

閉鎖性海域における水環境分析 ～陸域の荒廃による沿岸海域の水環境汚染～

蛭 間 豊 春

1. はじめに

閉鎖性海域の水環境は、周辺陸域の生活や生産活動の影響を最も受けやすい。わが国は、1975年代の高度経済成長に伴い自然環境の改変や環境の破壊が著しく進行し、数多くの「死の海や河川」を出現させた。これは、わが国の地形的な特性から閉鎖性海域の沿岸に都市が形成され、また資源の多くを海外に依存するため貿易港として利用し、産業施設が集中していることから、陸側で発生した汚濁物質が、河川や水路を経由して海域に流れ込み、海域の環境を悪化させていったことによる。このため、水質汚濁防止法や総量規制等の制度が導入され、さらには、公害防止技術の開発・普及や公害防止運動がすすめられた。その結果、一定の改善がなされつつあるものの、期待するほどの成果はなく環境基準の達成にいたっていない⁽¹⁾。

20世紀もまもなく終わる直前の2000年12月末、海の恵みを多く与えてきた有明海に異変が起き、“養殖のりの色落ち”被害発生の報道が全国を駆け巡った。その原因が当時の諫早湾の締め切り工事による影響で、それが有明海の流況メカニズムに変化を与え、生態系や水環境に影響を及ぼしたものと有識者による議論が沸騰したが、この施設が主原因であるといったことも解明されていない。国は2002年11月に、「有明海及び八代海を再生するための特別措置に関する法律」を公布し、即日施行した。閉鎖性海域に関する特別措置を講ずることを制定した法律としては、瀬戸内海に次いで2例目であった。

本研究は、有明海の水環境の悪化が陸域側の生活や社会生産活動からの定常的な汚濁負荷量の排

出と、自然災害や流域開発による非定常的な汚濁負荷量の排出にあるものとしてとらえて影響因子を抽出し、これらの要因と海域の水環境との関連を分析して影響を明らかにしようとしたものである。

2. 有明海の概要

有明海は、九州西岸に位置し長崎、佐賀、福岡及び熊本の4県に囲まれ、南から北に向かって深く入り込んだ閉鎖性の海域である（図2.1参照）。

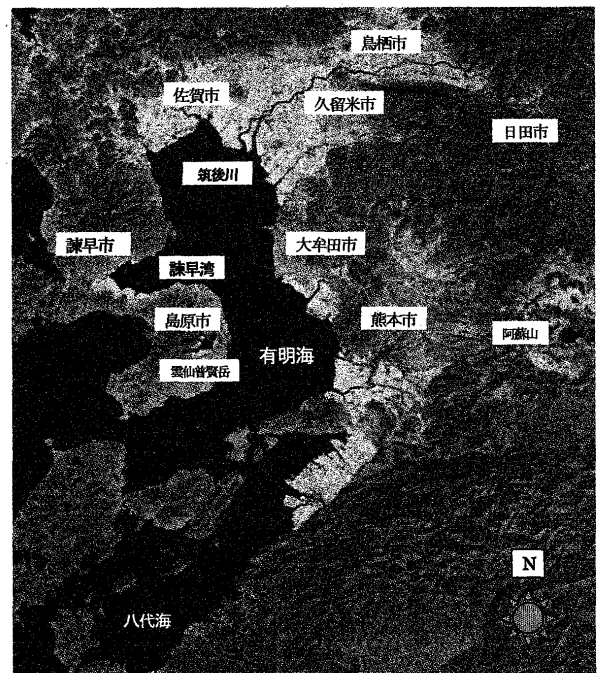


図2.1 有明海概要図

海域面積は1,700km²で、東京湾、大阪湾よりも広く伊勢湾とほぼ同じ面積である。平均水深は約20mで東京湾、大阪湾よりも浅い海域である。流入する河川は、湾奥部に九州最大の河川である筑後川のほか、佐賀、福岡県で比較的大きな河川である矢部川、六角川、嘉瀬川などが流入する。長

崎県では、諫早湾の干拓調整池を經由して本明川が流入する。有明海中心部の東側の熊本県には、菊池川、白川、緑川などの大きな河川がある。そのほかに、塩田川など多くの中小河川が流入し、洪水や発生した汚濁物質を排出する。その流域面積は約8,500km²である。

有明海は、わが国の他の海域に比べ潮汐が著しく大きいという特徴がある。これは、有明海の地形が、比較的広く浅い内湾で開口部が狭いことから、湾内海水の固有振動の周期と海洋から侵入する潮汐の周期とが一致し共振現象を起こすためと考えられている。潮差は湾口で最大約4m、奥部

で6～7mにも達し、この大きな潮汐に伴って大量の海水が内外海を出入りする。湾口部での流速は、大潮時に最大約7ノット（約13km/hr）にもなる。この出入する海水量は、大潮時には約60億m³といわれ、有明海容量の約20%にもなっている。この大きな潮汐によって沈積した底泥が、激しい攪拌のため絶えず巻き上げられる。このため、透明度は年間を通じて0.3～3程度で、常に黄土色に濁った海水色を呈している⁽²⁾。

九州地方の主な閉鎖性の海域を表2.1に示した。いずれも、水環境保全対策に多くの時間と労力が求められている海域である。

表2.1 九州地方の主な閉鎖性海域（海域面積100km²以上）⁽¹⁾

名称	湾口幅 (km)	面積 (km ²)	湾内最大水深 (m)	湾口最大水深 (m)	閉鎖度 (α)	海域の位置する都道府県
鹿児島湾	11	1,040	237	111	6.26	鹿児島県
有明海	4.5	1,700	164.6	117	12.89	福岡・佐賀・熊本・長崎・大分県
八代海	1.3	1,200	89	73	32.49	熊本・鹿児島県
橘湾	11.59	131	39	39	0.99	長崎県
大村湾	0.33	321	54	54	54.29	長崎県
伊万里湾	4.2	120	56	56	2.61	佐賀・長崎県
唐津湾	10.7	150	32	32	1.14	佐賀・福岡県
博多湾	7.7	134.2	23	17	2.04	福岡県

注) 閉鎖度指数 $\alpha = (\sqrt{S} \times D_1) / (W \times D_2)$ W: 湾口幅 S: 面積 D₁: 湾内最大水深 D₂: 湾口最大水深

3. 有明海の水質環境

3.1 有明海内の湾内環境

河川より排出された阿蘇火山灰土や汚濁物質は、いったん沖合に運ばれたのち満潮時には再び海岸近くに押し戻され堆積する。この現象を長い間繰返しながら干潟を徐々に発達させてきた。図3.1に示すように、有明海の反時計回りの潮流は、南から北に向けて流れ東側の河川より排出された汚濁物質を湾奥へと運び、佐賀県沖合の湾奥西部海域に滞留する⁽³⁾。この現象は、図3.2に示すように有明海内の干潟形成にも特色付けられている。すなわち、湾奥には泥質の干潟が発達し、東岸では砂質を主とした干潟が形成されている。また、西岸では、入り江となっている諫早湾を除き干潟の発達がほとんど見られない⁽²⁾。

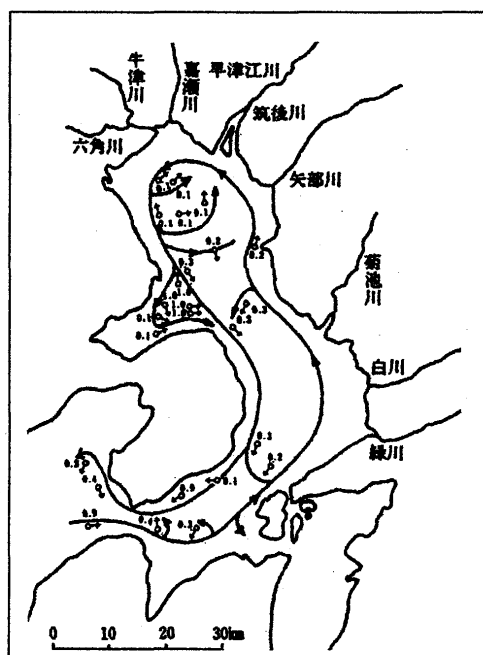


図3.1 有明海の湾内環流⁽³⁾

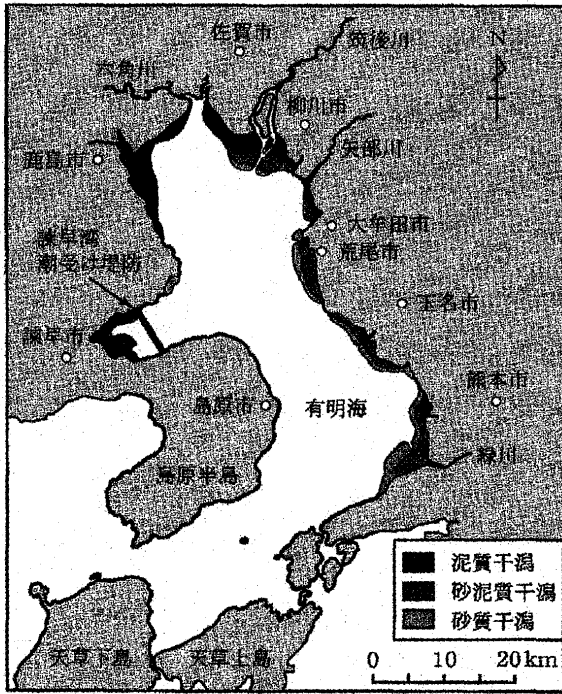


図3.2 有明海の主な干潟の底質区分⁽²⁾

著しく環境基準を超えた観測値となっている。水質濃度の平面分布状況も、ここ10年間で湾奥西部海域の水質濃度が年々上昇して悪化傾向にあることを示している（図3.5参照）。特に1997年から2000年にかけての環境悪化が著しい。



図3.3 有明海湾奥部および観測点（A-1,2）位置

3. 2 水環境分析

有明海の湾内還流の特性から、海域内の水質濃度分布にも大きな特徴が見られる。すなわち、有明海東岸は、汚濁物質が湾奥に向けて移動することから、絶えず新鮮な海水が供給されるため比較的COD値も低く環境基準以下となっている。しかし、湾奥部の観測点（図3.3参照）の水質調査結果から、図3.4に示すように、湾奥域には絶えず汚濁濃度の高い海水が流れ込むため環境悪化が

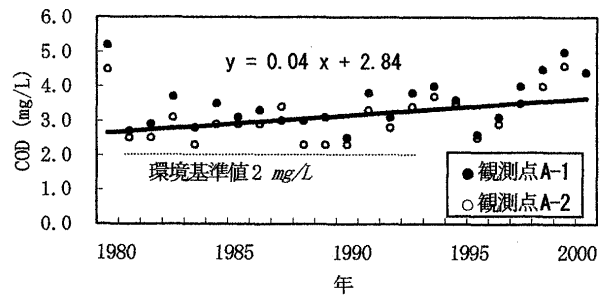


図3.4 佐賀県沖（湾奥）の水質（COD75%値）変化（環境省公共用水域水質調査資料より作図）

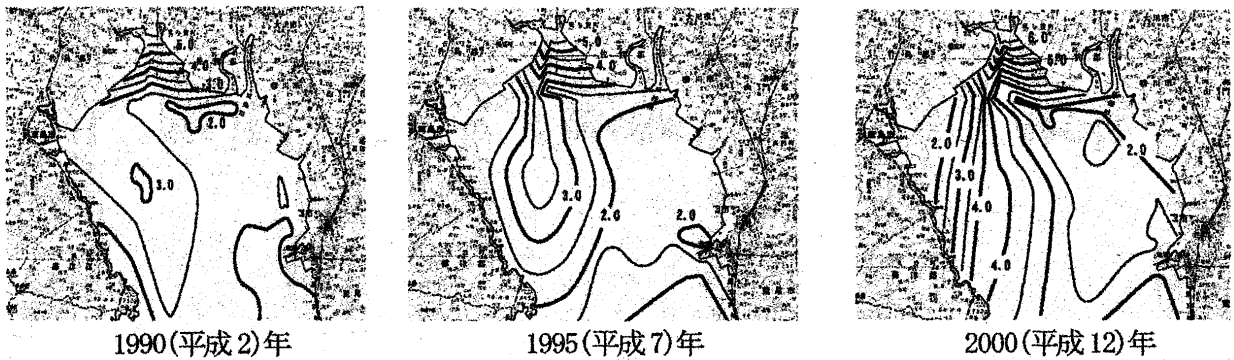


図3.5 有明海湾奥部の水質濃度（COD75%値）分布図（環境省公共用水域水質調査資料より作図）

3. 3 水質悪化にともなう環境変化

水環境の悪化は、赤潮の発生回数を増加させ、さらに漁獲高にも影響を与えている。養殖を主体とする車えびや二枚貝などは、魚類のように水環境悪化域から避難することができないため漁獲高に直接影響して急激な減少を示している。

湾奥に発生した赤潮回数と湾奥水質の相関を分析するとかなり強い相関性があり、湾内の漁獲高

もまた赤潮発生回数とかなり高い相関関係が認められた。統計値の分析からも湾奥水質の悪化に伴い漁獲生産高が指数関数的に減少する傾向を示している（図3.6参照）。特に定着性の漁種である養殖主体の車えびやアサリ、のりなどの漁獲高は、直線的な減少傾向を示している（図3.7～図3.9参照）。

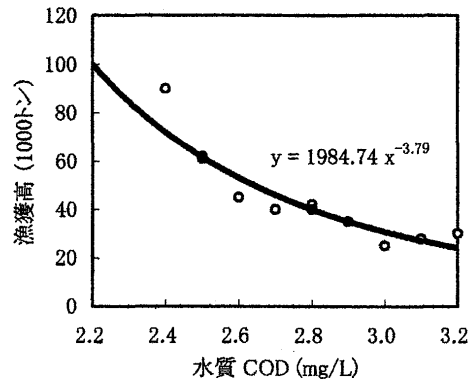
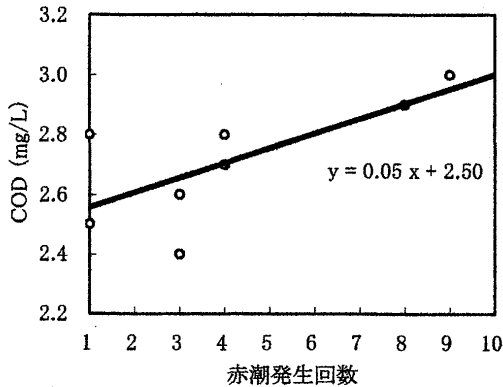


図3.6 湾奥における赤潮発生回数と水質（COD）および漁獲高の関係
（資料：九州農政局統計より作図）

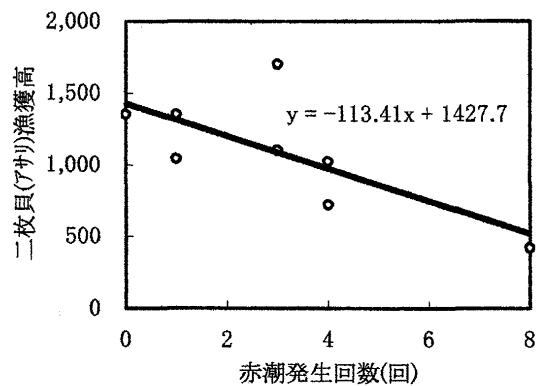
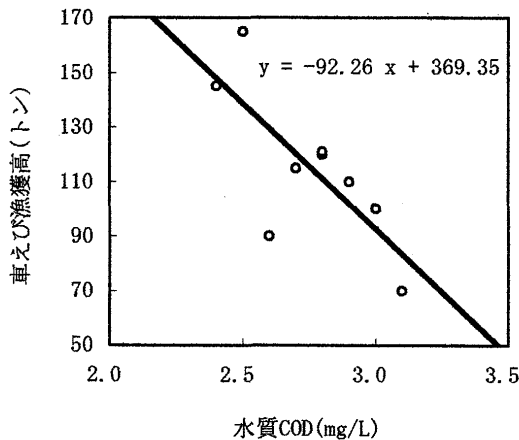


図3.7 車えび漁獲生産高と湾奥水質
（生産高：九州農政局統計より作図）

図3.9 湾奥赤潮発生回数と湾奥アサリ貝漁獲量
（漁獲高：九州農政局統計より作図）

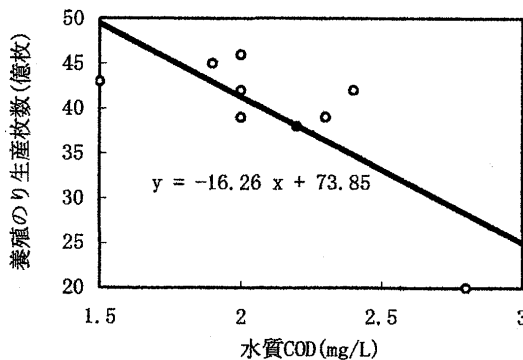


図3.8 養殖のり生産枚数と湾奥水質
（生産高：九州農政局統計より作図）

3. 4 自然災害による陸域荒廃が有明海の水環境に与えた影響

3. 4. 1 風倒木災害による山林荒廃の影響

1991年台風19号の最大瞬間風速60.3m/secという暴風は、北部九州に広範囲の倒木災害をもたらした。特に、筑後川や矢部川上流の山地に被害が集中し、筑後川上流域で190km²、矢部川流域で10km²以上の山林に倒木被害を及ぼした。倒木数は、1,500万本とも数えられ、洪水とともに排出され

る流木による河川施設への被害は現在でも続いている。

この現象は、森林の木材生産のために大量かつ広範囲な面積を皆伐したことと同様で、森林生態系に与える影響は、極めて甚大なものと報告されている。林野庁が北九州地方の杉林で行われた実験⁽⁴⁾では、皆伐後の流出水中の硝酸態窒素濃度（硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）とは、硝酸塩をその窒素量で表したものをいう）が急激に上昇し、その影響が約2.5年続いたと報告されている。これは荒廃した斜面の土壌表面が雨滴や表面流に曝されるようになったためで、様々な栄養塩が流出し下流河川や沿岸海域の水質濃度を増加させている。また、裸地化された斜面からは泥土も排出され河川を通じて有明海に流入する。筑後川や矢部川流域から排出された汚濁負荷量の影響によって1991年から湾奥西部海域のCOD値が急激に上昇している（図3.10参照）。

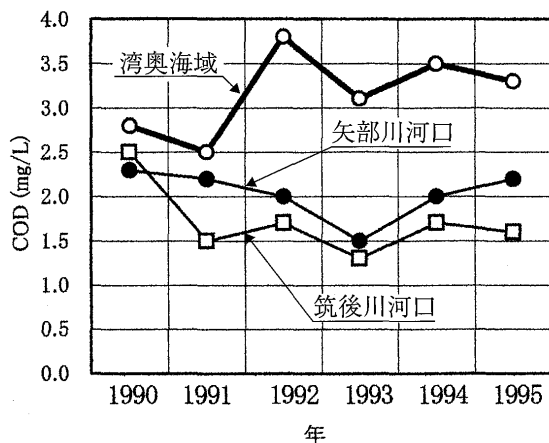


図3.10 災害後の海域水質の挙動
(環境省公共用水域水質調査資料より作図)

3. 4. 2 雲仙普賢岳の噴火に伴う海底環境の変化

有明海西岸、島原半島の中央に位置する雲仙普賢岳が、1990年11月17日に198年ぶりに噴火を開始した。この噴火活動によって火砕流や土石流が数多く発生し、山麓市町村の島原市や深江町に甚大な被害をもたらした⁽⁵⁾。噴出した総溶岩量は、1992年8月現在で約1.1億 m^3 であり、火砕流の堆積量（空隙も含む体積）は約1.06億 m^3 に達した（元建設省土木研究所及び国土地理院資料）とい

われ、この時点ではまだ噴火は継続をしていた。これらの堆積した噴出物は、いずれ降雨などによって運ばれ、土石流として有明海西岸の島原沖の海底へと沈積する。

この影響による被害の想定を検討は行われていないが、島原沖海底の底生生物の減少などが観測されている⁽²⁾。このことから島原沖の海底地形の変化や底質土壌の組成変化などが現れるものと考えられ、タイラギ貝をはじめとする二枚貝への漁獲高への影響があるものと想定される。

3. 5 社会現象の変動による陸域荒廃が有明海水環境に与えた影響

20世紀後半は人口の都市集中化の激しい時代であった。わが国においても、首都圏・近畿圏・中京圏などへの人口集中が著しく、都市域は拡大を続け過密化した都市環境を形成していった。この人口集中現象は、地方にも影響して県庁所在地などの中核都市も、人口増と都市域の拡大を続けていた。一方、農山漁村地である中山間地域では、都市への人口供給源となって流出が激しく過疎化し、高齢化の進捗によって後継者不足に悩み、生産従事者の減少に伴って放棄された農地が増加し、山村では手入れの行き届かない山林が増え続け、また放棄された牧場地などが目立つようになった。特に、河川流域上流の荒廃地からは、土砂や栄養塩の流出となり、より一層下流の河川や沿岸海域の汚濁を進めていった。林野庁の統計調査によれば、九州山地の山林において伐採後約3年以内に植林事業を行わない放棄地は、約4,600ha（2003年3月末）で、全国24,700haのうち、18.6%を占めている。このうち、有明海沿岸県である5県の統計は、約850haで、九州山地の放棄山林の約18%となっている。有明海沿岸域の市街地面積拡大推移と福岡県における潰廃耕作地面積の推移を示すと、いずれも増加傾向を示している（図3.11参照）。

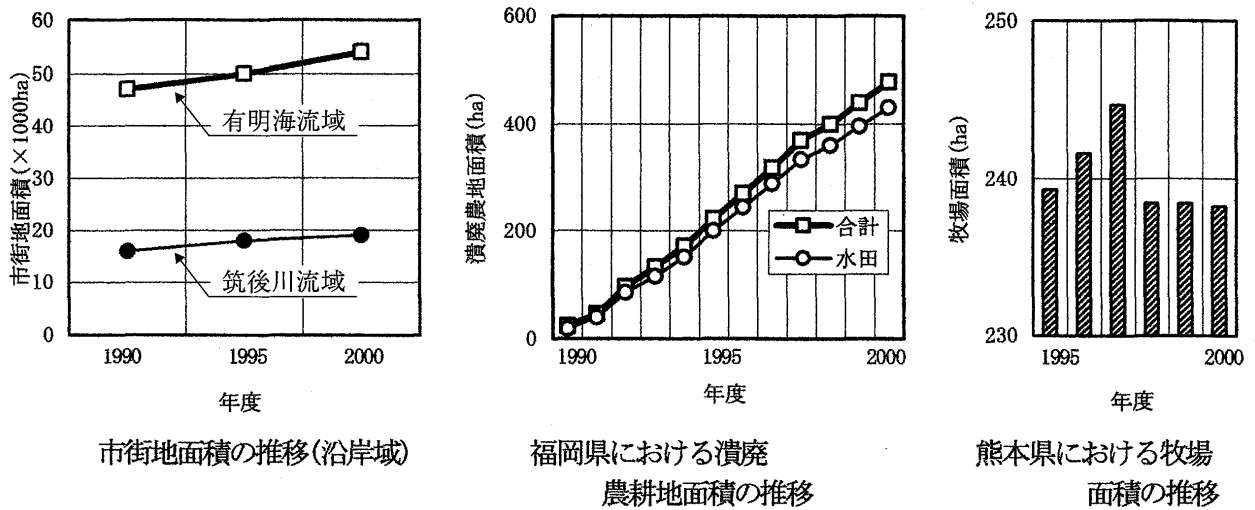
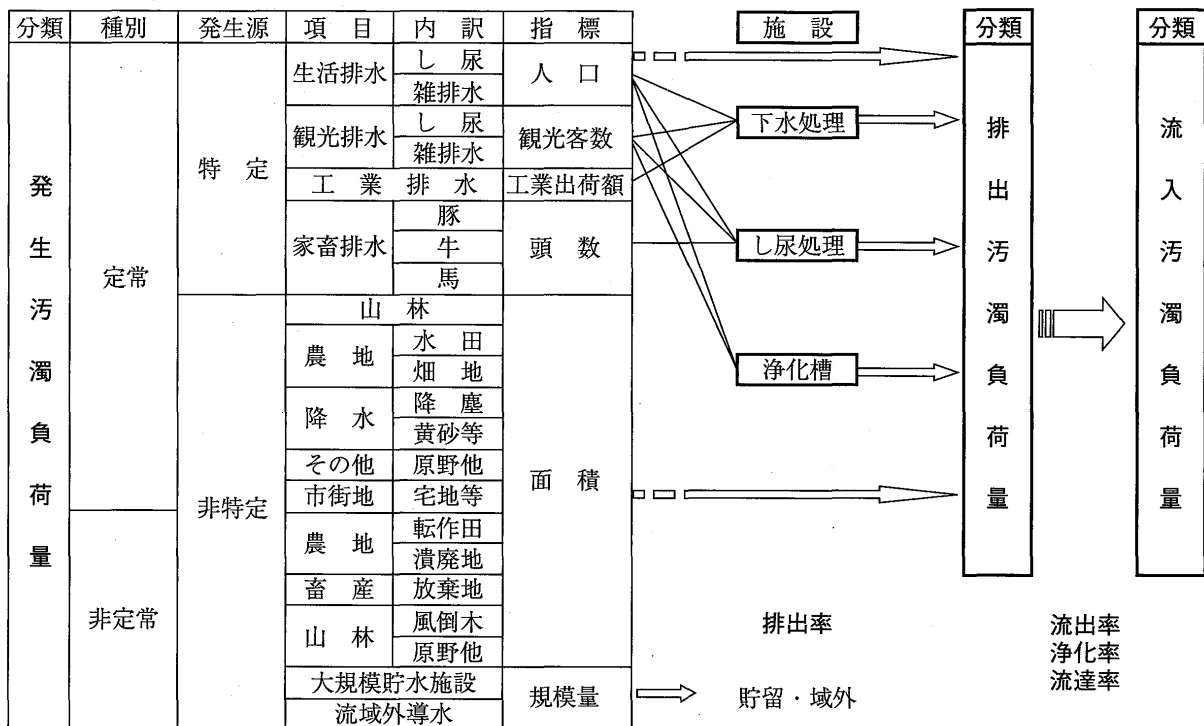


図3.11 社会の変動による市街地・農耕地・牧場地面積の変化

4. 陸域からの流入汚濁負荷量

陸域からの汚濁負荷量を、生活・社会産業活動による定常的な汚濁量と社会構造の変化や自然災害などによって発生する非定常的な汚濁量に分類して算定した。図4.1は、項目毎の発生した汚濁

負荷量が、有明海に流入するまでのプロセスを示したものである。表4.1は流域内の統計資料をもとに、発生汚濁負荷量、排出汚濁負荷量及び有明海流入汚濁負荷量を算定して集計したものである。



発生汚濁負荷量：陸域の発生源から水系に流入する汚濁負荷量
 排出汚濁負荷量：発生汚濁負荷量を人為的な処理・回収や施設への貯留、流域内貯留、域外に排出された量が控除された汚濁負荷量。排出率＝排出汚濁負荷量／発生汚濁負荷量
 流出汚濁負荷量：排出された汚濁負荷量が河道や水路を通じて海域に流入する汚濁負荷量。河道内の浄化作用や沈積による控除後に河口に流達する汚濁負荷量。海域側からは流入汚濁負荷量となる。
 流出率（流達率）＝流出汚濁負荷量／排出汚濁負荷量

図4.1 陸域からの流入汚濁負荷量プロセス

表4.1 有明海沿岸流域の汚濁負荷量 (単位：トン)

年 度	発生量	排出量	排出率 (%)	流入量 (流達)	
				流出量	流出率 (%)
1990	140,356	89,454	63.73	89,122	63.50
1995	144,542	86,969	60.17	84,527	58.48
2000	147,757	79,166	53.58	78,470	53.11

5. 陸域から流入する汚濁負荷量と有明海湾奥水環境と関連分析

5. 1 有明海湾奥水質に影響を及ぼす排水項目
有明海湾奥水質に影響を及ぼす排水項目と河川流域を明らかにするため、湾奥水質の実測値を目的変数とし、流域からの汚濁負荷量を説明変数として、重回帰分析によって検討した結果は次表に示すとおりである。

(1)ケース1 有明海湾奥の水質に影響する河川流域

有明海に流入する河川流域の面積、人口、人口密度、1 km²当たり流入汚濁負荷量、流入する汚濁負荷量を説明変数として、最も有明海湾奥の水環境に影響する河川流域について分析した (表5.1 参照)。

表5.1 有明海湾奥水質に影響を及ぼす河川流域

第1位流域	対象河川：筑後川、矢部川、菊池川、白川、緑川、嘉瀬川、六角川、本明川、中小河川				
	流域面積	人口密度	1 km ² 当たり汚濁負荷量	流域人口	汚濁負荷量 1900~2000年平均
	筑後川 占有率33.8%	白川 750人/km ²	本明川22.7トン (1993年)	筑後川 約116万人	筑後川 BOD換算 15,047トン

(2)ケース2 湾奥の水質濃度と排水負荷量との関連

有明海に流入する汚濁負荷量の排水項目と湾奥水質の分析をおこなった。説明変数となる排水項目は生活排水、観光排水、工業排水、家畜排水、自然排水、社会変動の影響による排水の6変数とし、湾奥水質濃度との関連を分析し、重要度係数の高い排水項目が影響の強度が大きいものとした

(表5.2参照)。

なお、社会変動による影響汚濁負荷量とは、大規模公共施設による汚濁量の貯留影響、域外導水による汚濁量の排出影響、風倒木災害による汚濁量増加影響、潰廃耕作地、牧場放棄による汚濁量増加影響、転作による農地の用途変更による排出汚濁内容の変化による影響量である。

表5.2 湾奥の水質濃度に影響を及ぼす流達負荷量

排水項目：生活排水、観光排水、工業排水、家畜排水、自然排水、社会変動の影響による排水				
重相関係数R	0.975	重要度ランク	i	ii
重決定係数R ²	0.950	排 水 項 目	生活排水	自然排水

注) 重要度ランク：説明変数の目的変数に対する影響度を表す指標

(3)ケース3 湾奥の水質濃度に影響を及ぼす河川流域

この分析では、有明海湾奥の水質濃度に影響を与える河川流域を明らかにするため、各河川流域から排出される汚濁負荷量を説明変数とした分析

と、河口基準点の実測水質 (BOD) を説明変数とした2ケースについて検討をおこなった (表5.3参照)。

表5.3 湾奥の水質濃度に影響を及ぼす河川流域

①排出される汚濁負荷量が湾奥水質濃度に影響を及ぼす河川流域							
対象河川：筑後川、矢部川、菊池川、白川、緑川、嘉瀬川、六角川、本明川、中小河川							
重相関係数R	0.974	重要度ランク	21.20	17.16	10.36	2.15	1.23
重決定係数R ²	0.949	河川流域	白川	中小河川	本明川	嘉瀬川	筑後川
②河川河口基準点の実測水質値と湾奥水質との関連							
重相関係数R	0.998	重要度ランク	i	ii	iii	iv	v
重決定係数R ²	0.995	河川名	中小河川	菊池川	筑後川	本明川	嘉瀬川

注) 重要度ランク：説明変数の目的変数に対する影響度を表す指標

(4)ケース4 河口の水環境に影響を及ぼす排水項目

この分析は、有明海に流入する河川流域の排水項目が、河口の水質濃度に影響を及ぼす強度について分析したものである。すなわち、各河川流域の排水項目を説明変数とし、河口環境基準点実測水質濃度を目的変数とした重回帰分析をおこなった(表5.4参照)。その結果、それぞれの河川流域

の特徴と一致している。例えば、白川流域は、人口規模の大きい都市である熊本市が存在し、上流阿蘇地域には、他地域からの観光客の流入があることから生活排水や観光排水の影響が大きく現れている。一方、本明川流域は、諫早市1市だけの流域で、都市河川としての様相が強く現れている流域となっていることから生活排水や工業排水の影響が大きい。

表5.4 河口の水環境に影響を及ぼす排水項目

流域	重要度ランク (影響度順位)					
	i	ii	iii	iv	v	vi
筑後川	生活排水	その他排水*	自然排水	工業排水	家畜排水	観光排水
中小河川群	観光排水	自然排水	生活排水	家畜排水	工業排水	—
本明川	生活排水	工業排水	自然排水	家畜排水	観光排水	—
嘉瀬川	自然排水	その他	観光排水	生活排水	家畜排水	工業排水
白川	生活排水	観光排水	自然排水	工業排水	家畜排水	—

* その他排水：社会変動による影響汚濁負荷量で、大規模公共施設による貯留影響、域外導水による排出影響、風倒木災害による汚濁増加影響、潰廃耕作地、牧場放棄による汚濁増加影響、転作による農地の用途変更による汚濁種変化の影響量である。

5.2 主成分分析による新目的変数解析

各排水項目の細目を表5.5に示す16因子による主成分分析をおこなった。この結果、2主成分で累積寄与率が90%以上となり、主成分分析による関数式(主成分)は2式で表され、新しい概念の目的変数を導く関係式が得られた。1つは、主成分1の固有ベクトルが全てプラスであるから「総合力」を表す。すなわち排水規模の大きさを表現する因子(Size factor)である。2つ目は、社会的な変動や自然災害による排水細項目がプラスとなり、定常的に排出される項目がマイナスとなる。このことは、流域内の社会現象や農業経営形態、

自然災害による排水増加などを表す形の因子(Shape factor)であることが明らかとなった。

さらに、固有ベクトル点図を示すと、座標系中に4つのグループ分けができる因子群が存在する。すなわち、主成分1をプラスにするグループで、社会経済活動要因の規模及び生活規模の変動による要因規模から定まる排水項目群である。マイナスとするグループには、大規模公共施設による汚濁負荷量の貯留、域外に排出する導水事業、転作による汚濁の種類を変化させる排水項目である。

一方、主成分1、2を共にマイナス化させる変

数は、流域外に水量と汚濁負荷量を運び出す導水事業の項目である。また、主成分2をプラス化させるグループは、社会経済活動要因の規模及び生活規模の変動による要因である。マイナス化させ

る要因は、生活規模を変化させる要因や農業形態の変化による土地用途変更が影響している（図5.1参照）。

表5.5 主成分分析による排水細項目

項目	細項目
生活排水	①雑排水 ②し尿排水
観光排水	③雑排水 ④し尿排水
工業排水	⑤食料品製造業
家畜排水	⑥牛、豚、馬
自然排水	⑦市街地排水 ⑧水田排水 ⑨畑地・樹園地排水 ⑩山林排水 ⑪原野・雑種地排水
社会の変動影響による汚濁負荷量	⑫大規模公共施設による影響 ⑬域外導水による影響 ⑭風倒木による山林荒廃による影響 ⑮潰廃耕作地・牧場放棄による影響 ⑯転作田による影響

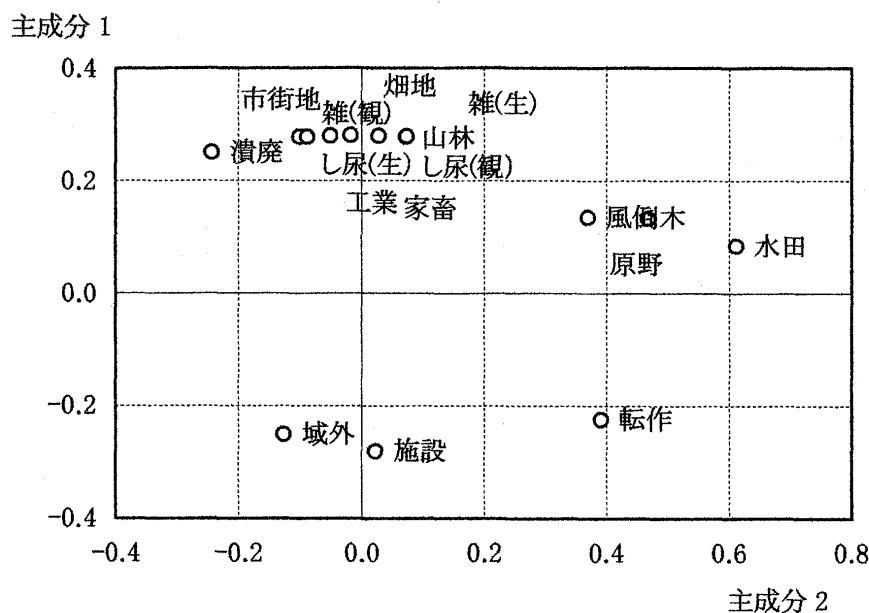


図5.1 主成分分析による固有ベクトル点図

6. まとめ

豊穰の海と言われた有明海水環境の状況変化をケーススタディとして、沿岸流域（福岡・佐賀・熊本・長崎・大分の5県25市130町16村、流域人口約350万人／2000年現在）の生活、社会産業活動、さらには社会状況変化、自然環境変化、大規模公共施設の建設等による影響因子を分析し、これらの要因の数量化を試みた。

数量化された要因をもとに多変量解析によって閉鎖性海域に及ぼす陸域からの影響因子を抽出

し、その影響度を明らかにすることができた。すなわち、有明海の水環境に強く影響を及ぼしている生活・社会産業活動因子に、自然災害（洪水、渇水による流域の荒廃、風倒木災害による山林荒廃、火山噴火降灰など）、社会変動（都市人口の集中化、農山村域の過疎化・高齢化、農業政策の変化など）が重なり、水環境の形成に大きく影響をおよぼしたことが明らかになった。さらに、流入する河川流域別の主な影響因子を明らかにし、総量規制や処理施設整備計画等の環境対策への方

針を示すことが可能となったので、今後の法整備や公共事業開発のあり方等の参考情報となることが期待される。

本分析結果から得た結論は、次のとおりである。

- (1) 有明海湾奥の水環境を決定する要因は、沿岸流域から排出される汚濁負荷量が支配的である。
- (2) 流域内の浄化施設（下水処理施設、し尿処理施設、単独浄化槽）による水質改善効果が大きい。
- (3) 2000年現在の流域内の下水処理人口整備率は、約40%（国土交通省調査）であり整備率の向上させることが有明海の水環境改善に大きな効果がある。従って、整備率の向上と栄養塩（窒素・磷など）の排出総量規制に効果が期待できる。
- (4) 大規模河川においては、有明海湾奥の水質状況に生活雑排水の影響が大きいと分析された。これには、単独浄化槽から合併浄化槽への改善が効果的である。
- (5) 中小河川流域の下水施設の整備率が極めて低い。排水処理施設整備の向上は、より水環境改善に効果がある。
- (6) 荒廃した山林、潰廃農地、放棄牧場地などからの発生汚濁負荷量の流出を抑制する対策が必要である。
- (7) 都市化、過疎化などによる用途変更への対策や転作田からの発生汚濁負荷量の流出を抑制すべきである。

キーワード：水質汚濁、水環境因子、自然環境因子、社会環境因子

謝 辞：本研究成果をまとめるに当たり、東亜大学大学院総合学術研究科伊藤猛宏教授並びに福岡克也教授には、多大なご助言、ご指導を賜りました。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- (1)環境庁水資源研究会編集：内湾・内海の水環境、(株)ぎょうせい、1996.12
- (2)佐藤正典編：有明海の生きものたち～干潟・河口域の生物多様性～、海游舎、2000.12
- (3)有明海研究グループ：有明・不知火海域の第4系、地図研専報第11号、(筑後川河川事務所資料)、1965
- (4)長崎福三著：システムとしての<森-川-海>魚付林の視点から、農山漁村文化協会、1998.6
- (5)砂防学会編：火砕流・土石流の実態と対策、鹿島出版会、1993.1