

複数の海洋レーダによる観測結果から得られた 大阪湾北部海域のM₂分潮流

M₂ Tidal Currents in Northern Part of Osaka Bay Estimated from Multiple Observation with Ocean Radar Systems

坪野考樹¹・森 信人²・松山昌史³・坂井伸一⁴・西田修三⁵

Takaki TSUBONO, Nobuhito MORI, Masafumi MATSUYAMA,
Shin-ichi SAKAI and Shuzo NISIDA

The spatial structures, tidal current amplitudes and phases, of M₂ tidal ellipses in the Northern part of Osaka Bay are estimated by using two set of observation with Ocean Radar Systems which measured the surface velocities in the western and the eastern area of Osaka Bay during around January and November 2003. The area of M₂ tidal ellipses estimated with two set of observation is 1.3 times as wide as the total area of that with each observation. The spatial averaged precision of the former velocities is expected about 3 times more accurate than that of the later velocities.

1. はじめに

DBF (デジタルビームフォーミング) 方式を用いた VHF 海洋レーダは、15分間隔という短い期間で、表層における視線方向の流速 (視線流速) を、8方向、500m間隔・約20kmの範囲で一度に観測できる (坂井ら, 2002)。ただし、1つのレーダで観測する流速は視線流速であるので、流速ベクトルを得るには複数の視線流速が必要となる。

筆者らは、これまで2003年1~2月 (OBS.1) と2003年10月~12月 (OBS.2) において、海洋レーダを用いた大阪湾内の海域流動観測を実施した。レーダの設置地点は、OBS.1の観測では明石海峡を挟む垂水と淡路島に (坂井ら, 2004)、OBS.2の観測では大阪と堺 (坪野ら, 2005) である。図-1に海洋レーダの設置位置および視線方向を示す。なお、図中では、OBS.1のレーダ設置地点のA, B局をSt.AおよびSt.Bと記述し、OBS.2のレーダ設置地点のA, B局をSt. A'およびSt. B'と記述している。また、図中の黒線はA局からの視線方向を示し、点線はB局からの視線方向を示す。そして、レーダでは、この視線方向に沿った視線流速を観測している。

これら両観測 (OBS.1, OBS.2) のそれぞれの視線流速について調和解析を行い、格子点上に空間・内挿する (坪野ら, 2008) ことでM₂分潮を計算した。用いたデータの観測期間は、OBS.1では1月18日10時から1月31日16

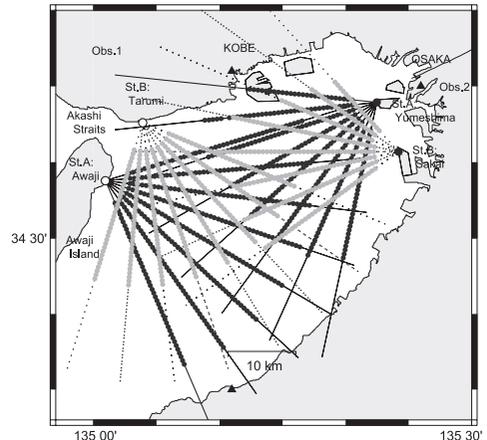


図-1 観測海域とレーダの設置地点および視線方向

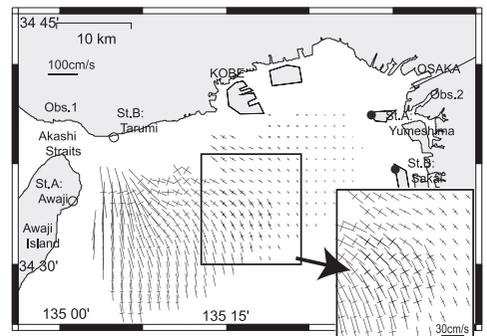


図-2 OBS.1とOBS.2で得られた視線流速のみを用いた場合の潮流楕円 (M₂分潮)

1 正会員 博(工) (財)電力中央研究所環境科学研究所
2 正会員 博(工) 京都大学准教授防災研究所
3 正会員 博(工) (財)電力中央研究所地球工学研究所
4 正会員 博(工) (財)電力中央研究所環境科学研究所
5 正会員 工博 大阪大大学院教授地球総合工学専攻

時の14日間、OBS.2では11月30日0時から12月14日24時までの15日間である。ただし、両期間ともに、外因性ノイズ等の影響で視線流速が取得できない場合があるため、取得率が85%以上の視線流速が観測できた位置のみ

について調和解析を行った。図-1中のビームに沿った黒丸、灰丸は85%以上の視線流速が観測できた位置を示している。

図-2に、OBS.1とOBS.2において、それぞれ得られた M_2 分潮の潮流楕円の主軸を重ねて示す。ここに、視線流速から流速ベクトルへの内挿・補間は20秒間隔の格子で行ったが、図では、見やすさから40秒間隔で表示している。

両期間で得られた潮流楕円の位置は、A、B局から放射状20kmまでの結果となり、A、B局から遠方に位置する視線が重なっていない領域では流速を合成できないため、表示できない結果となった。しかし、図-1の取得率が85%以上の点を見ると、OBS.1とOBS.2の各A、B局の遠方においても、OBS.1とOBS.2の視線が重なっている領域が存在する。そのため、OBS.1とOBS.2の観測した季節が近いこと、および潮汐の流向と大きさの経年的な変動が小さいことが考えられることから、OBS.1とOBS.2のように観測期間が異なっても、両観測結果を用いれば、図-2よりも広範囲な潮汐を推定することが期待できる。

レーダで得られた流速ベクトルは、2つ以上の視線方向の流速から推定するが、2つの視線流速から流速ベクトルを計算する場合、2つの視線流速が直交でないかぎり、視線流速が挟む角度によって、計算された流速ベクトルの精度が幾何学的に変化する(図-5(a)参照)。この幾何学的精度(Geometric Dilution of Precision: GDOP)はChapmanら(1997)により示されており、計算された流速ベクトルのGDOPは、2つの視線流速が挟む鈍角側で精度が高く、狭角側で精度が低くなることが示されている。さらに、2つの視線方向が挟む角度が小さくなると、流速ベクトルの狭角側における精度の低下が大きくなる。ただし、このような場合においても、新たに異なる方向の視線流速が追加されると、GDOPが向上することがBarrick(2006)により示されている。

図-1の視線方向を見ると、各レーダ局から遠方の領域では、交差する視線の角度が小さくなっていることから、この領域の図-2で示した潮流結果も、レーダ局の近傍と比較して精度が低下していることが予想される。しかし、図-1の取得率が85%以上の点を見ると、この遠方の領域においてOBS.1とOBS.2の視線が重なっている領域があり、両観測結果を用いれば、図-2よりも高精度の流速結果が推定できると考えられる。

海洋レーダの設置時期および設置場所をいくつか変えて観測することにより、潮汐流の測定範囲拡大や精度向上が期待される。そこで本研究では、観測期間や設置場所の異なる複数レーダで得られた視線流速を用いた潮汐流分布の推定について検討した。特に、異なる期間で限られた期間に得られた潮流では、潮汐流の位相や大きさ

表-1 大阪湾に位置する各地点の潮位結果から得られた M_2 分潮の振幅と観測期間OBS.1とOBS.2の振幅比および位相差

	振幅cm OBS.1	振幅cm OBS.2	振幅比 (OBS.1/OBS.2)	位相差° (OBS.2-OBS.1)
神戸	32.6	22.2	1.47	150
大阪	33.5	23.2	1.44	149.3
洲本	35.4	24.5	1.44	149.3
淡輪	32.7	24.6	1.33	147.9

に違いがあると考えられることから、これらの違いを補正する方法について検討した。

2. 観測期間の違いに関する予備検討

本研究では、OBS.1とOBS.2で観測した全ての視線流速から調和定数を計算し、両期間の M_2 分潮の定数の内挿・合成を行う。しかし、OBS.1とOBS.2で観測期間が異なるために、両期間で得られた M_2 分潮の位相が異なることが予想される。さらに、両期間の観測期間が約15日程度と短いこと、および日潮不等の影響が考えられることから、 M_2 分潮の大きさが、OBS.1とOBS.2で得られた調和定数が重なる領域において異なる可能性が予想される。そこで、OBS.1とOBS.2の M_2 分潮の調和定数について、潮位および流速それぞれの結果から検討し、両期間の結果を合成するための前処理方法について検討した。

(1) 潮位

OBS.1とOBS.2の解析期間中における神戸、大阪、洲本および淡輪の潮位結果(気象庁・潮位表, 2008-06-18参照)を用いて調和解析を行い、OBS.1とOBS.2における振幅の比と位相差を計算した。表-1に得られた各地点における M_2 分潮のOBS.1とOBS.2との振幅の比と位相差を示す。

大阪湾における潮位の M_2 分潮は、OBS.2の位相がOBS.1よりも約150度遅れる結果となっており、OBS.2とOBS.1における月の南中時刻の差の値である約168度と同程度となった。ただし、OBS.1の振幅はOBS.2の1.44倍となっており、振幅の大きさが異なる結果となった。さらに、気象庁・60分潮一覧(2008-06-18参照)を見ると、 M_2 分潮の振幅 η は、神戸(η_{KOBE})と大阪(η_{OSAKA})において、それぞれ28.8, 29.9cmと記述されており、OBS.2の振幅との比はそれぞれ1.3, 1.29と異なる結果となった。

OBS.1とOBS.2の両期間を延長し、60日間の潮位結果を用いて調和解析を実施した。その結果、OBS.1とOBS.2の M_2 分潮の位相は前述した値と同程度であった。また、OBS.1とOBS.2の振幅は、神戸においてそれぞれ29.3cm, 28.8cm, 大阪においてそれぞれ31.2cm, 29.7cmとなり、両期間の振幅はほぼ同じ大きさとなった。この振幅の値

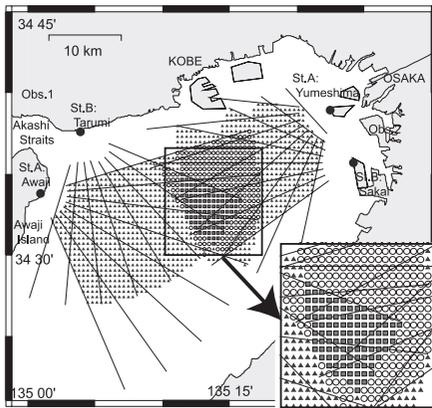


図-3 流速ベクトルの計算位置

は、神戸と大阪の気象庁・60分潮一覧の振幅 (η_{KOB} , η_{OSA}) と同程度となった。

以上の結果から、表-1のOBS.1とOBS.2とのM₂分潮の振幅比が1とならない理由、および海上保安庁が示した調和乗数と異なる理由は、観測期間中の日潮不等の影響と解析期間の短さ(15日程度)が原因と考えられる。

(2) 潮汐流

本節では、潮位と同様に両観測期間の潮汐流の振幅と位相について比較検討した。

視線流速で得られた調和乗数を比較するために、図-1に示す取得率が85%以上の視線流速が重なる領域の格子を、流速ベクトルを推定する格子として算出した。

図-3に、流速ベクトルを推定する格子を示す。ここに、図中の直線は取得率が85%以上の点を結ぶレーダからの視線を示し、黒三角、丸、灰四角は、それぞれ、2, 3, 4個の視線流速から流速ベクトルが算出される格子を示す。また、図中の線で囲まれた領域にある3個の視線流速がある格子数、および4個の視線流速がある格子数は、それぞれ247, 105である。

両期間の比較には、図-3中の四角、丸点で表される、視線流速が3, 4個ある格子で行った。しかし、比較に用いる潮流の調和定数が視線方向であるので、格子毎に特定の方向を決定して調和乗数を比較する必要がある。そこで、比較する方向は、以下のように、3個もしくは4個ある格子でそれぞれ区別して設定した。

3個の視線流速がある格子では、A局とB局の視線流速が揃う観測期間について潮流楕円を計算し、異なる観測期間の視線方向についての調和定数を計算して、OBS.1とOBS.2の調和定数を比較した。また、4個の視線流速がある格子では、OBS.1とOBS.2のそれぞれについて、A局とB局の調和定数を用いて潮流楕円を計算し、流速ベクトルのGDOPが最良となる(誤差が最小となる)方向についての調和定数を計算し、両観測期間の定数を比較した。

OBS.1とOBS.2の潮汐流の調和乗数を比較した結果、振幅比が1.5~3の範囲、位相差が130~160度の範囲となった。そして、この両期間の比較結果は、振幅の比について変動幅があるが、潮位で得られた振幅の比および位相差の結果と同様の傾向を示した。

潮汐流におけるOBS.1とOBS.2との振幅比と位相差の最適値を推定するために、最小二乗法により計算を行った。最小二乗法による計算では、OBS.1とOBS.2の定数同士の差の自乗和を目的関数に設定し、OBS.2の定数の位相差 ϕ と振幅比 β を変化させて、目的関数が最少となる位相差と振幅比 ϕ , β を推定した。

最小二乗法で得られたOBS.1とOBS.2との位相差 ϕ と振幅比 β は、それぞれ152度, 1.6となった。潮汐流から推定した位相差, 振幅比は、表-1で示した潮位の結果と同等となっており、これらの結果から、OBS.1とOBS.2の結果を合わせて潮汐流を推定するには、どちらかの期間の定数について位相および振幅を修正することが望ましいと判断される。

(3) 両観測期間の結果の合成法

潮位と潮汐流の観測期間OBS.1とOBS.2の違いについて検討した結果、片側の観測期間について修正が必要であることが分かった。そこで、以下の手順で、OBS.1とOBS.2の結果からM₂分潮の潮汐流を推定した。

まず、観測期間OBS.1の結果をOBS.2とあわせるために、前節の最小二乗の結果を用いて、OBS.1の視線流速の調和乗数のうち、振幅を1/1.6倍、位相を152度進めて修正した。そして、OBS.2の調和定数とOBS.1の修正結果とを用いて、設定した格子における潮流楕円を計算した。

そして、OBS.2の潮位から得られた結果と気象庁・60分潮一覧で示された実際の調和定数の比が1:1.3であったことから、この比の値である1.3を用いて、潮流楕円の大きさを修正した。

しかし、上述した手法で潮流楕円を試算した結果、図-3の線で囲まれた矩形域の北西角周辺の領域において、潮流楕円の長軸が異常に大きな値となった。そして、この異常な値を示す長軸の方向は北西・南東方向を示し、OBS.1のST.AとOBS.2のST.A'からの視線方向の交差角のうち、鈍角の中央を通る方向となった。この方向は、Chapmanら(1997)が示したGDOPが低下する方向と一致していた。これは、OBS.1のST.AとOBS.2のST.A'からの視線方向が非常に近い方向となっていることから、この領域の流速ベクトルの北西方向の精度が低下し、図-3の線で囲まれた矩形域の北西角の地点において、異常な値を示したものと考えられる。

そこで、潮流楕円が異常に大きくなる地点を避けることを目的に、視線方向からChapmanらが示した各格子点におけるGDOPを計算し、視線流速の誤差の大きさを

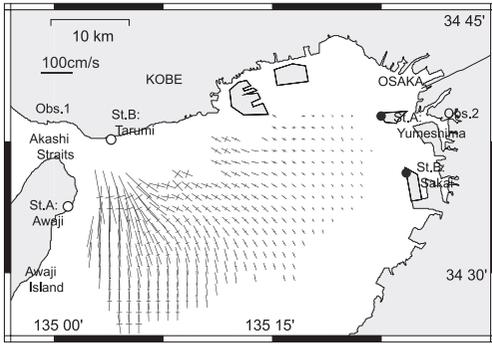


図-4 両観測期間 (OBS.1, 2) から得られたM₂潮流楕円の主軸の分布

1cm/s⁻¹と仮定して与えた場合に、流速ベクトルのGDOPの誤差楕円の長軸の大きさが5倍 (5cm/s⁻¹) 以上となる格子、つまり精度が大幅に低下する格子では、流速ベクトルに変換しないこととした。

3. 大阪湾におけるM₂分潮の潮汐流

前章の(3)で示した方法を用いて、OBS.1とOBS.2の結果から格子点上のM₂分潮の潮流楕円を計算した。以下に、潮流楕円の分布、長軸の大きさ、および位相を示す。

(1) M₂分潮の潮流楕円

図-4に、図-2と同様の格子上における、OBS.1とOBS.2の全ての観測結果を用いた場合の潮流楕円の主軸の分布を示す。

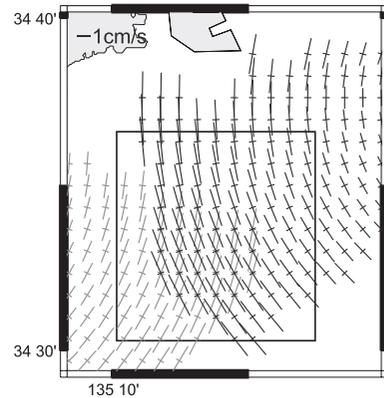
20秒間隔の格子上に流速を推定できた数は、図-2で示したOBS.1とOBS.2のそれぞれの結果を合計した数が1022であったのに対し、図-4で示した両観測結果を用いて推定した結果では1308となった。このことから、OBS.1とOBS.2のそれぞれの結果を用いる場合と比較して、両観測結果を用いた場合では、潮汐分布を推定する領域が3割程度拡大できたと考えられる。

図-4の結果から、図-3の線で囲まれた矩形域において、潮流楕円の向き、大きさが滑らかに変化しており、前章で示した解析方法が適切であったことが確認できた。

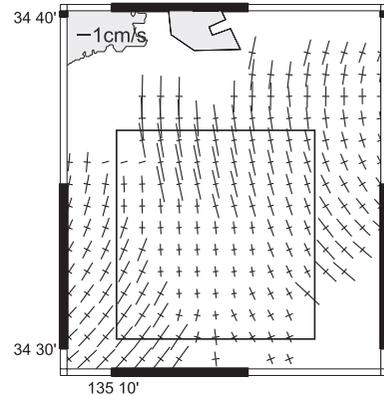
図-5に、図-3の線で囲まれた矩形域の領域における、視線流速の誤差に対する流速ベクトルのGDOPの比を示す。ここに、図-5で示したGDOPの比は、視線流速の誤差の大きさを1cm/s⁻¹と仮定した場合の、流速ベクトルに含まれる誤差結果を示している。ただし、GDOPの比は楕円となるが、図の見やすさから誤差の楕円の主軸を示した。また、図-5(a)は、OBS.1とOBS.2それぞれの2つの視線のみから得られたGDOPを示し、図-5(b)は、OBS.1とOBS.2をあわせて解析した結果を示す。

図-5の誤差の楕円の主軸から、流速ベクトルには特定の方向に誤差が大きくなるのが分かる。

図-5(a)のうち、4方向の視線が重なる格子(図-3の



(a) OBS.1 (灰線) と OBS.2 (黒線)



(b) OBS.1 + OBS.2

図-5 視線流速の誤差に対する流速ベクトルの誤差の比

灰四角)におけるGDOPの比の楕円長軸の値は、OBS.1では3~4の範囲となり、OBS.2では3.5~5の範囲であった。一方、OBS.1とOBS.2の結果全て用いた図-5(b)では、この長軸の値は0.9~2の範囲となり、流速ベクトルに含まれる誤差が、図-5(a)のそれぞれの結果と比較して、全体的に低下した。

4個の視線流速が重なる格子(図-3の灰四角)におけるGDOPの比の楕円長軸を平均すると、図-5(a)では4であったが、図-5(b)では1.2となった。この結果は、この領域における流速ベクトルに含まれる誤差が約70%低下したことを意味し、OBS.1とOBS.2の結果を用いることにより、潮流楕円の精度が3倍程度向上したと考えられる。

(2) 潮流楕円の長軸の大きさと位相

図-6に潮流楕円の長軸の大きさの水平分布を示す。図-7に潮流楕円の長軸の位相を示す。ここに、図-7中の位相は子午線上の南中からの遅角を表す。そして、図中の三角点、および数字は、前章で示した潮位観測点とその地点の潮位の振幅と遅角である。

長軸の大きさは、観測海域西部では、明石海峡の近傍

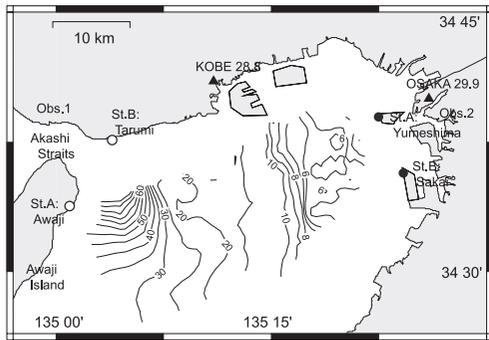


図-6 M₂潮流楕円の長軸の大きさ

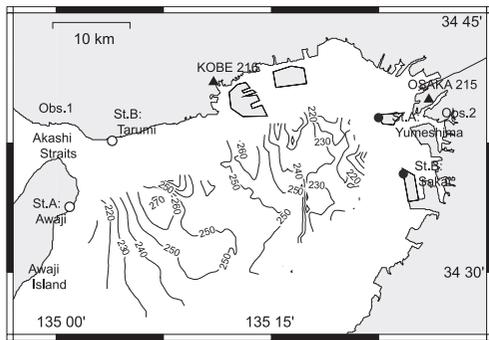


図-7 M₂潮流楕円の長軸の遅角

において最大値80cms⁻¹となり、明石海峡から離れるにつれて小さくなる結果となった。一方、観測海域東部では、潮流楕円の流速が西部と比較して小さくなっており、南北方向で一様となる結果となった。

湾全体での遅角は、210度から280度までの範囲となった。また、大阪湾東側海域での遅角は240度前後となったが、大阪湾東中央部（沖の瀬近傍）での遅角は260度と、周りよりも20度遅れる結果となった。

神戸と大阪での潮位結果から得られる遅角は約215度であったが、両地点近傍の潮流結果で得られた遅角の値もほぼ同じ値となっており、大阪湾では、柳（2001）が示したように進行性のM₂潮汐波となることが分かる。

4. まとめ

本研究では、潮流の観測範囲の拡大、および精度の向上を目的に、観測期間およびレーダの設置場所が異なるDBFレーダの結果から、潮流分布を推定する方法について検討した。

2003年春（秋）に大阪湾北西部（北東部）において実施した2つの観測結果を用いて、大阪湾北部のM₂分潮の潮流分布を計算した。M₂分潮流の振幅・位相差について修正が必要と判断されたが、これらの値を修正することにより、それぞれの観測結果を用いたM₂分潮流の分布

よりも、より広範囲の分布が推定可能となり、大阪湾北部のほぼ全域におけるM₂分潮流の分布を推定することができた。そして、両観測のレーダ局からの視線が重なる領域において、3倍程度の精度向上が確認できた。

本研究で実施した潮流分布の算出では、1方向しか観測できなかった視線流速を使用することができず、推定された潮流分布は連続式および運動方程式を満たすとは限らない。今後、レーダで得られた結果をより高度に利用するために、海洋レーダによる観測結果をデータ同化することにより、潮流分布の精度向上および観測範囲拡大を図る予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、レーダ観測にあたって、大阪大学の中辻啓二教授、国土交通省近畿地方整備局国営明石海峡公園事務所長であった松本正勝氏、神戸市建設局下水道河川部計画課係長であった岩橋哲也氏、大阪市港湾局ならびに大阪府環境農林水産部に多大なご協力を頂きました。また、レーダのピークサーチに関しては、当時大阪大学に在学していた中池悦郎氏、(株)電力計算センターの三枝健一氏、京都大学防災研究所の山口弘誠氏に協力して頂きました。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・西田修三・清水隆夫・中辻啓二（2005）：DBF海洋レーダを用いた大阪湾における流動・フロントの観測，海岸工学論文集，第52巻，pp.1006-1011.

坪野考樹・吉井 匠・松山昌史・坂井伸一・多田彰秀・水沼道博（2008）：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，海岸工学論文集，第55巻，pp. 1006-1011.

柳 哲雄（2001）：沿岸海洋学，恒星社厚生学園，pp. 85-86.

気象庁・潮位表または60分潮一覧：潮汐海面水位のデータ潮位表（オンライン），<http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/index.php>，参照2008-06-18.

Barrick, D. (2006) : Geometric dilution of statistical accuracy in multi-static HF radar networks (オンライン)，http://www.codar.com/images/about/2006Barrick_GDOSA.pdf，参照2010-06-18

Chapman, R. D., L. K. Shay, H. C. Graber, J. B. Edson, A. Karachinstev, C. L. Trump and D. B. Ross(1997) : On the accuracy of HF radar surface current measurements; Intercomparisons with ship-based sensors. J. Geophys. Res., Vol. 102, pp. 18737-18748.