

短波レーダーにより観測された対馬海峡の潮流

奥野, 章
水産総合研究センター中央水産研究所

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/10.15017/16757>

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 27 (1), pp.9-18, 2005-06. 九州大学大学院総合理工学府
バージョン：
権利関係：

短波レーダーにより観測された対馬海峡の潮流

奥野 章^{*1,†} · 吉川 裕^{*2} · 増田 章^{*2} · 丸林 賢次^{*2} · 石橋 道芳^{*2}
(平成17年4月28日 受理)

Tidal Currents in the Tsushima Straits Observed by HF Radars

Akira OKUNO, Yutaka YOSHIKAWA, Akira MASUDA,
Kenji MARUBAYASHI and Michiyoshi ISHIBASHI

[†]E-mail of corresponding author: okuaki@affrc.go.jp

Tidal currents in the Tsushima Straits observed by HF Radars are described in two different points of view. First, spatial pattern of the currents of fundamental tidal constituents in the Tsushima Straits are shown. The results agree well with past observations. Then seasonal variability of the radial amplitudes of M_2 currents is explained. The radial amplitudes of M_2 currents in the Tsushima Straits observed by the radars increase in winter and decrease in summer. This phase property qualitatively agrees well with that of the seasonal variability of the M_2 amplitude of sea level observed around the Tsushima Straits.

Key words: *Tsushima Straits, Tidal Currents, HF Ocean Radar*

1. はじめに

日本海は少数の海峡を通じて太平洋・オホーツク海と接続された半閉鎖海域である。日本海は太平洋や大西洋といった大洋に比べればごく小規模な海であるが、そこで観測される物理現象は大洋のそれと類似した性質をもつ。このため、日本海は海洋学研究上の示唆に富む「小大洋」と考えられている。また、外海との接続が少数の海峡に限られ、流入・流出の境界条件の把握が比較的容易であることから、研究対象海域としての日本海の価値はさらに高まる。¹⁾

日本海と外海との間を行き来する海水の基本的な動きは、対馬海峡で日本海に流入し、津軽海峡・宗谷海峡から外海に流れ出るといったものである。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となる。

このような観点に立ち、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では、海洋レーダーを用いた対馬海峡表層の流況監視を実施している。²⁾

海洋レーダーは、海面直下の流れしか計測できないという制約はあるものの、広域水平面内の海流計測を時間的・空間的に高い密度で実施できる装置である。鉛直方向の分布を得られるような他の観測結果とレーダー観測の結果を組み合わせれば、対馬海峡内の流れを立体的に把握することができるものと期待される。

本報では、上述の海洋レーダー観測に基づいて得られた対馬海峡内の潮流について、ふたつの項目に焦点を当てて報告する。

まず、一点目として、レーダー観測に基づく対馬海峡の基本的な潮流の空間分布を示す。水平面内の流れの分布を時間的・空間的に高密度に得ることができる海洋レーダー観測の利点を活かし、対馬海峡の潮流の空間分布を把握することが趣旨である。

二点目として、長期沿岸水位資料の解析結果として報告されている対馬海峡の M_2 潮の季節変動が、レーダー観測に基づく潮流振幅においてもみられたことを述べる。

2. レーダーシステム

前述のとおり、九州大学応用力学研究所では、対馬海峡に2機種7機の短波海洋レーダーを設置し、2002年1月から対馬海峡表層の海況を監視している。これを対馬海峡表層海況監視海洋レーダーシステムと称する(以降システムと略記する)。

システムは、Codar社製13MHz帯レーダー(Codarと略記)5基と、長野日本無線社製24MHz帯レーダー(NJRCと略記)2基により構成される。CodarとNJRCには、使用する電波の周波数帯—したがって計測水深が異なるほか、距離・方位分解能や視界範囲など、種々の差異がある。しかし、実際に得られる流速データには顕著な機種間差が認められない。このため、Codar、NJRC双方のデータを、特段の区別をせずに用いている。

*1 水産総合研究センター中央水産研究所

*2 九州大学応用力学研究所

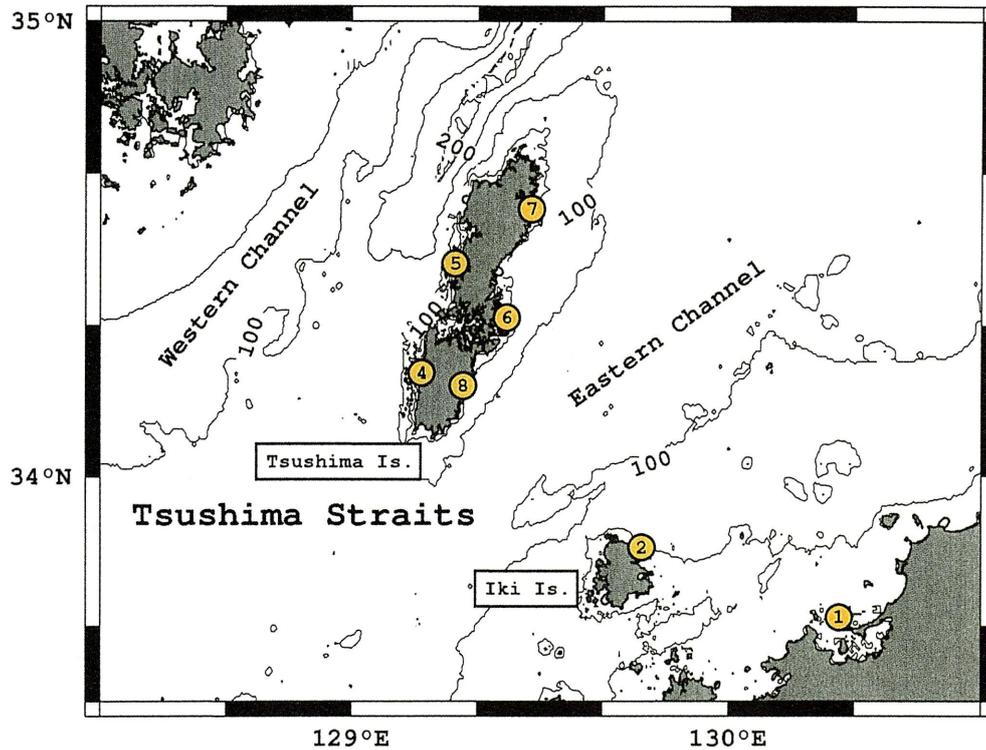


Fig. 1 Geographical distribution of the seven radar sites with site numbers. The yellow circles indicate the positions of the radar sites. Three Codar radars (Sites 1, 2 and 8) and two NJRC radars (Sites 6 and 7) observe surface currents in the eastern channel of the Tsushima Straits. The other two Codar radars (Sites 4 and 5) face the western channel. All the radars are controlled from the central site set up at RIAM, Kyushu University. Contour lines represent the bathymetry in meters (the contour interval is 50 m).

Table 1 Positions and observation periods of the radars. Site 3 had moved to Site 8 in 2003 to improve data quality. The position of Site 3 (the same as Site 7) is omitted in Fig. 1. The data measured by the radar at Site 3 was not used for the analysis described in this article.

Site No.	Site Name	Site Position	Radar Type	Observation Period
1	Shikanoshima	130° 17' 30" E, 33° 41' 12" N	Codar	2002/01/10 — contd.
2	Akasebana	129° 46' 14" E, 33° 50' 36" N	Codar	2002/01/11 — contd.
3	Goneo	129° 28' 41" E, 34° 35' 20" N	Codar	2002/01/13 — 2002/12/12
4	Siine	129° 11' 11" E, 34° 13' 45" N	Codar	2002/01/12 — contd.
5	Oumi	129° 16' 31" E, 34° 28' 08" N	Codar	2002/01/13 — contd.
8	Yara	129° 17' 51" E, 34° 12' 00" N	Codar	2003/08/22 — contd.
6	Akashima	129° 24' 39" E, 34° 21' 05" N	NJRC	2002/01/24 — contd.
7	Goneo	129° 28' 41" E, 34° 35' 20" N	NJRC	2002/11/19 — contd.

各計測局の地理的な配置を Fig. 1 に示す。対馬海峡東水道は Codar 3 基（志賀島・赤瀬鼻・野良）、NJRC 2 基（赤島・五根緒）の、計 5 基のレーダーを用いて観測している。一方、西水道には Codar 2 基（椎根・青海）を設置している。各計測局の座標と観測期間は Table 1 のとおりである。

Site 3（五根緒, Codar）は、計測データの品質に問題があったため、移設により Site 8（野良）となった。このため Fig. 1 では Site 3 が欠番となっている。Site 3 のレーダーにより得られたデータは、本報の解析には一切用いていない。

なお、システムのより詳細な情報は別報に記載があるので、必要であればそちらを参照されたい。²⁾ 海洋レーダーの計測原理については、付録に簡単に示した。

3. 基本潮流

本節では、レーダー観測に基づいて求めた対馬海峡内の基本的な潮流のパターンを示す。

海洋における観測では、固定した観測点を高密度に置くことが困難であるため、対馬海峡のように比較的狭い海域であっても、潮流の空間分布は正確に把握されてこなかった。そこで、流れの水平面内分布を時間的・空間的に高密度に得ることができる海洋レーダー観測の利点を活かし、対馬海峡の潮流の空間分布を把握しようというのが趣旨である。

3.1 解析手法

基本潮流の解析は 1 年ごとに分けて実施した。後述するように、この解析は M_2 潮流振幅の季節変動性の解析とも関連する。解析の手順は以下のとおりである。

まず、各計測局の計測ピンごとに視線方向流速 V の 1 年分の時系列を生成する。2003 年、2004 年の解析では各年の 1 月 1 日から 12 月 31 日までのデータを用いたが、2002 年の解析では、2002 年 2 月 1 日から 2003 年 1 月 31 日までのデータを用いた。これは、システムの稼動期間の都合である。

つぎに、この時系列を 60 分潮用いて調和解析し、各計測局の各計測ピンごとに視線方向潮流の調和定数を求める。さらに、得られた視線方向潮流の調和定数を、双線型補間を用いてデータ生成点上に再配置する。

2 局以上の視線方向潮流調和定数が置かれたデータ生成点上で流況解析と同様の合成処理を施せば、東向潮流・北向潮流の調和定数に直すことができる。こうして得られる調和定数から、各データ生成点における潮流楕円要素を算出する。

3.2 解析結果

上述の手順で 2002 年、2003 年、2004 年の潮流分布をそれぞれ得た。現時点では 3 年分の結果しかないので

断定的なことはいえないが、今回得られた各年の潮流には顕著な差異が認められなかった。代表例として、ここでは 2004 年の結果に基づく図のみを示す。

解析の結果、各年とも、対馬海峡全域で M_2 , K_1 , O_1 , S_2 の 4 分潮が卓越することが確認された。半日周潮 (M_2 , S_2) の潮流楕円分布を Fig. 2 に、日周潮 (K_1 , O_1) の潮流楕円分布を Fig. 3 に示す。

主要 4 分潮の潮流楕円の長軸は、いずれも基本的には地形に沿っている。長軸振幅は、 M_2 では $15\text{--}20\text{ cm s}^{-1}$, K_1 では $10\text{--}12\text{ cm s}^{-1}$, O_1 では $\sim 10\text{ cm s}^{-1}$, S_2 では $5\text{--}8\text{ cm s}^{-1}$ の程度になっている。半日周潮の潮流楕円は非常に扁平で、主方向の振動が卓越することがわかる。一方、日周潮の潮流楕円は、半日周潮の潮流楕円に比べて丸みを帯びている。また、東水道の日周潮の潮流楕円は、半日周潮のものに比べて長軸が若干東を向く傾向がある。

ここまで述べてきた結果は、断片的に得られてきた従来の観測結果と、定性的にも定量的にもよく一致している。^{3,4)} 海洋学的な知見に照らして驚くべき事柄はとくに含まれていないが、そのことが逆に、レーダー観測に基づいて得られた潮流分布の妥当性を示唆する。

4. M_2 潮流振幅の季節変動

通常おこなわれる潮汐の解析では、ある場所における起潮力に対する応答は時間的に変化しないという考え方が基礎になっている（その場所の地形が大きく変化した場合などは別であるが）。しかし、実際にある場所で得られた長期資料をもとに解析をおこなうと、その結果として得られる潮汐には季節変動・経年変動がみられることが知られている。

たとえば Kang らは、対馬海峡を含む朝鮮半島周辺海域の長期沿岸水位データを解析し、 M_2 潮の振幅・位相に季節変動があることを報告している。⁵⁾ その結果によれば、対馬海峡の M_2 潮位は、冬季に振幅が大きく夏季に振幅が小さいという 1 年周期の季節変動を示す。

また、遥山らは Kang らの解析手法を日本全域の沿岸水位長期データに適用し、 M_2 潮位振幅の季節変動および経年変動が日本沿岸で普遍的にみられること、 M_2 潮位の変動特性が海域ごとに定まることを示唆した。⁶⁾

M_2 潮の季節変動の原因として、Kang らは季節変動する平均流との相互作用を挙げているが、現時点では断定的なことがいえないというのが実態である。

本節では、上に述べたような M_2 潮の季節変動性がレーダー観測に基づく潮流にも現れているかどうかを調べた結果を示す。

4.1 解析手法

解析手法は Kang らや遥山らのそれと同様である。ただし、解析対象が水位データではなく、各計測ピンにおいてレーダーが観測した視線方向流速 V である点が異な

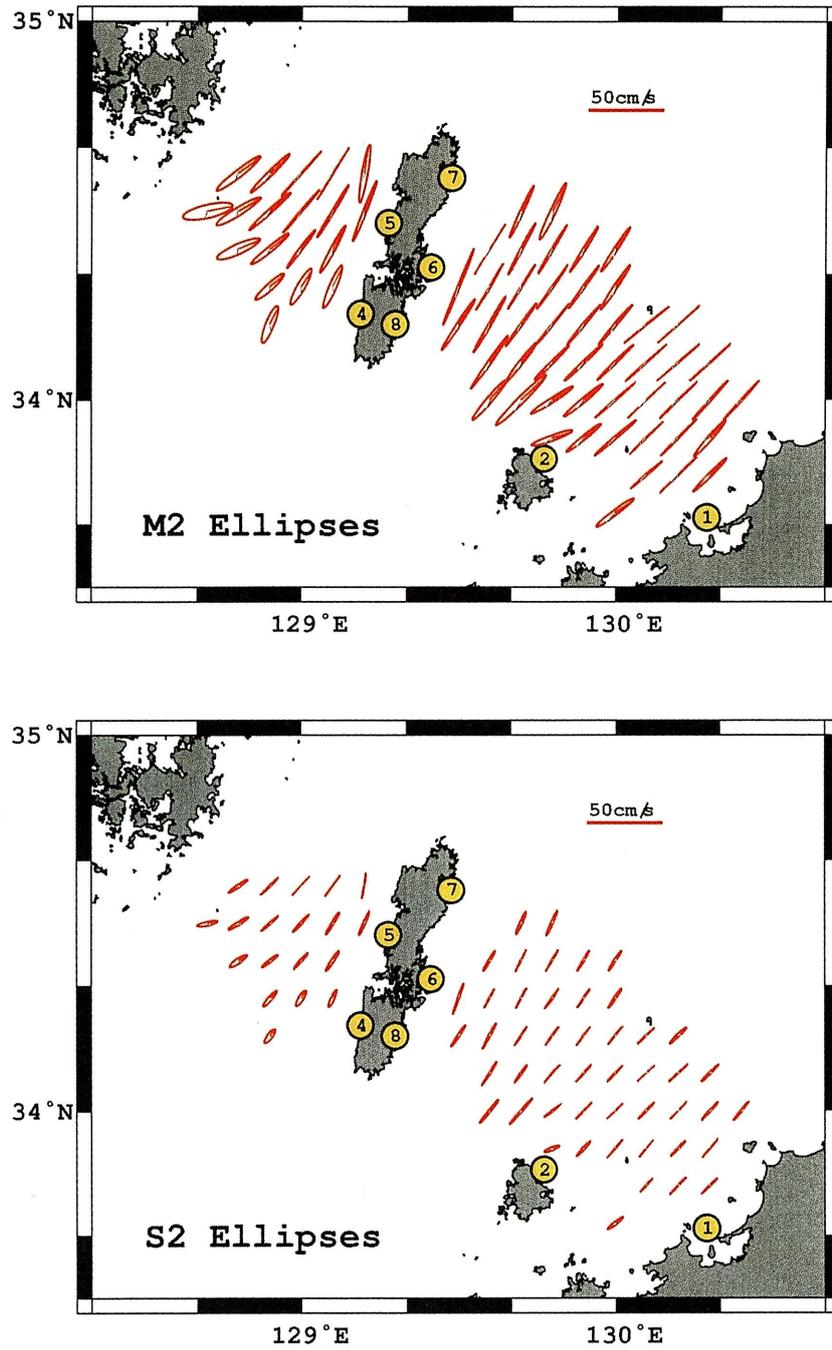


Fig. 2 M_2 and S_2 tidal currents in the Tsushima Straits observed by the HF radars in 2004. The red line drawn with each ellipse indicates the meridian passage of the tide-generating body at 135°E . In the same way the gray line shows the phase of a quarter of the period after the meridian passage.

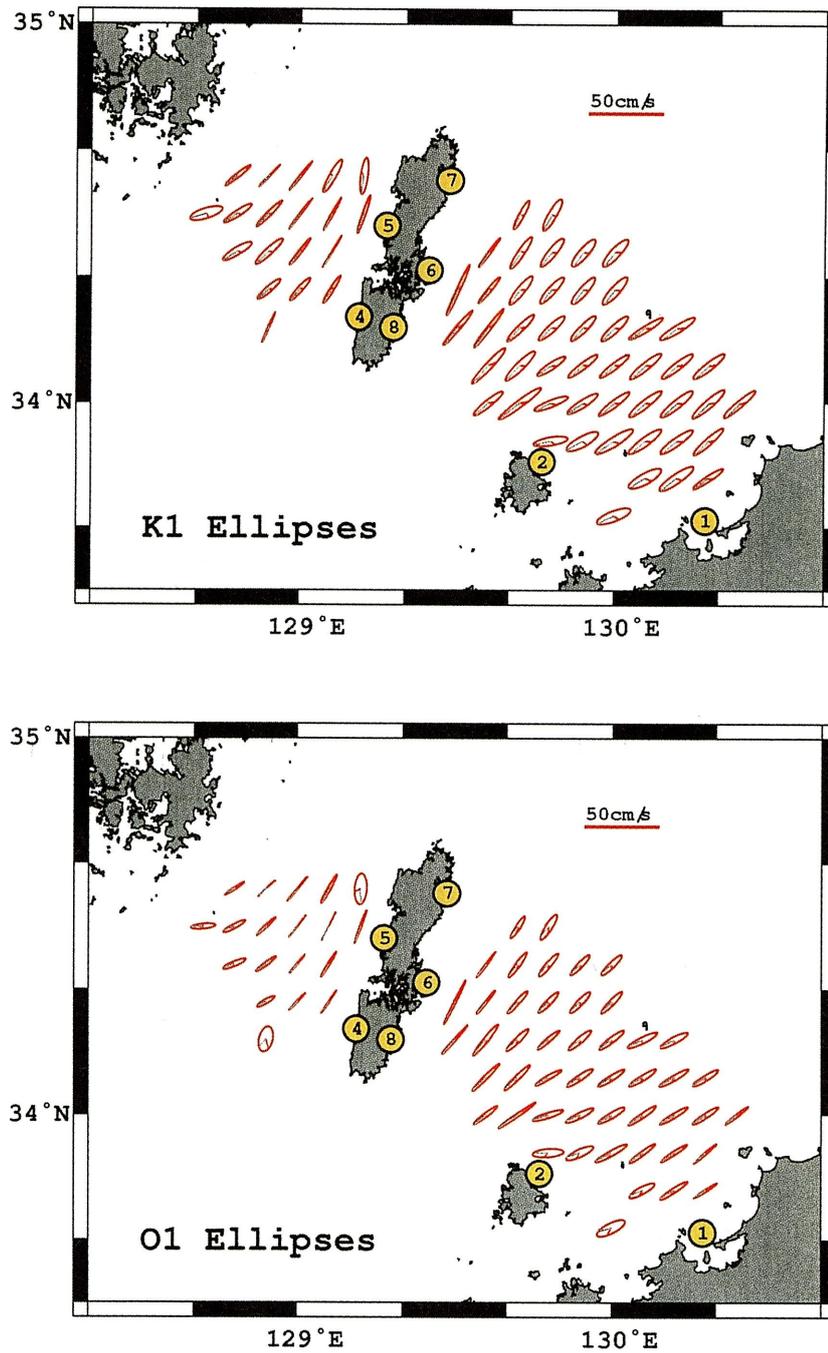


Fig. 3 K₁ and O₁ tidal currents in the Tsushima Straits observed by the HF radars in 2004. The red line drawn with each ellipse indicates the meridian passage of the tide-generating body at 135° E. In the same way the gray line shows the phase of a quarter of the period after the meridian passage.

る.^{5,6)} その概略は以下のとおりである。

まず 1 年分の V の時系列を用意する。季節変動をみるために、この時系列を各月ごとに分割し、23 分潮用いて調和解析を実施する。こうして得られた各月の M_2 潮流視線方向振幅を、Kang らに倣って OBS と書くことにする。このとき、形式的に

$$OBS = \bar{A} + A' + A_e \quad (1)$$

のように書ける。ここで、 \bar{A} はその年を通じて変化しない成分振幅、 A' は今問題にしている季節変動成分振幅である。この解析では、調和解析の対象とする時系列の長さが 1 か月しかないので、 OP_2 潮 および MKS_2 潮を M_2 と区別することができない。このため、これら 2 分潮の寄与が、誤って M_2 潮の寄与として算出されてしまう。 A_e は、この解析誤差を表す。なお、 OP_2 潮 および MKS_2 潮を M_2 潮から分離するには、半年分の時系列が必要となる。

つぎに、真の季節変動 A' を抽出するために、OBS とは別のデータを用意する。最初に用意した 1 年分の V の時系列を 60 分潮用いて調和解析し、通年の調和定数を求める。前節で述べた基本潮流解析が、ちょうどこの作業にあたる。この通年調和定数 60 分潮分から各月の 1 か月分の視線方向潮流時系列 V_{1T} を再生成し、あらためて 23 分潮用いて調和解析する。このとき、通年調和定数を用いたことにより、季節変動成分 A' はあらかじめ除外されている。解析誤差 A_e は OBS を得たときと同様に生ずる。こうして得られた各月の M_2 潮流視線方向振幅を、Kang らに倣って EST と書くと、形式的には

$$EST = \bar{A} + A_e \quad (2)$$

となる。

このように OBS と EST を算出し、OBS から EST を差し引けば、季節変動成分 A' のみを抽出することができる。以降、OBS, EST に合わせて、 A' を RES と書くことにする。すなわち、

$$RES \equiv OBS - EST = A' \quad (3)$$

である。

4.2 解析結果

Fig. 4 に Site 2 のある計測ピンで得られた結果を一例として示す。OBS (赤線) をみると、この計測ピンにおける M_2 潮流の視線方向振幅が、冬季に大きく、夏季に小さくなっている様子がうかがわれる。ただし、この変動に解析誤差 A_e が含まれていることは、解析手法の項で述べたとおりである。問題の A_e は EST (緑線) の半年周期変動として現れている。OBS から EST を差し引いて得られた RES (青線) が、この計測ピンにおける M_2

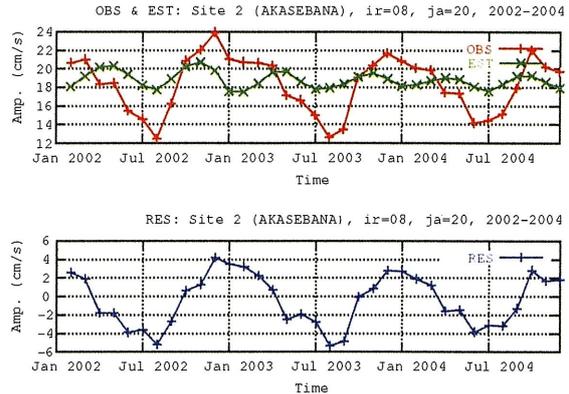


Fig. 4 Seasonal variability of the radial amplitude of M_2 current observed at a measurement bin of the radar at Site 2. The red and green lines in the upper panel show OBS and EST respectively. The blue line in the lower panel denotes $RES \equiv OBS - EST$. The notation follows Kang *et al.* (1995).

潮流の視線方向振幅の季節変動成分 A' である。得られた RES は、冬季に極大、夏季に極小をとる 1 年周期の変動を明瞭に示している。

RES の大きさの計測平面内分布を図示すると、Fig. 5 のようになる。対馬海峡東水道の例として Site 2 の結果を、西水道の例として Site 4 の結果を示す。なお、遙山らは、RES に 1 年周期の正弦関数を適合させ、その正弦関数の振幅から季節変動成分の大きさを評価したが、ここでは単に各計測ピンにおける RES の自乗平均の平方根 (root mean square; RMS) を計算し、季節変動成分の大きさを見積もっている。⁶⁾ 東西両水道に顕著な差はなく、 $2-3 \text{ cm s}^{-1}$ 程度の RES が観測されている。

各計測ピンにおける M_2 潮流の視線方向定常振幅に対する RES の大きさの比を求め図示すると Fig. 6 のようになる。これは、遙山らが求めた季節変動割合に対応するものである。⁶⁾ なお、定常振幅は、各年ごとに定まる \bar{A} を 3 年分平均して求めた。ここでは、対馬海峡東水道の例として Site 2 の結果を、西水道の例として Site 4 の結果を示す。

Site 4 の図では、視界中央方位の周囲に季節変動割合が異常に大きい領域があるが、これは、潮流の基本振動方向とレーダー視線方向のなす角が直角に近く、視線方向振幅がそもそも非常に小さいためである。このような領域は、Site 2 を除くすべてのレーダーの視界内に存在した。

上述の領域を除けば、季節変動割合は概ね 10-20% の範囲にある。ただし、遙山らによると、この海域の水位データから見積もられる季節変動割合 (片振幅評価) は 2-3% の程度となっており、それに比べるといささか大きすぎるように思われる。⁶⁾

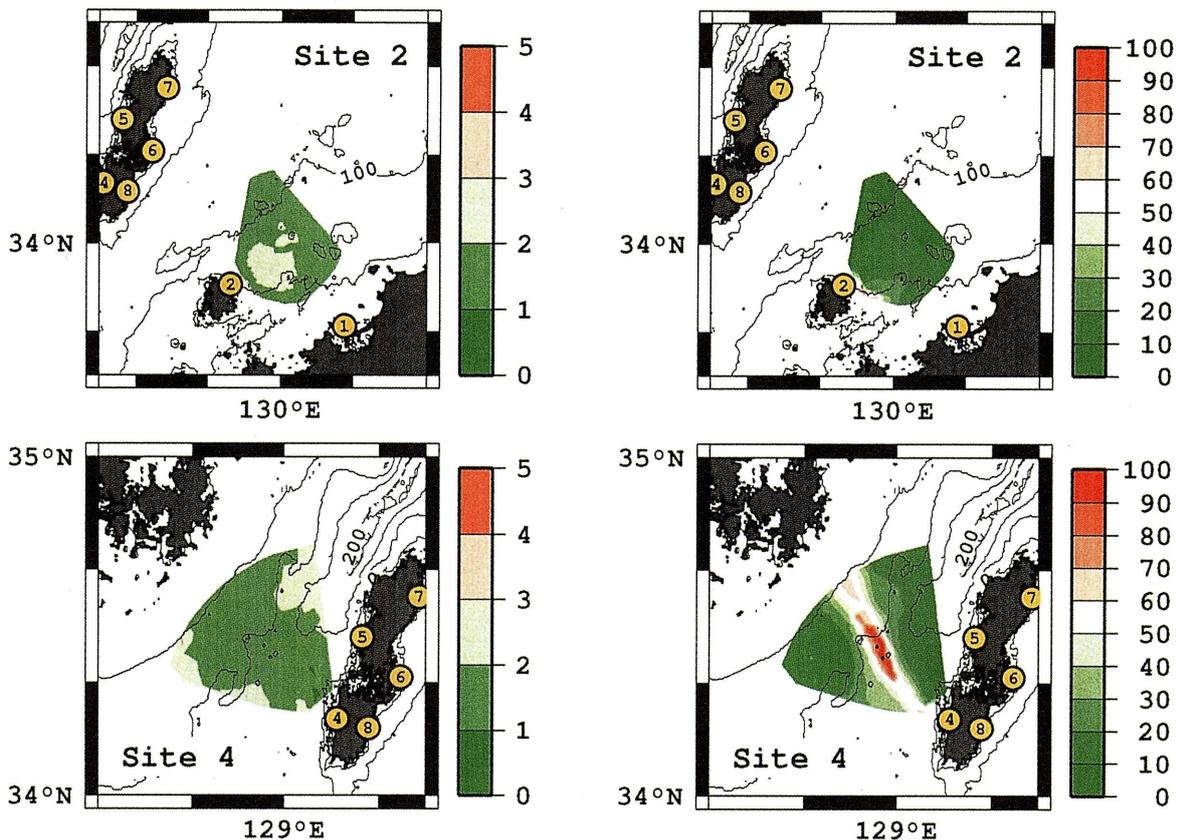


Fig. 5 Spatial distribution of the magnitude of the seasonal variability of M₂ radial current (RES) observed by the radars at Site 2 (upper) and at Site 4 (lower), in cm s⁻¹. The magnitude was estimated as RMS of RES for each measurement bin.

Fig. 6 Spatial distribution of the ratio of the magnitude of the seasonal variability of M₂ radial current (RES) to the permanent amplitude of M₂ radial current in Percent. The upper panel shows the case for Site 2 and the lower the case for Site 4.

最後に、各計測ピンで求めた OBS, EST, RES に計測平面内平均を施し、各計測局が観測した M₂ 潮流視線方向振幅の季節変動特性をまとめた。その際、前述の季節変動割合に関して 30% を閾値として定め、季節変動割合がこれを超えるような計測ピンは、平均操作から除外した。東水道の例として Site 2 の結果を Fig. 7 に、西水道の例として Site 4 の結果を Fig. 8 に示す。Kang らが指摘した潮汐の季節変動と平均流の季節変動との関連をみるために、平均流の視線方向振幅の計測平面内平均も共に描いている。⁵⁾ 東水道では、大きさ 2 cm s⁻¹ 程度の、1 年周期の正弦関数様季節変動が明瞭に現れている。極大期は 1-2 月、極小期は 7-8 月となっており、潮位についての解析結果ともよく一致している。^{5,6)} 一方、西水道では、東水道と同様、冬季に大きく夏季に小さいという M₂ 潮流振幅の季節変動が見られるものの、1 年よりも短い別の周期の成分が相当含まれており、その挙動を単一の正弦関数に適合させることは難しそうである。東西両水道とも、平均流の視線方向振幅は、冬季に小さく、

夏季に大きくなっており、M₂ 潮流の視線方向振幅とはちょうど逆位相の季節変動を示している。ただし、両者の間に何らかの因果関係があるのかどうかは、現時点では不明である。

5. おわりに

本報では、対馬海峡に設置した海洋レーダーにより観測された対馬海峡の潮流について、ふたつの項目に焦点を絞って述べた。

2002 年から 2004 年にかけて得られたデータから求めた対馬海峡の基本的な潮流の空間分布は、過去の断片的な観測結果と定性的・定量的によく一致し、海洋学的な知見に照らして妥当なものであった。今後は、海洋レーダーの特性を活かして空間的に高密度に得られた潮流の情報を種々の目的に活用するとともに、他の観測による鉛直方向の情報を用いてより立体的な潮流の把握を目指す。対馬海峡内の潮流にはかなりの鉛直変化があることは、すでに報告がなされている。^{3,4)}

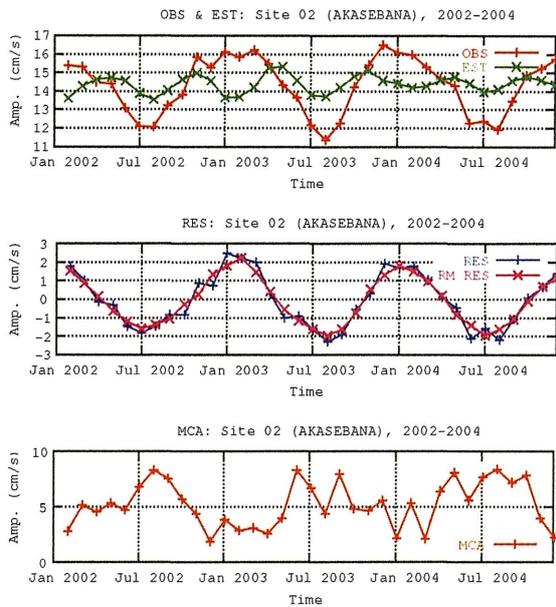


Fig. 7 Seasonal variability of the radial amplitude of M_2 currents observed by the radar at Site 2 averaged over the observation plane. The red and green lines in the uppermost panel depict [OBS] and [EST] respectively, where the square brackets denote the planar average. The blue and magenta lines in the middle panel represent [RES] and its 3-month running mean. The orange line in the lowermost panel shows the planar average of the radial amplitudes of mean currents observed by the radar.

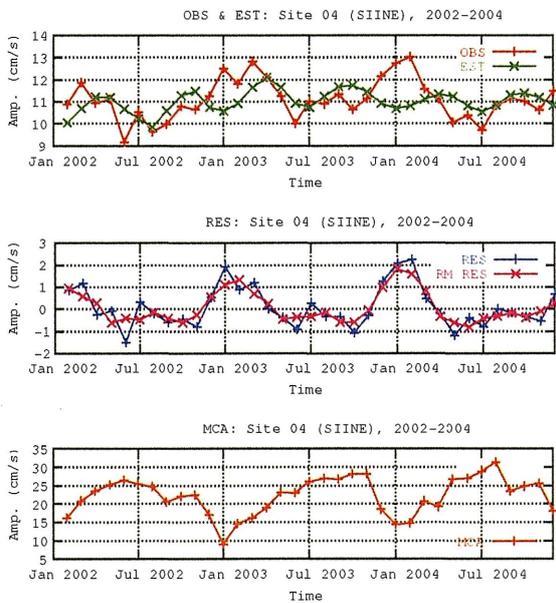


Fig. 8 The same as Fig. 7 but for the radar at Site 4.

レーダーが観測した M_2 潮流の視線方向振幅は、冬季に大きく、夏季に小さいという季節変動性を示した。このような季節変動は、沿岸水位の長期データの解析結果として報告されている対馬海峡の M_2 潮位の季節変動特性と定性的に一致するが、定量的にみると、季節変動の強度が水位のそれに比べて強すぎるようである。

M_2 潮流の視線方向振幅にみられる季節変動は、平均流の視線方向振幅にみられる季節変動とちょうど逆位相となっている。しかし、両者の間に因果関係があるのかどうかは現時点では判然としない。両者が関連を持つのかどうかの追求も含め、 M_2 潮に季節変動が生じる原因を探求することが、今後の課題となるだろう。

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) 奥野 章, 吉川 裕, 増田 章, 丸林 賢次, 石橋 道芳: “対馬海峡表層海況監視海洋レーダシステム”, 九州大学応用力学研究所所報, 第 126 号, (2004) 57-67.
- 3) Teague, W. J., H. T. Perkins, G. A. Jacobs and J. W. Book: “Tide observations in the Korea-Tsushima Strait”, *Cont. Shelf Res.*, Vol. 21, (2001) 545-561.
- 4) 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.
- 5) Kang, S.-K., J.-Y. Chung, S.-R. Lee and K.-D. Yum: “Seasonal variability of the M_2 Tide in the seas adjacent to Korea”, *Cont. Shelf Res.*, Vol. 15, (1995) 1087-1113.
- 6) 遙山 誠, 増田 章, 吉川 裕, 奥野 章: “日本沿岸域における M_2 潮汐振幅の季節変動および経年変動”, 九州大学大学院総合理工学報告, 第 26 巻, (2004) 365-372.
- 7) 藤井 智史: “海洋レーダの技術と歴史”, 沿岸海洋研究, 印刷中.
- 8) 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.
- 9) Stewart, R. H. and J. W. Joy: “HF radio measurements of surface currents”, *Deep-Sea Res.*, Vol. 21, (1974) 1039-1049.

付 録

A1. 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ているが、本文の説明との関連もあるため、ここであらためて簡単にふれておくことにする。なお、より詳細な解説は他の文献を参照されたい。^{7),8)}

海洋レーダーは、観測海域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

面の起伏は一般には不規則で、あらゆる波長・波向の海面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。また、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ため、電波の散乱に際して Doppler 効果が生じ、受信波の周波数と送信波の周波数とは一致しない。

そこで、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。⁹⁾

このようなレーダー 2 基以上を適当に隔たった別々の地点に設置し、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、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、1 基の海洋レーダーは、距離-方位格子上に離散的に配置された多数の計測ピンのそれぞれにおいて、視線方向流速 V を計測する。本報に述べる潮流解析は、計測ピンごとに得られる最も基本的な情報である視線方向流速 V をまず調和解析し、ベクトルとしての潮流への合成は最後におこなうという方針で実施した。