

潮流潮汐WGの検討結果
(本編)

- 目 次 -

1 . WG 開催の趣旨.....	1
2 . 潮流の経年的な変化の推定.....	1
3 . 潮流と底質の泥化に関する検討	2
(1) 粒子径と汚濁限界流速の関係	2
(2) 有明海における流速と SS 濃度との関係及び底泥輸送過程	3
(3) 有明海の潮流の状況、底質の状況について	7
(4) 有明海の流速と底質の変化について	10
4 . 潮流潮汐と透明度・成層化・貧酸素水塊等について	11
(1) 透明度の上昇.....	11
(2) 成層化、貧酸素水塊.....	13
(3) 潮流・潮汐の変化による水産生物（魚類等）への影響	15

1. WG開催の趣旨

評価委員会においては、水産資源の減少、海域環境の悪化等の問題点にかかる要因・原因について検討を重ね、これまで、二枚貝（アサリ、タイラギ）と底質泥化との関係及び底質の泥化、底質の有機物・硫化物の増加の要因を整理してきた。このうち、底質の泥化については、河川からの砂の供給減が要因の一つとして可能性がある（寄与度の大小を示すものではない）と整理したが、潮流・潮汐との関係については、データ不足により検討ができないとしてきた。

他方、評価委員会での検討に加えて、各分野のワーキンググループが開催されており、水産資源のワーキンググループより、底質の泥化に関し、重要な要素である潮流・潮汐による影響を検討してほしいとの要請が寄せられている。

現在、評価委員会で行っている原因・要因の明確化にかかる検討は、有明海・八代海の再生に資するとの観点から行っているものであって、それ自体が目標ではなく、立証や証明といった趣旨とは異なる。こうした観点から、潮流潮汐と底質の泥化について、推定を含めて、以下のとおり整理を試みた。

2. 潮流の経年的な変化の推定

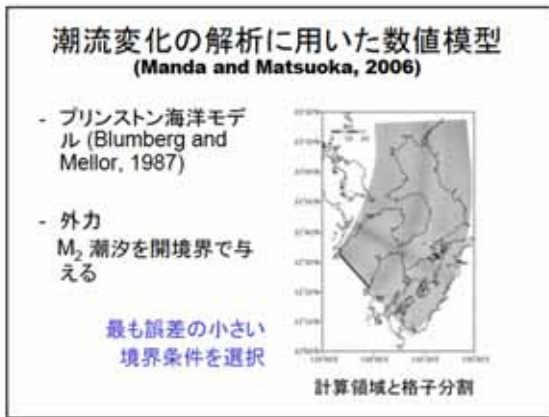
(1) 有明海を取り巻く環境

有明海においては、河川からの土砂流入により干潟域が前進し、古くから干拓・埋め立ての歴史を有している。近年では、1970年代の湾奥部の干拓を始めとして、干拓・埋立て、海岸線の人工化（護岸化）が進むとともに、港湾等の人工構造物の構築、ノリ養殖業発展に伴うノリ網の敷設数の増加が進んだ。さらに、最近、外海域の水位上昇に伴って有明海においても水位が上昇を続けている。このように有明海において長期にわたって生じてきた、海面積の減少、平均水位の上昇等の事象は、物理的条件として、有明海において潮流を長期的に減少させる方向へ働くものと考えられる。

(2) シミュレーションによる評価

有明海において比較可能な経年的な潮流速のデータがほとんどないため、潮流の経年的な変化については、現時点ではシミュレーションによる推定に頼らざるを得ない。

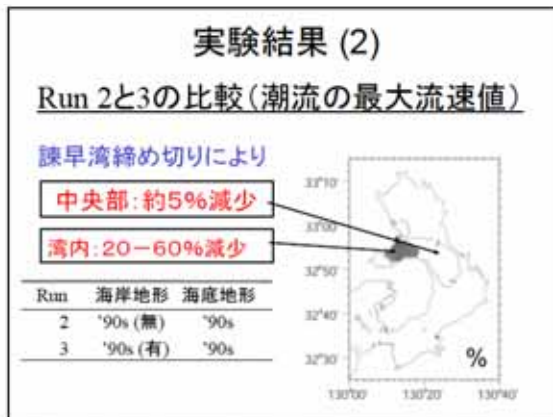
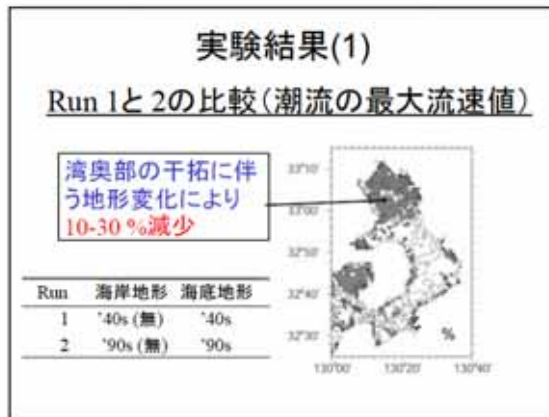
長期的な有明海の地形変化に伴う潮流速の変化に関してシミュレーションが行われており、有明海湾奥部の干拓に伴う地形変化によって湾奥部を中心に潮流は10～30%減少、諫早湾干拓に伴う地形変化によって諫早湾内で20～60%の流速減少、中央部で5%の流速減少との結果が報告されている。



数値実験に用いた地形

Run	海岸地形	海底地形
1	'40s (無)	'40s
2	'90s (無)	'90s
3	'90s (有)	'90s
4	'40s (有)	'40s
5	'90s (無)	'40s

無: 諫早堤防無し 有: 諫早堤防有り



資料) 中田英昭(2006)「「有明海の環境変化が漁業資源に及ぼす影響に関する総合研究」の成果から」第22回
有明海・八代海総合調査評価委員会 資料3

(3) 有明海の潮流にかかる経年的な実測データの不足等から、その程度、原因・要因の寄与度等について判断することはできないが、上記(1)のような事象が有明海で生じ、また、有明海の長期的な地形変化による潮流変化にかかるシミュレーション結果を考察すれば、有明海の潮流については、長期的(経年的)かつ平均的に減少した可能性が高いと考えられる。

3. 潮流と底質の泥化に関する検討

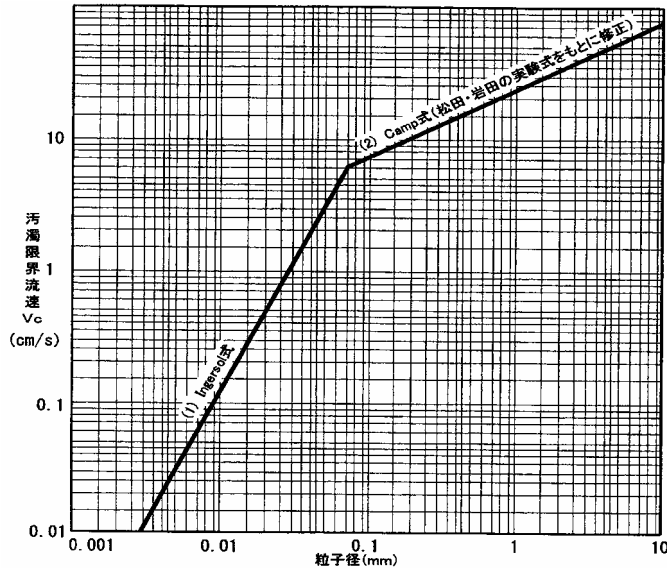
潮流と底質の泥化に関する検討を行うにあたり、まず、流速と粒子の粒径・沈降に関する関係、有明海における潮流の状況、底泥(底質)の状況を整理した上で、有明海の潮流と底質の変化について検討を行った。

(1) 粒子径と汚濁限界流速の関係

潮流と底質の関係を検討するにあたって、流れの中に存在する粒子の粒径と汚濁限界流速との関係を図1に示した。

ある粒子の粒径に対応する汚濁限界流速よりも大きな流れのもとでは、その粒子は沈降することなく浮遊し続ける。すなわち、汚濁限界流速が低くなれば、沈降せずに

海底上を浮遊・流動する粒子の粒径は小さくなる。こうしたことから、一般的に海底の底質への粒子の沈降、堆積を考える場合、粒子の粒径と潮流流速の大きさに密接な関係があることに留意する必要がある。



注：1) 上図の式は、次のとおりである。

(1) Ingersol 式
$$V_c = \frac{1}{1.2} V \sqrt{\frac{8}{f}}$$

ここで、 V は Stokes 式より次のとおりである。

Stokes 式
$$V = \frac{1}{18} \cdot \frac{g(\rho_s - \rho)}{\mu} \cdot d^2$$

(2) Camp 式 (松田、岩田の実験式をもとに修正)
$$V_c = 1.86 \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} g d}$$

ここで、式中の記号は、次のとおりである。

V_c : 汚濁限界流速 (cm/s)	f : 摩擦抵抗係数 (=0.025)
g : 重力加速度 (980 cm/s ²)	ρ_s : 土粒子の比重 (=2.65)
ρ : 水の単位体積重量 (=1.024)	μ : 粘性係数 (15°C = 0.01145 poise)
d : 土粒子直径 (cm)	V : 沈降速度 (cm/s)

- 2) 上図の関係は、取扱い土砂の性状によっても変化するので、現地底質の存在状態、土質を把握しておく必要がある。
- 3) Ingersol 式の摩擦抵抗係数 f の値は、濁りを構成する微細土粒子が主対象となることから、 $f=0.025$ とした。
- 4) 上図の関係は、沈殿堆積した粒子が再浮上する流速下では浮遊粒子の正味の沈降はないとの考え方に基づいて作成したものである。

図 1 粒子径と汚濁限界流速の関係

(2) 有明海における流速と SS 濃度との関係及び底泥輸送過程

ア) 中川 (2005) は有明海の流速と SS 濃度との関係及び底泥輸送過程について以下のとおり整理した。

- ・ 湾内 4 地点 (図-4) で実施した連続観測調査によると、有明海では大潮期を中心に SS 濃度が上昇し、湾奥部の St.1、St.2 でその傾向が顕著 (図-5)。
- ・ 短期的に見られる SS 濃度の上昇は波浪の影響であることを確認。また、SS は、10 ~ 100 μ のシルト・粘土分が主成分。

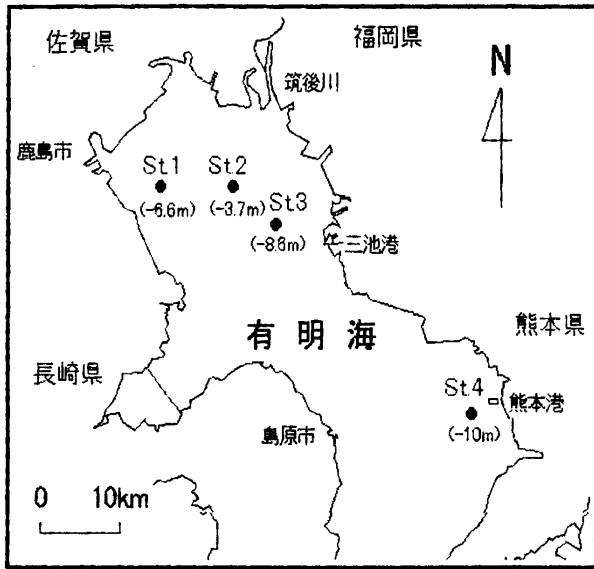


図-4 観測地点 (カッコ内は平均水深)

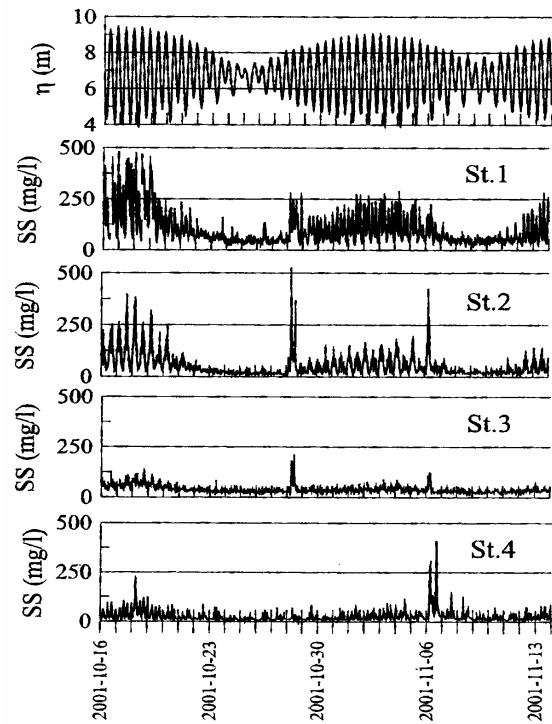
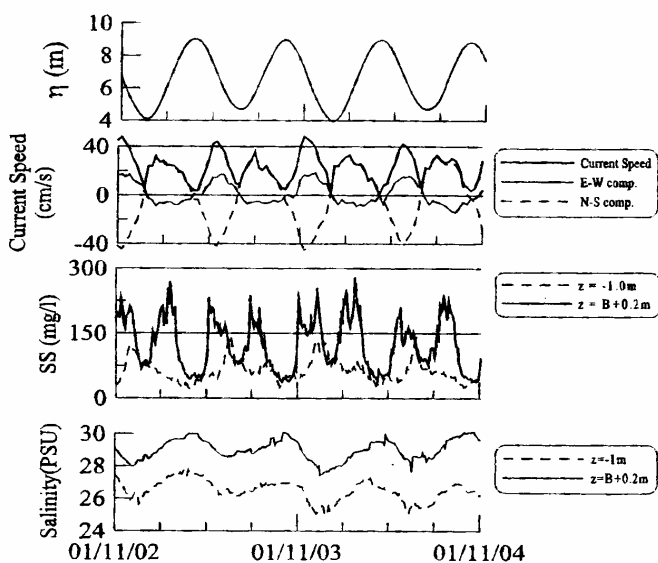
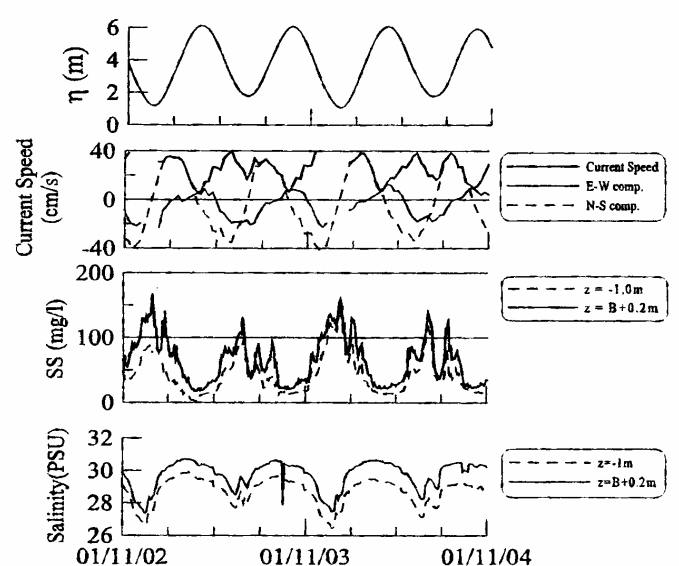


図-5 各観測点での底面付近の SS 濃度と潮汐の関係

- ・大潮期の水位、流速、SS 濃度、塩分を見ると、St.1 の底層の SS 濃度は流速に対応しており、上げ潮と下げ潮時の流速増大による底泥巻き上げが SS 濃度増大の主要な要因。
- ・他方、St.2 の SS 濃度は鉛直的に一様化し、流速よりも潮位に対応 (SS 濃度は干潮時で最大、満潮時に低下)。これは北部の筑後川の高濁度水塊の移流の影響が想定。



(a) St. 1



(b) St. 2

図-7 St. 1 および St. 2 における大潮期の水位、流速、SS 濃度および塩分の変化

- ・ St.1 では底層の流速が 20cm/s を超えると顕著な SS 濃度増大がみられ、この流速値が底泥の移動限界に対応しているものと思料(図 8)。このような潮汐流に対応した SS 濃度の変動パターンは、熊本港沖の St.4 においても同様に見られる。
- ・ 有明海では、大きな潮位差により生じる潮汐流が、底泥の巻き上げや河口付近の高濁度水の輸送を引き起こし、湾内の底泥輸送過程に重要な役割をしている。

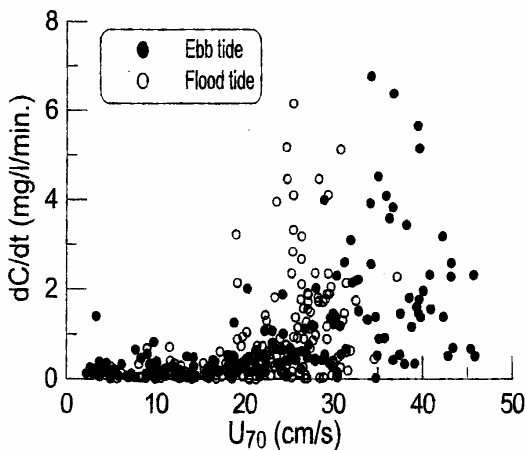


図-8 St.1における底面付近でのSS濃度上昇率と流速の関係

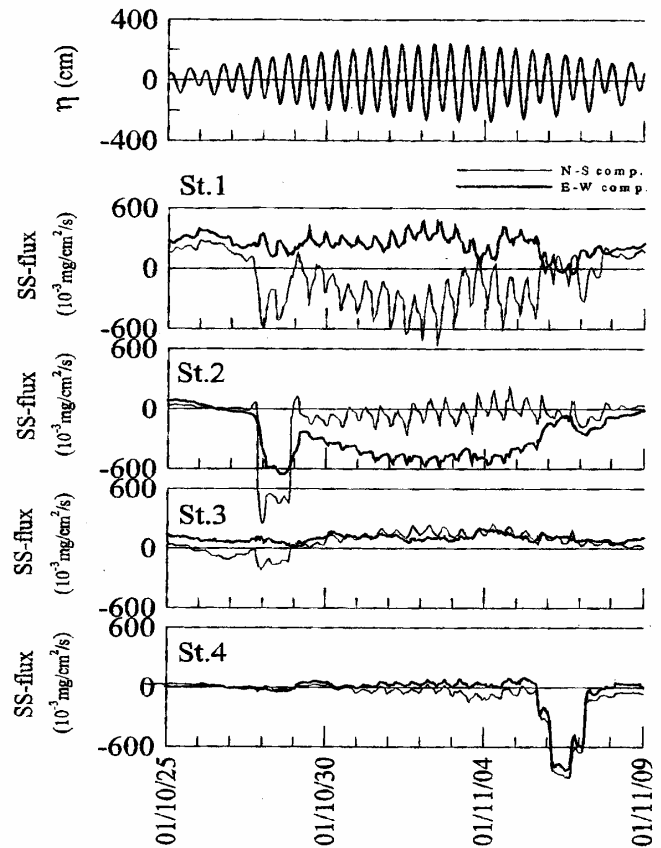


図-9 泥の輸送(25時間移動平均値)と潮汐の関係

- ・ 底泥の輸送量が顕著となる大潮期の湾奥部においては、筑後川沖 (St.2) からは西向きに、湾奥西部海域 (St.1) では南向きに浮泥状体の泥の輸送が生じている(図-9)。このことは、有明海湾奥部における泥質物の堆積が西岸側でより顕著であることと対応し、潮汐作用が泥の堆積分布の形成における重要な要素のひとつであることを示している。

資料) 中川康之(2003)「有明海における底質輸送現象のモデル化」港湾空港技術研究所報告, 第 42 巻, 第 4 号, pp.25-42

イ) タイラギの生息、潮流、底質の関係について知見が得られた「薄まき覆砂の効果実証」の概要を以下に示す。

- ・薄まき覆砂を行った海域は、福岡県大牟田地先と佐賀県太良沖のタイラギ漁場。
- ・平成 17 年 6 月の覆砂後、8 月に福岡県、佐賀県ともにタイラギ稚貝の着底を確認。その後、稚貝は福岡県では 11 月に稚貝が生残していたが、佐賀県では 8 月以降密度が低下し、11 月までに殆どみられなくなった。

表 1 福岡県大牟田地先と佐賀県太良沖の潮流と底質の状況

項目		福岡県大牟田地先	佐賀県太良沖
流況	潮流の状況 後述「有明海の潮流の状況」より	大潮期平均流速が相対的に遅い範囲であるが、その中でも流速が速い湊筋付近に位置している。	大潮期平均流速が相対的に遅い範囲に位置
	薄まき覆砂事例	流速が 25m/sec 以上の出現頻度が高い(16~17%程度)(下図:図-3)。	流速が 25m/sec 以上の出現頻度が低い(1%程度)(下図:図-3)。
底質	底泥の状況 後述「有明海の底泥(底質)の状況」より	含泥率が高い筑後川河口域に属するが、その海域の中でも含泥率は低い箇所に位置する。底質分布より中粒砂域付近に位置する。	含泥率が高い佐賀県沿岸域に位置する。底質分布よりシルト域付近に位置する。
	薄まき覆砂事例	11 月までシルト堆積層が見られていない(下図:図-1)。	11 月にシルト堆積層が見られた。(下図:図-1)。

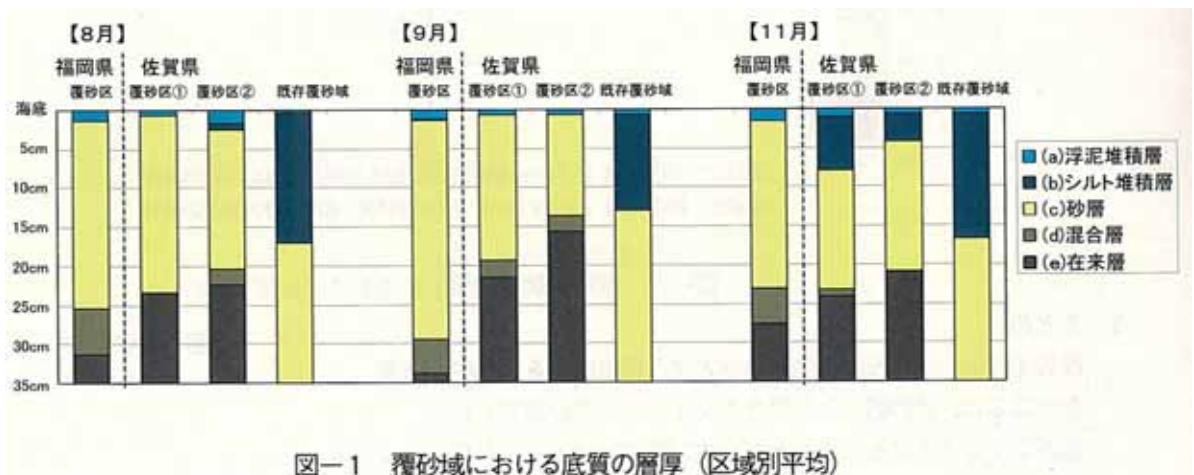


図-1 覆砂域における底質の層厚 (区域別平均)

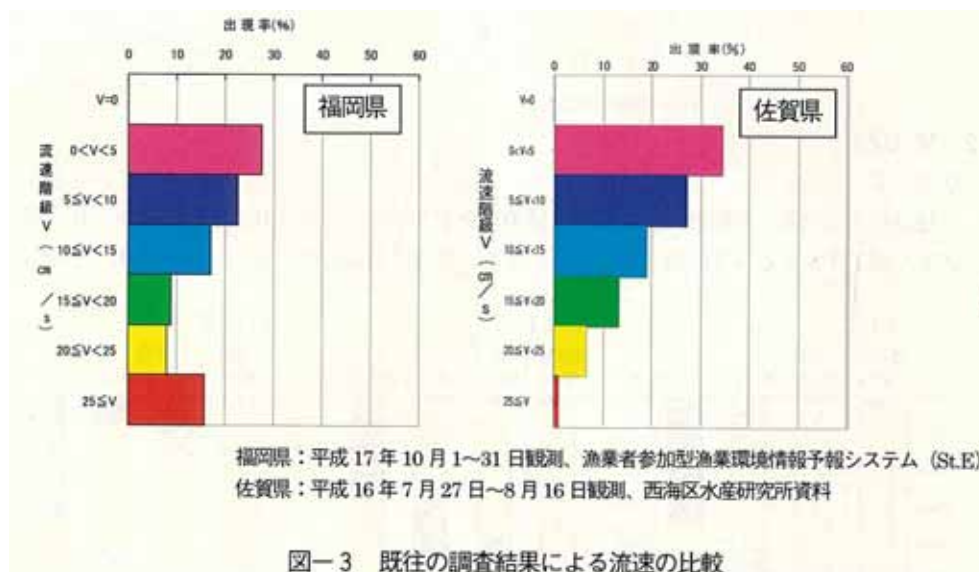


図-3 既往の調査結果による流速の比較

- ・タイラギ漁場である福岡県大牟田地先と佐賀県太良沖は、底質への浮泥の堆積状況が異なると推測され、25cm/s の流速の出現頻度の違いがその要因のひとつとして推測される。
- ・中川（2005）は、有明海湾奥西部における底泥の移動限界に対応した流速を 20cm/s と推測しており、本実証調査の結果と調和するものと思われる。

資料) 水産庁(2006)「有明海改善のための実証試験について」第20回有明海・八代海総合調査評価委員会
資料5

(3) 有明海の潮流の状況、底質の状況について

有明海の潮流の状況(図2に整理)

- ・大潮平均流速分布より、湾奥部と沿岸域(早崎瀬戸中央部で約7ノットに対して1ノット(51.4cm/s)以下)では相対的に遅い(資料1)。
- ・早崎瀬戸中央部の最大流速値(365.0cm/sec)を1.0とした場合、多比良付近から長洲付近を結ぶラインより北側は0.2(73cm/sec)以下と相対的に遅い(資料2)。
- ・湾奥河口域(筑後川河口域)の澇筋や長洲と対岸の多比良間を結んだ湾幅がやや狭くなっている海域に速い流れが出現している(資料1)。

有明海の底質の状況(図3に整理)

- ・底質の含泥率は、湾奥部の筑後川河口、佐賀県沿岸及び諫早湾、熊本市沖で80%以上と高い海域が存在している(資料3)。
- ・湾奥部西側と熊本沖でMd 4以上の底質が存在する(資料4)。

有明海の潮流と底質との関係

「有明海の潮流の状況」と「有明海の底泥(底質)の状況」を比較すると、概ね相対的に潮流の遅い海域で底質の含泥率が高く、シルト・粘土分が多い傾向がみられる。

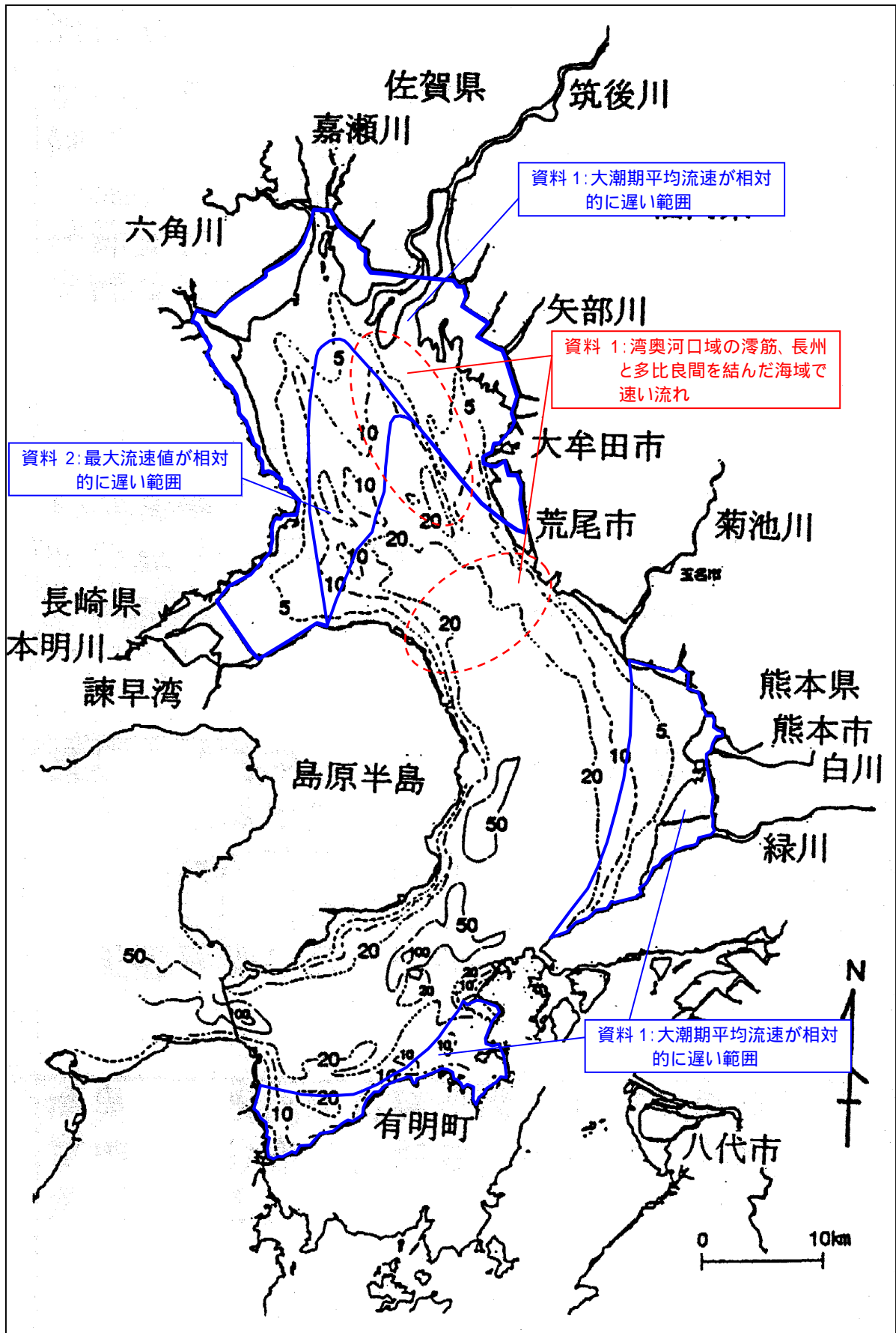


図2 有明海の潮流の状況

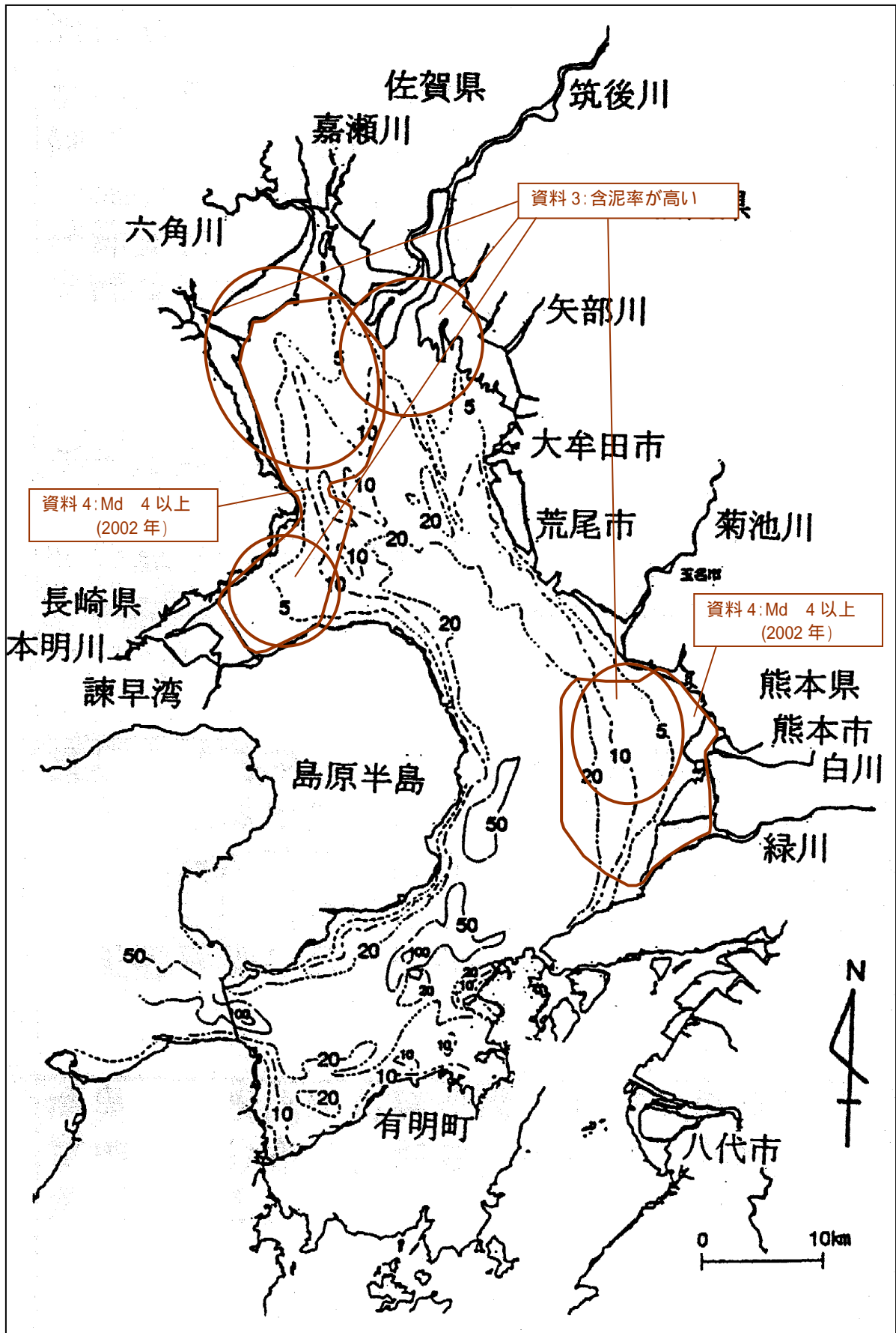


図3 有明海の底泥（底質：含泥率、シルト・粘土分）の状況

(4) 有明海の流速と底質の変化について

一般的に、底質の粒度は流速と密接に関係すると考えられ、有明海湾奥西部では底層の流速が約 20cm/s を超えると、底泥のまき上がりや浮遊が顕著となり、この流速値が底泥の移動限界に対応すると考えられる。さらに、タイラギの薄まき実証調査においても流速 25cm/s の出現頻度の低い地点での浮泥の堆積が示唆されている^(注)。

有明海全体について潮流速と底質の状況を見ると、相対的に潮流の遅い海域で底質の含泥率が高く、シルト・粘土分が多い傾向がみられる。1956～1957年、1997年及び2001年の有明海の底質を比べると、湾奥部の底質の泥化傾向がみられ(資料5)また、1989年と2000年の底質の調査結果によると、Md 7の部分が湾中央までに広がり、底質の細粒化・泥化の進行が推測される(資料6)。

このような海域の底質の泥化に関して、有明海の潮流は前述2のとおり多くの要因により長期的に減少した可能性があると考えられるため、流速の経年的な低下に伴って、浮泥の移動限界に対応した流速値を下回る海域が拡大し、当該海域において底泥の移動量の減少、堆積量の増加を生じさせ、底質の泥化を進めた可能性が高いと推測される(B⁺)。

(注) この流速値は絶対値ではなく、底質の質、海域の水深(波による巻き上げ効果)等により変化することに留意する必要がある。

4. 潮流潮汐と透明度・成層化・貧酸素水塊等について

(1) 透明度の上昇

【原因・要因として指摘されている事項】赤潮全般

・有明海における最近の透明度の増加は、浮泥の巻き上がりの低下の影響が大きく、その原因として潮位差の減少による潮流流速の減少や平均潮位の増加が考えられる。

『出典：文献シート No.H16 -24；杉本隆成[東京大学海洋研究所]，田中勝久[(独)水産総合研究センター中央水産研究所]，佐藤英夫[(株)ファイ・ラムダ](2004)：有明海奥部における浮泥の挙動と低次生産への影響，沿岸海洋研究，VOL.42,NO.1，pp.19-25』

中川(2003)は、有明海湾奥部の測点において、潮流速の上昇に伴ってSS濃度が増加すること、底層でSS濃度の上昇が顕著であることから、潮流による底泥のまき上げをSS濃度増加の主な要因とした(図7)。また、流速が20cm/sを超えると顕著なSS濃度増大がみられ、この流速値が底泥の移動限界に対応していると推測される(図8)。

有明海湾奥部の浅海定線調査定点の透明度は、高濁度水の影響を受けるとされる筑後川河口域等を除いて、長期的に概ね上昇傾向にある。既存文献等により有明海の流速が減少した可能性があり、流速の減少による底泥の巻き上げの減少がSS濃度の低下につながり、透明度の上昇となって顕れた可能性が推測される(B+)。

他方、佐賀県側の筑後川河口域のノリ漁場では、ノリ網により26%の流速の減少が確認されるとともに、SS濃度と潮位差の関係は、ノリ漁期の最盛期と終期で傾向が異なり、ノリ網の抵抗による流速の減少がSS濃度の低下(透明度の上昇)の要因の一つになっていると推測される(図1-39)(B+)。

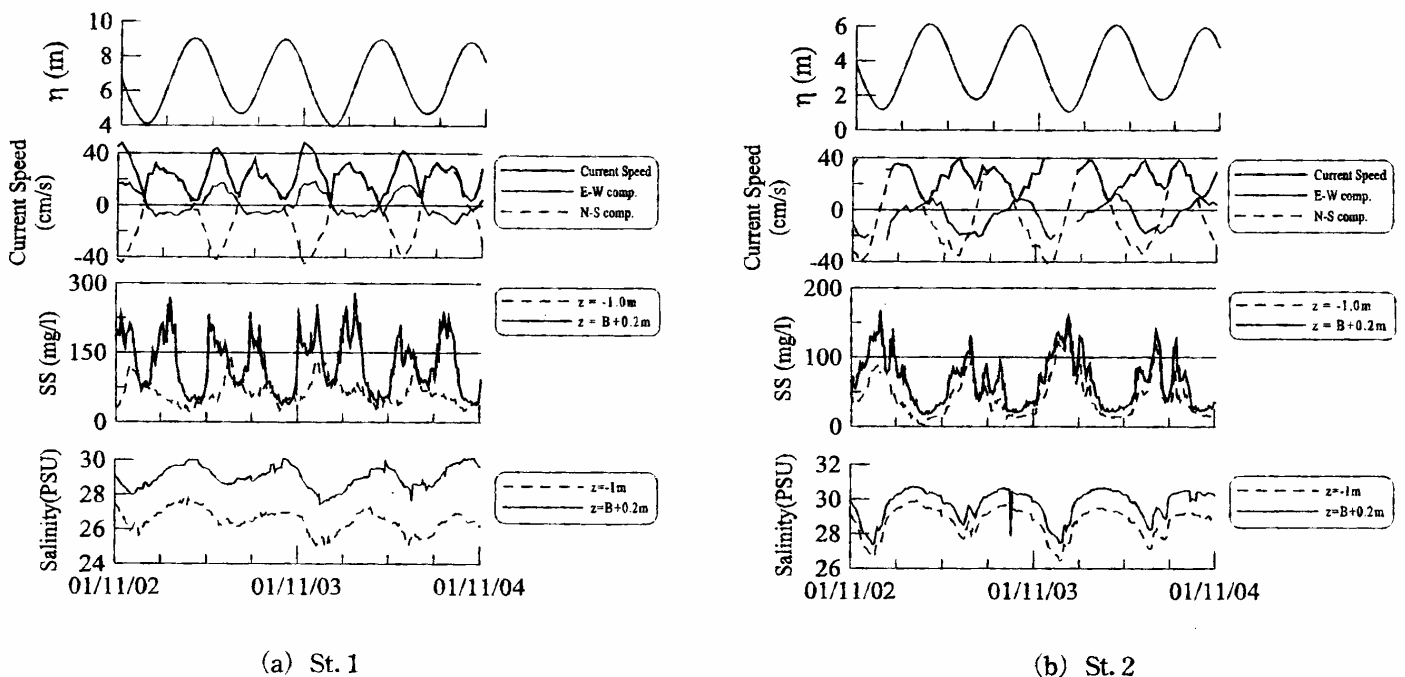


図-7 St.1 および St.2 における大潮期の水位，流速，SS濃度および塩分の変化

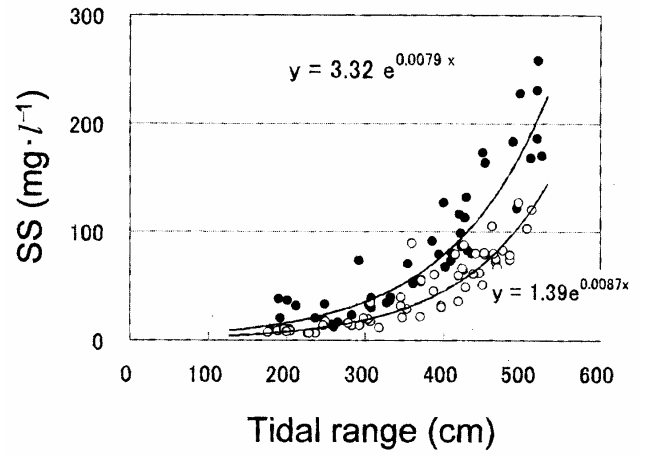
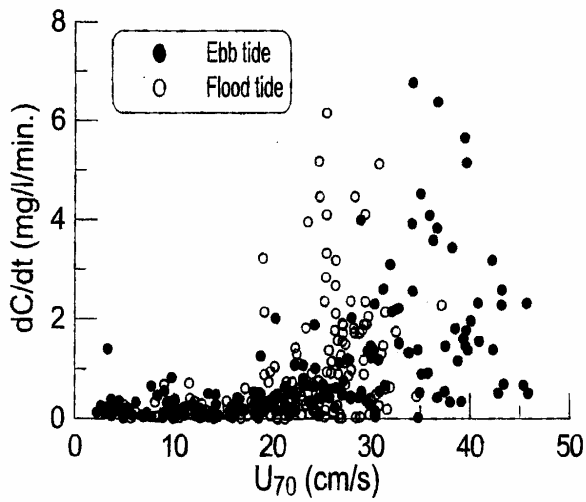


図-8 St.1における底面付近でのSS濃度上昇率と流速の関係

図1-39 2002年度ノリ漁期の潮位差(三池港)と定点2における表層(水深約1m)の日平均SS濃度の関係(○ノリ漁期盛期、●前期および終期)

資料) 中川康之(2003)「有明海における底質輸送現象のモデル化」港湾空港技術研究所報告, 第42巻, 第4号, pp.25-42
 研究成果第432集「有明海の海洋環境の変化が生物生産に及ぼす影響の解明」(平成17年3月, 農林水産省農林水産技術会議事務局編) pp.37-42

(2) 成層化、貧酸素水塊

- ・柳 (2006) は以下の条件により有明海の潮汐・潮流、成層度を計算。
 1985年: 諫早堤防なし、平均水位上昇なし、開境界での振幅 80.0cm、位相 230度
 1999年: 諫早堤防あり、平均水位上昇 10cm、開境界での振幅 77.5cm、位相 230度
- ・ M_2 潮汐振幅 (左上図)・位相分布 (左下図)・潮流差の結果は以下のとおり。

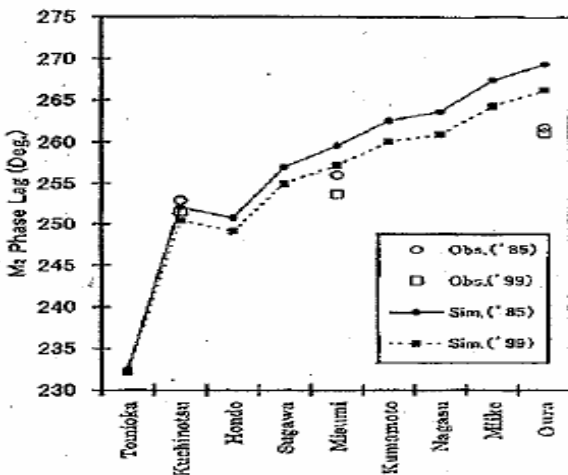
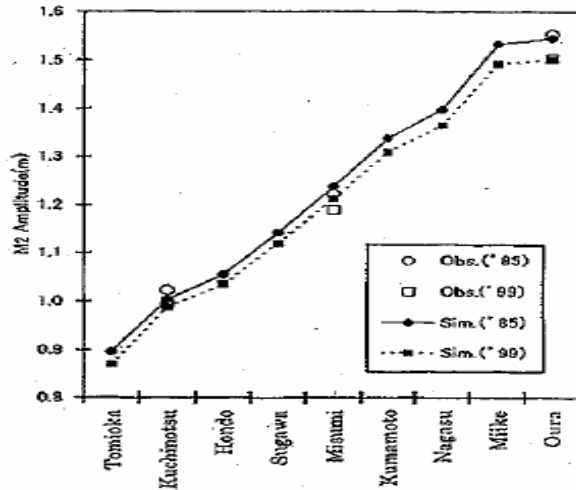


図3.5 計算結果と観測結果

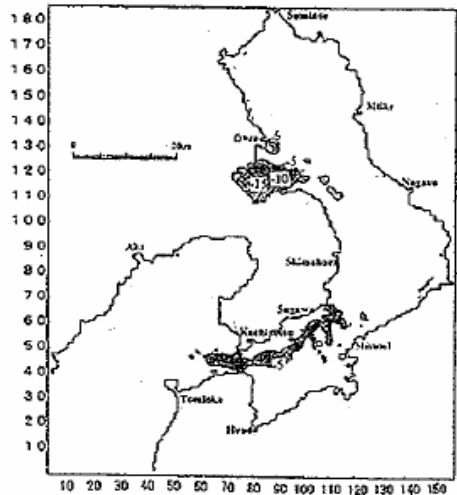
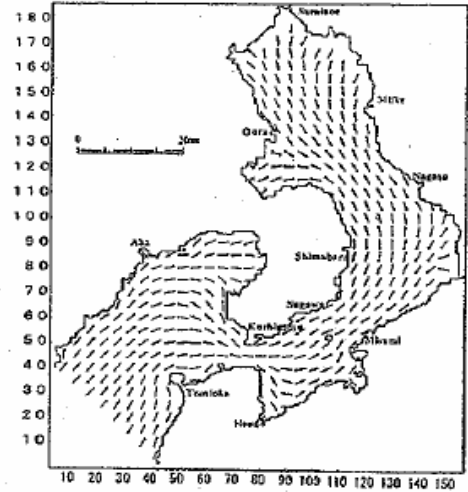


図3.8 1985年と1999年の潮流差

M_2 潮汐振幅 (上図)・位相分布 (下図)

M_2 潮流楕円の長軸の方向と長さに関する 1999年と1985年の差

- ・ M_2 潮汐振幅幅 4.3cm に対する諫早湾閉め切り堤防、有明海の平均水位の上昇、有明海外の潮汐振幅減少の影響は、各々16%、-4.7%、86%と見積もった (表3.1)。

表3.1 有明海潮汐振幅変化の原因

Case	amplitude along open boundary (cm)	mean sea level rise (cm)	Isahaya Sea Dike	Amplitude at Oura (cm)	Observed value (cm)
1	80.0	0	—	154.5	155
2	77.5	10	Yes	150.2	150
3	80.0	0	Yes	153.8 (16%)	
4	80.0	10	—	154.7 (-4.7%)	
5	77.5	0	—	150.8 (86%)	

- ・ 1985年-1999年の潮流振幅変化が湾内の成層状態に及ぼす影響を評価するため、 $\text{Log}_{10}(H/U^3)$ { H : 水深(m)、 U : M_2 潮流振幅(m/sec)}の変化を算出。1999年には1985年と比較して、湾奥西部で $\text{Log}_{10}(H/U^3) > 2.5$ 以上の潮流振幅が小さく、成層が発達しやすい海域が広がっている(図3.9)。
($\text{Log}_{10}(H/U^3) = 2.5$ より値が小さいと鉛直混合が発達)
- ・ 有明海の佐賀県海域においては、貧酸素水塊の発生が観測されるとともに(図3.10)同海域の底質中の硫化物の増加及び夏季の底層DOの低下傾向がみられ、本シミュレーション結果と一致する。

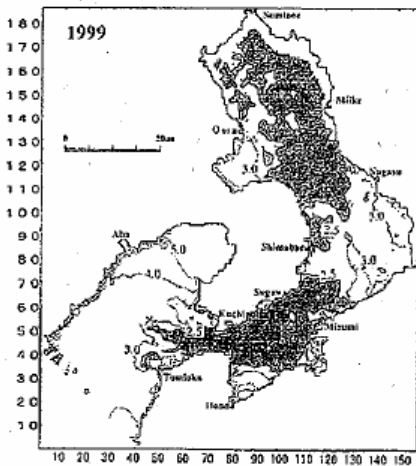
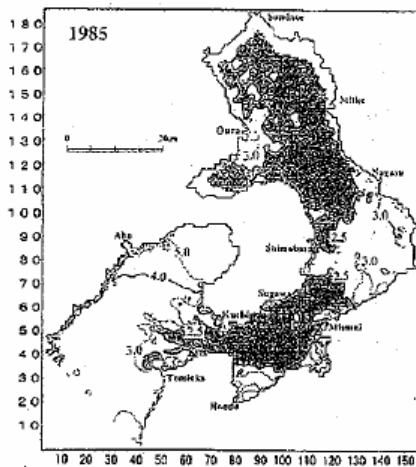


図3.9 成層度の変化

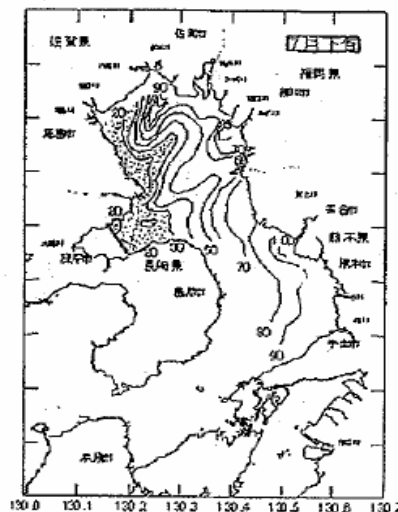


図3.10 貧酸素水塊

- ・他方、水温・塩分観測データを用いて1990年～2000年の成層度を解析した結果、有明海ではほぼ全域で成層度が減少しており、このことは近年の有明海湾奥における貧酸素水塊の頻発や赤潮の大規模化は少なくとも物理的な原因による成層強化によって説明できないとの報告もある(図7.6)。
- ・有明海における潮流流速の低下と成層化・貧酸素水塊との関係についての知見は少なく、十分な整理がなされていないものと考えられる。今後、淡水流入の影響とともに、潮流流速と成層化・貧酸素水塊との関係をさらに調査していく必要がある(B)。

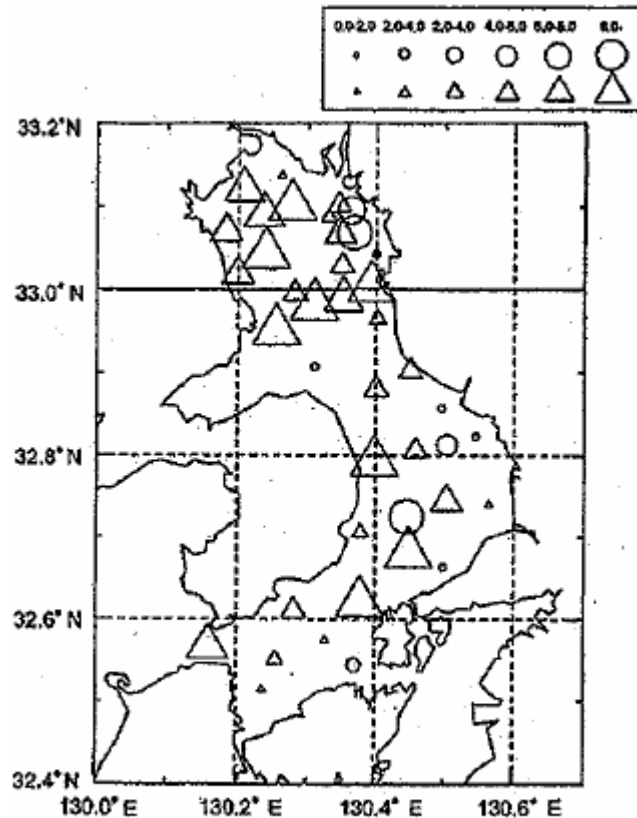


図7.6 成層度の経年変動空間分布

注) ○ : 成層度が増加した海域、△ : 成層度が減少した海域

資料) 柳哲雄[九州大学応用力学研究所](2006)「有明海の環境変化の原因」有明海異変と諫早湾干拓の関連解明に向けて、pp.7-50

(3) 潮流・潮汐の変化による水産生物(魚類等)への影響

- ・現時点では、潮流・潮汐の変化と魚類等への影響の関係を示した科学的根拠を有する文献を見つけることはできなかった。
- ・評価委員会においては、水産資源作業部会がこの影響の可能性を指摘しており、今後、知見の収集を図るべき分野であろう。

< 参考 1 : 流入河川の河口域について >

河川から流入する土砂が、海域（河口域）でどのような挙動を示すのかを把握することを目的として、知見のある筑後川河口域と白川、緑川等が流入する熊本沖について整理した。その結果は以下のとおりである。

筑後川河口域や熊本沖は、前述「有明海の底泥（底質）の状況」より、含泥率が高く、シルト、粘土分が多い海域である。しかし、局所的に見ると、底質の性状は河川の影響を大きく受け非常に変動しやすいことが分かる。

（筑後川河口域）

- ・ 筑後川河口域の洪水前の漣筋付近は砂質であり、それ以外の海域はシルト粘土質であった。洪水後には漣筋付近を中心に砂質領域はシルト粘土に更新されており、それ以外の海域では粒径の変化はなかった（資料 8）。
- ・ 洪水前後の地形及び含泥率をみると、土砂の堆積は凹部で顕著であり、全体的に含泥率が上昇。筑後川感潮河道の堆積シルト粘土が出水後に沖合に移動していることから、出水後 B 海域には筑後川由来の土砂と感潮河道で浸食された河床材料が堆積したと考えられる（資料 7、8）。
- ・ 洪水前の粒子密度分布より、漣筋付近の海域では $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ 以上（砂泥質）の地点が主体であり、それ以外の海域では $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ 以下（泥質）となっている。湾奥部に泥質が多いことは、一般に言われている反時計回りの恒流によって筑後川河口域からシルト粘土が輸送された可能性がある（資料 8）。

（熊本沖）

- ・ 熊本沖（白川沖）の干潟は、白川からの土砂供給量の状況（大規模な出水の有無）により地形の変化（堆積、浸食）が起こる¹⁾。表層堆積物の含泥率は過去の調査結果を踏まえると、経年変化しやすいことが認められた（資料 9）。

< 参考資料 >

- 1) 栗山善昭, 滝川清, 榎園光廣, 野村茂, 橋本孝治, 柴田貴徳 (2003) 「熊本市白川河口における土砂収支の検討」 海岸工学論文集 VOL.50, pp.556-560

<参考2：底質の粒度組成等の信頼性について>

底質の分布は水域の特性により空間的・時間的に変化する。空間的な分布は、水平方向には水中の懸濁物質の沈降特性や、水域の流動特性により選択的に堆積し、特徴的な分布を示す場合が多い¹⁾。

調査地点の設定に当たっては、水域の面積や形状、流入河川の位置等の水域特性や、さらには過去の調査事例等を参考に、調査地点の代表性に留意して特に底質の変化が大きいと考えられるところでは、地点数を密に配置するなど配慮する必要がある¹⁾。

また、底質の分布は、水質の分布とは必ずしも一致しない場合が多く、水質の分布を参考にしつつも、水域の地形等を考慮して地点の配置を行う必要がある¹⁾。

資料1) 社団法人 底質浄化協会(2003)「底質の調査・試験マニュアル 改訂版第三版」

このように、底質の分布は空間的・時間的に変化する。その分布は沈降特性、流動特性、水域の面積や形状、流入河川の位置等の水域特性等に依存する。そのため、例えば、砂質とシルト質の底質がまだらにあるような海域では、1年目の調査では砂質の調査地点が、2年目ではシルト質の調査地点になる可能性がある。このようにデータの信頼性を損なうことがあれば、底質の変化状況の判断を間違えるおそれがある。

従って、底質の粒度組成等の分布については、海域の流動特性や水域特性等を踏まえ、可能な限り密な調査地点の設定、複数回の調査を行うことで、底質調査で問題となる点を可能な限り少なくし、海域の底質の粒度組成の信頼性の向上を図る必要があると考えられる。