

海洋レーダで観測された諫早湾口部における潮汐流と潮汐フロント

Tidal Currents and Tidal Fronts around Isahaya Bay Mouth Measured with DBF Marine Radar

坪野考樹¹・吉井 匠²・松山昌史³・坂井伸一⁴・多田彰秀⁵・水沼道博⁶

Takaki TSUBONO, Takumi YOSHII, Masafumi MATSUYAMA,
Shin-ichi SAKAI, Akihide TADA and Michihiro MIZUNUMA

M_2 and S_2 tidal currents in Ariake Bay in front of Isahaya Bay mouth were observed with DBF Marine Radar in 2007. These semidiurnal tidal velocities perpendicular to Isahaya Bay mouth are linearly increasing from the north to the south along the bay mouth. The parameter $\log(h/U^2)$, where h is the water depth and U the amplitude of the M_2 tidal current, ranges from 2.4 in southern region to 3.0 in northern region around the bay mouth. We may consider that a tidal front separates the stratified area from the well-mixed area in the contour of $\log(h/U^2)=2.5\sim 3$ (Yanagi et al., 1995) at the bay mouth in summer.

1. はじめに

諫早湾は有明海の北西側に湾口を持つ閉鎖的な海域であり、近年、水質および流動の観測・研究が多くなされている。諫早湾口において赤潮が発生する場所としては、主に竹島周辺の北側海域が報道されており、また、諫早湾内においても、水温や水質の分布が北側と南側で異なることが報告されている(矢野ら, 2005; 山口ら, 2006)。

潮汐流は恒常的に駆動されることから、諫早湾において水質へ与える影響が大きいと予想される。そのため、諫早湾内および湾口の水質への影響についての検討には、諫早湾口における潮汐流の特徴を把握することが重要となる。

海洋レーダは、時間・空間的には高解像で広範囲の流速を計測できることから、沿岸海域における潮流現象を把握する有効な手段となっている(坂井ら, 2004)。そこで、本研究では、有明海の諫早湾口前方海域において、海洋レーダを用いた表層流動の長期観測を実施した。そして、この海域の表層流動の結果から潮汐流を算出して諫早湾口周辺部における潮汐流について検討を実施し、潮汐流が諫早湾内の環境に与える影響について考察を行った。

2. 観測の概要と解析法

(1) 海洋レーダと得られた流速の概要

DBF海洋レーダは、電波の送受信により波長約3.5mの波浪からの後方散乱波を受信し、後方散乱波が海域流動によりドップラシフトしていることを利用して、流速

を計測している(坂井ら, 2002)。そのため、DBF海洋レーダは、水深約0.3m(坂井ら, 2002)の視線方向の流速を計測している。DBF海洋レーダの仕様では、速度分解能が 2.13cms^{-1} であり、一度の送受信で、8方位・500m間隔64個(32kmまで)の視線方向流速を計測出来る。また、レーダのビーム幅が約15度となっていることから、本レーダで得られる流速は、視線上の各点におけるビーム幅約15度、視線方向500m間隔で囲まれた領域の平均流速となる。

DBF海洋レーダは、視線流速を観測することから、2台(以降St.A, St.Bと記述。)を設置して海域の流速を計測する。各St.A, Bの混信を避けるために、St.Aは毎時刻0,30分、St.Bは毎時刻15,45分に観測を開始し、約15分間の送受信で観測を行う。そのため、各St.A, St.Bで観測される視線流速は、15分間の平均した結果となる。

海洋レーダを長崎県雲仙市西郷(St.A)、熊本県荒尾市蔵満(St.B)に2007年1月から2008年2月まで設置し、有明海における諫早湾湾口前面海域の観測を行った。図-1に観測海域を示す。ここに、図-1の各St.A, St.Bからの線は、レーダの視線方向を示している。

(2) 解析法

観測した流速値は8方位の視線流速であるので、解析には格子点における東西南北方向の流速ベクトルに変換する必要がある。そこで、まず視線流速について調和解析を行い、その結果から格子点位置での東西南北流速の潮流成分に合成および変換して潮流成分を計算した。

観測期間中にレーダの設置位置やビーム方向を変更する必要があり、また12月5日にB局において海洋レーダの故障があった。このことから、調和解析の計算には同一の条件で観測できた最長の区間を採用し、A, B局の視線流速は、それぞれ4月22日、6月5日から12月5日までの期間の結果を用いた。ただし、機器のトラブル等があったため、全期間の流速を観測することが出来なかった。

調和解析は最小二乗法を用い、坪野ら(2007)が開発

1 正 会 員	工 博	(財)電力中央研究所	環境科学研究所
2 正 会 員	工 修	(財)電力中央研究所	環境科学研究所
3 正 会 員	工 修	(財)電力中央研究所	地球工学研究所
4 正 会 員	工 博	(財)電力中央研究所	環境科学研究所
5 正 会 員	博(工)	長崎大学教授	工学部
6 正 会 員	工 博	西日本技術開発(株)	調査解析部

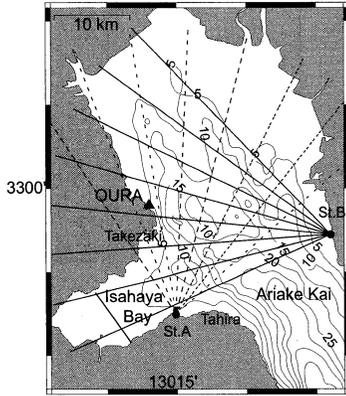


図-1 観測海域とレーダー設置地点およびビーム方向

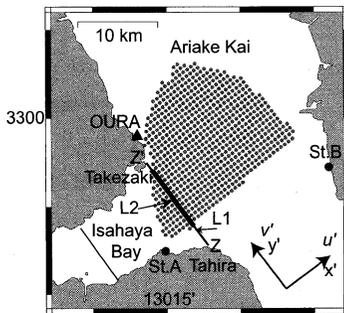


図-2 海流成分が計算できた位置と湾口の定義

した自動ピークサーチ法で得られたA,B局の視線流速から、各局・各視線・各地点における視線流速について7つの潮流成分 (M_2, S_2, N_2, K_2 および K_1, O_1, P_1 分潮の成分)の計算を行った。ただし、各St.A, Bでデータが取得できた期間においても、外因性のノイズなどの影響により視線流速が取得できない場合があったため、各分潮の係数の最小自乗法の計算は、取得可能な期間中75%以上の流速が観測できた位置のみについて実施した。

図-2に75%以上の視線流速が観測できた位置 (灰色○)、つまり潮流成分が計算できた位置を示す。潮流成分を計算した地点は、諫早湾口を横切る潮汐流を検討するために、図-2のように東西・南北方向を37度反時計回りの軸 (x', y') を定義して、この軸方向に設定した。ここに、軸 (x', y') は湾口に対して直角、平行方向であり、 x', y' 軸それぞれの格子間隔 $\Delta x', \Delta y'$ は496.3, 519.5mである。また、以降の記述において x', y' 軸方向の流速成分を u', v' とする。

本研究では、諫早湾口を横切る潮汐流を解析するために、湾口について図-2に示すZ-Z'のラインを定義した。ただし、レーダで観測できた位置はZ-Z'のライン中太線しかなかったことから、以降の潮汐流による流入量の検

討のために、南からレーダで観測できなかったラインを L_1 とし、観測できたラインを L_2 とした。

3. 湾口近傍の結果

有明海の潮汐は、 K_1, O_1 分潮と比較して、 M_2, S_2 分潮の潮流流が数倍以上大きい (安田, 2006) ことが知られていることから、本研究では M_2, S_2 分潮の潮流流について示す。

(1) 潮流楕円

図-3(a), (b)に M_2, S_2 分潮の潮流楕円の長・短軸と長軸の大きさをそれぞれ示す。図-3の線が潮流楕円の長・短軸を表し、コンターが長軸の大きさを表している。また、図中の三角の地点は、潮位観測所のある大浦を示し、その三角の下の数字は潮位振幅を示している。

M_2, S_2 分潮の潮流楕円は、円形というよりも直線状の楕円形となっている。また、潮流の向きは、諫早湾口近傍南側では諫早湾に流入出する方向となるが、それ以外では主に有明海の汀線に沿った南北方向となる。

等潮差の結果より、 M_2 分潮および S_2 分潮ともに、有明海の西側である大浦の半島南側で最小となり、有明海の東側であるSt.Bの前で最大となることから分かる。諫早湾口近傍では、 M_2, S_2 分潮ともに、湾口の外側ではコンターが南北方向になっており、密になっていることから、湾の外側から内側にかけて流速が小さくなることから分かる。

M_2 分潮と S_2 分潮を比較すると、等潮差のコンターは、大きさを除けば、同様な分布となる。また、ここでは示さないが、潮位の遅角からのずれも、おおむね同様な分布になっていた。以上から、大潮 (や小潮) 時の潮流流の大きさは、 M_2 分潮に両分潮の等潮差の比を掛け合わせることで近似可能と考えられる。

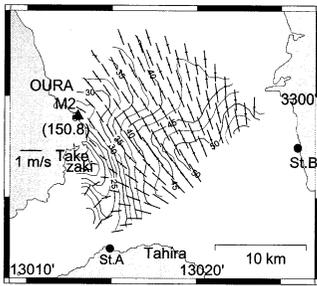
(2) 諫早湾口を横切る u' 方向の潮流

本節では、2章で定義した軸 (x', y') 方向の流速のうち、湾口に対して直角方向 x' 軸における u' 方向の潮流流について検討を行う。

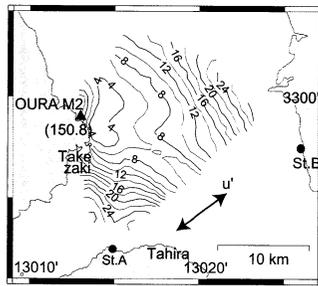
a) 諫早湾近傍における x' 軸方向流速

図-4(a), (b)に M_2, S_2 分潮の諫早湾を横切る潮流流の大きさの分布を示す。図-5(a), (b)に M_2, S_2 分潮の諫早湾を横切る潮流流の遅角の分布を示す。図-5の黒三角▲下の数字は、大浦の潮位から計算した遅角 (気象庁・潮位表) の値、つまり月の子午線の南中時刻からの満潮時刻との位相差を示している。また、図-5のコンターは、上げ潮最大の遅角を示しており、等潮時を示している。

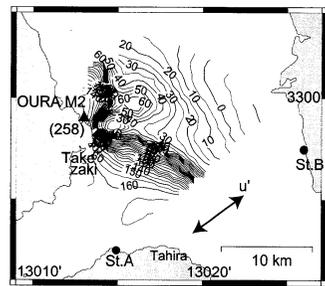
諫早湾を横切る方向の (u' 方向の) 潮流流の大きさは、 M_2 分潮では 4cm s^{-1} から 25cm s^{-1} 、 S_2 分潮では 3cm s^{-1} から 12cm s^{-1} の大きさとなっており、両分潮ともに最大となる位置は、有明海の東側と諫早湾口南側となる。図-3と比較す



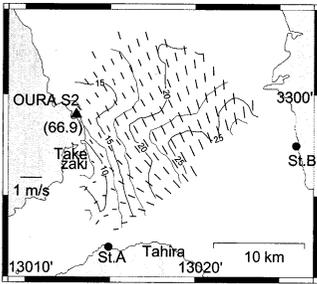
(a) M_2 分潮



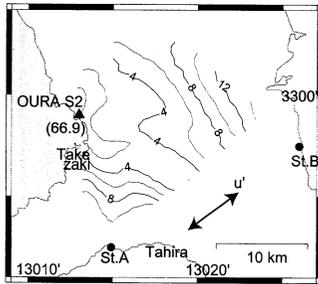
(a) M_2 分潮



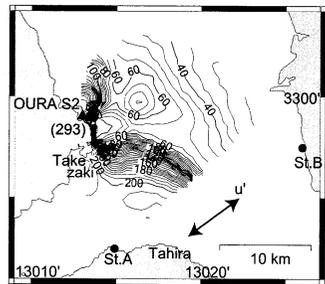
(a) M_2 分潮



(b) S_2 分潮



(b) S_2 分潮



(b) S_2 分潮

図-3 潮流楕円の長・短軸と長軸の大きさ

図-4 u 方向の潮汐流の大きさ

図-5 u 方向の潮汐流の遅角

ると、湾口近傍以外では、 u 方向の潮汐流が、長軸方向の流速よりも小さくなっており、諫早湾口近傍以外では長軸方向と異なっていることが分かる。

有明海では、定在性の潮汐波に支配されていることが報告されており(安田, 2006), その場合では潮位の遅角と潮汐流の遅角は90度ずれることが一般に知られている。このことを考慮すると、潮位の遅角から潮流の遅角の差が約90度となる潮汐流の遅角は、 M_2, S_2 分潮では約160度, 約200度となる。

諫早湾を横切る方向の(u 方向の)潮汐流と潮位の遅角の差は、 M_2, S_2 分潮ともに諫早湾口近傍領域以外では90度以下となる。そして、 u 方向の潮汐流の遅角のコンターは、諫早湾口から沖合いにかけて密となっており、急激に変化している。以上の結果から、このコンターの密な領域よりも諫早湾内においては、前節での潮流楕円の長軸と u 方向がほぼ一致した結果からも分かるように、 u 方向の潮汐流が卓越し、定在性の潮汐流として存在していると考えられる。

b) 諫早湾口を横切る x 軸方向流速

諫早湾口を横切る方向の流速の詳細を確認するために、2章2節で示した図-2に示すZ-Z'ラインにおける潮汐流について検討を行った。図-6に、図-2に示すZ-Z'のラインを拡大し、 y 方向の観測番号を示す。ここに、Z-Z'のラインの平均水深は約8mとなる。

図-7(a), (b)に M_2, S_2 分潮におけるZ-Z'のラインの区間 L_2 の諫早湾口を横切る流速の大きさおよび遅角を示す。Z-

Z'のラインの区間 L_2 の諫早湾口を横切る潮汐流の大きさは、 M_2 分潮では、南側で最大(26 $cm s^{-1}$), 湾口北側で最小(9 $cm s^{-1}$)となり、南側から北側にかけてほぼ線形的に低下している。また、 S_2 分潮では、 M_2 分潮と同様に湾口南側で最大(12 $cm s^{-1}$), 湾口北側で最小(3 $cm s^{-1}$)となる。

Z-Z'のラインの区間 L_2 の諫早湾口を横切る潮汐流の位相は、 M_2 分潮では約151度から約166度となり、 S_2 分潮では約176度から約205度となり、両分潮ともに湾口南側が北側と比較して遅く伝播することになるが、時間にして10分程度であり、上げ潮最大時刻は諫早湾口の南北で変化がない結果となる。

4. 考察

前章の M_2, S_2 分潮の結果が同様な分布となることから、本章では、 M_2 分潮の結果を用いて諫早湾に流入する海水量と諫早湾口部における鉛直混合・成層化しやすい領域について考察し、諫早湾内の環境について推測した。

(1) 潮汐により諫早湾に流入する量

まず諫早湾の面積と潮位差から湾内に流入する海水量を計算する。次に3章で図-6のZ-Z'ラインの区間 L_2 の流速から諫早湾に流入する海水量を計算し、観測できなかった区間 L_1 の流量を推定した。

諫早湾の湾口、つまり図-6のZ-Z'ラインから湾奥の防潮堤までの面積Aは、図-6の海域の点数=323個, 1メッシュの面積 $\Delta x' \times \Delta y' = 0.258 km^2$ より83.28 km^2 となる。 M_2 分潮の振幅 η は図-3の三角の下の数字より約1.5mであるので、最干潮から最満潮までに湾内に流入する海水量

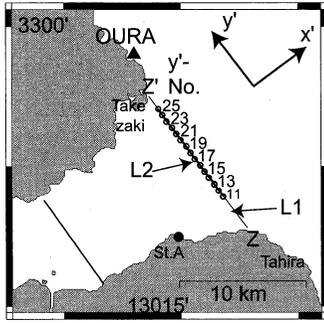
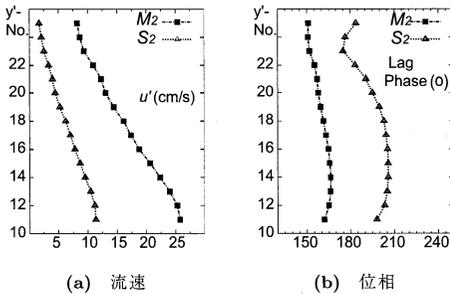


図-6 Z-Z'ラインとy'の番号



(a) 流速

(b) 位相

図-7 Z-Z'ラインの諫早湾口を横切る流速(M₂, S₂の分潮)

Q_ηは、 $2 \times \eta \times A \approx 2.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ となる。

レーダで得られたM₂分潮が鉛直様な分布であると、潮汐流の流速について区間L₂の諫早湾口を横切る流速が正の期間、水深およびy'方向に積分すると、湾内に流入する海水量Q_{L2}は、

$$\int_0^{L2} \int_0^{h0} \int_0^T hu_0 \sin(2\pi/Tt) dt dh dl = T/\pi \sum_{i=11}^{25} (u_i' h_i \Delta y')$$

(1)

≈約 $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ となる。ここに、u₀は最大流速、Tは周期である。ただし、以上の計算には2章の結果よりM₂分潮の位相差が南北で小さいことから、南北の位相差については考慮せず、また水位ηについても考慮せずに平均水深を用いて積分を行った。

Q_ηとQ_{L2}の差δQは、 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ となる。図-6中Z-Z'ラインの区間L₂より北側の流速が少ないことから無視すると、この流量差δQは、区間L₂の南側の区間L₁よりもたらされると考えられる。区間L₁の平均水深が8mで幅が約2.5kmであるので、この潮流振幅の区間平均値は約28 cm/sとなり、前章でのZ-Z'ラインの区間L₂の最南部の流速値である26 cm/sよりも若干大きくなり、最南部の流速値と矛盾しない値となった。

図-6のZ-Z'ラインの区間L₂の流速は、南から北にかけて線形的に減少する。また、区間L₁の流量Q_{L1}は、Q_ηの約30%となる。そこで、流量がQ_ηの約70%、80%、90%となるZ-Z'ラインの南岸からの位置を、流量Q_{L1}を考慮し

て計算すると、図-6のZ-Z'ラインの16, 18, 21の位置となった。この結果は、矢野ら(2005)が指摘した、潮汐により諫早湾に流入する水量の大半が湾口部南側から流入出する結果と同様となった。

Z-Z'ラインの中央部(y'-No.18)より南側からの流入量が諫早湾に流入する海水量の約80%となる結果は、流出についても同様であることから、諫早湾口における諫早湾と有明海の海水交換は、ほとんどが諫早湾口南側で行われ、北側では海水交換が小さいと考えられる。

(2) 鉛直混合と成層化しやすい海域と潮汐フロント

夏季の内湾では、海面加熱によって成層構造が発達するが、この成層構造は、潮汐流による鉛直混合に伴い破壊されて混合域となる。これら成層域と混合域の境界部を潮汐フロントと呼ぶ(柳, 2001)。

Simpson and Hunter (1976)は、成層化した場合の位置エネルギー(∝h)と潮汐により鉛直混合が成層を破壊するエネルギー(∝U³)を比較して、成層域と鉛直混合域がh/U³の大ききで決まることを示している(柳, 2001, Yuasa and Ueshima, 1992)。ここに、h,Uはそれぞれ水深と潮汐流の大きさである。

h/U³の意味は、水深が大きく流速が小さい場合にh/U³が大きくなるが、この場合では、成層が維持するエネルギーが潮汐の鉛直混合により成層が破壊されるエネルギーよりも大きくなるために成層が維持されることを意味している。逆に、水深が小さく、流速が大きい場合では、h/U³が小さくなり、この領域では成層が破壊されて鉛直混合した海域となる。

Yanagi et al. (1995)は、夏場の大阪湾においては、成層化した海域と鉛直混合した海域を分ける潮汐フロントがh/U³の対数log(h/U³)=2.5~3.0の等値線とおおむね一致することを示している。また、柳(1990)は、豊後水道においてlog(h/U³)=2.5の等値線に潮汐フロントが存在することを示している。

そこで、柳らと同様に、M₂の潮流楕円の長軸をUとして諫早湾口部におけるlog(h/U³)を計算した。図-8にM₂分潮におけるlog(h/U³)の値を示す。

有明海の全域において、log(h/U³)は2前後の値となるが、有明海西側の大浦のある半島の周りで2.5から3.0の値となる。このことから、M₂程度の潮汐が駆動すると、有明海中央部から東側にかけての全域では鉛直混合しやすい海域となるが、有明海の西側での大浦のある半島の周りでは、成層化した状態になりやすいことが分かる。

諫早湾口近傍を見ると、log(h/U³)が湾口中央部から大浦の前面海域にかけて2.5以上の値となり、湾口部北側では3となる。このことから、湾口中央部から北側にかけて成層が維持しやすい領域であることが分かる。また、湾口部南側においては、前節で示したように流速

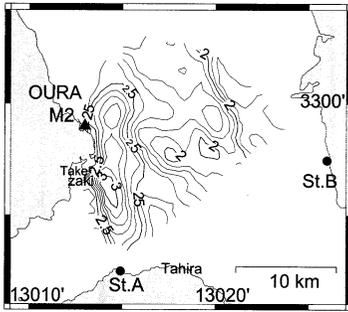


図-8 M_2 分潮における $\log(h/U^2)$

が大きくなることが推測できることから、 $\log(h/U^2)$ が2.5よりも小さな値になると推測され、鉛直混合して成層化しにくくなると考えられる。以上の結果および Yanagi et al. (1995) の大阪湾の結果から、諫早湾口において成層化した海域と鉛直混合した海域を分ける潮汐フロントが存在することが予測される。

図-3や図-7から、 S_2 分潮の潮汐流の大きさは、有明海全体で M_2 分潮の約40%となっており、大浦の振幅比(0.44=67/151)と同程度である。そのため、各潮時の潮汐流の振幅を M_2, S_2 分潮の線形結合で考えると、潮汐流は大潮時では M_2 分潮の1.4倍程度、小潮時では M_2 分潮の0.6倍程度となると考えられる。図-8の結果は、中潮時と同程度と考えると、諫早湾口部の $\log(h/U^2)$ は大潮時では小さくなり、小潮時では大きくなる。この結果、成層化しやすい北側の領域は、大潮時では小さくなり、小潮時では大きくなると考えられ、潮時によりフロントの位置が南北に移動する可能性が示唆される。

(3) 湾口部の潮汐流の効果

この章の湾口部の潮流の結果をまとめると、諫早湾に流入出する海水量は、湾口中央部より南側で大部分(約80%)を占めており、有明海と諫早湾の海水は湾口中央部より南側で交換される。また、諫早湾口部北側は、有明海との海水交換が小さく、夏季にいったん成層化されると潮汐流による鉛直混合が期待できない海域となる。

以上の湾口部での結果が諫早湾内に及ぼす影響を考えると、有明海から諫早湾に流入する海水は南北で鉛直構造が異なることが予想される。そして、諫早湾の水深が地形に沿っており、流体が地形をまたいで混合しにくいことから、諫早湾内では特に表層において南・北側で異なる水質となりやすいことが推測される。このことは、1章で示した矢野ら(2005)や山口ら(2006)が示した諫早湾内の水温や水質の分布が南北で異なる結果を説明していると考えられる。

5. まとめ

2007年に実施した海洋レーダで観測した流速結果から半日周潮成分を計算し、諫早湾口周辺の潮流について検討を実施した。その結果、湾口部では、半日周潮によって諫早湾内に流入出する海水量のうち約80%が、湾口の中心より南側で交換することが分かった。そして、 M_2 分潮の流速と水深を比較したところ、諫早湾口の北側では、南側と比較して潮汐による鉛直混合の効果が小さく、成層が維持されやすい海域となることが分かった。以上の結果に基づけば、諫早湾口部で、諫早湾口部では潮汐フロントが存在し、諫早湾内の表層において南・北側で異なる水質環境になることが推測された。

海洋レーダで観測される流速は、表層かつ有明海の諫早湾口近傍の結果であったことから、この海域のフロント等の検討には、現地観測や数値計算などと総合的に解析する必要があるが、今回示した詳細かつ面的な潮汐結果は、それらの解析の一助になると考えられる。

謝辞：熊本県および長崎県に設置場所の提供をして頂きました。また長崎大学および西日本技術株式会社にレーダ設置のご協力をして頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 坂井伸一・平口博丸・松山昌史・坪野考樹・森信人・杉山陽一・藤井智史・佐藤健一・松岡建志(2002): 短時間観測が可能なデジタルビームフォーミング方式による沿岸海洋レーダの開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1511-1515.
- 坂井伸一・松山昌史・坪野考樹・森信人・中辻哲二・西田修三・中池悦郎・谷川陽裕(2004): DBFレーダによる沖ノ瀬還流域の広域流動観測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.1416-1420.
- 坪野考樹・森信人・松山昌史・坂井伸一(2007): DBF海洋レーダの表層流速自動推定法, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1421-1425.
- 安田秀一(2006): 内湾における副振動の発生と有明海の潮汐増幅について, 海の研究, Vol.15(4), pp.319-334.
- 山口創一・経塚雄策(2006): 諫早湾における貧酸素水塊の形成機構, 海の研究, Vol.15(1), pp.37-51.
- 柳哲雄(1990): 潮目の科学, 169pp.
- 柳哲雄(2001): 沿岸海洋学, pp.71-75.
- 矢野真一郎(2005): 土木学会平成16年度重点研究課題(研究助成金)研究成果報告書.
- Simpson, J.H., J. R. Hunter(1976): Fronts in the Irish Sea, Nature, Vol.250, pp.404-406.
- Yanagi, T., S. Igawa, O. Matsuda(1995): Tidal Fronts at Osaka Bay, Japan, in winter, Cont. Shelf Res., Vol.15, No. 14, pp.1723-1735.
- Yuasa, I., H. Ueshima(1997): A Tidal Front in Winter Influenced by River Discharge, J. Oceanogr., Vol.48, pp.239-255.
- 気象庁・潮位表: 気象庁 | 潮汐・海面水位のデータ潮位表(オンライン), <http://www.data.kis-hou.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/index.php>, 参照2008-01-01.