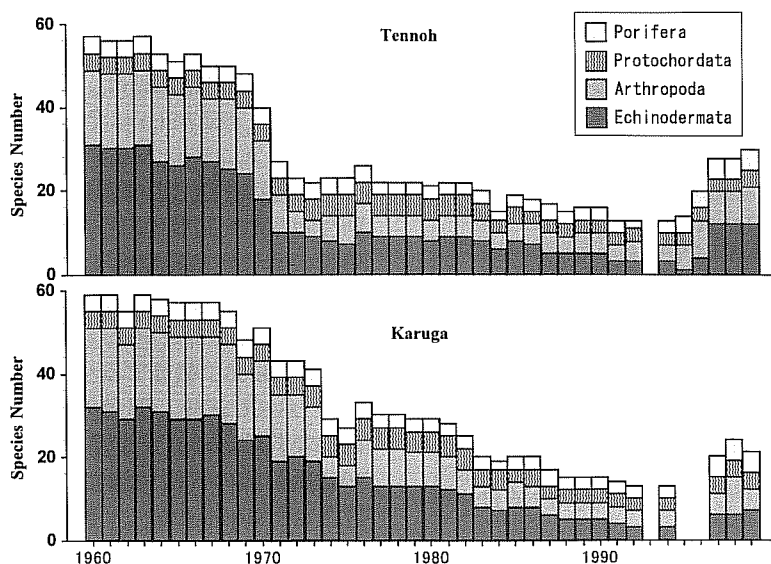


Figure 8. Temporal variations in species number of inter- and sub-tidal invertebrates in Karuga and Tennoh, Kure (from Fujioka, 2000).

の兆候が見られ、1999年には狩留賀においては21種、天応では30種が観察されている。

生物資源持続性の評価指標の構築と評価

前述の太田川—広島湾流域圏の環境や広島湾の生物、漁業などの変遷を理解した上で、広島湾の生物資源の持続性を評価するために、以下の3項目を基準とする指標を提案したい。それらは生物資源あるいは生態系の、①生産性、②効率性、③安定性を示す指標である。

まず生産性を示す指標として、広島湾内の漁獲量と養殖量の合計量を使用することとする (Figs. 7, 10)。広島湾における両者の合計量は1967年に最大となり、富栄養化が急速に進行した直後の1970年代前半に一時的な減少があり、1990年に入って継続的な減少が見られている。このことから、広島湾の生物資源の生産性は特に最近10年間慢性的に失われつつあると考えられる。

次に効率性の指標として、親生物元素であるNとPの陸域からの流入負荷量に対する水産業による回収効率を取り上げることとする。広島湾に流入したN、Pは植物プランクトンに取り込まれ、食物連鎖を経由して一部は水産物として取り上げられるので、回収効率 (E, %) ($E = F/L \times 100$, 但し、Fは水産業による取り上げ量 ($t \cdot day^{-1}$), Lは流入負荷量 ($t \cdot day^{-1}$)) は生物生産の場としての広島湾の機能効率を示す指標となる。水産業による取り上げ量として、漁獲量、マガキ養殖量、ノリ養殖量を含めた。その際、湿重量からN量への換算係数は、魚貝類では0.025、マガキでは0.014、ノリでは0.015とした (科学技術庁資源調査会, 1991; 小濱, 2000)。湿重量からP量への換算係数は、魚貝類では0.002、ノリでは0.0021とした (山本, 1987; 野田, 1971a, b; 科学技術庁資源調査会, 1991)。N回収効率は

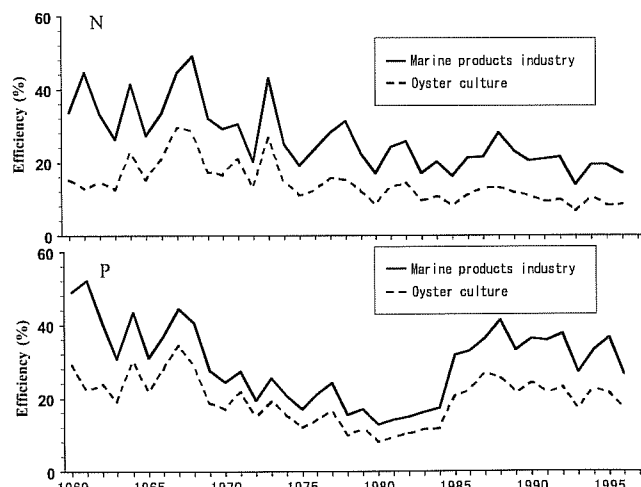


Figure 9. Temporal variations in removal efficiency of nitrogen and phosphorus in Hiroshima Bay. Removal efficiency is determined by dividing landings by loads.

1960年から1968年まで上昇し最高の49%となったが、その後は徐々に低下する傾向が見られ1993年には14%に低下した (Fig. 9)。N回収効率 低下の主要な原因は、1980年代半ばまでは陸からの負荷量の増大によるもの、それ以降の減少はマガキ養殖量の減少によるものである。P回収効率は1960年代の約40%から徐々に減少し、1980年には13%となった (Fig. 9)。その後Pの総量規制のために負荷量が低下し、それに伴い回収効率は1988年の41%まで上昇した。しかし1990年代に入るとマガキ養殖量の減少により回収効率は低下傾向にあり、1996年には26%となった。広島湾においては、マガキ養殖による回収効率が水産業全

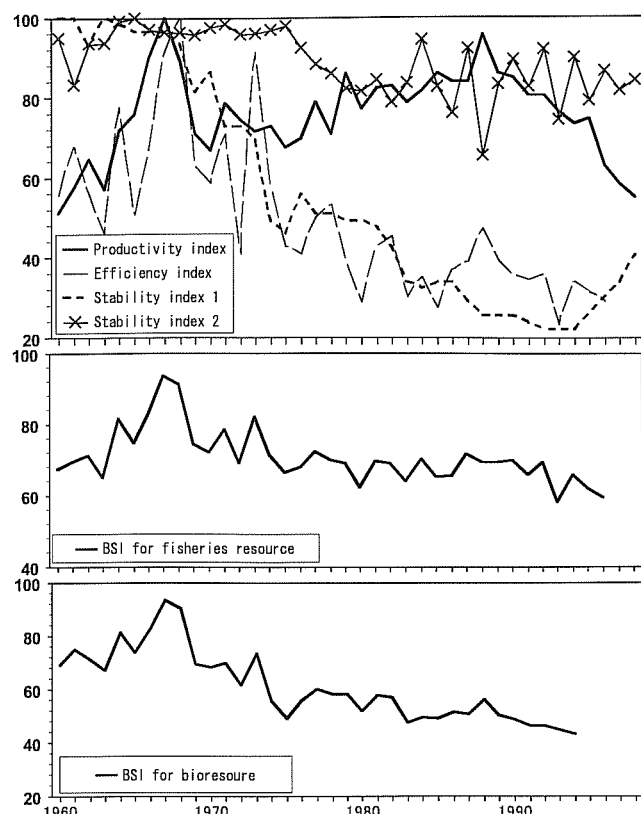


Figure 10. Temporal variations in productivity, efficiency and stability indexes to assess bioresource sustainability in Hiroshima Bay. Stability index 1 shows species number of inter- and sub-tidal invertebrates and stability index 2 shows diversity index (H') of fisheries animals. The bioresource sustainability index (BSI) is the mean of those three indexes.

体によるN, P回収効率の50%を占めており, マガキ養殖がいかに効率の良い水産業であるかが改めて示された。

広島湾の生産の効率性を長期的に判定するには, 人間活動の活発化に応じて負荷量が増加しているNを基準とする方が良いでしょう。N回収効率から判断すると (Fig. 10), 広島湾は1970年以降徐々に効率性の悪い海域に変化していると推測される。また, P回収効率は流入負荷量が減少し始めた1985年以降有効な指標になると考えられ, P回収効率を基準とした場合でも, 1990年代になると広島湾は効率性の悪い水域に移行していると推測される。

安定性の指標として, 漁獲物組成の食性別多様性と海岸動物の出現種類数を使用することができよう。前述のように漁獲物の食性別多様性は1970年代中頃から次第に失われている。海岸動物の種類数も1970年以降急速に減少しており (Fig. 10), これらの結果から, 1970年以降広島湾の生態系の安定性が失われてきたことを示している。

生産性 (PI), 効率性 (EI), 安定性 (SI) の3者を包括する総合的な生物資源持続性指標 (BSI) を提案する。

$$BSI = ((PI_n/PI_{max}) + (EI_n/EI_{max}) + (SI_n/SI_{max})) \times 100/3$$

なお各指標の最大値 (PI_{max} , EI_{max} , SI_{max}) を100とし, 各年の指標値 (PI_n , EI_n , SI_n) はそれらに対する相対値とした (Fig. 10)。

生産性の指標として漁獲量と養殖量の合計量, 効率性の指標としてN回収効率を用いる。安定性の指標として, 漁獲物の食性別多様度 H' と海岸動物の種類数を用いることが出来る。前者を用いた場合, BSIは水産生物資源持続性を示す総合指標といえよう。また, 後者を用いた場合, BSIは広島湾に棲息する生物全般の資源持続性を示す総合指標といえよう。両者のBSIは同様の経年変動を示し, 1960年代中頃から後半が最も良好でその後次第に低下し, 1990年以降の資源持続性は著しく低下した状況にあると評価される (Fig. 10)。

以上BSIにより生物資源持続性を定量的に表す指標を提案した。しかし, 生物資源持続性評価法の研究例が少なく他に生物資源持続性の指標がないことから, BSIの妥当性を検証することが出来なかった。今後, 一般的に「持続的である」とされる海域と「持続的ではない」とされる海域のBSIを比較検討することにより妥当性を検証する必要がある。また, 各指標を単純平均することによりBSIとしたが, 各指標間のバランスが考慮されていないため, それぞれ指標間の相互関係も明らかにする必要がある。

考 察

太田川—広島湾流域圏の人間活動, 広島湾内の環境, 生物, 水産業などの変遷を1960年まで遡って概観すると, 経年的に次のような大きな変化があった。即ち, 太田川—広島湾流域圏は, 1950年代から1970年代にかけて急激な人口増加と人間活動の上昇により, 広島湾に流入するN, P負荷量が増大した。それに伴い, 広島湾は1960年代後半から1970年の前半にかけて急速に富栄養化が進行し, その結果湾内の透明度が悪化し, 1970年代以降夏季は慢性的に底層貧酸素水塊が形成されるようになった。1980年以降Pの削減指導によりP負荷量は減少に転じた。しかし, 広島湾内のTP濃度は低下せず, 底質も依然として改善は見られない。海岸動物の出現種類数は1970年以降顕著に減少し, また漁獲量やマガキ養殖量も特に最近10年間の減少が顕著である。このような経年変動をみると, 大方は広島湾の生物資源持続性が損なわれていると評価される。本研究では生物資源あるいは生態系の生産性, 効率性, 安定性に基づいた総合的な生物資源持続性指標の構築を提案し, それに基づいて広島湾の生物資源の持続性を定量的に評価した。その結果, 生物資源持続性は1960年代中頃から後半の時期が最も高く, その後徐々に低下し, 1990年以降は著しく低下した状況にあると判断された。

沿岸海域の生物資源の変動には人間活動の直接的な影響

も含めた数多くの要因が関連し、それぞれが複雑に絡み合っている。そのためなるべく多くの要因を抽出し、それらを定量化した指標として構築し、生物資源持続性評価のために使用することが求められている。本研究では古くから系統立ったデータとして存在する広島湾に流入するN、P負荷量、漁獲量、養殖量、海岸動物の出現種類数を利用して生物資源持続性の評価指標を提案し、その有効性を示した。藻場、干潟の面積、自然海岸の割合、有害化学物質の有無などの項目は経年的な定量データが存在しないため、本研究では指標として取り上げることが出来なかった。藻場や干潟は魚介類の棲息の場として重要であるだけでなく、有機物の分解を行う浄化機能の高い空間である。砂浜や岩礁などの自然海岸地形の多様性は、様々な生物に棲家を提供している。有害化学物質の有無は、例えば有機スズなどのように生物の生殖に異常をきたすなど、生物の生存に直接関わる重要な要因である。その他利用可能な項目の追求も含めて、各海域にどのような種類のデータが長期間にわたり存在するのかを精査し、それらを利用することが当該海域の生物資源持続性評価のために重要である。

近年著しく低下している広島湾の生物資源持続性を改善するために今後どのような環境管理が必要であろうか。生産性や効率性の改善のためには、当然漁獲量や養殖量の維持を図る必要がある。特に広島湾では栄養塩の回収効率が極めて高いマガキ養殖が重要な貢献をしている。マガキ養殖は筏の占める空間を必要とし、筏の底層ではカキ殻や排泄物の堆積による底質環境の悪化が懸念されている。そのため、今後はマガキ養殖と漁業の空間の適正な配分、マガキ養殖筏台数の制限、マガキ養殖期間の短期化などによるマガキ養殖の適正化が必要となる。広島湾は約40年間でアサリなどの貝類やナマコなどのベントスの生産性が失われ、同時に安定性も失われた。その主な原因は、彼らの棲息場である干潟や藻場の面積の急速な減少にある(楠木, 1984)。現存する干潟や浅場をこれ以上埋立てることはやめ、環境修復技術などを有効に利用することにより失ったそれらの空間を造成回復させる必要がある。また、広島湾の慢性的な底質悪化も関連していると思われ、底質改善のためには、今後も陸上からのN、P負荷量削減を継続する必要がある。N、Pは河川集水域や沿岸陸域の人間活動から発生したものが、河川や下水道を通じて湾に流入している。沿岸域の環境や生態系の管理のためには、海陸一体となった流域圏内での総合管理を考える必要がある。

謝 辞

本研究をまとめるに当たりご助言頂いた松田 治、戸田常一、柳 哲雄、門谷 茂の各教授に感謝の意を表す。流域下水道のデータは広島市下水道局より提供して頂いた。本研究の一部は、瀬戸内海環境保全協会「瀬戸内海の生物資源の持続性評価システムに関する研究」、並びにニッセ

イ財団「太田川—広島湾流域圏の人間活動と環境保全の調和—広島湾の生物資源持続性の視点から—」による助成を受けた。記して感謝する。

引用文献

- 中国四国農政局広島統計情報事務所 (1960-1998) 広島県農林水産統計年報。
- 藤岡義隆 (2000) 広島沿岸の生態系の変遷。住民がみた瀬戸内海、環瀬戸内海会議編、技術と人間、東京、81-92。
- 広島県 (1976-1996) 公共用水域の水質測定結果。
- 広島県 (2002) 第46回広島県統計年鑑 (平成13年度版)。
- 広島県水産試験場 (1971-1998) 広島県水産試験場事業報告。
- 広島市下水道局 (1969-1996) 広島市下水道局資料。
- 広島市水産振興協会 (1983-1996) 広島市水産振興協会事業報告書。
- 広島地方気象台 (1960-1998) 広島県気象年報。
- 建設省河川局 (1971-1998) 流量年表。
- 科学技術庁資源調査会 (1991) 四訂日本食品成分表、女子栄養大学出版部、東京、pp. 368。
- 木村知博 (1973) 瀬戸内海汚染物質調査。昭和48年度広島県水産試験場事業報告、45-50。
- 木村知博 (1974) 瀬戸内海汚染物質調査。昭和49年度広島県水産試験場事業報告、39-41。
- 木村知博 (1975a) 広島湾海域に流入する淡水の移流について。水産増殖、22, 110-119。
- 木村知博 (1975b) 瀬戸内海汚染物質調査。昭和50年度広島県水産試験場事業報告、43-45。
- 北川建次 (1991) 平和都市広島と戦後の福山 都市の歴史と生活—瀬戸内海に焦点をあてて—、広島大学放送教育実施委員会編、広島大学放送教育実施委員会、広島、163-179。
- 小濱 剛 (2000) 沿岸域における親生物元素の物質循環過程に対する付着動物の役割とその環境修復への応用、愛媛大学大学院連合農学研究科学位 博士論文、pp. 140。
- 楠木 豊 (1981) カキ養殖漁場における漁場老化に関する基礎的研究。広島県水産試験場研究報告、11, 1-93。
- 楠木 豊 (1984) 広島湾。漁業と環境、吉田陽一編、恒星社厚生閣、東京、43-54。
- Magurran, A.E. (1988) Diversity indices and species abundance models. In: Ecological diversity and its measurement, ed. A. E. Magurran, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 7-78。
- 門谷 茂 (1996) 瀬戸内海の環境と漁業の関わり。瀬戸内海の生物資源と環境、岡市友利ら編、恒星社厚生閣、東京、1-40。
- 野田宏行 (1971a) 海藻の生化学的研究—II。あさくさのりの品質と一般成分との関係、日本誌、37, 30-34。
- 野田宏行 (1971b) 海藻の生化学的研究—III。あさくさのりの品質と無機成分との関係、日本誌、37, 35-39。
- 大内 晟 (2001) 広島湾の富栄養化。水産海洋研究、65, 175-176。
- シップ・アンド・オーシャン財団 (2002) 海の健康診断マスタープラン/ガイドライン、シップ・アンド・オーシャン財団海洋政策研究部、東京、pp. 99。
- 新川英明 (1992a) 感潮河川における貝類の生態学的研究—IV。分布型の変遷、広島経済大学研究論集、14, 11-22。
- 新川英明 (1992b) 感潮河川における貝類の生態学的研究—VI。本川(太田川)における分布型の変遷、広島経済大学研究論集、15, 27-36。
- 田中 博・田中貞子・田中 潤 (1996) 元宇品の海藻。佐々木印刷、広島、pp. 216。
- 多々良薫 (1981) 基礎生産と漁獲量との関係—漁獲量による基礎生産の利用—。南西海区水研研報、13, 111-133。
- 上嶋英機・橋本英資・宝田盛康・山崎宗広 (1984) 瀬戸内海の海水交換機構—ラグランジュ的手法による水理模型実験—。第31

- 回海岸工学講演論文集, 665-669.
- 山本民次 (1987) ノリ品質向上のための漁場行使に関する研究. 3. ノリ葉体によるアンモニアおよび硝酸の取り込み—音戸の関数として. 愛知水試研究業績C集, 72, 15-21.
- 湯浅一郎・山崎宗広・橋本英資・宝田盛康・田辺弘道 (1995) 広島湾・呉湾における貧酸素水塊の分布と歴史. 中国工業技術研究所報告, 44, 9-17.
- 吉田陽一 (2000) 海域の富栄養度と水産生物. 水産増殖, 48, 161-168.
- 柳 哲雄 (1988) 瀬戸内海汚染の歴史. 生物生存環境の適正化に関する総合研究報告書, 55-67.
- 柳 哲雄 (2000) 閉鎖性海域保全の現状と展望. 資源環境対策, 36, 20-24.
- 柳 哲雄・藤井直紀 (2002) 沿岸海域生態系保全のための環境モニタリング総合指標. 海の研究, 11, 561-567.