

IV. 有明海湾奥部干潟・浅海域の底質環境変遷に関する総合考察

1 長期的変遷（数百年スケール）

現在の有明海の形成はおよそ 10,000 年前にさかのぼる。しかし、その環境に人間活動の影響が顕著に現れるのはこの 100 年ほどのことである。本事業では、人間活動の影響が比較的少なかった時代から現在までの有明海特有の環境を数百年スケールで明らかにするため、干潟堆積物を柱状コア試料として採取し、堆積物柱状試料の堆積相解析・貝遺骸解析を行った。

有明海湾奥の干潟環境は様ではなく、地形や河川の影響により、粒度や堆積速度等がそれぞれの場所で大きく異なっていると考えられたため、鹿島、川副、柳川沖の 3 つの干潟において柱状コア試料を採取した。

近過去の堆積物の年代を決定するため、鹿島沖コアでは ^{210}Pb 堆積年代測定と木片の放射性炭素年代測定が併用された。さらに、川副沖、柳川沖コアからは 1792 年に発生した島原大変による津波堆積物が検出され、極めて良質の時代尺度が得られた。これらの結果を時間マーカーとして用い、100 年オーダーの環境変遷を検討した。

各地点での環境変遷の状況を以下に要約する。

(1) 鹿島コア（干潟縁辺部の浅海域）

最下部に産する木片の放射性炭素年代測定結果により、鹿島コアは約千年間の堆積環境が記録されていると考えられる。

含まれている貝化石はシヅクガイやヒメカノコアサリなど貧酸素環境に耐性のある種類であることから、この海域では夏季の酸素レベルの低い環境がここ 200 年ほどは継続して出現していることを暗示している。

表層から最下部（190cm）にわたって、シルト-粘土で構成されている。これは、試料採取地点近傍に堆積物を多量に供給する大規模な河川がないため、有機物に富んだシルトや泥の堆積する環境が長期間継続している。

表層から深さ約 30cm の区間の見かけの堆積速度は $0.74\text{cm}/\text{年}$ 程度と推測される。

コアの最深部から表層に至る粒度組成など大きな変化はないことから、長期間にわたって安定した堆積環境が継続している。

(2) 白石コア（干潟域）

柱状コア試料の全長は 120cm であったが、昭和 62 年の覆砂層の上位に厚さ 50cm 以上のシルトが堆積している。これに基づく見かけの堆積速度は約 $2.5\text{cm}/\text{年}$ になり、他の試料と比較して大きく、このコア試料は数十年の環境変化を記録していると考えられる。

この試料から推察できる堆積環境は、覆砂層を除くと有機質に富む細粒のシルトや粘土粒子が主体をなし、かつ粒度組成変化がほとんど見られないことから、鹿島沖と同様に泥干潟環境で、帯水時には貧酸素状態になる状況が継続している。

(3) 東与賀コア（干潟域）

柱状コア試料は 100cm であり、中層からは ^{137}Cs ピークが検出される。コアの最下部までの区間には島原大変の津波堆積物が認められないことから、このコアは最近のほぼ 100 年間の記録を残していると考えられる。

中部以下、特に下部では堆積相が頻繁に変化するとともに泥分率が 50-70% であるが、上層では 90% にもなり、堆積物の細粒化が進行したことを示している。

下部に産する貝化石はソトオリガイやハイガイなどが優占するものの、上部ではそれらが産しなくなることから、淡水の流入など生息環境の劣化が推察される。東与賀では明治時代から昭和時代にかけて大規模な埋め立て（干拓）がなされ、埋め立て地の護岸がコア採取地点に接近したことが知られているため、この地点が陸水の影響をより強く受けるようになった可能性がある。

(4) 川副コア (干潟域)

柱状コア試料の表層には細粒砂〜中粒砂が卓越しており、近年の砂州からなる砂干潟の環境を反映している。しかし、中部に泥層を挟むことから、砂州の移動があったことを示す。

表層から 1950 年代を示す ^{137}Cs が検出され、下部には島原大変 (1792 年) の津波堆積物を挟むことから約 200 年間の記録を残しているといえる。堆積環境が砂州であることから、浸食や堆積の中断があった可能性がある。

アサリ化石が約 90 年前から現在までほぼ連続して群生することから、約 90 年前が有明海湾奥部でアサリの優占開始時期と推定される。

スナモグリの棲管がほぼ全層に渡って観察されることから、基本的には好氣的環境が継続していたといえる。

(5) 柳川沖 (干潟域)

この柱状コア試料の表層部の深度約 35cm には異質の砂質堆積物がある。記録によればこれは 2005 年に散布された覆砂堆積物である可能性が高い。 ^{137}Cs が検出されないことから、表層から深度約 35cm までとそれ以深との間には年代の隔たりがあり、浸食や堆積の中断があった可能性がある。

深度 65-90cm に粗粒砂の堆積物があり、貝殻を多量に含む。これは 1792 年の島原大変に起因する津波堆積物と考えられ、これを契機にアサリやサルボウが生息を開始したことを暗示している。その上位で細粒化し、細粒砂になっていることから、津波イベント前後の堆積環境は砂泥質干潟であったと推察される。

津波イベント以深はシルトから構成され、河口デルタの末端部の泥干潟の環境を反映していると考えられる。

津波堆積物と覆砂堆積物からはアサリやサルボウの貝殻が多量に存在することから、津波イベント以降、アサリなどの生育可能な環境になっていると推察される。

2 短期的変遷（数十年スケール）

(1) 数値解析モデルによる検証

- 1) 貧酸素水塊の形成および物質収支とそれらの支配要因に関する考察
 - 1 JST モデルの構造、基礎方程式および2000～2006年の現況再現結果をレビューした。
 - 2 JST モデルおよびJST モデルをベースにした科研費モデルにおいて、2001年を基本ケースにして、1930年代、1950年代、1977年、1983年および1990年の主要な環境条件を想定した感度解析を行い、各時代の貧酸素水塊の形成および物質収支とそれらの支配要因について考察した。なお、気象条件および河川流量は2001年と同じ条件とし、貧酸素水塊が頻発する湾奥西部（A2エリア）と諫早湾（Bエリア）に着目して整理した。
 - 3 貧酸素水塊は1930年代、1950年代にはほとんど発生せず、1970年代後半¹以降に発生していたと推察される。酸素供給に関わる鉛直拡散係数および流入出流量については、年代とともに小さくなり、湾奥西部では1970年代後半以前の地形変化の影響を受け、1977年以降では地形変化よりも自然変動である外海潮位振幅の影響を強く受けていると考えられる。諫早湾では1990年と2001年のケース間に大きな変化があり、諫早干拓による地形変化の影響を受けていると推察される。
 - 4 酸素消費に関わる諸量については、1930年代から2001年にかけて上昇傾向にあり、POC・DOCの分解・無機化に伴う消費、動植物プランクトンの呼吸による消費の寄与が大きく、これらの増加は内部生産量の増加に依存していると考えられる。加えて、大型二枚貝等の濾過食者による酸素消費物質の低減効果が大きいことが推測される。例えば、1977年、1983年および1990年では湾奥部（A0・A1・A2エリア）に発生する内部生産量が濾過食者により2001年の2～5倍系外に除去されていたことになる。
 - 5 湾奥部では地形変化が著しい1950年代から1977年にかけて、TOC・TN・TPの存在量は特に湾奥部で増加している。その主因として流入負荷量の増大および内部生産量の増加、海水交換量の減少の影響が考えられる。
 - 6 底泥間の物質輸送についてみると、各年代とも湾奥部と東部沿岸域（干潟形成域）では堆積傾向、島原半島の西部海域（強流域）では侵食傾向を示す。湾奥西部（A2エリア）、諫早湾（Bエリア）とも堆積・侵食フラックスは年代とともに減少し、底泥と水中でSSの挙動が小さくなっていることを示している。また、SSおよび栄養塩の沈降フラックスは年代とともに減少傾向にあり、栄養塩/SS比が増加していることからSSの減少率が大きいことを示している。
- 2) モデルの精度向上と課題について
 - 7 新たに2007～2008年を検証データとして再現計算を行った結果、底泥中の粒子状有機物質の濃度レベルおよび炭素/窒素比、硫化物濃度の再現性（底泥の酸化層の評価）、水中のリン酸態リンの再現性（窒素制限の評価）、水中の総窒素濃度の再現性、表層溶存酸素濃度の過大評価については計算パラメータの見直しなどによって再現精度が高まった。
 - 8 しかし、冬季のアンモニア態窒素の過大評価、鉛直方向のクロロフィルa濃度分布の再現性、底泥中の粒子状有機物質の季節変動、夏季における硫化物濃度の上昇量、干潟上での炭素・窒素・リン等の物質循環（底生生物との相互作用）、初夏（6～7月）における底層溶存酸素濃度の過大評価については課題が残った。

¹ 1960年代～1970年代前半に湾奥部を中心とする大規模干拓が集中した。

(2) 既存データの整理

1960年以降の有明海的环境変遷に関する既存データを収集し経年変化図を作成し、主な環境変遷を表2-1にまとめた。また、数値解析モデルで検討した1930年以降の貧酸素化に関わる主要な環境変化については下記が挙げられる(図2-1)。

- 1 気温上昇
- 2 外海の潮位振幅(月の昇交点の変動に伴う18.6年周期)
- 3 潮位振幅増幅率(大浦/口之津)の低下と平均水面の上昇(1980年代以降)
- 4 地形変化(1960年代~1970年代前半の規模干拓、1997年の諫早干拓)
- 5 土砂供給の減少(1960~1970年代の砂利採取、1980年代以降のダム堆砂)
- 6 流入負荷量の増大(1950~1970年代の増加)
- 7 透明度の上昇
- 8 赤潮(特に有害赤潮)の発生と長期化
- 9 ノリ生産量の増大(1970年代以降)
- 10 大型二枚貝(濾過食者)の減少

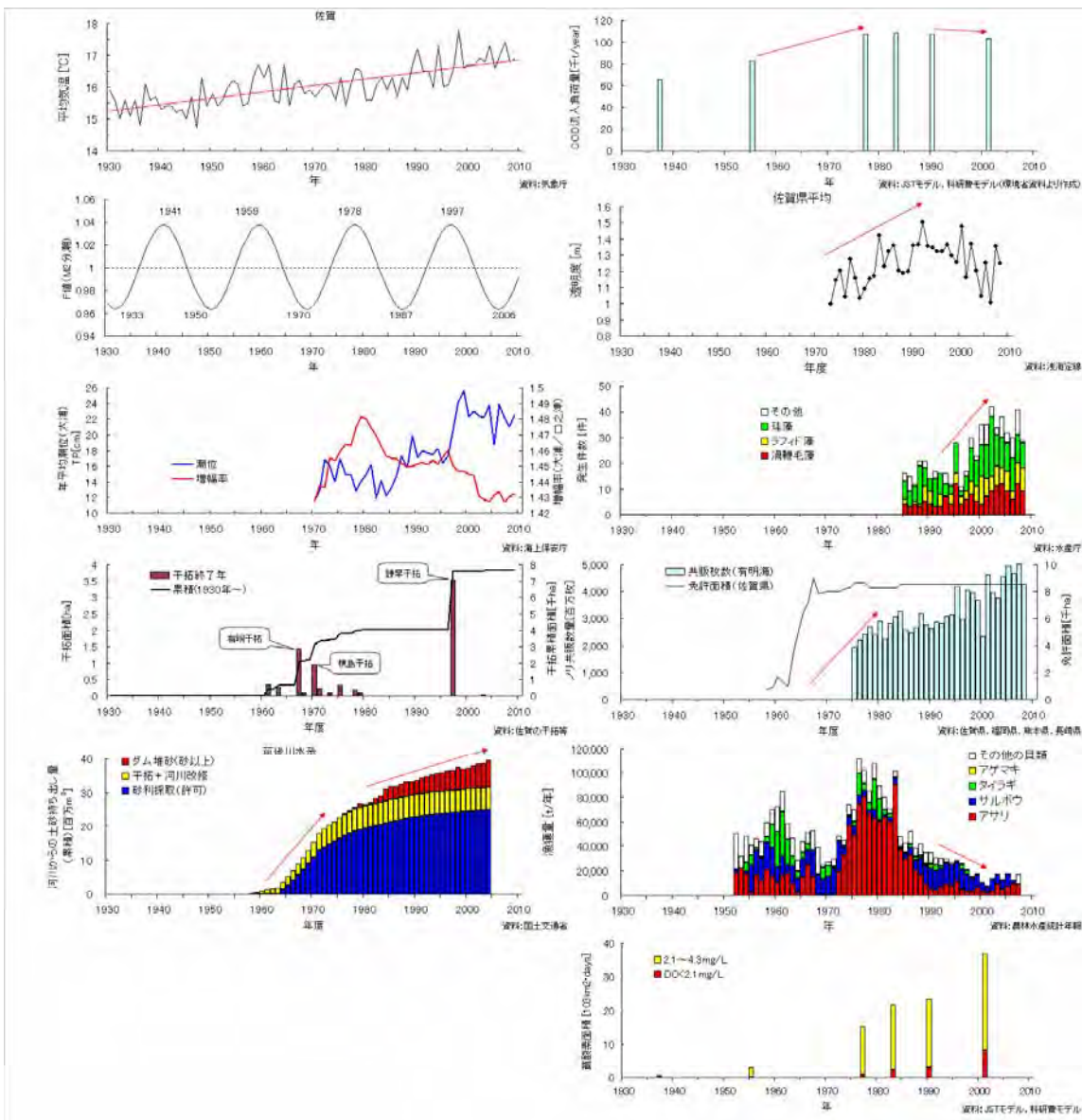


図 2-1 既存データで見る有明海的环境変遷 (1930~2009年)

表 2-1 有明海の主な環境変遷 (再掲)

年代	トピックス	負荷, 海象, 水質(湾奥)	生物, 漁業
1960	湾奥部干拓 (1960s) 砂利採取急増 (1960L~ 1970F)	栄養塩等負荷量低水準 (1960s)	ノリ養殖免許急増 (1960s)
1970	人口増大 (1970F~1980L) 人工海岸化 (1970L~) 松原ダム・下笠ダム (筑後 川水系) 竣工 (1973)	栄養塩等負荷量上昇 (1970s) 水温上昇 (1970L~1990F) 透明度上昇 (1970L~1990F) COD 上昇 (1970L~1980L) PO4-P 上昇傾向 (1970L~)	貝類漁獲量ピーク (1970L~ 1980F)
1980	福岡導水取水開始 (1983) 筑後大堰竣工 (1984) 松原ダム・下笠ダム (筑後 川水系) 再開発事業完了 (1986) ダム堆砂増 (1980L~)	栄養塩等負荷量高水準 (1980s) 平均水面上昇 (1985L~ 1990s)	魚類漁獲量ピーク (1980s) 貝類漁獲量減少傾向 (1980L~) ノリ養殖 10 億枚台 (1980s) 酸処理剤 (1984~) タイラギ低迷 (1980L~) アサリ激減 (1980L)
1990	人口減少 (1990L~) 諫早干拓潮受堤防締切り (1997) 筑後川下流用水取水開始 (1998)	栄養塩等負荷量やや低下 (1990s)	魚類漁獲量減少傾向 (1990~) ノリ養殖増大 (1990s~2000F) 酸処理剤急増 (1990L) サルボウ減少 (1990L~) アゲマキ壊滅 (1990L~)
2000	竜門ダム (菊池川水系) 竣 工 (2001)	平均水面高レベル (2000s) 栄養塩等負荷量横ばい (2000s)	ノリ大不作 (2000 年度) 赤潮多発 (2000s) ナルトビエイ駆除 (2001~) ノリ養殖 20 億枚台 (2000L)

注) S: ~年代, F: ~年代前半, L: ~年代後半

3 総合考察と今後の課題

3.1 総合考察

川副沖や柳川沖での 100 年オーダーでの環境は、1792 年の島原大変に起因する津波によって砂泥質干潟から砂質干潟へと大きく変化した。砂質干潟とアサリの群棲との関係が明らかになった。津波イベント以降砂泥質干潟となってアサリが減少したが、覆砂によって砂質となり回復している。筑後川河口デルタ前進や後退による堆積の促進や削剥が生じ、複雑に堆積相が変化している。覆砂の効果の裏付けとなる。

一方、鹿島沖や白石沖では、夏季貧酸素環境を伴った状態が少なくとも 200 年ほどは継続していると考えられる。

昭和初期から現在までの約 100 年において 10 年オーダーでの環境は、近年の有明海異変の象徴として、また生物生息環境として重要な貧酸素化を指標にすると、下記 1~3 の 3 つの時代に区別することができる。これらの環境変遷を学び、近い将来（下記 4）に豊穡の海を取り戻すための再生のあり方について考察する。数値解析モデルによる貧酸素水塊発生規模の経年変化と主因の感度解析による結果を図 3-1 に、物質収支の変遷等に基づいた環境変遷シナリオを図 3-2 に示す。

- 1 1930~1950 年代（人間活動が有明海に著しい影響を与えることはなく、豊穡の海であった時代）
- 2 1970 年代後半~1990 年代前半（湾奥部での干拓地農業の隆盛、ノリ養殖の急激な増大や二枚貝の高漁獲など人間活動の急激な増加により有明海生態系が目立ち出した時代）
- 3 1990 年代後半~2000 年代（諫早湾干拓事業による急激な環境変化などにより有明海生態系異変が顕在化した時代）
- 4 2010 年代以降（これまでの人間活動によって疲弊した有明海生態系を回復させる時代）

上記 1~3 は干拓面積の時系列が示すように、1960 年代から 1970 年代前半にかけての湾奥部に集中した大規模干拓と、1997 年の諫早干拓を境にしている。すなわち、地形変化が主要なインパクトと考えられ、湾奥部については 1970 年代後半以降、諫早湾については 1997 年の諫早干拓潮受け堤防の締め切り以降に潮流速が弱くなり、成層強度が強まった。流れ場の変化に伴い、海水交換の低下、SS の低下、透明度の上昇、内部生産量の増大へと伝達していく。さらに、1970 年代後半以降は流入負荷量の増大により、栄養塩濃度の上昇、内部生産量の増大、これによって 1950 年代までは顕著でなかった貧酸素水塊が発生し長期化するようになったと推測される。また、貧酸素水塊の発生等によって二枚貝等の懸濁物食者の現存量が減少し、摂食されなくなった懸濁有機物による酸素消費により、さらなる貧酸素化へと負のスパイラルが生起していると推測される。数値解析モデルでは、酸素供給の指標として鉛直拡散係数と流入出水量、酸素消費の指標として内部生産量、底泥からの栄養塩の溶出量、濾過食者の役割等を具体的に出力して、有明海異変に関連する環境変遷シナリオ（負のスパイラル）を裏付けている（図 3-2）。さらに、貧酸素水塊の主な発生要因の感度解析により、1970 年代後半~1990 年代前半では地形条件は同じであるが、栄養塩等負荷量、懸濁物食者現存量、外海潮位振幅（F 値）等の違いによる貧酸素水塊発生規模の変化を明らかにしている（図 3-1）。

堆積物に残された環境変化の解釈、文字記録として残された人間活動の整理、数値解析モデルによる過去に生じたであろう現象再現を通して、有明海環境異変の要因が明らかになった。望ましい有明海生態系の再生にあたっては、先ず底質環境悪化の負のスパイラルを逆流させる再生（正）のスパイラルを駆動するための対策が必要である。それには、

- 1 過去の流動場に近い状態に復元すること（酸素供給の増大）
- 2 二枚貝の生息環境を改善し資源量を増大させること（酸素消費の減少）

が基本になるであろう。そのための具体的な対策あるいは水産振興策としては、1)湾奥部の大部分が人工海岸であることからなぎさ線の回復（直立護岸の緩傾斜化など）による流動場の回復、2)流域の流砂系の保全（土砂供給の回復）による持続的な底質改善、3)懸濁有機物を系外に除去するための施策、例えば、カキ礁の復元（ノリ養殖との合意が必要）、4)二枚貝資源が増大する兆しが見えるまでの応急措置としての覆砂、海底耕耘などが有効であると考えられる。

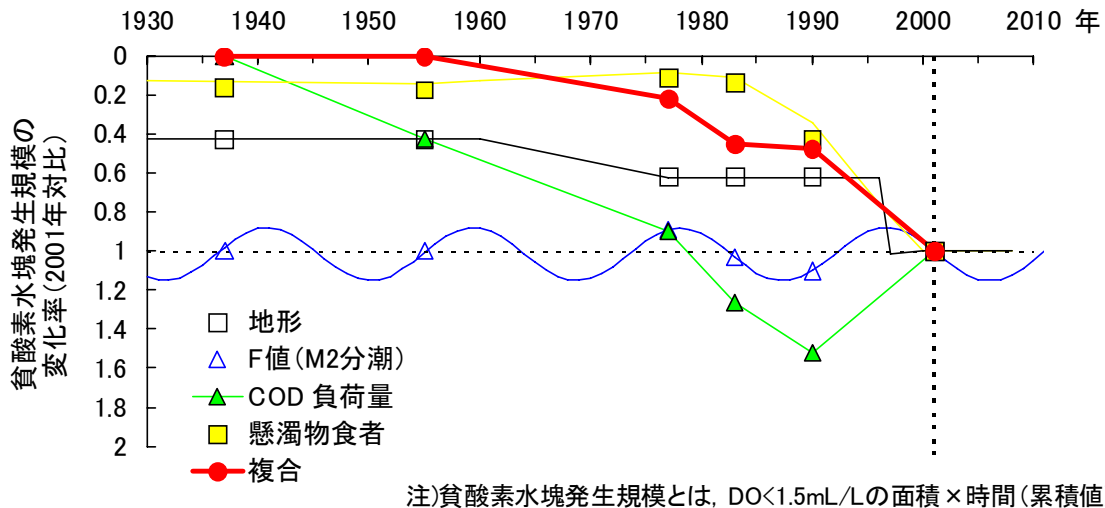


図 3-1 数値モデルによる貧酸素水塊発生規模の経年変化と主因別の感度解析結果 (2001 年対比)
 注) 計算年は 1930 年代, 1950 年代, 1977 年, 1983 年, 1990 年, 2001 年 (現況) である。
 2001 年の貧酸素発生規模 (DO 1.5mL/L 以下) は 6,279km²・day である。

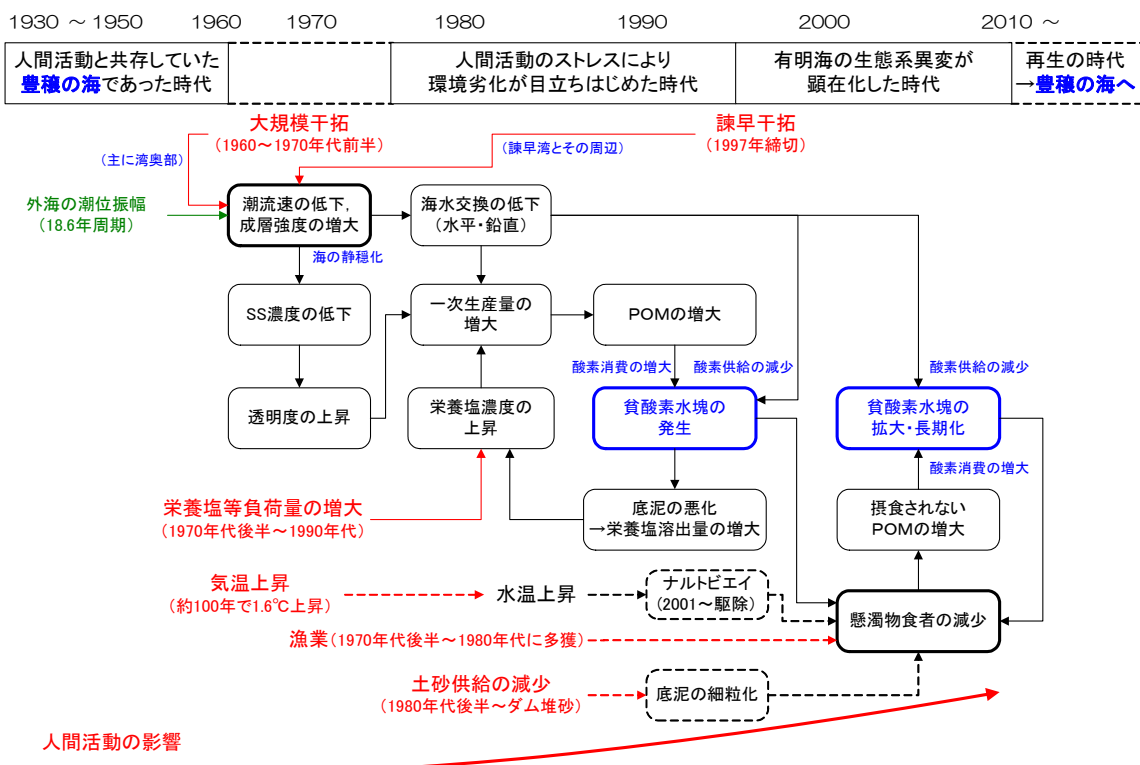


図 3-2 有明海の短期的な (昭和初期から約 100 年間の) 環境変遷シナリオ
 注) 赤字は人為的インパクト, 緑字は自然変動, 破線は数値モデルで取り扱わなかったことを示す。

3.2 今後の課題

(1) 数値解析モデル精度向上にむけての今後の検討課題

本調査・研究では過去の環境変化を直接に記録している堆積物の解析、人間活動を記録した種々の資料の時系列解析と数値解析モデルから得られる現象の時系列解析との整合性検討を通して、有明海異変の主たる要因を解明することから、望ましい有明海生態系回復の手法を提言しようとし、一定の成果を上げることができた。しかし、数値解析モデルのさらなる精緻化には以下のような問題が残された。

本検討では、有明海の干潟・浅海域における物質収支の変化要因を解明するために、数値解析モデルを用いて、2001年を現況（基準）とし、過去を想定した5ケースの感度解析（状況復元）を実施した。これらのケース間で生じる物質収支の変化から、近年、貧酸素水塊の発生が長期化・拡大化していると指摘されていることに着目した。検討にあたっては、貧酸素化に関わるそれぞれの物質循環過程について、時系列でその過程による循環量の大小関係を整理することにより貧酸素化が長期化・拡大化している要因を抽出することができた。

その結果のひとつとして、二枚貝類等の底生動物に利用されない内部生産量の変化が湾奥部での酸素消費量の増大に大きく寄与していることが明らかになった。しかし、数値モデルでの内部生産量および内部生産の高次生態系への循環量の評価にあたっては、比較的単純化されたモデル式を用いている。例えば、予測結果には、各ケースごとの年代に発生したであろう植物プランクトン種の違いやそれに伴う高次生態系への循環量（捕食圧）の変化等は考慮していない。海域での内部生産量の高次生態系への循環量の増強という視点は、数値モデルを用いた有明海の再生方策を検討するにあたっては重要である。

有明海の干潟・浅海域における物質収支の変化要因を解明および再生方策の検討を目的とした数値モデルの精度向上に向けては、上記のモデル式の高精度化を図るためにはよりきめ細かな現場での基礎データの集積が必要である。