

環境省 第5回有明海・八代海総合調査評価委員会

平成 15 年 10 月 27 日

有明海の海域環境の変動特性

熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター

教授 滝川 清

論文資料：

- ① “有明海の過去 25 年間における海域環境の変動特性”
海岸工学論文集、第 50 巻、土木学会、pp. 1001-1005 (2002)
- ② “有明海とその周辺地域における近年の気候変動の傾向”
海岸工学論文集、第 50 巻、土木学会、pp. 1171-1175 (2002)
- ③ “有明海の潮汐変動特性と沿岸構造物の影響”
海岸工学論文集、第 49 巻、土木学会、pp. 1061-1065 (2002)
- ④ “有明海の中中部海域における環境変動の要因分析”
海岸工学論文集、第 49 巻、土木学会、pp. 1066-1070 (2002)
- ⑤ “有明海干潟底泥の水質浄化能力と物理的かく乱による能力強化に関する研究”
海岸工学論文集、第 49 巻、土木学会、pp. 1121-1125 (2002)
- ⑥ “干潟環境の修復・改善へ向けた対策工とその効果”
- ⑦ “有明海干潟環境変化のメカニズムに関する観測・調査研究について”

1. 「有明海の海域環境特性」

滝川 清

熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター 教授

1. はじめに

有明・八代の海は、豊富な魚介類の宝庫として、また干潟は、魚介類の生産基盤としての役割はもとより、懸濁物質の吸着・分解など浄化機能、更には高潮災害の干渉の役割を果たすなど、かけがえの無い存在である。ところが、数年前から有明・八代の海で、“濁りがひどくなった”、“海藻が減った”、“魚種が変わった”、“水温が上がった”等の環境悪化が顕著になり始め、昨年の平成 12 年 7 月には大量の赤潮が発生し、プランクトンの異常発生に伴う「ノリ被害」など深刻な事態に陥っている。この急激な環境悪化の要因には、干潟域の減少、沿岸域の開発、流域の都市化や農薬使用に伴う汚水物質の流入、河川形態の変化、大洪水に伴う土砂・汚濁物質の大量流入、台風や海流の変動による高温海水の浸入や潮流の変化など様々な原因が考えられるが、詳細な因果関係は不明のままである。長年月の間に“掃き溜め”となり“疲弊している”ことに違いない。

有明・八代海のような閉鎖性が極めて高い海域における環境は、自然の物理・化学的作用と生態系及び人為的行為などの複雑な要素が互いに関連し、その微妙なバランスにより形成されるものであり、今日の環境悪化の原因分析と再生方策については、海域全体の物理化学的環境と生物生産過程を視野に入れた総合的取り組みが必要であり、諫早湾干拓事業の影響もこの枠組みの中で進められるべきである一方、この海域は、平成 11 年 9 月の台風 9918 号による高潮・高波によって甚大な被害を被ったが、特に、

熊本県下では八代海沿岸域を中心に死者 16 名を含む過去最大級の被害を受けた。これは、既往最大の水位をはるかに 2.2m も超えるものであり、もし伊勢湾台風クラスの規模であれば今回を更に約 2 m 近く超える事が計算されており¹⁾、これらの教訓から従来型の防災構造物のみによる“防災”対策では不十分であって、地域住民を含めた“減災”対策への変革が必要であることを認識させるものであった。

世界的にも希有な数々の特徴を有するこの海域が“死の海”と化する前に、その環境特性を生かし環境容量に十分配慮された保全と利用がなされる為には、防災と環境に関する総合的検討が、緊急かつ積極的に行われねばならない。

本研究は、これまで観測データも乏しく、その環境特性がよく分かっていない有明海について、物理環境、水質環境および気象環境の特性を、数値シミュレーション、過去 25 年間にわたる海域の浅海定線調査データ、気象衛星データ等を基に、総合的視点から調査・検討したものである。

2. 有明海の物理環境特性

2. 1 地形の特性

有明海は、福岡・熊本・長崎・佐賀の 4 県に囲まれ、九州西部に南から深く入り込んだ大きな内湾であり、その規模では東京湾・伊勢湾・大阪湾などにも匹敵する。胃袋型に湾曲した形状を持つこの湾は、湾軸の延長 96 km、平均幅 18 km、水面積は約 17 万 ha(1,700 km²)の水面を有するが、平均水深は約 20m にすぎない。海底地形は湾口部の早崎瀬戸に水深 110~135m

の海釜が存在し、春秋の大潮時には 5.5~6.0 / ヲに達する潮流が生じる。湾中央部の島原半島東部沖には 30~40m の広い平坦な堆積面や浸食面をなす。ここは有明海の海成沖積層をなす有明粘土層の基底にある埋没谷が露出した部分で、島原海湾層とよばれる中砂・粗砂・細礫からなる砂礫層が分布する。湾奥部には南北に伸びた大きな海底砂洲が発達し、その間は溝状の海底水道となっている。有明・八代海域の干潟は、河川からの大量の流入土砂と、4 m~5m にも

達する大潮位差およびこれに伴う強い潮流との相互作用によって形成され、その結果、他の海域と違って微細粒子の濁泥が岸側に堆積する。干潟面積は約 27,000ha であり、湾奥の北部から諫早湾にかけての泥質干潟と、大牟田から熊本、宇土半島へと東海岸に沿って砂泥質の干潟が広がる。諫早湾の干潟面積は約 2,900ha で有明海全体の水面積の約 1.7% となっている。こ

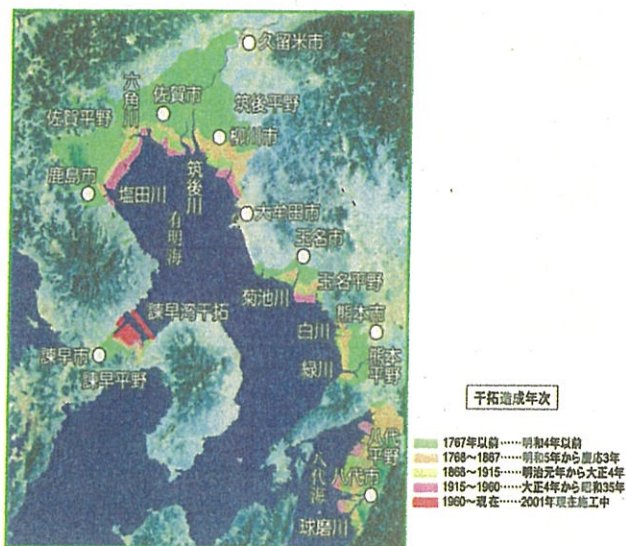


図 2.1 有明・八代海の干潟により作られた陸地

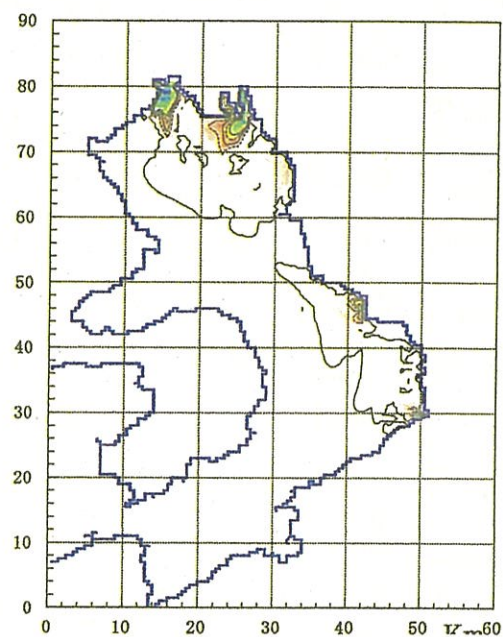


図 2.2 有明海の物質拡散（数値シミュレーション）
“緑川・白川・菊池川からの物質は北上、物質は湾奥に溜まる傾向にある。”

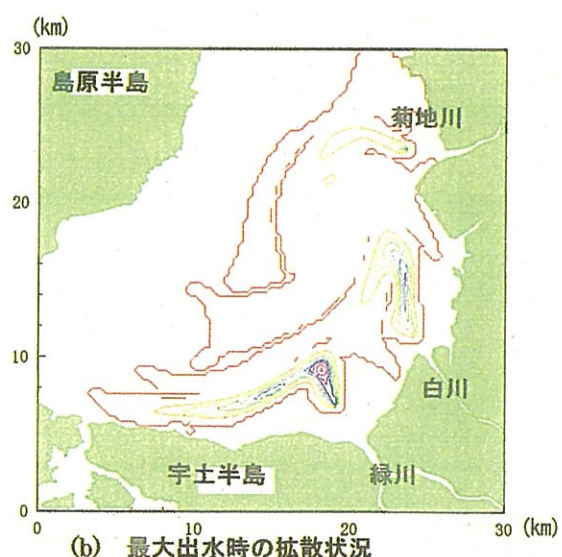
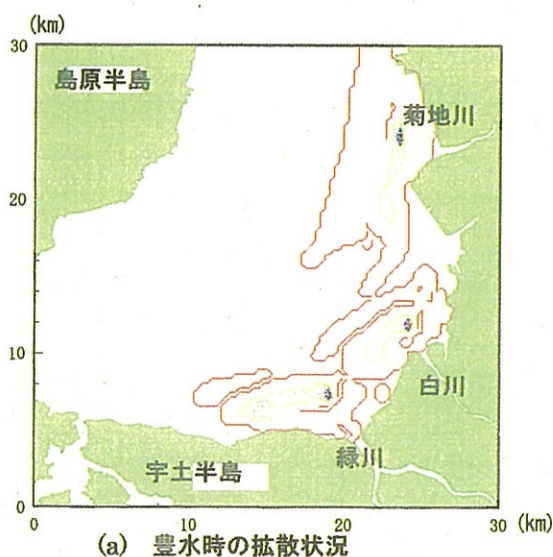


図 2.3 河川出水量の相違による拡散状況（1 潮汐後：数値シミュレーション）

の干潟は約700年前の鎌倉時代からの干拓により陸地化が押し進められてきている。(図2.1)

2.2 流況特性

有明海では1潮汐間で海水交換が完全に行われず(およそ54日),さらに基本的に潮汐残差流が反時計回りであるため,東岸沿いから湾奥にかけて物質が堆積する傾向にある。(図2.2)

干潟の地形は,日常の潮汐変動に伴う浮泥の流動によっても変化するが,高潮や高波浪の異常海象時や,洪水時の河川からの大出水による土砂流入に伴う地形変化が顕著である。(図2.3)

干潟域を中心にノリ養殖が盛んに行われてきたが,その作付け面積は,昭和38年を境に急激に増加した。このことは,この時期を境にノリ成長の為に栄養塩類の十分な供給が持続している事を意味する。また同時に,広大な面積へのノリ網の設置は,潮流への影響を無視できないものと考えられる。諫早湾堤防や熊本新港等が潮流変化の要因として挙げられているが,このノリ網設置等の影響を含めて,推論でなく科学的根拠により定量的評価を行う必要がある。

(図2.4)

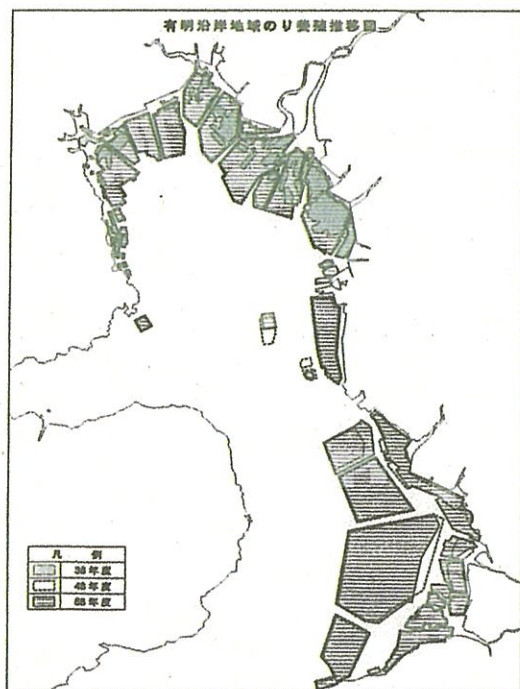


図2.4 ノリ養殖の年度推移

2.3 有明海の湾振動と潮汐特性

有明海域の潮汐変動についての平面2次元の数値シミュレーション結果³⁾に基づき特性を報告する。有明海の湾振動特性を調べるために,外海から様々な周期の海面振動(長周期波浪)を入射して,各地点の水面振動の応答を計算した。非線形性を除くなど,現象を単純化するために,入射波の振幅は小さい値(0.1m)としている。また,計算格子の間隔は600mから200mのメッシュとした。図2.5は計算結果の出力点を示し,図2.6は外海からの入射波の周期による各点での水面振動の応答関数で,諫早湾締め切りの有無による比較をしたものである。図より,有明海の海面振動応答のピークは早崎瀬

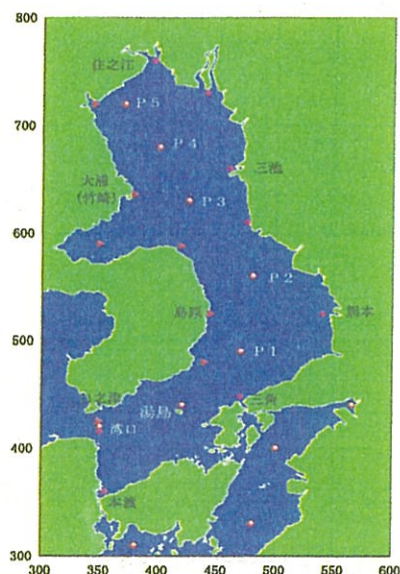


図2.5 有明海の計算結果の出力点

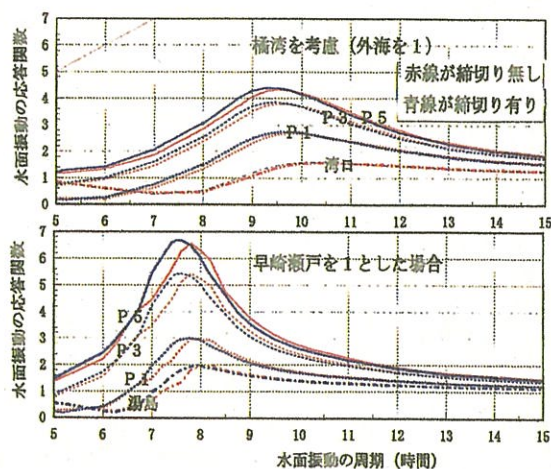


図2.6 湾水振動への諫早湾締切の影響

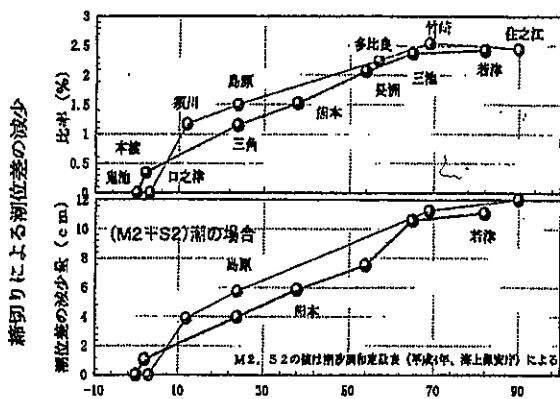


図 2.7 湾水振動への諫早湾締切の影響

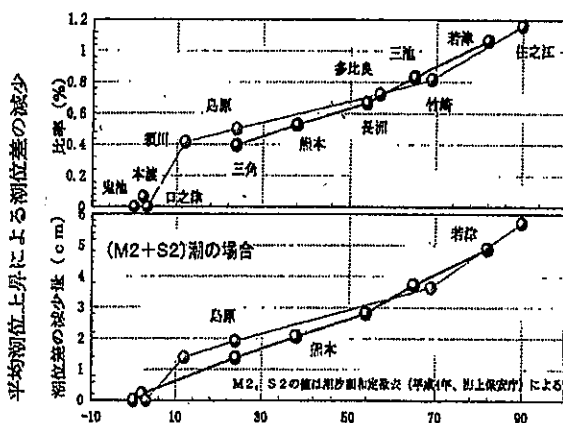


図 2.8 平均潮位上昇 (20cm) の潮位差への影響

戸 (有明海湾口) を基準にすると約 7.5 時間の周期で生じるが、外海からの波浪に対しては約 9.5 時間の周期で最も増幅される。これは、長崎半島 (野母半島) およびその延長上の海底山脈と、島原半島・天草下島の間に有る橋湾の湾振動特性の関係で、早崎瀬戸 (有明海湾口) の振幅が変化するために生じる現象である。

諫早干拓の潮受け堤防を設置するとこの共振周期は約 20 分程度短くなることが計算される。

また、潮汐の周期を 12 時間とすると、諫早湾の堤防締切による潮位差の減少割合は、図 2.7 に示すように湾奥にゆくほど大きく、湾の最奥の住之江では約 2.5% (M2 潮 + S2 潮換算での潮位差は約 12cm) の減少である。

図 2.8 に示すように、平均水位の上昇が 20cm

あるとして計算すると、潮位差の減少は、住之江で約 1.2% (同じく潮位差で約 6cm) である。近年 20 年間の観測結果 (農林水産省, 2001⁴⁾) によると、湾奥に近い大浦では、潮位差の減少は大潮時の干満差で約 21cm である。これは潮位差の約 3% にあたり、数値シミュレーションの結果ともほぼ一致する。

2. 4 潮流特性と諫早湾締切の影響

諫早干拓潮受け堤や熊本港など、最近の人為的改変の無い場合の有明海の潮流を計算した。図示するのは 1 級河川から豊水流量相当の流出を与えた大潮に相当する潮汐の計算例で、図 2.9, 図 2.10 は、それぞれ、上げ潮最盛期、下げ潮最盛期の線流量である。図 2.11 は、物質輸送に大きく関係する 1 潮汐間での残差流量 (線流量で表した恒流) である。

有明海の恒流 (線流量), すなわち、1 潮汐間の海水流動は湾口部から島原沿岸沿いで大きく、この海域では多くの渦 (循環) が現れている。熊本県沿岸沿いの有明海東岸から湾奥部および諫早湾にかけての流動は少ない。

図 2.12 は、諫早干拓潮受け堤があり、調整池の水位が -1.0m (TP.) で管理されている場合である。上げ潮、下げ潮とも諫早湾内部への入り込みが少なくなって、湾口付近での南北の流れが強まり、湾口南部・島原半島北部の沿岸域での循環流が弱まっている。諫早湾内では、潮受け堤建設前はほぼ全域で上げ潮時に最大流速が生じていたのが、潮受け堤建設後は逆になっている。物質輸送・底質の巻き上げ沈降などの特性が変化している可能性がある。

2. 5 熊本港建設の影響

熊本港建設による港近傍の流況変化を図 2.13 に示す。計算のメッシュ間隔は、地形と防波堤等の再現のため熊本港周辺では 20m と細かくした。図は下げ潮最盛期、上げ潮最盛期における、熊本港建設前後での流速の変化量を示したもので、港の周辺では 20~30 cm の流速変化がある。また、潮位差への影響は、港の周辺で ±2 cm 程度である。

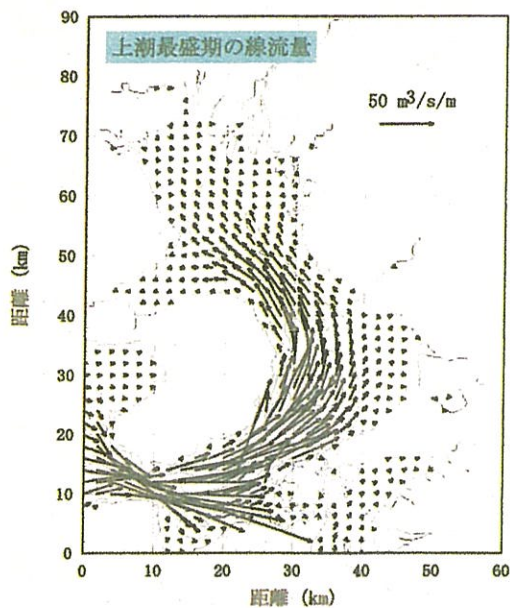


図 2.9 上げ潮最盛時の線流量

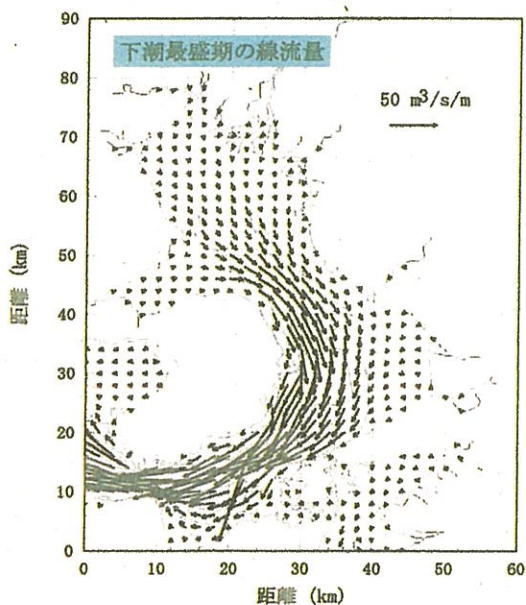


図 2.10 下げ潮最盛時の線流量

2.6 ノリ網の潮流におよぼす影響
図 2.14 は、ノリ網の影響を透過性構造物の抵抗係数として評価し、ノリ網設置の有無による有明海流況の変化を粒子追跡により調べたものである。ノリ網の影響も無視できず、特に湾中央から湾奥にかけての海水の流動が小さくなる傾向にある。

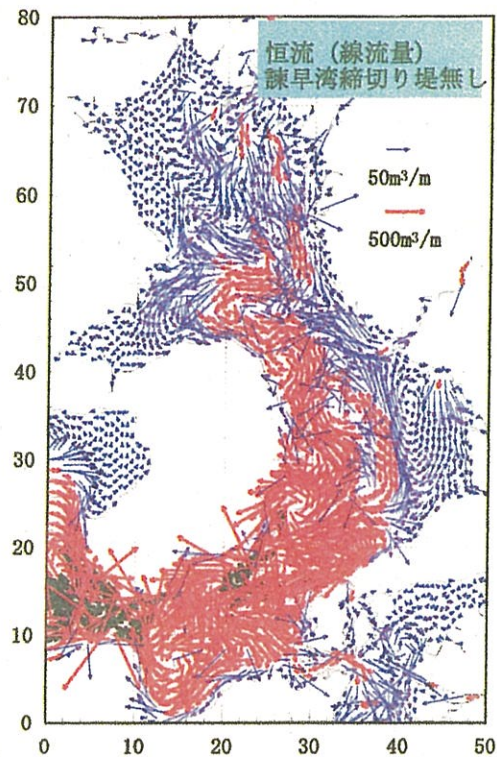


図 2.11 残差流量 (線流量の恒流)

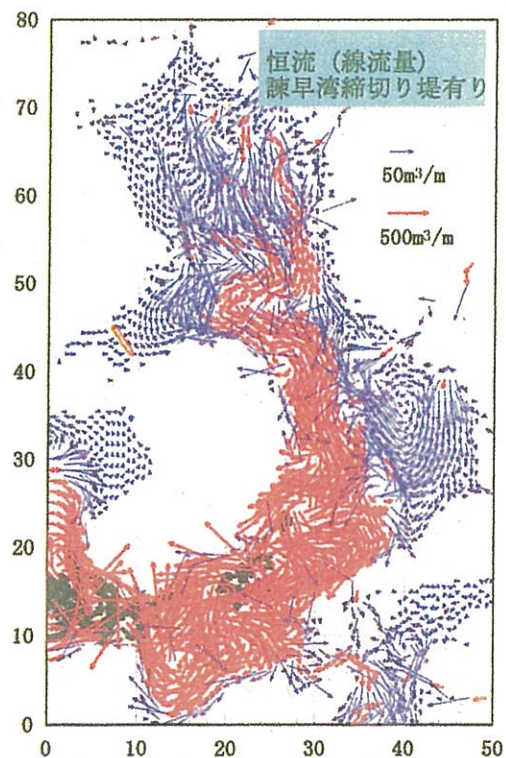


図 2.12 残差流量 (諫早締切後)

2. 7 潮汐変動のまとめ

有明海域の大きな特徴として、広大な干潟と大潮位差で外海の影響も受けている潮汐がある。これは、潮流の数値解析を行う立場からは、干出・水没を繰り返す干潟を考慮しながら、また、滞筋などの微地形を取りこみながらも外海を含む広範囲の海域の計算を行わねばならないという困難が付きまとう。一方、干潟については十分な計算精度を得るだけの水深データが無い。本研究では、入手可能な限りの水深データを収作成した。

有明海域は干潟のみならず複雑な地形の大水深域も存在するため、この海域の流況把握には3次元解析が望まれる。しかし、計算精度やコンピュータの能力を考えたとき、3次元計算はこれから開発すべき重要な課題の1つであるといえる。ここでは、平面2次元の非線形浅水流や長周期波動を対象にして新たに開発した解析法を用いた。これは、運動量などの保存則を直接離散化して定式化した、時空間ともに中央差分である陽の数値解析法である。この計算手法を用いて、有明海の湾振動特性、諫早湾の潮受け堤の影響、熊本新港建設の影響、ノリ網設置の影響などを調べた。いずれもなんらかの影響が見とめられる。

今回は触れられなかったが、流入河川流量の影響や潮汐振幅の違いなどについても調べており、これらの結果とその複合過程の環境変動に及ぼす要因分析が課題である。また、これらの物理環境の変動が自然・生態環境にどのような影響を与えるかについては、先に述べた3次元解析や生態系モデルなどを通じさらに定量的な研究へと進展させる必要がある。

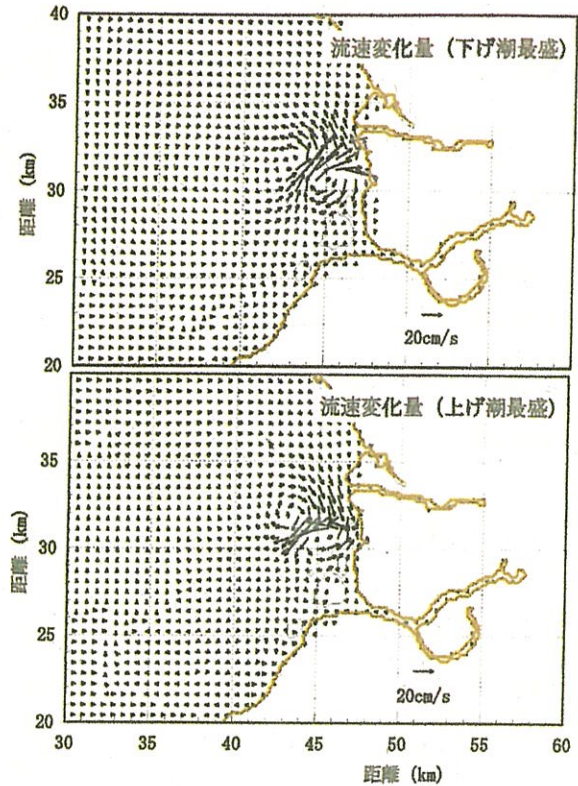


図 2.13 熊本新港設置前後の流速変化量

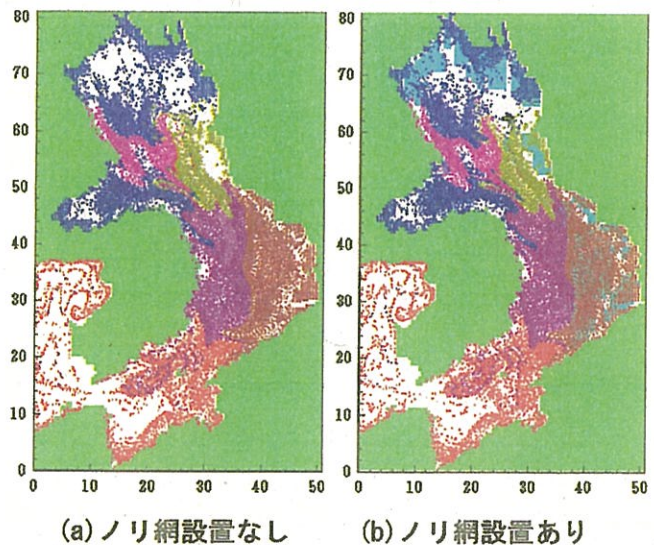


図 2.14 ノリ網設置の有無による流況の変化
(粒子追跡結果の3潮汐後)

表 2.1 各干潟における浄化

	白川 河口	不知火海 (八枚戸川河口)	菊池川 河口	佐賀 早津江川河口	緑川 河口
脱窒速度($\text{mg-N}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$)	79.1	232	189	407	213
干潟面積 ⁶⁾ (ha)	395	8	190	404	116
各干潟における脱窒速度($\text{kg-N}/\text{d}$)	312	18.6	35.9	1640	247
下水処理場収容人口への換算(万人分)	13.9	0.82	15.9	73.1	11.0

2. 8 干潟の浄化機能特性

干潟の浄化機能を、自然浄化機能の一つである脱窒速度で評価し、有明・八代海の干潟を対象に調査研究した結果^{2), 5)}を表 2.1 に示す。これは、各干潟における脱窒速度を下水処理場の標準的な1人1日の浄化能力($2.25 \text{ g/d} \cdot \text{人}$)で除することにより、脱窒速度を実際の標準下水処理場の収容人口に換算算出したものである。千葉県三番瀬干潟(101ha)は、13万人分の下水処理場の浄化能力に匹敵するとの報告があり、今回対象とした干潟はそれとほぼ同等の浄化能力を示した。特に、佐賀干潟は三番瀬の単位面積当たり約 1.4 倍の浄化能力があるものと推定される。

脱窒速度(浄化能)は含泥量と最も相関が高い。これは、含泥量が高いほど底泥の粒子が細かく、酸素の拡散が制限され、底泥内に脱窒反応に適した還元状態ができやすくなるためであり、さらに、含泥量が高い地点では強熱減量も高く、脱窒の水素供与体となる底泥中の有機物の含有量も多くなり、脱窒活性が大となるためと考えられる。また、干潟に棲息する底生生物は巣穴を形成して生物攪乱を行うことで約 10~20%の脱窒能力を促進^{6), 7), 8), 9)}する。干潟には優れた自然浄化能力が存在し、その干潟を保全していくことが如何に重要なことであるかが示唆される。干潟は砂質、泥質、砂泥質に区分されるが、魚介類に有用なもの、多種・多様生物が生息するもの、生物が少ないが嫌気性のバクテリアが活躍して窒素等を分解・浄化するものなど、それぞれに異なり、“良い干潟、悪い干潟”等々、一概に論ずることは出来ない。保

存すべき干潟、修復すべき干潟、干拓したほうが良い干潟など、自然環境との対話を通してから“ゾーニング”をすべきである。

2. 7 海岸線の実態(熊本県の海岸環境調査)¹⁰⁾

有明海の海岸線は、諫早湾口の北側の一部を除くと、その殆んどが干拓堤防や道路護岸の人工海岸である。ここでは、熊本県の海岸環境の実態を、海岸線の人工化と海浜植物の自生状況を中心に調べた結果を紹介する。

熊本県の海岸における人工海岸の占める比率は 59%で福岡県とほぼ同じである。福岡県は沿岸域への人口の集中が大きく、また、北九州市や福岡市などで大規模な埋立てが行われて埋立護岸の延長が伸びているのに対し、熊本県では離島が多い。このことを考えると、熊本県の人工海岸の占める比率は異常に大きいといえる。熊本県の人工海岸には、道路護岸と干拓堤防の多いことが特徴で、これらの前面の地盤高さも低く、植生のある半自然海岸は少ない。(図 2.15)このような理由で、塩生植物の生息適地となる地盤高さの海浜は少なく、さらに、ハマゴウや塩生植物の分布や自生地状況から、砂

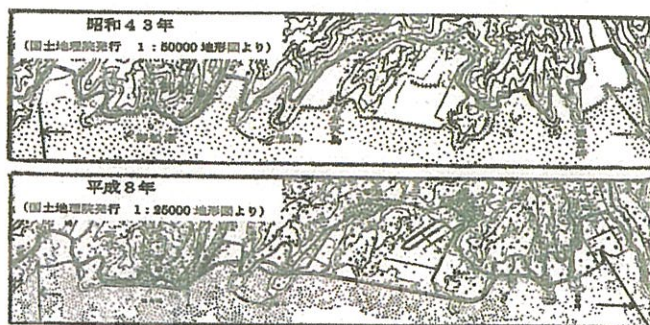


図 2.15 海岸道路整備に伴う海岸線の経時変化
(国道 266 号線：三角町と不知火町鏡)

泥海岸が減少していることが推定される。砂泥海岸の減少については原因の調査が必要であるが、これが今後も続くようであれば、塩生植物の存続が危うくなる。また、砂浜と海辺の生物は水質浄化に寄与していることが分かっているが、この機能が低下し、海域全体に悪影響を与えることも考えられる。なお、砂浜や砂の減少の原因としては、開発による直接的喪失の他に、構造物による海象の変化や海砂採取・浚渫などの人為的要因、砂防や後浜砂丘の減少など人為的・地形的要因による供給源の減少、高波の来襲や平均海面の上昇などの海象、などが考えられ、このような原因を明らかにすることは今後の課題である。

3. 過去 25 年間の浅海定線調査データに基づく有明海の環境変動特性^{11), 12), 13)}

3. 1 海域環境異変の概要と調査項目

九州西部に位置し、代表的な閉鎖性内湾である有明海は、生態系を含む物質循環の微妙なバランスによって形作られた独特の自然環境にある。総面積約 1,700km²(全国の約 49%)にも達する日本最大の干潟と湾奥部域の最大 5m 以上に及ぶ大きな干満差による強い潮流の効果、及び汚濁物質を凝集・沈降させる浮遊底泥の効果などもあって、これまでは赤潮発生などの顕著な環境問題が表面化することは少なかった。しかし 1980 年代より、生息生物の種および数が

減り始め、赤潮の発生、漁獲量の減少や水質の悪化など環境悪化が顕著になって来ている。図 3.1 は有明海 4 県(福岡、長崎、熊本、佐賀)の総漁獲量の変化であるが、1980 年以降著しい減少が見られ、2001 年(平成 13 年)1 月には「ノリの色落ち」により沿岸 4 県の漁業に莫大な被害が生じている。図 3.2 は有明海における赤潮発生件数であるが、1995 年(平成 7 年)で急増がみられ、2000 年(平成 12 年)7 月には「大量の赤潮発生」が起こっている。本研究では、このような有明海域の環境悪化の原因解明にあたって、過去 25 年間の有明海域の生物・水質・底質・気象特性などの現地観測データの経年変化記録から、有明海の環境変動特性を把握することを目的とし分析を行った。

(1) 浅海定線調査地点および項目

1976 年から 2000 年の 25 年間におよぶ有明海の浅海定線調査データ(熊本¹⁴⁾、福岡¹⁵⁾、佐賀¹⁶⁾の 3 県)、1990 年から 2000 年までの底質生物モニタリング調査データ(佐賀¹⁷⁾)および気象観測データ(気象庁提供)をもとに、有明海海域における水質および気象特性について調べた。浅海調査地点は、2000 年度現在、熊本県側 22 点、福岡県側 10 点、佐賀県側 11 点の計 43 地点である。調査地点の分布図を図 3.3 に、各県で実施されている調査項目を表 3.1 に示す。調査項目は水温、塩分濃度の他に、溶存酸素(DO)、化学的酸素要求量(COD)やリン酸態リン(PO₄-P)、硝酸態窒素(NO₃-N)、亜硝酸

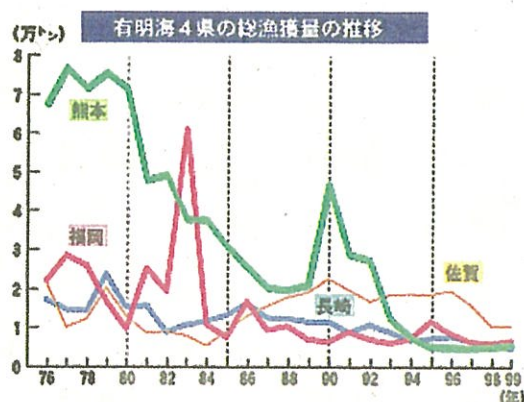


図 3.1 有明海 4 県の総漁獲量の推移 (熊本日日新聞)

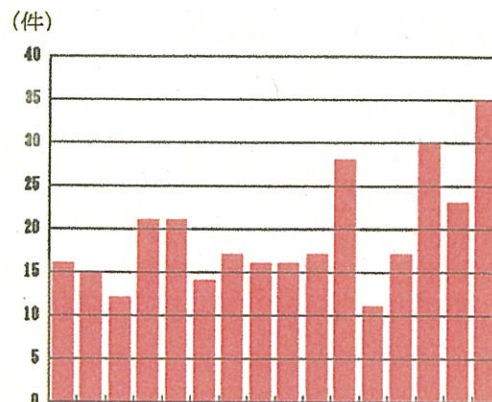


図 3.2 有明海の赤潮発生件数

3. 2 赤潮発生と水質特性

図 3.5 は、有明海域における近年の 12 月の赤潮発生件数である。2000 年は赤潮が大量発生した年で、特に 12 月は 7 件発生しており、過去 10 年 0~2 件であったことと比較すると異例である。2000 年の冬季は、第 3 章で述べたように、高気温、高降水量、高日射量であり赤潮の発生しやすい気象条件が重なった。この赤潮の大発生がノリの成長に必要な栄養分を奪ったため 2001 年のノリの色落ち被害が起こったと考えられる。

赤潮の原因であるプランクトンの大量発生には、栄養塩である窒素を体内に摂取・消費するため、その濃度が関係している。そこで、浅海定線調査データを用いて窒素濃度の平面分布を調べ、赤潮発生分布との関係を調べた。図 3.6 は 2000 年と前年の 1999 年 12 月の硝酸($\text{NO}_3\text{-N}$)とプランクトン沈殿量の水深 5m 地点の平面分

布図である。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は 1999 年の $4\sim 18\mu\text{g-at/l}$ と比較して 2000 年の有明海全域において $0\sim 2\mu\text{g-at/l}$ と低い濃度を示している(a)。プランクトン沈殿量は、2000 年は特に湾奥と湾中央東側を中心に全域的に高い値がみられる(b)。このことは、冬に赤潮の原因であるプランクトンが大量発生し、それに伴い硝酸を消費したことを示していると考えられる。

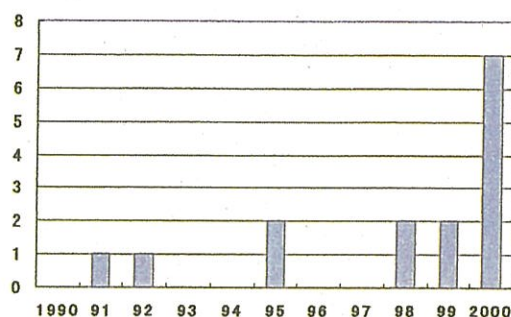


図 3.5 有明海の赤潮発生件数(12 月)

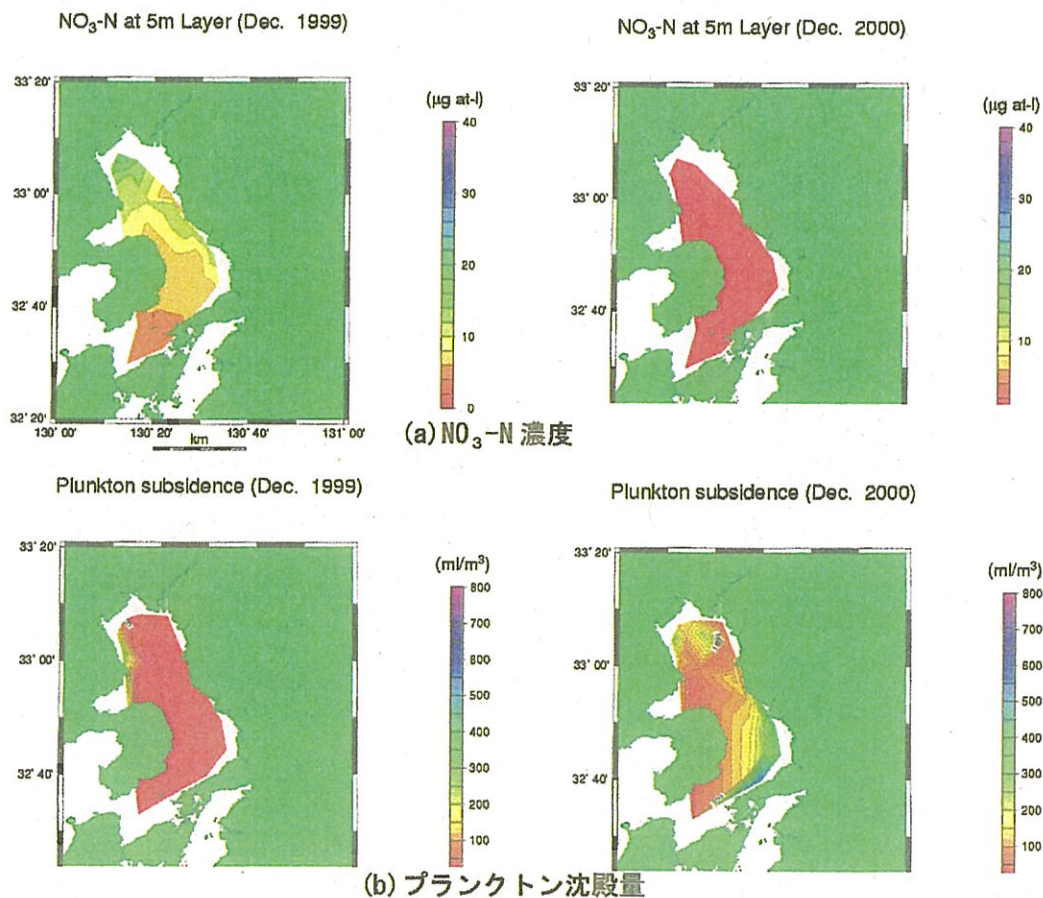


図 3.6 水深 5m 地点の濃度分布

3. 3 クラスタ分析による海域特性

(1) 海域の分類

有明海の海域特性を調べるため、河川による影響が大きいと思われる夏季のデータについて25年間の水質データを平均しクラスタ分析を行った。その結果、図3.9の結果から、夏の水質項目の平均特性は図3.7に示す湾奥北部(A)、湾奥南部(B)、湾央部(C)、湾口部(D)、筑後川河口(E)の5つの海域グループに分類された。また、分類グループの水質項目ごとに図3.8に示すような平年値の変動特性が明らかになった。透明度表層の年間変動は湾奥部が低く、湾口部になるほど高くなっており、各グループごとに年間を通じてほぼ一定の値を示す(図3.8(a))。これは、透明度が主に水深と潮汐活動の大きさに左右されているためだと考えられる。図3.8(b)に示す塩分表層の濃度は湾奥側ほど低くなっており7月に著しい低下が見られる。これは、梅雨における大量の降水により、河川流入量も増加することが原因と考えられる。

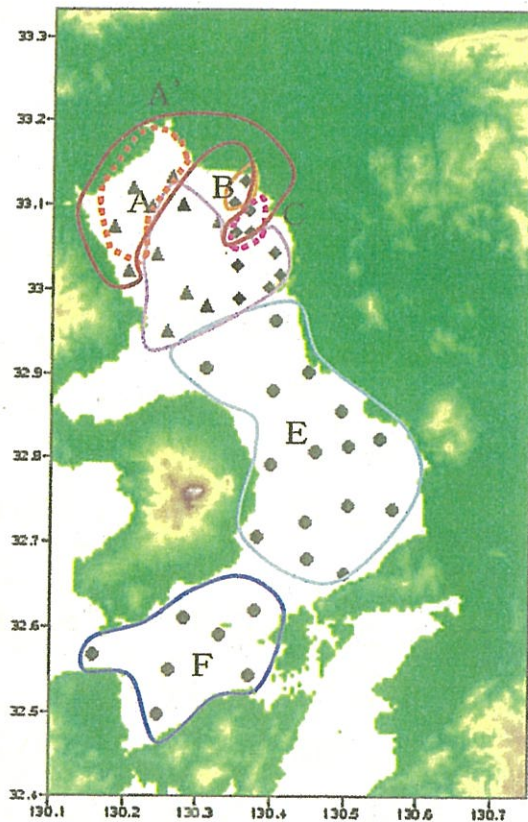
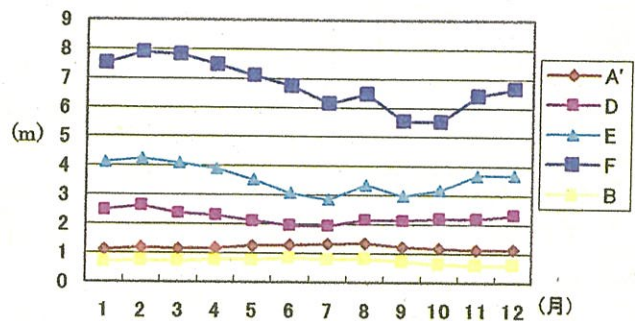
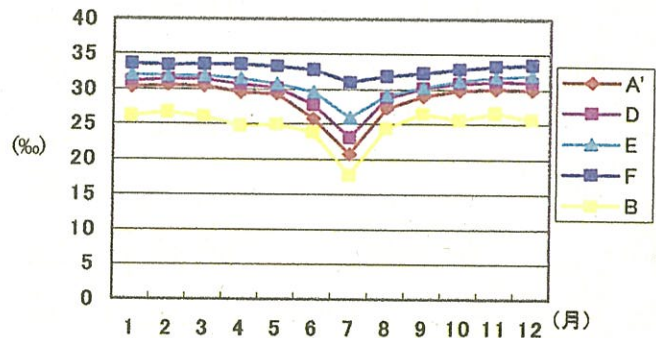


図 3.7 夏場の水質項目によるクラスタ分析

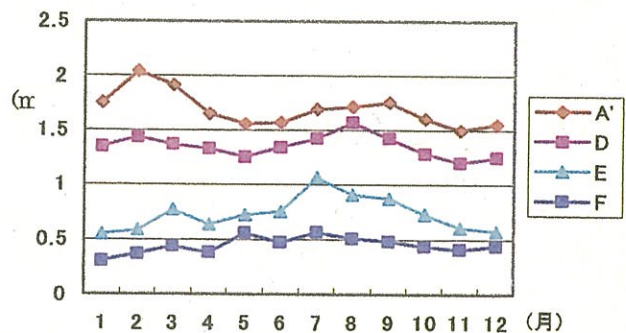
水深5m地点のCOD(図3.8(c))は夏季に上昇し冬季にかけて低下する傾向が見られ、湾奥側ほど高い値を示している。また地域AにおいてCODは他の海域と異なり月に最大値を示している。このクラスタによる分類海域ごとに水質の特徴が表れていることが分かった。以降、この分類に基づき領域毎に平均化した値を算出し、その経年変動について解析を行う。



(a) 透明度 (表層)



(b) 塩分 (表層)



(c) COD (水深5m)

図 3.8 水質項目の年変動特性 (平年値)

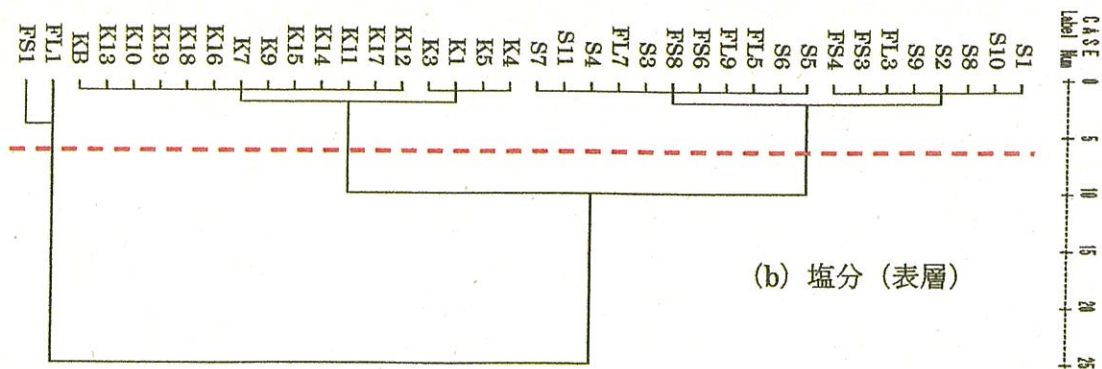


図 3.9 クラスタ分析の結果

(2) 気象変動と水質変動との関連性

有明海の長期的な変動特性を把握するため、(1)で得られたA'海域を東西2つに分け、新たに図3.7に示すようにA、C海域に分け、グループごとの平均を用いて水質項目の時系列変動を調べた。

図3.10は1991年～2000年までの各平均水温と佐賀、熊本の気温の10年間にわたる時系列変動である。有明海の水温は、佐賀、熊本の陸地の平均気温と比べて夏季は同程度～5℃低い傾向に、冬季は3～8℃高い傾向にあることが分かる。年較差を比べると湾口域(F)で13～15℃である一方、湾奥域(A、B、C)で20℃以上に達する。水温に関しては特に冬季における温度が

顕著である。これは湾口部において、東シナ海と接しており北上する対馬海流によって暖かい海水が供給されるものと考えられる。その一方で湾奥域では、冬季においては、陸地からの冷たい淡水が流入し、流入水に熱が奪われることで、海水温が相対的に低くなると考えられ、その結果冬季の水平温度勾配が夏季と比べて大きくなるものと解釈することができる。

図3.11は、同じ期間の各平均DIN濃度と佐賀、熊本の雨量の時系列変動である。DIN濃度は雨量の多い月に高くなる傾向が見られる。また、B、Cは変動が大きく河川による影響、特に河川流量の大きい筑後川の影響を大きく受けていることが図より明らかである。

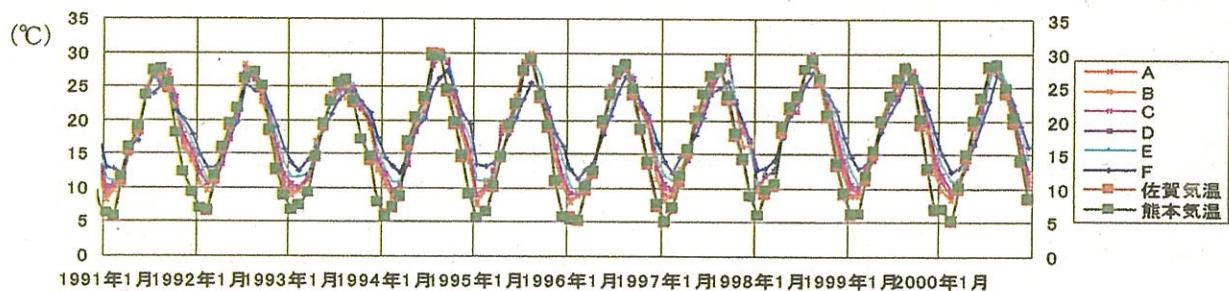


図 3.10 水温（表層）と気温の時系列変動（1991～2000年）

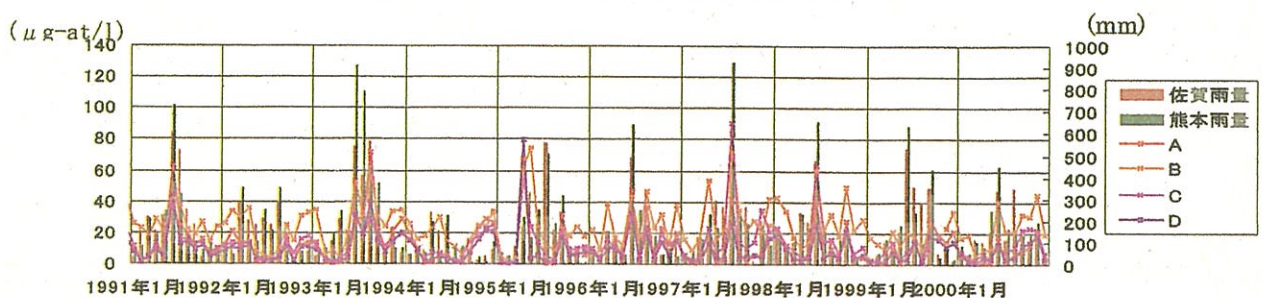


図 3.11 DIN（表層）と雨量の時系列変動（1991～2000年）

(3) 海域の窒素循環

海域に流入した有機態の窒素は、微生物によって無機物に分解される。無機態となった窒素は脱窒されて窒素ガスとなり大気中に分散したり、栄養塩として生物の体内に取りこまれたりする。生物に取りこまれた窒素は排泄されて溶解態の窒素となり、微生物によって分解される。また、その生物の死骸が再び微生物によって分解されて無機化される。

図 3.12 は、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$)、リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$)、COD の 1 年移動平均、図 3.13 は、 $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比、 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比、 $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比の 1 年移動平均の推移をそれぞれ表している。図の A~F のうち、表層のデータのそろっている、海域 A~D のデータ（福岡・佐賀）について解析する。

$\text{NH}_4\text{-N}$ (図 3.12(a)) は各地点で 80 年代後半から 90 年代前半にかけて減少していたが、1996 年以降は増加傾向に転じており、特に筑後川河口の B で顕著にみられる。その一方、 $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比 (図 3.13(a))、 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比 (図 3.13(b)) のグラフを見ると 1993 年以降急激に減少していることが分かる。このことから、アンモニア態窒素—亜硝酸態窒素—硝酸態窒素に変化する過程で、硝化能力が十分に作用されなくなっていると推測される。また、 $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比、 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比から、ここ数年海域分類ごとの差が小さくなっていることから、全域的に硝化能力が衰えてきている可能性が指摘される。

$\text{PO}_4\text{-P}$ (図 3.12(b)) の推移を見ると、80 年代から 1992 年頃までゆるやかに減少がみられるが、1993 年以降再び増加傾向にある。COD (図 3.12(c)) は 1980 年以降非常に緩やかに増加し続けていることが分かる。COD が増加するということは、海水中の有機物が増加しているということである。これらのことから、 $\text{PO}_4\text{-P}$ を含む生活廃水や農業廃水の増加が大きく関係していると考えられる。

$\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比 (図 3.13(c)) はほぼ横ばいの

値を示しているが、海域 A を除いて植物プランクトンの平均的な N/P 比 $16^{18)}$ を超過している。陸域から窒素が過剰供給されていたことが言える。しかしここ数年、N/P 比は減少傾向が見られ 16 に近づいてきている。リンが窒素以上に過剰供給されている可能性が指摘される。

以上のことから生活廃水や工場排水などの汚染混入の増加や、自然浄化作用の衰えなどにより、広い範囲にわたって水質が悪化してきていることが明らかになった。

3. 4 海域の成層化と貧酸素水塊

(1) 有明海における成層化現象

有明海の成層化の状況を把握するために、図 3.14 に示すように湾軸方向に断面を設定し、縦断面における水温と塩分濃度の鉛直分布特性を調べた。その結果、夏場には水温、塩分ともに長年にわたって成層化が多く観測された。例として図 3.15、図 3.16 に 2000 年夏 (7 月) と冬 (12 月) の水温と塩分濃度の分布を示す。夏場の水温は、宇土半島～島原半島中央部付近の水深 0~10m 付近から湾奥まで、広い範囲にわたって成層化が見られ、表層と海底でその差は 5°C 以上にもなった。塩分濃度についても水温と同じ範囲にわたって夏場に成層化が見られ、宇土半島～島原半島中央部付近から菊地川河口～有明町と三池港～大浦海域中部付近から湾奥にかけてより顕著であった。これは、梅雨時期における湾奥に集中する筑後川などの一級河川からの影響と考えられる。次に水温と塩分濃度から密度の状態方程式 (Mamayev, 1975¹⁹⁾) を用いて σ_t 分布を求めた。

$$\begin{aligned}\sigma_t = & 28.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 \\ & + (0.802 - 0.002T)(S - 35) \quad (1) \\ & (T: \text{水温 } (^\circ\text{C}), S: \text{塩分 } (\text{‰}))\end{aligned}$$

この式で算出された数値を用い、湾軸方向の鉛直断面における 2000 年夏 (7 月) と冬 (12 月) の密度分布を図 3.17 に示した。夏季には水深 0~10m 付近から湾奥まで密度成層が起こっていることが明らかとなった。

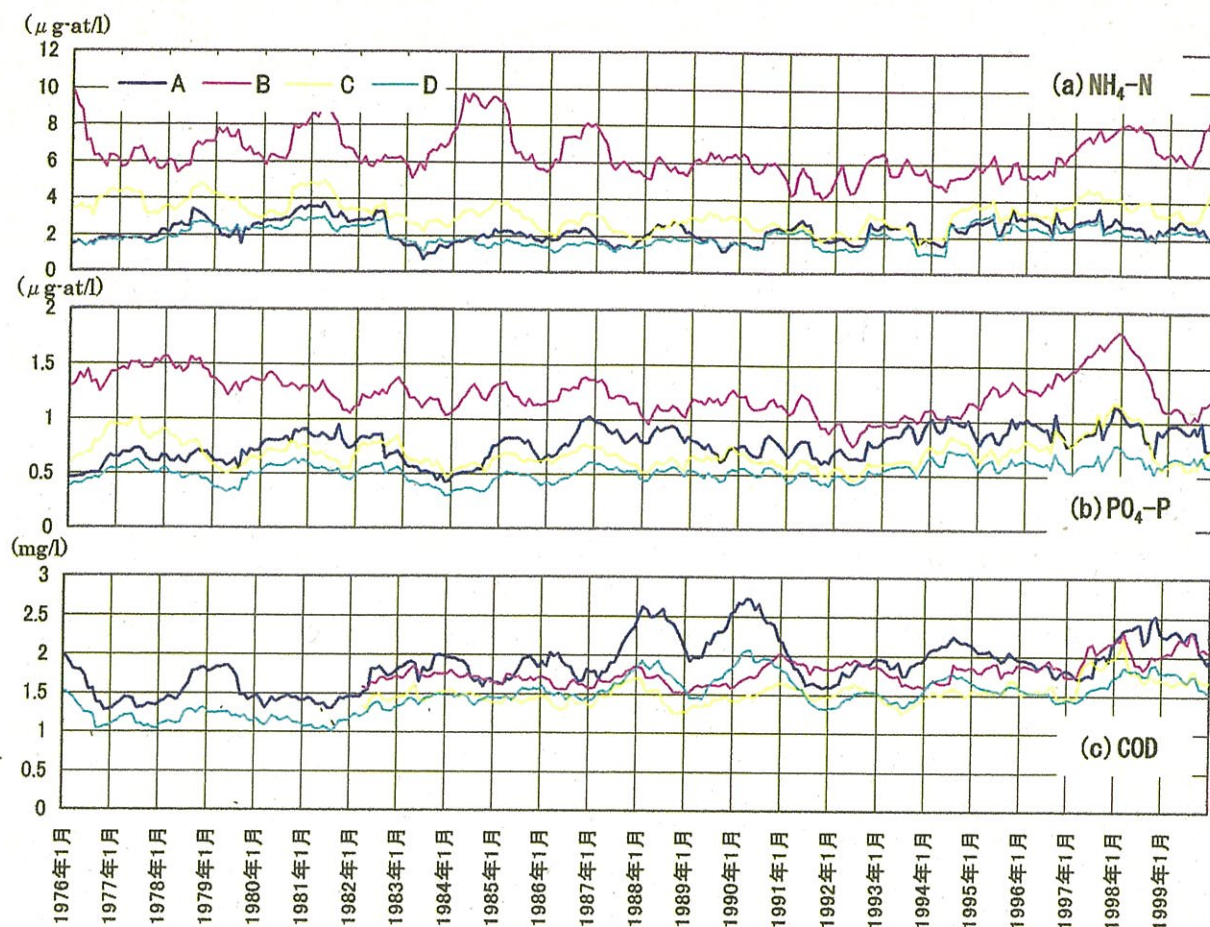


図 3.12 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, COD の 1 年移動平均の推移

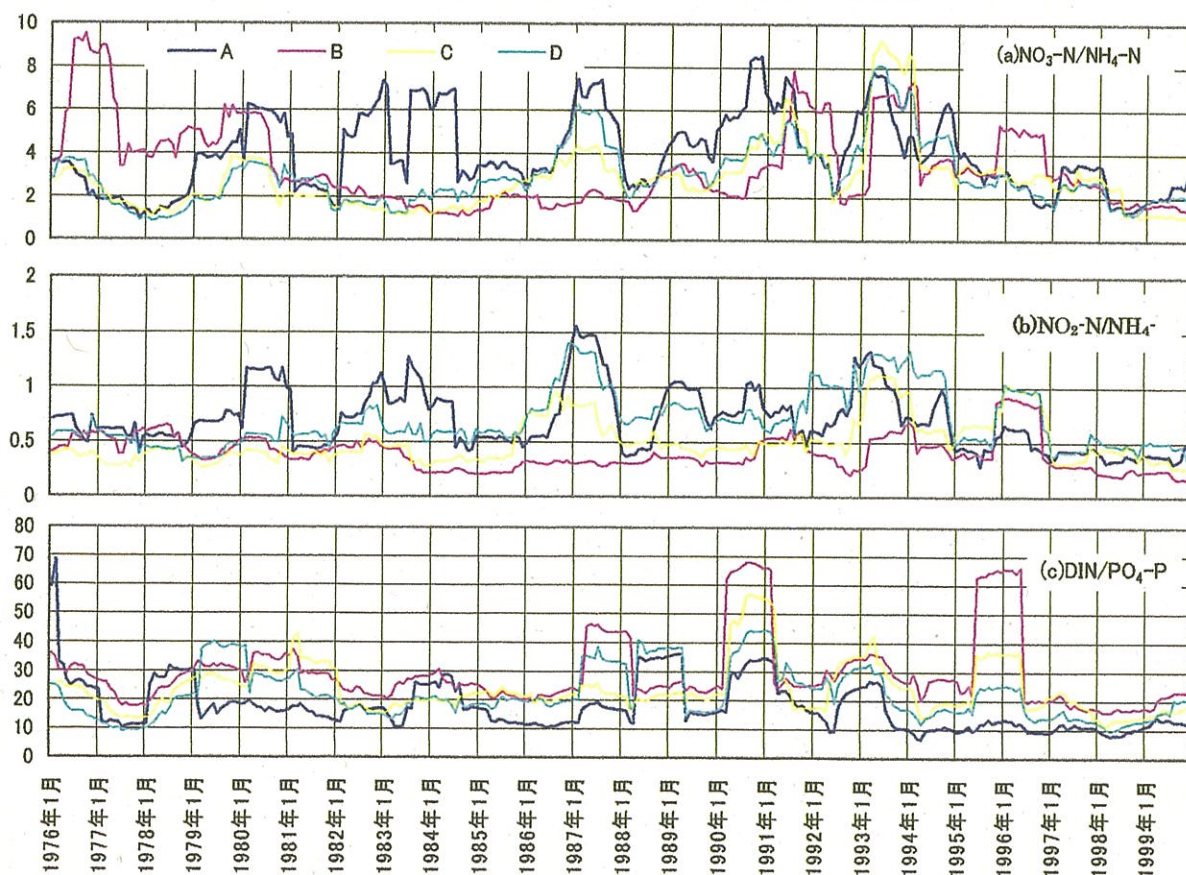


図 3.13 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比, $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比, $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比の 1 年移動平均の推移

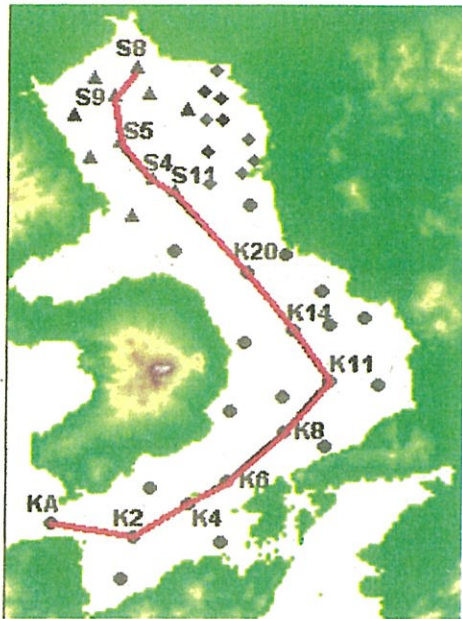


図 3.14 浅海調査地点と断面軸



図 3.18 分析地点 (S 4 地点)

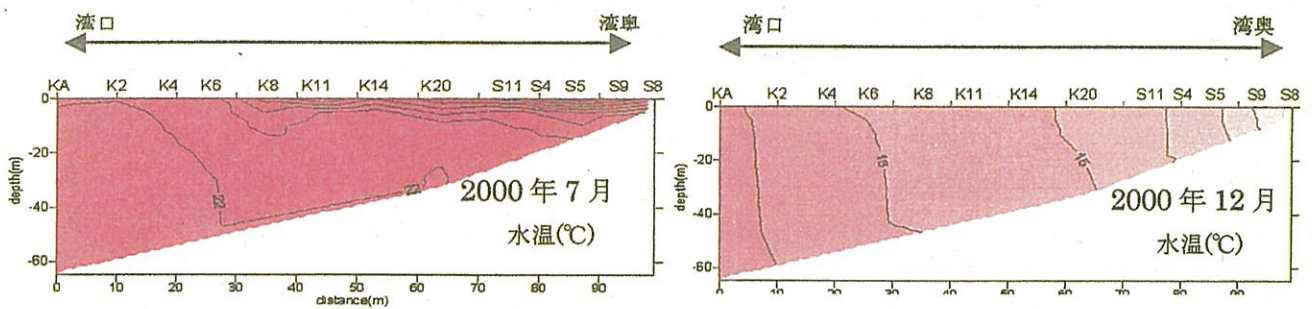


図 3.15 湾軸方向の水温の縦断分布 (平成 12 年)

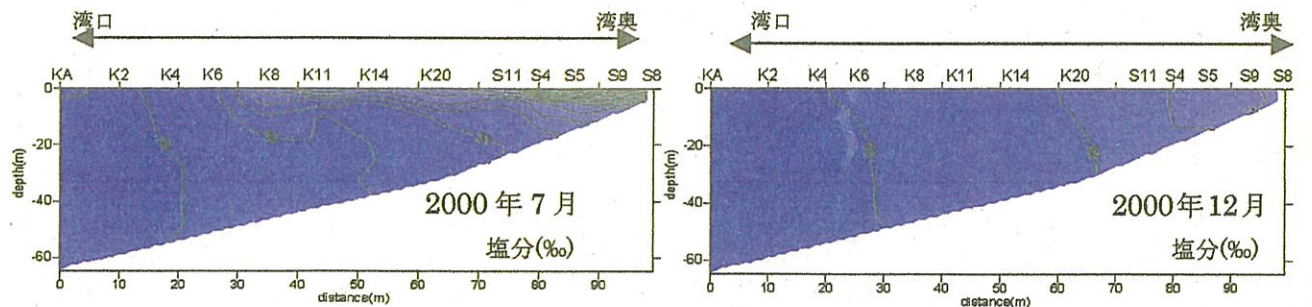


図 3.16 湾軸方向の塩分の縦断分布 (平成 12 年)

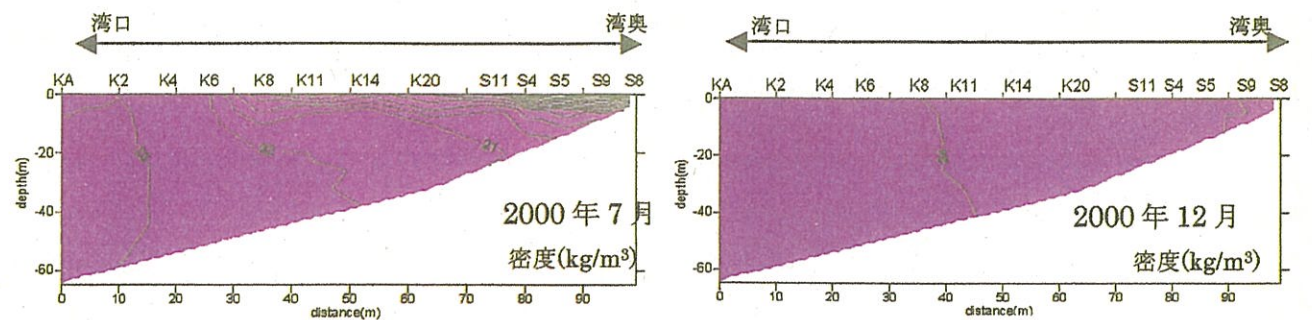


図 3.17 湾軸方向の密度の縦断分布 (平成 12 年)

(2) 貧酸素水塊の発生

有明海における、貧酸素化現象を把握するために、水深方向のデータのそろっている湾奥の1点(S4地点)について分析を行った(図3.18)。S4は縦断軸の点で、河川からの影響が少ない一般的な点として選んだ。図3.19は、S4地点の底層について溶存酸素(DO)の水産用水基準値6mg/l(底層においては4.3mg/l以上が目安)以下が観測期間中にどれだけ出現したかを表したものである。赤い点線は4.3mg/lを示す。この図から観測当初の1970年代より夏から秋にかけて貧酸素化現象が見られることが判る。1999年に冬季までDOが低い状態が続く現象が見られるが、観測当初と近年を比較してもDOの極小値や貧酸素化の期間には大きな違いは見られないと思われる。また、他の湾奥の地点でも観測当初から貧酸素化が起こっており、湾奥では以前から広範囲で貧酸素化現象が起こっていたことが明らかとなった。

図3.20は、赤潮が増加してきた1995年以降の月別赤潮発生件数²⁰⁾、図3.21は、同じく1995年以降のS4地点におけるDOとNO₂-Nの水

深方向の時系列である。DO(図3.21(a))は5月~7月にかけて徐々に濃度の低下が見られ、貧酸素水塊が発生していることが分かる。1998年を見ると表層の濃度は6月から7月下旬にかけて夏場10mg/l以上(飽和酸素濃度の150%以上)の値を示しており、底層では3.5mg/l以下の貧酸素水塊が観測できる。図3.20より、この時期に植物プランクトンによる赤潮が発生していることから、植物プランクトンが光合成により酸素を放出したことにより表層のDO濃度が高くなり、大量に発生した植物プランクトンは死骸となって沈殿し、分解する際に酸素が使われ底層での貧酸素現象が起こったと推測される。他の年でも、夏季において、表層でDOが過飽和になっている地点と底層で貧酸素水塊がみられる地点はほぼ一致していることが観測される。このことから、夏季の赤潮発生と底層の貧酸素化は密接に関係していることが分かる。次にDOとNO₂-N(図3.21(b))の時系列を比較してみると、底層においてDO濃度の低い地点とNO₂-N濃度の高い地点が一致している部分が多く観測できる。4.3で述べたようにア

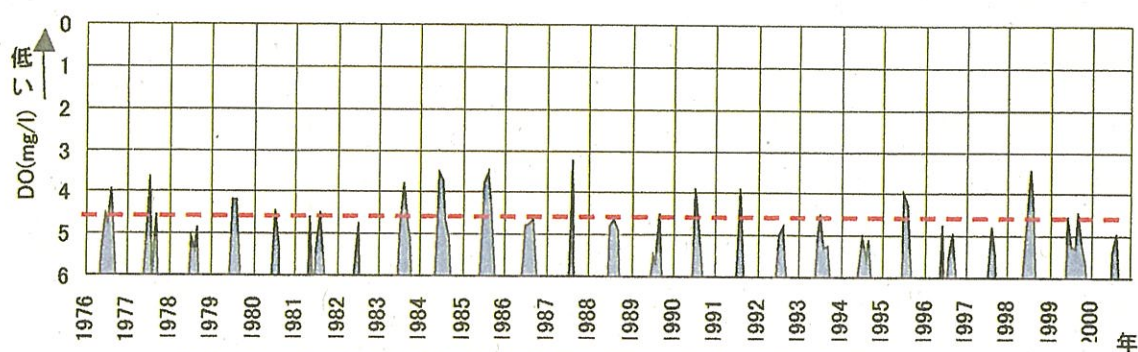


図3.19 底層における溶存酸素(DO)濃度の経年変化(S4地点)

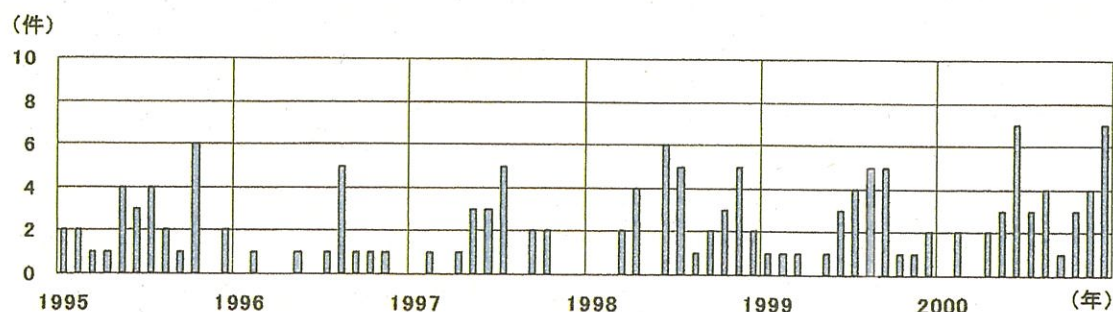


図3.20 赤潮発生件数(1995~2000年)

ンモニア態窒素の一部は亜硝酸態窒素・硝酸態窒素と変化する。硝化過程の中間物質である $\text{NO}_2\text{-N}$ があるということは近くに汚染源があるということを示しており、この汚染物の分解

に酸素が使われ DO 濃度は低下する。その結果、夏季における $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度の上昇と DO 濃度の低下が同じ場所で起こったと考えられる。

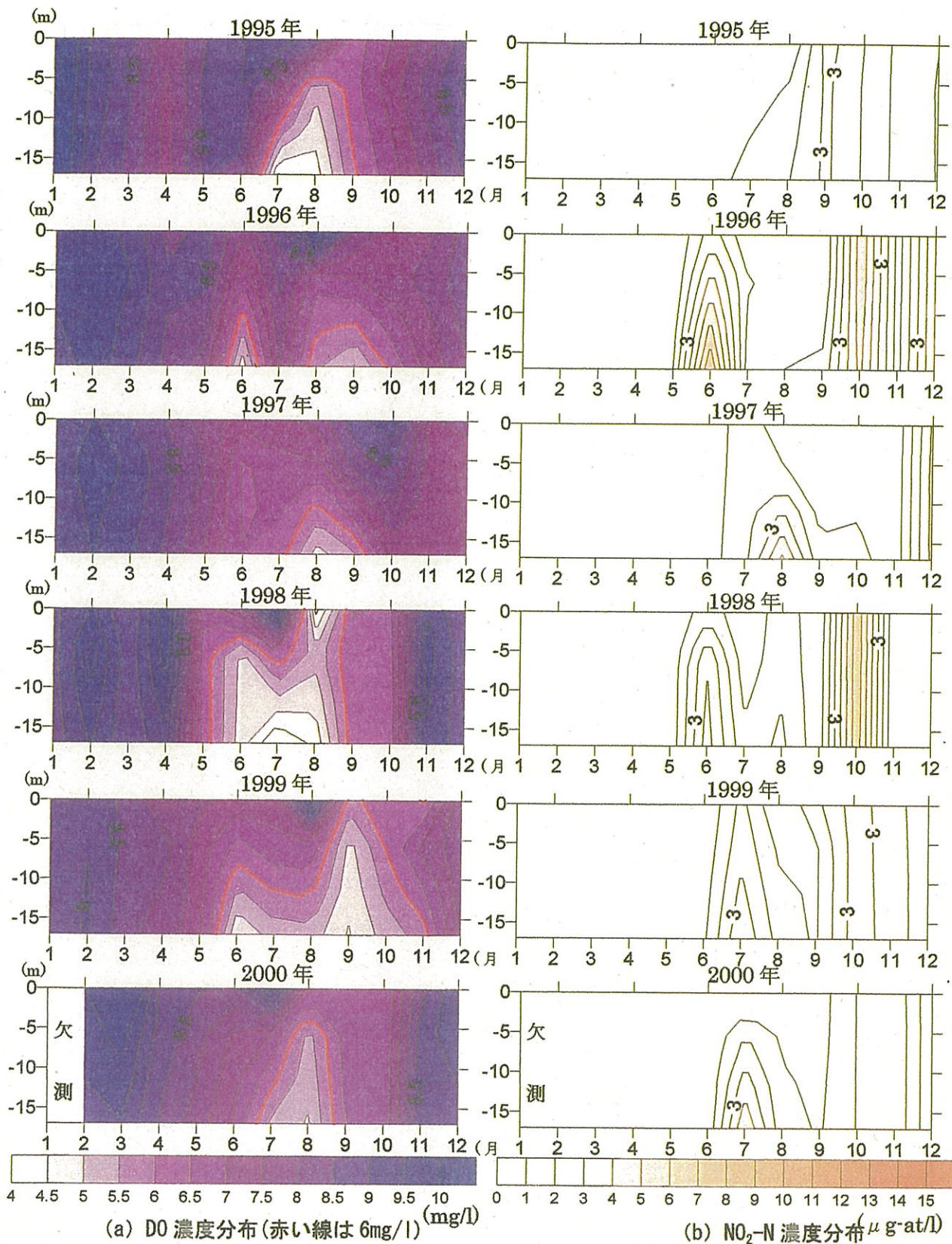


図 3.21 S4 の鉛直断面の時系列 (1995~2000 年)

3. 5 底質データによる海域特性

底質特性は底生生物が棲む環境そのものの変化を示し、近年底質の悪化（泥質化、汚泥化）が示唆されている。そのため底質特性を把握するため底質（硫化水素、強熱減量、COD）のデータのある湾奥の調査地点（図 3. 22）について、クラスター分析を用いて解析を行った。その結果、図のように海域 A、B、C に分類され、図 3. 23 に示す変動特性が明らかになった。COD は水産用水基準によると 20mg/g 以上は汚染泥である。海域 A では汚染が進んでおり、海域 B も近年値が高くなってきている(a)。強熱減量の値は試料中に含まれる有機物等のおよその目安になり、有機物の負荷量が多いと分解が追いつかず、酸素も不足し、腐敗した有機物が増えて環境に悪影響を与える硫化水素が発生するようになり、有機物に含まれる栄養分の窒素やリンが多量に海に溶け出すようになる。(b) では、海域 B の上昇がみられ同時に(c)でも増加が見られる。これらの変動特性から、筑後川からの流入の影響が大きい領域を除き、西側の方に徐々に COD、硫化水素、強熱減量が増加し、汚染が深刻化してきていることが明らかとなった。

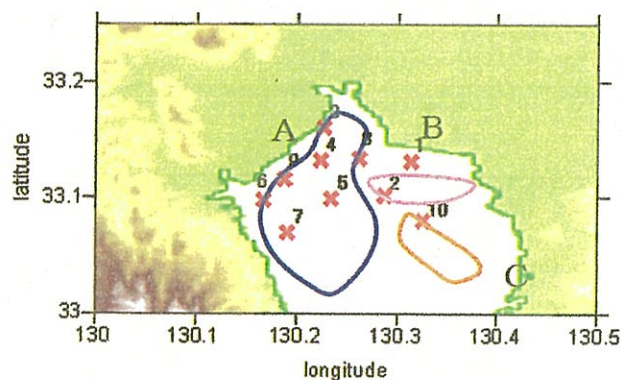
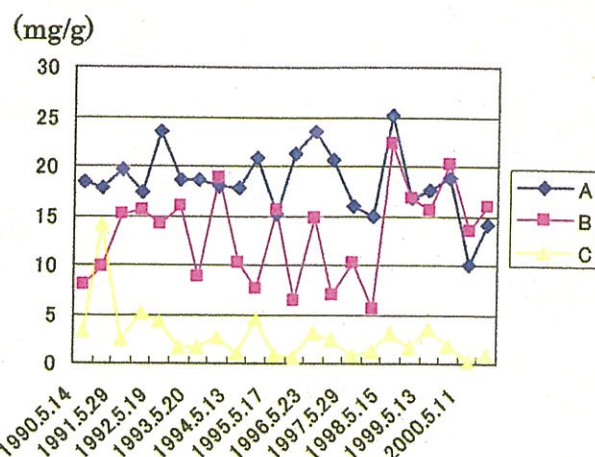
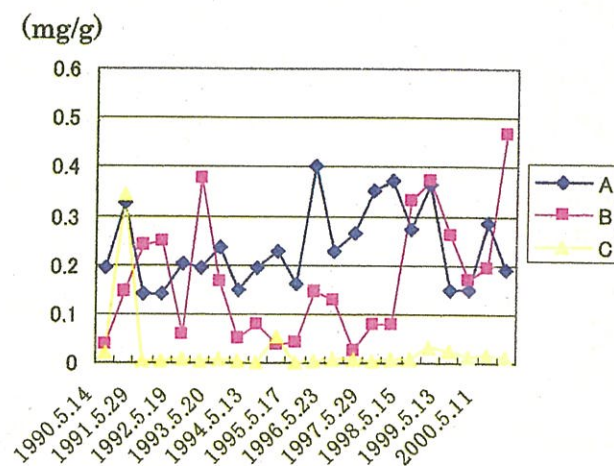


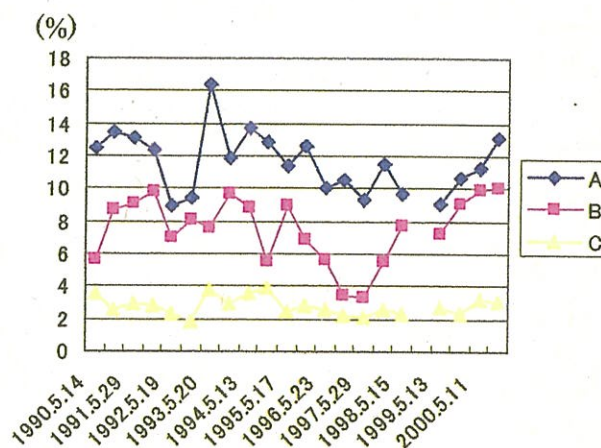
図 3. 22 底質生物モニタリング調査地点



(a) COD の経年変化



(b) 硫化水素の経年変化



(c) 強熱減量の経年変化

図 3. 23 底質の経年変動特性

4. 有明海と周辺域の気候変動特性

有明海に隣接する東シナ海とその周辺域との環境要素の相互作用の観点から、アジア・モンスーン域の気候変動特性を把握し、有明海環境悪化の要因を探る。

4.1 地上観測データによる熊本・佐賀の気候変動

アジア・モンスーン域に領域を広げて解析する前に、有明海沿岸域での地上気象観測データを基に、気象要素の変動を解析した。使用したデータは、気象庁年報のCD-ROM(気象庁提供)に収録されてある熊本・佐賀地方気象台の月別統計値データである。

図4.1は、熊本気象地方台における全天日射量と日最低気温の偏差を示している。全天日射量(図4.1(a))は、2000年、2001年の2月～9月にかけて、平年より10～20%大きい。2000年10月～11月は全天日射量が平年より一旦下回るが、12月に入ると、再び平年よりも15%大きくなる。日最低気温(図4.1(b))をみると、2000年10月～11月は(全天日射量が平年より少ないにもかかわらず)平年よりも2、3度高いことが分かる。

4.2 アジア・モンスーン域の気候変動特性

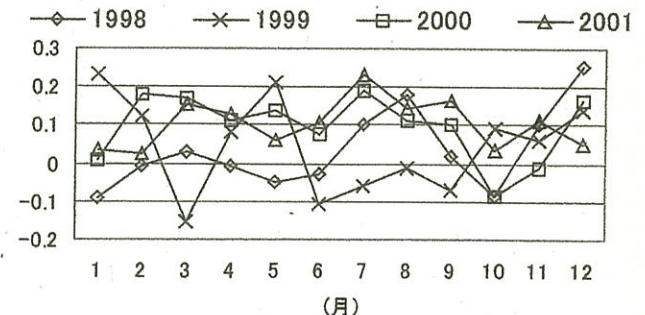
アジア・モンスーン域全体における有明海とその周辺域全体の気候変動について、NCEP(National Center for Environmental Prediction)客観解析データと熱帯降雨観測衛星(TRMM)の雲、海水温データを用いて解析を行った。

(1) NCEP客観解析データ

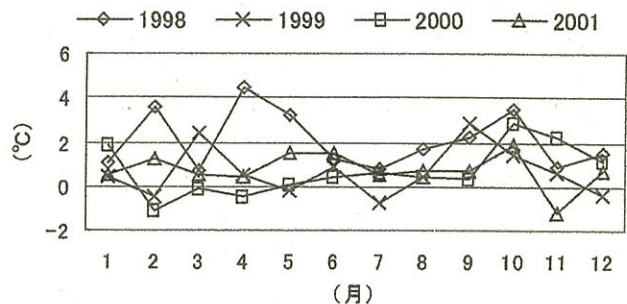
地上気象観測データと同様、各格子点における平年値からの偏差を求め、その分布特性を調べた。図4.2は地上に達する下向き短波放射(日射量に相当する)の偏差の分布を示している。1999年2～6月(図4.2(a))、2000年2～6月(図4.2(b))のいずれの平均値も、九州から東シナ海全域にわたって平年よりも大きいことが分かる。とりわけ、2000年のケースでは平年より10%以上日射量の大きい領域が東シナ海上に存

在しており光合成による植物性プランクトンの大量増殖が起こり易い環境下にあったといえる。

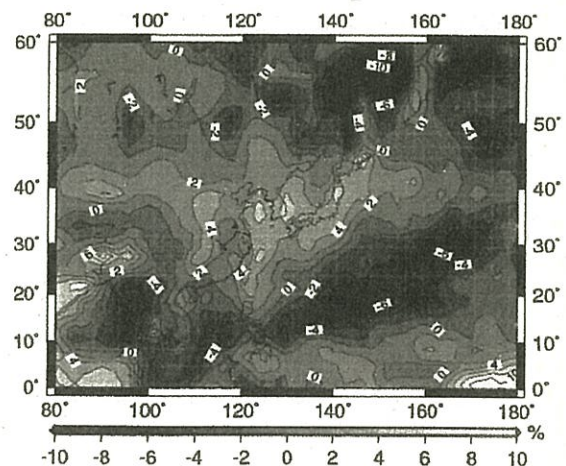
一方、2000年10月～11月の平均値(図4.2(c))をみると、東シナ海海域は平年よりも10%以上低い領域に位置していることが分かる。従って、東シナ海全域にわたり、例年よりもこの時期の雲量が多いことが予想される。



(a) 全天日射量の平年差(熊本)



(b) 日最低気温の平年差(熊本)



(a) 1999年2～6月の月平均

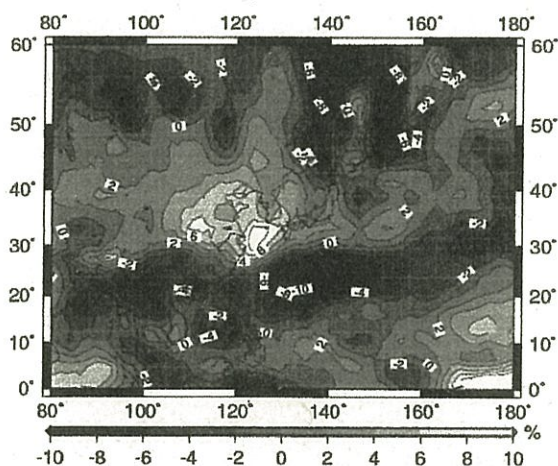
図4.2 日射量の年変動

4. 3 TRMM(熱帯降雨観測衛星)観測データ

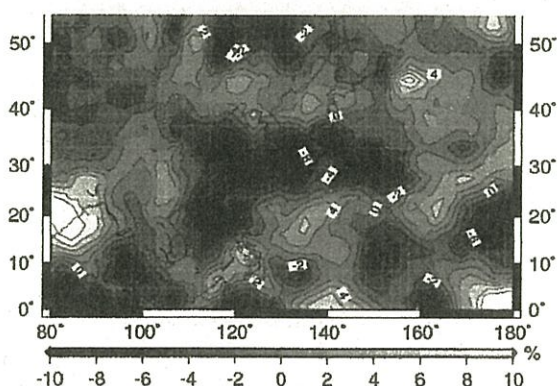
客観解析データより得られた、日射量の偏差と雲の関係を調べるため、熱帯降雨観測衛星(TRMM)によって観測された水蒸気・雲水量・海面温度データを用いて解析を行った。対象領域は東シナ海を含む北緯 15~35 度、東経 120~130 度とした。水平分解能 0.25 度の格子点データを東西方向に平均化し、基準日を中心とした 9 日間の移動平均値を算出した。図 4.3 は、有明海湾口部とほぼ同緯度の北緯 32.5 度における平均雲水量の推移を表している。2000 年について着目すると、日射量の多かった 2~6 月にかけては雲水量も他の年と比べて少ないことが分かる。9 月以降になると雲水量が増加し、他

の年に比べて多くなる。このように 2000 年の東シナ海における雲の発生状況は、他の年とはかなり異なった様相であることが分かった。

今回、夏季の赤潮の大量発生、冬季の海苔の色落ち被害と、環境悪化に伴う重大な被害が顕著であった 2000 年を中心として、気象要素の解析を行った。その結果、2000 年春~夏の大量の日射、同年秋~冬にかけての雲活動が背景として存在することが確かめられた。春~夏の日射は、光合成の活性化、ひいては、植物性プランクトンの大量発生へと結びつく可能性をもっている。一方、秋~冬にかけての雲の被覆は、特に夜間における放射冷却が抑制される。冷却されきれない海水が東シナ海を北上し、有明海に達することで、特定種のプランクトンの発生に寄与した可能性が指摘される。また、大量の雲に伴う大量の降水が沿岸域河川からの栄養塩流入に与えると考えられる。



(b) 2000 年 2~6 月の月平均



(c) 2000 年 10~11 月の月平均

図 4.2 日射量の年変動

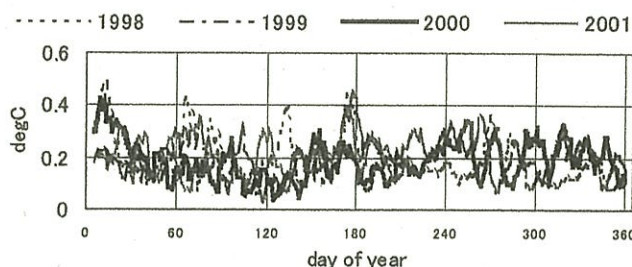


図 4.3 雲水量の年変動

参 考 文 献

- 1) 海川清 田村修(2001.11): "高潮・潮汐・波浪の相互作用解析に基づく出現最大を想定した高潮・高波のサーボマップの形成", 工学論文集 第48巻(2), pp.1366-1370
- 2) 海川清 古川隆治 鈴木敏巳 大本照憲(1999): "有明海の白川・綱川河口域における干潟環境特性とその評価に関する研究", 海草工学論文集 土木学会 第46巻(2), pp.1121-1125
- 3) 海川清 田村修(2002): "有明海の潮汐変動特性と沿岸構造物の影響", 工学論文集 第49巻(2), pp.1061-1066
- 4) 農林水産省(2001): 有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会, 第6回会議資料, 資料5, 「有明海海域環境調査」関係資料~有明海の30年間の推移の概況~

- 5) 岩崎良憲 古川恵治(2000): 脱窒能に着目した干潟の浄化能力の評価 日本水処理生物学会誌 Vol. 36, No. 3 pp. 153-159
- 6) 海川 清 山田文彦 原田浩幸 北園芳人(1998): “有明海沿岸域における干潟の浄化機能と環境荷重に関する研究”, 海岸工学論文集 土木学会 第45巻(2), pp. 991-995
- 7) 原田浩幸 古川恵治 海川 清(1999): “パイオターベシジョンによる脱窒に及ぼす干潟底土COD, 酸化還元電位の影響”, 環境技術 環境技術研究協会 vol. 28, no. 12, pp. 907-912
- 8) 原田浩幸 海川清(2000): “浄化に關する微生物活性に与える生物膜の影響”, 海岸工学論文集 第47巻 pp. 1131-1135
- 9) 原田浩幸 海川清(2001): “有明海密着・砂質干潟底層の水質浄化機能と生物擾乱の影響”, 海岸工学論文集 第48巻(2), pp. 1126-1129
- 10) 田淵雅彦 海川清 外村隆臣(2001): “熊本県の海岸植物分布と海岸環境”, 土木学会地球環境委員会 第9回 地球環境シンポジウム
- 11) 海川清(2002): “有明・八代海沿岸域の自然環境面と環境共生型社会基盤整備に関する研究”, 平成10年度~13年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A)(2): 一般, 研究成果報告書 453p.
- 12) 海川清 田中健路 吉村祥子(2002): “有明海の中部海域における環境変化の要因分析”, 土木学会 海岸工学論文集 第49巻, pp1066-1070
- 13) 西岡律恵 海川 清, 田中健路: “有明海の海域環境変動特性に関する研究”, 平成14年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, III-60, (2003. 3)
- 14) 熊本県水産研究センター(1975-2000): 浅海定線調査
- 15) 福岡県水産海洋技術センター(1975-2000): 浅海定線調査
- 16) 佐賀県有明海水産振興センター(1975-2000): 浅海定線調査
- 17) 佐賀県有明海水産振興センター(1990-2000): 底質生物モニタリング調査
- 18) 鯉淵幸生、小倉久子、安藤晴夫ら(2000): 東京湾湾奥部における栄養塩の周年変動に関する現地観測、海岸工学論文集、第47巻(2)、pp1066-1070
- 19) Mamayev O. I. (1975): “Temperature-Salinity Analysis of World Ocean Waters.” , Elsevier, Amsterdam, 374p.
- 20) 九州漁業調整事務所(1985-2000): 有明海赤潮発生件数

論文資料：

- ① “有明海の過去 25 年間における海域環境の変動特性”
海岸工学論文集、第 50 巻、土木学会、pp. 1001-1005 (2002)
- ② “有明海とその周辺地域における近年の気候変動の傾向”
海岸工学論文集、第 50 巻、土木学会、pp. 1171-1175 (2002)
- ③ “有明海の潮汐変動特性と沿岸構造物の影響”
海岸工学論文集、第 49 巻、土木学会、pp. 1061-1065 (2002)
- ④ “有明海の中部海域における環境変動の要因分析”
海岸工学論文集、第 49 巻、土木学会、pp. 1066-1070 (2002)
- ⑤ “有明海干潟底泥の水質浄化能力と物理的かく乱による能力強化に関する研究”
海岸工学論文集、第 49 巻、土木学会、pp. 1121-1125 (2002)
- ⑥ “干潟環境の修復・改善へ向けた対策工とその効果”
- ⑦ “有明海干潟環境変化のメカニズムに関する観測・調査研究について”

有明海の過去 25 年間に於ける海域環境の変動特性

滝川清*・田中健路**・外村隆臣***

西岡律恵****・青山千春*****

環境悪化の悪循環に陥っていると懸念される有明海の環境変化の要因分析を行なうにあたり、水質特性や底質特性、気象などの過去 25 年間のデータを用いて整理と解析を行なった。その結果、水質環境の変動特性により 5 つの海域に分類でき、以前より湾奥では夏季に密度成層が形成され、海底面近傍では貧酸素化現象が起っていたこと、海域全体の窒素循環において硝化能力が低下していること等が明らかとなった。また、ノリの色落ちが顕著であった 2000 年には、春夏期の高日射量と秋冬期の高雲水量、および冬季の高水温と降水による栄養塩の流入等、気象要素の異変などが明らかとなった。

1. はじめに

代表的な閉鎖性内湾である有明海の環境は、1980 年代より、生息生物の種および数が減り始め、赤潮の発生、漁獲量の減少や水質の悪化など環境悪化が顕著になって来ており、特に 2000 年 7 月には「大量の赤潮発生」、2001 年 1 月には「ノリの色落ち」により莫大な被害が生じている。本研究では、このような有明海域の環境悪化の原因解明にあたって、過去 25 年間の有明海域の生物・水質・底質および気象などの観測データの経年変化記録から、有明海の環境変動特性を把握することを目的として研究をおこなっている（滝川他 2002 a, 滝川他 2002 b, 滝川他 2003）。

2. 有明海域の環境変動特性

1976 年から 2000 年の 25 年間に於ける有明海の浅海定線調査データ（熊本、福岡、佐賀の 3 県）および気象庁データ（気象庁年報、アメダス観測年報）をもとに、有明海域の水質および気象特性について調べた。浅海定線調査地点は、図-1 に示すように熊本県 22 点、佐賀県 11 点、福岡県 10 点である。調査項目は水温、塩分濃度の他に、溶存酸素（DO）、化学的酸素要求量（COD）やリン酸態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）、硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）、亜硝酸態窒素（ $\text{NO}_2\text{-N}$ ）、アンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）、珪酸態珪素（ $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ）、溶存三態窒素（DIN）といった栄養塩濃度、プランクトン沈殿量、透明度、pH が毎月 1 回の間隔で計測、分析されている。底質生物モニタリング調査地点は、図-2 に示す湾奥の 10 地点で、調査項目は強熱減量、硫化水素、COD であり、こちらは 1990 年より年 2 回（5 月、8 月）実施されている。

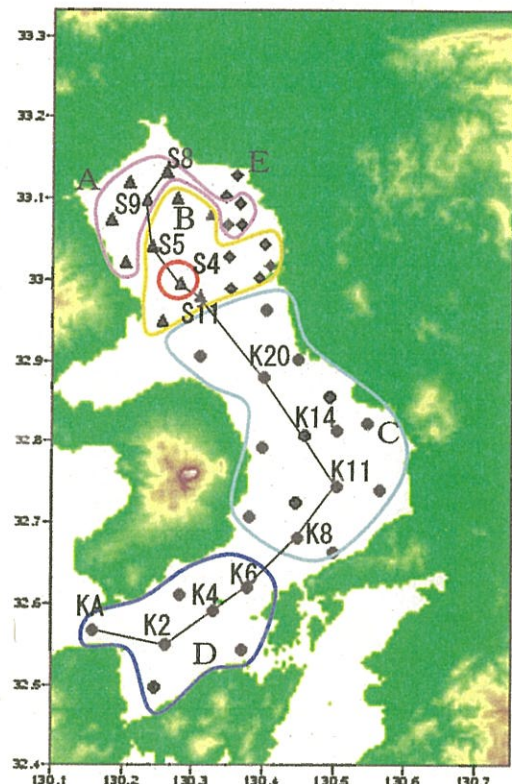


図-1 浅海定線調査地点（クラスター分類と縦断線）

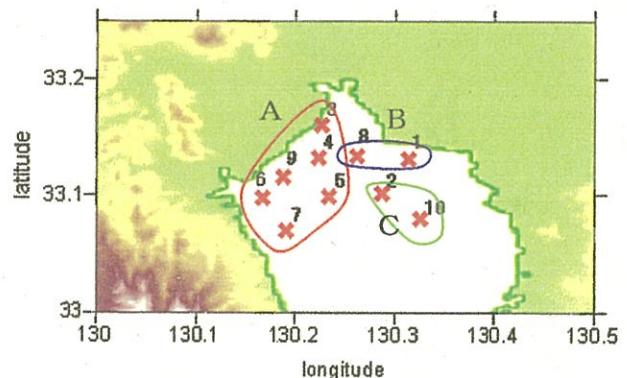


図-2 底質モニタリング調査地点（クラスター分類）

* 正会員 工博 熊本大学教授 沿岸域環境科学教育研究センター

** 正会員 理修 熊本大学助手 工学部環境システム工学科

*** 正会員 熊本大学技官 工学部環境システム工学科

**** 正会員 (株) jimos

***** 正会員 博(水産) 独立総合研究所

(1) 解析方法

浅海定線調査データについて、地点毎の分布特性を明確化するために、水質項目データを用いてクラスター分析を行い、グループ毎の典型的な変動パターンを見出すことで水質環境の変動特性を調べた。また、赤潮発生のメカニズムに赤潮が関与することから、湾軸方向に沿う形で調査地点を抽出して、水温、塩分、密度、溶存酸素などの鉛直分布特性を調べることで、有明海の水質環境の時空間的な変動特性の把握を試みた。底質生物モニタリング調査も、浅海定線調査と同様、クラスター分析によって地域的特性を見出して、その変動傾向について解析を行った。

(2) クラスタ分析による海域特性

有明海の海域特性を調べるため、河川による影響が大きいと思われる夏季のデータについて 25 年間の水質データを平均しクラスター分析を行った。その結果、夏の水質項目の平均特性は図-1 に示す湾奥北部 A、湾奥南部 B、湾中央部 C、湾口部 D、筑後川河口 E の 5 つの海域グループに分類された。また、分類グループの水質項目ごとに図-3 に示すような平年値の変動特性が明らかになった。透明度表層の年間変動は湾奥部が低く、湾口部になるほど高くなっており、各グループ毎に年間を通じてほぼ一定の値を示す(図-3(a))。これは、透明度が主に水深と潮汐活動の大きさに左右されているためと考えられる。塩分表層の濃度は湾奥側ほど低くなっており 7 月に著しい低下が見られる。これは、梅雨における大量の降水により、河川流入量も増加することが原因と考えられる。また、図-3(b) に示す水深 5m 地点の $PO_4\text{-P}$ 濃度は、分類 E の筑後川河口域を除くと湾奥部ほど高く、その年間変動は冬季から夏季にかけて低濃度となり、夏季から秋季に高濃度となる傾向にある。この $PO_4\text{-P}$ が低濃度の時期は図-4 に示すように潮汐の年間変動のうち平均潮位が低くなって干潟干出面積の広がる時期とほぼ一致する。

(3) 海域の窒素循環

海域に流入した有機態の窒素は、微生物によって無機物に分解される。無機態となった窒素は脱窒されて窒素ガスとなり大気中に分散したり、栄養塩として生物の体内に取り込まれたりする。生物に取り込まれた窒素は排泄されて溶存態の窒素となり、微生物によって分解される。また、その生物の死骸が再び微生物によって分解されて無機化される。

図-5 は、 $NO_2\text{-N}/NH_4\text{-N}$ 比、 $NO_3\text{-N}/NH_4\text{-N}$ 比、 $DIN/PO_4\text{-P}$ 比の 1 年移動平均の推移をそれぞれ表している。海域 A～F のうち、表層のデータのそろっている、海域 A～D のデータ(福岡・佐賀)について解析する。

$NO_3\text{-N}/NH_4\text{-N}$ 比(図-5(a))、 $NO_2\text{-N}/NH_4\text{-N}$ 比(図-5(b))のグラフを見ると 1993 年以降急激に減少

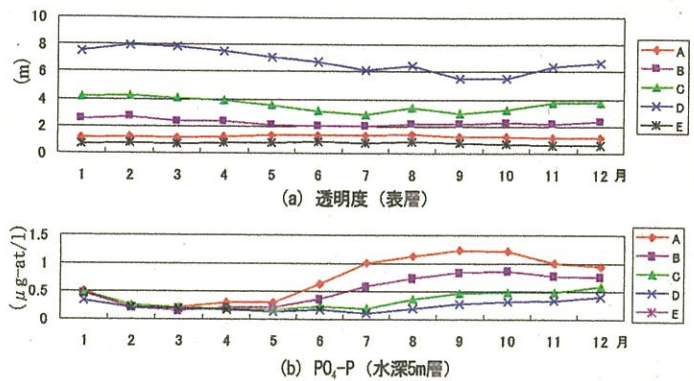


図-3 水質項目の年変動特性(平年値)

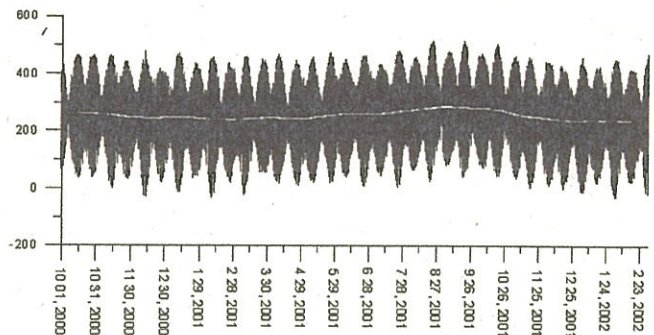


図-4 平均潮位の年変動(熊本港)

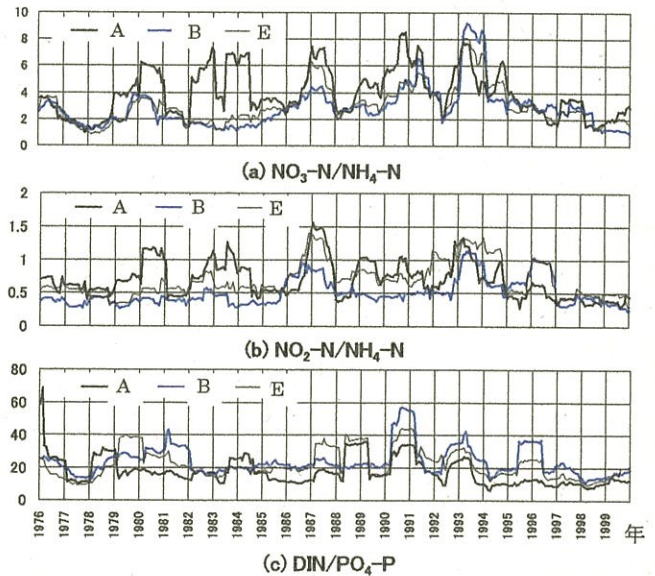


図-5 $NO_3\text{-N}/NH_4\text{-N}$ 、 $NO_2\text{-N}/NH_4\text{-N}$ 、 $DIN/PO_4\text{-P}$ 比の 1 年移動平均の推移

していることが分かる。このことから、アンモニア態窒素一亜硝酸態窒素一硝酸態窒素に変化する過程で、硝化能力が十分に発揮されなくなっていると推測される。また、 $NO_3\text{-N}/NH_4\text{-N}$ 比、 $NO_2\text{-N}/NH_4\text{-N}$ 比から、ここ数年海域分類ごとの差が小さくなっていることから、全域的に硝化能力が衰えてきている可能性が指摘される。

DIN/PO₄-P 比 (図-5(c)) はほぼ横ばいの値を示しているが、海域Aを除いて植物プランクトンの平均的な N/P 比 16 (鯉渕ら, 2000) を超過している。陸域から窒素が過剰供給されていたことが言える。しかしここ数年、N/P 比は減少傾向が見られ 16 に近づいてきている。リンが窒素以上に過剰供給されている可能性が指摘される。以上のことから生活廃水や工場排水などの汚染混入の増加や、自然浄化作用の衰えなどにより、広い範囲にわたって水質が悪化してきていることが明らかになった。

(4) 海域の成層化と貧酸素化現象

有明海の成層化の状況を把握するために、図-1 に示すように湾軸方向に断面を設定し、縦断面における水温と塩分濃度の鉛直分布特性を調べた。その結果、夏場には水温、塩分ともに長年にわたって成層化が多く観測された。例として図-6 に 2000 年夏 (7 月) と冬 (12 月) の水温・塩分濃度より求めた密度分布 (σ_t) を示す。夏季には水深 0~10m 付近から湾奥まで密度成層が起こっていることが明らかとなった。

有明海における、貧酸素化現象を把握するために、水深方向のデータが揃っている湾奥の 1 点 (S4 地点 (図-1)) について分析を行った。S4 は縦断面の点で、河川からの影響が少ない一般的な点として選んだ。図-7 は、S4 地点の底層について溶存酸素 (DO) の水産用水基準値 6mg/l (底層においては 4.3mg/l 以上が目安) 以下が観測期間中にどれだけ出現したかを表したものである。点線は 4.3mg/l を示す。この図から観測当初の 1970 年代より夏から秋にかけて貧酸素化現象が見られることが判る。観測当初と近年を比較しても DO の極小値や貧酸素化の期間には大きな違いは見られない。また、他の湾奥の地点でも観測当初から貧酸素化が起こっており、湾奥では以前から広範囲で貧酸素化現象が起こっていたことが明らかとなった。

図-8 は、赤潮が増加してきた 1995 年以降の月別赤潮発生件数 (九州漁業調整事務所, 1985-2000), 図-9 は、同じく 1995 年以降の S4 地点における DO と NO₂-N の水深方向の時系列である。DO は 5 月~7 月にかけて徐々に濃度の低下が見られ、貧酸素水塊が発生していることが分かる。1998 年を見ると表層の濃度は 6 月から 7 月下旬にかけて夏場 10mg/l 以上 (飽和酸素濃度の 150% 以上) の値を示しており、底層では 3.5mg/l 以下の貧酸素水塊が観測できる。図-8 より、この時期に植物プランクトンによる赤潮が発生していることから、植物プランクトンが光合成により酸素を放出したことにより表層の DO 濃度が高くなり、大量に発生した植物プランクトンは死骸となって沈殿し、分解する際に酸素が使われ底層での貧酸素現象が起こったと推測される。他の年でも、夏季において、表層で DO が過飽和になっている地点と底層で貧酸素水塊がみられる地点はほぼ一致していることが

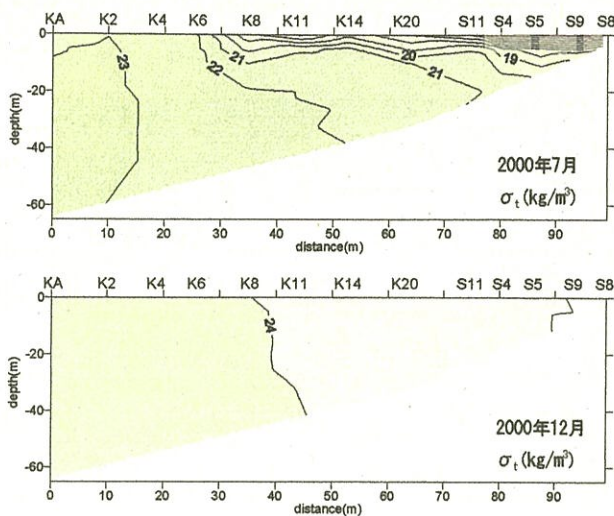


図-6 湾軸方向の密度縦断分布

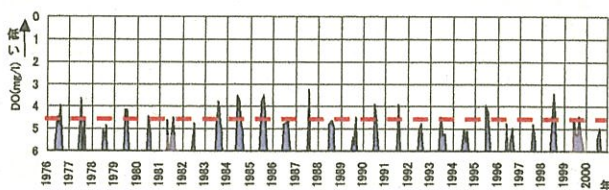


図-7 底層における DO の経年変化 (S4 地点)

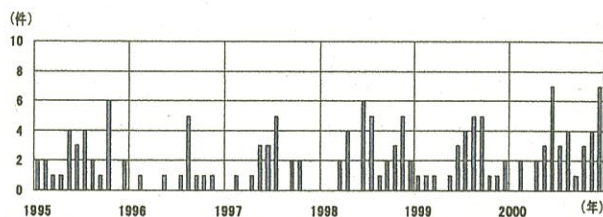


図-8 赤潮発生件数 (1995~2000 年)

観測される。このことから、夏季の赤潮発生と底層の貧酸素化は密接に関係していることが分かる。DO と NO₂-N (図-9) の時系列を比較すると、底層において DO 濃度の低い地点と NO₂-N 濃度の高い地点が一致している部分が多く観測できる。アンモニア態窒素の一部は亜硝酸態窒素・硝酸態窒素と変化する。硝化過程の中間物質である NO₂-N があるということは近くに汚染源があるということを示しており、この汚染物の分解に酸素が使われ DO 濃度は低下する。その結果、夏季における NO₂-N 濃度の上昇と DO 濃度の低下が同じ場所で起こったと考えられる。

(5) 底質データによる海域特性

底質特性は底生生物が棲む環境そのものの変化を示し、近年底質の悪化 (泥質化、汚泥化) が示唆されている。そのため底質特性を把握するため底質 (硫化水素、強熱減量, COD) のデータのある湾奥の調査地点 (図-2) について、クラスター分析を用いて解析を行った。その

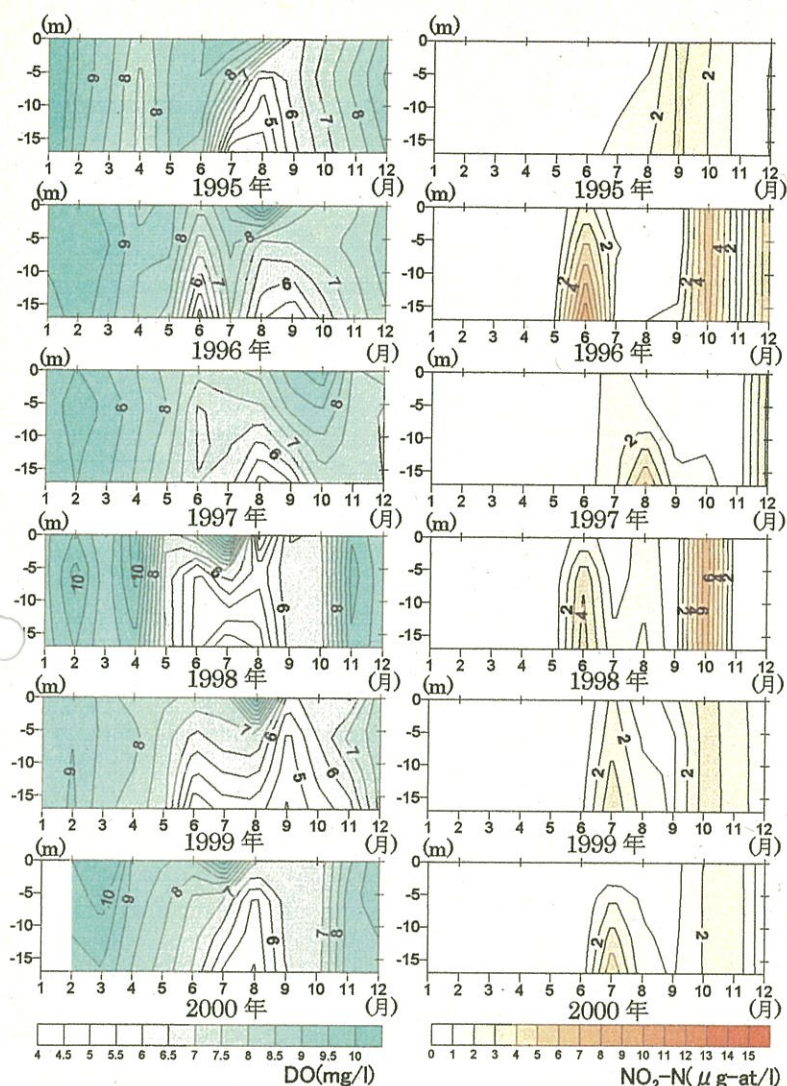


図-9 S4地点の鉛直断面の時系列(1995~2000年)

結果、図-2のように海域A, B, Cに分類され、図-10に示す変動特性が明らかになった。(a)図に示すCODは水産用水基準によると20mg/g以上は汚染泥である。海域Aでは汚染が進んでおり、海域Bも近年値が高くなってきている。強熱減量の値は試料中に含まれる有機物等の目安になり、有機物の負荷量が多いと分解が追いつかず、酸素も不足し、腐敗した有機物が増えて環境に悪影響を与える硫化水素が発生するようになり、有機物に含まれる栄養分の窒素やリンが多量に海に溶け出すようになる。(b)図の硫化水素では、海域Bの上昇がみられ同時に(c)図の強熱減量でも増加が見られる。これらの変動特性から、筑後川からの流入の影響が大きい領域を除き、西側の方に徐々にCOD, 硫化水素, 強熱減量が増加し、汚染が深刻化してきていることが明らかとなった。

3. 地上観測データによる熊本・佐賀の気候変動

有明海沿岸域での地上気象観測データを基に、気象要

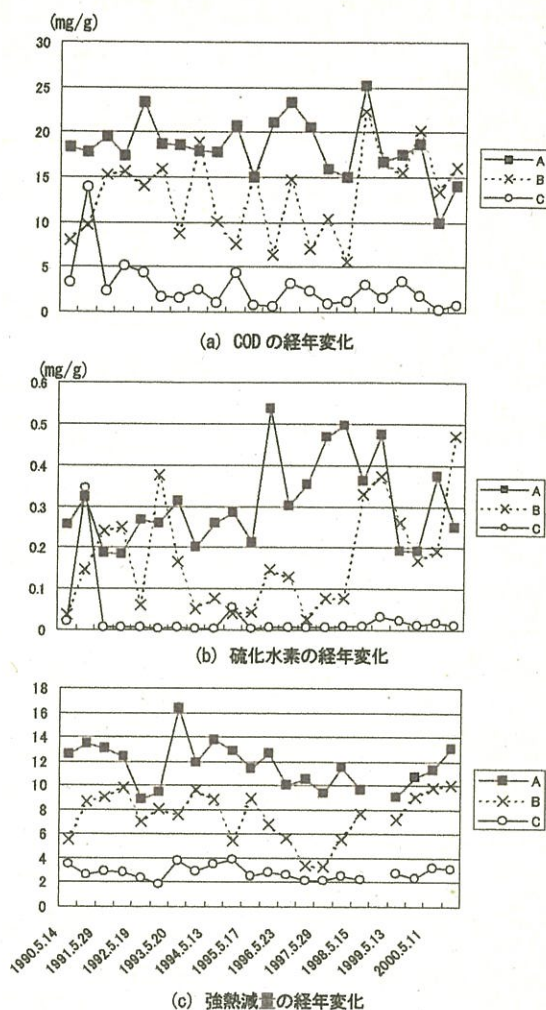


図-10 湾奥底質の経年変動特性

素の変動を解析した。使用したデータは、気象庁年報のCD-ROM(気象庁提供)に収録されてある熊本・佐賀地方気象台の月別統計値データである。

図-11は、熊本気象地方台における全天日射量と月平均気温および月降水量の偏差を示している。全天日射量の対平年値との偏差(図-11(a))は、2000年、2001年の2月~9月にかけて、平年より10~20%大きい。2000年10月~11月は全天日射量が平年より一旦下回るが、12月に入ると、再び平年よりも15%大きくなる。月平均気温の月別偏差(図-11(b))は、2000年10月~11月は(全天日射量が平年より少ないにもかかわらず)平年よりも約2度ほど高いことが分かる。また、月別の降水量の偏差(図-11(c))から、2000年10月~11月は例年よりも降水量が多いことが分かる。

また、アジア・モンスーン域全体における有明海とその周辺域全体の気候変動について、NCEP(National Center for Environmental Prediction)客観解析データと熱帯降雨観測衛星(TRMM)の雲、海水温データを用いて解析を行

った結果(田中・滝川ら, 2003)によると, 1999年2~6月および, 2000年2~6月のいずれにおいても下向き短波放射(日射量に相当する)の偏差の値は, 九州から東シナ海全域にわたって平年よりも大きく, とりわけ, 2000年では平年より10%以上日射量の大きい領域が東シナ海上に存在しており光合成による植物性プランクトンの大量増殖が起こり易い環境下にあったといえる。一方, 2000年10月~11月の日射量は東シナ海海域は平年よりも10%以上低く, 例年よりもこの時期の雲量が多いことが指摘されており, 2000年の東シナ海における雲の発生状況は, 他の年とはかなり異なった様相であることが分かった。

すなわち, 夏季の赤潮の大量発生, 冬季の海苔の色落ち被害と, 環境悪化に伴う重大な被害が顕著であった2000年においては, 春~夏の高日射は, 光合成の活性化, いては, 植物性プランクトンの大量発生へと結びつく可能性を持つとともに, 秋~冬にかけての雲の被覆は, 特に夜間における放射冷却を抑制し, 冷却されきれない海水が東シナ海を北上し, 有明海に達することで, 特定種のプランクトンの発生に寄与した可能性が指摘される。また, 大量の雲に伴う降水が沿岸域河川からの栄養塩とともに流入したと考えられる。

4. おわりに

過去25年間の有明海の水質・底質・生物及び気象の観測データを分析し, 膨大な資料の数値データ化および図化とともに, 環境変動の時空間特性の把握を行った。その結果, 夏季の水質環境の変動をクラスター分析することによって, 特徴ある5つの海域に分類できた。有明海では大潮位差のため貧酸素水塊は発生しにくいと考えられていたが, 以前より湾奥部を中心にして夏季に密度成層が形成され, 海底面近傍では貧酸素化現象が起こっていたことが分かった。また, アンモニア態窒素, 亜硝酸態窒素, 硝酸態窒素の割合の経年変化の分析結果から, 海域全体の窒素循環において硝化能力が低下していること等が明らかとなった。気象観測記録の分析から, ノリの色落ちが顕著であった2000年には, 春~夏季に高日射量があり, 逆に, 秋~冬季には雲水量が多かったことが分かった。この結果, 冬季における熱放射が抑制され, 冬季の高水温とともに例年以上の降雨が発生し, 降水による栄養塩の流入等, 気象要素の異変が生じていたことなどが明らかとなった。

本研究を行うに際して, 熊本県水産研究センター, 佐賀県有明海水産振興センター及び福岡県水産海洋技術センターから貴重なデータの提供を戴きました。ここに記して感謝致します。また, 本研究の一部は, 日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A)(2)(代表: 滝川清; 課

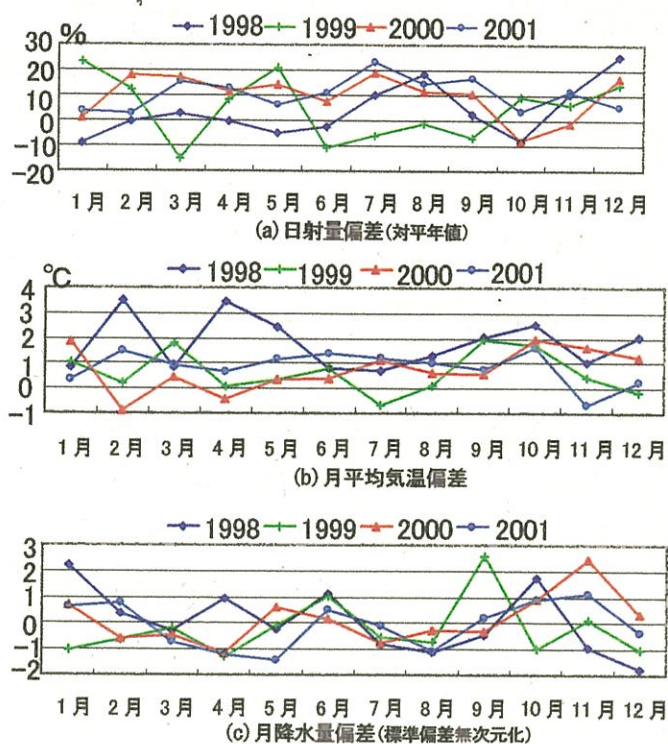


図-11 熊本地方気象台における気象観測記録

題番号 14208072 : 平成14~17年度)の補助によるものであり記して謝意を表します。

参考文献

- 鯉淵幸生・小倉久子・安藤晴夫(2000): 東京湾湾奥部における栄養塩の周年変動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第47巻(2), pp1066-1070.
- 九州漁業調整事務所(1985-2000): 有明海赤潮発生件数
- 滝川清・田中健路・外村隆臣・吉村祥子(2002a): 有明海の中部海域における環境変動の要因分析, 海岸工学論文集, 第49巻(2), pp1066-1070.
- 滝川清・古川憲治・鈴木敦巳・北園芳人・原田浩幸・田中健路・柿本竜治・山下隆男(2002b): 有明・八代海沿岸域の自然環境評価と環境共生型社会基盤整備に関する研究, 平成10~13年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(2))研究成果報告書, (課題番号10308026), 453p.
- 滝川清・田中健路・外村隆臣・増田龍哉・森岡三郎・酒井勝(2003): 有明海干潟環境の改善・回復に向けた対策工とその効果, 海岸工学論文集, 第50巻, (投稿中)
- 田中健路・滝川清・成松明(2003): 有明海とその周辺地域における近年の気候変動の傾向, 海岸工学論文集, 第50巻, (投稿中)

有明海とその周辺地域における近年の気候変動の傾向

田中健路*・滝川清**・成松明***

本研究では、近年顕在化している有明海の環境変異における重大な要因の一つとして考えられる、有明海を中心とした領域の気候変動に関して、地域気象観測（アメダス）データ・NCEP 客観解析データなどを用いて解析を行った。環境悪化に伴う被害が深刻だった2000年は、有明海ならびに東シナ海において、夏季モンスーンの発達に平年より弱く太平洋高気圧の勢力下にあり、日射量が平年よりも10%以上高かったこと、また、熱帯域での夏季～秋季の降水パターンが、有明海近海域において10月に平年の2倍以上の大量の降水をもたらしたことが、地上観測・広域データ双方を解析することによって明らかとなった。

1. はじめに

有明海は、九州西部に位置する代表的な閉鎖性内湾であり、生態系を含む熱・水・物質循環の微妙なバランスによって形作られた独特の自然環境にある。日本の干潟総面積の約49%を占める広大な干潟と、湾奥部で満潮時最大5m以上に達する潮位差による強い潮流効果、および、汚濁物質を凝集沈降させる浮遊底泥の効果などもあり、これまで、赤潮発生などの環境悪化に関する現象が表面化することはなかった。しかし、1980年代以降生物種の減少や漁獲量の減少や赤潮・青潮発生の頻発化など、環境悪化に伴う諸現象が表面化するようになってきた。特に、2000年の7月の「赤潮の大量発生」や2000年12月～2001年1月の「ノリの色落ち被害」により、沿岸4県において莫大な被害が生じた。

有明海における環境変動については、上空の大気・周囲河川を含めた水・底泥における個々の過程が生態系プロセスと複雑に結び付いており、どのプロセスが近年の環境悪化に対して支配的であるかについて、多角的視野に基づいた解析が求められる。現地調査に基づく水質・底質の変動（滝川ら、2002）や諫早湾締め切り堤防などの構造物に伴う流速場（灘岡ら、2002）・潮位差の変化（滝川・田淵、2002）など、近年数多く研究が行われてきている。気象要素もまた、水温や流動場をはじめとして海域環境に多大な影響を与えられている。日射・降水・風と赤潮発生との関連性は、有明海のみならず、東京湾や大阪湾などの海域環境変動に関する研究でも議論されてきている。

ところが、従来の有明海の環境変動に関する研究は、個々のイベントの発生要因に着眼したものが多数であり、背景的要因として位置付けられる気候変動などについて

は十分な知見が得られていない。そこで、本研究では有明海沿岸域および周辺域の気候変動を把握することを目的とし、各種気象データを用いて解析を行った。

2. データ

有明海海域における気候変動を捉えていく上で、東シナ海をはじめとして、周辺域の状況を含めて把握していく必要がある。本研究では、地上観測データと全球客観解析データ、ならびに、衛星観測データを用いて解析を行った。

地上気象観測データとして、気象庁年報（2001年度・気象庁提供）を使用した。気象庁年報には、全国153個所の測候所における気象要素の1時間値が収録されているほか、観測開始からの半旬・旬・月・年間統計値と極値順位（観測開始からの最大、最小値など）、異常気象記録、気象災害資料などが収録されている。本研究では、観測開始（1891年）以来の熊本・佐賀地方気象台の気象要素の月統計値を使用した。

全球規模の気象データとして、NCEP 客観解析データ（Shea 他、1994）及び全球降水気候計画（GPCP: Global Precipitation Climatology Project）1度格子点データ（以降、GPCP データと称す）を用いた。NCEP 客観解析データは、データの空間分解能や解析要素などの組み合わせにより、数百種類にも及ぶ。今回は、全球2.5度間隔の1948年以降の月間データ（ds090.0）を用いた。

衛星観測データとして、熱帯降雨観測衛星（TRMM: Tropical Rain Measuring Mission）の雲・降水・水蒸気データを使用した。現在、統合的強化観測期間（CEOP: Coordinated Enhanced Observing Period）など、気候変動をはじめとする地球環境に関する観測研究プロジェクトが実行されてきており、その一環として、数々の観測衛星が打ち上げられてきている。TRMMはこれらの観測衛星の一つで、1997年11月に打ち上げられ、同年12月より観測を継続しており、5年以上の運用実績を持っている。本研究では、可視赤外観測装置（VIRS）とTRMM マイクロ波観測装置（TMI）によって観測される、雲水量、可降水

* 正会員 修(理) 熊本大学助手工学部環境システム工学科

** 正会員 工博 熊本大学教授沿岸域環境科学教育研究センター

*** 学生会員 学(工) 熊本大学大学院自然科学研究科環境土木工学専攻

量、海面温度データ（柴田ら、1999）を用いて、雲・水蒸気などの分布を解析した。

気象要素の季節変動・年々変動特性を明らかにするため、ある地点の要素 $S(y, m)$ に対する平年値 $\bar{S}(m)$ に対する偏差

$$S'(y, m) = S(y, m) - \bar{S}(m) \quad (1)$$

を求めた。日射や降水量などは、 S' を平年値で割って百分率で与えることで、平年に対する増減を評価した。

3. 地上気象観測による熊本・佐賀の気候変動

熊本地方気象台における、観測開始以来の年平均気温、及び7月と1月の月平均気温・日最高最低気温の経年変動を図-1に示す。1950年以降、平均気温が徐々に上昇し、1990年代に入り上昇率が20年に1℃と加速していることが明らかである。日最低気温は夏季・冬季いずれにおいても100年間に約3~5℃もの上昇率を示している。特に、1980年代後半から1990年にかけて、1月の最低気温・最高気温・日平均気温ともに3℃以上上昇しており、観測開始以来の熊本地方気象台における、年降水量の経年変動、ならびに、年降水量の過去30年標準偏差の経年変動を図-2に示す。年降水量は平均的にはっきりとした増大・減少傾向が見られず、年々変動が増大する傾向にある。図-2の太線で示してある、過去30年分の移動標準偏差の変動は、1960年までは400mm以下で会ったのに対し、1990年代後半以降は500mmを超える値となっている。標準偏差に見られるような降水量の年々変動幅の増大は、河川流量をひいては栄養塩流入量を支配し得るという点で、重要と考えられ、今後とも継続的な解析が望まれるところである。

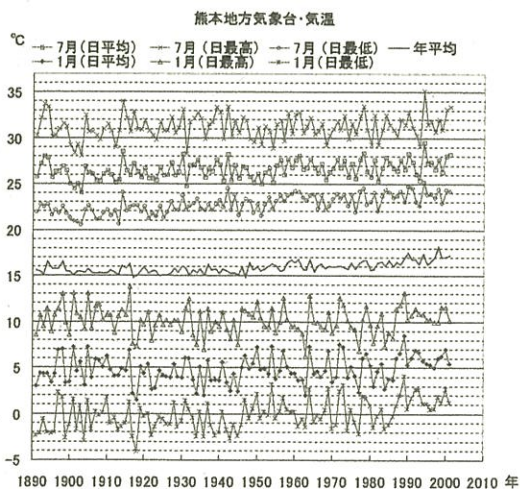


図-1：熊本地方気象台における年平均気温及び1月・7月の平均日最高最低気温の経年変動

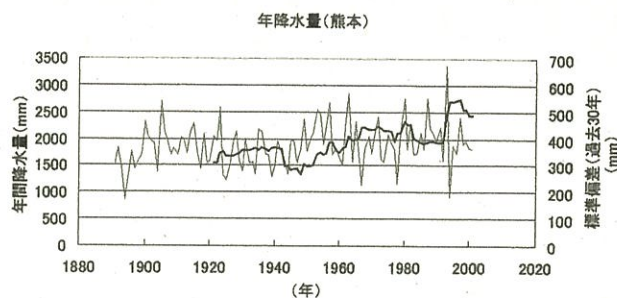


図-2：熊本地方気象台における年間降水量（細線・左軸）及び過去30年標準偏差（太線・右軸）

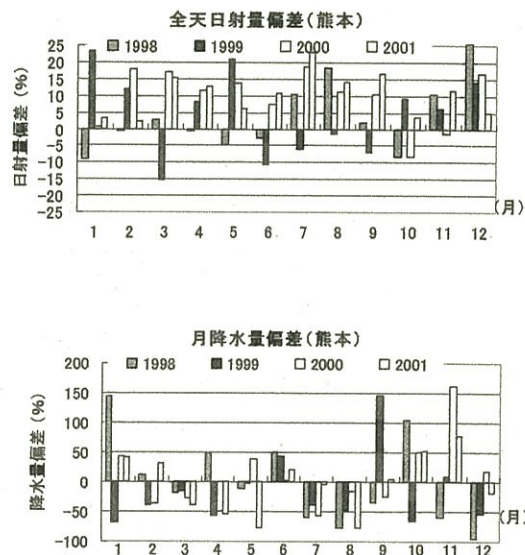


図-3：熊本地方気象台の全天日射量・日平均気温・日平均気温の偏差（1998年～2001年）

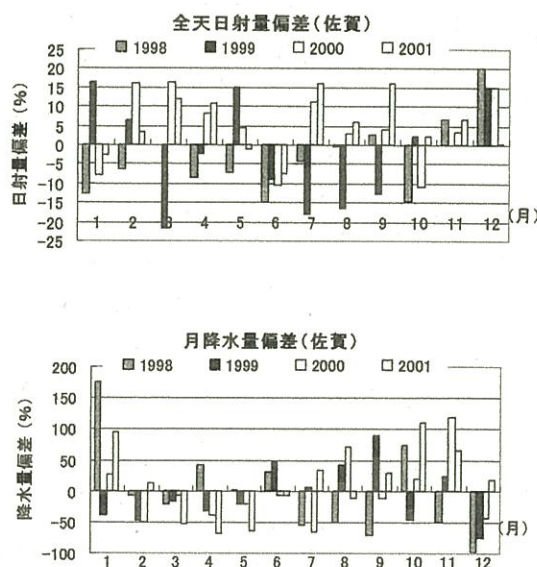


図-4：佐賀地方気象台の全天日射量・日平均気温・日平均気温の偏差（1998年～2001年）

熊本・佐賀地方気象台の1998年以降の日射・降水量について、平年値（1971年～2000年の30年間より求めた平均値）からの偏差を、図-3、図-4に示す。熊本・佐賀いずれにおいても、2000年2～5月、7月～9月の日射量が平年より大きく、特に熊本では平年より10%以上大きい時期が続いた。また、ノリの色落ち被害の発生する直前の2000年10月～11月にかけて、平年の1.5～2.5倍の降水を観測しており、同年12月に入り、平年より全天日射が10～15%強くなった。粒子追跡法による数値計算結果によると、有明海の潮流や河川水流入などによる海水交換のサイクルが約50～60日程度であることから、2000年10～11月における大量降水に伴う河川からの大量の栄養塩が流入し、同年12月においてはそれらが有明海全域に拡散する最中であつたものと考えられる。それに加えて、2000年12月には例年を上回る日射量、および、平年よりも高温状態が重なったことで、ある特定のプランクトンが活発化し、最終的にはノリの色落ち被害へと至ったことが考えられる。

以上の地上気象観測データに基づく解析により、近年の日射量増大・秋季の降水量の変動が重要であることが確かめられた。

4. 広域解析

(1) 降水分布特性

有明海周辺域の降雨分布を把握するため、GPCPIDD(1度格子・日降水量分布)データを用いて、時空間分布を作成した。時空間分布作成にあたり、南北一時間断面及び東西一時間断面の2種類を作成するため、解析種類を北緯0～40度、東経120～130度(東西方向を平均化:領域R-I)の領域と北緯30～35度、東経80～180度(南北方向を平均化:領域R-II)の領域を設けた。

図-5は、領域R-Iにおける、1998年～2001年4年間の日降水量の南北一時間断面図である。1998年前半は20世紀最大級のエル・ニーニョにより、赤道(インドネシア・海大陸)～北緯20度(フィリピン近海)までは乾燥した状態が続いている一方、北緯30度を中心として非常に強い降水域が発達しつづけており、5月下旬に一度南下したあと、モンスーンに伴って北上している様子が現れている。2000年の降水分布に着目すると、5月～9月にかけて赤道域には約50日周期の振動が表れており、それが北進するパターンが顕著である。9月後半に形成された強雨域が北進して10月に有明海近海に到達して、例年になく多量の降雨がもたらされたように見える。図-6は、有明海を中心とした東西帯状の領域R-IIにおける日降水量の時空間断面を示している。2000年夏季においては、太平洋高気圧の発達によるものと思われる、少雨域が九州西部まで達しており、2000年夏季の高日射・少雨は夏

季モンスーンと太平洋高気圧の発達が関連しているものと考えられる。

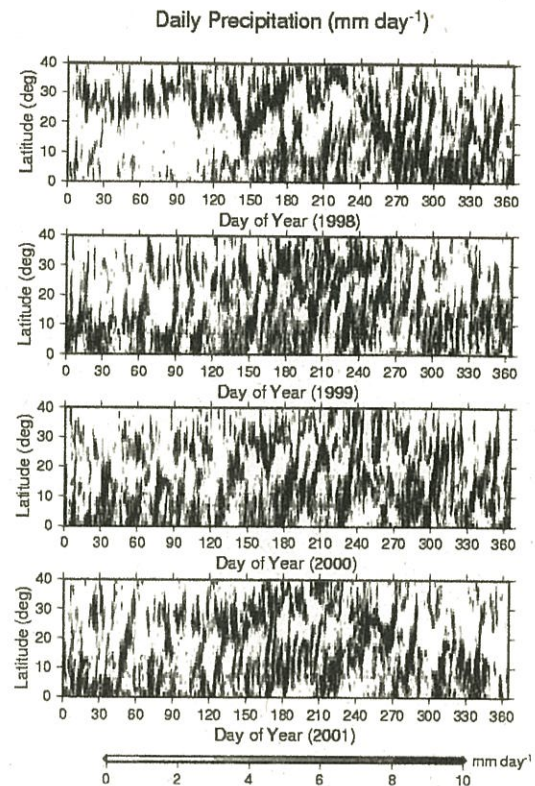


図-5: インドネシア赤道域～黄海北部(領域R-I)における日降水量の南北一時間断面

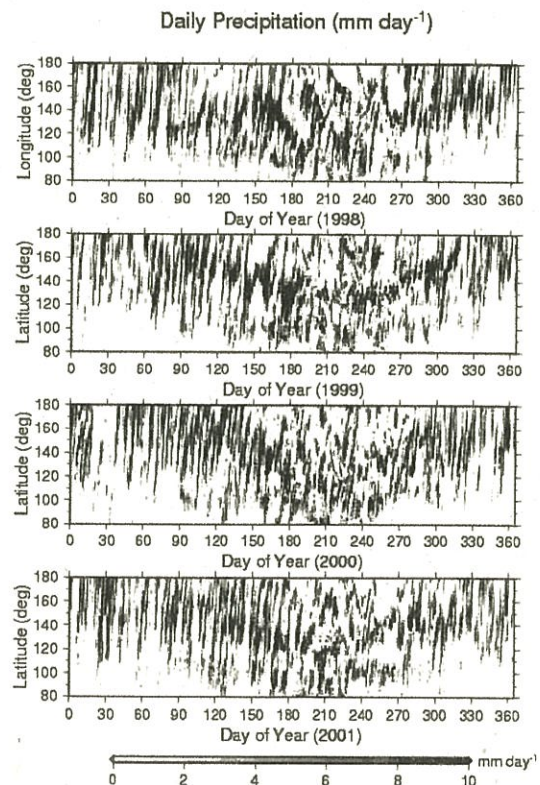


図-6: 東経80～180度の中緯度帯における日降水量の東西一時間断面

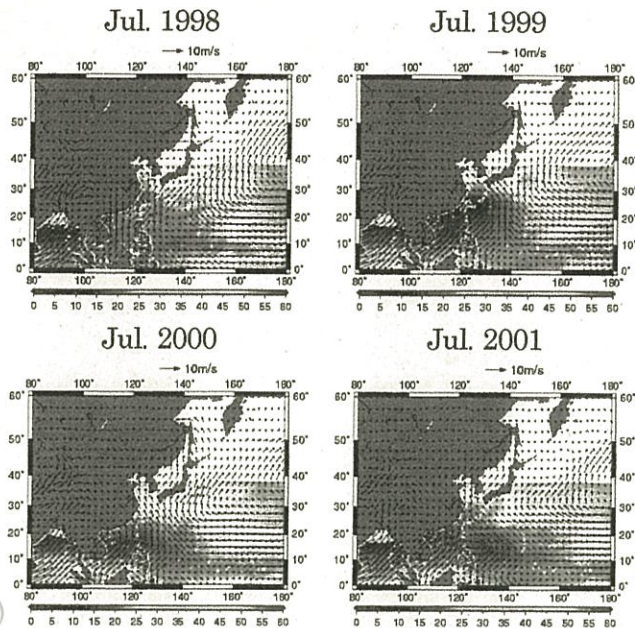


図-7：熱帯降雨観測衛星(TRMM)によるアジア地域の水蒸気分布およびNCEP 客観解析データによる地上風ベクトル。

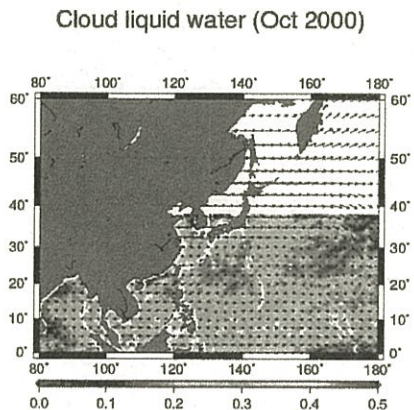
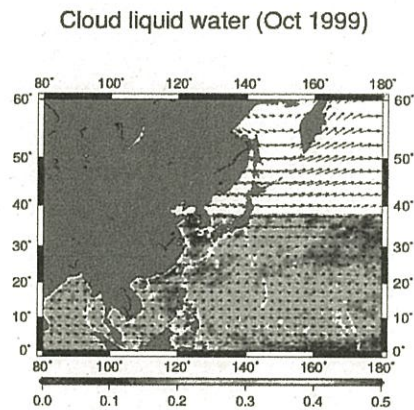


図-8：1999年・2000年10月における雲水量(単位: mm)

(2) 夏季(7月)の水蒸気(可降水量)・風速場

夏季のモンスーンの発達と太平洋高気圧発達とのバランスに関連して、熱帯降雨観測衛星(TRMM)による可降水量(水蒸気の鉛直積分値)の分布を図-7に示す。2000年7月は他の年と異なり、フィリピン海・インドシナ半島・ベンガル湾にかけて発達する湿潤域が弱く、東シナ海北部は太平洋高気圧の強い影響下にあり、比較的乾燥していたと考えられる。

(3) 秋季(10月)における雲水量の分布

TRMMで観測された1999年10月・2000年10月における月平均雲水量分布を図-8に示す。1999年10月は東シナ海上の月平均雲水量は0.15mm以下であるのに対し、2000年10月においては0.3mm程度であり、同時期の赤道近海域と同程度の雲水が存在していた。水蒸気量は地上気温にも大きく依存するため、同時期の可降水量を比較しても明瞭な差は見受けられないが、雲水量では顕著な差異が見られたことは、放射・降水過程を今後詳細に解析していく上で重要な結果であると考えられる。

(4) 下向き短波放射フラックス

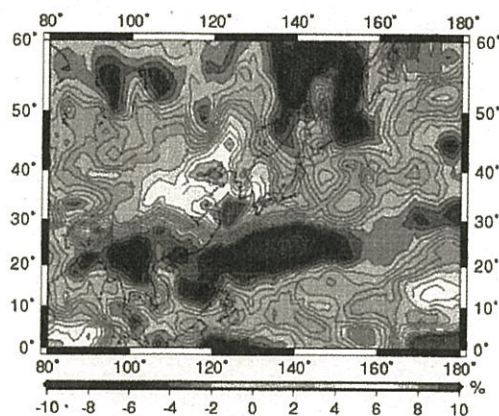
NCEP 客観解析データには、風速・気温・湿度などの基本的な気象要素以外に、地表面ならびに大気上端における長波・短波放射フラックス、地表面における顕熱・潜熱フラックスが収められている。図-9は、地表面における下向き短波放射フラックスの偏差を、2000年2月～7月の6ヶ月平均したもの(図-9(a))と2000年10月11月の2ヶ月平均(図-9(b))である。熊本や佐賀の地上気象観測(図-3、図-4)でも示されているが、有明海を含め東シナ海北部(北緯30度以上)においては、平年を5%以上上回る領域が広がっている。一方、2000年10月～11月にかけては、東シナ海北部域に-5%以下の負の強い偏差域が広がっているのがわかる。

近年見られる、春季から夏季にかけての有明海・東シナ海海域での下向き短波放射量の増大について、図-10にその経年変動を示す。図-10は、北緯32.5度、東経120～130度に位置する格子点データの短波放射フラックスの空間平均をとり、その月ごとの偏差を3ヶ月平均したものの経年変化である。1975年以降、10～12月の短波放射フラックスが平年より5%以上増大していたが、1990年代に入り、10～12月の短波放射フラックスは徐々に減少し、代わって1～6月の短波放射フラックスが上昇傾向にある。

本節で述べてきたとおり、地上気象観測データより得られた日射・降水などの変動は、アジアモンスーンの発達や赤道域の乾燥・湿潤過程など、さまざまな時空間ス

ケールの現象に伴って生じる。今回の解析では、偏差域の存在を示すところが主となったが、それぞれの発達メカニズムについては今後更なる研究を要する。

(a) Downward Shortwave Radiation (surface) Feb.-Jul., 2000



(b) Downward Shortwave Radiation (surface) Oct.-Nov., 2000

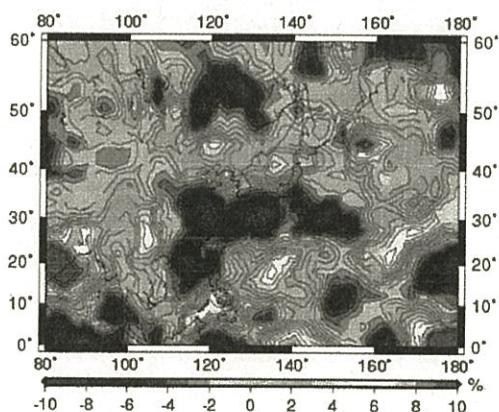


図-9：NCEP 客観解析データによる地表面における下向き短波放射の偏差 (a) 2000 年 2-7 月の偏差の 6 ヶ月平均値、(b) 2000 年 10・11 月の偏差の 2 ヶ月平均値

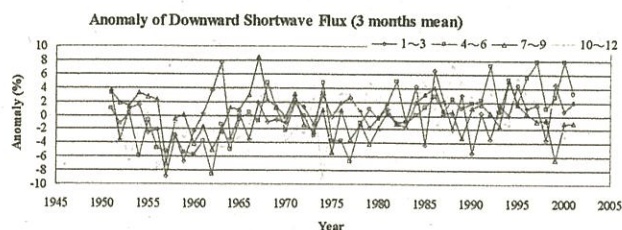


図-10：下向き短波放射フラックスの偏差の経年変動

5. 結語

本研究では、地上観測データとグローバルな解析データ双方を用いて、有明海と周辺域（特に有明海と接する東シナ海）との気候変動について解析を行った。赤潮の

大量発生やノリの色落ち被害など、環境悪化に伴う諸問題が顕在化した 2000 年について、(1)夏季モンスーンの発達が近年の他の年と比べて弱く、太平洋高気圧の発達に伴い、7 月において高日射状態が続いたこと、(2)赤道付近の降水振動が東シナ海の降水パターンに少なからず影響を与えており、2000 年秋季の大量降水もその一つである可能性であるという特徴があげられる。そして、2000 年秋季の降水と 12 月に入り日射量が増大したことで高温状態が続いたことが、ノリの色落ち被害へと至る一つの気象的（気候的）要因として結論付けられる。

数十年規模の長期的な変動について、30 年移動偏差に見られるように、近年降水量の年々変動が大きくなっている。このことは、河川からの水・土砂・栄養塩など物質流入量の不安定化、上空の雲・放射過程と相まって海域における物質循環・生態系への影響へとつながる可能性がある。そのため、海域環境の回復・保全にあたっては、越年スケールの変動もある程度視野に入れて取り組む必要があるといえよう。

謝 辞

本研究で使用した、熱帯降雨観測衛星データ (VIRSSST, Ver 1.0 及び TMISST, Ver. 2.0) は、宇宙開発事業団地球観測利用研究センターにおいて作成されており、同センターより提供を受けました。また、地上気象観測データは財団法人気象業務支援センターより提供を受けました。

参 考 文 献

- 鯉淵幸生, 小倉久子, 安藤晴夫, 五味美智男, 佐々木淳, 磯部雅彦 (2000): 東京湾湾奥部における栄養塩の周年変動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.1066-1070.
- 柴田彰, 今岡啓治, 可知美佐子, 村上浩 (1999): マイクロ放射計 TMI を用いた研究の展望, 日本リモートセンシング学会誌, 18 巻, pp.52-61.
- 滝川清, 田淵幹修 (2002): 有明海の潮汐変動特性と沿岸構造物の影響, 海岸高学論文集, 第 49 巻, pp.1061-1065.
- 滝川清, 田中健路, 吉村祥子, 外村隆臣, 古市正彦 (2002): 有明海中部海域における環境変動の要因分析, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.1066-1070.
- 灘岡和夫, 花田岳 (2002): 有明海における潮汐振幅減少要因の解明と諫早堤防締め切りの影響, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.401-405.
- Curtis, S., R. Alder, G. Huffman, E. Kelkin, and D. Bolvin (2001): Evolution of tropical and extratropical precipitation anomalies during the 1997-1999 ENSO cycle, Intl. J. Climatol., vol. 21, pp.961-971.
- Shea, D. J., S. J. Worley, I. R. Stern and T. J. Hoar (1994): An Introduction to Atmospheric Oceanographic Data, NCAR Technical Note, NCAR-TN-404+1A, Climate and Global Dynamics Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 134p.

有明海の潮汐変動特性と沿岸構造物の影響

滝 川 清*・田 淵 幹 修**

有明海では、ノリの色落ちや貝類の激減など環境の異変が現れているが、その詳細な原因については不明のままである。本研究では、新しく開発した浅水流動解析法（平面 2 次元）を用い、詳細な地形データに基づく数値シミュレーションを中心に、沿岸堤防や港湾、ノリ網設置などの潮汐変動・物質拡散におよぼす影響などの物理環境特性の変化を調べた。その結果、たとえば諫早干拓潮止め堤は、諫早湾口外の潮流や循環に影響を及ぼすなど、人為的な改変の影響をある程度明かにできた。

1. はじめに

かつて、ノリ養殖や豊かな魚介類の宝庫として、また、特有の貴重な生物種が生息するなど豊饒の海であった有明・八代海域の環境に異変が現れ、2000 年夏には大量の赤潮が発生、2001 年 1 月にはノリの色落ちにより莫大な被害が生じている。この急激な環境悪化の要因には、干潟域の減少、沿岸域の開発、流域の都市化や農業使用に伴う汚水物質の流入、洪水に伴う土砂・汚濁物質の大量流入、高温海水の浸入や潮流の変化など様々な原因が考えられるが、詳細な因果関係は不明のままである。

本研究は、これまで観測データも乏しくその環境特性がよく分かっていない有明海について、詳細な地形データに基づく数値シミュレーションを中心に、沿岸堤防や港湾、また、ノリ網設置などによる潮汐変動・物質拡散への影響などの物理環境特性を調べ、環境変動の要因分析と改善方策の資料を提供しようとするものである。

2. 数値解析法の概要と計算条件

2.1 離散化方程式の概要

本研究で用いる解析法は、微分可能性を前提とした基礎方程式の差分化は行わず、流れ場に固定された格子網の各々のコントロールボリュームに対して、質量（または体積）と運動量保存則の概念を直接適用して離散化方程式を構成した、平面 2 次元解析である。これは、巨視的な物理法則が成立する積分形の基礎方程式に根拠を置くことになり、跳水などのようにエネルギーの激しい逸散を伴う場合、あるいは水面が不連続な場合なども計算でき、水底勾配も考慮される。

座標系は直交座標で、直交格子を採用する。離散化は、時間的にも空間的にも中央差分として、水理量の平均操作や風上差分は用いない。これにより、離散化方程式本来の物理的意味を確保するとともに、精度の向上を図ることができる。また、空間的な離散化では、コントロー

ルボリュームの中心値と境界上の 8 つの点、併せて 9 つの点の値を用いる。これは要素境界上の水理量の分布を考慮したことになり、計算の精度を上げ、計算の発散をおさえる効果があり、コントロールボリュームの一部分が干出している場合の取り扱いも容易である。

また、汎用性を考え、流体の密度（または単位質量）と大気圧を変量として扱っている。

尚、本解析法における差分スキームは空間的にも時間的にも中央差分となっているが、完全な陽形式である。初期条件は 2 ステップ分の値を与え、開境界条件も境界および境界から 1 要素中に入った格子の 2 重に与える。安定条件は C.F.L 条件である。

水理量は水深方向の平均値を扱う。水平な基準面に x 軸および y 軸の直交座標系をとり、計算領域を、 x 軸および y 軸の格子間隔をそれぞれ Δx , Δy とする直交格子で分割する。この格子上の全ての点で、全ての水理量を Δt 時間毎に定義する。また、地盤高もすべての格子点で与える。これを h とし、基準面から下方にとる。なお、ここで取り扱う主な水理量としては、 η : 水位（基準面から上方にとる）、 D : 水深 ($=\eta+h$)、 U , V : それぞれ x 軸および y 軸方向の線流量、 u , v : それぞれ x 軸および y 軸方向の水深方向に平均した流速 ($u=U/D$, $v=V/D$) である。

2.2 質量（体積）保存則

直交格子で作られるコントロールボリュームに質量（体積）保存則を適用すると、 (x, y) 点の時刻 $t+\Delta t$ における水位 $\eta_{x,y}^{t+\Delta t}$ を求める次式が得られる。

$$(\rho\eta)_{x,y}^{t+\Delta t} = (\rho\eta)_{x,y}^{t-\Delta t} + \sum_{k=1}^3 \gamma_k F_{x,k}^t \frac{\Delta t}{\Delta x} + \sum_{k=1}^3 \gamma_k F_{y,k}^t \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$F_{x,k}^t = \{(\rho U)_{x-\Delta x} - (\rho U)_{x+\Delta x}\}_{y+(k-2)\Delta y}^t$$
$$F_{y,k}^t = \{(\rho V)_{y-\Delta y} - (\rho V)_{y+\Delta y}\}_{x+(k-2)\Delta x}^t$$
$$\gamma_k = \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}\right)$$

ここに、 ρ : 流体の密度である。

右辺 { } の最も外側（右側）の上下にある添え字は { }

* 正会員 工博 熊本大学教授 沿岸環境科学教育研究センター
** 正会員 熊本大学講師 工学部環境システム工学科

内の水理量に適用されるものとし、この表記方法は以後も用いる。

2.3 運動量保存則

前項で述べたコントロールボリュームに運動量保存則を適用することによって、時刻 $t + \Delta t$ における線流量 U , V を求める式が得られる。平面二次元の場合の運動量保存則は、せん断力や波浪によるラディエーション応力、コリオリ力等を除いた基本的な部分を概念的に表現すると次のように表わされる。

コントロールボリューム内の運動量の時間変化
= 圧力による力積 + 流体の運動によって持ち込まれる運動量 (2)

流体の単位重量を $\omega (= \rho g, g: \text{重力の加速度})$ として静水圧分布を仮定すると右辺第1項の圧力による力積は次のようになる。

$$\text{圧力による力積の } x \text{ 軸方向成分} = \sum_{k=1}^3 \gamma_k G_{x,k}^i \Delta y \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} G_{x,k}^i = & \frac{1}{2} [D_x \{ (\omega D)_{x-\Delta x} - (\omega D)_{x+\Delta x} \\ & - 2(\Delta p_{x-\Delta x} - \Delta p_{x+\Delta x}) \} \\ & + (D_{x-\Delta x} - D_x) \{ (\omega D)_{x-\Delta x} - 2\Delta p_{x-\Delta x} \} \\ & + (D_x - D_{x+\Delta x}) \{ (\omega D)_{x+\Delta x} - 2\Delta p_{x+\Delta x} \} \\ & + (h_x - h_{x-\Delta x}) \{ (\omega D)_x + (\omega D)_{x-\Delta x} \\ & - (\Delta p_{x-\Delta x} + \Delta p_x) \} \\ & + (h_{x+\Delta x}) \{ (\omega D)_{x+\Delta x} + (x D)_x \\ & - (\Delta p_{x+\Delta x} + \Delta p_x) \}]_{y+(k-2)\Delta y}^i \end{aligned}$$

$$\text{圧力による力積の } y \text{ 軸方向成分} = \sum_{k=1}^3 \gamma_k G_{y,k}^i \Delta x \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $G_{y,k}^i$ の内容は上述の $G_{x,k}^i$ の記述式中、 x を y に書き換えたものである。

右辺第2項の流体の運動によって持ち込まれる運動量は次のようになる。

$$\text{持ち込まれる運動量の } x \text{ 軸方向成分} \\ = \frac{1}{g} \sum_{k=1}^3 \gamma_k \{ M_{x,k}^i + N_{y,k}^i \} \Delta y \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} M_{x,k}^i = & [\omega_{x-\Delta x} (u_{x-\Delta x} - u_{x+\Delta x}) U_{x+\Delta x} \\ & + \omega_{x-\Delta x} u_{x-\Delta x} (U_{x-\Delta x} - U_{x+\Delta x}) \\ & + (\omega_{x-\Delta x} - \omega_{x+\Delta x}) u_{x+\Delta x} U_{x+\Delta x}]_{y+(k-2)\Delta y}^i \\ N_{y,k}^i = & [\omega_{y-\Delta y} (u_{y-\Delta y} - u_{y+\Delta y}) V_{y+\Delta y} \\ & + \omega_{y-\Delta y} u_{y-\Delta y} (V_{y-\Delta y} - V_{y+\Delta y}) \\ & + (\omega_{y-\Delta y} - \omega_{y+\Delta y}) u_{y+\Delta y} V_{y+\Delta y}]_{x+(k-2)\Delta x}^i \end{aligned}$$

$$\text{持ち込まれる運動量の } y \text{ 軸方向成分} \\ = \frac{1}{g} \sum_{k=1}^3 \gamma_k \{ M_{y,k}^i + N_{x,k}^i \} \Delta x \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $M_{y,k}^i$ は $M_{x,k}^i$ 式中の x を y に、 u と U をそれぞれ

v と V に書き換えたものである。また $N_{x,k}^i$ は $N_{y,k}^i$ 式中の y を x に、 u と V をそれぞれ v と U に書き換えたものである。

以上の式は桁落ちに配慮した表現となっている。これらを式(2)に代入してまとめると、 $U^{t+\Delta t}$, $V^{t+\Delta t}$ を求める次式が得られる。

$$(\omega U)_{x,y}^{t+\Delta t} = (\omega U)_{x,y}^{t-\Delta t} + \sum_{k=1}^3 \gamma_k \{ g G_{x,k}^i + (M_{x,k}^i + N_{y,k}^i) \} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$(\omega V)_{x,y}^{t+\Delta t} = (\omega V)_{x,y}^{t-\Delta t} + \sum_{k=1}^3 \gamma_k \{ g G_{y,k}^i + (M_{y,k}^i + N_{x,k}^i) \} \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad \dots\dots\dots (8)$$

2.4 その他の外力項

運動量保存の概念式(2)では流れの基本的な部分のみを考慮したが、計算の対象とする現象によっては必要に応じて次のような項を追加する。

(a) 水底摩擦

水底摩擦の表現は乱流理論による方法もあるが、本計算では、マンシングの抵抗則を用いる。

(b) 水平方向の乱れエネルギーによるレイノルズ応力

浅海部では、SDS and 2 HD モデル(灘岡ら, 1993)を、深海部では拡散型モデルを用いる。

(c) 水面に働く風のせん断応力

水面に働く風の接線応力は、風速の2乗に比例するとし、水面の抵抗係数と風速の関係式は本多・光易(1980)を用いる。

(d) その他、波浪による運動量輸送、コリオリ力など。

2.5 解析法の信頼性

本解析法は、9918 台風による八代海(不知火海)の高潮に適用して、高潮偏差の実測値と計算値がよく一致することを確かめている(滝川・田淵, 2000)。また、本計算法は形状損失を自動的に計算するが、その計算の妥当性や、河岸の形状や河床勾配の複雑な実河川(白川: 熊本県)の出水に適用して実測水位をよく説明できることを確認している。本論文では、紙数の関係で検証については省略するが、次項以下の計算の一部で実測値との比較を行っている。

3. 有明海の湾振動と潮汐特性

有明海の湾振動特性を調べるために、外海から様々な周期の海面振動(長周期波浪)を入射して、各地点の水面振動の応答を計算した。非線形性を除くなど、現象を単純化するために、入射波の振幅は小さい値(0.1 m)としている。また、計算格子の間隔は600 m から200 m のメッシュとした。図-1 は計算結果の出力点を示し、図-2 は外海からの入射波の周期による各点での水面振動の応答関数で、諫早湾締め切りの有無による比較をし

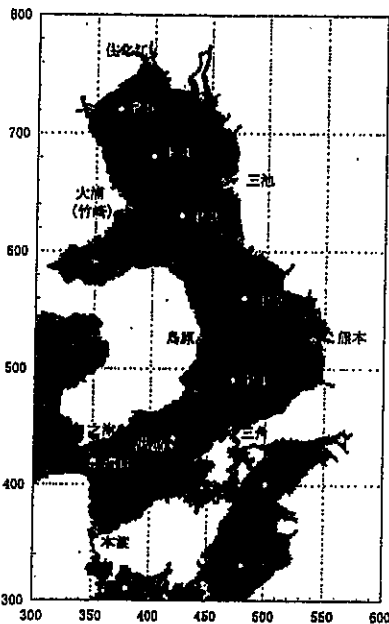


図-1 有明海の計算結果の出力点

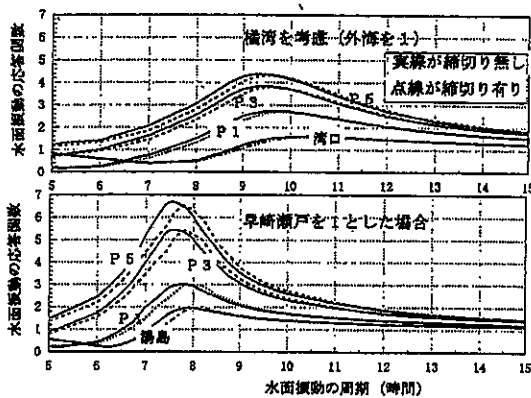


図-2 湾水振動への諫早湾締め切りの影響

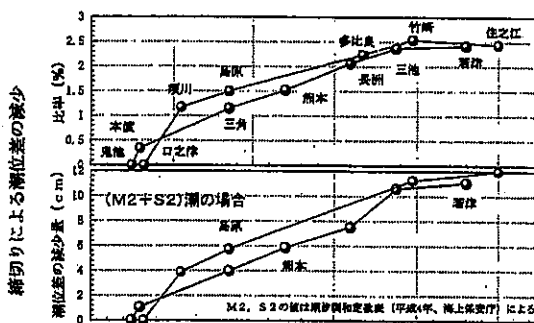


図-3 諫早湾締め切りの潮位差への影響

たものである。図より、有明海海面振動応答のピークは早崎瀬戸(有明海湾口)を基準にすると約7.5時間の周期で生じるが、外海からの波浪に対しては約9.5時間の周期で最も増幅される。これは、長崎半島(野母半島)およびその延長上の海底山脈と、島原半島・天草下島の

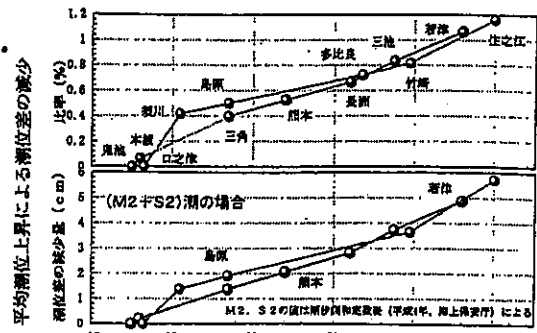


図-4 平均潮位上昇(20 cm)の潮位差への影響

間に有る橋湾の湾振動特性の関係で、早崎瀬戸(有明海湾口)の振幅が変化するために生じる現象である。

諫早干拓の潮受け堤防を設置すると、この共振周期は約20分程度短くなることが計算される。

また、潮汐の周期を12時間とすると、諫早湾の堤防締め切りによる潮位差の減少割合は、図-3に示すように湾奥にゆくほど大きく、湾の最奥の住之江では約2.5% (M_2 潮+ S_2 潮換算での潮位差は約12 cm)の減少である。

図-4に示すように、平均水位の上昇が20 cmあるとして計算すると、潮位差の減少は、住之江で約1.2%(同じく潮位差で約6 cm)である。近年20年間の観測結果(農林水産省, 2001)によると、湾奥に近い大浦では、潮位差の減少は大潮時の干満差で約21 cmである。これは潮位差の約3%にあたり、数値シミュレーションの結果ともほぼ一致する。

4. 潮流特性と諫早湾締め切りの影響

諫早干拓潮受け堤や熊本港など、最近の人為的改変の無い場合の有明海の潮流を計算した。図示するのは1級河川から豊水流量相当の流出を与えた大潮に相当する潮汐の計算例で、図-5、図-6は、それぞれ、上げ潮最盛期、下げ潮最盛期の線流量である。図-7は、物質輸送に大きく関係する1潮汐間での残差流量(線流量で表した恒流)である。

有明海の恒流(線流量)、すなわち、1潮汐間の海水流動は湾口部から島原沿岸沿いで大きく、この海域では多くの渦(循環)が現れている。熊本県沿岸沿いの有明海東岸から湾奥部および諫早湾にかけての流動は少ない。

図-8は、諫早干拓潮受け堤があり、調整池の水位が-1.0 m (TP.)で管理されている場合である。上げ潮、下げ潮とも諫早湾内部への入り込みが少なくなると、湾口付近での南北の流れが強まり、湾口南部・島原半島北部の沿岸域での循環流が弱まっている。

諫早湾内では、潮受け堤建設前はほぼ全域で上げ潮時に最大流速が生じていたのが、潮受け堤建設後は逆になっている。物質輸送・底質の巻き上げ沈降などの特

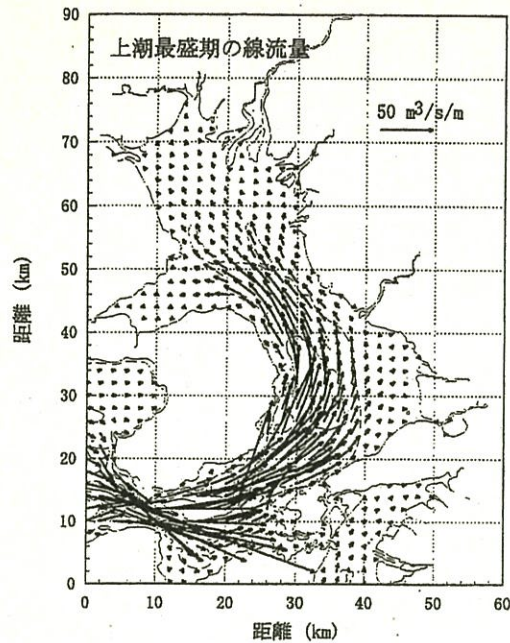


図-5 上潮最盛時の線流量

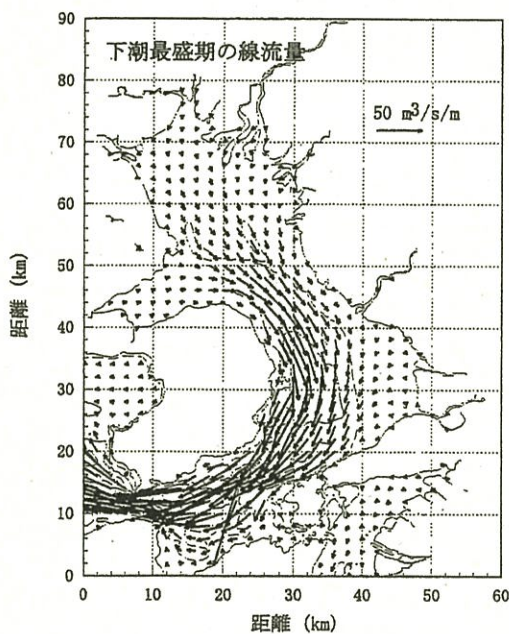


図-6 下潮最盛時の線流量

性が変化している可能性がある。

5. 熊本港建設の影響

熊本港建設による港近傍の流況変化を図-9に示す。計算のメッシュ間隔は、地形と防波堤等の再現のため熊本港周辺では20 mと細かくした。図は下げ潮最盛期、上げ潮最盛期における、熊本港建設前後での流速の変化量を示したもので、港の周辺では20~30 cmの流速変化がある。また、潮位差への影響は、港の周辺で±2 cm程度である。

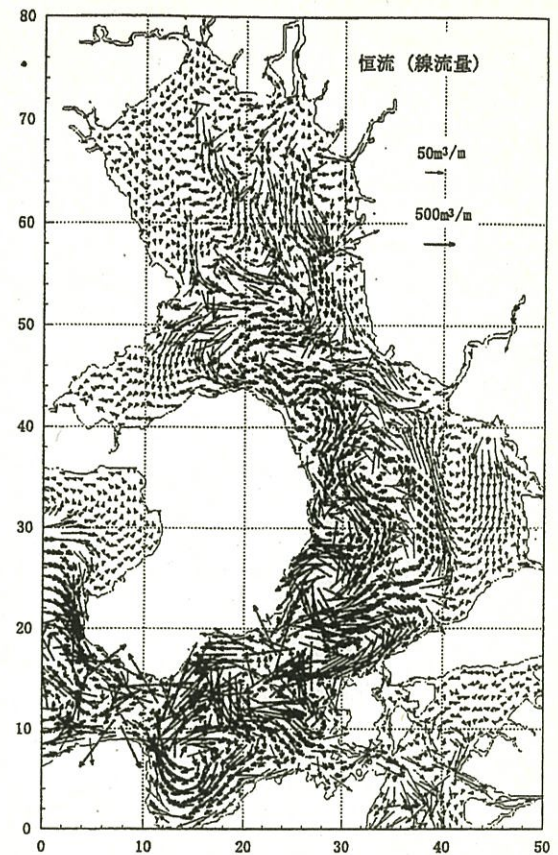


図-7 残差流量 (線流量の恒流)

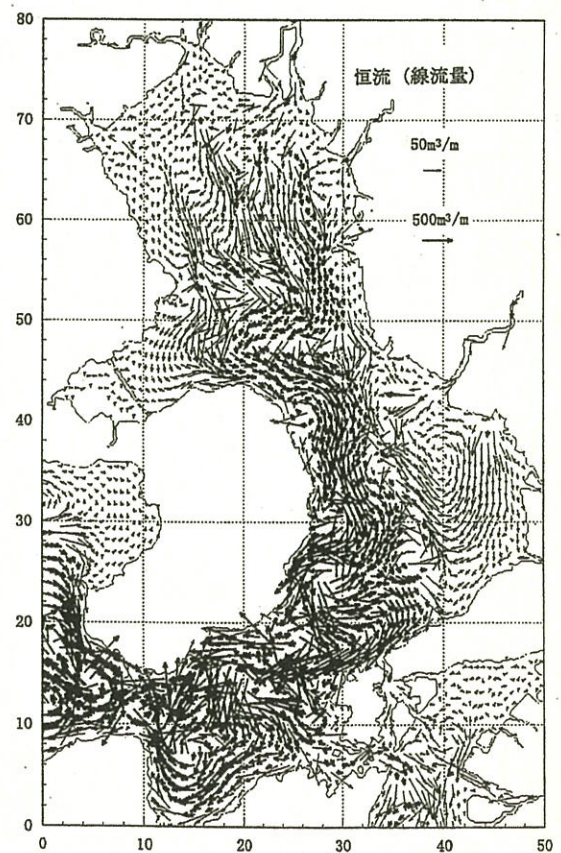


図-8 残差流量 (諫早湾締め切り後)

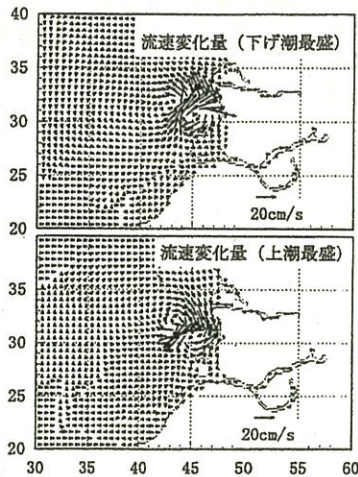


図-9 熊本新港設置前後の流速変化量

6. ノリ網の潮流におよぼす影響

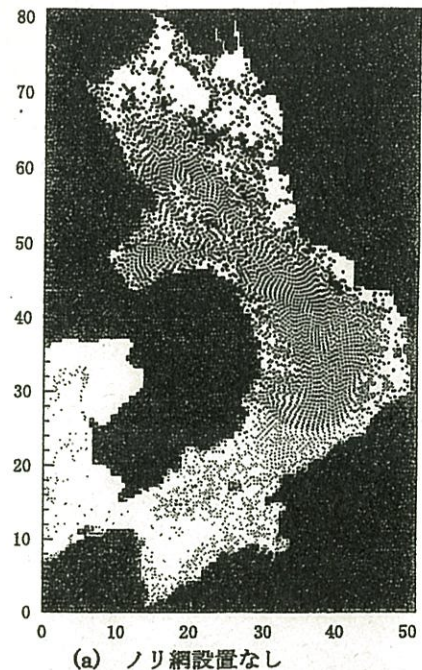
図-10 は、ノリ網の影響を透過性構造物の抵抗係数として評価し、ノリ網設置の有無による有明海流況の変化を粒子追跡により調べたもので、粒子追跡から3潮汐後の結果を図示したものである。ノリ網の影響も無視できず、特に湾中央から湾奥にかけての海水の流動が小さくなる傾向にある。

7. あとがき

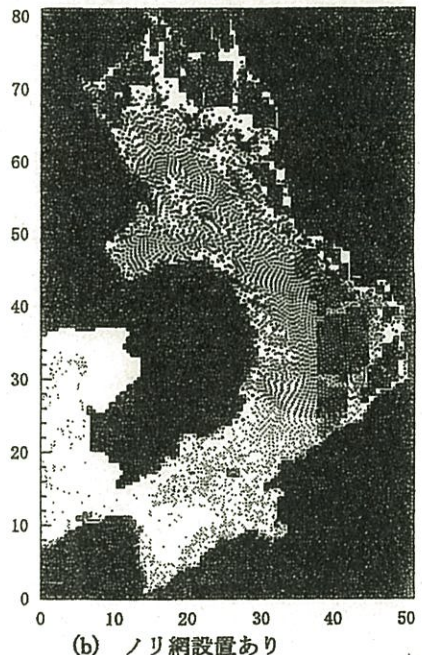
有明海域の大きな特徴として、広大な干潟と大潮位差で外海の影響も受けている潮汐がある。これは、潮流の数値解析を行う立場からは、干出・水没を繰り返す干潟を考慮しながら、また、瀬筋などの微地形を取りこみながらも外海を含む広範囲の海域の計算を行わねばならないという困難がつきまとう。

また、有明海域は干潟のみならず複雑な地形の大水深域も存在するため、この海域の流況把握には3次元解析が望まれる。しかし、計算精度やコンピュータの能力を考えたとき、3次元計算はこれから開発すべき重要な課題の1つであるといえる。ここでは、平面2次元の非線形浅水流や長周期波動を対象にした解析法を新たに開発し、この計算手法を用いて、有明海の湾振動特性、諫早湾の潮受け堤の影響、熊本新港建設の影響、ノリ網設置の影響などを調べた。いずれもなんらかの影響が見とめられる。

今回は触れられなかったが、流入河川流量の影響や潮汐振幅の違いなどについても調べており、これらの結果とその複合過程の環境変動に及ぼす要因分析が課題である。また、これらの物理環境の変動が自然・生態環境にどのような影響を与えるかについては、先に述べた3次元解析や生態系モデルなどを通じさらに定量的な研究へと進展させる必要がある。



(a) ノリ網設置なし



(b) ノリ網設置あり

図-10 ノリ網設置の有無による流況変化 (粒子追跡開始3潮汐後)

参考文献

- 滝川 清・田淵幹修 (2000): 台風 9918 号による不知火海の高潮と波浪特性, 海岸工学論文集, 47(1), pp. 291-295.
- 灘岡和夫・八木 宏 (1993): 浅い水域の乱流場に関する数値計算モデルの開発と沿岸流場への適用, 土木学会論文, No. 473, pp. 25-34.
- 農林水産省 (2001): 有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会, 第6回会議資料, 資料5, 「有明海海域環境調査」関係資料—有明海の30年間の推移の概況—
- 本多忠夫・光易 恒 (1980): 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 90-93.

有明海の中部海域における環境変動の要因分析

滝川 清* ・田中健路**・外村隆臣***
吉村祥子****・古市正彦*****

本研究では、近年顕著となってきた有明海の環境変化の要因分析を行なうにあたり、水質特性や底質特性、気象などの過去のデータから環境特性を把握するため分析と整理を行なった。その結果、底質の泥化による環形動物の増加や軟体動物の減少など底生生物の個体数の変化、降雨に伴う河川からの栄養塩流入と赤潮発生との相関、塩分・透明度など水質項目の季節変動が幾つかの海域グループに分類できることなどが明らかになった。また、水温・塩分濃度の水深方向分布調査から、干満差の大きい有明海でも夏季には密度成層が生じていることが明らかとなった。

1. はじめに

代表的な閉鎖性内湾である有明海は、生態系を含む物質循環の微妙なバランスによって形作られた独特の自然環境にある。全国の49%にも達する我が国最大の干潟と湾奥部域の大きな干満差による強い潮流の効果、及び汚濁物質を凝集・沈殿させる浮遊底泥の効果などもあって、これまでは赤潮発生などの顕著な環境問題が表面化することは少なかった。しかし1980年代より、生息生物の種および数が減り始め、赤潮の発生、漁獲量の減少や水質の悪化などの環境悪化が顕著になって来っており、特に平成12年7月には「大量の赤潮発生」、平成13年1月には「ノリの色落ち」により沿岸4県の漁業に莫大な被害が生じている。本研究ではこのような有明海域の環境悪化の原因解明にあたって、過去約25年間の有明海域の生物・水質・底質・気象特性などの現地観測データの経年変化記録から、有明海の環境変動特性を把握することを目的とし分析を行なった。

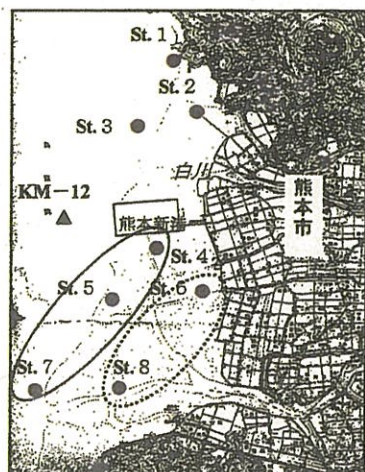


図-1 熊本港周辺干潟生物調査地点

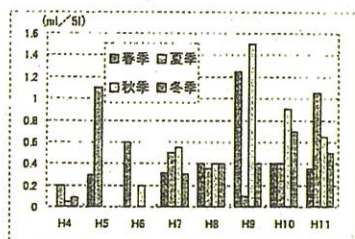


図-2 プランクトン沈殿量 (St. 6)

2. 熊本港周辺海域の環境変動特性

熊本港周辺海域干潟生物調査データ分析報告書(熊本県港湾課, 2001. 3)をもとに、この海域の海域環境特性を調べた。調査地点は図-1に示す8つの地点で、およそ昭和51年から平成11までの25年間の調査データである。調査項目は、水質(水温、塩分、pH、COD、DO、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、DIN、SS)、底質(粒度組成、強熱減量、硫化物、COD)、プランクトン(沈殿量)、ベントス(個体数、種類数)などである。

2.1 底質特性

底質特性は底生生物が棲む環境そのものの変化を示し、河川流入による底質・水質等の変動を表す指標になる。そのため、緑川河口付近については底質特性の分析から行った。図-1に示す緑川河口付近の5ヶ所の調査地点(St. 4~8)について、全項目のデータが揃っている平成4年以降の底質のデータを用いてクラスター分析を行った。その結果、図-1中に示すようにSt. 4, 5, 7とSt. 6, 8の2グループに大別できた。これは、St. 6, 8では硫化物が観測され、St. 4, 5, 7ではほとんど観測されていなかったこと、また、この2グループは河口付近と沖合いという河口からの距離に比例した分類となっている。硫化物は河川流入により供給された有機物に起因するもの、或いは発生プランクトンの沈殿(図-2参照)に

起因するものと考えられる。このことから、ある程度、河口からの距離に比例して底質の特性が異なることがわかる。底質特性は生物の種類や個体数を直接左右する。図-3は軟体動物・環形動物の経年変化で、St. 4~St. 8で観測された個体数を合計したものである。生物の個体数は全体的に減少する傾向にあり、特に軟体動物は近年大きく減少している。軟体動物と環形動物の生息環境については、環形動物であるゴカイは泥質に生息し、軟体動物であるアサリなどの二枚貝は砂質に生息し、互いに棲み分けする傾向がある(滝川ら, 1999; 滝川,

* 正会員 工博 熊本大学教授 沿岸域環境科学研究センター

** 正会員 理修 熊本大学助手 工学部環境システム工学科

*** 正会員 熊本大学技官 工学部環境システム工学科

**** 正会員 工修 国土交通省九州地方整備局長崎工事事務所

***** 正会員 博工 熊本県土木部 港湾課長

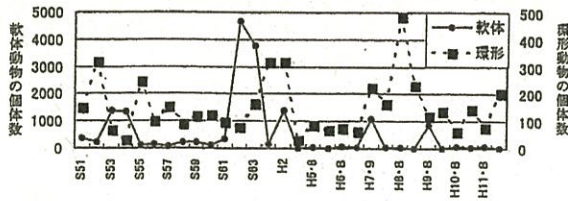


図-3 生物個体数の経年変化 (St. 4~8)

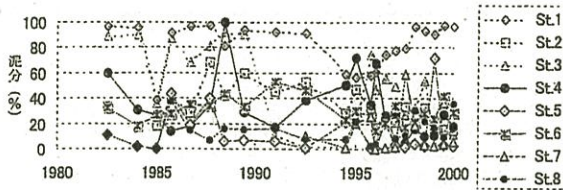


図-4 泥分の経年変化 (St. 1~8)

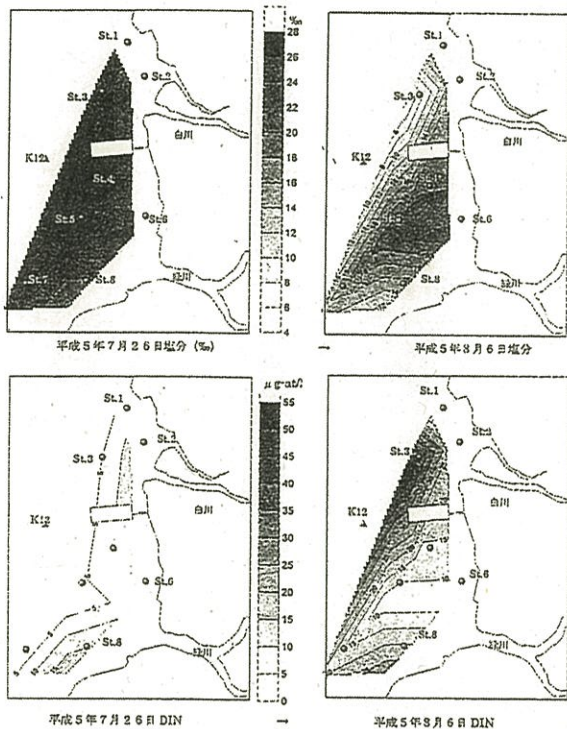


図-5 河川出水に伴う熊本港周辺の塩分とDIN (H5年度)

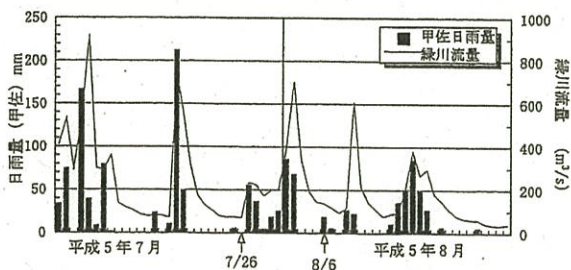


図-6 緑川流量と日雨量

2002). このことから、軟体動物が減少するという現象は、底質の泥化が進んでいることを示していると思われる。

図-4 に熊本港周辺の泥分の経年変化を示す。場所に

より異なるが、St. 1 を除くと St. 2, St. 3 の白川河口および St. 4 は泥分が減少し、緑川河口の St. 5~St. 8 では増加する傾向にある。図-3 の底生生物の経年変化とあわせて考えると、泥分の増加と軟体動物の減少とが対応していることがわかる。

2.2 水質特性

河口付近の栄養塩濃度は降水量・河川流入量に大きく左右される。図-5 は平成 5 年 7 月 26 日と 8 月 6 日に熊本港周辺海域において行われた水質調査の結果で塩分と DIN の平面分布図を示している。平成 5 年は例年より降雨が多かった年である。7 月 26 日から 8 月 6 日にかけて塩分量は全体的に減少し、DIN は増加する傾向にあることがわかる。これは図-6 に示すように、期間中の降雨により河川流量が増加し、河口域に通常以上の無機窒素が流入した影響によるものである。

3. 有明海中部海域の環境変動特性

昭和 51 年から平成 12 年の 25 年間におよぶ有明海の浅海定線調査データ (熊本、福岡、佐賀の 3 県) および気象庁データ (気象庁年報、アメダス観測年報) をもとに、有明海中部海域を中心に、水質および気象特性について調べた。浅海定線調査地点は、図-7 に示すように熊本県 22 点、佐賀県 11 点、福岡県 10 点である。

3.1 有明海中部海域の海域特性

1) クラスター分析による海域特性

熊本県の浅海定線調査データのうち、平成 1 年から 7 年の間のデータを用い、水面下 5 m 層における塩分と $\text{PO}_4\text{-P}$ 、および透明度につきクラスター分析を行った。その結果、図-8 に示すような海域グループに分類され、また水質項目ごと及び分類グループごとに、図-9 に示すような月平均の年間変動特性が明らかになった。表層の塩分濃度特性は湾口 (グループ A)、湾中央南部 (グループ B)、湾中央北部 (グループ C) に分類され、その月平均値の年間変動は 7 月の降雨期に低く、また湾奥部になるほど低濃度になる。 $\text{PO}_4\text{-P}$ の変動特性も、湾口部、湾中央南部、湾中央北部に分類され、その年間変動は冬季から夏季にかけて低濃度となり、夏季から秋季にかけて高濃度となる傾向にある。この $\text{PO}_4\text{-P}$ の低濃度の時期は、潮汐の年間変動のうち平均潮位が低くなって干潟干出面積の広がる時期とほぼ一致する (町田ら, 2001)。また、透明度については湾口 (グループ A)、湾中央 (グループ B)、浅海干潟部 (グループ C) 及びその他 (グループ D) に分類され、各グループごとに年間を通じてほぼ一定の透明度を示す。これは、透明度が主に水深と潮汐変動の大きさに影響されているためと思われる。

2) 赤潮発生と水質特性

図-10 は、有明海中部域 (熊本県) における近年の赤

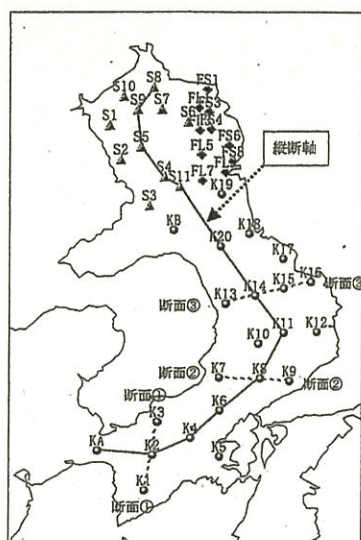
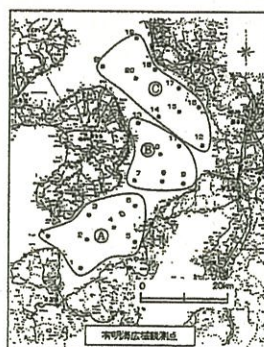
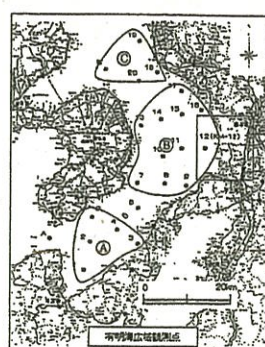


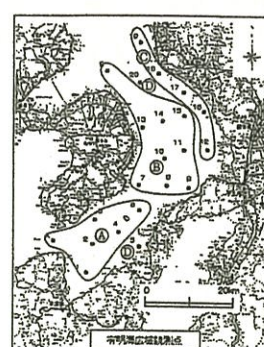
図-7 浅海定線調査地点と断面軸



(a) 塩分による分類



(b) PO4-Pによる分類



(c) 透明度による分類

図-8 水質項目による海域のクラスター分析

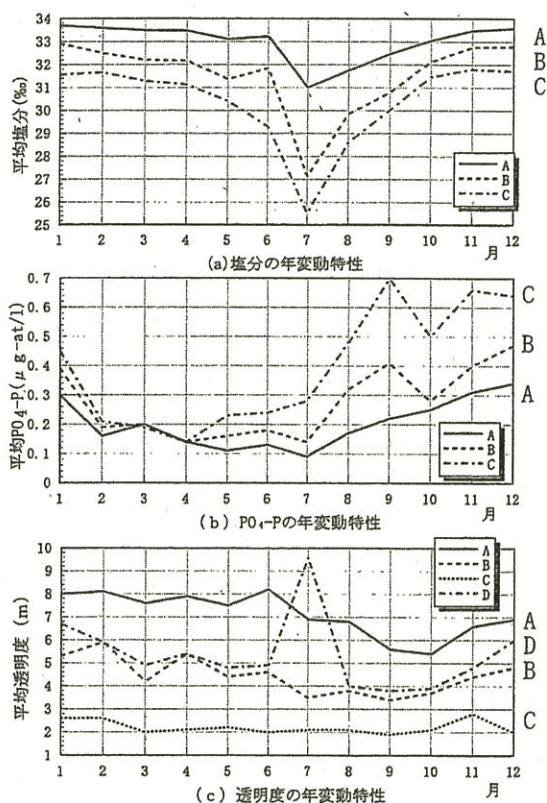


図-9 有明海中部海域の水質項目の年変動特性

潮発生件数（農林水産省，2000）である。平成7年以降に赤潮が多発傾向にあり，これは図-2に示したプランクトン沈殿量の変動傾向と一致する。平成7年の夏には，観測日の約一週間前に一日総降水量が200mmを越す日があったため，観測日直前に河川流入量が増加して土砂等が大量に流入し，図-11に示すように，湾中央部に及ぶ透明度の低下が観測された。陸域からの土砂流入とともに，栄養塩の流入によって大量のプランクトンが発生し，

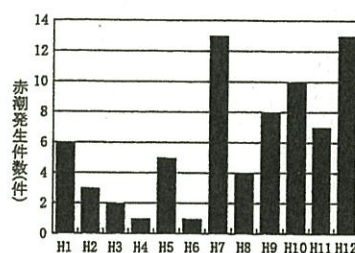


図-10 有明海（熊本県）の赤潮発生件数

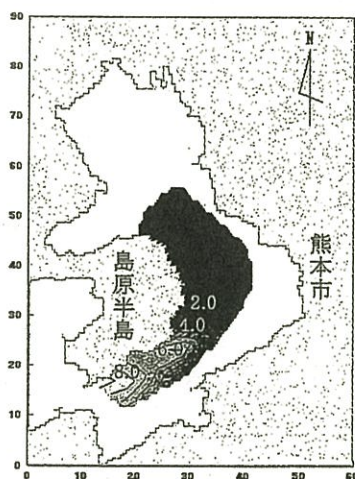


図-11 透明度（平成7年夏）

プランクトンそのものや死骸によって透明度が低下した可能性も考えられる。

有明海における平年の表層でのDIN濃度の平面分布は湾口より湾奥のほうが高く，また夏場より冬場のほうが高い濃度を示すが，平成7年は，前述した降雨に伴い海域に大量の無機窒素が流入したため，夏場のDIN濃度は平年より高く， $4\mu\text{g-at/l}$ 以上の地点もある。この時の無機態窒素を個別に平面分布に表すと，図-12のようである。亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)，硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)，アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)はいずれも $1\mu\text{g-at/l}$ 以下の部分が多く，非常に低い濃度を示している。特に，

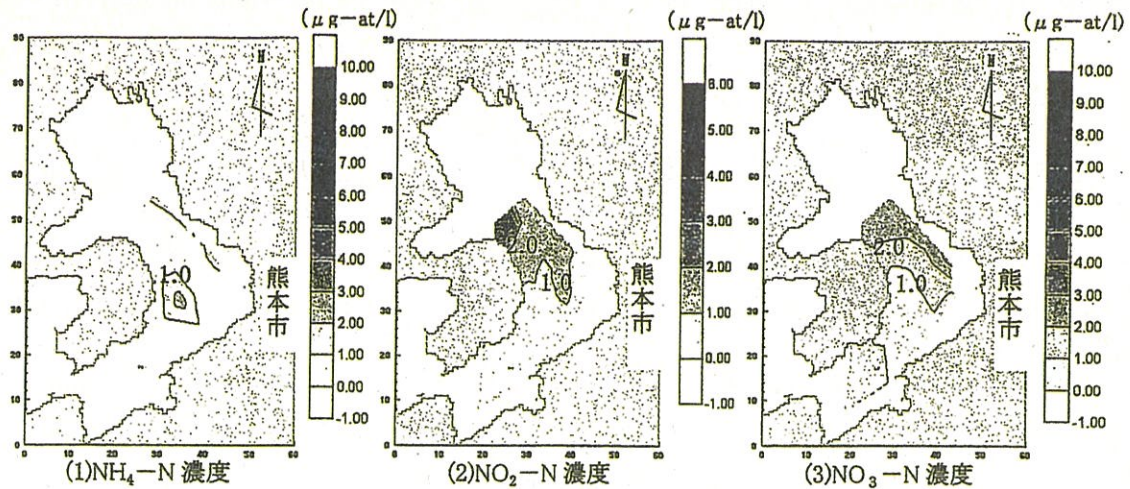


図-12 溶存態無機窒素の濃度分布 (平成7年夏)

夏場には溶存酸素が不足するため比較的高濃度になるアンモニア態窒素の濃度が、 $0 \sim 1 \mu\text{g-at/l}$ と著しく低い。一般に海域において、プランクトンは窒素をアンモニア態一亜硝酸態一硝酸態の順に体内に摂取・消費する。そのため $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が著しく低下するという傾向から、プランクトンが大量に発生し、アンモニア態窒素を大量に消費したことが予想される。

3.2 気象変動特性

図-13は昭和51年(1976年)から平成12年(2000年)の25年間にわたる熊本及び佐賀県の気象データをもとに作成した降水量、気温、日射量に関する変動特性である。(a)図の降水量は各1ヶ月間の積算降水量の経年変化、(b)図の気温偏差は過去25年間の各月平均値からの気温偏差、また、(c)図の全天日射量偏差は過去25年間の各月平均値からの偏差を各月平均値で割った値である。平成5年(1993年)は記録的な冷夏、多雨の年で、

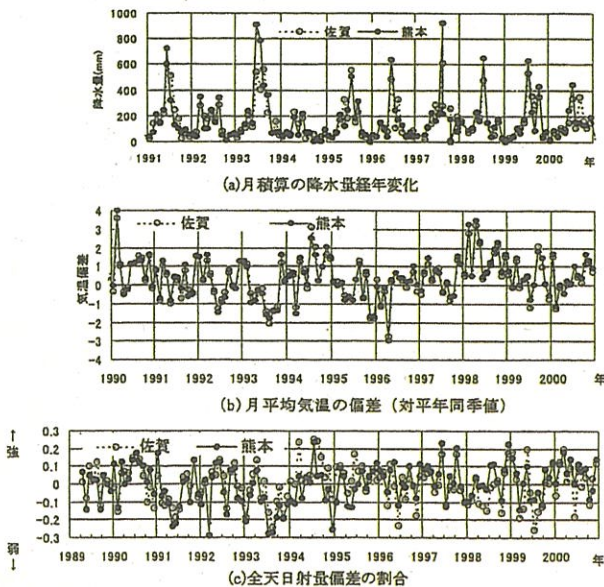


図-13 有明海の気象の経年変動

翌年の平成6年(1994年)は渇水、猛暑の年である。平成10年(1998年)は20世紀最大級のエルニーニョ発生年に当たる。有明海のノリ不作となった平成12年(2000年)末には、例年に比べて、降水量、気温偏差および日射量のいずれも大きいことが分かる。

3.3 水温・塩分の分布特性

浅海定線調査データのうち、水深方向の分布が計測されている水温と塩分について、図-7中に示した縦横断の断面における分布特性を調べた。図-14, 15, 16には、赤潮発生が急増した平成7年の夏と冬、ノリ色落ちが生じた平成12年の冬における水温と塩分濃度の分布を示した。なお図-14には水温と塩分濃度から密度の状態方程式を用いて算出される σ_t 分布も図示した。図-14に示す夏季には、水温は夏場に定点 K8(宇土半島〜島原半

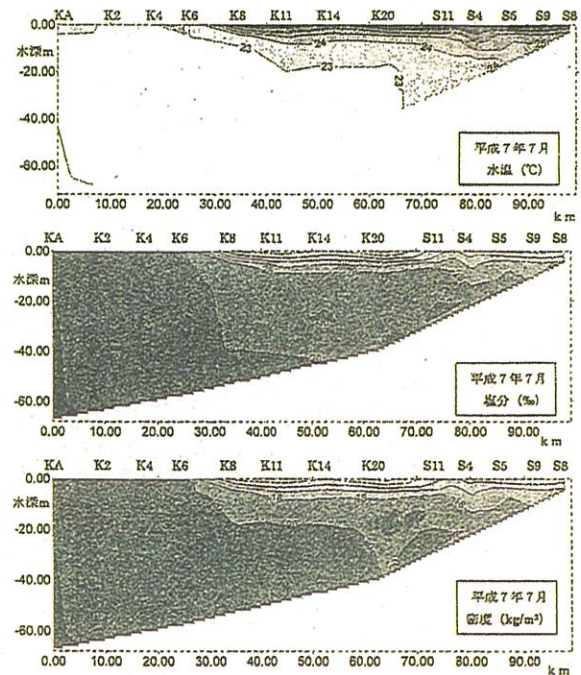


図-14 夏季の水温・塩分・密度の縦断分布 (H7年7月)

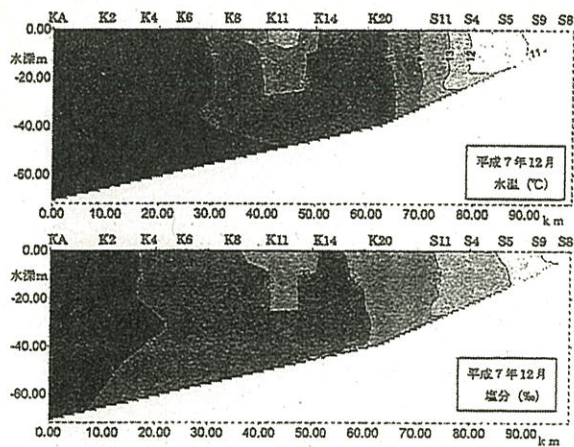


図-15 冬季の水温・塩分の縦断分布 (H7年12月)

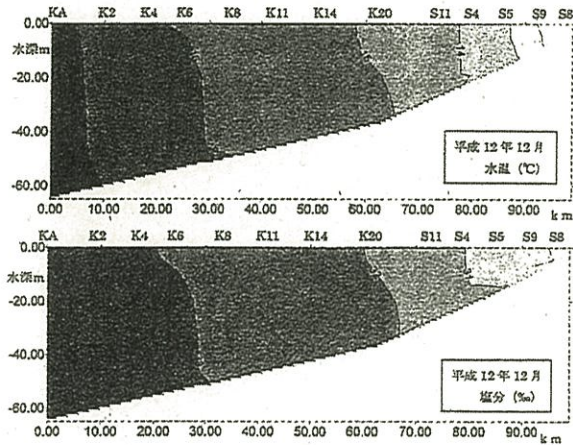


図-16 冬季の水温・塩分の縦断分布 (H12年12月)

島の海域中央部付近) の水深 0~10 m 付近を始まりとして、湾奥に向かいより成層化が顕著にみられ、表層と海底でその差は 5°C 以上にもなった。塩分濃度も夏場の成層化が顕著に現れ、海底と表層で 10‰ 以上の差があり、 σ_t 分布においても、表層から水深 5 m~10 m 付近まで湾奥部にかけて密度が小さくなっており、干満差の大きい有明海中部海域においても夏場には表層から水深 5 m 付近にかけて成層化が生じていることが明らかとなった。図-15, 16 の冬季における水温、塩分濃度分布には成層化はみられないが、ノリ不作の平成 12 年 12 月は平成 7 年 12 月に比べ、湾奥部で水温が高く、塩分濃度も低くなっていたことが分かる。

図-17 は、平成 7 年 7 月の湾軸に垂直な東西方向断面での水温・塩分濃度の鉛直分布を示す。各図の左側は島原、右側は熊本を示す。断面②において成層化が顕著となっており、断面③に至っては、表層での塩分濃度は 25‰ 以下となる。断面②, ③はそれぞれ菊池川及び緑川・白川の河口付近にあたり、この時期の河川流入によって、表層の塩分濃度が特に低下したと考えられる。

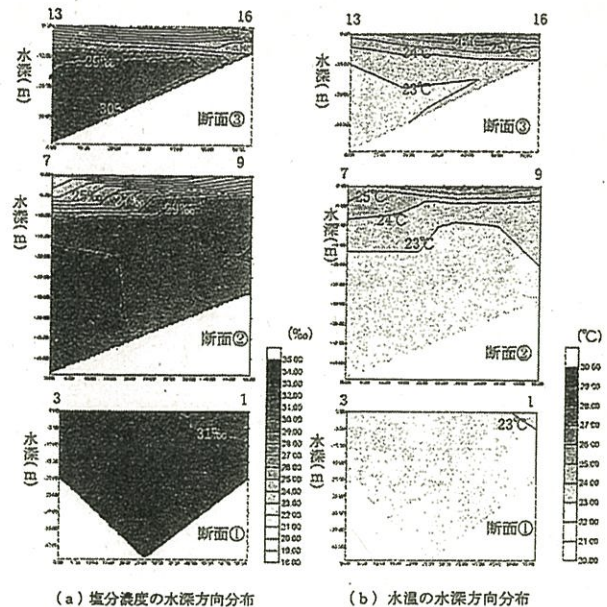


図-17 湾横断面の塩分・水温の水深方向分布 (H7年7月)

4. おわりに

有明海の過去 25 年間にわたる浅海定線調査データを中心に気象・海象データから、この海域の環境特性の主要と変動要因の把握を行うことができた。しかしながら、これまでに行われた浅海定線調査は、多くて月に 1 回程度であり、この海域の環境変化を今後も注意深く調べるには、多くの定点での定期的かつ連続的な観測と、底質、水質、海象にわたる、より多くの調査項目についての計測が必要である。最後に本研究を進めるに当たり、データの提供を図って戴いた農林水産省、熊本県、福岡県、佐賀県の関係各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 熊本県土木部港湾課 (2001): 熊本港周辺海域干潟生物調査データ分析報告書, 208 p.
- 熊本県水産研究センター (1975-2000): 浅海定線調査.
- 佐賀県有明海水産振興センター (1975-2000): 浅海定線調査.
- 滝川 清・鈴木敦巳・古川憲治・大本照憲 (1999): 有明海の白川・緑川河口域における干潟環境特性とその評価に関する研究, 海岸工学文集, 第 46 巻, pp. 1121-1125.
- 滝川 清 (2002): 有明・八代海沿岸域の自然環境評価と環境共生型社会基盤整備に関する研究, 平成 10 年度~13 年度日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤研究 (A) (2): 一般), 研究成果報告書, 453 p.
- 農林水産省 (2000): 有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会, 第 1 回会議資料, 資料 5-2.
- 福岡県水産海洋技術センター有明研究所 (1975-2000): 浅海定線調査.
- 町田史子・荒木宏之・古賀憲一・他 (2001): 有明海の海象および水質特性に関する基礎的研究 (I), 平成 12 年度土木学会西部支部研究発表会, pp. B-450-451.

原田 浩幸*・滝川 清**

** 正会員 工(博) 熊本大学教授 沿岸環境教育・研究センター

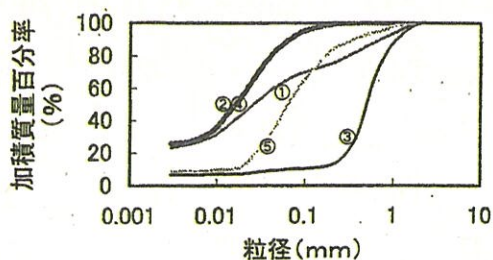


図-2 粒径加積曲線

するために硝酸濃度の減少を測定し、その変化量を脱窒速度とした。方法は採取したコアサンプルに海水と所定濃度を変えた硝酸カリウム溶液を加え放置する。それぞれ硝酸態窒素濃度の時間経過を測定しその直線的な部分を脱窒速度として算出した。

水質分析は、下水試験方法や上水試験方法では海水中の硫酸イオンの影響があったので海水対応のセントラル化学社製の DR-2000 分析装置によった。

b) 干潟コアサンプルの浸透海水の水質とかく乱による変化

通水のためのコアサンプルは直径 8 cm、高さ 10 cm の塩化ビニール管を 2 本連結して用い、底部にはガラスビーズを詰めた円錐状とし、このガラスビーズの上にコアサンプルを接続した。なおコアサンプルは図-1 の④と⑤から採取した。

そして通気によって酸化還元電位 Eh をほぼ 120 mV まで高めた海水を上端から供給した。酸化還元電位電極は表層から 3 cm の位置に挿入した。海水の供給は 2 潮汐を模して 6 時間サイクルで海水供給ポンプを ON-OFF 制御した。海水の供給速度は 0.7 l/d とした。海水は図-1 の⑤付近で満潮時に採取した。図-3 は実験装置を示す。

Eh がほぼ一定になったときにカラムを解体し、最上部から 5 cm までの表層部を V 型混合機 (筒井理化学器械マイクロ混合機) を用いて 120 rpm で 10 分かく乱する。その後、かく乱した底泥はカラムを連結して元に戻し、再度の海水の供給を再開した。

3. 結果と考察

3.1 干潟底泥脱窒速度の推定

図-4 は硝酸態窒素処理濃度と泥質、砂質干潟底泥の脱窒速度の関係を示す。図-1 中の①の脱窒速度は砂質干潟底泥と同じ程度で低いが、②と④泥質干潟底泥の脱窒速度は③、⑤砂質干潟底泥に比べて大きいことがわかる。

N. Raymond ら (1992) は地中海の沿岸を 70 km にわたって数カ所の脱窒速度の測定をおこなった。干潟の脱窒速度の測定には、まずアセチレンブロッカ法で測定す

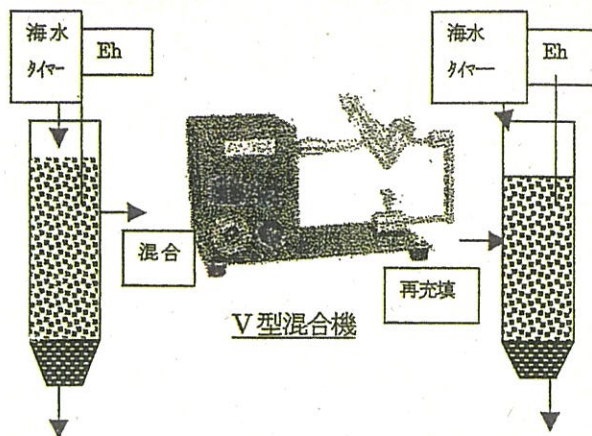


図-3 実験装置

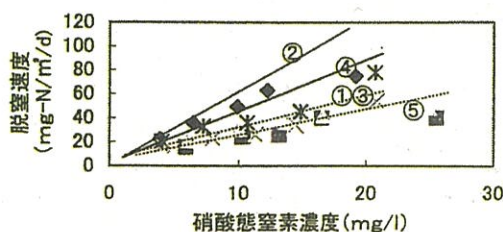


図-4 処理硝酸濃度と脱窒速度との関係

るのに際して添加する硝酸濃度を変えて Michaelis-Menten の式 (式 1) で相関式をつくる。そしてフィールドの間隙水の値を代入して推定する方法をとっている。

具体的には脱窒速度 V の逆数 $1/V$ を縦軸、平衡濃度 C の逆数 $1/C$ を横軸にとった Lineweaver-Burk プロット (式 2) から、その切片と傾きにより K_m : 飽和定数と V_{max} : 比最大脱窒速度を算出する。

$$V = V_{max} \cdot C / (K_m + C) \quad \text{..... (1)}$$

$$1/V = K_m / V_{max} \cdot 1/C + 1/V_{max} \quad \text{..... (2)}$$

図-4 の結果を式 2 に適用した結果を図-5、図-6 に示す。図中には直線回帰したときの相関係数を示し、表-1 に算出した K_m 、 V_{max} をまとめる。

図-1 の各調査地点で採取したサンプルの間隙水中の硝酸態窒素濃度を代入し、式 1 により脱窒速度を計算すると干潟での脱窒速度は① 12.70、② 14.02、③ 6.43、⑤ 7.59 mg-N/m²/d と推定された。これから泥質干潟である①、②六角川のほうが砂質干潟である③、⑤に比べ約 2 倍高い事がわかる。

3.2 干潟コアサンプルの浸透海水の水質変化と物理かく乱の影響

a) 酸化還元電位 Eh の変化

図-7 に Eh の変化を示した。かく乱前、砂質・泥質カラムとも実験当初の Eh は約 300 mV で日数の経過とともに -200 mV 程度に減少しほぼ一定となる。砂質カラムではかく乱後 214 mV まで増加し、再びかく乱直前の

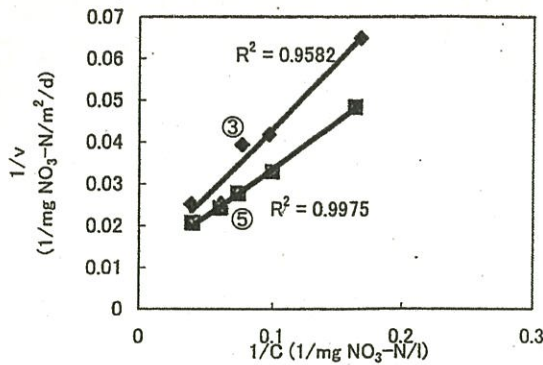


図-5 砂質干潟底泥 Lineweaver-Burk プロット

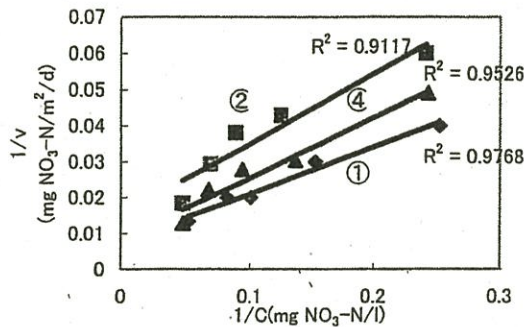


図-6 泥質干潟底泥 Lineweaver-Burk プロット

 表-1 各サンプルの係数 (K_m , V_{max}) の決定

	①	②	③	④
K_m (mg/l)	16.59	12.53	29.89	20.72
V_{max} (mg-N/m²/d)	126.58	64.52	92.59	91.74

値までに減少する。また、泥質カラムにおいてはかく乱後-454 mV まで減少しその後 156 mV まで増加した。かく乱前の E_h 減少は同じように水の入れ替えをして潮汐を模したニホンオサガニによる有機物浄化を検討したカラム実験(矢持ら, 1997)でも見られている。かく乱によって砂質底泥の E_h はすぐに増加したが、一方泥質底泥の E_h 増加はかく乱から 4 日後であった。この違いはかく乱した表層と下層で E_h の差が大きく、かく乱によって均一化されてもすぐには増加とまらないためと考えられる(原田ら, 1999)。

図-8 は浸透水中のアンモニア態窒素および硝酸態窒素のかく乱前後における変化を示している。

アンモニア態窒素について、砂質カラム浸透水は実験当初海水とほぼ同じ値を示していたが、かく乱前には 0.5 mg/l まで減少した。かく乱によって 1.0 mg/l ほど溶出したものの日数の経過に従い 0.1 mg/l まで減少した。泥質カラムにおいては、かく乱前は海水の 50% 程度となっているが、かく乱後一時的に溶出し、その後減少して 0.1 mg/l 以下と低い値で推移した。

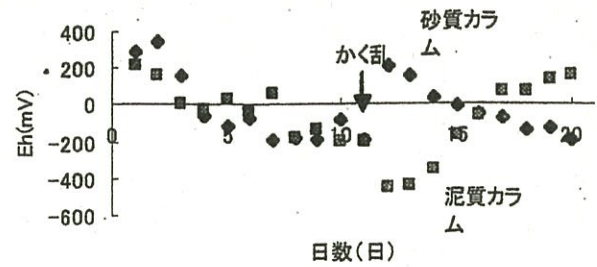
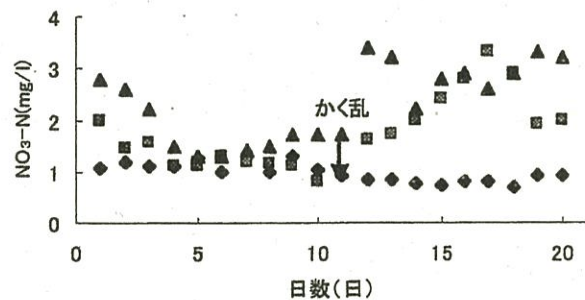
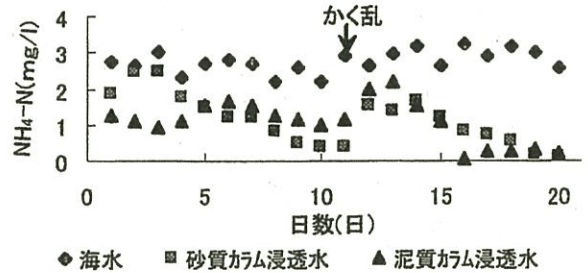
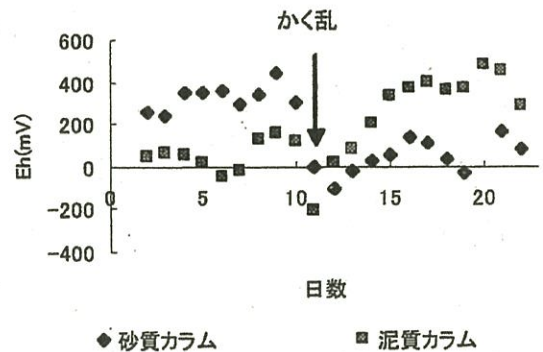

 図-7 E_h のかく乱前後における変化


図-8 窒素のかく乱前後における変化


 図-9 連続供給における E_h のかく乱前後における変化

硝酸態窒素について、砂質カラム浸透水は当初海水と同じ程度の値を示すが、かく乱によって流入海水の 2, 3 倍の値となる。泥質カラム浸透水は実験当初、流入海水の 3 倍程度の値となるが、次第に減少して約 1.5 mg/l で一定となる。かく乱後は平均で 3.0 mg/l 前後となる。

かく乱前に NH_4-N が海水より低い値を示し、対応して NO_3-N が増加しないことはすみやかに硝化と脱窒が

進行していることが考えられる。このときに海水を供給しないときの表層からの空気の流入の寄与が大きいと思われるので、比較として連続的に海水を供給した実験をおこなった。このときに水位は底泥表層からほぼ3 cmの位置でとなって常に冠水の状態となっている。図-9, 10には E_h とアンモニア態窒素の変化を示す。

図-7と異なり、連続供給下でのかく乱前 E_h は砂質カラムで200~400 mV, 砂質カラムで0~100 mVを示し、低下はみられなかった。物理的かく乱で、砂質カラムは200 mVまでしか増加しなかったが、泥質カラムでは400 mVまで増加した。アンモニア態窒素は海水より高い値を示したが、かく乱によってその値は1.0 mg/l以下と海水より低い値となった。 E_h が高いにもかかわらず、 $\text{NH}_4\text{-N}$ がかく乱前に濃度が海水よりも高くなったこと、それが濃度が減少したことは、海水のアンモニアの硝化の促進には表層からの空気の流入や物理的かく乱の影響が大きいことを示唆している。

図-11はリン酸態リンの変化を示す。砂質カラムではかく乱にかかわらず0.2 mg/l以下の値で推移した。また、泥質カラムでは実験当初の濃度が3.0 mg/l以上と高くなったが、時間の経過とともに減少して0.5 mg/l以下と海水の濃度より低くなった。図-12は連続供給における結果を示す。泥質カラム浸透水は断続供給に比べて海

水よりも高くなることはなく、かく乱によって0.5 mg/l前後に減少した。このことからリン酸態リン減少に対する断続供給の効果は少ないことがわかる。そして、 E_h が一となっても溶出がおこっていないことから溶出がおこる酸化還元電位状態までに低下せず、初期に間隙水中に生成した高濃度のリン酸態リンが洗いだされたもの(野村ら, 2002)と考えている。かく乱後、濃度が減少しているのは E_h が増加し吸着が促進されたためである。砂質カラムでは浸透水のリン濃度が特に低く、それは成分による化学的結合によるものと思われる。

表-2はかく乱後のCODを示す。砂質カラムでは7日目まで海水と同じ値であったが、かく乱後1~1.5 mg/l減少した。泥質カラムでは7日目は海水より3 mg/l高い値を示した。かく乱後、まだ海水よりも高い値ではあるが7日目より2 mg/l程度減少した。

4. ま と め

コアサンプルを用いて干潟での脱窒速度を推定するために硝酸の処理濃度を変えて対応する脱窒速度を求めた。このデータから Lineweaver-Burk プロットをおこなって比最大速度定数と飽和定数を算出した。間隙水中の硝酸濃度を Michaelis-Menten 式に適用すると泥質干潟の脱窒速度は砂質干潟底泥に比べて約2倍であることがあきらかとなった。

水質浄化能力の強化の評価は物理的かく乱によって、硝化・脱窒は砂質・泥質干潟素底泥カラムとも促進された。リン酸態リンは砂質カラムの浸透水は特に低い値を示した。泥質カラムの浸透水は当初、海水より高い値であったが、時間経過とともに減少して、かく乱によってさらにその約50%の値となった。CODは砂質カラム

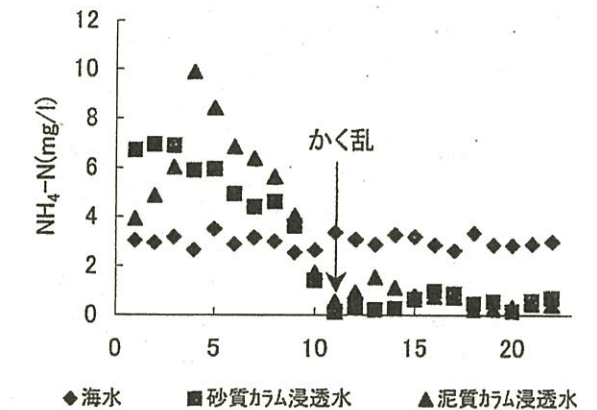
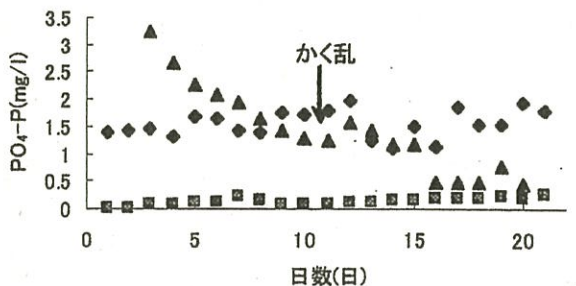
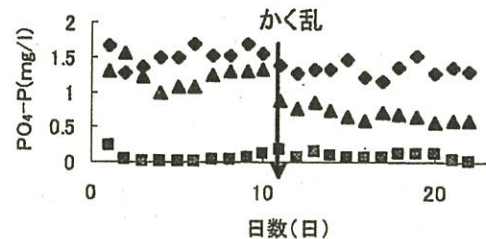


図-10 連続供給におけるかく乱前後のアンモニア態窒素の変化



◆ 海水 ■ 砂質カラム浸透水 ▲ 泥質カラム浸透水

図-11 かく乱前後におけるリン酸態リンの変化



◆ 海水 ■ 砂質カラム浸透水 ▲ 泥質カラム浸透水

図-12 連続供給におけるかく乱前後のリン酸態リンの変化

表-2 かく乱による浸透水のCOD変化

経過日数	海水	砂質カラムの浸透水	泥質カラムの浸透水
7	16	16	19
11(かく乱後)	15.5	14.8	17.4
14	15	14	17.5
19	16.2	14	17

単位 mg/l

ではかく乱後海水より1~2 mg/l低下した。

謝辞：研究の遂行に熊本大学工学部卒業生 村崎修司君に協力いただいた，また文部科学省の科学研究費金基盤/発展（滝川 清）より援助を受けた。記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 栗原 康 (1988): 河口沿岸域の生態系とエコテクノロジー, 東海大学出版会, pp. 86-96.
- 清水 徹・平岡喜代典・西嶋 渉・向井徹夫・滝本和人 (1998): 広島湾における水質浄化機能に関する研究—有機物の分解特性について—, 水環境学会誌, 第21巻, pp. 421-428.
- 中野正詩・宮崎 毅・塩沢 明・西村 拓 (1995): 土壌物理環境測定法, 東京大学出版会, pp. 86-96.
- 野村宗弘・中村由行 (2002): 播州干潟における潮汐に伴う水質変動に関する研究, pp. 217-225.
- 原田浩幸・滝川 清 (2001): 有明海干潟泥質・砂質干潟底泥の水質浄化機能と生物かく乱の影響, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1126-1129.
- 原田浩幸・古川憲治・滝川 清 (1999): 干潟底泥のCODとORPが生物かく乱による脱窒に及ぼす影響, 環境技術, pp. 907-912.
- 細見正明・白旗清伸・前田浩義・村上昭彦 (1996): 干潟底泥生物が水質浄化機能に及ぼす影響, 第30回日本水環境学会年会講演集, pp. 500.
- 矢持 進・岡田庄一・小田一紀 (1997): 砂浜や泥浜を優先する底生生物の底質浄化能力, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1176-1196.
- Franck, G., Pratrice, B. and Geroges, S. (0000): Effects of bioturbation in a marine sediments from the Western Mediterranean Litterol, Hydrobiologia, No. 304, pp. 49-58.
- Raymond, N., P. Boinin and J.-C. Bertrand (1992): Comparison of methods for measuring denitrifying activity in marine sediments from Western Mediterranean Coasts, Oceanologica Acta, Vol. 15(2), pp. 137-143.

干潟環境の修復・改善に向けた対策工とその効果

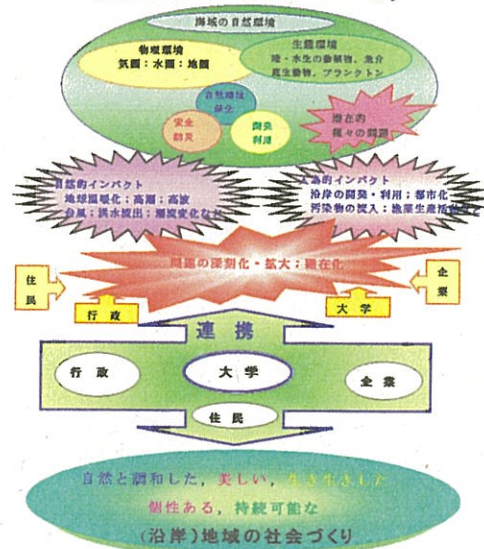
熊本大学 沿岸域環境科学教育研究センター・教授・滝川 清

(有明海・八代海の環境異変と改善策)

代表的な閉鎖性水域である有明・八代海域は、本来陸水によって輸送される種々の物質が、物理的、化学的、生物的作用を受け、さらに潮汐などの影響の下で生態系を含む物質循環の微妙なバランスによって形作られた独特の自然環境にある。この海域における急激な環境悪化の要因には、干潟域の減少、沿岸域の開発、流域の都市化や農業使用に伴う汚水物質の流入、河川形態の変化、大洪水に伴う土砂・汚濁物質の大量流入、台風や海流の変動による高温海水の浸入や潮流の変化、さらには地球温暖化など様々な原因が考えられるが、詳細な因果関係は不明のままである。長年月の間に「掃き溜め」となり「疲弊している」ことに違いない。

有明・八代海のような閉鎖性が極めて高い海域における環境は、周辺に多くの都市部や農村地域を抱えており、本来陸域からの負荷により富栄養化や汚染が進行しやすい海域である。このような海域の環境は、自然の物理・化学的作用と生態系及び人為的行為などの複雑な要素が互いに関連し、その微妙なバランスにより形成されるものであり、今日の環境悪化の原因分析と再生方策については、海域全体の物理化学的環境と生物生産過程を視野に入れた総合的取り組みが必要であり、国の委員会（農林水産省：有明海ノリ不作対策関係調査検討委員会（第3者委員会））においても、有明海環境悪化の要因分析と改善方策について総合的な調査・検討が行われているが、調査・研究を進めるにあたっては「何を調査するか」ではなく「何のために調査するか」の視点が必要であり、調査結果をどのように分析・整理し、原因の究明と今後の方策に結びつけていくべきか、方針を常に明確にしながら進めることが重要である。海域環境の改善策は、基本的には「人為的インパクトの低減」と自然環境の回復能力の再生、特に「干潟環境の回復と創造」および河川水を含めた「水質の改善」が必要である。ここでは、「干潟環境の改善策」に関する調査研究の取組みを紹介する。

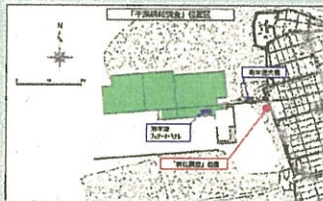
沿岸環境と地域づくり



耕耘による干潟改善

(熊本大学と国土交通省九州地方整備局 熊本港湾空港工事事務所
+ ㈱ アジアプランニングとの共同研究)

- 干潟走行機を開発、これの「耕耘」及び「耕耘+Air混入」による改善効果を期待
 - 1) 酸素の供給、2) 浄化能力のある生物の促進、3) 太陽による自然消滅
- 平成14年9月より、熊本港大橋南側干潟で調査
- 調査項目：底質分析、間隙水分析、水質分析、底生生物調査など



写真：耕耘の全景

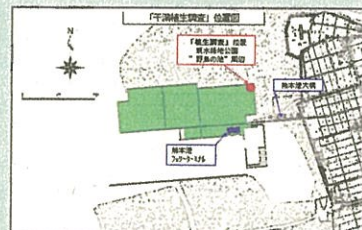
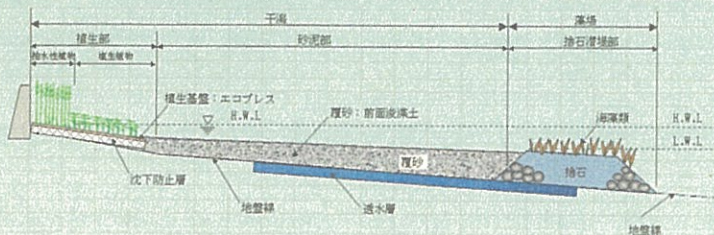


写真：耕耘+鋤

植栽による干潟改善

(熊本大学と㈱テトラとの共同研究)

- 塩生植物の生育実験を干潟で実施。植生基盤の開発利用による干潟緑化再生の可能性と底質・底生生物環境の改善効果を期待
- 平成14年9月より、熊本港親水緑地公園、「野鳥の池」周辺
- 調査項目：植生生育実験、底質分析、間隙水分析、水質分析、底生生物調査など



1. 浄化機能：①植栽による浄化：塩生植物による汚濁物質や窒素・リンの吸収と植生基盤に吸着する微生物による有機物の分解、硝化、脱窒。②砂泥部による浄化：干潟の堆積物食者や濾過食生物による海水浄化と干潟の植物連鎖を介した浄化作用。③底質による浄化機能：海藻類による海中の窒素・リンの固定と植物連鎖による海域の浄化
2. 覆砂安定化工夫：覆砂下部に透水層を設け、高波浪時に地下水位低下を図り砂泥部を安定させる。また、干潟の沖側に砂止溝を設け、砂泥部の沖側流出防止を図る。
3. 酸化防止効果：植生基盤（エコプレス）を設置することにより、珪酸、有機酸等による海水の酸性化を防ぐ

「なぎさ線の回復」による干潟改善

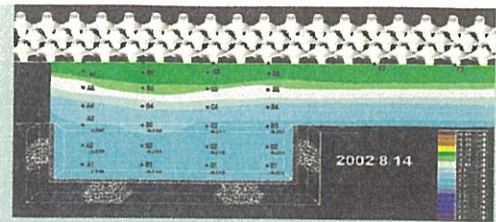
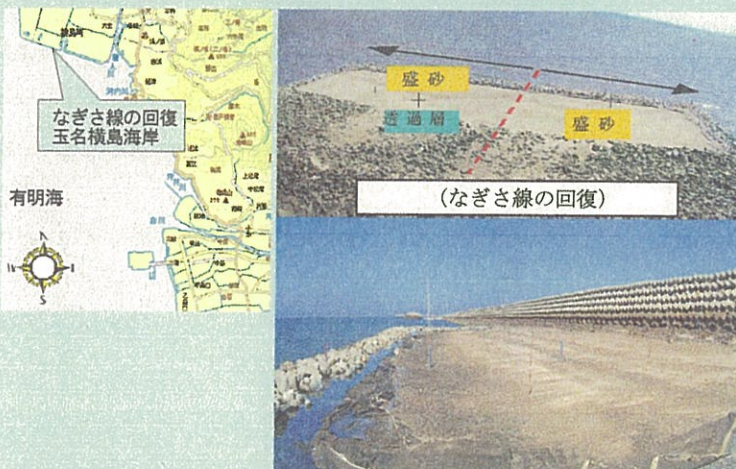
(熊本大学と農林水産省九州農政局玉名横島海岸保全事業所との共同研究)

●干拓堤防護岸前面に、「押え盛砂工」としての“なぎさ線”を創生し、防災機能と環境保全の機能を有する新しい海岸事業の開発研究。

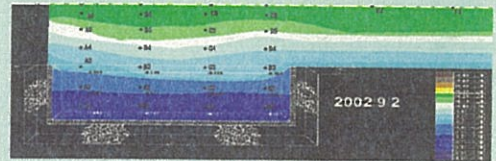
「押え盛砂工(52m×20m)」の区間に「盛砂のみ」と「盛砂+透過層」の2つの区域を設け、底質環境の相違による浄化機能の特性を調査。

●平成14年9月より、玉名横島海岸 干拓堤防護前面で調査

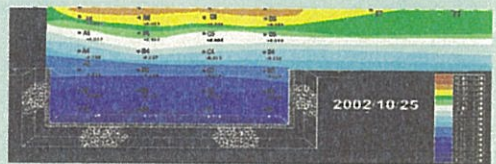
●調査項目: 底質分析、間隙水分析、水質分析、底生生物調査など



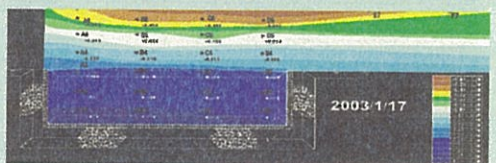
(a) 施行当初 (2002/8/14)



(b) 台風 15号直後 (2002/9/2)



(c) 約 70日後 (2002/10/25)



(d) 約 6ヶ月後 (2003/1/17)

人工干潟の創生

(熊本大学と熊本県土木事務所および熊本県土木部港湾課

+ 株式会社アブリランニングとの共同研究)

●通水パイプを通して、潮汐の干満に応じた海水を導入する池(“野鳥の池”)を人工的に創り、ここに創生される“新たな干潟と生命活動”を追跡調査する。

●平成14年9月より、熊本港親水緑地公園、“野鳥の池”

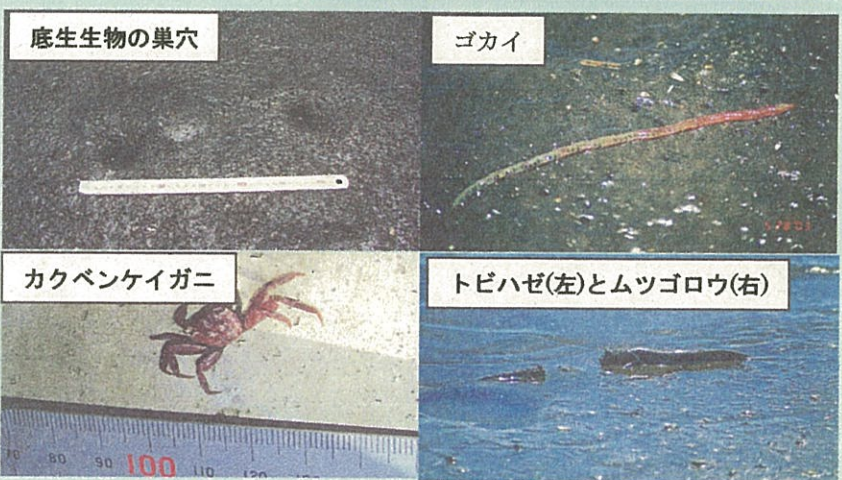
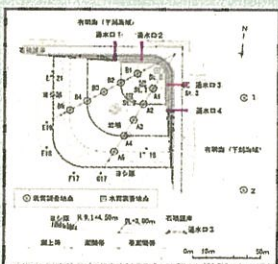
●調査項目: 底質分析、間隙水分析、水質分析、底生生物調査、植生生育実験など



満潮時の「野鳥の池」



干潮時の「野鳥の池」



底生生物の巣穴

ゴカイ

カクベンケイガニ

トビハゼ(左)とムツゴロウ(右)

「野鳥の池」内干潟にできた巣穴とその主たち

有明海干潟環境変化のメカニズムに関する観測・調査研究について ～熊本港周辺を中心とした調査研究の実施計画～

滝川 清¹・田中健路²・外村隆臣³

1. 緒言

わが国の代表的な閉鎖性内湾であり、広大な干潟と大潮位差など独特の自然環境にある有明海では、近年の生物層の変化とその種と数の激減、赤潮の多発、水質・底質の悪化など、急激な環境悪化の悪循環に陥っているものと懸念され、海域環境の回復と再生方策の実施が緊急かつ大きな課題となっている。2002 年末には、「有明海及び八代海を再生するための特別措置法」が公布・施行され、2003 年 1 月には「自然再生推進法」が制定されて、地域自然環境特性、環境容量、生態系等の微妙なバランスなどを踏まえ、科学的知見に基づいた自然再生の実施がなされるべきとの基本方針が示された。

現在、海岸線の人工化や干潟の減少と底質の悪化が著しい干潟環境を対象に、その改善工法を開発する目的として、「人工干潟の創生」、「植栽による干潟改善策」、「耕耘による干潟改善策」、「なぎさ線の回復」の干潟改善策について、熊本県、文部科学省、民間企業、国土交通省、農林水産省などとの共同研究を実施しており、これらがもたらす干潟改善・回復効果について科学的視点から調査を行っている。

また更に、干潟自然環境の長期変動を科学的に把握することを目的として、2003 年 3 月に熊本港北東側の干潟域に干潟環境観測塔を建設し、気象・水質・地中熱物性などの連続総合観測を実施し始めているところである。本稿では、現在熊本港周辺（図-1）において実施中である、干潟改善策の現地調査と観測塔における総合観測について、その概要と今後の計画を紹介する。

2. 野鳥の池における人工干潟の創生及び干潟生態系の構築に関する調査

熊本港親水緑地公園の一角に、「野鳥の池」と呼ばれる人工池が 2002 年 11 月完成した。この人工池では、通水パイプを通じて潮汐の干満に応じて海水を導入することで創生される“新たな干潟と生命活動”を追跡調査し、自然環境の創生過程を把握することを目的としている。野鳥の池の面積は、図-2 に示すように、亜潮間帯 1,028m²、潮間帯 4,222m²、潮上帯 17,750m² の計 23,000m² である。石積み護岸によって外海とへだてられ、池の東側と北側に 2ヶ所ずつ計 4ヶ所の通水パイプ（直径 1.0 m）があり、干潮時（水面 DL=3.0m）で平均水深 0.3m、最深部でも 1.0m 未満である。池内の底質は含泥量 80%以上のいわゆる泥干潟で、潮間帯に 2ヶ所岩場が設置されている。

野鳥の池においては、図-2 の I” 18 地点付近の H.W.L. (D.L.+4.5m) を中心とした領域（標高 D.L.+4.73m～+4.40m）に、セラミックス製の植生基盤を設置して塩生植物を植栽し、その生育状況と共に植生基盤を中心とした生態系の構築過程、及び、干潟域の水質・底質の浄化作用への寄与を把握することを目的として調査が行われている。植栽された塩生植物は、有明・八代海の干潟域で確認されている 12 種類の中か



図-1：熊本港付近で実施中の干潟改善事業（野鳥の池）と干潟環境観測塔の位置

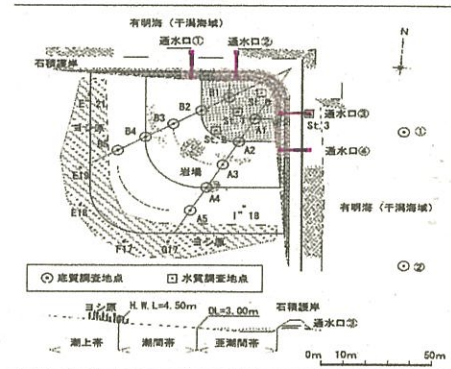


図-2：野鳥の池の概要



写真-1：ハマサジの新芽

¹ 熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター 教授, 〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1, E-mail: takikawa@gpo.kumamoto-u.ac.jp

² 熊本大学工学部環境システム工学科 助手, 〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1, E-mail: ktanaka@gpo.kumamoto-u.ac.jp

³ 熊本大学工学部技術部 〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1, E-mail: hokamura@gpo.kumamoto-u.ac.jp

ら、永続管理しやすいハマサジ・フクド・シオフグ・ナガミノオニシバ・ハママツナ・ハマアカザ・ハマギク・シバナなどである。

野鳥の池における調査項目の一覧を表-1に示す。2002年11月4日に通水を開始して半年以上経過した時点で、特に重要と思われる経過についてまとめると、以下のようになる。

1) 池の内部における地盤の変化：海水の導入に伴い、コーン支持力が低下し、地盤の軟弱化が進んだ。ただし、池の外部の干潟ほどまでの軟弱化には至っていない。また、降水に伴って池内の潮間帯が浸食され、亜潮間帯に約10cmの堆積が見られた。

2) 底生生物・魚類：

通水開始後2週間目の調査において、ヤドカリが確認されて以来、2003年4月の調査までに総出現種類数は11種までに増えた。2003年4月の調査時点で、ボラの稚魚が群れをなして泳いでいる様子が確認されており、導水によって池の内部における生態系が徐々に構築されてきている様子が明らかになりつつある。

3) 植生基盤：2003年5月の調査の時点で、ハマサジの新芽が多数発芽しているのが確認(写真-1)され、また、冬季にもかかわらず、多年草・越年草の根は植生基盤に活着しており、これからの生育が期待される。

表-1：野鳥の池における環境調査項目

底質	粒度分析・含水比・COD, IL, T-S, ORP, pH ; 地盤高, 貫入試験(コーン支持力)
水質 (土壌間隙水)	COD, SS, NO ₃ -N, NO ₂ -N, NH ₄ -N, PO ₄ -P, DO, pH 電気伝導度, 濁度, 塩分濃度
底正生物	マクロベントスの種・個体数・湿重量・巢穴数
植生基盤	沈下試験 植物物性(草丈, 葉面積指数, 被覆率)
その他	魚類・土中バクテリア(生息種・個体数)

3. 干潟環境観測塔における大気・水・地圏総合観測

干潟域における、大気—海水—底泥間の熱・物質相互作用と生態系プロセスに与える寄与を科学的に解明することを目的として、熊本港北東側干潟域(北緯32度46分15秒, 東経130度35分34.4秒:世界標準測地系(WGS-84))に干潟環境観測塔(写真-2)が2003年3月に建設され、総合観測に向けて準備をすすめてきている。観測項目の一覧は、表-2に示すとおりである。観測塔は地盤から頂上の風速計までの高さが10.0mで、高さ5.6mの位置に、3m四方の足場を設けており、観測機器の収納及び機器の維持作業などのスペースとして使用している。観測設備で使用する電源は、観測塔足場の南側に太陽電池パネル(発電能力110W/h)を設置し、収納庫内部にある蓄電池(74Ah×3台)に蓄電しつつ使用している。観測塔での作業時間は潮汐によってごく限られるため、携帯電話を使用した通信システムを導入することにより、観測状況を遠隔監視可能とすることで、現地での作業の効率化を図っている。

2003年6月現在、予備観測期間として、測定機器の現地動作確認を行いつつ、水質観測と一部の気象観測について観測を開始しており、データを取得中である。2003年10月1日より本格的な連続観測を開始する。エルニーニョに代表される領域～地球規模の気候変動と干潟域における熱・物質環境との連動性を解明するため、現状の設備で最短5年間の観測を予定している。なお、必要に応じて、さらに継続的観測を行う予定である。

表-2：干潟環境観測塔における観測項目

気象	風向風速・気温・湿度・降水量 4成分放射(短波・長波放射)
水質	DO, pH, ORP, NO ₃ , NH ₄ -N, 水位(水圧式+超音波) 電気伝導度, 濁度, 塩分濃度, 水温, σ_t
土壌	地表面温度・地中温度(1cm-1m) 土壌水分量(体積含水率)・地中熱流量
その他 (予定)	大気乱流観測・流速観測



写真-2: 干潟環境観測塔

4. 調査・観測研究からの展開について

上述の干潟改善・回復事業、また干潟環境観測塔での観測等によって、有明海干潟域における生態系を含む物理・物質環境に関する膨大な種類・数の諸情報が蓄積され、干潟環境変化のメカニズムの解明に大いに役立つものと期待される。また、海域環境評価手段の一つとして、数値計算法を有効な手段として活用することが大切であるが、従来からの海域調査データのみでは、特に時間間隔において不十分である。本研究の連続観測実測データは、数値計算の妥当性の検証のみならず、より正確な数値計算を行うための係数や計算式の再構築用の資源として利用できる。以上、本観測ならびに調査・研究の成果及び改良された数値計算プログラム等によって、より正確で有益な将来予測が可能となることが大いに期待される。

有明海の海域環境の変動特性

熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター
教授 滝川 清



閉鎖度指数＝

$$(\sqrt{S \times D1}) / (W \times D2)$$

但し：S＝海域面積

W＝湾口幅

D1＝湾内の最深深さ

D2＝湾口の最深深さ

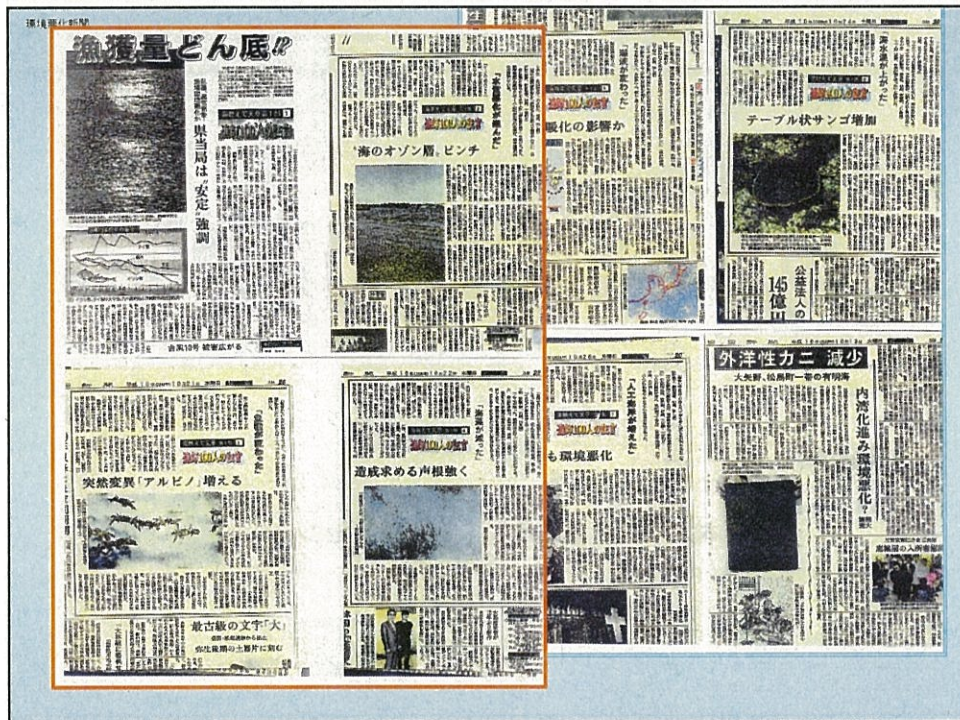
八代海＝32.5 (A=1200km²)

有明海＝12.9 (A=1700km²)

東京湾＝ 1.8 (A=1380km²)

伊勢湾＝ 1.5 (A=2100km²)

陸奥湾＝ 2.9 (A=1670km²)



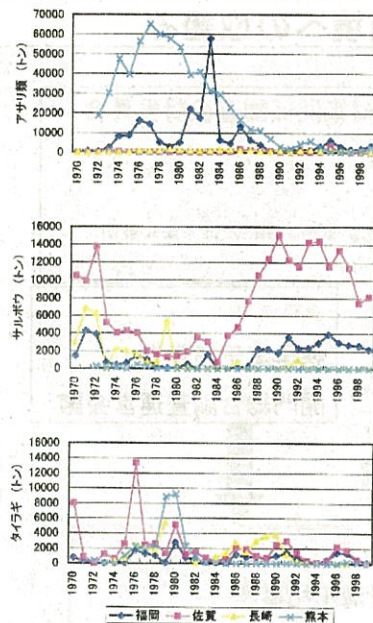


図1-3. 有明海における主要二枚貝類の県別漁獲量の変化。

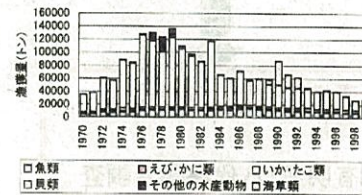
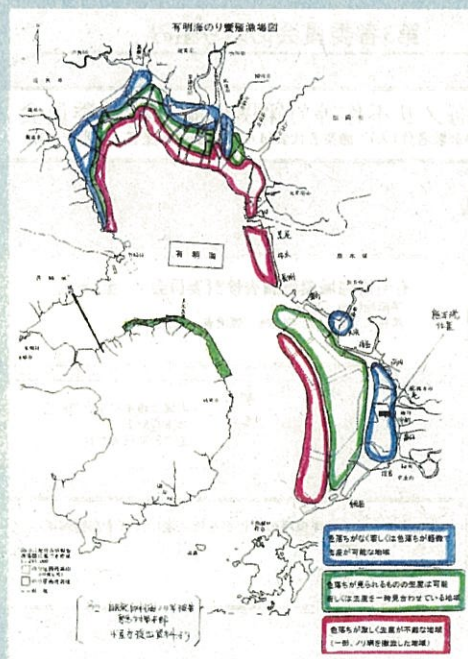


図1-1. 有明海における魚種別漁獲量の経年変化。



有明海・八代海環境への取組み

第3者委員会:有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会

=有明海海域環境調査検討委員会=(国庁費調査)

=海域環境モデル専門部会=

=有明海における海洋環境の変化が生物生産に及ぼす影響解明=
(行政特研費調査)

環境省(国の諮問委員会):

有明海・八代海総合調査
評価委員会

熊本県:環境政策課
有明海・八代海再生推進室

農林水産省

諫早湾干拓事業

開門総合調査運営会議

農林水産省

諫早湾干拓事業

中・長期開門調査検討会議

第3者委員会の取り組み

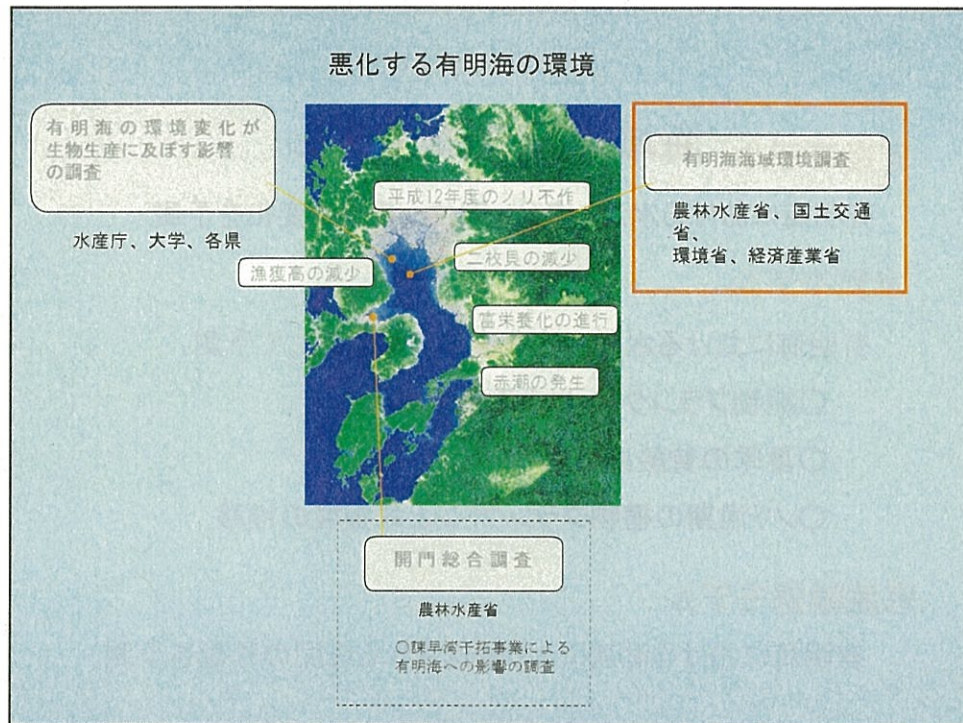
有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会

・学識経験者(11人)+漁業者代表(4人) ; 農林水産省, 各省庁、県

=有明海海域環境調査検討委員会= 国庁費調査
学識経験者(13名);
農林水産省, 国土交通省, 環境省, 経済産業省

=海域環境モデル専門部会=
学識経験者,
国立研究所専門家

=有明海における海洋環境の変化が生物生産に及ぼす影響解明=
行政特研費調査
学識経験者:
水産庁, 各県



有明海海域環境調査 (国土総合開発事業調整費調査)

農 林 水 産 省
経 済 産 業 省
国 土 交 通 省
環 境 省

流動モデル 海域環境予測モデル

有明海における水温、塩分、潮位、潮流の変化を予測

水質モデル

有明海における水質の変化を以下に留意して予測

- 植物プランクトンによる赤潮の発生
- 夏季の貧酸素現象
- ノリ漁期の植物プランクトンと栄養塩の推移

底泥輸送モデル

有明海における潮流により輸送される底泥の移動を予測

流動モデルの概要

【検討範囲】

有明海全域

【検討項目】

潮位、潮流、水温、塩分

【検討期間】

2000年～2001年

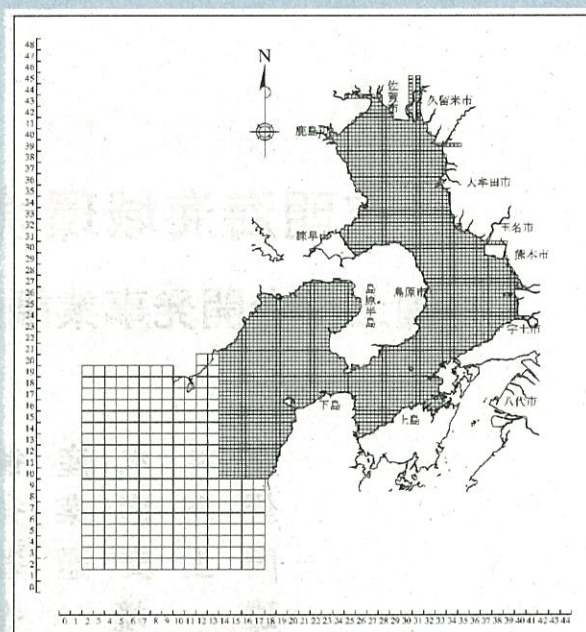
【モデルの構造】

鉛直14層レベルモデル

格子間隔

有明海 900m

外 海 2700m



基本式

<連続の式>

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

<運動方程式>

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f_v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f_u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_y$$

$$\rho g = -\frac{\partial p}{\partial z}$$

<水温・塩分の拡散方程式>

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + F_\theta$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S$$

x, y, z : 右手系の直交座標系, 上向きを正

u, v, w : x, y, z 方向の流速成分 cm/s

p : 圧力 $\text{g/cm} \cdot \text{s}^2$

θ : 水温 $^{\circ}\text{C}$

S : 塩分 (PSU)

f : コリオリ係数 1/s

ρ_0 : 代表密度 g/cm^3

ρ : 密度 g/cm^3

K_M : 鉛直渦動粘性係数 cm^2/s

K_H : 鉛直渦動拡散係数 cm^2/s

K_{xy} : 水平渦動粘性係数 cm^2/s

K_{xy} : 水平渦動拡散係数 cm^2/s

g : 重力加速度 cm/s^2

水質モデルの概要

【検討範囲】

有明海全域

【検討項目】

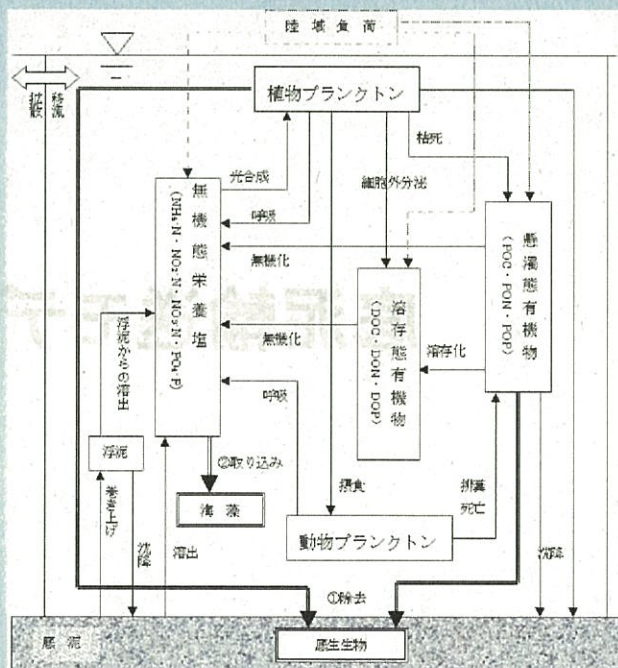
植物プランクトン
動物プランクトン
栄養塩
溶存酸素等

【検討期間】

2000年～2001年

【モデルの構造】

鉛直14層レベルモデル
格子間隔
有明海900m



①植物プランクトン

$$\frac{dPh}{dt} = \text{光合成} - \text{細胞外分泌} - \text{呼吸} - \text{枯死} - \text{動物プランクトンの摂食} - \text{沈降} - \text{二枚貝による除去}$$

②動物プランクトン

$$\frac{dCh}{dt} = \text{摂食} - \text{排泄} - \text{呼吸} - \text{排泄} - \text{死亡}$$

$$\frac{dFOCh}{dt} = \text{植物プランクトンの枯死} + \text{動物プランクトンの死亡}$$

$$\frac{dFOCh}{dt} = \text{植物プランクトンの枯死} + \text{動物プランクトンの死亡}$$

$$+ \text{排泄} - \text{分解} - \text{無機化} - \text{沈降} + \text{流入負荷} - \text{二枚貝による除去}$$

$$\frac{dFOCh}{dt} = \text{植物プランクトンの枯死} / rCN_p + \text{動物プランクトンの死亡} / rCN_z$$

$$+ \text{排泄} / rCN_z - \text{分解} - \text{無機化} - \text{沈降} + \text{流入負荷} - \text{二枚貝による除去}$$

$$\frac{dPOPh}{dt} = \text{植物プランクトンの枯死} / rCP_p + \text{動物プランクトンの死亡} / rCP_z$$

$$+ \text{排泄} / rCP_z - \text{分解} - \text{無機化} - \text{沈降} + \text{流入負荷} - \text{二枚貝による除去}$$

③植物プランクトンの分岐 (DOCh, DOMh, DOPh)

$$\frac{dDOCh}{dt} = \text{植物プランクトンの分泌} + \text{分解} - \text{無機化} + \text{流入負荷} - \text{硝化} - \text{ノリによる取りこみ} + \text{浮泥からの溶出} + \text{二枚貝の排泄}$$

$$\frac{dDOMh}{dt} = \text{植物プランクトンの分泌} / rCN_p + \text{分解} - \text{無機化} + \text{流入負荷} + \text{動物プランクトンの呼吸・排泄} / rCP_z + \text{有機物の無機化} + \text{流入負荷} + \text{溶出}$$

$$\frac{dDOPh}{dt} = \text{植物プランクトンの分泌} / rCP_p + \text{分解} - \text{無機化} + \text{流入負荷}$$

④硝酸素 (NH₄-N)

$$\frac{dNH_4h}{dt} = - \text{光合成} / rCN_p + \text{植物プランクトンの呼吸} / rCN_p$$

$$+ \text{動物プランクトンの呼吸・排泄} / rCN_z + \text{有機物の無機化} + \text{流入負荷} + \text{溶出}$$

$$- \text{硝化} - \text{ノリによる取りこみ} + \text{浮泥からの溶出} + \text{二枚貝の排泄}$$

$$\frac{dNO_3h}{dt} = - \text{光合成} / rCN_p + \text{硝化} + \text{流入負荷} + \text{溶出} - \text{ノリによる取りこみ}$$

$$\frac{dPO_4h}{dt} = - \text{光合成} / rCP_p + \text{植物プランクトンの呼吸} / rCP_p$$

$$+ \text{動物プランクトンの呼吸・排泄} / rCP_z + \text{有機物の無機化} + \text{流入負荷} + \text{溶出}$$

$$- \text{ノリによる取りこみ} + \text{浮泥からの溶出} + \text{二枚貝の排泄}$$

ここで、

h 層厚

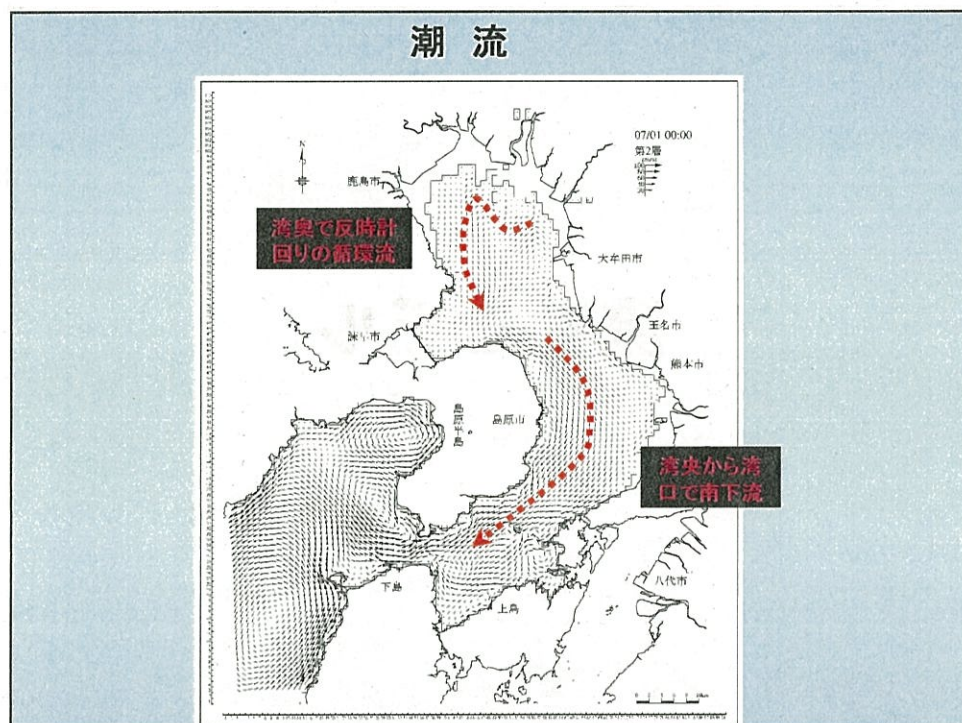
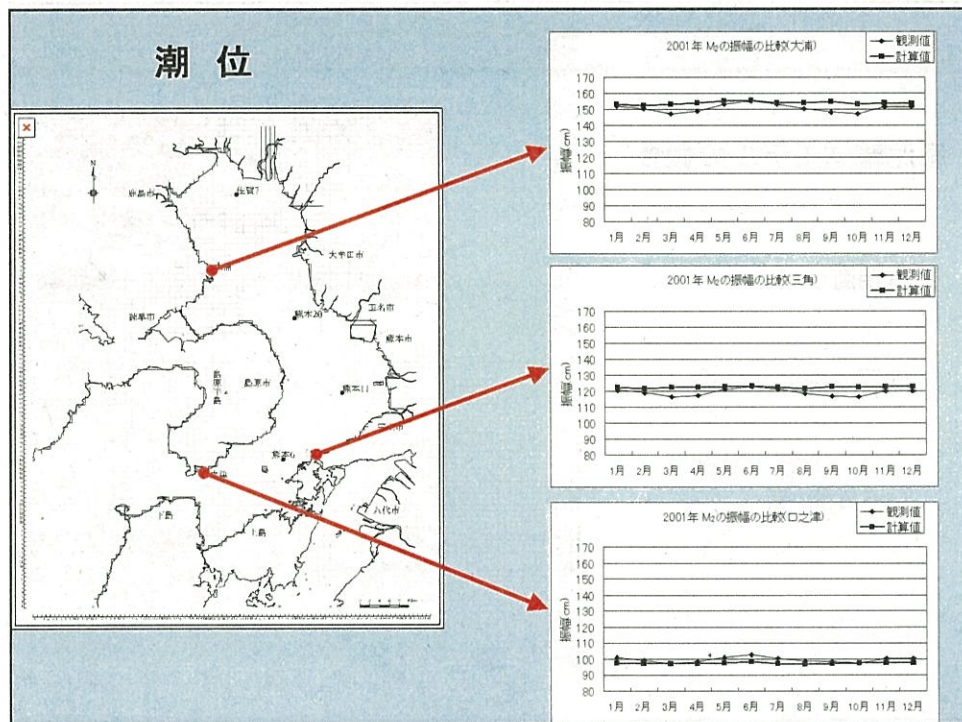
rCN_p 植物プランクトンのC/N比

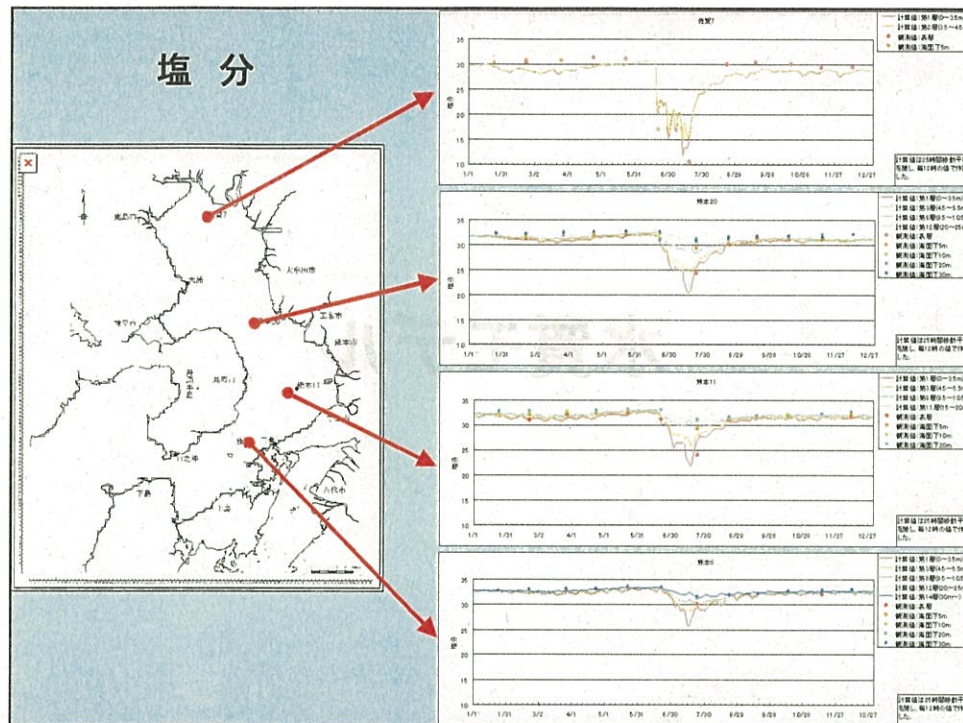
rCP_p 植物プランクトンのC/P比

rCN_z 動物プランクトンのC/N比

rCP_z 動物プランクトンのC/P比

底泥輸送モデル





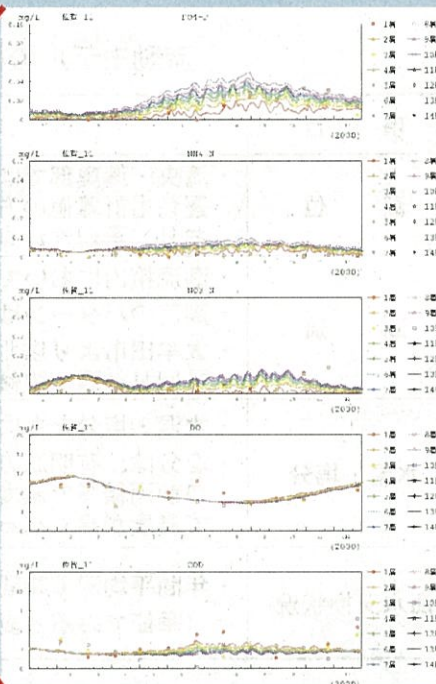
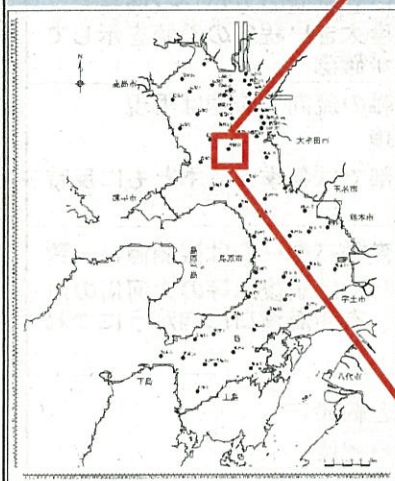
流動モデルの検証結果の概要

項 目	内 容
潮 位	・ 湾央・湾奥部では平均的に計算値の方が1~2%高く、遅角も計算値の方が1~2度大きい程度の差値を示しており、再現性が高いことが確認
潮 流	・ 潮流橢円において概ね長軸の流向・流速は再現 ・ 潮流のパターンは概ね再現 ・ 大牟田市より以北の湾奥部では冬季、夏季ともに反時計回り循環流の傾向
水温・塩分	・ 水温・塩分ともに年間の変動パターンは観測値と一致 ・ 塩分は、有明海の湾奥もしくは筑後川等の大河川の河口前面領域で濃度が低く、有明海湾口に向かうにつれて濃度が高くなる傾向
海水交換状況	・ 年間平均滞留時間でみると約50日 (季節でみると夏季は40日程度)

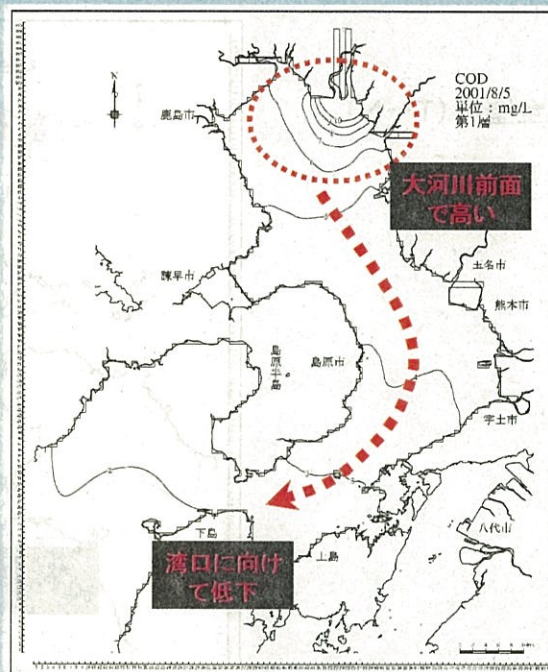
水質モデル

水質における観測値と計算値の比較

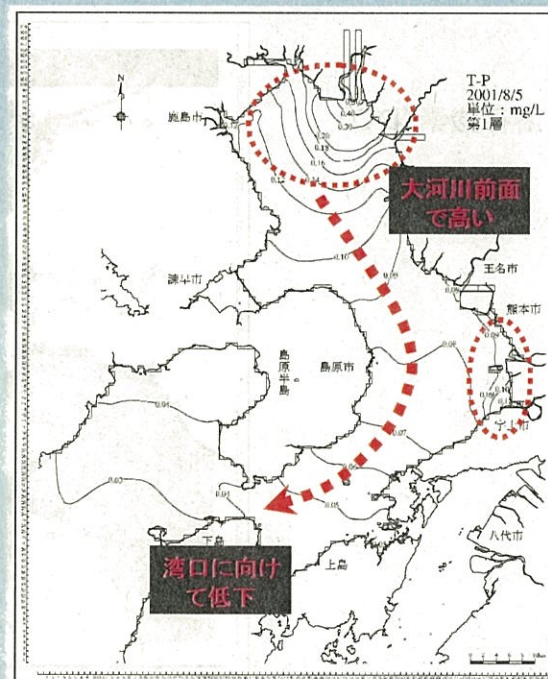
(1) 観測値と計算結果の比較



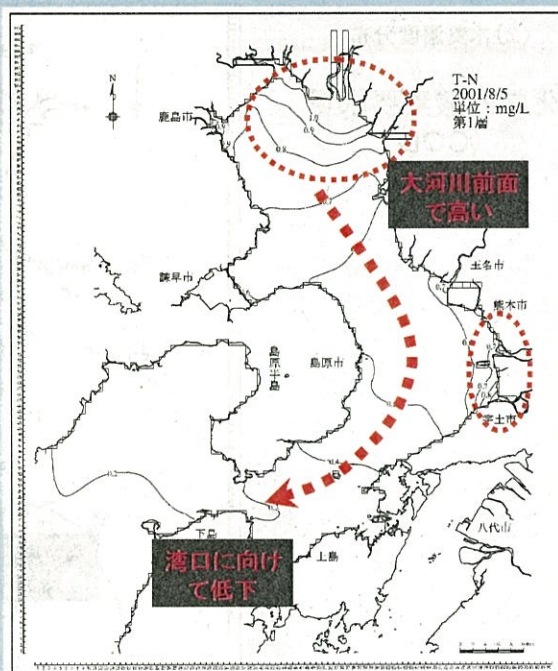
化学的酸素要求量
(COD)



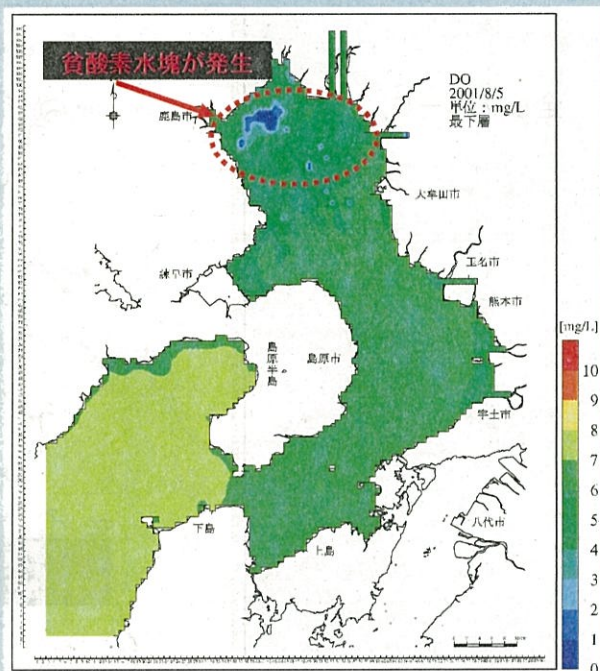
全リン(T-P)



全窒素(T-N)



溶存酸素(DO)



水質モデル検証結果の概要

項 目	内 容
化学的酸素要求量 (COD)	・年間変動パターンは概ね再現 ・冬季にみられる高濃度に関する再現性は十分ではなかったものの、大河川前面海域で高い濃度がみられ、湾央および湾口に向けて濃度が低くなる傾向
浮遊物質量 (SS)	・2000年の春季から夏季にかけて計算結果が観測値より高くなっていたが、その他の時期は概ね再現されていた ・大河川前面海域で高い濃度がみられ、湾央および湾口に向けて濃度が低くなる傾向
栄養塩類 (T-P、T-N)	・観測値は、夏季から秋季にかけてやや高くなる傾向にあり、計算値は観測値の変動を概ねとらえていた ・大河川前面海域で高い濃度がみられ、湾央および湾口に向けて濃度が低くなる傾向
溶存酸素量 (DO)	・2000年、2001年とも夏季に有明海湾奥部で大河川からの出水が原因と考えられる貧酸素水塊が発生 ・貧酸素は大牟田と竹崎を結んだ以北において生じており、有明海湾央部から湾口部にかけてはみられない

資料2-34ページ

開門総合調査営会議

○ 水質解析

干潟浄化機能調査で構築した
泥質干潟の干潟生態系モデルの概要

○諫早干潟の浄化機能を組み込んだ水質モデル

潮受堤防が無い場合の数値シミュレーション



国調費水質モデルをベースとして、
現在の潮受堤防の内側に干潟浄化機能調査で構築した
干潟生態系モデルを組み込んだ水質モデルを使用

潮受堤防が無い場合の水質計算方法

潮受堤防が無い場合の水質シミュレーション

潮受堤防の内側(諫早湾奥)
(配質干潟の干潟生態系モデル)

潮受堤防外側の有明海海域
(国調費水質モデル)



資料2.28ページ

○干潟生態系モデルの構成要素

項 目	生 物	非 生 物
浮遊系	植物プランクトン 動物プランクトン	懸濁態有機物 溶存態有機物 無機態栄養塩類 (NH ₄ -N, PO ₄ -P, NO _x -N (NO ₃ -N+ NO ₂ -N)) 溶存酸素
底生系	付着珪藻 メイオベントス カニ類 カニ類以外の堆積物食者 カキ類 カキ類以外の懸濁物食者 ムツゴロウ	デトリタス 間隙水中溶存態有機物 間隙水中無機態栄養塩類 (NH ₄ -N, PO ₄ -P, NO _x -N (NO ₃ -N+ NO ₂ -N)) 間隙水中溶存酸素

資料2.35 ページ

資料2.35 ページ

<基本式等>

$$\frac{\partial}{\partial t}(h \cdot S) = \left(u \frac{\partial}{\partial x}(h \cdot S) + v \frac{\partial}{\partial y}(h \cdot S) + w \frac{\partial}{\partial z}(h \cdot S) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot h \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot h \cdot \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \cdot h \cdot \frac{\partial S}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial}{\partial t}(h \cdot S) \right) \dots \dots \dots$$

移流項

拡散項

生成・消滅項

ここで、S：各構成要素毎の物質濃度

x, y, z：層厚

u, v, w：x, y, zは右手系の直交座標軸、zは鉛直上向きを正

K_x, K_y, K_z：x, y, z方向の流速成分

：x, y, z方向の渦動拡散係数

<モデルの特徴>

○浮遊系：

無機態栄養塩類の無機態リンについて、溶存態と懸濁態に区分
→ 国調費水質モデルは区分無し

○底生系：

・底生系の構成要素毎に計算

→ 国調費水質モデルは、底生生物に係る物質循環は懸濁態有機物の
取込み・排泄を二枚貝のみの現存量で計算

・栄養塩類の溶出速度や溶存酸素消費速度は底泥中の現存量で計算

→ 国調費水質モデルは、底泥中の現存量と無関係に一定速度で計算

潮受堤防と有明海海域環境の関係

○ 水 質

今回の報告では、

- ・ 諫早干潟の浄化機能を組み込んだ水質モデルを用いて、有明海全体のCOD、全窒素、全リン、DO、クロロフィルaについて数値シミュレーションを行い、
- ・ 国調費調査の現況再現結果と比較するとともに、公共用水域水質測定等の観測データも踏まえて、潮受堤防の締切りによる有明海の水質への影響を検討

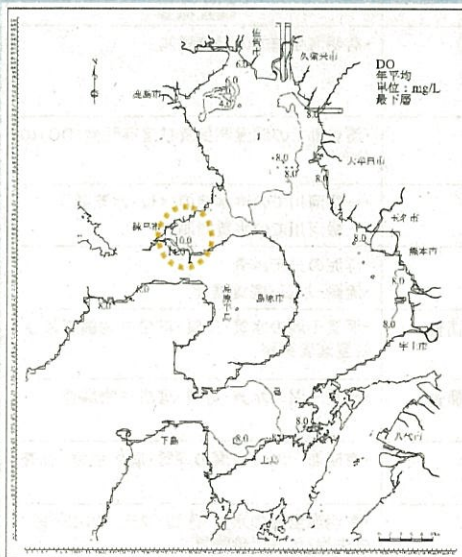
溶存酸素(DO)

① 数値シミュレーションによる検討

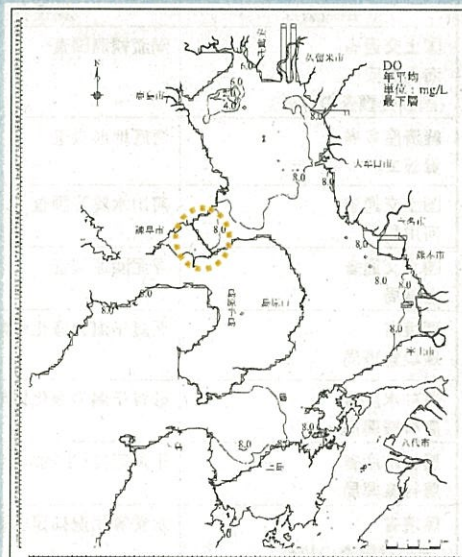
資料 4.61 ページ

有明海全域における年平均のDO分布
(平成12年平均、最下層)

資料 4.61 ページ



潮受堤防が無い場合



潮受堤防が有る場合

有明海全域における年平均のDO分布
(平成13年平均、最下層)

資料4-61 ページ2



潮受堤防が無い場合



潮受堤防が有る場合

潮受堤防の有無により、
僅かな差がみられるが、
佐賀湾内の有明海では
有意な差はみられない。

現地調査

担当省庁	調査名	調査概要
国土交通省 海上保安庁 (国調費調査の枠外)	潮流観測調査	・有明海全域での潮流観測
経済産業省 資源エネルギー庁	海底地形調査	・湾奥部での深浅測量及び溶存酸素(DO)の分布
国土交通省 河川局	河川水質等調査	・一級河川での洪水時の水位・水質観測 ・一級河川での水質観測
国土交通省 港湾局	浮泥関連調査	・浮泥の分布調査 ・流動・水質・底質調査
環境省 環境管理局	泥質干潟の浄化機能調査	・泥質干潟の水質・底質・底生生物調査及び脱窒速度実験
農林水産省 農村振興局	砂質干潟の浄化機能調査	・砂質干潟の水質・底質・底生生物調査
農林水産省 農村振興局	干潟底質・生物調査	・有明海全域の干潟の底質・底生生物 調査
環境省 (国調費調査の枠外)	水質等状況補足調査	・有明海全域の水質・底質・プランクトン・底生生物・化学汚染物質 ・底質からの栄養塩類の溶出速度、底質からの溶存酸素(DO)消費速度

有明海異変への原因仮説

平成13年3月27日

有明海異変の原因解明と有明海再生に向けた調査・研究についての提言

有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会

1. 有明海異変の捉え方

- 半閉鎖的な海域
- 陸域からの負荷により富栄養化や汚染が進行しやすい海域



- 水深の割に干満の差が大きく海水の混合が活発
- 泥質および砂泥質干潟の発達
- 二枚貝類をはじめとする大型底棲生物が豊富に分布することにより海域自体の浄化能力は高い。
- ノリをはじめとする漁業・養殖業生産による栄養分（C、N、P）の系外への移出



有明海の物質の収支をバランス

海域の生態系と漁業・養殖業生産の持続

つづき

物質収支のバランス崩壊

夏季：鞭毛藻有毒赤潮
冬季：珧藻赤潮の頻発



有明海の海洋環境の回復と持続を図るために、

海域全体の物理化学的環境と生物生産過程を視野に入れた総合的な取り組みが必要

2. 有明海異変にいたる原因仮説

(1) 底質悪化や干潟消失による底棲生物の減少

①底質の悪化： 底質悪化の原因としては、都市化の進行等にもなう陸域からの栄養物質の負荷の増加、ダム等による河川からの砂等の比較的大型の粒子の流入の減少、潮流の変化などが想定される。

②干潟の消失： 沿岸各地での干拓等により干潟の喪失が進んできた。しかしながら、最近では干拓事業による諫早湾内の干潟の喪失が最も大規模なものであり、それによる環境浄化能力の直接的低下、周辺環境への悪化や夏季の有毒赤潮の誘発との関係が懸念されており、具体的な因果関係を明らかにするための調査・研究が必要である。一方、諫早湾のみでなく、近年の有明海全体での自然の海岸線の減少が、本来、自然の感潮域が持つ、環境浄化や生物生産などの生態系維持における多面的機能を大きく減退させたとの指摘もあり、あわせて定量的な評価が必要であろう。

③貧酸素水塊と有毒赤潮の発生

水産庁や関係県の調査により、近年、夏季にシャットネウ等の有毒赤潮の発生が増加していることから、有明海においても、夏季の貧酸素水塊発生、有毒赤潮発生、底棲生物死滅・減少、冬季の珪藻赤潮発生・持続、海底への有機物の蓄積の促進のループが形成され、環境変化と漁業・養殖業生産の低下を促進している可能性に注目する必要がある。また、炭坑の旧坑道による海底の陥没や、諫早湾干拓事業における堤防建設のための土砂の採取跡の窪地が、貧酸素水塊発生の一つの引き金になっているとの指摘もあり、今後、検討し解明していく必要がある。

(2) その他の人為的及び自然的インパクト

その他、有明海の海洋環境や生物生産過程に影響を及ぼす可能性がある人為的な要因として指摘されている問題に、

- ①環境ホルモン等の環境汚染物質の問題や、
- ②ノリ養殖の過程で使用される処理剤の問題がある。

また自然的インパクトには、地球自転や太陽活動の周期的変化を背景とした

- ③周期的な気候・海洋変動や、傾向的变化としての地球温暖化がある。

文部科学省 科学研究費研究 基盤A

- 「有明・八代海沿岸域の自然環境評価と環境共生型社会基盤整備に関する研究」
平成10年～13年度:一般 : 代表; 滝川清
- 「有明・八代海域における高潮ハザードマップ形成と
干潟環境変化予測システムの構築」
平成13年～15年度:展開: 代表; 滝川清
- 「有明海干潟環境の回復・維持方策に関する研究」
平成14年～17年度:一般: 代表; 滝川清

1. 潮汐変動特性

(過去調査分析・数値シミュレーション)

2. 気象変動特性

(過去25年間)

3. 水質変動特性

(浅海定線調査:1975～25年間)

4. 底質変動特性

(熊本大学・長崎大学底質調査)

1. 潮汐変動特性

底質と恒流概地図

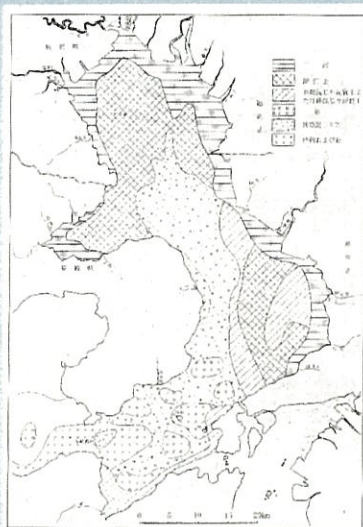


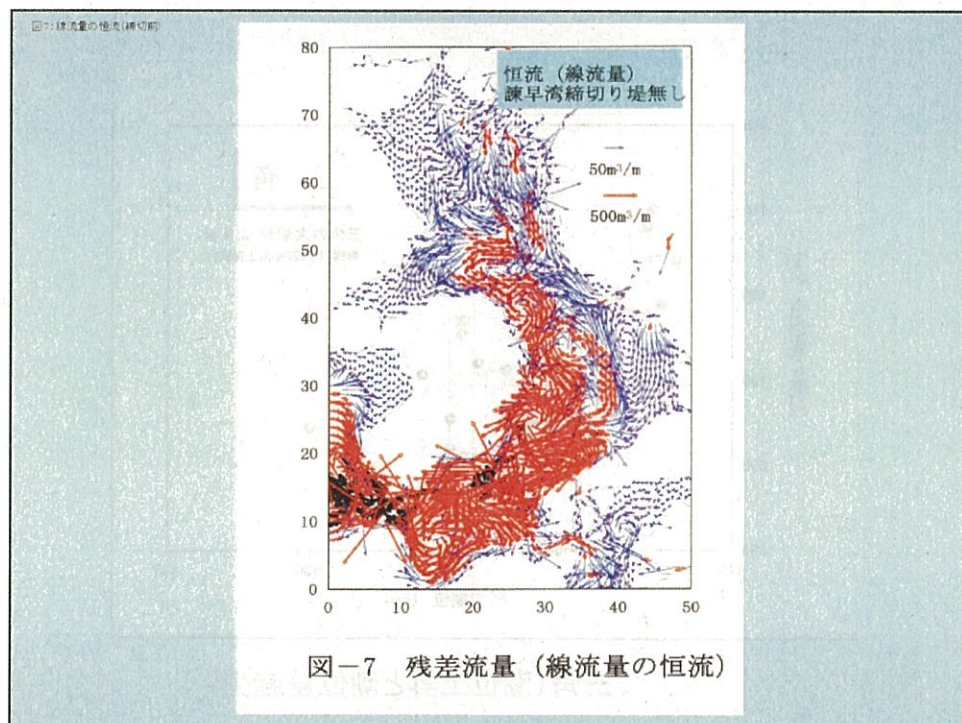
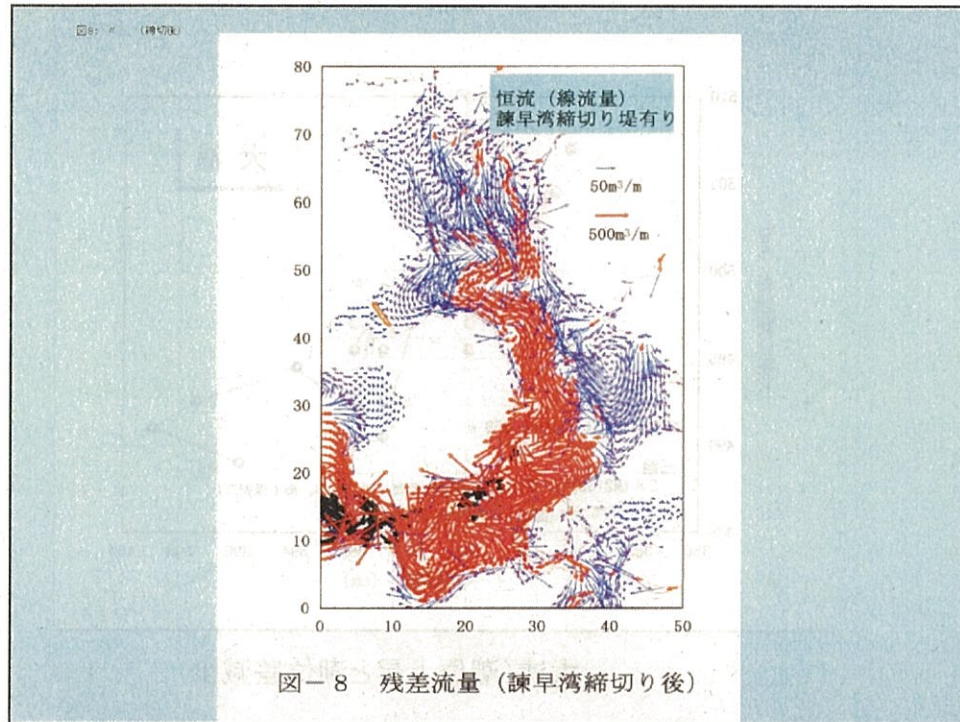
図-2 有明海の底質図

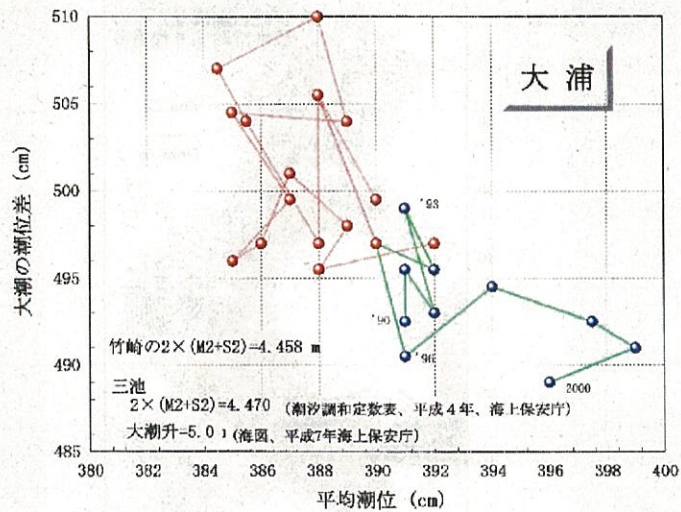
有明海の底質図



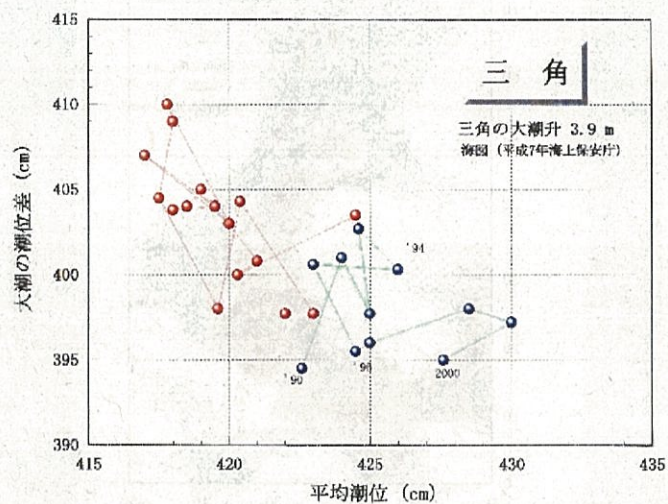
図-8 有明海の海域区分と恒流の概念図

資料：福岡県他4県「東支那海有明海栽培漁場資源生態調査とりまとめ報告書」





大浦(潮位上昇と潮位差減少)



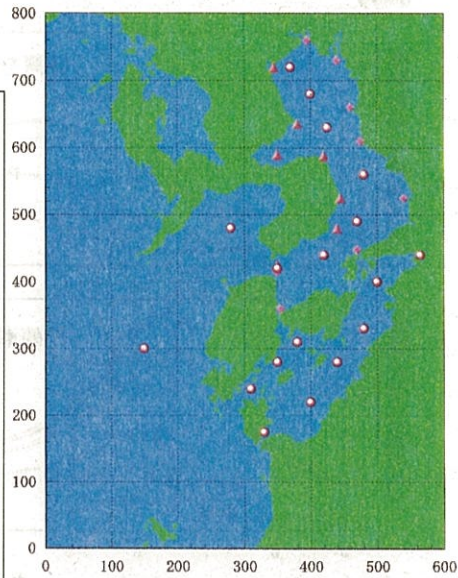
三角(潮位上昇と潮位差減少)

○解析上の注意！

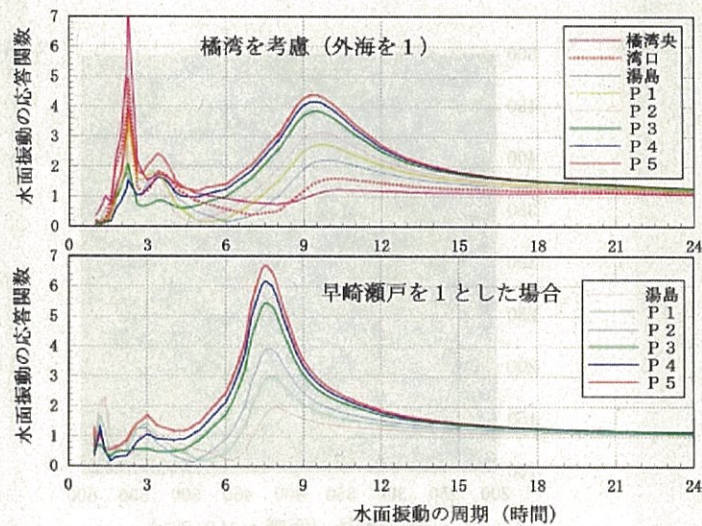
- ・計算領域を出来るだけ広くする
- ・八代海を含める！
- ・地形・水深の正確なデータ
- ・3次元の計算
- ・干潟干出の考慮

○潮汐への影響項目#

- ・干拓堤防有無の影響
- ・熊本港の影響
- ・河川出水・降水の影響
- ・風の影響
- ・ノリ網の影響

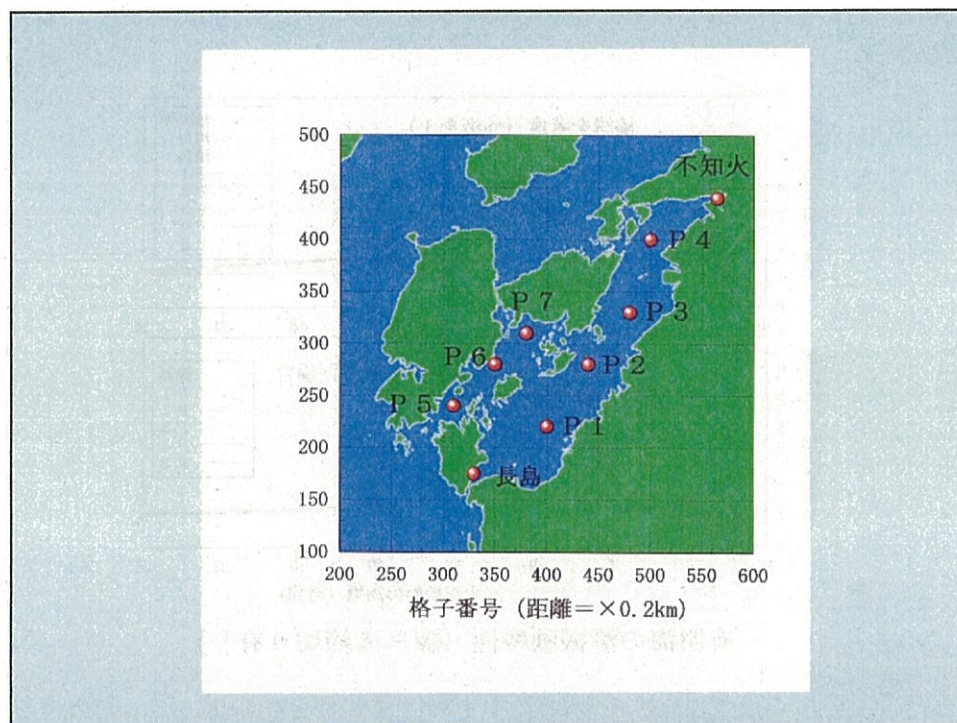
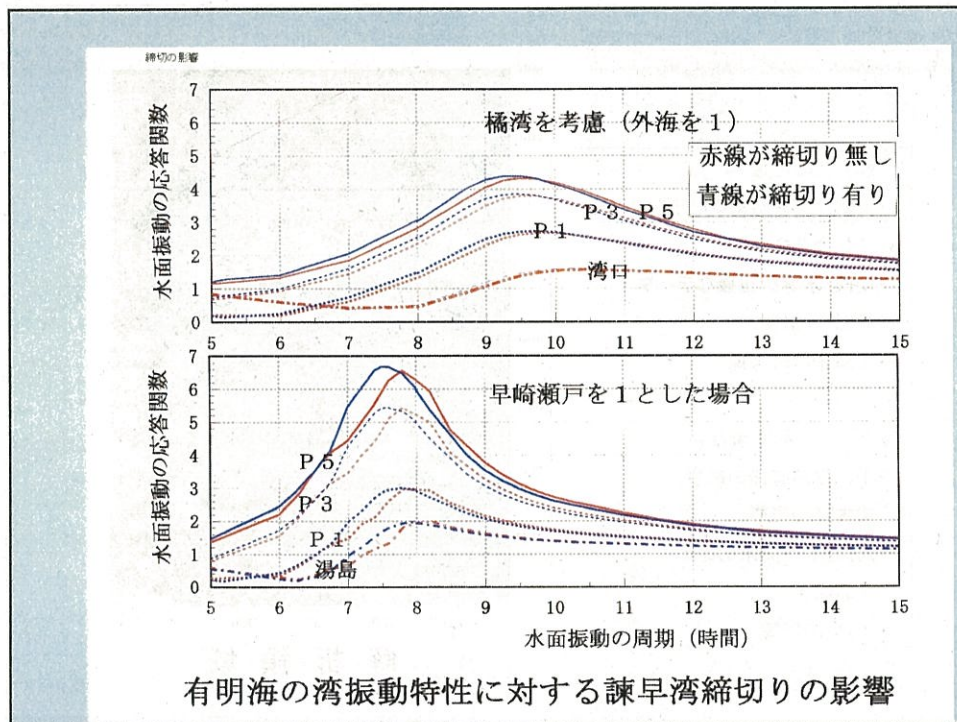


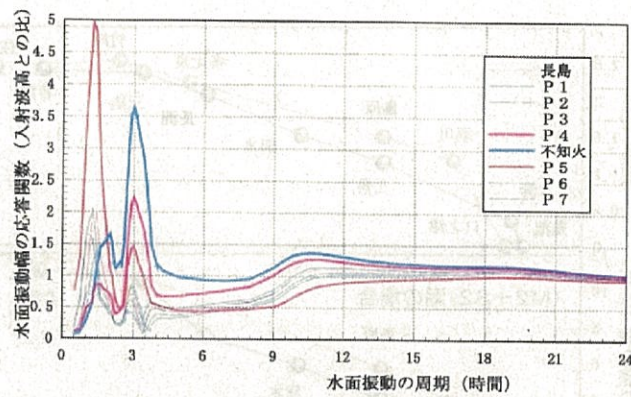
解析領域



有明海の湾振動特性 (諫早湾締切り有り)

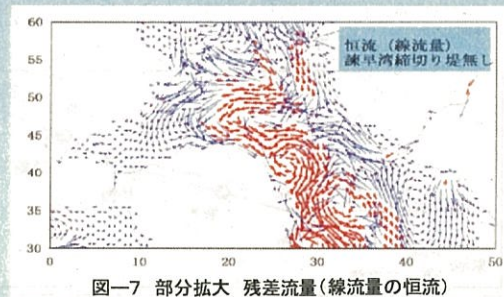
湾振動特性 (締切りあり)



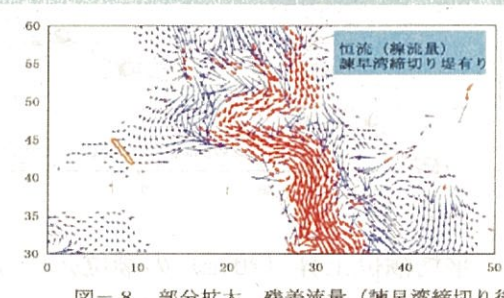


不知火海（八代海）の湾振動特性

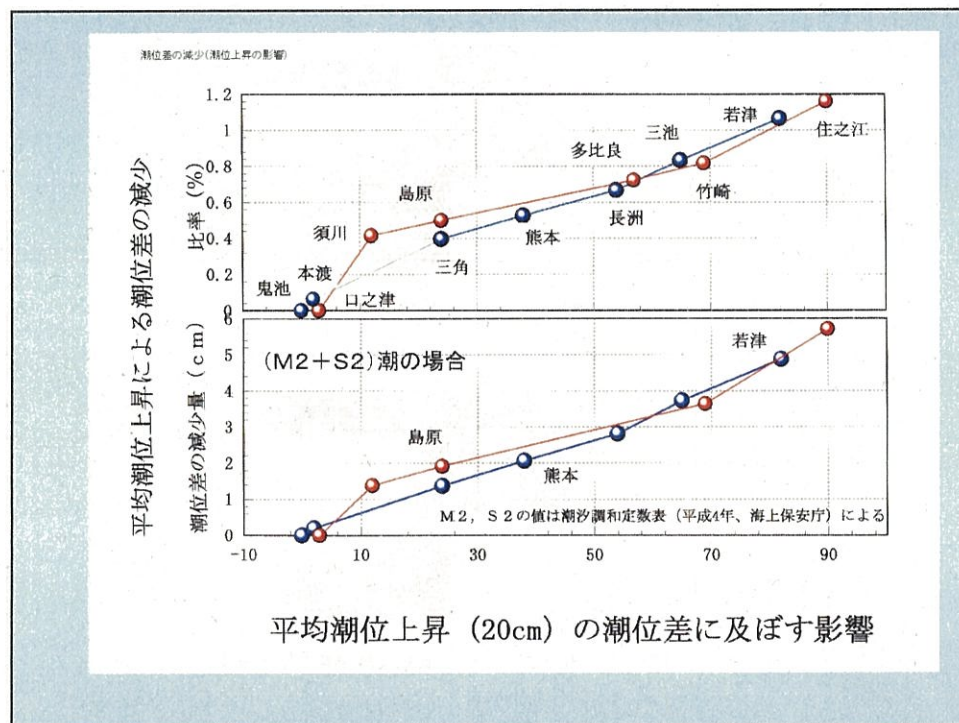
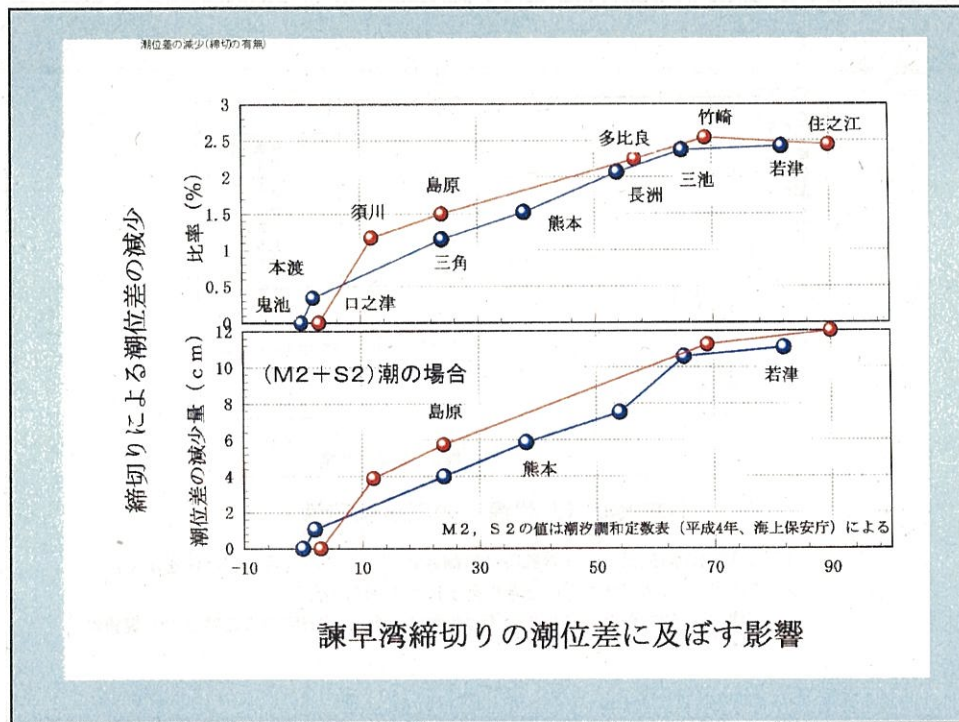
- 1) 3時間の湾振動は9918台風時に観測されており、本計算の妥当性を示す。
- 2) 周期が9時間より大きいときの高水位は有明海の影響。
- 3) 周期が2時間程度より小さい所は振動の振幅が単調増加またはうなり現象が現れて定常になっていない。

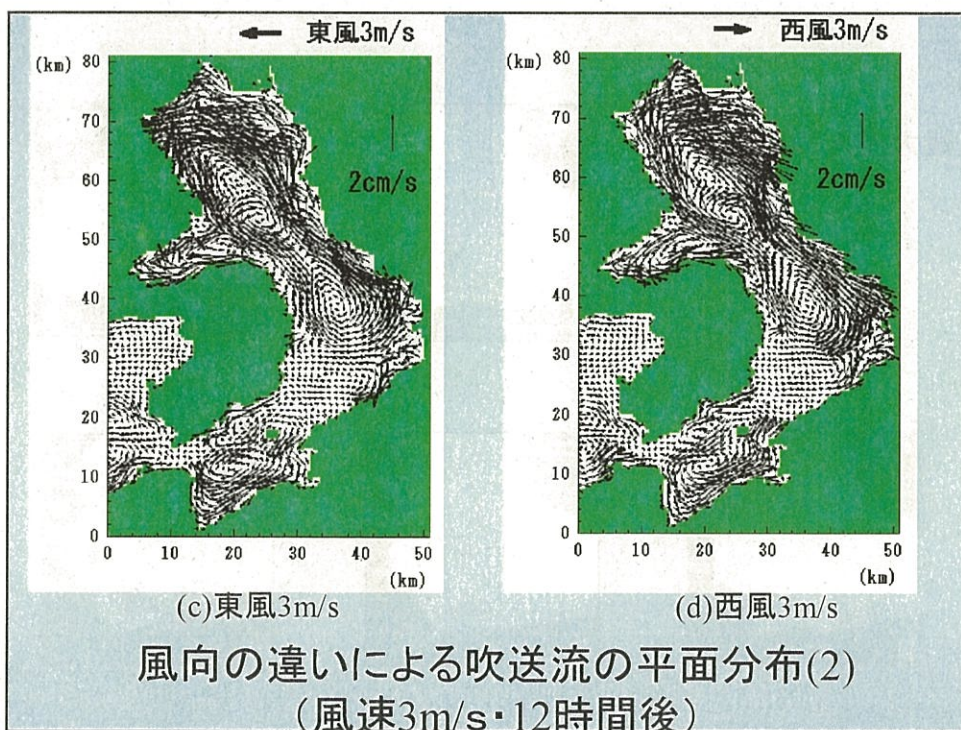
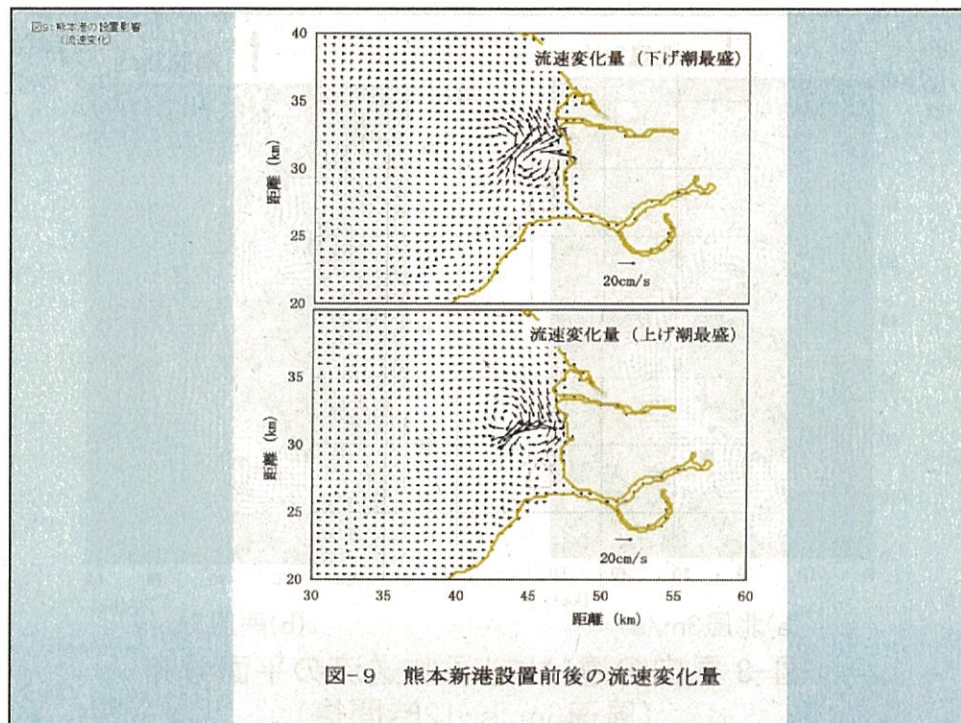


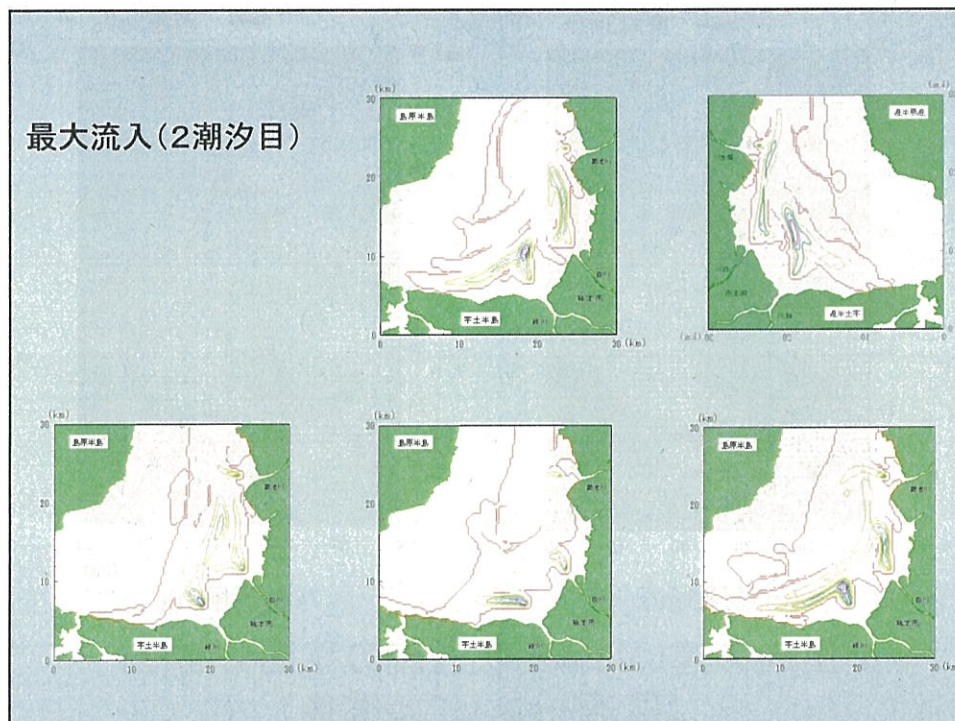
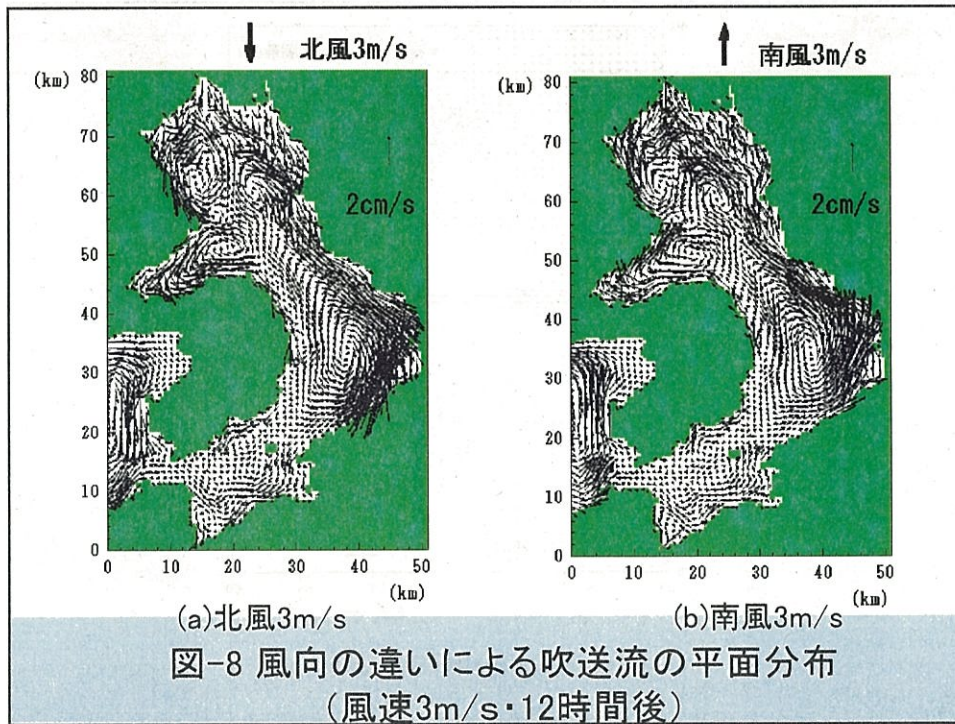
図一七 部分拡大 残差流量(線流量の恒流)

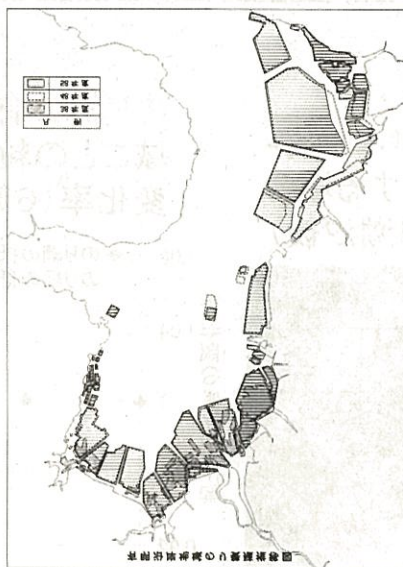


図一八 部分拡大 残差流量(諫早湾縮切り後)









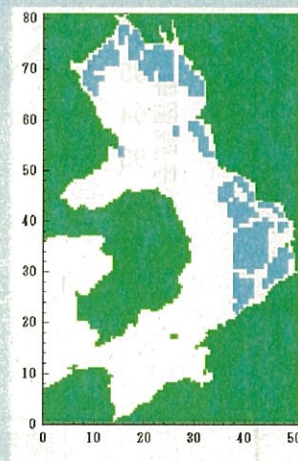
のり作付け経年変化

のり網の有無による流況の比較

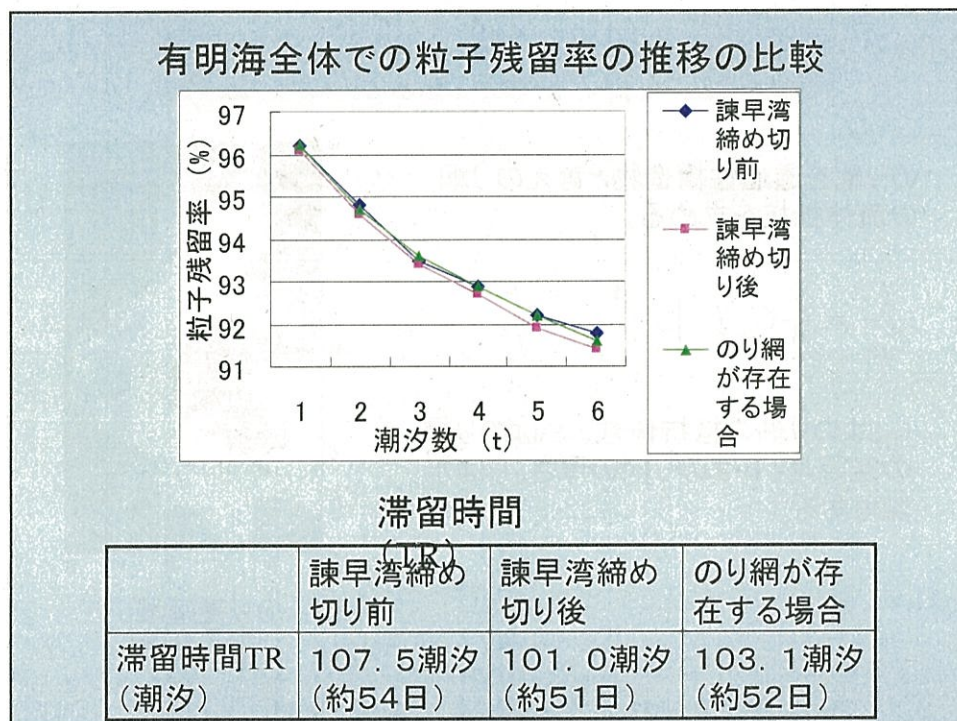
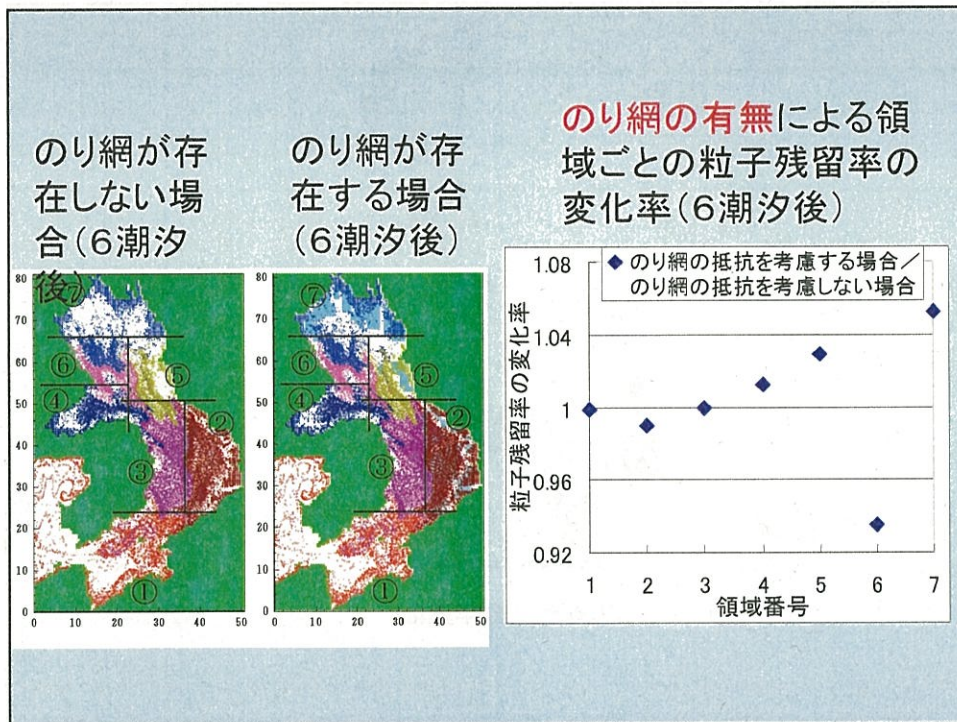
のり網を透過性構造物と考え、のり網の流体抵抗を求める。

$$\frac{F}{\rho} = \frac{1}{2} C_D U |U| \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^2} \frac{B}{H}$$

C_D はのり網の抵抗係数、 ε はのり網の空隙率、 B はのり網の厚さ、 H は水深である。



のり養殖域
(昭和58年
度)



海岸線の減少

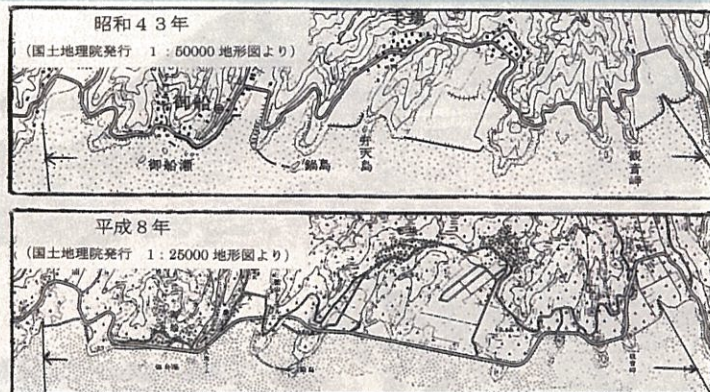


図-11 海岸道路整備に伴う海岸線の経時変化
(国道266号線：三角町と不知火町鏡)

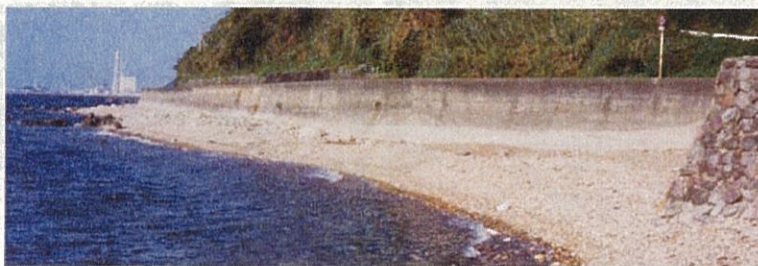


砂浜の減少(牛深福浦海岸；砂浜が厚さ50cmも減少(写真上)し、ウミガメの卵が灌水して孵化出来ず)

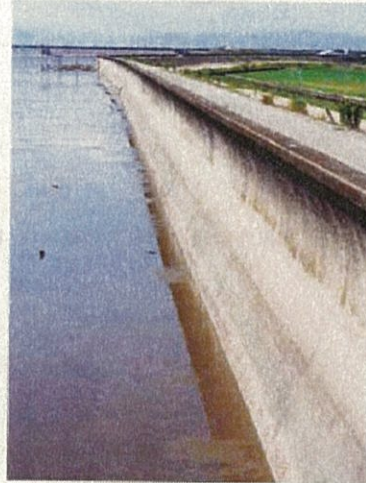
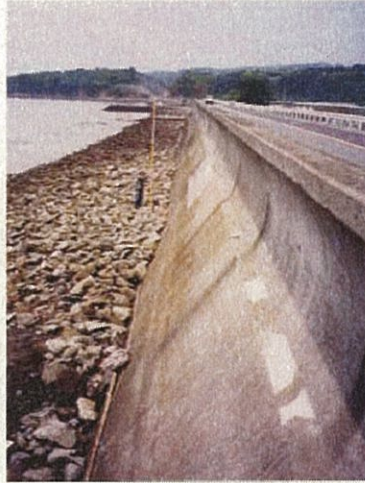
岩礁海岸



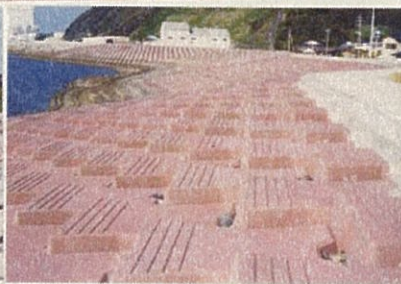
岩礁海岸（写真上：牛深茂串海岸； 写真下：三角町戸胞（岩礁上に砂礫生息のオニシバが生息））



道路護岸（写真上：帯北町海岸； 写真下：五和町通詞島海岸）



高い道路護岸と干拓堤防（大きな潮位差に対応するため高さの高い護岸と堤防）



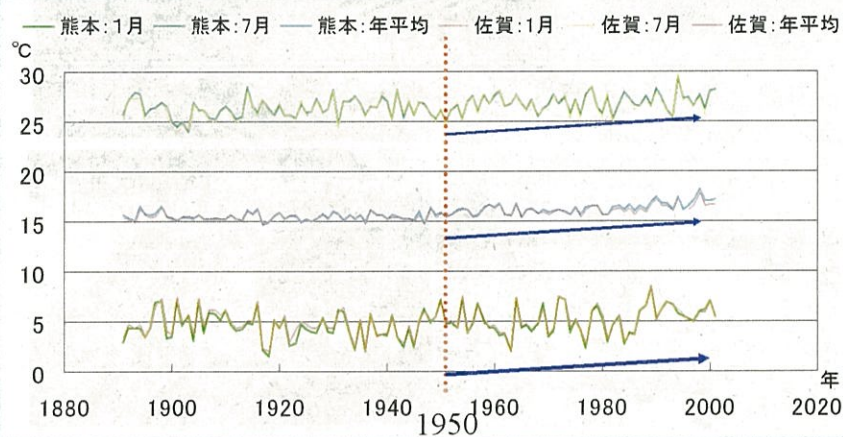
階段式護岸（写真上：苓北町海岸； 写真下左：荒尾地先海岸； 写真下右：苓北町都呂々）

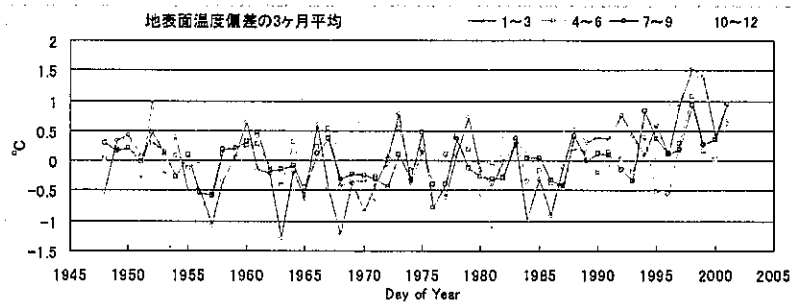
2. 気象変動特性

気象庁年報, アメダス観測年報, NCEP客観解析データ, TREMM観測データ

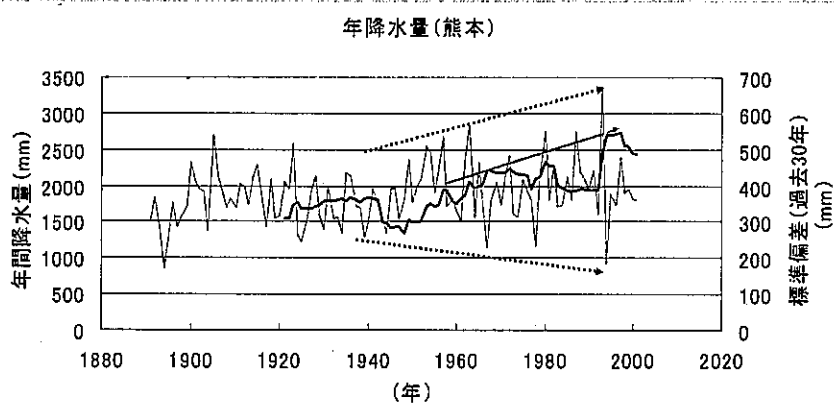
熊本・佐賀地方気象台における気象観測記録(1)

日平均気温の年々変化

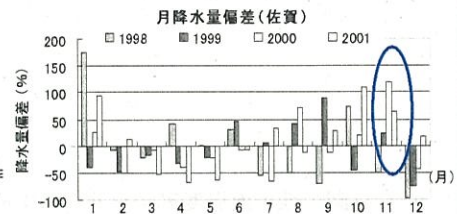
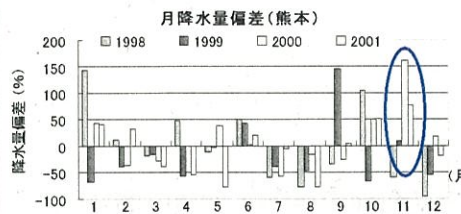
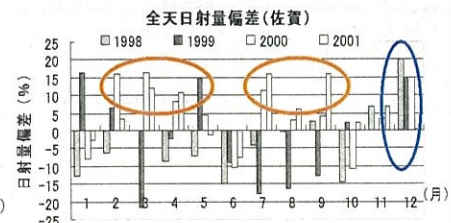
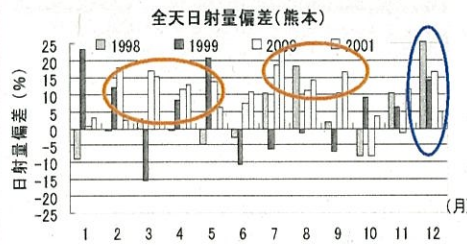




図：地表面温度アノマリーの3ヶ月平均値の経年変化（1948～2001）



図：熊本地方気象台における年間降水量（細線・左軸）及び
過去30年標準偏差（太線・右軸）

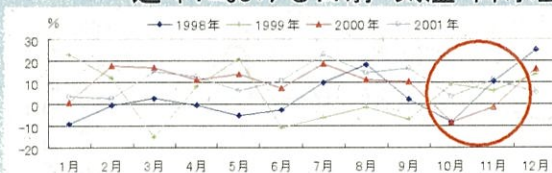


図：熊本地方気象台の全天日射量・
日平均気温・日平均気温の偏差
(1998年～2001年)

図：佐賀地方気象台の全天日射量・
日平均気温・日平均気温の偏差
(1998年～2001年)

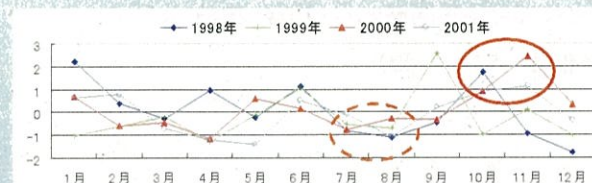
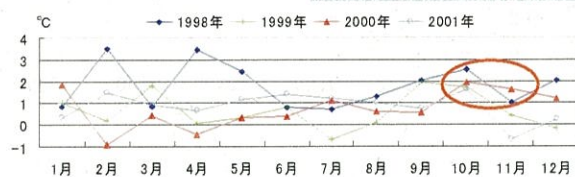
熊本地方気象台における気象観測記録(2)

近年における日射・気温・降水量偏差の変化



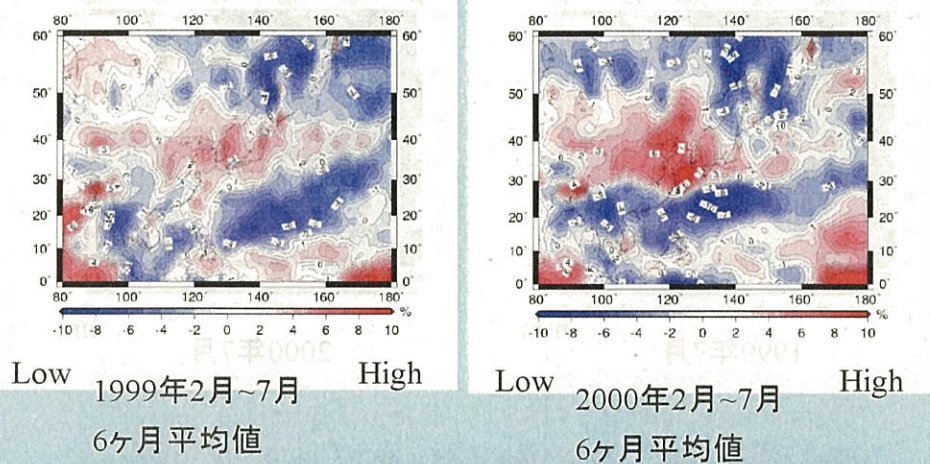
日射量偏差
(対平年値)

月平均気温偏差



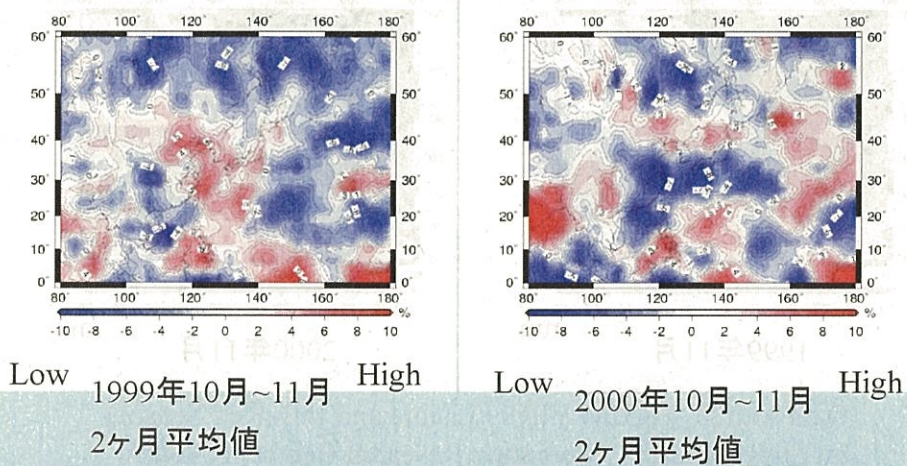
月降水量偏差
(標準偏差で無次元化したもの)

下向き短波放射フラックス(日射量)のアノマリー分布
(1)



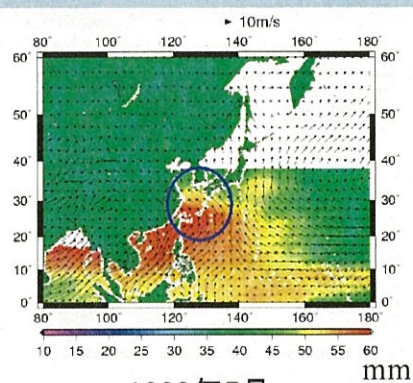
Data source: NCEP Reanalysis (UCAR, USA)

下向き短波放射フラックス(日射量)のアノマリー分布
(2)

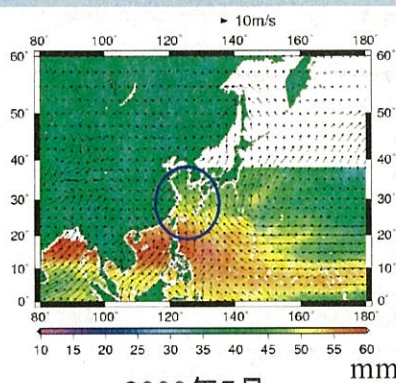


Data source: NCEP Reanalysis (UCAR, USA)

可降水量分布 (1)



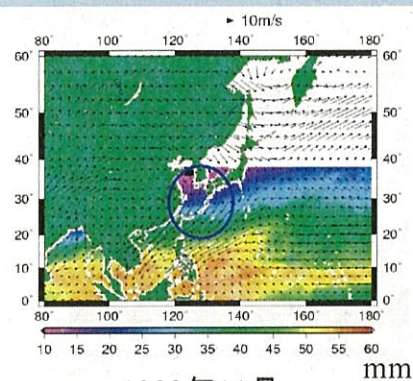
1999年7月



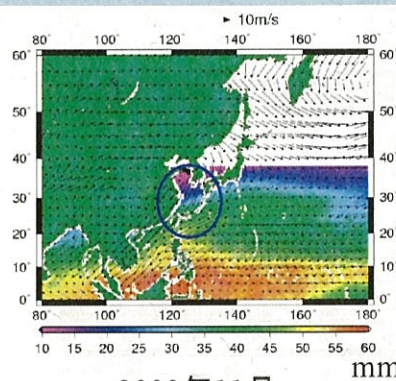
2000年7月

Data source: TRMM VIRS (Visible and InfraRed Sensor)
by EORC (Earth Observation Research Center) NASDA
Wind vector at 10m above ground level: NCEP Reanalysis

可降水量分布 (2)

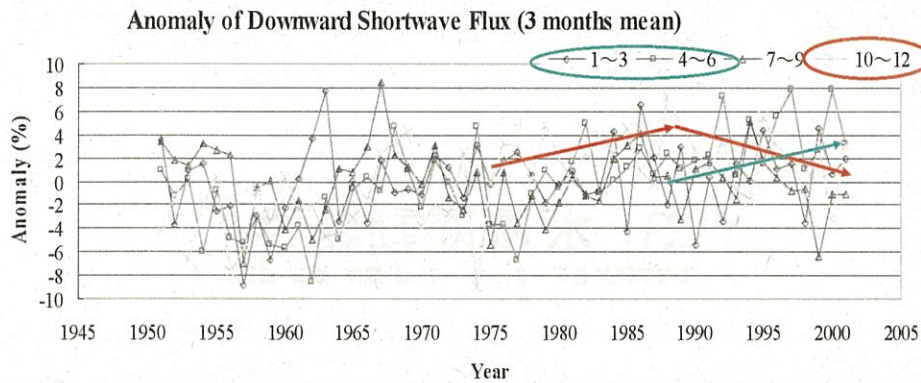


1999年11月



2000年11月

Data source: TRMM VIRS (Visible and InfraRed Sensor)
by EORC (Earth Observation Research Center) NASDA
Wind vector at 10m above ground level: NCEP Reanalysis



図：有明海・東シナ海

下向き短波放射フラックスの偏差の経年変動

赤潮の大量発生やノリの色落ち被害など、環境悪化に伴う諸問題が顕在化した2000年について

(1)夏季モンスーンの発達が近年の他の年と比べて弱く、太平洋高気圧の発達に伴い、7月において高日射状態が続いたこと、

(2)赤道付近の降水振動が東シナ海の降水パターンに少なからず影響を与えており、2000年秋季の大量降水もその一つである可能性であるという特徴があげられる。

(3)そして、2000年秋季の降水と12月に入り日射量が増大したことで高温状態が続いたことが、

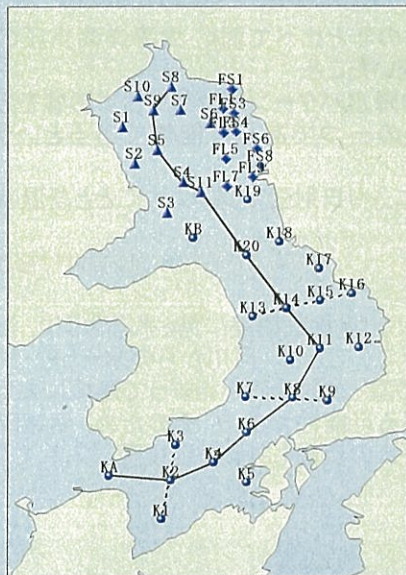
ノリの色落ち被害へと至る一つの気象的(気候的)要因として結論付けられる。

数十年規模の長期的な変動について、30年移動偏差に見られるように、近年降水量の年々変動が大きくなっている。このことは、河川からの水・土砂・栄養塩など物質流入量の不安定化、上空の雲・放射過程と相まって海域における物質循環・生態系への影響へとつながる可能性がある。そのため、海域環境の回復・保全にあたっては、越年スケールの変動もある程度視野に入れて取り組む必要があるといえよう。

3. 水質変動特性

浅海定線調査データ(1975~2001:熊本・佐賀・福岡)

浅海定線調査点

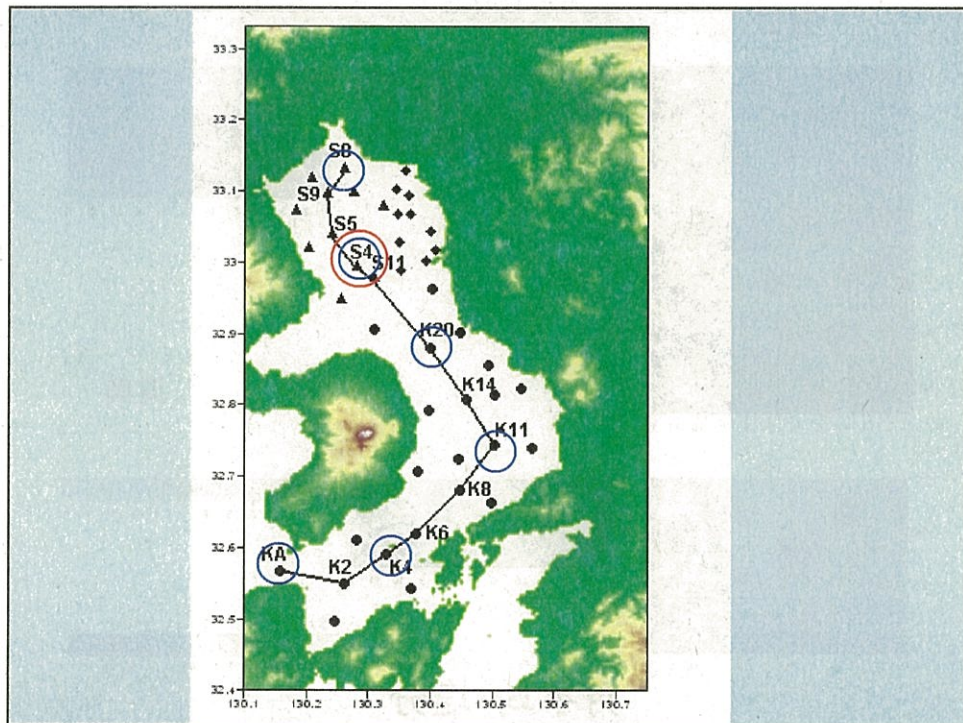


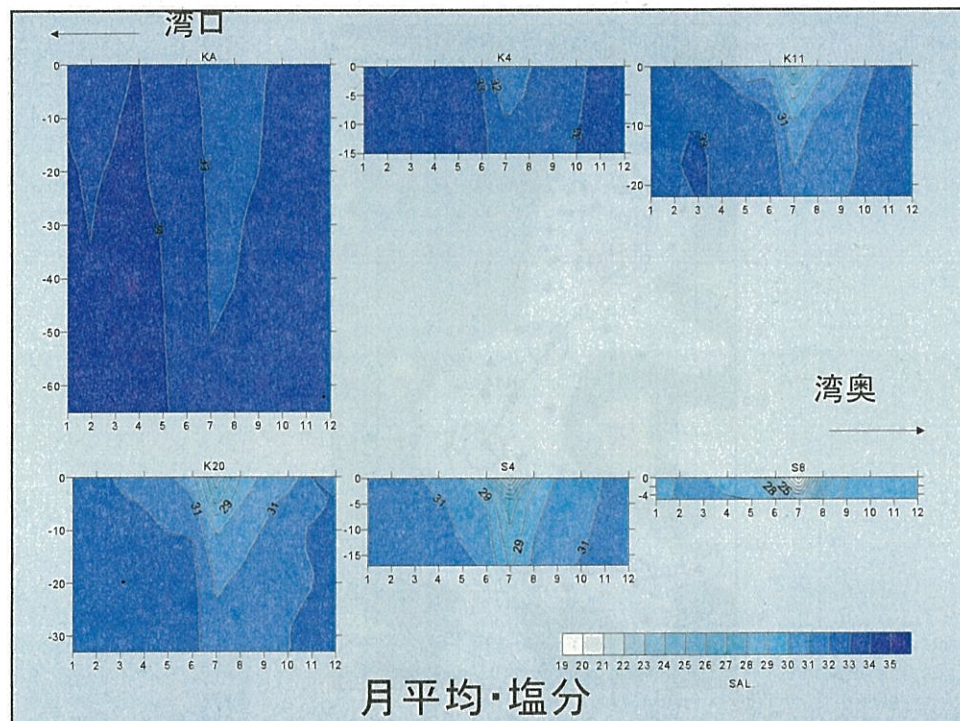
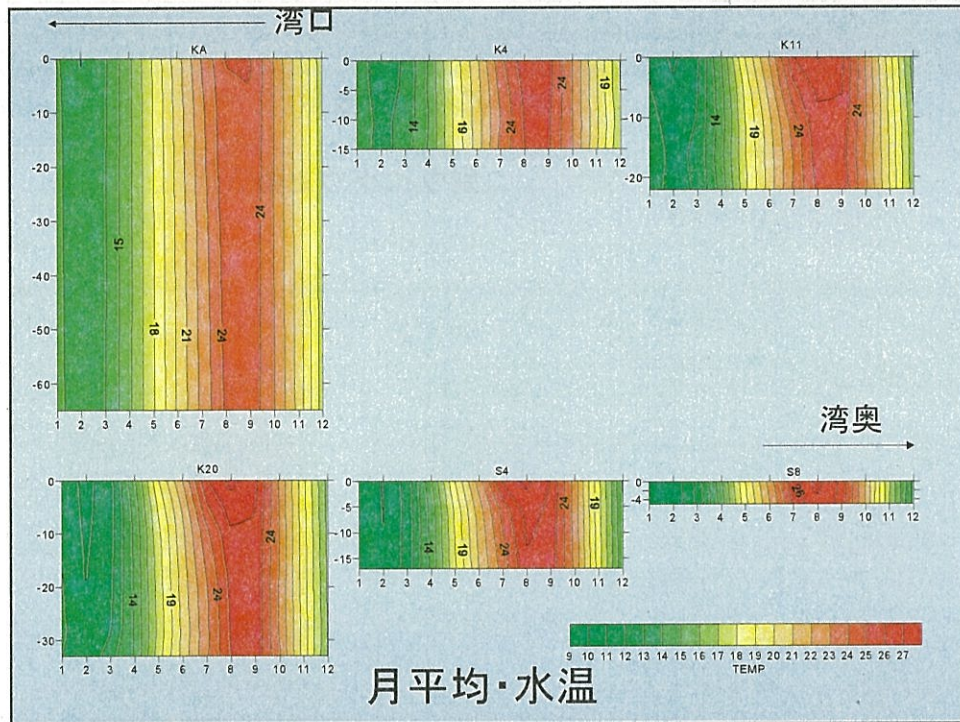
調査項目

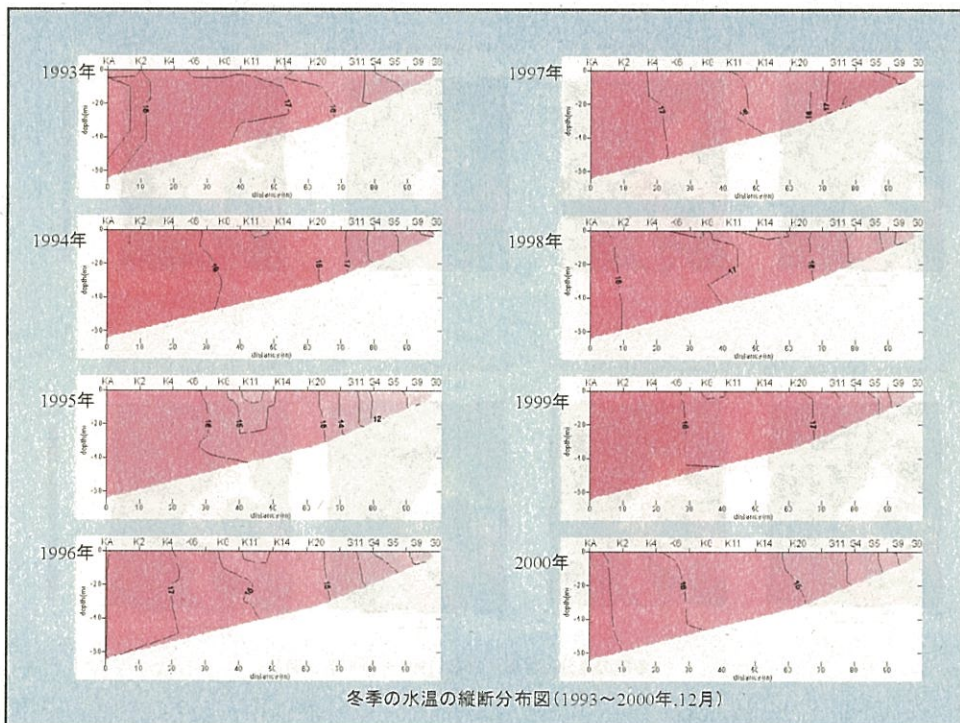
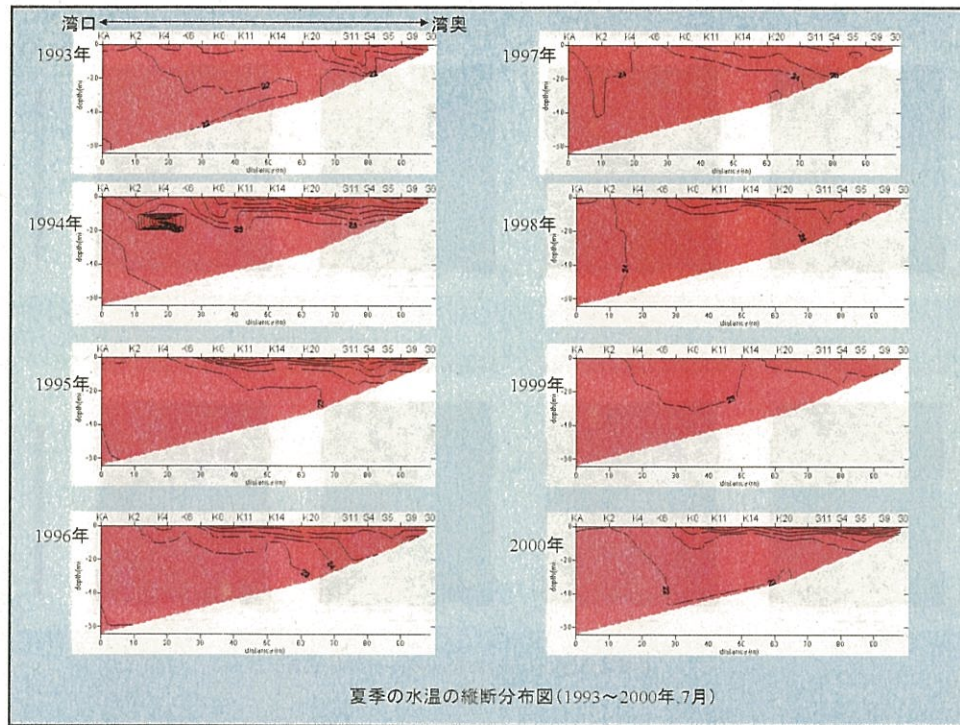
調査地点	水質項目
●熊本県 (22地点)	表層、水深5,10,20,30m,底層: 水温,塩分 水深5m:水温,塩分,DO,COD, PO ₄ -P,NH ₄ -N,NO ₂ -N, NO ₃ -N,DIN,SiO ₂ -Si
◆福岡県 (10地点)	表層、水深5m,底層: 水温,塩分,DO,COD, PO ₄ -P,NH ₄ -N,NO ₂ -N, NO ₃ -N,DIN,SiO ₂ -Si
▲佐賀県 (11地点)	

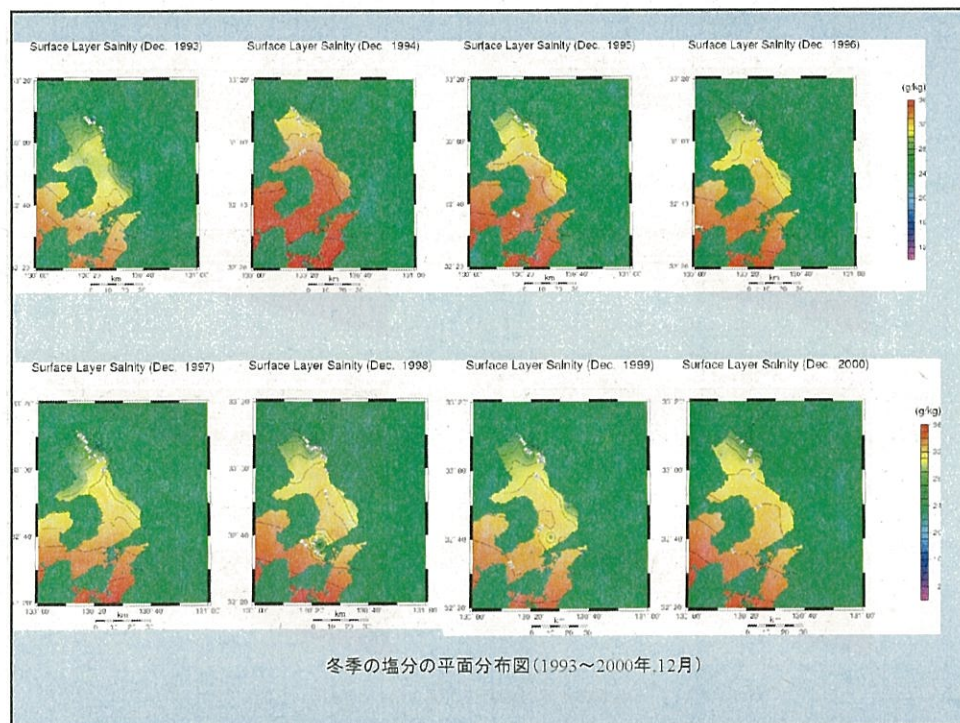
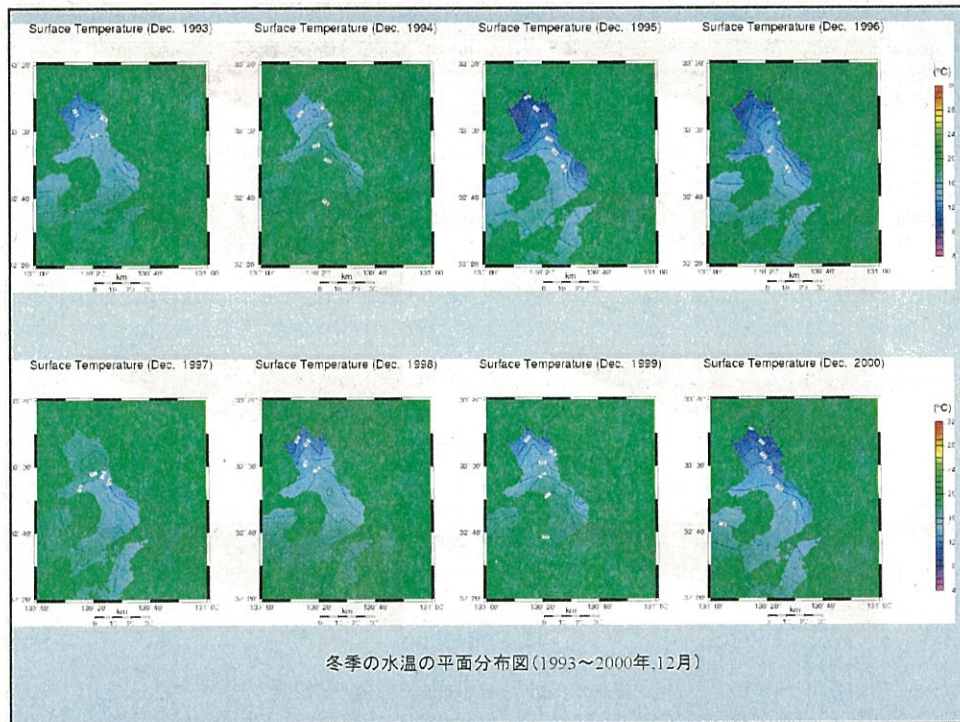
観測地点の平均水深 (別ウィンドウで表示)

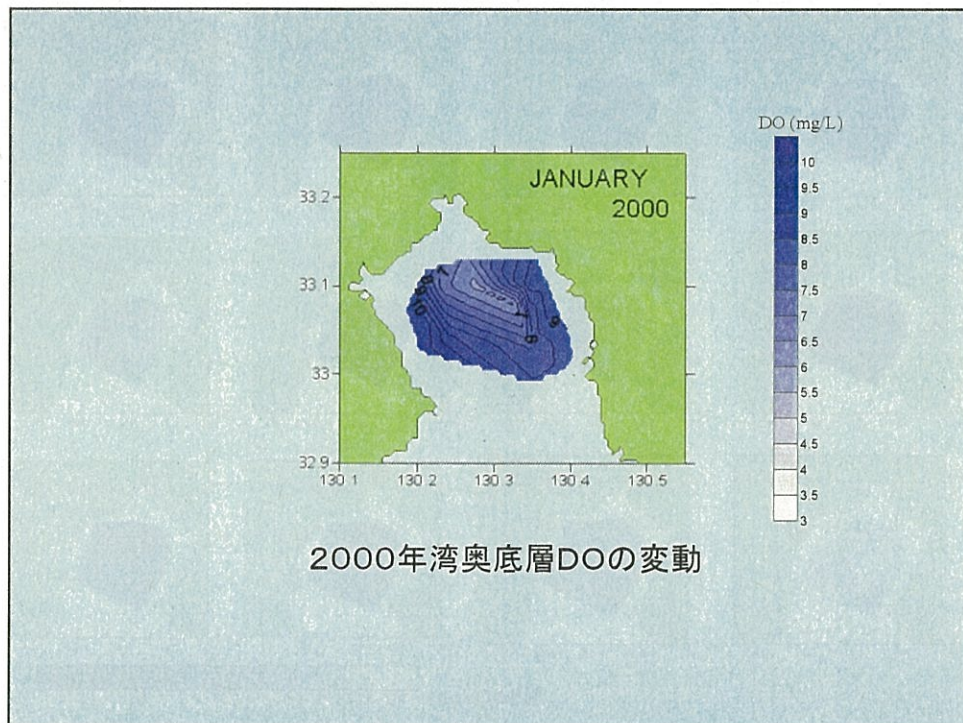
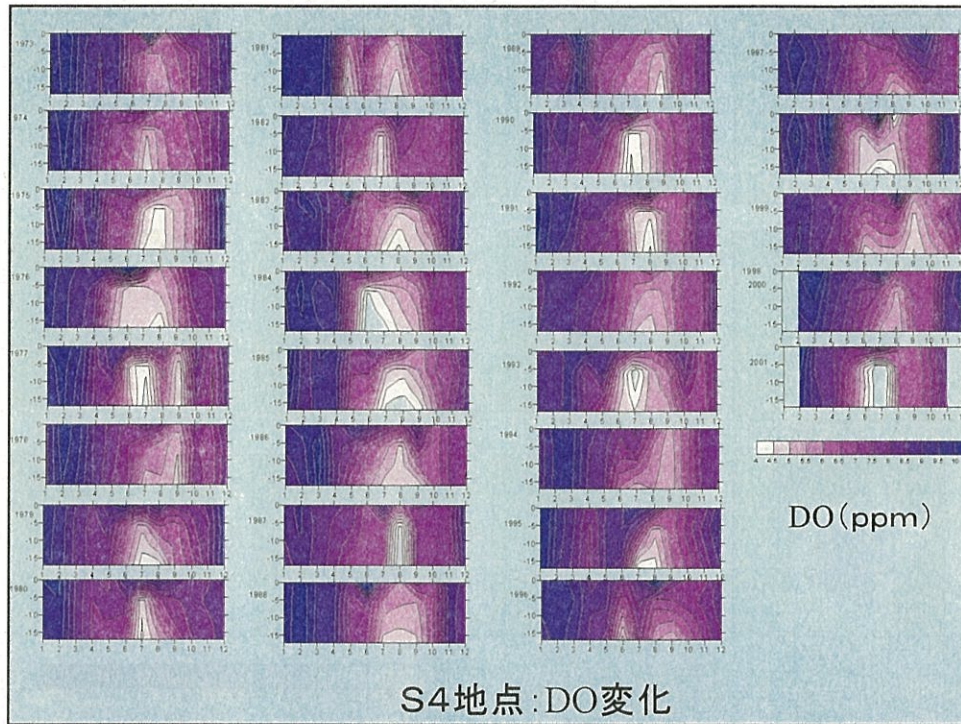
観測地点の水深の分布 (別ウィンドウで表示)

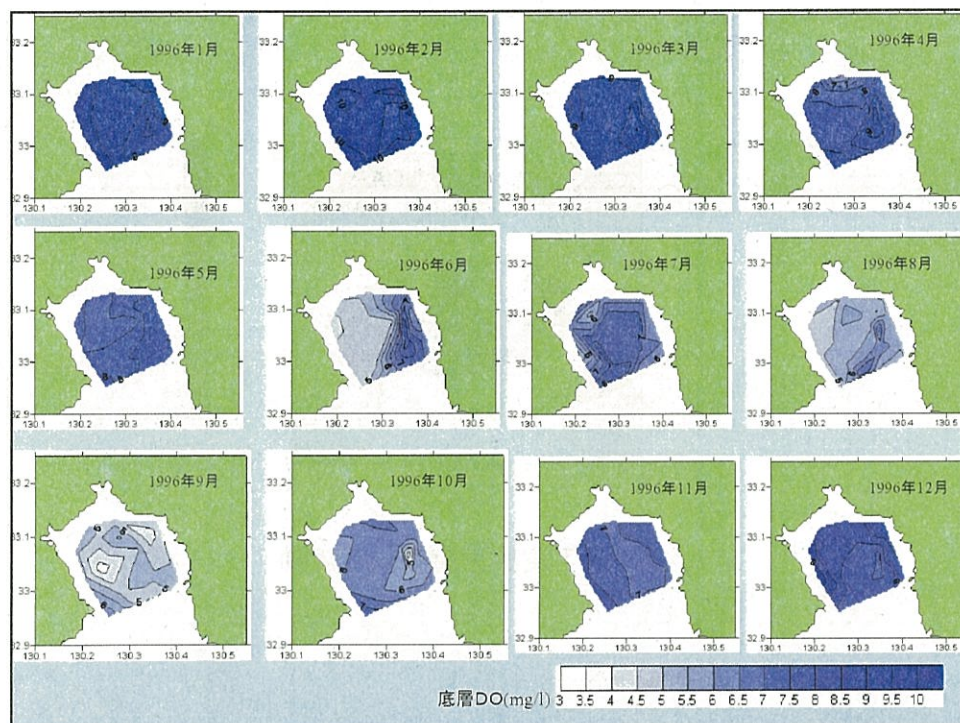
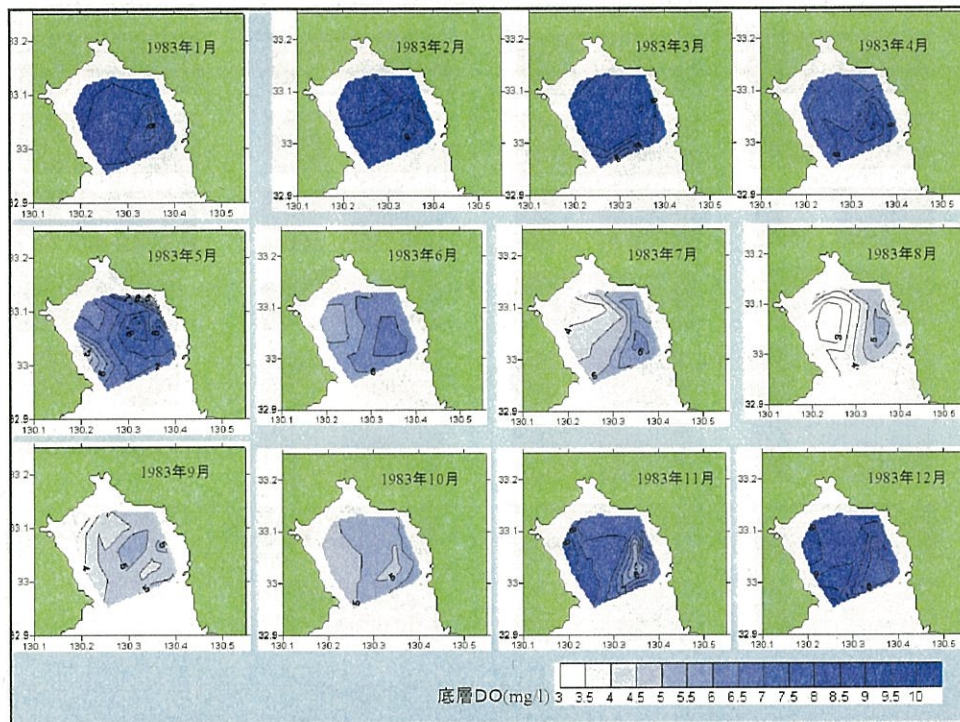


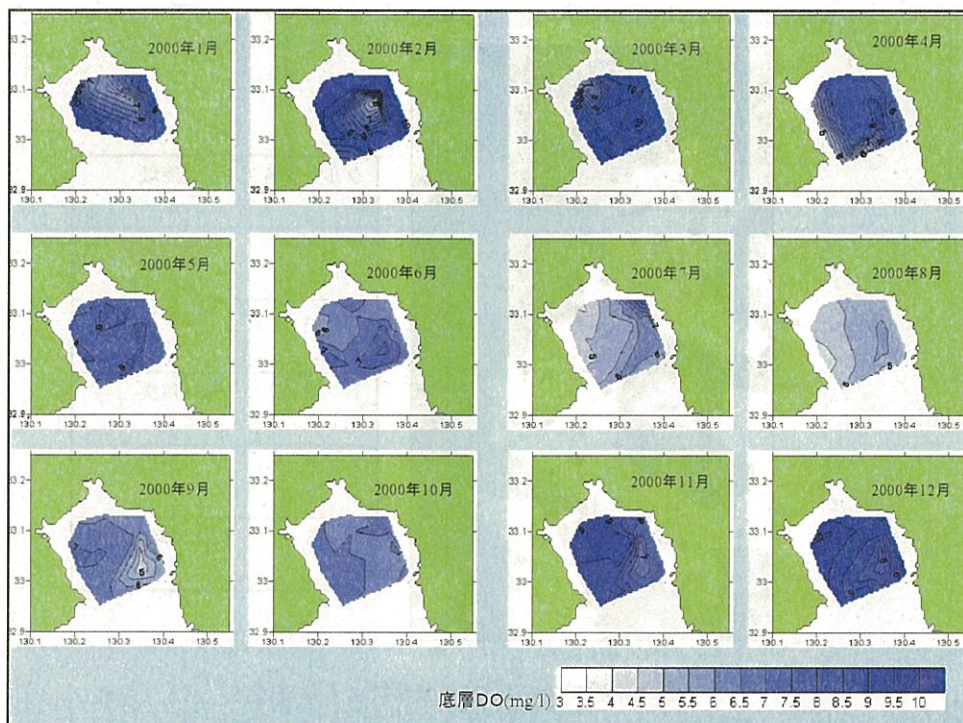
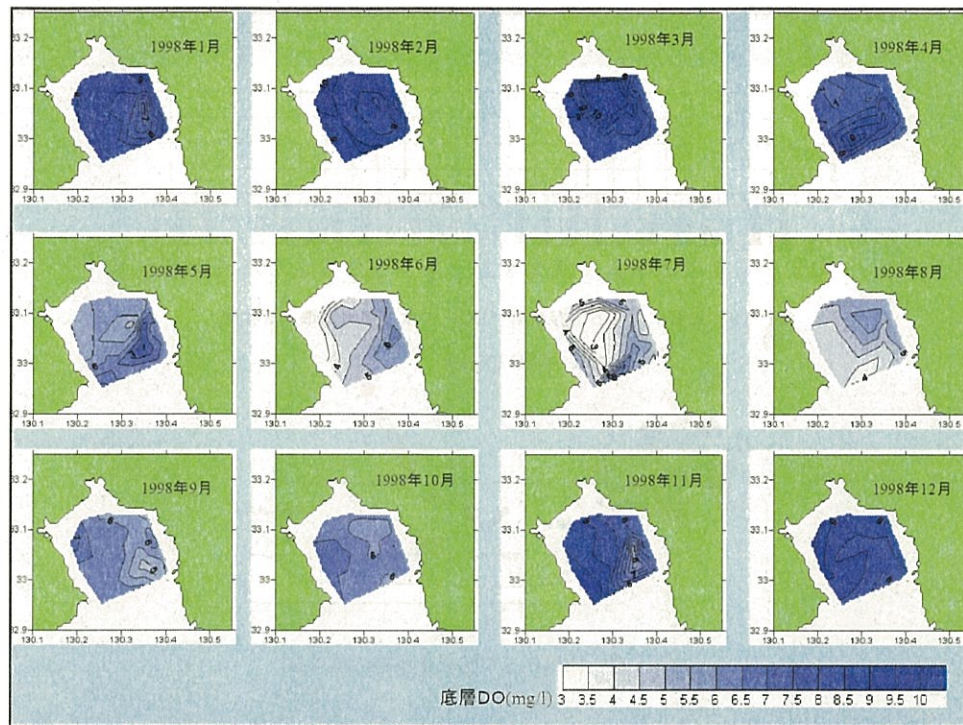












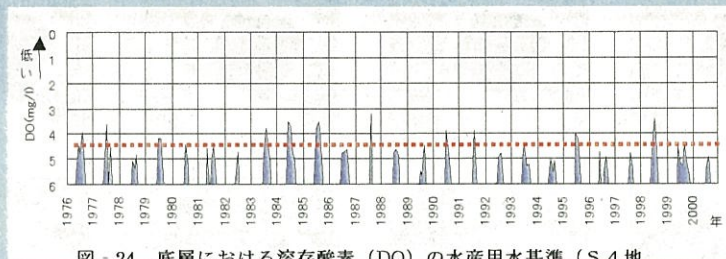


図 - 24 底層における溶存酸素 (DO) の水産用水基準 (S4 地点)

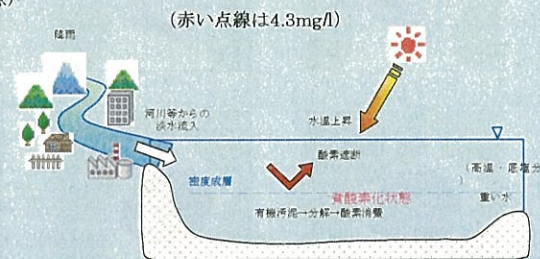
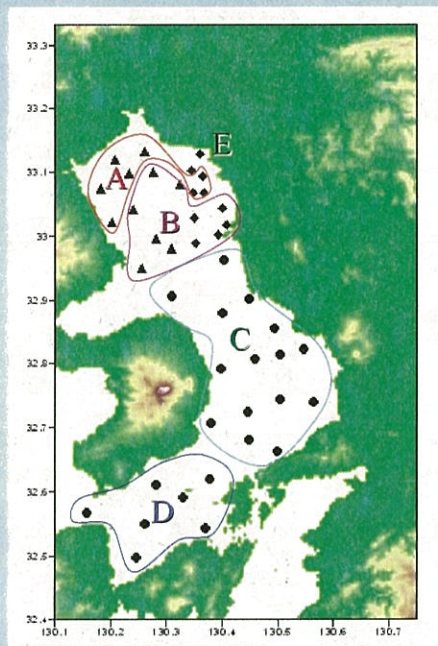
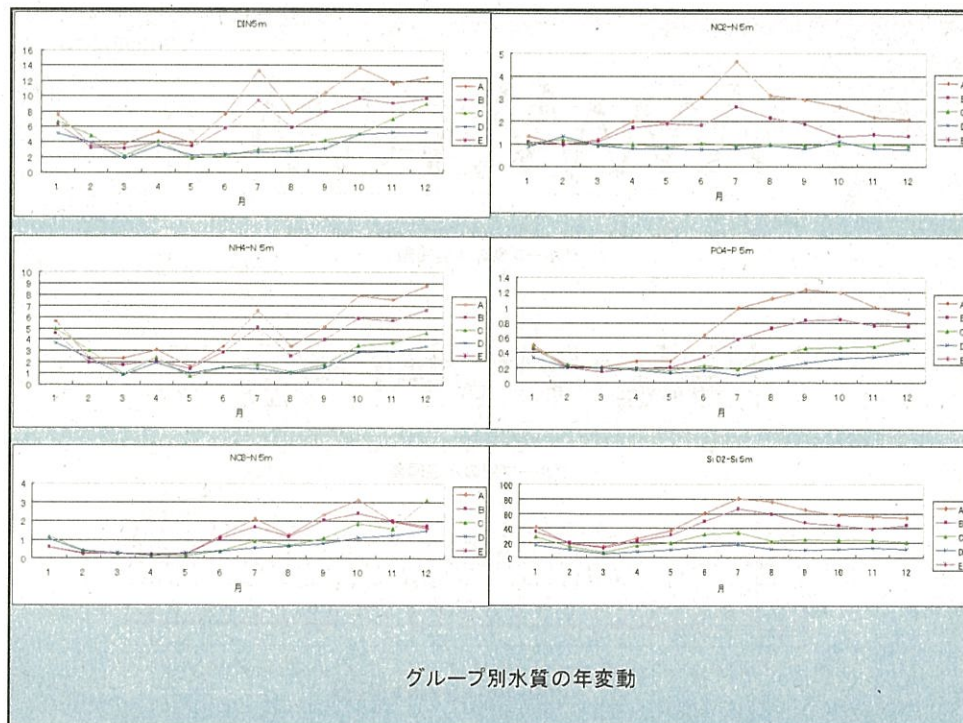
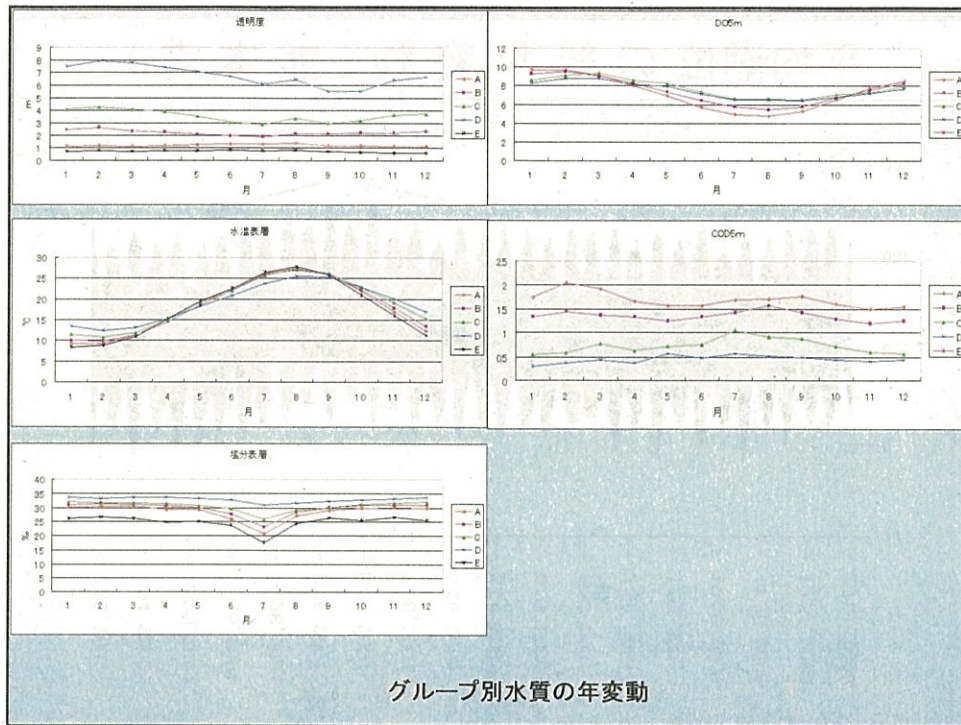


図 - 18 成層化と貧酸素化現象の模式図

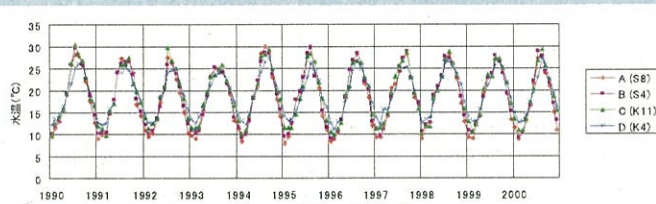
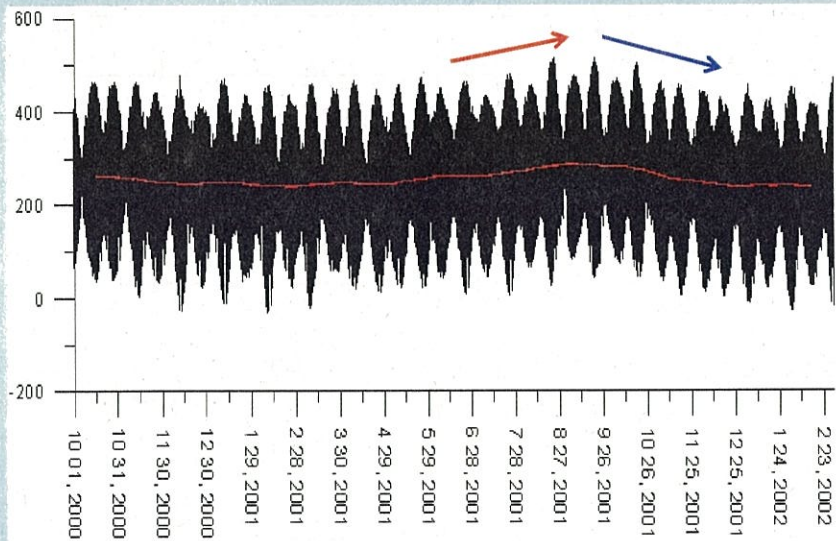


グループ名	海域
A	湾奥北部
B	湾奥南部
C	湾央
D	湾口
E	筑後川河口付近

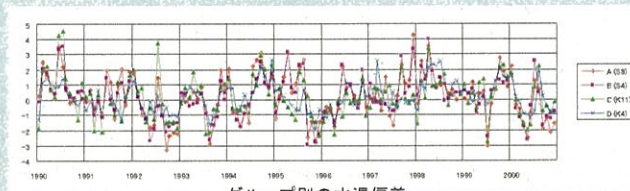
夏季水質でのクラスター分析による海域区分



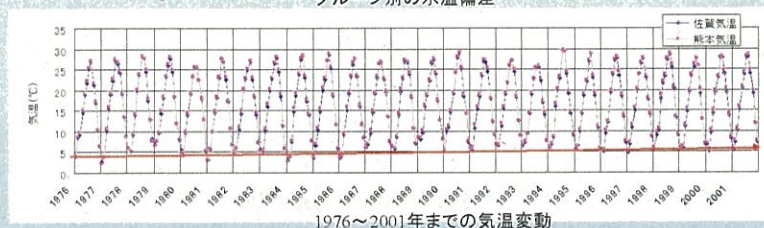
平均潮位の経年変動（熊本港）



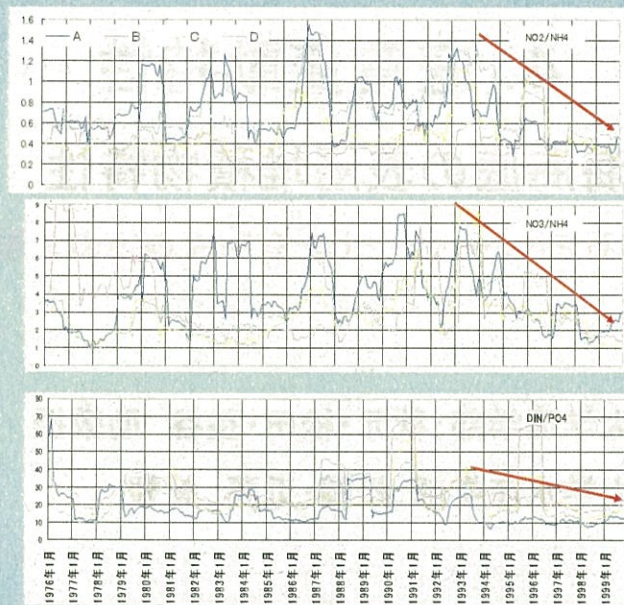
グループ別の水温変動



グループ別の水温偏差

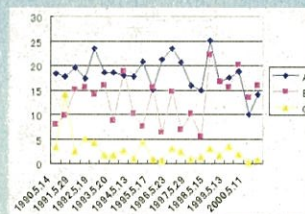
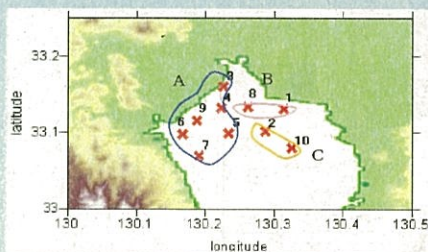


1976～2001年までの気温変動

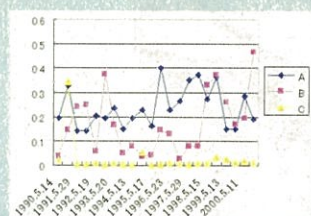


G別 : 硝酸態/アンモニア態 : DIN/珽素 比

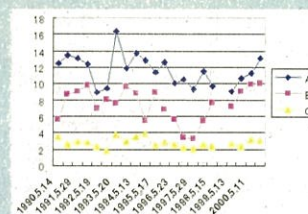
底質分析



(a) CODの経年変化



b) 硫化水素の経年変化



(c) 発熱量の経年変化

4. 底質変動特性

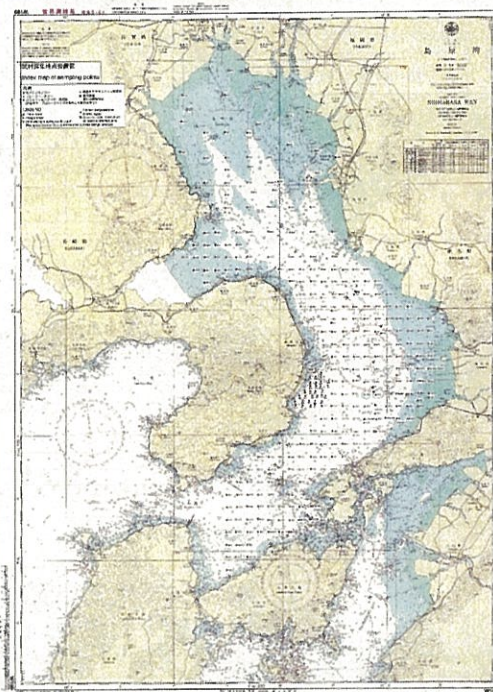
有明海海底の表層堆積物特性

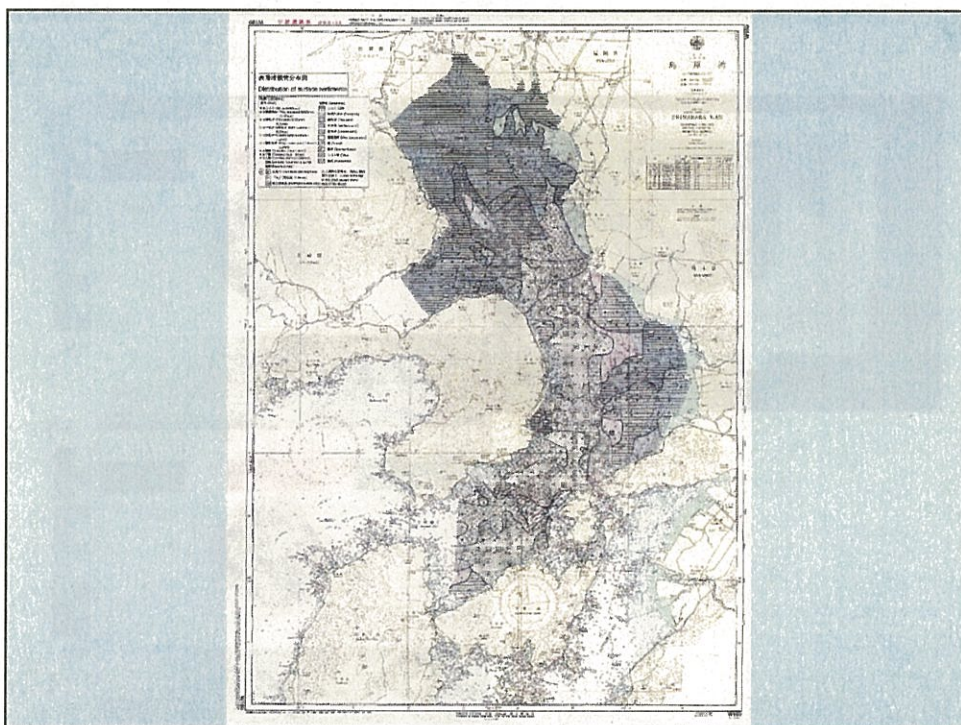
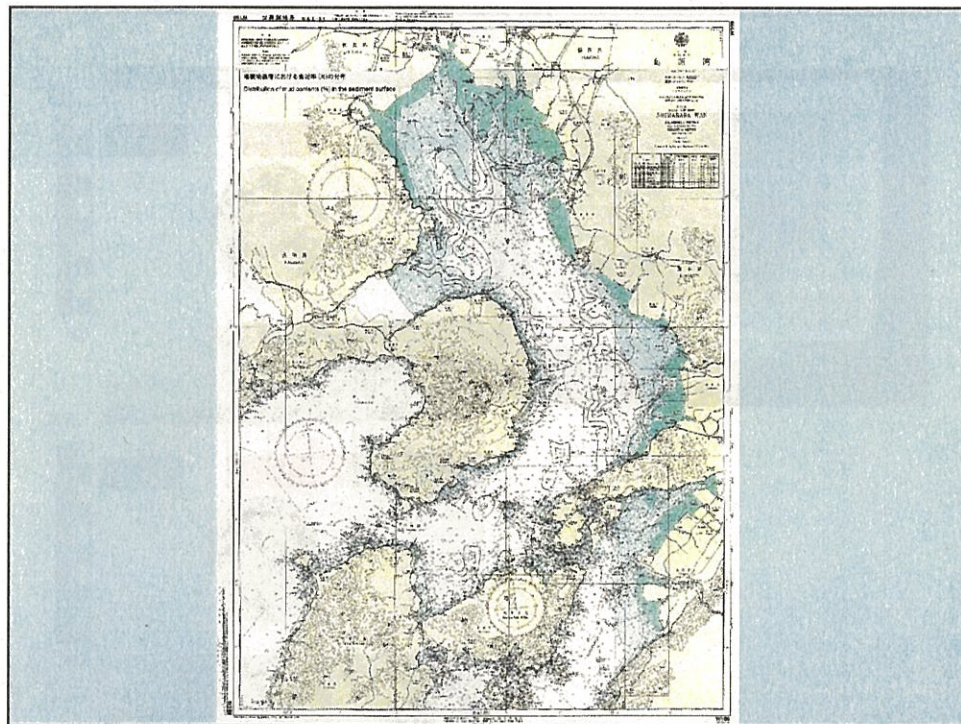
(微化石をトレーサーとした有明海環境の変遷調査)

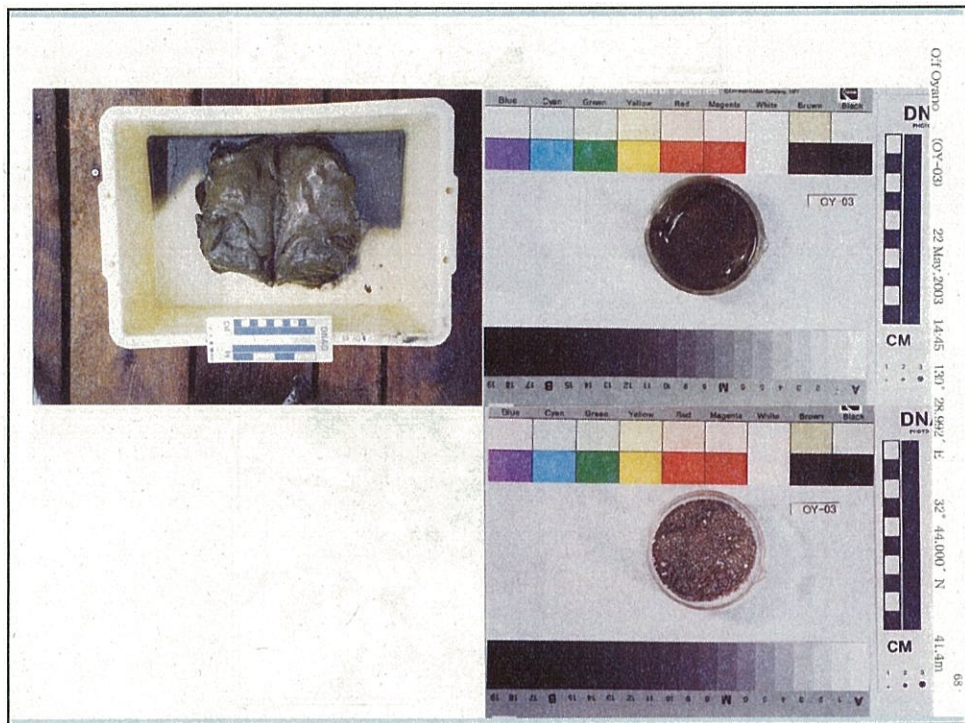
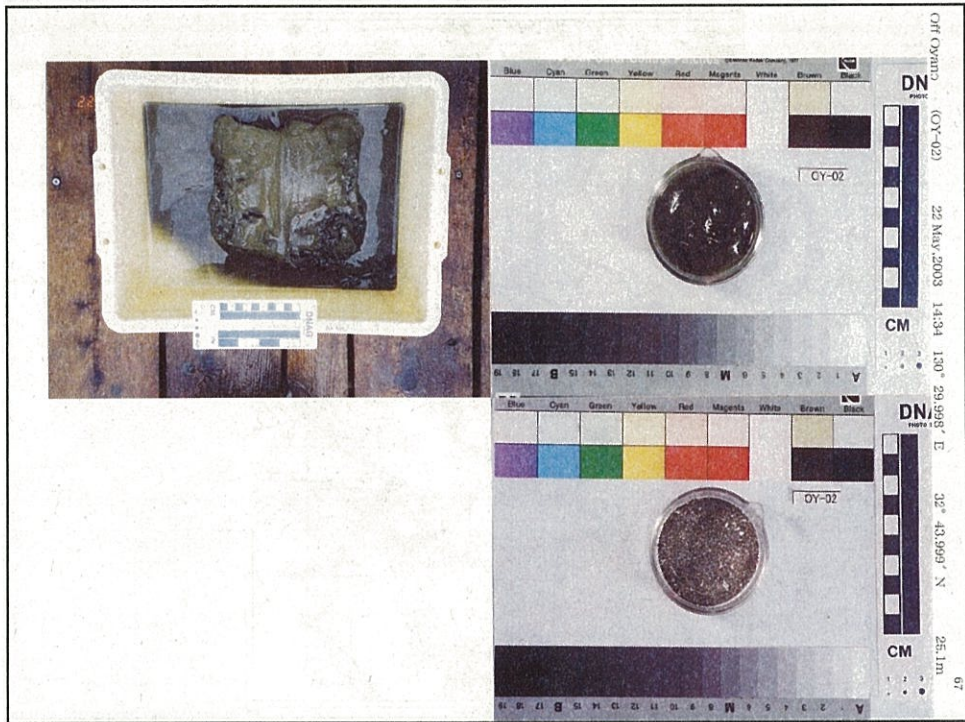
調査グループ:

熊本大学理学部: 秋元・松田・長谷 助教授

長崎大学水産学部: 松岡・近藤 教授



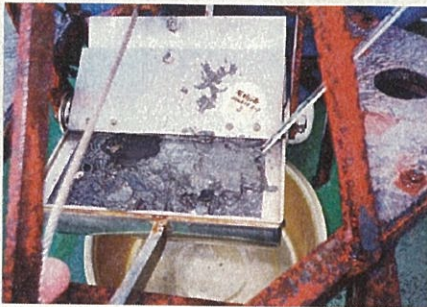


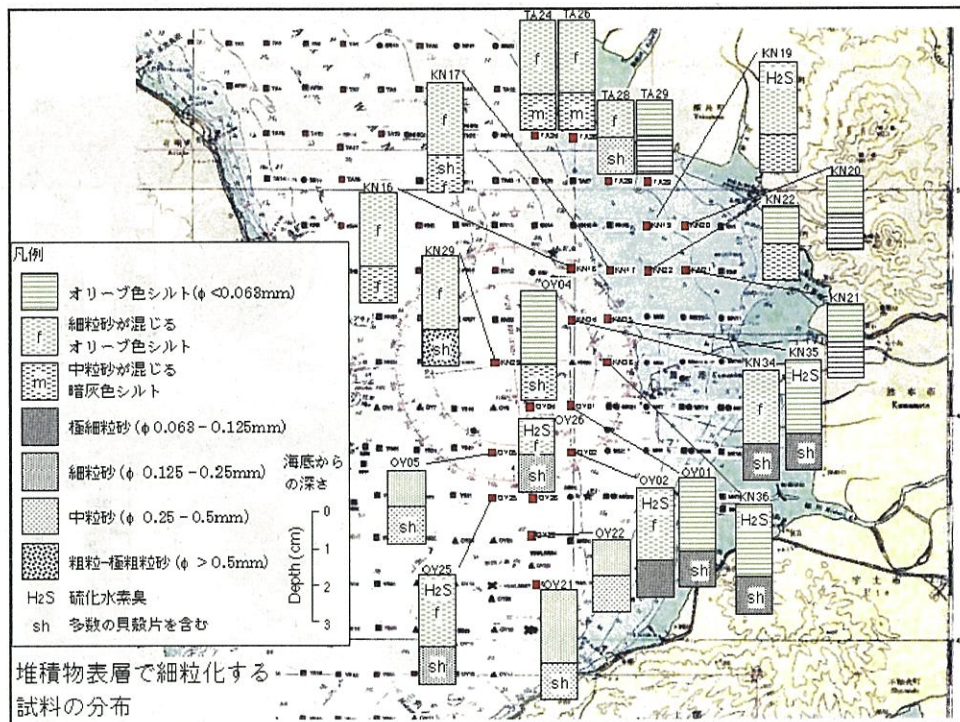


NG01/10 (01.11.6-7) ST.2, 33° 03.96'N, 130° 16.99'E, 13.7m, 軟泥のため、採泥不能、H₂S臭強い、サンプルは採集
採集時 (長崎大・近藤寛先生撮影)



NG01/10 (01.11.6-7) ST.3, 33° 02.01'N, 130° 13.01'E, 10.4m, 泥、貝殻少し、H₂S臭強い
採集時 (長崎大・近藤寛先生撮影)





改善の試み

改善への処方箋

基本的には

1. 「人為的インパクトの低減」
2. 自然環境の回復能力の再生、特に「干潟環境の回復と創造」および
3. 河川水を含めた「水質の改善」が必要である。

自然のおよび人為的インパクト：

①自然的インパクト：

地球温暖化、外海水の流入、台風にもなう高潮・高波、大雨に伴う河川水・土砂の流入、海底陥没等による干潟の減少、地形（干潟地形）の変化など

②人為的インパクト：

公共施設の建設、漁業・養殖業を含む各種の産業活動、内陸の都市化等にもなう負荷の量と質の変化など（特に、海岸における「なぎさ線」の喪失、干潟の消失、環境汚染物質の流入と蓄積、陸域からの栄養物質の負荷、ノリ養殖における酸処理剤の使用や施肥、砂利採取による海底地形変化など）

事 例

熊本大学との共同研究

①渚線の回復（玉名横島）

農林水産省 九州農政局 玉名保全事務所

②干潟耕耘（熊本港大橋南側）

国土交通省 九州地方建設局 熊本港湾空港工事
アジアプランニング

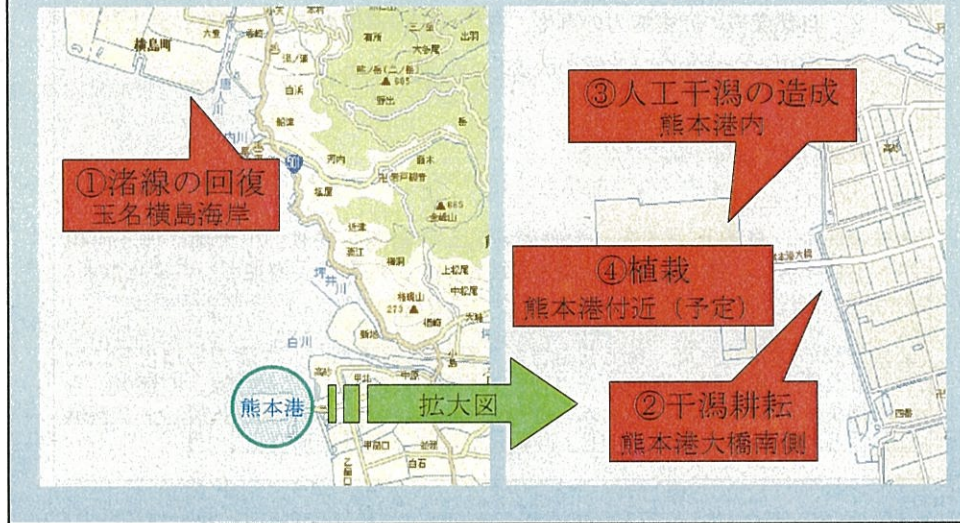
③人工干潟の造成（熊本港内）

NPO:みらい有明・不知火+熊本県
アジアプランニング

④植栽による改善（熊本港付近）

テトラ(株)

対策工実施地点



八代海のゴミ



海域整備船



〇〇海防整備船(イメージ)



〇〇海防整備船(イメージ)

新環境整備船

10月にデビュー

熊本港湾・空港整備事務所

本船は、環境整備船として、主に、
港湾・空港の周辺海域の清掃、
海藻の除去、
沈没物の回収、
などを行います。
本船は、環境整備船として、
主に、
港湾・空港の周辺海域の清掃、
海藻の除去、
沈没物の回収、
などを行います。

【主要設備】
船名 環境整備船
船型 環境整備船
主機 1,200kW
トン数 100t
乗員数 10名
その他 各種機器

【主要設備】
船名 環境整備船
船型 環境整備船
主機 1,200kW
トン数 100t
乗員数 10名
その他 各種機器

被害被災(災害)

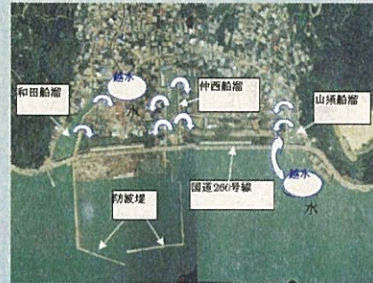
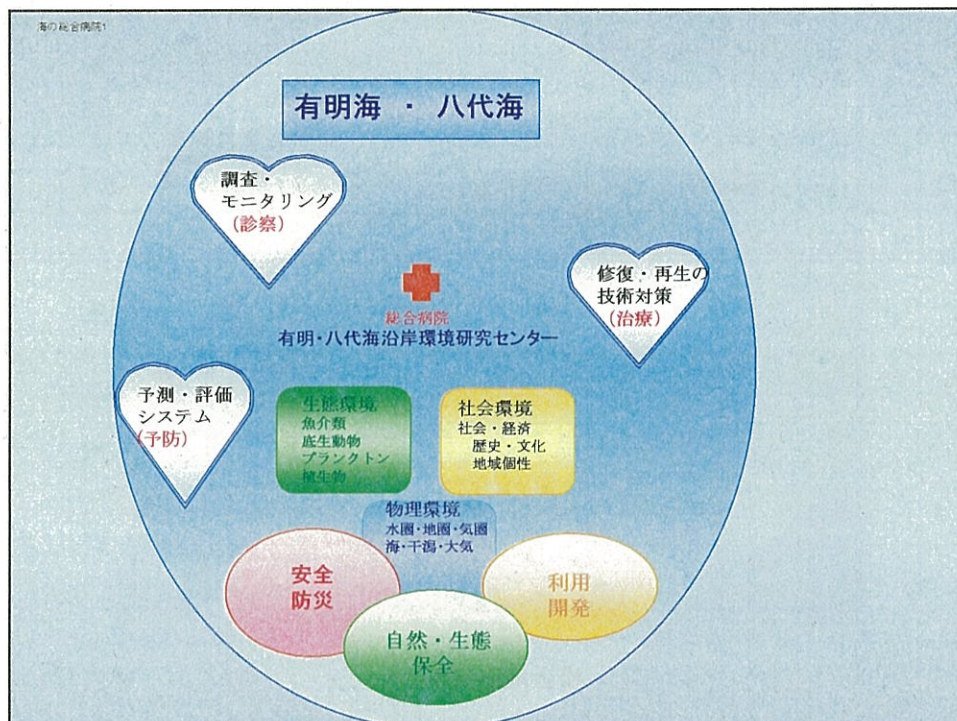
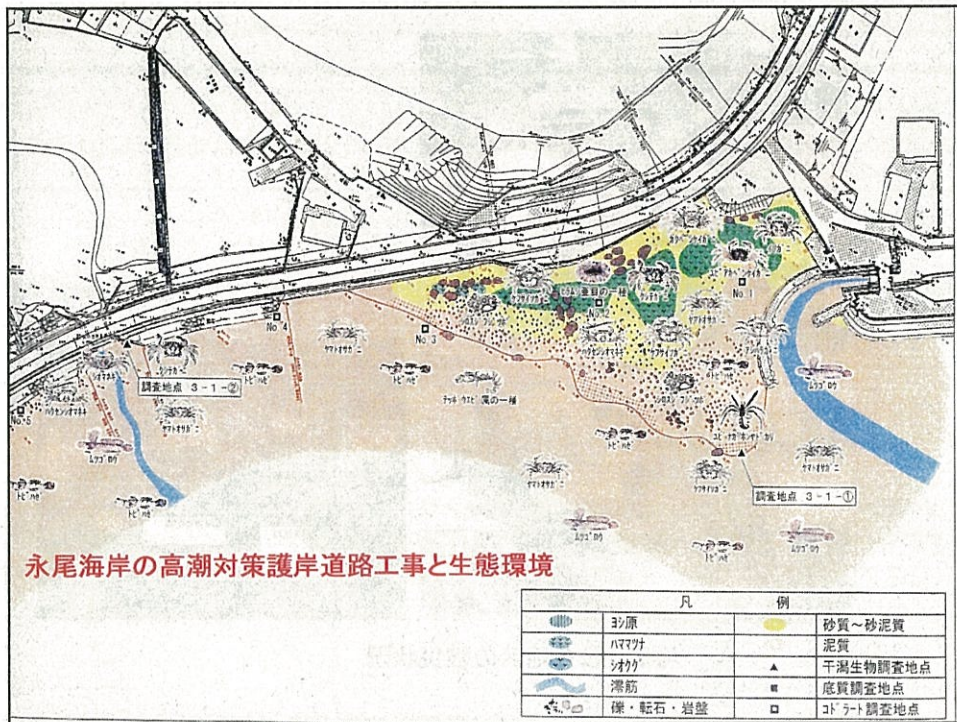


写真 松合地区の被災状況



松合地区現況



自然再生推進法＋有明・八代再生法

自然再生推進法：平成15年1月 制定

損なわれた生態系や自然環境を取り戻すことを目的に、行政機関、住民、学識者等が一体となり、将来にわたる豊かな自然環境を持続し、自然と共生する社会の実現に向けて取り組むこと、また、**地域の自然環境特性、環境容量、生態系等の微妙なバランスを踏まえ、科学的知見に基づいた自然再生の実施がなされるべき**

有明海・八代海総合調査評価委員会

有明海・八代海の再生法（平成14年11月末）に基づき、国の諮問委員会（平成15年2月～）

（24名の学識者等＋臨時委員1名）
改善への提言等を行う

地域特性と物理・化学＋生態系バランス

→ 海域全体のバランス（ゾーニング）