九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

対馬海峡表層海況監視海洋レーダーシステム

奥野, 章
九州大学応用力学研究所

吉川, 裕
九州大学応用力学研究所

増田, 章
九州大学応用力学研究所

丸林, 賢次
九州大学応用力学研究所

他

https://doi.org/10.15017/3547

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 126, pp.57-67, 2004-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

対馬海峡表層海況監視海洋レーダーシステム

奥野 章*1　吉川 裕*1　増田 章*1　丸林 賢次*1　石橋 道芳*1

(2004年1月30日受理)

Ocean Radar System to Monitor Surface Currents in the Tsushima Straits

Akira OKUNO, Yutaka YOSHIKAWA, Akira MASUDA,
Kenji MARUBAYASHI and Michiyoshi ISHIBASHI
E-mail of corresponding author: *okuno@riam.kyushu-u.ac.jp*

Abstract

A radar observation system to monitor surface currents in the Tsushima Straits was constructed. The system consists of seven high frequency (HF) ocean radars remotely controlled from the central site set up at Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University. This paper describes the hardware specification and configuration of the system. The data processing flow of the radar observation is also explained. Furthermore, some troubleshooting cases which occurred in practical operation of the system are reported. Finally, a few examples of recent oceanographic results derived from the radar data are shown. It is expected that the data obtained by this radar system will be important bases for future research works on Japan Sea oceanography.

Key words : *Ocean Radar, Tsushima Straits, Remote Sensing*

1. はじめに

日本海は少数の海峡で太平洋・オホーツク海と接続された半閉鎖海域である．太平洋・大西洋といった大洋と比べると小規模な海であるが，それら大洋と類似の性質をもち，海洋学研究上の示唆に富む「小大洋」であるといえる．また，海洋物理の研究に際してきわめて重要である流入・流出の境界条件が把握しやすいこともあり，研究対象海域としての日本海の価値はさらに揺るぎないものとなる.[1)]

日本海に出入りする海水の基本的な流れのパターンは，対馬海峡で日本海に流入した海水が津軽海峡・宗谷海峡から太平洋・オホーツク海に流れ出るというものである．このため，最上流側にあたる対馬海峡での流動を把握することがとくに重要になる．

九州大学応用力学研究所が実施している博多–釜山間の定期旅客船を用いた航路断面観測は，そのような目的に沿った研究活動の好例である.[2, 3)] 航路に沿った鉛直断面内の流速が定期的に得られるこの観測は，対馬海峡を通過する海水の流量を把握する目的には適している．しかし，水平的な広がりをもつ流れの構造をとらえることは難しい．

これに対し，近年各地に導入が進められている海洋レーダーは，計測可能な流れが海面付近に限定されるものの，水平面内で時間的・空間的に高密度の広域海流観測を実現できる装置である．対馬海峡を海洋レーダーで監視し，他の観測と相互に補完しあえば，より豊かな海洋学的知見が得られるものと期待される．

このような観点に立ち，1999年には通信総合研究所との共同研究として海洋レーダーを用いた対馬海峡表層海流の予備観測を実施した．その際に良好な観測結果を得たことは，既に報告したとおりである.[4)]

これに意を得て，九州大学応用力学研究所力学シミュレーション研究センターを中心として大型事業研究「日本海表層海況の監視と予測」を推進する運びとなった．その根幹をなすのが，対馬海峡表層海況監視海洋レーダーシステムである．

このシステムは，対馬を中心として設置した7基の海洋レーダーを用い，対馬海峡東西両水道の流れを長期監視することを目的とする．得られたデータは，日本海研究にとって重要な情報となるであろう．システムは2002年1月より稼動を開始し，すでに2年の運用期間を経た現在も，順調にデータを収集しているところである．

本報では，この対馬海峡表層海況監視海洋レーダーシステムを，計測原理・機器構成・データ処理といった側面から紹介する．また，これまでの運用期間に生じた重要な問題と対処について報告する．加えて，レーダー観測より得

*1 九州大学応用力学研究所

られた結果の一部を示し，結びに今後の展望を述べる．

2. 海洋レーダーの計測原理

近年，国内における海洋レーダーを用いた表層海流観測の事例も増え，海洋レーダーの海流計測原理についてはよく知られるところとなった．海洋レーダー全般の技術と開発の経緯を簡潔にまとめた文献もすでにあり[5]．また，沿岸観測用の海洋レーダーについてその原理を含めて詳述した成書もある[6]．そこで，海洋レーダーによる海流計測の原理について，ここではごく簡単にふれるにとどめておく．

海洋レーダーは，海に向けて特定の周波数の電波を送信し，海面の起伏による後方散乱を受信する．海面波による海面の起伏は一般には不規則で，あらゆる波長・波向の波の重ね合わせとして表現される．このとき，レーダーの送信波の波長 λ_R の半分の波長 λ_W をもちレーダー視線方向に伝播する海面波が Bragg 共鳴散乱を起こす．さらに，海面波による海面起伏は，海面波自身の伝播と海洋表層の流れの影響により移動しているので，Doppler 効果により，受信波の周波数は送信波のそれとは一致しない．

以上のことをふまえ，Doppler 効果による周波数変化 (Doppler 周波数) Δf に対する受信波のスペクトル (Doppler スペクトル) を算出すると，上述の Bragg 共鳴散乱を表す鋭いピークが現れる．このピークの位置 (Δf) は，Bragg 共鳴散乱を起こした海面波の (静水における) 位相速度 c_p と海洋表層流速のレーダー視線方向成分 V の和を反映していると考えられる．海面波がいわゆる深水波であることを仮定すると c_p は既知であるから，Δf から c_p の寄与分を差し引けば V を求めることができる．

なお，レーダーが計測する視線方向流速 V —すなわち，海面波の起伏の移動に影響する海洋表層流速は，海面から $d \sim \lambda_W/4\pi = \lambda_R/8\pi$ ほどの深さまでの平均的な値であるといわれている[7]．

このようなレーダー 2 基を適当に隔てられた 2 地点に設置し，同一海域における視線方向流速 V を各々計測すれば，それらを合成することにより海洋表層流速ベクトルが得られる．

測距原理は通常のレーダーと同様である．すなわち，送信から受信までの時間を距離に換算する．信号到来方位の決定については，送信波に指向性をもたせることで信号到来方位を限定する手法や，多方位からの信号を複数の受信アンテナを用いて一度に受信し，後の解析により到来方位ごとの情報を分離する手法がある．

以上が海洋レーダーによる海流計測の原理のあらましである．なお，後述するとおり，本報に述べる海洋レーダーシステムでは，対馬海峡東水道を 5 基のレーダーで観測している．海域によっては 3 つ以上の V が得られることがあり，海流ベクトルを単純な合成によって一意に定めることができない．このような場合の最適な海流ベクトル推定手法の開発も，このシステムに関連した研究の視野に入る．現在までに開発した手法は所与の V に最も適合する海流ベクトルを最小二乗法の手法で求めるというもので，良好な結果をあたえている．

3. システム構成

本節では，対馬海峡表層海況監視海洋レーダーシステムの構成について，機器構成とデータ処理の流れの二側面から述べる．

3.1 機器構成

対馬海峡表層海況監視海洋レーダーシステム (以降システムと略記) は 2 機種のレーダーにより構成される．一方の機種は CODAR 社製の短波海洋レーダー SeaSonde (以降 CODAR と略記) である．長距離・広範囲を計測するために比較的低い周波数帯 (13 MHz 帯) の電波を用いる．もう一方の機種は長野日本無線社製の短波海洋レーダー (以降 NJRC と略記) である．こちらは中距離計測用で，可搬式の仕様となっている．CODAR に比べて高い周波数帯 (24 MHz 帯) の電波を用いる．CODAR, NJRC 双方の諸元を Table 1 および Table 2 に示す．

CODAR と NJRC では使用周波数帯が異なるため，双方の計測水深が異なるということになるが，実際に得られるデータには有意な差は現れないようである．

CODAR, NJRC とも，GPS 時刻同期信号を用いて各計測局が同期動作するため，送受のタイミングを相互にずらすことにより，同一海域を同時刻に計測することが可能となっている．なお，当初 NJRC には同期機能がなかったが，後の仕様変更で実現されたことを付記しておく．

CODAR は独特の交差ループ受信アンテナを用いて全方位からの信号を一度に受信し，後の解析で到来方向ごとの情報の分離をおこなう．ごく大まかに述べると，ある Doppler 周波数に対応する信号が交差した 2 本の指向性アンテナにどのような強度比で受信されるかによってその信号の到来方向を決定するという方法である[8]．この方式には，アンテナ系を小型化でき，また，原理的には全方位を観測できるという利点がある．本システムの CODAR の受信アンテナの一例を Fig. 1a に示す．一方，NJRC は直線配列アンテナで信号を受信し，各々の素子アンテナの出力の振幅・位相を演算処理して信号到来方向を算定する方式である．これを Linear Array Digital Beam Forming (直線配列 DBF) 方式という．直線配列アンテナを用いるため，アンテナ系の設置面積は大きくなる．本システムの NJRC の場合，設置面積は 7 m × 60 m 程度を要する．本システムの NJRC の受信アンテナの一例を Fig. 1b に示す．

設置面積は CODAR の方が格段に小さく，NJRC よりもむしろ CODAR の方が可搬性があるように思える．しかし，CODAR の場合，観測を開始する前にアンテナパ

Table 1　Specification of CODAR radars.

Radar type	FMICW
Transmit power	40 W (peak)
Frequency	13.946 MHz ±25 kHz
Sweep rate	2 sweeps per second
Measurement depth	~172 cm
Maximum range	~100 km
Effective range	~75 km
Ranging resolution	3.03 km
Direction finding	MUSIC with crossed-loop receive antenna
Directional coverage	360° (72 directions)
Directional resolution	5.0°
Polarization	Vertical

Table 2　Specification of NJRC radars.

Radar type	FMICW
Transmit power	200 W (peak)
Frequency	24.515 MHz ± 50 kHz
Sweep rate	2 sweeps per second
Measurement depth	~98 cm
Maximum range	~90 km
Effective range	~50 km
Ranging resolution	1.50 km
Direction finding	DBF with phased-array receive antenna (8-element array; 3-element Yagi)
Directional coverage	±45° (12 directions)
Directional resolution	7.5°
Polarization	Vertical

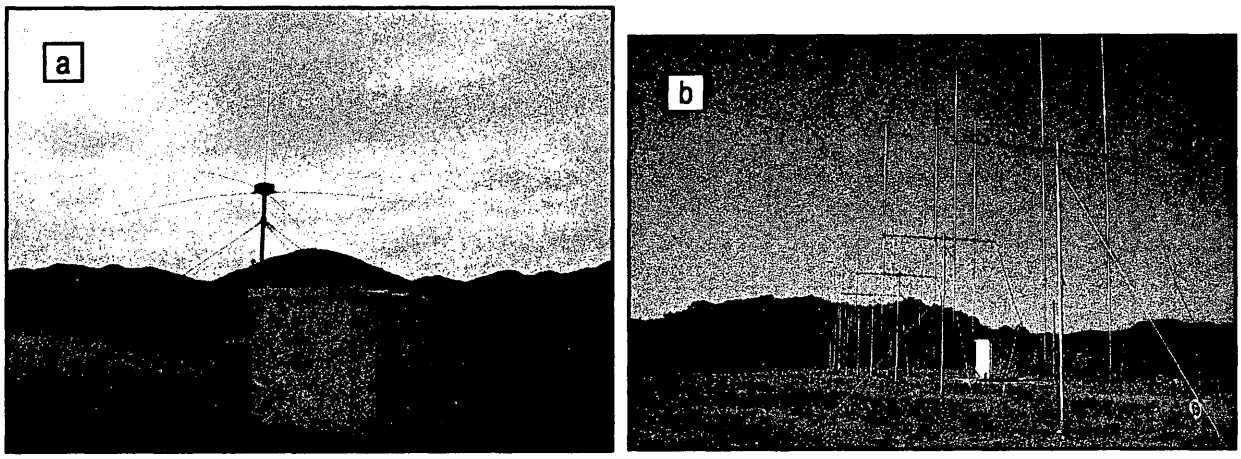

Fig. 1　(a) Crossed-loop antenna of CODAR radar set on shelter box at Siine site. (b) Phased-array antenna of NJRC radar and shelter box at Akashima site.

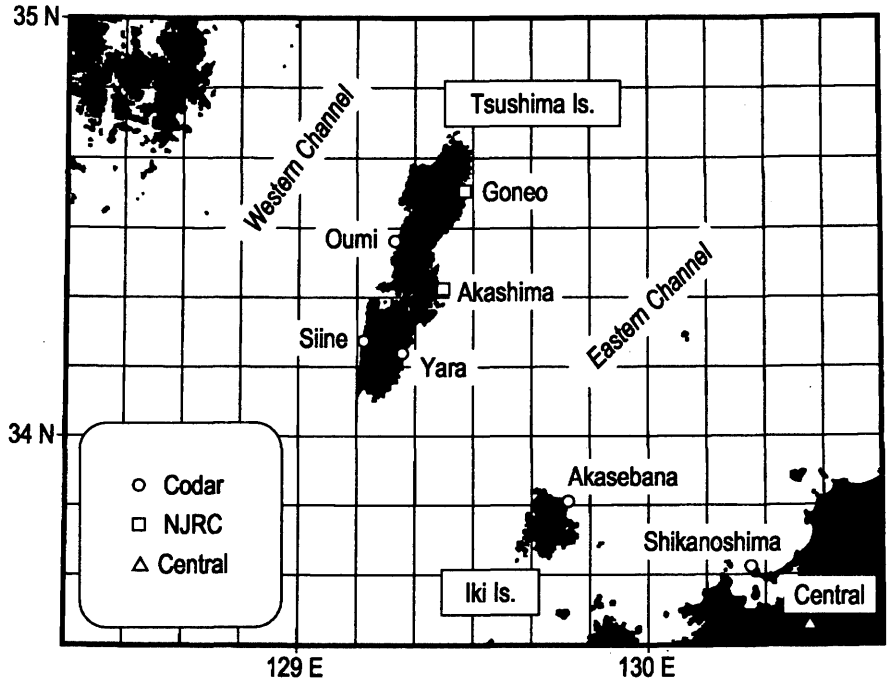

Fig. 2 Geographical distribution of the seven measurement sites and the central site. Three CODAR radars (Shikanoshima, Akasebana and Yara) and two NJRC radars (Akashima, Goneo) observe surface currents in the eastern channel of the Tsushima Straits. The other two CODAR radars (Siine and Oumi) face the western channel. All the radars are controlled from the central site set up at RIAM, Kyushu University.

Table 3 Positions and observation periods of the measurement sites. One CODAR radar had moved from Goneo site to Yara site to improve data quality.

Site name	Radar type	Position	Observation period
Shikanoshima	CODAR	130° 17′ 30″ E, 33° 41′ 12″ N	2002/01/10 — contd.
Akasebana	CODAR	129° 46′ 14″ E, 33° 50′ 36″ N	2002/01/11 — contd.
Goneo	CODAR	129° 28′ 41″ E, 34° 35′ 20″ N	2002/01/13 — 2002/12/12
Siine	CODAR	129° 11′ 11″ E, 34° 13′ 45″ N	2002/01/12 — contd.
Oumi	CODAR	129° 16′ 31″ E, 34° 28′ 08″ N	2002/01/13 — contd.
Yara	CODAR	129° 17′ 51″ E, 34° 12′ 00″ N	2003/08/22 — contd.
Akashima	NJRC	129° 24′ 39″ E, 34° 21′ 05″ N	2002/01/24 — contd.
Goneo	NJRC	129° 28′ 41″ E, 34° 35′ 20″ N	2002/11/19 — contd.

ターン計測 (後述) を実施する必要がある．設置後観測に移行するまでの時間は NJRC の方が短くてすみ，より機動性があるといえる．現在のところ，CODAR 5 基，NJRC 2 基の編成である．

これらのレーダーを，対馬海峡東水道に面して 5 基，西水道に面して 2 基，計 7 基設置し，2002 年 1 月より本格運用を開始した．Fig. 2 に各局の地理的配置を示す．対馬海峡東水道は CODAR 3 基 (志賀島・赤瀬鼻・野良) と NJRC 2 基 (赤島・五根緒) を用いて観測する．一方，西水道は CODAR 2 基 (椎根・青海) を用いて観測する．各計測局の座標は Table 3 に示すとおりである．NJRC は通常運用時には対馬海峡表層海流の観測に用いるが，他所で至急短期集中的に計測をおこなう必要が生じた場合には即時移設することも想定している．すべてのレーダーは九州大学応用力学研究所に設置した中央局から遠隔制御できるようになっている．計測局・中央局の端末計算機に導入した遠隔操作用ソフトウェアにより，計測局の状況を中央局から監視することも可能である．CODAR, NJRC 双方の計測局において，端末計算機，およびアンテナ系を除いた送受信用機器類は，空調を備えた 2.8 m (D) × 2.0 m (W) × 2.4 m (H) ほどの大きさのシェルターボックスに収納される (Fig. 1 参照)．

システム運用開始時には，五根緒に CODAR と NJRC を併設していた．しかし，CODAR の計測データの品質が著しく悪かったため，2002 年 12 月に計測を打ち切り野良に移設した．CODAR 野良局は設営・運用開始に時間がかかり，2003 年 8 月の本運用開始となっている (この事情については後述する)．また，CODAR 移設を決定するまでの間 NJRC 五根緒局は運用を停止していた．そのため，NJRC 五根緒局の本運用は 2002 年 11 月 に開始した．一部 CODAR と NJRC の稼動期間が重なっているのは，その間五根緒において CODAR と NJRC の交互運転試験をおこなったためである．

3.2　データ処理の流れ

現状の運用では，各計測局は 1 時間に 1 つのデータセットを生成する．ただし，CODAR と NJRC とではデータの関与時間が異なっている．CODAR は常時送受信を続けており，得られるデータは 1 時間にわたっての平均値の意味になる．一方，NJRC は 1 時間に 1 回，30 分間の送受信をおこなう．得られるデータはその 30 分間の平均値ということになる．なお，前述のとおり，当初 NJRC は同期動作機能をもたなかったため，赤島局・五根緒局が交互に計測をおこなっていた．その間の計測時間は両局とも 20 分であった．30 分計測への移行は 2003 年 5 月 22 日に完了している．

計測局に蓄積されたデータは，1 日に 1 回，まとめて中央局に転送・収集する．CODAR, NJRC とも ISDN 回線を使用する．CODAR はターミナルアダプターのアナログポートとアナログモデムを用い，NJRC はシリアルポートを通じてデジタル通信をおこなう構成である．

CODAR は計測局において視線方向流速データを生成する．したがって，中央局に転送されたデータは直ちに流況解析に用いることができる．他方，NJRC の場合，中央局に転送されるのは Doppler スペクトルデータである．そのため，流況解析に先立ち，視線方向流速データを生成する作業が必要となる．現時点ではこれを手動操作で実行せねばならないが，自動化するべく目下作業中である．

このようにして中央局に集積した各計測局の視線方向流速データを自主開発した解析プログラムで処理し，対馬海峡東西両水道の表層流況を得る．流況データは，利便性の高い経度 - 緯度格子上に生成する．流況解析は 1 日に 1 度自動的に実行される．その際作成される流況図を，将来的には Web を通じて一般に公開する予定である．

以上のような現状の運用形態では，計測から流況解析までに 1 日程度の遅れが生じる．ただし，対馬海峡で海難事故や油流出事故などが発生し，表層流況を速報する必要が生じた場合には，データ転送と解析処理の頻度を上げて対応することが可能である．

4.　運用上の問題と対処

観測システムを長期運用していると，種々雑多な障害に遭遇する．本報で紹介しているレーダーシステムについても，中央局・計測局間の通信障害，それに起因する転送データの途絶，落雷の影響による機器破損，ラジオ等の外来電波の混信によると思われるデータ品質の悪化など，細かい事柄まで数え上げれば枚挙に暇がない．ただし，それらのほとんどは中央局からの遠隔操作，ないし計測局現地での機器交換作業により即時復旧するような性質のものであった．定期保守点検作業も含め，離島へ出向いての作業が多くなる点に難はあるが，これは致し方あるまい．

本節では，システム運用開始より現在までに遭遇した問題から，とくに記録しておくべきと考えられる案件 3 つを紹介する．うち 2 つの案件は，システム構成に変更をきたす重要なものであった．

4.1　台風による被害

通常，海洋レーダーは海岸近くの見通しのよい場所に設置される．荒天時には風雨に晒されるため，装置全般，とくにアンテナ系には充分な強度・耐風性・耐水性が要求される．また，防錆・防塩の処置も厳重におこなう必要がある．当然，事前に検討をおこない，対策を施した上で設置するわけであるが，想定以上の荒天となった場合には装置が破損することもある．

2003 年 9 月 12 日 21:00 ごろ，対馬海峡西水道を台風 14 号 (0314) が通過した。翌 13 日，台風通過後の状況の

レーダーの観測海域で船舶搭載 ADCP が計測した流速のレーダー視線方向成分 V^{ADCP} を求め，同時刻にレーダー各局が計測した視線方向流速 V^{HF} と比較するという手法を用いている．

以上のような検討の結果，ADCP 計測データとレーダー計測データの一致は従来の比較結果と同程度であるにも関わらず，対面レーダー比較では看過できない系統的誤差が存在することがわかった．さらに，この系統的誤差は，とくに CODAR のデータに起因することが示唆された[9]

そのような誤差を生ずる原因として，CODAR が信号到来方向分離に用いるアンテナパターン (アンテナ指向特性) の問題が考えられた．システム構成の節に述べたように，CODAR は交差ループアンテナの指向特性から定まる受信信号の強度比を用いて信号到来方向を判定する[8] したがって，設置した受信アンテナの実際の指向特性を適切に解析に反映させなかった場合，計測結果に方位の狂いが生じてしまう．

実際には，レーダー設置地点の地形や周囲の構造物，とくに誘電体の存在により，レーダーのアンテナパターンは容易に変化し，想定される理想的なパターンとは異なったものになる．このことから，CODAR の設置に際しては現地におけるアンテナパターンの実測が事実上必須となっている．

しかし，実測アンテナパターンをそのまま用いると，アンテナパターン計測に含まれる誤差に起因してデータが生成される方位が限定されてしまうことがある．そのため，実測アンテナパターンがそれほど大きく歪んでいないのであれば，むしろ想定アンテナパターンを用いた解析に適当な補正を施す方が計測率の観点からは望ましいという場合もあって，話はそう簡単ではない．

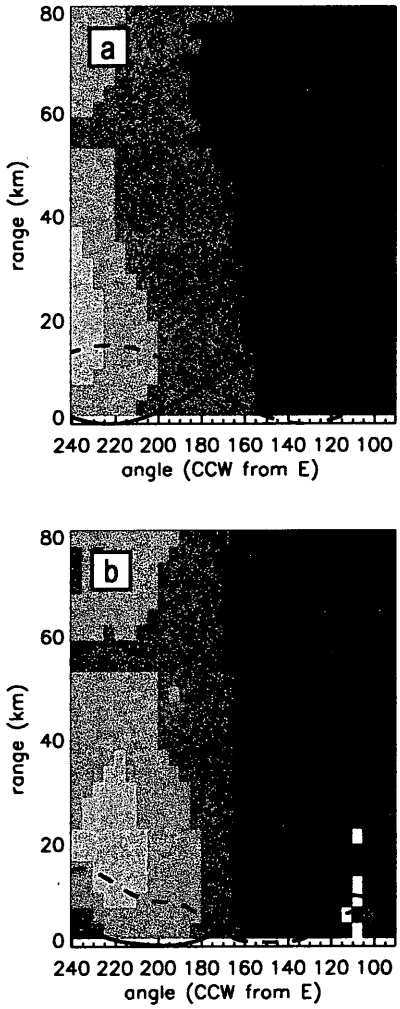

Fig. 5 Monthly mean of the radial velocities measured by Oumi radar (CODAR) in October, 2003. The data processed with the ideal antenna pattern (a) and with the measured antenna pattern (b) are mapped in direction-range space. Brighter and darker colors indicate positive and negative large radial velocities, respectively. Curves above the angle axis of each panel depict the antenna pattern (Solid: Loop 1, Dashed: Loop 2). The direction finding error due to the distortion of antenna pattern is clearly shown in comparison between (a) and (b).

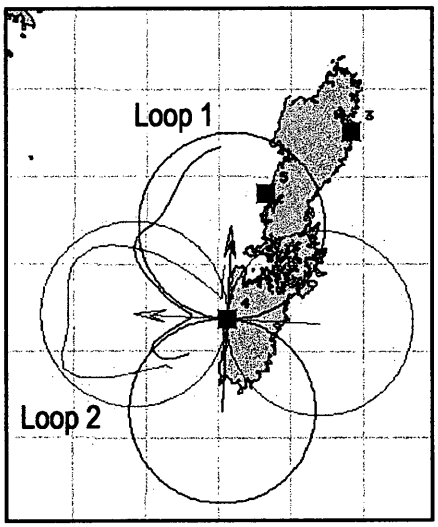

Fig. 4 Comparison between the ideal antenna pattern and the measured antenna pattern of Siine radar (CODAR). Ignorance of the distortion of antenna pattern had caused the direction finding error in radar measurements.

アンテナ設計時に想定される理想的なアンテナパターンに対し，実際に設置されたアンテナパターンがどのように歪むのかということの実例を Fig. 4 に示す．図中正円で表されているのが想定アンテナパターン，その内側の曲線が実測アンテナパターンである．システム稼動後 2003 年

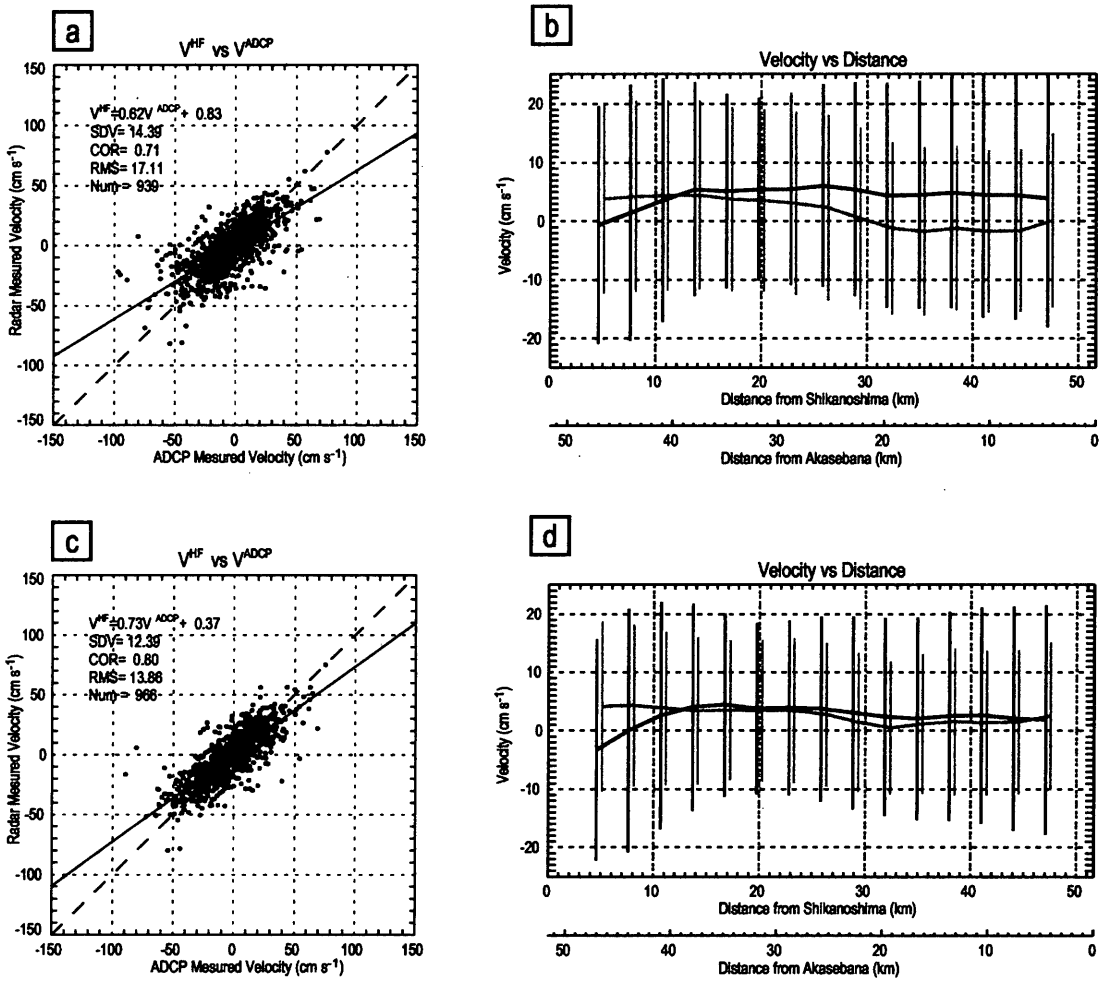

Fig. 6 Validation of the radial velocities measured by the radars. (a) Comparison between the radial velocities measured by radars (V^{HF}) and the radial velocities measured by ADCPs (V^{ADCP}). The CODAR data included were processed with the ideal antenna pattern. The compared data were sampled from September to December, 2003. (b) Facing-radar comparison of the monthly-mean radial velocities of October, 2003, between Shikanoshima (CODAR) and Akasebana (CODAR) radars. The data were processed with the ideal antenna pattern. The black and gray colors indicate Sikanoshima and Akasebana, respectively. Thin vertical lines show the standard deviatoin for each mean radial velocity. Panels (c) and (d) are the same as (a) and (b) but with CODAR data processed with the measured antenna pattern for each site. Change of data quality due to antenna-pattern selection can be seen clearly in the two cases of facing-radar comparison (b) and (d).

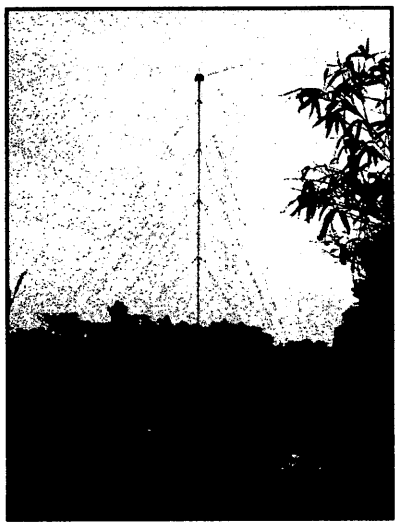

Fig. 3 Receive antenna of Yara radar (CODAR). The crossed-loop receive antenna is raised ~13 m from the ground level to make clear view in front of the antenna.

確認をとったところ，NJRC 赤島・五根緒両計測局の配列アンテナの一部が倒壊・破損していることが判明した．システム構築時にあらかじめ用意しておいた交換用アンテナを用いて直ちに修復作業をおこない，9 月 18 日には両局とも復旧した．

このときの台風被害と復旧の経験から，海洋レーダーを用いた長期観測をおこなう場合には，観測を途絶させないために，アンテナ系に限らず予備・代替の機器の準備が重要であることが実感された．海況監視を業務としておこなう場合には，この点がより重要になるだろう．とくにわが国の南西地方の場合，台風の通過は事前に充分に想定できるため，長期観測を目的とした海洋レーダーの導入時にはこれに備えた交換用機材の準備が検討されてしかるべきであると考える．

4.2 設置場所の選定に関連する問題

すでに述べたとおり，五根緒には当初 CODAR と NJRC 両機種を併設していた．対馬は山がちの島で，海沿いにレーダー設置に好適な土地を探すことが非常に難しい．そのため，やむを得ず同一地点に 2 機種併設することとなったわけである．

ところが，システムの運用を開始すると，CODAR 五根緒局のデータ品質，およびデータ計測率が非常に悪いことが判明した．併設のため条件の悪い場所に CODAR の受信アンテナを設置せざるを得なかったこと，および，NJRC 配列アンテナの影響で CODAR 交差ループアンテナのアンテナパターンが歪められたことが原因と考えられた (アンテナパターンの歪みの影響については項をあらためて詳しく述べる)．

そこで，レーダーを設置可能な土地をあらためて探し，最終的に CODAR を野良に移設することとなった．CODAR 五根緒局の運用を 2002 年 12 月 12 日に打ち切り，明けて 2003 年 2 月 5 日には CODAR 野良局の仮運用を開始した．

しかし，移設直後の CODAR 野良局は，レーダー正面方位のデータ計測率が著しく悪く，そのままでは海況監視の目的に寄与できないことがわかった．この問題は，レーダー正面方位に地形が張り出しており，見通し視界が確保できなかったためであると考えられた．とはいえ，他にレーダー設置に適した土地があるわけでもなく，何らかの対策を講ずる必要があった．

結局，受信アンテナのみさらに海側に移動させ，同時に，Fig. 3 のように受信アンテナを地上高約 13 m までかさ上げすることで見通し視界を確保した．この処置後，計測データの品質は格段に向上し，問題なく流況解析に用いることができるようになった．

以上のような経緯を経て，CODAR 野良局の本運用は 2003 年 8 月 22 日に開始した．この紆余曲折から，やむを得ず最適とはいえない地点にレーダーを設置する場合であっても，対策次第で質のよいデータが得られるという感触をもった．

4.3 アンテナパターンの歪みに起因する問題

2002 年 1 月のシステム運用開始以降，計測データの品質に関する検討を精力的におこなってきた[9]．

レーダー計測データの対面レーダー比較 (facing-radar comparison) はその一例である．東水道に設置したレーダーのうち，志賀島局と他の計測局との基線 (2 基のレーダーを結ぶ線分) 上には，双方のレーダーから観測可能な点が含まれている．それらの点においては，同一時刻に双方のレーダーが計測する視線 (基線) 方向流速の大きさが等しく，互いに逆向きになっていなければならないはずである．このような比較をおこなうことにより，レーダー機種間および計測局間のデータの一貫性・誤差の検討が可能となる．この種の検討は，これまであいまいにされてきた海洋レーダーの計測誤差を把握する上で非常に重要であるといえる．しかるに，このような手法を用いた検討は従来ほとんどおこなわれておらず，わずかに 1 例が報告されているのみである[10]．

また，レーダー観測と他種測器による観測の結果を総合し海洋学的研究を進めるためには，レーダーの計測結果と他種測器による測流結果との整合性を当然検討しておかなければならない．比較対象として計測精度のよく知られた測器を選べば，レーダーの計測精度についても評価できるはずである．このような目的で，システム稼動後，Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) による測流結果との比較・検討をおこなってきた．簡単に述べると，

8月までは，システムを構成するCODARのアンテナパターンの歪みは許容範囲にあり，想定アンテナパターンを用いた解析に適当な補正をおこなうことで対応可能であるというCODAR社の技術者の判断に基づき，想定アンテナパターンのみ用いてデータの生成をおこなった．

しかし，実際に生成されたデータの品質には問題があったため，2003年7月に各局のアンテナパターンをあらためて測定しなおし，同8月末より，想定・実測双方のアンテナパターンを用いて2種類のデータを生成するよう，すべてのCODARの運用方法を変更した．

Fig. 5に，実測アンテナパターンを用いることによりCODARの方位選定結果が変化することの一例を示す．この図は，2003年10月に青海局で計測された視線方向流速を平均し，方位 - 距離空間に表示したものである．a図は想定アンテナパターンを用いた場合，b図は実測アンテナパターンを用いた場合を示す．方位は東を0°として反時計回りに測った角度で表している．方位軸上の曲線はCODARの交差ループアンテナのアンテナパターンを表す．実線がループ1，破線がループ2である．色の濃淡は視線方向流速の大小に対応している(淡色が大)．距離20 km付近に見える視線方向流速の極大・極小は，青海局西方を南方から北方に通過する対馬暖流を表している．この極大・極小を含め，a図・b図の視線方向流速分布を比較すると，想定アンテナパターンを用いた場合と実測アンテナパターンを用いた場合とで，選定方位が左右約20°ずつ変化していることがよくわかる．たとえば極大の現れる方位は，a図では240°付近であるが，b図では220°付近である．

このような方位選定の変化が対面レーダー比較やADCPデータとレーダーデータとの比較にどのような変化をもたらすかを調べた結果の一例をFig. 6に示す．a図，c図はADCP計測データとレーダー計測データの一致を散布図として示したもの，b図，d図は志賀島局と赤瀬鼻局(ともにCODAR)の月平均視線方向流速の対面レーダー比較である．CODARデータの生成について，a図，b図は想定アンテナパターンを用いた結果，c図，d図は実測アンテナパターンを用いた結果を示す．

まず，ADCPデータとの比較についてみる．ここで用いたADCPデータは，海上保安庁第七管区海上保安本部提供のもの(計測水深は2 m, 5 m, 7 mのいずれか)，および，福岡県水産海洋技術センター提供のもの(計測水深5 m)である．想定アンテナパターンと実測アンテナパターンのいずれを用いるかに依らず，相関係数にして0.7 ～ 0.8程度，RMS誤差にして17 ～ 18 $\mathrm{cm\,s^{-1}}$程度の一致を示している．これらの数値は，これまでに知られる類似の比較結果と比べても遜色はない[11, 12]．ただし，実測アンテナパターンを用いた場合に一致の改善がみられる点は注目に値する．

一方，平均視線方向流速の対面レーダー比較では，アンテナパターンによる差が非常に顕著である．志賀島局と赤瀬鼻局の平均視線方向流速の差が，想定アンテナパターンを用いた場合には志賀島局からの距離40 km付近で7 $\mathrm{cm\,s^{-1}}$程度あったのに対し，実測アンテナパターンを用いた場合にはそのような差がほとんど解消し，志賀島局からの距離10 ～ 45 kmの範囲できわめてよい一致を示すようになっている．

以上のように，対面レーダー比較にみられた大きな誤差は実測アンテナパターンを用いたデータ生成をおこなうことで一応の解決をみた．結局，本システムを構成するCODARに関する限り，データ生成には実測アンテナパターンを用いる方がよいという結果であった．レーダー設置地点が地形的な制約の大きい山がちの島嶼に集中しているという事情が不利にはたらいたものであろう．

5. 観測結果から

前節までに，システム構成と運用開始後に生じた問題と対処について述べた．データ品質の問題に関しては解決までに1年8か月を要することとなってしまったが，幸いなことに，初期に計測したCODARのデータは実測アンテナパターンを用いた再解析が可能である．今後は，システム運用開始より現在までに蓄積した2年以上の長さのデータを用いた海洋学的研究へと移行していく．対馬海峡東水道にみられる渦流など，興味深い現象がすでに見出されているが，データ品質の問題が解決してから未だ日が浅いこともあり，それらについての議論は続報に譲る．ここでは，観測結果の例として，レーダー観測で得られた対馬海峡の潮流と平均流についてごく簡単に示すにとどめておく．広域を時間的・空間的に高密度に観測できる海洋レーダーの威力を感じ取っていただければ幸いである．

Fig. 7に，レーダー観測によって得られた対馬海峡のM_2潮流楕円を示す．レーダー計測データの品質の問題が解決後，2003年9月から12月のデータを用い，主要10分潮まで分解した結果である．まず各レーダーの視線方向流速時系列を調和分解し，その結果を合成することで潮流を得るという手順をとった．参考までに，高精度潮汐模型による計算値を同時に示した[13]．レーダー視界の周縁部では視線方向データの合成時に誤差が拡大されるため[14]，海域によって不自然な潮流が散見されるが，レーダー視界の中ほどでは，西水道・東水道とも基本的に地形に沿う潮流を示しており，まず妥当な結果であるといえる．ここでは直接比較結果を示すことはしないが，潮流楕円の振幅，長軸方位等，近傍海域における他の観測結果との整合性もよい[2, 3]．また，高精度数値模型の計算値との一致がよいことも一見してあきらかである．

Fig. 8は，2003年9月から12月のレーダー観測によって得られた対馬海峡の平均流である．先に述べた事情

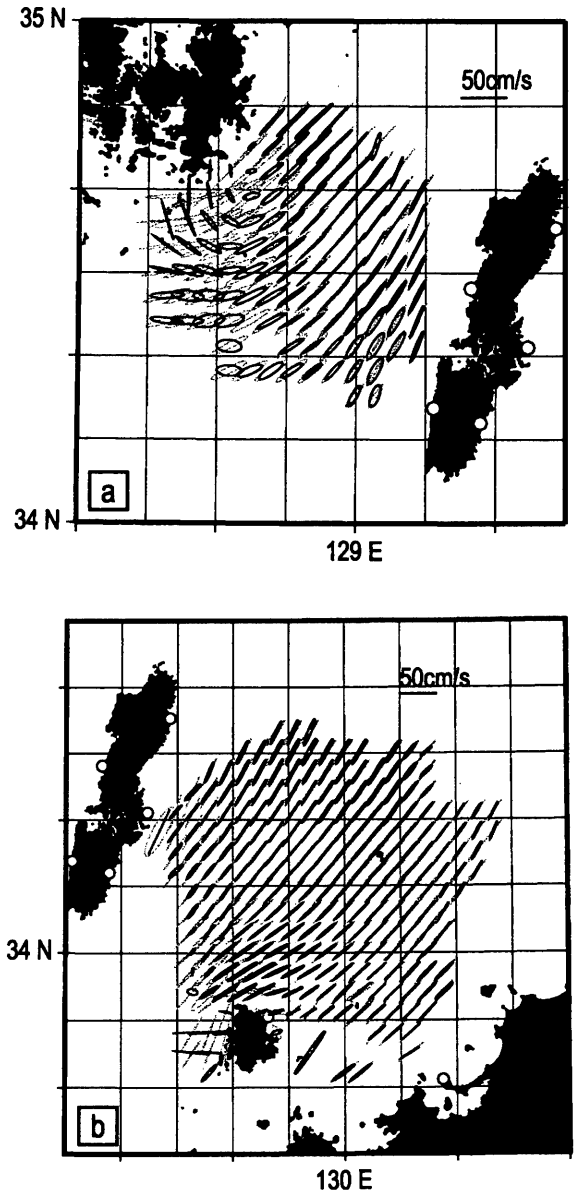

Fig. 7 M_2 tidal ellipsis in the Tsushima Straits derived from the radar observation from September to December, 2003. Ellipsis based on Kawano (1999) are also shown in gray color to reference. (a) Western channel. (b) Eastern channel.

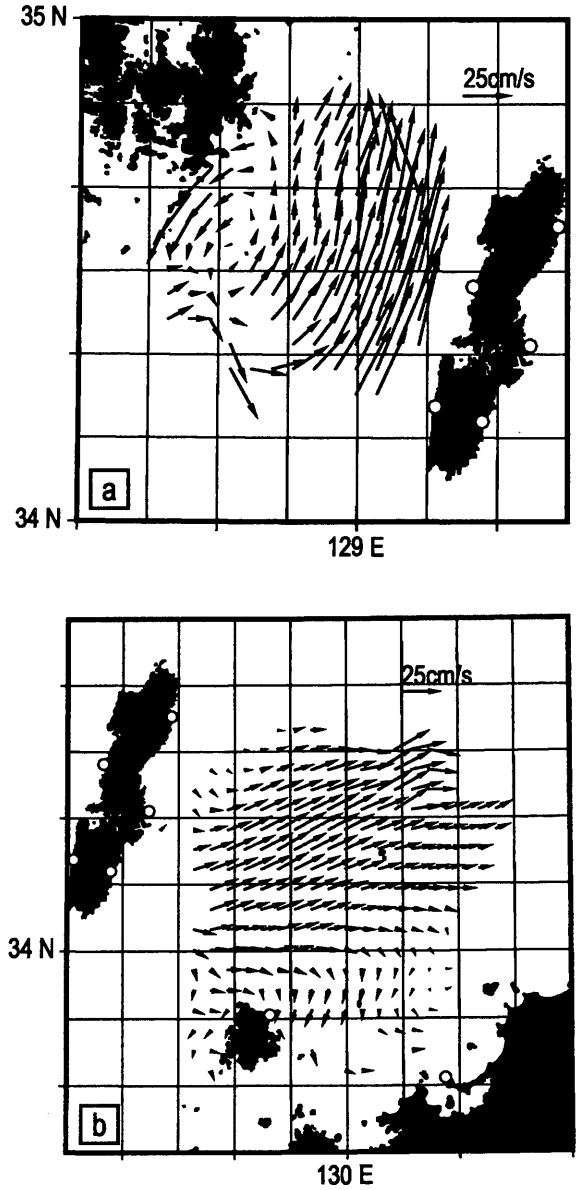

Fig. 8 Mean currents in the Tsushima Straits derived from the radar observation from September to December, 2003. (a) Western channel. (b) Eastern channel.

により，レーダー視界の周縁部に異常なベクトルが散見されるものの，基本的には対馬暖流のパターンが明瞭に捉えられている．南西より到来する対馬暖流により後流域となる対馬東方では，西水道に比べて平均流が小さいことに注意されたい．西水道では 50 cm s^{-1} に達する平均流が存在するのに対し，東水道では 25 cm s^{-1} を超える平均流はみられない．

以上示したような観測結果は，いずれも 1999 年の予備観測時の結果を踏襲している.[4)]

6. おわりに

日本海研究のための重要な基礎データを収集するべく，対馬海峡の表層流況を監視するための海洋レーダーを用いた観測システムを構築した．CODAR, NJRC の 2 機種のレーダーよりなるシステムは，運用を開始して以降，さまざまな障害に直面したものの，そのいずれも最終的には解

決し，現在は良質のデータを日々集積しつつある．

本報では，このレーダーシステムの機器構成やデータ処理の流れについて解説した．また，システム運用開始より現在までに生じたシステム運用上の問題から，今後の海洋レーダー導入に際して有用と思われるものを3例選び報告した．とくに，CODAR受信アンテナのアンテナパターンの歪みがデータ生成時に適切に考慮されなかった場合，計測データの質に深刻な影響をおよぼしうることを示した．

今後は，本システムにより得られる対馬海峡表層海況の長期観測データを用いて海洋学的な研究を進行させていく．対馬海峡の平均流や潮流，その季節変動性，あるいは擾乱の発生・伝播といったより時間規模・空間規模の小さい現象についての知見が得られるであろう．

たとえば，対馬海峡東水道において，対馬海流が対馬背後に作る後流渦と思われる渦流が生成・伝播する様子が，本システムの観測によってとらえられている．また，冬季季節風の卓越がレーダー観測による平均流場を変化させる様子も明瞭に確認できている．風況データと比較検討することにより，レーダー計測に対する海上風の影響も評価できるであろう．

さらに，冒頭に挙げた定期客船航路断面観測[2,3]等とレーダー観測を総合することにより，海峡部の流況をリモートセンシング技術を利用して3次元的に把握する手法を確立していく．将来的には，そこから得られる知見が日本海研究のための重要な基礎データとなると期待される．

謝辞

海上保安庁第七管区海上保安本部，ならびに福岡県水産海洋技術センターより，レーダー計測データと比較対照可能なADCP測流データをご提供いただきました．また，九州大学応用力学研究所の尹 宗煥 教授より，高精度潮汐数値模型によるデータをご提供いただきました．対馬にレーダーを設置するにあたっては，現地にお住まいの井 忠義氏，田村 健二 氏のお二方に格段のご配慮・ご尽力をいただきました．記して感謝の意を表します．

参考文献

1) 増田 章: 日本海における大気海洋相互作用と海洋変動・気象変動の解明に向けて, 月刊海洋, Vol. 30, (1998) 447–455.

2) 滝川 哲太郎, 尹 宗煥, CHO Kyu-Dae: 長期ADCPデータによる潮流成分調和分解と対馬海峡における潮流, 九州大学大学院総合理工学研究科報告, 第21巻, (1999) 307–311.

3) Takikawa, T, J.-H. Yoon, and K.-D. Cho: Tidal Currents in the Tsushima Straits Estimated from ADCP Data by Ferryboat, *J. Oceanogr.*, Vol. 59, (2003) 37–47.

4) 山本 秀幸, 増田 章, 草場 忠夫, 丸林 賢次, 石橋 道芳, 奥野 章, 藤井 智史, 佐藤 健治: HFレーダーを用いた対馬海峡表層海流の観測 —予備解析—, 九州大学応用力学研究所所報, 第122号, (2002) 9–23.

5) 藤井 智史: 海洋レーダの技術と歴史, 沿岸海洋研究, 印刷中.

6) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会: 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測, 土木学会, (2001) pp. 212.

7) Stewart, R. H. and J. W. Joy: HF radio measurements of surface currents, *Deep-Sea Res.*, Vol. 21, (1974) 1039–1049.

8) Lipa, B. J. and D. E. Barrick: Least-squares methods for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data: application at ARSLOE, *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. OE-8, (1983) 226–253.

9) 吉川 裕, 増田 章, 丸林 賢次, 石橋 道芳, 奥野 章, 山下 義幸: HFレーダーによる対馬海峡表層海流観測 —計測精度の検証—, 沿岸海洋研究, 印刷中.

10) Lipa, B. J.: Uncertainties in SeaSonde current velocities, *Proceedings of the IEEE/OES Seventh Working Conference on Current Measurement Technology*, (2003) 95–100.

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

12) Nadai, A., H. Kuroiwa, M. Mizutori, and S. Sakai: Measurements of ocean surface currents by CRL HF ocean surface radar of the FMCW type. Part 1. Radial current velocity, *J. Oceanogr.*, Vol 53, (1997) 325–342.

13) 河野 史郎: 対馬海峡における高精度潮汐モデルの研究, 九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻修士論文, 九州大学, (1999) pp. 51.

14) Nadai, A., H. Kuroiwa, M. Mizutori, and S. Sakai: Measurements of ocean surface currents by CRL HF ocean surface radar of the FMCW type. Part 2. Current vector, *J. Oceanogr.*, Vol. 55, (1999) 13–30.