

海辺の自然再生の推進に向けた環境メカニズム の概念モデル化の提案

The use of Conceptual Model as a Promotion tool of Coastal Environment Restoration

堀江岳人¹・古川恵太²・岡田知也³

Takehito HORIE, Keita FURUKAWA, Tomonari OKADA

¹正会員 工修 株式会社アルファ水工コンサルタンツ 東京本部 主任

(〒101-0031 東京都千代田区東神田2-7-9)

²正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 海洋環境研究室 室長

(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 海洋環境研究室 主任研究官

(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

To promote coastal environment restoration, it is important to clearly show performance measures of the environment restoration and the impact-response flow between environmental factors and ecosystem services to stakeholders. In addition, it is necessary to implement restoration projects and environmental monitoring schemes regarding the measures and the flows. In this study, usefulness of the conceptual model that easily shows the impact response flow has been demonstrated. Followings were major accomplishments of this study. Three different types of conceptual models were established. The proposed conceptual models showed the impact response flow easily be understood by stakeholders, and helped to pick out suitable performance measures for the restoration project and the environmental monitoring. Some models were not completely made, because of lack of the data and possible change of ecosystem services. Thus, it is necessary to use conceptual models adaptively with required modifications.

Key Words: *Environmental restoration, conceptual model, ecosystem services, environmental evaluation*

1. はじめに

海の自然再生を推進するためには、対象水域の環境や生物多様性が人々に提供する生態系サービス、背景となる環境の変動メカニズムやそれら評価指標を政策決定者や市民へ理解しやすい形で示し、再生に向けての行動計画・対策および環境モニタリングに反映させることが重要である。これまでに、沿岸域環境の評価手法として、因果関係に着目したインパクト・レスポンスフロー解析^{1), 2)}, ミチゲーションを目的としたHEP³⁾, HGM⁴⁾, BEST⁵⁾, WET⁶⁾およびHAT⁷⁾など、生物生息量を基本とする生態系評価指標^{8), 9)}, 低次生態系モデル¹⁰⁾, マルチボックスモデル¹¹⁾などの生態系機能に特化した生態系モデル、生物多様性の定量的尺度を示す多様度指数¹²⁾など、環境変化に対する生態系の応答を定量化する手法が開発・提案されている。しかし、これらの手法は社会背景や生態系サービス等の具体的な目標を組み込むことができないこと、現象を詳細に示すあまり構造が複雑で政策決定者や市民にとってわかり難いという弊害が見られた。一方、我が国は、厳しい財政状

況下にあり、環境モニタリングに充てられる予算も縮小傾向にあることから、生態系サービスの向上に向けた効果的な対策・戦略の立案・実施に向けて必要不可欠なモニタリング項目を見極めることが必要である。こうした点からもわかり易い環境メカニズムのフローが必要であると考え。

本研究では、環境要因から生態系サービスまでの一連の環境メカニズムの流れをわかり易く示す概念モデル化を提案する。また、東京湾におけるいくつかの環境問題を対象として、概念モデル例を作成することを目的とした。

2. 生態系サービス

生態系サービスは、生態系の機能や生物から人間が享受している便益を意味し、2005年には地球規模の環境評価書としてミレニアム生態系評価¹³⁾がまとめられている。海辺から享受している生態系サービスとしては、魚介類等の食料や燃料などの供給サービス、干潟による水質浄化や気候の調整などの調整

サービス、釣りやレクリエーションなどの文化的サービス、一次生産や栄養塩サイクルなどの支持サービスが挙げられる。一方、近年において東京湾沿岸から享受できる生態系サービスは低下していると考えられており、例として漁獲量の減少、青潮による二枚貝の大量死などが挙げられる¹⁴⁾。

海の自然再生を目的とした計画や政策の立案では、最終目標を単に水質改善とするのではなく、人が享受する生態系サービスの向上と位置づけた場合、多様な事業効果および目的などの説明や理解がしやすいと考える。従って、本研究における概念モデルのフローの最終目標(ゴール)については、具体的な生態系サービスを挙げた。

3. 概念モデル(Conceptual Model)

(1) 概念モデルの考え方

本研究においては、概念モデルを第7回東京湾シンポジウムのMike Connor氏の基調講演「湾の健康診断」¹⁵⁾を参考として以下の様に定義した。また、概念モデルの作成により、各要素間における「原因-結果」の明確な根拠を確認し、多くの関係者の共有物(情報)として再利用していただけるように整理・整備するプロセスを、概念モデル化と定義した。

- ・ 概念モデルとは、環境要因から目標とする生態系サービスまでの環境メカニズムのフローを、既往の知見および研究から科学的考察に基づいて単純化し、そのフローだけから生態系サービスの向上を目的として何をすべきか、何が変化すると他のものがどのように変化するかを読み取れる様にしたものである。
- ・ 上述における科学的考察とは、概念モデル化を行う者の推測・予測ではなく、調査、研究および実験などから得られた結果を示す。
- ・ 単純化に際しては、ゴールとなる生態系サービスの向上のための行動計画や、有効な対応策および環境モニタリングのための評価指標(モニタリング項目)が読み取れることが肝要である。

(2) 概念モデル化の手順の整理

概念モデル化の手順について、PCM手法(Project Cycle Management)¹⁶⁾を参考に以下の様に整理した。

- ・ 現状の環境問題に関する「原因-結果」の因果関係が明確な要素のセット(中心問題)を抽出する。ただし、要素については定量的な取り扱いが可能なものとする(中心問題の抽出)。
- ・ 既往の知見を参考に、上述で抽出した中心問題の直接的に原因となっている要素(要因)と、中心問題が直接的な原因となって引き起こされている要素(結果)を抽出・単純化し、中心問題を軸とした環境メカニズムのフロー図を作成することで原因-結果を示す概念モデルとする。なお、フロー作成時に用いる要素間の因果関係に

ついて、科学的根拠が不十分な場合は明確化を行い、今後の課題として表記しておく(問題分析)。

- ・ 環境対策事業の抽出を行う場合には問題分析で得られたフロー図を用いて、中心問題が解決されるための要件(対策)とその結果得られる具体的な生態系サービス(成果)を結びつけ対策-成果を示す概念モデルとする(目的分析)。
- ・ 作成した概念モデルから、評価指標すなわち改善度合いの検証や環境メカニズムの解明に向けたパフォーマンス指標(モニタリング項目)を抽出し、生態系サービスとの関係について検証を行う(概念モデルの検証)。
- ・ 作成した概念モデルから、生態系サービスの享受および向上に向けた問題解決手法について検討する(問題解決手法の検証)。

4. 実例を用いた概念モデル化の例

本章では、幾つかの海辺における水環境問題を対象として概念モデル化を行い、対象とした問題を改善することにより享受もしくは向上可能な生態系サービスを挙げ、評価指標および問題解決手法について検討を行った。

(1) 中心問題を「風に伴う貧酸素水塊の挙動」等とした場合の原因-結果の概念モデル化

本節では風に伴う貧酸素水塊の挙動等を対象として、東京湾から得られる生態系サービスの内、文化的サービスとして得られる東京湾奥千葉側沿岸域での日々の散策、および供給サービスとして得られる市原海づり施設周辺(図-1)での日々の釣果について概念モデル化を行い、サービスの享受および向上に向けた対策について検討した。なお魚類は魚種毎に生態および生活史が異なることから、本論における釣果の検討ではシロギス(*Sillago japonica*)を対象種として検討を行った。

a) 東京湾奥千葉側における日々の散策

はじめに、東京湾奥千葉側における北東の風の連吹と貧酸素水塊の湧昇¹⁷⁾、ゴミの流入と吹き溜まり量の増加¹⁴⁾を中心問題として設定した(表-1)。次に、上述した中心問題を軸として、直接的に原因となっ

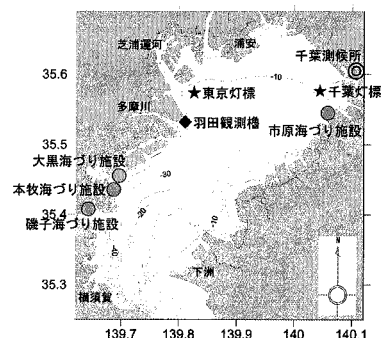


図-1 海づり施設及び水質等観測施設の位置図

表-1 中心問題とフロー図を構成する要素の整理(日々の散策)

因果関係	明確性	各要素間における因果関係
①	△	沿岸域では、河川からのゴミの流入の影響を強く受けている。ただし、具体的な量に関しては不明である ¹⁸⁾ 。
②	○	河川出水時における濁度の上昇は、数多くの調査にて報告されている ¹⁹⁾ 。
③	○	出水時における栄養塩濃度の上昇は、数多くの調査にて報告されている ¹⁹⁾ 。
④	○	栄養塩と赤潮の関係について、数多くの研究結果が報告されている ²⁰⁾ 。
⑤	○	北東風の連吹により底層にある無酸素水塊が沿岸して湧昇する ¹⁷⁾ (中心問題)。
⑥	○	無酸素水塊が湧昇により海表面を青白く変色させる青潮が発生する ¹⁷⁾ 。
⑦	○	青潮は、水産生物など生息生物に多大な影響をもたらす、それに伴う死骸の漂着や青潮自体の悪臭が問題となっている ¹⁴⁾ 。
⑧	○	沿岸域や海浜公園などにおいてゴミなどの吹き溜まりが報告されている ¹⁴⁾ (中心問題)。

※日々の散策では、音や触感、アクセス方法なども考慮すべき重要な一要素と考えられるが、概念モデル化での単純化により省略されている。

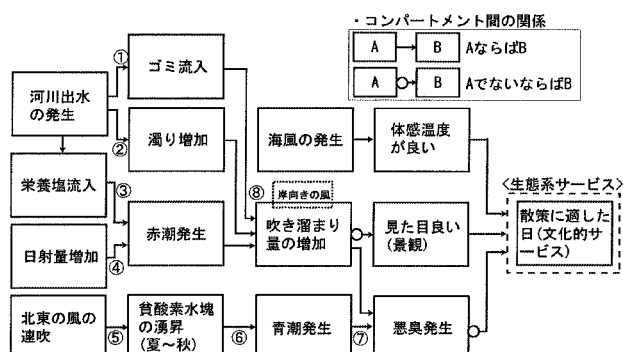


図-2 日々の散策を具体的な生態系サービスとして抽出した概念モデルの例

ている要因と、中心問題が直接的な原因となって引き起こされている結果を抽出し、問題分析を行った(表-1)。中心問題が解決されたことにより得られる具体的な生態系サービスとして沿岸域における日々の散策が快適に実施できることを結果としてフロー図を作成した(図-2)。作成した概念モデルから、日々の散策では北東の風の発達による青潮の発生に伴う悪臭の発生、河川出水によるゴミの流入および栄養塩の流入に伴う赤潮等が、臭いおよび見た目の悪い要因となっていることがわかりやすく示され、風と河川出水が評価指標となることが示された。なお、貧酸素水塊の発生に関する詳細な概念モデル化の例は堀江ら²¹⁾に示されており、問題解決策としては人工干潟の造成、浚渫、覆砂などの対策が実施されているところである¹⁴⁾。概念モデル中における各要素間の因果関係については、図-2中における凡例を参照されたい。

b) 市原海づり施設周辺における日々の釣果

はじめに、市原海づり施設周辺における南風の発達と貧酸素水塊の移動²²⁾を中心問題と設定した(表-2)。次に、既往の知見を参考として中心問題を軸とした環境メカニズムのフロー図を作成し、中心問題が解決されたことにより得られる具体的な生態系サービスをシロギスの日々の釣果を結果として当該中心問題の概念モデル化を行った(図-3)。

概念モデル化の検証として、市原海づり施設における釣果数と周辺における水環境(ここでは、千葉灯標²⁶⁾(図-1)における水質観測結果)とを分析した結果、南の風が卓越すると貧酸素水塊が解消され釣果数が増加した貧酸素水塊が解消時に釣果が増加したこと(図-4中、期間A、B、D、E)、約10.0mを超える南風の連吹した場合は底層における塩分濃度が低下し釣果数が減少したこと(図-4中、期間C)を確認した、なお千葉灯標では、毎正時に水面下0.5mから底面直上1.0mまでサンプリング間隔1.0mでD_O濃度、水温および塩分などが観測されている。以上の結果より、市原周辺における釣果は風による貧酸素水塊の挙動および塩分濃度の変化が大きく影響していることが示され、すなわち日々の釣果を向上させるためには、貧酸素水塊の解消が重要であることがわかり易く示され、対策一成果の概念モデルによる対策事業抽出の可能性も示唆された。

(2) 中心問題を「テラス型護岸への改修による生物生息環境の適正」等とした場合の対策一成果の概念モデル化

表-2 中心問題とフロー図を構成する要素の整理(シロギスの日々の釣果)

No.	明確性	各要素間における因果関係
①	○	南風の影響に伴い、湾内底層水は湾軸西側へ移動する ²³⁾ (中心問題)。
②	○	東京湾奥部で比較的強い南風が連吹すると、表層水が湾奥部へ吹き寄せられ、底層まで高温・低塩分で満たされる状態となる ²³⁾ 。
③	○	シロギスは海底砂面上30cm上を群れて遊泳するため ²⁴⁾ 、貧酸素水塊の影響を受けやすい。
④	○	シロギスは低塩分水塊を好まない ²⁵⁾ 。

※表中以外にシロギスの外敵、食餌、生息箇所、生活史などの既往知見の収集と整理を行ったが、概念モデル化での単純化により省略されている。

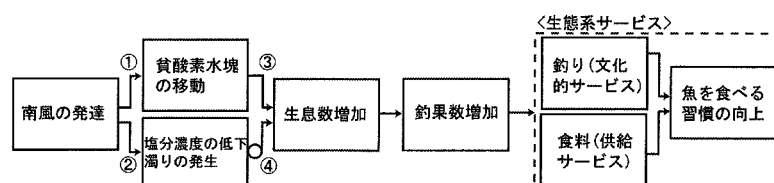


図-3 シロギスの日々の釣果を具体的な生態系サービスとして抽出した概念モデルの例

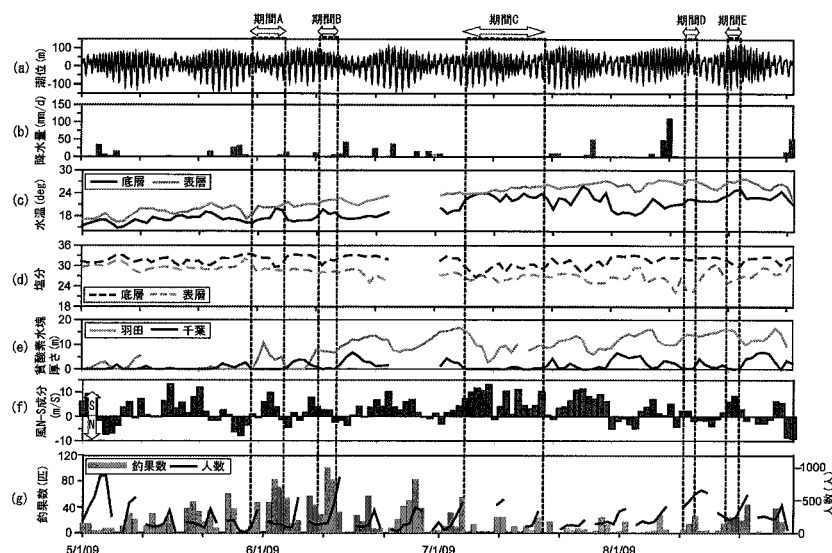


図-4 概念モデル(図-3)の検証結果 (a)実測潮位(千葉灯標), (b)日雨量(千葉測候所), (c)水温(千葉灯標), (d)塩分(同), (e) 海底面からD0濃度が3mg/Lの高さまでと定義した貧酸素水塊の厚さ(千葉灯標, 羽田観測樁), (f)風のN-S成分(東京灯標), (g)シロギス釣果数および釣り客数(市原海づり施設)

芝浦生き物棲み処づくりプロジェクト^{27), 28)}は、都市臨海部における老朽化した護岸を潮だまり部と干潟部を有したテラス型護岸(図-5)へ改修することで生物多様性の場を再生し、それに伴い周辺住民の都市部の水環境への市民の気づきと参加を目標として、行政・市民・研究者の協働で実施された。

貧酸素化した水路において生物が生息できないという問題分析に基づき、テラス型護岸に潮だまりを設けることによって側面や底面に付着した藻類の光合成により溶存酸素量が増加することでマハゼ等の幼稚魚などが生息できる水環境となること、また干潟部を設けることによってベントスやプランクトンの発生によりマハゼやウナギなどの餌料を確保できること、護岸改修前より芝浦護岸に生息しているエビ・カニの生息場を提供することができるようになることなどを目的分析により抽出した^{29), 30)}。こうした要素の総合的な成果としては、市民の気づきとプロジェクトへの参加をととした海域の再生として、対策一成果の概念モデルを作成した(図-5)。

本プロジェクトでは概念モデル化を基に評価指標をゴカイの生息量およびマハゼの生息数とし、その生息数は市民参加によるベントス調査やマハゼ釣り調

査によってモニタリングが実施された。本指標は、政策決定者や一般市民にもわかり易く、かつ生物生息場としての機能を示す重要な指標であったと考えられる。また、溶存酸素濃度を評価指標とした場の機能の評価および問題解決手法の検証については、早川ら²⁷⁾梅山ら²⁸⁾に示されている。

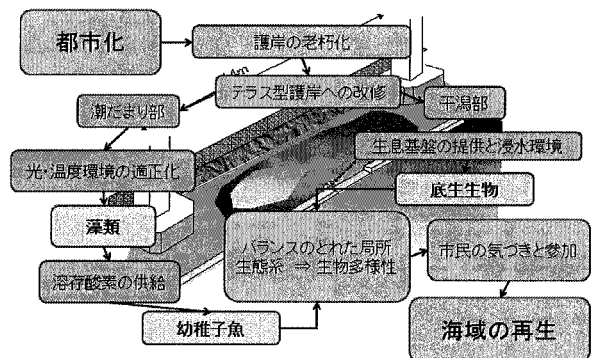


図-5 芝浦生き物棲み処づくりプロジェクトにおいて用いた概念モデル

(3) 中心問題を「水温の変動による魚の成長促進」等とした場合の原因-結果の概念モデル化

表-3 中心問題とフロー図を構成する要素の整理(シロギスのシーズンの釣り)

No.	明確性	各要素間における因果関係
①	○	黒潮流量の長周期変動がアリューシャン低気圧の強度を表す北太平洋指数の長周期変動と5年遅れで相関が高い。このことは、北太平洋中央部における風の変動が黒潮の流量の経年変動を引き起こしていることを示唆している ³²⁾ 。
②	○	北太平洋中央部における風の変動と日本南方の黒潮流量の変動が約3年遅れで相関が高い ³³⁾ 。
③	○	黒潮通過時において水温が上昇する ³¹⁾ 。ただし、蛇行流路に関する留意が必要である(中心問題)。
④	△	植物プランクトンの増加の要因として、水温の上昇や黒潮域の内側(陸側)における海底からの栄養塩の湧昇が考えられる ³⁴⁾ 。
⑤	○	食物連鎖の関係から、植物プランクトンの増減は、動物プランクトン(シロギスの仔稚魚期の餌となるカイアシ類やアミ類)の増減に影響する ²⁵⁾ 。
⑥	△	仔稚魚期におけるシロギスの餌は、主にカイアシ類、アミ類等を多く摂餌する。例としてスズキの仔稚魚期における餌の摂取量は、その後の成長に大きく影響する ³⁵⁾ が、シロギスの場合の生息数にどの程度寄与するかは不明である。
⑦, ⑧	○	東京湾内湾域におけるシーズンの釣果数は、シロギスが湾口側から内湾側へ移動する数に依存すると考える ³⁶⁾ 。
⑨	○	東京湾内湾域において、シロギスの卵や仔稚魚が見られない ³⁶⁾ 。これは産卵時期にシロギスが東京湾口へ移動するためである。
⑩	×	産卵後の成魚の死亡率については不明である。
⑪	○	東京湾沿岸域のほとんどが直立護岸や港湾施設に占められており、陸から直接海に触れることができる場所はほとんどないため、結果的に海や海辺環境に対する市民の関心は薄くなっている ³⁷⁾ 。

※表中以外にシロギスの産卵、仔稚魚、外敵、生活史などの既往知見の収集と整理を行ったが、概念モデル化での単純化により省略されている。

- Wetland, and Functional Indices. Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-9. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.88, 1995.
- 5) Barnett, A.M. and T.D. Johnson: Evaluation of the mitigative value of an artificial reef relative to open coast sand bottom by the biological evaluation standardized technique (BEST), Conference Proceedings, "Recent advances in aquatic habitat technology", 1991.
 - 6) Adamus, Paul R., Lauren T. Stockwell, Ellis J. Clairain, Jr., Michael E. Morrow, Lawrence P. Rozas, and R. Daniel Smith.: Wetland Evaluation Technique; Volume I: Literature Review and Evaluation Rationale. Technical Report WRP-DE-2. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1991.
 - 7) Cable, T.T., V. Brack, Jr., and V.R. Holmes.: Simplified method for wetland habitat assessment. Environmental Management 13, pp.207-213, 1989.
 - 8) 水産庁水産工学研究所：生態系における構造と機能の評価方法に関するレビュー，水産工学研究集録，February 2000 No. 8, 2000.
 - 9) Candy C. Bartoldus: A COMPREHENSIVE REVIEW of WETLAND ASSESSMENT PROCEDURES, A Guide for Wetland Practitioners, ENVIRONMENTAL CONCERN INC, 1999.
 - 10) Yanagi, T, T.Yamamoto, Y.Koizumi, et al.: A numerical simulation of red tide formation, Journal of Marine Systems, Vol.6, 1995.
 - 11) 古川恵太，中山恵介，岡田知也，宮野仁：環境施策に資する内湾域の総合的な把握を目指したMELID-Mbモデルの構築，国総研報告，No. 1, 2002.
 - 12) 小笹博昭，村上和男，浅井正，中瀬浩太，綿貫啓，山本秀一：多様度指数を用いた波高，構造物形式別の付着生物群集の評価，海岸工学論文集，第42巻，pp. 1216-1220, 1995.
 - 13) 浦野紘平，松田裕之：生態環境リスクマネジメントの基礎，オーム社，2005.
 - 14) 東京湾の環境をよくするために行動する会：東京湾読本，2008.
 - 15) Mike Connor：湾の健康診断，第7回東京湾シンポジウム，pp. 6-16, 2006.
 - 16) PCM Tokyoグループ：PCMハンドブック，有限会社ネフカ，2004.
 - 17) 中辻啓二，尹鐘星，湯浅泰三，村岡浩爾：東京湾における吹送密度流と青潮発生機構との関連性，海岸工学論文集，第42巻，pp. 1066-1070, 1995.
 - 18) 栗山雄司，東海正，田嶋健治，兼廣春之：東京湾海底におけるごみの組成，分布とその年代分析，日本水産学会誌，69. 5, pp. 770-781, 2003.
 - 19) 八木宏，江連伸明，井瀬肇，Tanuspong POKAVANICH，灘岡和夫，諸星一信，古土井健，有路隆一，森重輝政，小林聡：東京湾羽田周辺水域における貧酸素水塊と懸濁物質の時空間変動特性，海岸工学論文集，第54巻，pp. 1036-1040, 2007.
 - 20) 鯉渕幸生，五明美智男，佐々木淳，磯部雅彦：現地観測に基づく春季の東京湾における赤潮発生機構，海岸工学論文集，第47巻，pp. 1071-1075, 2000.
 - 21) 堀江岳人，古川恵太，岡田知也：海辺の自然再生の推進に向けた概念モデル化の提案および事例によるモデル例の作成，国総研資料，No. 587号，2010.
 - 22) 八木宏，Tanuspong POKAVANICH，井瀬肇，灘岡和夫，有路隆一，古土井健，下司弘之，古殿太郎，大野幸正：冬季東京湾多摩川河口沖海域への湾外系洲水波及と河口域への影響について，海岸工学論文集，第55巻，pp. 1086-1090, 2008.
 - 23) 八木宏，内山雄介，鯉渕幸生，日向博文，宮崎早苗，灘岡和夫：東京湾湾奥部における成層形成期の水環境特性に関する現地観測，海岸工学論文集，第44巻，pp. 1076-1080, 1997.
 - 24) 関東周辺堤防釣り場ガイド：成美堂出版，2009.
 - 25) 河野博：東京湾魚の自然誌，東京海洋大学魚類学研究室編，平凡社，2006.
 - 26) 海上保安庁：MONITORING POST，海上保安庁WEBサイト，2009.
 - 27) 早川修，古川恵太，川村信一，井上尚子，瀬藤一代，古川三規子：市民協働による生き物の棲み処づくりの実践とその成果，海洋開発論文集，第24巻，pp. 771-776, 2008.
 - 28) 梅山崇，古川恵太，岡田知也：生物生息環境を指標としたテラス型護岸の造成の基本的な考え方，国総研資料，No. 586, 2010.
 - 29) 岡田知也，古川恵太：テラス型干潟におけるタイドプールのベントス生息に対する役割，海洋開発論文集，Vol. 22, pp. 661-666, 2006.
 - 30) 柵瀬信夫，加藤智康，枝広茂樹，小林英樹，古川恵太：都市汽水域の生き物の棲み処づくりにおける順応的管理手法の適用，海洋開発論文集，第23巻，pp. 495-500, 2007.
 - 31) 気象庁：気象庁WEBサイト，2010.
 - 32) Hanawa, K. and J. Kamada: Variability of core layer temperature (CLT) of the North Pacific subtropical mode water. Geophys. Res. Lett., 28, pp.2229-2232, 2001.
 - 33) Yasuda, T. and Y. Kitamura: Long-term variability of North Pacific subtropical mode water in response to spin-Up of the subtropical gyre. J. Oceanogr., 59, pp.279-290, 2003.
 - 34) 松梨順三郎：環境流体汚染，森北出版，1993.
 - 35) 小路 淳：森川海のつながりと河口・沿岸域の生物生産，水産学シリーズ157，恒星社厚生閣，pp. 11-34, 2008.
 - 36) 国土交通省国土技術政策総合研究所：平成14年度東京湾広域環境調査，国総研WEBサイト，2002.
 - 37) 渡辺彰：追浜に“浜”を取り戻す活動，第9回東京湾シンポジウム報告書，pp. 44-50, 2008.