

九州沿岸の環境破壊脆性の評価に関する研究

山城 賢*・入江 功**・長山達哉***・小島治幸****

海域の環境が水質、底質、生物などの生物化学的要因と海域の開口度や潮汐などの物理的要因に支配されるものとするれば、これらの要因をもとに座標図上で海域の環境を評価することが可能となる。本研究では、この座標図を環境座標図と呼び、適正な環境度の算定法を提案の上、九州沿岸の海域について環境評価を行った。また、生態系モデルを用いて物理的環境度の変化に対する生物化学的環境度の変化を推測し、環境座標図上で環境度の変化の特性を調べた。その結果、沿岸域の開発等による物理的要因の変化が同程度であっても、開発前の環境条件が異なれば開発後の環境の変化も異なることを示した。

1. はじめに

海域の環境は、水質・底質・生物などの生物化学的要因と海域の開口度や潮汐などの物理的要因に支配される。もし、何らかの方法で、前者を生物化学的環境度、後者を物理的環境度としてそれぞれ一つの代表的概念で表示できれば、両者を縦軸、横軸にとることで、図-1 に示すような環境座標図を設定でき、ある特定の海域は図中 P の位置で表示できる。この海域に埋立等の開発行為を施せば物理的環境度は悪化し、それに伴い生物化学的環境度は低下するので、P 点は例えば Q 点へ移動する。逆に導水等の改善を行えば右上がりに R 点へ移動する。

本研究では、このような両者の一意的関係を利用して、海域の環境破壊脆性（勾配 PQ）、環境復元性（勾配 PR）を、種々の海域に対して明らかにし、ミチゲーションによる環境修復の難易度予測に資することを目的としている。そこで、まず、環境度の算定手法を提案し、九州各地の沿岸を対象に環境座標図を作成して、その妥当性について検討した。次いで、数値モデルを用いて、環境座標図上で、物理的要因の変化に伴う環境破壊脆性（環境度の変化率）の特性について明らかにした。

2. 環境座標図の作成

(1) 環境要因の収集

図-2 に示す九州沿岸の 12 海域を対象とし、生物化学的要因を得るため、水質、底質、生物について現地調査を行った。調査対象海域のうち、博多湾については平成 14 年の 11 月に図-3 に示す 7 地点で調査を行った。それ以外の 11 海域については平成 13 年の 11 月から 12 月にかけて調査を行っており、一海域につき沖合部と汀線部で数点ずつ調査地点をとっている。

物理的要因は湾口幅、海域面積、浅海面積、浅海域比、開口度、潮差および底質の 50% 粒径とし、海図、既存資料、インターネットなどを参考に概略値を求めた。ここ

で浅海域とは 10 m 以浅の海域を対象とし、開口度は「湾

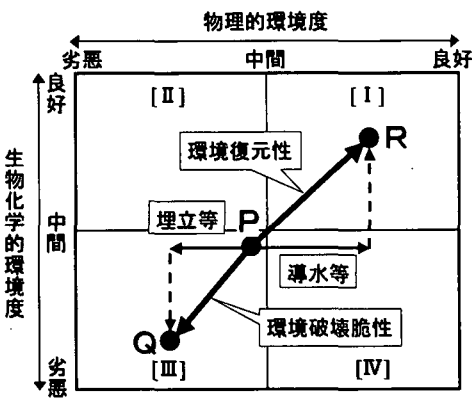


図-1 環境座標図の概念

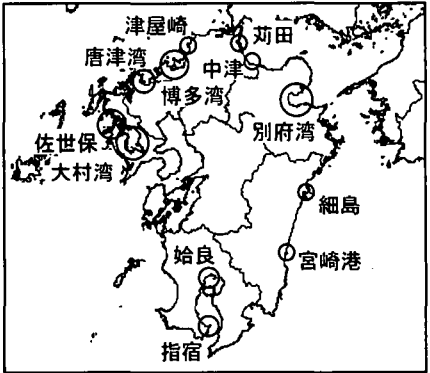


図-2 対象海域

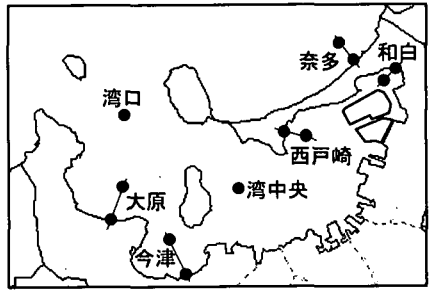


図-3 調査地点 (博多湾)

* 正会員 博(工) 九州大学助手 大学院工学研究院環境都市部門
** 正会員 工 博 九州大学教授 大学院工学研究院環境都市部門
*** 学生会員 九州大学大学院工学部海洋システム工学専攻
**** 正会員 工 博 九州共立大学教授 工学部土木工学科

口幅」と「海域面積の平方根」の比とした。なお、湾として定義されていない海域（宮崎湾、津屋崎など）は海域の範囲を独自に判断し海域面積、開口幅を算定した。

(2) 環境度の算定

環境に対する各要因の重要性はそれぞれ異なり、要因の重要度の決定は環境度の算定において最大の問題点となる。この点を考慮し、主成分分析を用いて生物化学的環境および物理的環境の総合指標を求め、これをもとに環境度を算定する手法を提案する。

まず環境要因に主成分分析を適用し、主成分の意味を吟味して環境の優劣を表す主成分のみを抽出する。次いで主成分の意味から環境度に寄与する方向（正負）を決定し、寄与率（重み）を考慮して次式で環境度を算定する。なお、環境度は「+」を良好、「-」を劣悪とする。

環境度 = $\sum$ (環境度への寄与の方向

×第 n 主成分得点 × 寄与率) ……(1)

このとき、各要因に対する重要度は次式で表される。

各要因に対する重要度

= $\sum$ (環境度への寄与の方向 × 寄与率

×固有ベクトル) ……(2)

生物化学的環境度については、表-1 に示す生物化学的要因を用いて算定した。主成分分析では要因の種類や数によって主成分が必ずしも環境の優劣を表すとは限らず、また分析者が主成分の意味を判断するため、分析者の主観により結果が左右されることも考えられる。表-1 に示す要因は、主成分が環境の優劣を表すものとなり易いように、試行錯誤的に選択したものである。

図-4 に主成分得点分布および第1・第2主成分の固有ベクトルを示す。なお第3主成分以降は寄与率が低いことから考慮していない。図より主成分の意味を考えると、まず第1主成分は、固有ベクトルよりTN、TPやCODなどが大きく寄与しており、また主成分得点の分布図をみると、湾奥の海域で得点が高く湾口や外洋性の海域で得点が高い。以上のことから第1主成分は海域汚濁の総合指標を表しているものと判断し、寄与の方向を「-」とした。次に第2主成分は底生生物やプランクトンなどの生物要因が大きく寄与している。調査時期は秋から冬であり海域に赤潮は発生していないと考えられるので、第2主成分は海域の生物の豊かさを表しているものと判断し寄与の方向を「+」とした。各主成分の寄与率

はそれぞれ43%、20%である。このときの各要因の重要度を表-2 に示す。これより生物化学的環境度には底質のCODや強熱減量および栄養塩であるTNが大きく寄与し、それらの値が高いほど環境度が低下する。

また、生物化学的要因に対しクラスター分析を適用したところ、図-4 の主成分得点分布に示すように、大きく4つのグループに分けられた。この分類について地形条件を考察すると、グループ1には外洋性の海域が多く、

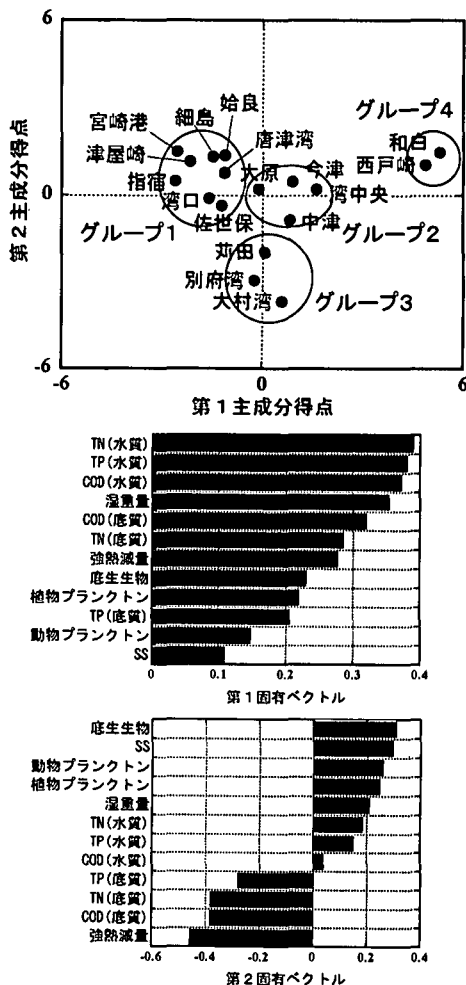


図-4 主成分得点分布および固有ベクトル

表-2 生物化学的要因の重要度

要因	重要度	要因	重要度
SS	0.009	TP(水質)	-0.095
動物プランクトン	-0.008	TP(底質)	-0.103
底生生物(個体数)	-0.027	COD(水質)	-0.109
植物プランクトン	-0.032	TN(底質)	-0.142
底生生物(湿重量)	-0.079	強熱減量	-0.150
TN(水質)	-0.093	COD(底質)	-0.153

表-1 環境度算定に用いた生物化学的要因

水質	TN	底質	TN	生物	植物プランクトン
	TP		TP		動物プランクトン
	COD		COD		底生生物(個体数)
	SS		強熱減量		底生生物(湿重量)

グループ3、4となるにつれ湾奥の海域となっている。

一方、物理的環境度については、海水交換に寄与する物理的要因として、代表的と考えられる湾の開口径と潮差を用いることとした。しかし、要因の数が2つであるため主成分分析による環境度の算定が困難である。そこで環境度は $\Sigma(\text{重要度} \times \text{基準化された要因の値})$ で求められることから、物理的環境度の算定は開口径と潮差をそれぞれ基準化し、重要度を1:1として算定した。なお、開口径と潮差はともに大きいほど海水交換が活発になると考え、寄与の方向は「+」としている。

(3) 環境座標図

図-5に環境座標図を示す。開口径や潮差の大きい宮崎港、苅田、中津の物理的環境度が高く、逆に閉鎖性の海域である大村湾や博多湾は低くなっている。生物化学的環境度は栄養塩や有機汚濁指標が低い宮崎港、指宿、津屋崎で高く、富栄養海域である大村湾や博多湾で低い。また、博多湾では、湾口から湾奥(西戸崎、和白)になるにつれ生物化学的環境度が低下している。したがって、外海との海水交換の点から考えると環境座標図による海域環境の相対評価は概ね妥当なものであると思われる。また、大村湾、和白、西戸崎が最も左下に、宮崎港が最も右上に位置し、全体的には右上がりの配置になっており、物理的環境度と生物化学的環境度に相関があることを示している。

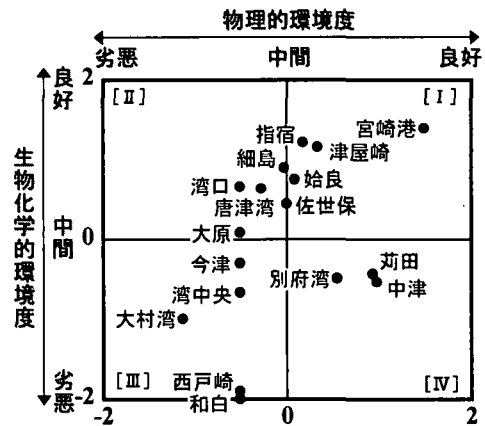


図-5 環境座標図 (九州沿岸12海域)

例えば、TNは PO_4 と植物プランクトンおよびデトリタスに含まれるリンの総和として表すなどして推定した。

(2) 計算条件

対象海域は博多湾とする。博多湾では、人工島の建設が平成6年から行われており、現在では埋立はほぼ完了している。したがって、対象とする地形は図-7に示すように埋立完了後の地形とした。

計算条件を表-3に示す。低次生産モデルに関する定数や係数は、博多湾を対象に計算を行った既往の文献等を参考に決定した(福岡市, 2000; 藤田, 2001)。

各コンパートメントは一定濃度の状態から計算を開始しており、初期濃度、外海の物質濃度、河川流量および負荷(PO_4)についても既存資料を参考とした。なお、本計算では、季節的な変動は考慮しておらず、水温および塩分の境界条件については年間の平均値程度に設定している。計算時間については、本計算の目的が物理的要因の変化に対する生物化学的要因の変化の程度(変化率)を知ることにあるため、一定の計算時間のもとで比較することとし、濃度分布の様子と計算に要する時間との兼ね合いから10周期とした。

(3) 環境破壊脆性の特性

まず、潮位振幅と流入負荷量を変化要因として、表-4

3. 環境破壊脆性

(1) 数値モデルの概要

数値解析モデルを用いて、環境座標図上で表される環境破壊脆性(物理的環境度の変化に対する生物化学的環境度の変化率)について検討した。使用した数値モデルは潮汐による流動と低次生産を考慮している。以下に数値モデルの概略を示す。

流動モデルは中辻(1994)によるモデル(ODEM)を用いた。支配方程式は連続の式、Navier-Stokesの式および移流拡散方程式で、運動方程式にはコリオリ力が考慮されており、移流拡散方程式は水温と塩分の偏差を解く。なお、本計算では海面加熱は考慮していない。

低次生産モデルの概要を図-6に示す。対象とするコンパートメントはリン酸態リン(PO_4)、植物プランクトン(phyto)、DO濃度(DO)、デトリタス(phyto)の4種である。これらのコンパートメントに関する反応項を加えた移流拡散方程式を、前述の流動モデルと連動して陽解法により解く。

以上の数値モデルにより求められる湾内の物質濃度を、水質項目(TP, TN, SS, COD)に換算して環境度を算定した。なお、水質項目への換算は、博多湾における既存の調査資料(福岡市環境保全部, 1998)をもとに、

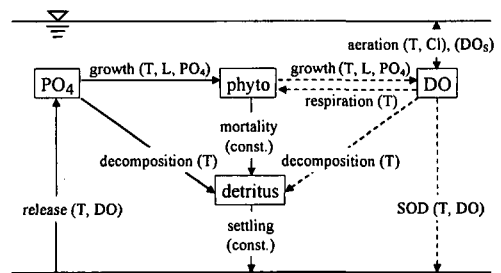
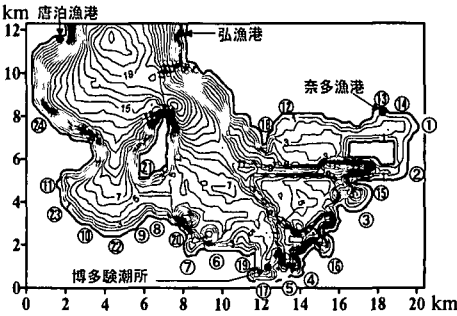


図-6 低次生産モデルの概要

表一4 計算ケース

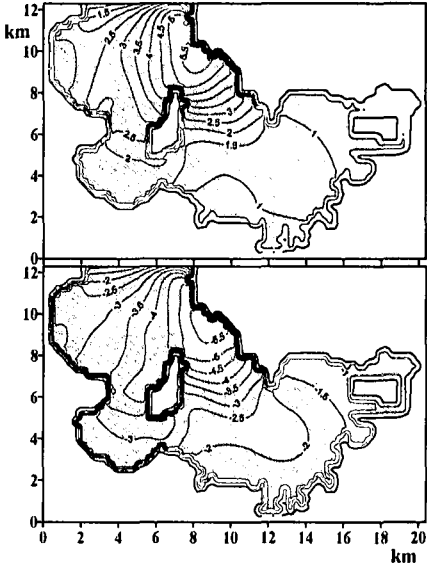
	潮位振幅	流入負荷		潮位振幅	流入負荷
Case A	1.0	1.0	Case A'	1.0×0.8	1.0
Case B	0.5	1.0	Case B'	0.5×0.8	1.0
Case C	1.5	1.0	Case C'	1.5×0.8	1.0
Case D	0.5	0.2	Case D'	0.5×0.8	0.2
Case E	1.5	2.0	Case E'	1.5×0.8	2.0



図一7 計算対象領域 (博多湾: ①, ②などは流入点)

表一3 計算条件

対象海域	博多湾(人工島埋立完了後)
水平格子間隔	$\Delta x = \Delta y = 300 \text{ m}$
水深方向分割数(層数)	6層(下層から5, 5, 3, 3, 3, 3 m)
潮位変動	M_2 潮(周期: 12 時間 25 分)
潮位振幅	0.53 m
計算時間	10 周期
時間間隔	$\Delta t = 5 \text{ s}$
コリオリ係数	$f = 8.0 \times 10^{-5} / \text{s}$
水平渦動粘性係数	$A_H = 50 \text{ m}^2/\text{s}$
鉛直渦動粘性係数	$A_V = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
水平渦動拡散係数	$K_H = 50 \text{ m}^2/\text{s}$
鉛直渦動拡散係数	$K_V = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
デトリタスの沈降速度係数	$W_{\text{settling}} = 1.16 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
植物プランクトンの死滅速度係数	$k_{\text{mortality}} = 1.16 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
半飽和定数	$K_s = 5.0 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^3$
デトリタスの分解に関する係数	$a_{\text{dec}} = 1.74 \times 10^{-7} / \text{s}$
デトリタスの分解に関する係数	$b_{\text{dec}} = 0.0693$
DOの初期濃度	0.25 molO/m^3
PO ₄ の初期濃度	$0.33 \times 10^{-3} \text{ molP/m}^3$
phytoの初期濃度	0.01 molC/m^3
detritusの初期濃度	0.053 molC/m^3
外海のDO濃度	0.25 molO/m^3
外海のPO ₄ 濃度	$0.11 \times 10^{-3} \text{ molP/m}^3$
外海のphyto濃度	0.005 molC/m^3
外海のdetritus濃度	0.0265 molC/m^3
外海の塩分濃度	33‰
外海の水温	20°C
河口の塩分濃度	28‰
河川水の水温	18°C
河川水のDO濃度	0.26 molO/m^3



図一8 Case A を基準とした COD 濃度の偏差 (%)
(上: Case B (潮位振幅-50%), 下: Case C (潮位振幅+50%))

い生物化学的要因が変化することがわかる。なお、他の要因についても同様に変化することを確認している。

図一9 に環境座標図を示す。生物化学的環境度は、全計算ケースについて、4つの生物化学的要因(TN, TP, COD, SS)の全海域における平均値を求め、要因ごとに基準化し、重要度を考慮して算定した。なお、要因の重要度は九州沿岸の海域を対象として得られた値(表一2)を利用している。物理的環境度は変化させた要因が潮位振幅のみ(負荷は物理的要因として取り扱っていない)であるため、潮位振幅の増減率で表した。また、図中のA(1.0, 1.0)などは計算ケース(Case A を基準とした時の潮位振幅の比, 流入負荷の比)を示す。なお、図に示した環境度は、Case A における環境度が原点に位置するよう若干の調整を行っている。図より現状(A点)に対し潮位振幅が0.5倍に減少すると、物理的環境度の低下に伴い、生物化学的環境度も低下しプロットはB点に移動する。逆に潮位振幅が1.5倍に増加すると、生物化学的環境度も増加しC点に移動する。これは物理的要因の変化が海域の環境に影響することを顕著に表している。また、B点とC点を比較すると、物理的環境度(潮位振幅)の変化率に対する生物化学的環境度の変化率が異なる

に示す10ケースについて計算を行い環境破壊脆性の特性を調べた。Case A は表一3 に示すほぼ現状の条件における計算であり、このときの潮位振幅と流入負荷量を基準とする。これに対し、潮位振幅を0.5倍および1.5倍にしたケース(Case B および C)、潮位振幅に加えて流入負荷量を0.2倍および2.0倍にしたケース(Case D および E)、さらに、Case A~E のそれぞれに対して、潮位振幅を0.8倍にした Case A'~E' について計算を行った。

図一8 に計算結果の一例を示す。現状の条件である Case A の COD 濃度を基準としたときの Case B および C における COD 濃度の偏差を示したものである。図より、潮位振幅が減少すると湾内の COD 濃度が高くなり、逆に潮位振幅が増加すると COD 濃度が低下していることから、物理的要因(この場合は潮位振幅)の変化に伴

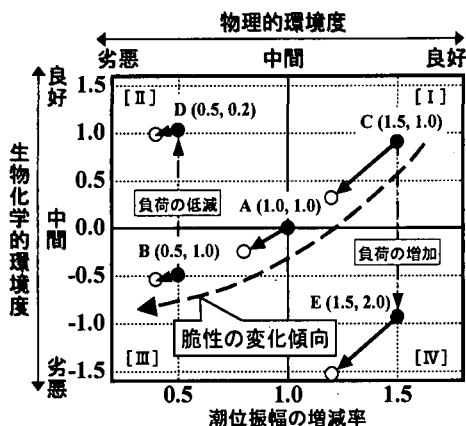


図-9 潮位振幅の変化による環境破壊脆性の変化
(図中の括弧内は Case A を基準とした時の(潮位振幅の比, 流入負荷量の比)を示す)

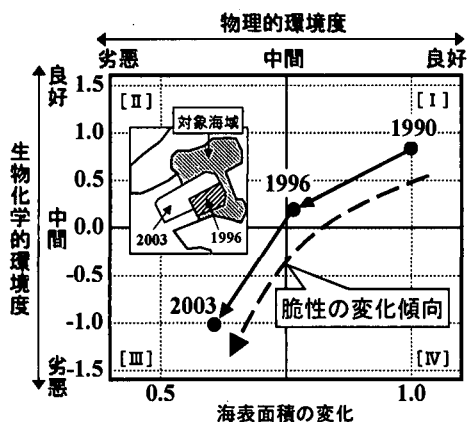


図-10 海表面積の変化による環境破壊脆性の変化

ることがわかる。さらに、B 点は流入負荷量を 0.2 倍にすると D 点へ移動し、C 点は負荷量を 2.0 倍にすると E 点に移動する。このことは負荷が海域環境の優劣に大きく影響することを示している。B～E の 4 点はいずれも仮想的な条件のもとで算定された環境度であるが、現実においても流入負荷などの周辺環境によって D 点(第 II 象限)や E 点(第 IV 象限)に位置する海域が存在するものと思われる。そこで、異なる象限における環境破壊脆性(環境度の変化率)を調べるため、A～E 点の条件に対し潮位振幅を 20% 減少させたところ、各点はそれぞれ移動(図中○)し、環境破壊脆性は実線の矢印で表される結果となった。このことから物理的要因の変化が同程度であっても、本来の環境条件(どの象限に位置しているか)

によって環境破壊脆性は大きく異なるといえる。

次いで、より現実的な問題として、埋立に伴う環境度の変化を同じく数値計算により調べた。図-10 は博多湾の湾奥(図中に示す人工島背後の海域)を対象に、埋立に伴う環境度の変化を示した環境座標図である。図中の数字は西暦を表しており、それぞれの年の水深データを用いて計算している。すなわち 1990 年は埋立が行われる以前、1996 年は埋立途中、2003 年は現況で埋立が完了した状態である。なお、物理的環境度は対象海域の海表面積の比(1990 年を 1 とする)で表している。この図より、埋立面積が広いほど環境度の低下率、つまり環境破壊脆性は大きくなることがわかる。図-9 の結果と併せて考えると、変化する物理的要因やその変化の程度によって環境破壊脆性は異なり、予め脆性を把握することは、開発等を合理的に行う上で非常に有用であると思われる。

4. おわりに

環境座標図による海域環境の評価手法を考案し、九州沿岸の海域における環境度を算定して、環境座標図による海域環境の相対評価が概ね妥当であることを確認した。また、環境座標図上で表される環境破壊脆性の特性について数値モデルを用いて検討し、物理的要因の変化が同程度であっても、変化以前の環境条件によって環境破壊脆性は大きく異なることなどを明らかにした。

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)(1)(課題番号：13450204、研究代表者：入江 功)の補助を受け、8 大学および 2 国立研究所の共同で行われた研究の一部であることを付記します。また、大阪大学の中辻先生による流動モデル(ODEM)、および独立行政法人港湾空港技術研究所の井上氏による低次生産モデルを利用させて頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 入江 功 (2003)：九州沿岸の環境破壊脆性の総合評価に関する研究、平成 13～14 年度科研費(基盤研究(B)(1))研究成果報告書、192 p.
- 福岡市 (2000)：アイランドシティ整備事業環境影響評価レビュー報告書、824 p.
- 福岡市環境保全部編(1998)：福岡市水質測定結果報告書、219 p.
- 藤田健一 (2001)：水一底質予測モデルの開発と気象要素が底層の溶存酸素濃度に及ぼす影響に関する研究、九州大学学位論文、167 p.
- 中辻啓二 (1994)：大阪湾における残差流系と物質輸送、水工学に関する夏期研修会講義集、pp. A-9-1～A-9-28.