

有明海の潮流ならびに物質輸送の変化に関する研究

小松利光¹・矢野真一郎²・齋田倫範³・田井 明⁴

諫早湾干拓事業が有明海に与えた影響については、調査研究が進んでいるもののいまだ明確な回答は得られていない。本論文では、基本的な物理環境である潮流に焦点を当て、既存の現地観測資料の精査ならびに新たな観測の実施から干拓事業がもたらした影響を評価し、そのメカニズムについても考察を試みた。その結果、潮受け堤防締切りにより有明海の潮流が減少するメカニズムや諫早湾口付近の流動構造が変化した原因などが推定された。また、締切り前後の比較データとして広く利用されてきた小田巻ら (2003) の潮流観測結果の問題点を抽出した。

1. はじめに

2000 年冬季の養殖ノリの色落ちに始まる「有明海異変」の主要因の一つとして、諫早湾干拓事業が取りざたされてきた (例えば、宇野木, 2006; 日本海洋学会, 2005)。これまでに 1997 年に行われた潮受け堤防の締切り前後の環境変化に関する調査研究が行われてきたが、未だその影響は明らかになっていない。特に、水環境や生態系に対する影響が明らかでなく、最も基本的な物理環境といえる諫早湾内外の流れや物質輸送の変化についても、明確な回答が得られていないのが実状である。

そのような中で、締切り前後を比較できる数少ない観測データの内、代表的なものが海上保安庁 (1974) が 1973 年に行った有明海全体における流動調査である。また、中央海域に限定されているものの、1992~94 年に 1ヶ月間の連続流動観測を多点で実施した西ノ首・山口 (1996) の調査結果も極めて貴重なデータと考えられる。これら堤防締切り前の貴重なデータを活かして、締切り後の流れと比較するための観測がそれぞれ実施されている (小田巻ら, 2003; 西ノ首ら, 2004)。

さらに近年、現況の流動構造の把握を目的として、有明海全体スケールから局所的なスケールまで多くの現地観測が実施されてきている。大きなスケールの観測としては、小松ら (2003) による有明海全体の同時一斉観測「有明プロジェクト」や、小松ら (2004) による北部有明海の同時一斉観測「有明プロジェクトⅡ」、さらに多田ら (2005) による諫早湾全体の同時一斉観測がある。また、局所的なものについてはこれまで多くの観測が試みられており、代表的なものとしては有明町-長洲町を結ぶ断面 (例えば、矢野ら, 2004)、諫早湾口断面 (例えば、多田ら, 2004) などの測定が行われている。

本研究では、それらの調査結果の再精査ならびに新たな観測を追加することで、諫早湾干拓事業が有明海の潮流や物質輸送に与えた影響ならびにそのメカニズムについても評価・考察を試みた。

2. 有明海の潮流の特性

(1) 入退潮量の変化

海図から算定した海表面積の減少と気象庁の潮汐データを用いて、副振動の効果による湾奥での潮汐振幅の増幅を考慮して潮受け堤防の建設による入退潮量の減少率を見積もった。減少率の算定断面は、有明海湾口と内部の 6 断面、および潮受け堤防前面とした。ここで、大浦から大牟田方向に伸びる断面以北は、潮受け堤防による海表面積の減少が無いため減少率は 0% となる。各断面における減少率の分布は、図-1 に示すとおりである。なお、計算に使用した各領域における M_2 潮の振幅については、検潮所の実測潮位データをもとに線形補間により算出している。

当然ながら、面積減少のない最奥部を除いて有明海全体で入退潮量は減少する。ただし、ここで算出された減

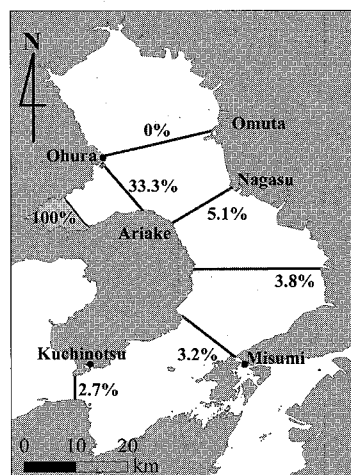


図-1 諫早湾潮受け堤防の建設による入退潮量の減少率

1 フェロー 工博 九州大学教授大学院工学研究院環境都市部門
2 正会員 博(工) 九州大学助教授大学院工学研究院環境都市部門
3 正会員 博(工) 九州大学大学院工学研究院環境都市部門
4 学生会員 修(工) 九州大学大学院工学部海洋システム工学専攻

少率は、潮受け堤防の締切り前後で潮汐振動が変わらないという前提の元での各断面内での平均的な情報であるので、実際には断面内で通過する潮流速は局所的には異なってくる可能性があるが、断面全体では図-1のように減少することになる。

(2) 減衰系としての有明海の潮流

(1) で明らかとなったように、諫早湾干拓事業に伴い建設された潮受け堤防による諫早湾奥の締切りは、海表面積を減少させるため有明海全体に渡って入退潮量を減少させる。すなわち、各断面を通過する海水のボリュームが減少するため、必然的に潮流が平均的に減少することになる。有明海において、潮流に影響を与える要因としては、潮受け堤防の他に、ノリひび、熊本新港の建設、風による吹送流、河川水の流入や温度成層に起因する密度流の影響などが考えられる。これらのうち、熊本新港についてはその近傍では影響があるものの、有明海全体に影響を及ぼすものではない(滝川・田淵, 2003)。その他の影響については、一時的・局所的であり常に同じ影響を与えるという性質のものではない。一方、堤防締切りは、常に潮流を平均的に減少させる要因である。したがって、締切り後の有明海は、基本的には潮流が減少する系となっている。ただし、波動のダイナミクス等によって、局所的な流速の増加が起こる可能性はあるが、その場合はそれを補償する更に大きな減速域が生じなければならず、断面内で積分して平均した場合は必ず流速は平均的には減少することになる。

なお、入退潮量の減少はボックスモデル的な原理から導き出されるが、潮流の駆動力ともいえる入退潮量の増減は各横断面で平均的には必ず潮流の変化を引き起こすため、このような入退潮量の定量的評価は潮流の基本的変化を議論する上で絶対的な前提となるものである。

3. 現地観測結果による比較

(1) 海上保安庁による観測

小田巻ら(2003)は、2001年5月に有明海全域において潮流の連続観測を実施した。この観測の目的は、1973年8~9月に海上保安庁(1974)により実施された調査結果と比較し、近年の潮流の変化を把握することであった。この調査の結論では、2001年の潮流は1973年と比較して測定場所により強くなる所も弱くなる所もあり、明確な減少傾向は確認できなかったとしている。この結論は、干拓事業が潮流に与える影響を評価する上で混乱を引き起こす原因となってきた。そこで本研究では、この調査結果が堤防締切り前後の潮流の比較検証データとして適切であったかどうかの検討を試みた。

図-2に、2001年の観測点(計12点)と小田巻ら(2003)が再解析して比較に用いた1973年の観測点(計10点)の

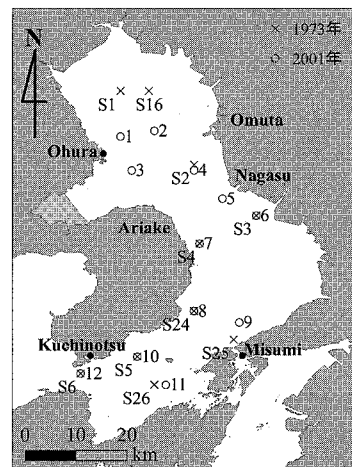


図-2 海上保安庁(1974)と小田巻ら(2003)の観測地点

位置を示す。1973年の観測点の内、S1~S6は15昼夜の連続観測、その他の点は一昼夜のみの観測である。論文中で比較されている測点の組み合わせは、(S2,4), (S4,7), (S5,10), (S6,12), (S24,8), (S25,9)の6組である。このうち15昼夜連続観測により得られた大潮(M_2+S_2)の潮流楕円長軸長の変化を(S2,4), (S4,7), (S5,10), (S6,12)の4組について比較している。(S2,4)に関しては、2001年観測の方が潮流が減少したが、その他の測点は全て増加する結果となっている。図-1に示すように有明海全体としては潮流は減少系でなければならないのに対し、この観測結果では比較可能と思われる測点の大部分で潮流は逆に増加しており、齟齬をきたしている。特に湾口の(S6,12)における M_2 潮長軸長は、1973年に0.77 m/s (1.5 knot)であったのに対し、2001年は1.33 m/s (2.6 knot)と6割の増加となっていた。この測点は、有明海の湾口である早崎瀬戸の中央に位置しており、この位置で流速が6割増加すると有明海の入退潮量が6割増加していることに相当するため、あり得ない非現実的な結果と考えられる。

以下に、この観測結果から堤防が潮流へ与える影響を評価する上での問題点を考察する。まず、1973年と2001年の間には30年弱の時間が過ぎており、この間には、他の海岸での干拓、埋め立て、浚渫、海底炭鉱の陥没など諫早湾干拓事業以外に多くの地形変化が生じている。また、観測した季節が異なっており、降雨条件の違いから河川からの淡水流入量が4倍程度異なっているため、密度流の影響が大きい。さらに、赤潮の大規模化や貧酸素水塊の発生などの水環境悪化が集中的に生じている有明海北部には、比較のための観測点が少ないことが挙げられる。

以上の理由から、この観測結果は直接的比較はできな

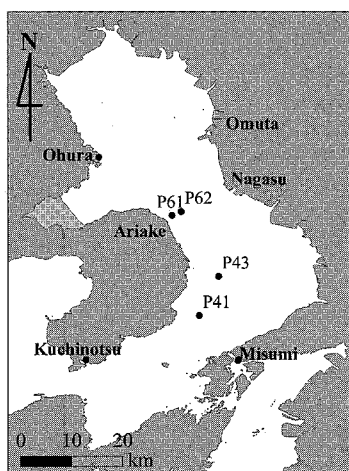


図-3 著者らの観測測点

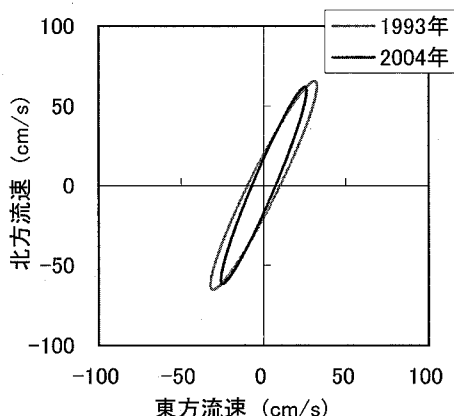
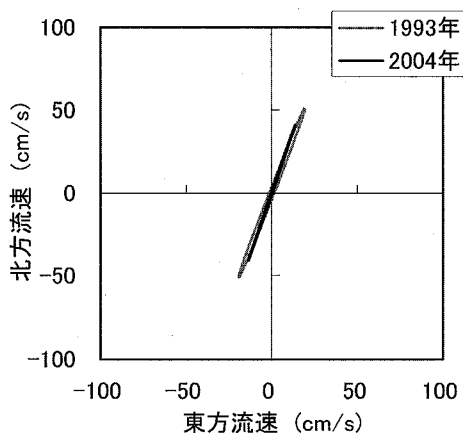
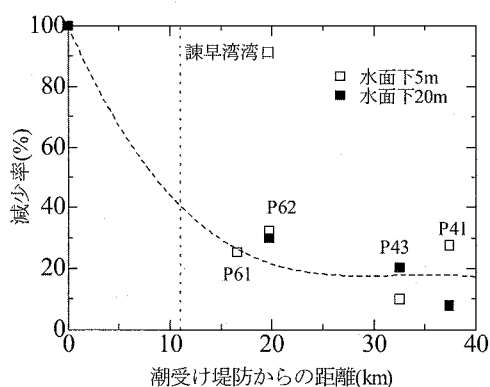
いデータとなっており、これにより干拓事業の影響を評価することは、適切ではないと結論づけられる。

(2) 著者らによる現地観測

1990年に噴火した雲仙普賢岳の火砕流・土石流による漁業被害の評価・予測に関する調査の一環として、西ノ首・山口(1996)により、潮受け堤防締切り前の1992年～1994年に長崎県島原半島沿岸部で潮流の連続観測が行われていた。著者らは2003年のP61, P62の観測(西ノ首ら, 2004)に引き続き、2004年に1993年4月28日～5月28日に実施された観測と全く同じ観測機器・観測方法を用いて連続観測を行なった。

観測は、2004年4月22日～5月22日の31日間に実施した。今回は、諫早湾口から離れた海の代表点として島原市沖のP41, P43を選定した。図-3に、P41(32°41'23"N, 130°23'49"E, 平均水深47m), P43(32°45'30"N, 130°25'52"E, 平均水深48m)をP61, P62と共に示す。観測結果の一例としてP41, P43の水深20mのM₂潮の潮流楕円をそれぞれ図-4, 5に示す。

気象条件は、同じ季節だったということもあって顕著な差異は見られず、ほぼ同等な条件下での潮流観測結果の比較が行なえた。先の観測の結果、有明町沖(観測点P61, P62)においては、観測期間中のM₂潮の潮位変動は潮受け堤防建設後8.1%減少しているのに対して、潮流流速(M₂潮の潮流楕円の長軸長)は大幅に(25.2%～32.3%, 平均29.1%)減少し、また、M₂潮の潮流楕円の長軸が潮受け堤防建設後には東西方向にずれていた。今回の島原沖(P41, P43)においては、観測期間中のM₂潮の潮位変動は潮受け堤防建設前の1993年と較べて9.1%減少しているのに対して、潮流流速(M₂潮の潮流楕円の長軸長)は大幅に(7.8%～27.5%, 平均16.41%)減少していた。ところで、有明町沖にお

図-4 P41のM₂潮潮流楕円の比較(水深:20m)図-5 P43のM₂潮潮流楕円の比較(水深:20m)図-6 潮受け堤防からの距離とM₂潮潮流楕円の長軸長減少率

るP61, P62の潮流流速の減少率は、締切によって減少した海表面積から生じる有明-長洲ラインの平均的な入退潮量の減少率5.1%(図-1)と較べて大きくなっている。これは、諫早湾の位置的な関係から島原半島沿岸か

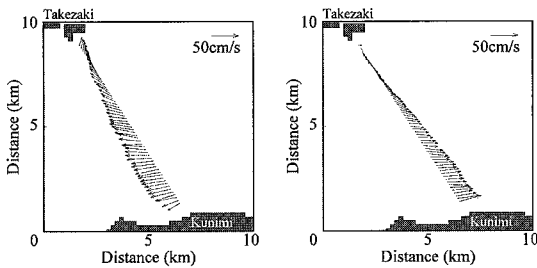


図-7 大潮時の諫早湾口における水深平均流速ベクトル図 (左図：上げ潮最強時，右図：下げ潮最強時) (齋田ら，2005)

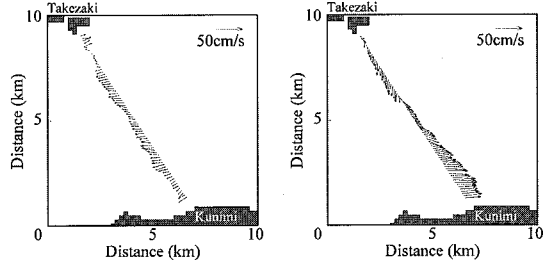


図-8 中潮時の諫早湾口における水深平均流速ベクトル図 (左図：上げ潮最強時，右図：下げ潮最強時) (齋田ら，2005)

ら沖合い 4 km 程度までの海域に堤防締切りによる入退潮量の減少が集中的に生じたからであると思われる (図-6)。また島原市沖における観測点 P41, P43 では潮受け堤防から遠く離れていることから，堤防の影響が島原市沖の広い範囲に拡散したため，潮流の減少率が有明町沖と比べて小さくなっているものと考えられる (図-6)。

本観測結果は，本来流速の突出部となっていて移流分散効果に大きく寄与していたこれらの地点の潮流の減少が，水平方向の海水交換の減少ならびに鉛直混合の減少をもたらすため，潮受け堤防の影響が北部有明海だけでなく有明海本体の水環境にまで大きな影響を及ぼしている可能性を示唆している。

(3) 数値シミュレーションとの関係

諫早干拓堤防締切りの影響が島原半島に沿った速い流速帯の領域に集中して現われて，潮流流速の大幅な減少を引き起こしていることを述べてきたが，シミュレーションでは，その点の再現が容易ではない。著者らは逆にそれが現在までのシミュレーションの限界を表していると考えている。一つは分解能の問題で，上述の極めて局所性の高い流れを再現するには計算格子が粗すぎるということ，もう一点は渦動粘性係数の正確な評価の問題である。今後の更なる研究の進展に期待したい。

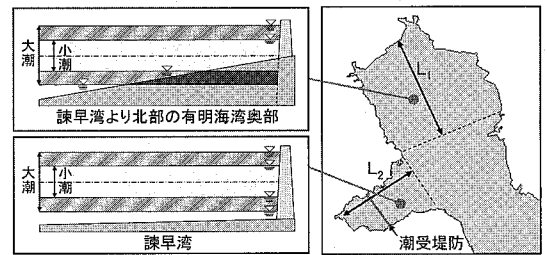


図-9 干潟の有無がもたらす潮汐条件による入退潮量の差異

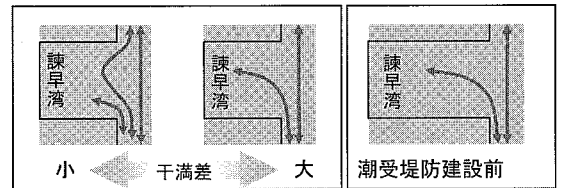


図-10 潮汐条件による諫早湾口の流れの差異

(4) 諫早湾口の潮流の変化

図-7, 8 に，2001 年 10 月の大潮期と 2003 年 7 月の中潮期において実施された ADCP 曳航観測 (小松ら，2003, 2004) により得られた，諫早湾口部の下げ潮最強時と上げ潮最強時の流速分布をそれぞれ示す (齋田ら，2005)。大潮期では諫早湾への強い水塊の流入が見られるのに対して，中潮期ではそれが弱まり，湾口北側 (竹崎側) で下げ潮時にやや強い流入が発生しており，キャビティフロー的な流動構造が出現している。大潮～中潮～小潮のサイクルで干満差が変化したとしても，諫早湾ならびに北部有明海についてそれぞれの湾奥部の汀線付近における地形の状況が同じであれば，両海域に出入りする入退潮量の比は変わらない。しかし実際には図-9 に縦断面図を模式的に示すように，北部有明海の湾奥部については，干潮のときは広大な干潟が広がり，満潮のときには直立堤防によって仕切られている。一方，諫早湾奥部は常時潮受け堤防が直立壁となって仕切っている。これらの地形状況の違いにより，北部有明海の奥部に出入りする入退潮量は小潮から大潮になっても図-9 中の黒塗りで示される潮間帯に掛かる容積分は増えないことになる。したがって，小潮～大潮の変化は，諫早湾と北部有明海へそれぞれ出入りする入退潮量の比を変化させることになる。すなわち，諫早湾への入退潮量の北部有明海奥部への入退潮量に対する比が，小潮・中潮期よりも大潮期で相対的に大きくなる。これらのことより，大潮期では諫早湾口周辺海域において諫早湾方向 (東西方向) へ往復する潮流成分は，北部有明海方向 (南北方向) に往復する潮流成分に対して相対的に増加する (分岐・合流流れ)。

ここに示した諫早湾口周辺の流況は、松野・中田(2004)により、有明海奥部への入退潮が諫早湾口の前面海域を通過する際に生じるキャビティフローと諫早湾へ出入りする潮流との重ね合わせとして説明されている。潮受け堤防締切り後の現況では、大潮期は小潮・中潮期と較べて諫早湾への入退潮量が相対的に大きいためにキャビティフローの成分が弱まり、分岐・合流流れに近くなるが(図-7)、潮差の比較的小さい中潮では有明海奥部に対する諫早湾への入退潮量の比が相対的に小さくなるため、キャビティフローが明瞭に現れたと推測される(図-8)。つまり現在の諫早湾口付近の流れのパターンは潮位の干満差の大きさによって変わってくるという微妙なバランスの上に成り立っていると言える。

内湾における潮流の大きさは基本的にはその点の単位幅当たりの入退潮量とその点の水深によって決まる。単位幅当たりの入退潮量は干満差と湾の奥行き長で決定される。図-9の右図に示されるように締切り以前は諫早湾の奥行き L_2 と有明海奥部の奥行き L_1 はほぼ同程度であった。その後の諫早湾における堤防締切りは、諫早湾の奥行き長を約 $2/3$ に減少させたことで単位幅当たりの入退潮量も約 $2/3$ に大幅に減少させることとなった。さらに、諫早湾奥部の汀線の地形をも変化させた。締め切り以前は、諫早湾への単位幅当たりの入退潮量は現在の約 1.5 倍であったことから諫早湾と北部有明海は、上げ潮に分岐流、下げ潮で合流が明瞭に発生する安定した流れ場であったが、現在では干満差の大きさに規定されるような微妙な流れパターンの場に変化したものと考えられる(図-10)。なお、この潮流パターンの大きな変化は有明海奥部の物質輸送や海水交換に大きな変化を与えたものと思われる。

4. む す び

本研究で得られた内容を以下にまとめる。

- (1) 有明海等の内湾では、干拓や締切りによる海表面積の減少は即入退潮量の減少につながる。湾内の潮流の駆動力は入退潮量であるため、断面平均的に潮流は減少することになる(減少系)。
- (2) 小田巻らによる観測結果は、観測時の条件が異なり過ぎていて、片方のみ密度成層の影響を強く受けているため、水面下一点のデータでは比較不能となっている。従って、このデータからは潮受け堤防締切りによる潮流の変化を議論することはできない。
- (3) 島原半島沿いの早い潮流流速が堤防締切りにより大幅に減少していることが、今回の観測データを加えて改めて確認された。この部分の流速の大幅な減少は有明

海奥部領域の1~2週間程度の時間スケールの物質輸送能力を大きく低下させていると思われる(諫早湾の海水交換ポンプの役割の低下)。

- (4) 現況の諫早湾口付近の流れは大潮時に分岐・合流流れに近く、中潮・小潮時はキャビティフローに近い流れになるなど微妙なバランスの上に成り立ったフローパターンを示している。締切り以前は諫早湾の入退潮量が現在の約 1.5 倍あり、現況の大潮時よりも格段に大きな入退潮量となっていたことから、安定した分岐・合流流れであったと思われる。この潮流パターンの大きな変化は有明海奥部の物質輸送に大きな変化を与えたものと思われる。

参 考 文 献

- 宇野木早苗(2006): 有明海の自然と再生, 築地書館, 264 p.
- 小田巻実・大庭幸広・柴田宣昭(2003): 有明海の潮流新旧比較観測結果について, 海洋情報部研究報告, 第39号, pp. 33-61.
- 海上保安庁(1974): 有明海, 八代海海象調査報告書, 39p.
- 小松利光・安達貴浩・金納聡志・矢野真一郎・小橋乃子・藤田和夫(2003): 有明海における流れと物質輸送に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 936-940.
- 小松利光・矢野真一郎・齋田倫範・松永信博・鶴崎賢一・徳永貴久・押川英夫・濱田孝治・橋本彰博・武田誠・朝位孝二・大串浩一郎・多田彰秀・西田修三・千葉賢・中村武弘・堤裕昭・西ノ首英之(2004): 北部有明海における流動・成層構造の大規模現地観測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 341-345.
- 齋田倫範・矢野真一郎・橋本泰尚・小松利光(2005): 大規模一斉観測データを用いた諫早湾口周辺の流動特性の検討, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 346-350.
- 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, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1061-1065.
- 多田彰秀・中村武弘・矢野真一郎・武田誠・橋本彰博・染矢真作・齋田倫範(2005): 諫早湾内における夏季の流況観測, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 351-355.
- 多田彰秀・中村武弘・矢野真一郎・武田誠・藤本大志(2004): 諫早湾湾口部における潮流流速と溶存酸素濃度の現地観測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 901-905.
- 西ノ首英之・小松利光・矢野真一郎・齋田倫範(2004): 諫早湾干拓事業が有明海の流動構造へ及ぼす影響の評価, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 336-340.
- 西ノ首英之・山口恭弘(1996): 島原湾及び橘湾の海水流動特性, 雲仙普賢岳火山活動の水産業に及ぼす影響調査事業報告書, pp. 10-65.
- 日本海洋学会編(2005): 有明海の生態系再生をめざして, 恒星社厚生閣, 211 p.
- 松野健・中田英昭(2004): 有明海の流れ場を支配する物理過程, 沿岸海洋研究, 第42巻, pp. 11-17.
- 矢野真一郎・齋田倫範・橋本泰尚・神山泰・藤田和夫・小松利光(2004): 有明海における潮汐条件に対する流動・成層構造の変化, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 331-335.