

## 黒潮上流域における衛星海面高度計とHFレーダの観測による流速値の比較

渡慶次, 亮子  
九州大学大学院総合理工学府

市川, 香  
九州大学応用力学研究所 | 海洋研究開発機構

藤井, 智史  
情報通信研究機構

佐藤, 健治  
情報通信研究機構

他

<https://doi.org/10.15017/26814>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 130, pp.29-34, 2006-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

# 黒潮上流域における 衛星海面高度計とHFレーダの観測による流速値の比較

渡慶次 亮子\*<sup>1</sup> 市川 香\*<sup>2,3</sup> 藤井 智史\*<sup>4,5</sup> 佐藤 健治\*<sup>4</sup> 児島 正一郎\*<sup>4</sup>

(2006年1月31日受理)

## Comparison of velocities observed by the HF radar and satellite altimeters in the upstream of the Kuroshio

Ryoko TOKESHI, Kaoru ICHIKAWA, Satoshi FUJII, Kenji SATO and Shoichiro KOJIMA

E-mail of corresponding author: tokeryo@riam.kyushu-u.ac.jp

### Abstract

Sea surface velocity in the upstream of the Kuroshio obtained by the HF radar is compared with the geostrophic velocity determined from the altimetry data along a satellite subtrack. Two velocities agree well when the geostrophic velocity is smoothed over the spatial scale of the HF velocity. In the Kuroshio area, this spatial scale is found nearly 70km, which is the same as the spatial smoothing scale of the HF radar. Meanwhile, in the offshore area where the smoothing scale of the HF radar is much smaller, the spatial scale of the HF velocity is rather increased to about 150km, which is consistent with the scale of the mesoscale eddies.

**Key words :** HF radar, satellite altimeter, upstream of the Kuroshio, geostrophic velocity, spatial scale

### 1. はじめに

北太平洋の西岸境界流である黒潮は、台湾の東方より東シナ海に流入し、日本列島の沿岸部に沿って北上している。流速が0.5m/s以上の領域の幅は100km程度と狭いが、最大流速は2m/sと速く、低緯度から中・高緯度へ莫大な水量と熱量を輸送している。近年、広域を繰り返し観測できる衛星海面高度計のデータ解析によって、黒潮の上流域である台湾東方で、北太平洋を西進してくる直径400kmから800kmほどの中規模渦が黒潮に取り込まれて黒潮の流量を変化させることが明らかとなった<sup>1), 2)</sup>。上流域での黒潮の流量変動は、その後、東シナ海とトカラ海峡を経て四国南方へ伝播していくため、下流域の黒潮流速の予測のためにも上流域の流況変動を明確にすることは重要である。

黒潮の上流域では、2001年7月より情報通信研究機構(NICT)によって開発・運用されている遠距離海洋レーダ(HFレーダ)によっても、黒潮のモニタリングが行われている。前述の衛星海面高度計は、時空間分解能が粗く変動場し

か得られないため、中規模渦のようにゆっくり動く大きな擾乱を捕捉する上では問題ないが、黒潮のように空間スケールが小さく強い平均流を持つ現象を詳細に記述するのは困難である。一方、HFレーダは、観測海域は限られているものの、時空間分解能が高く、絶対流速場を求めることができるという利点を持っている。そこで、これらのような観測特性をもつ衛星海面高度計とHFレーダの両者を併用すれば、上流域の黒潮を詳細に記述できると期待できる。

ただし、海面高度計とHFレーダの各々の観測によって得られる流速は異なっている。海面高度計が計測している物理量は、衛星直下の海面力学高度偏差であり、海洋表層が地衡流平衡していると仮定して地衡流速偏差を算出する。一方、HFレーダが計測している物理量は、レーダの視線方向の風波の移動速度であり、風波の波長で決まる位相速度を差引くことによって表面流速を算出している。この表面流速は、視線方向に7km間隔で、その直交方向にはビーム角8°から16°程度に広がるレーダ照射面内の流速を平均していると考えられており、レーダ基地局周辺では現場での流速計の観測値と良い一致を示している<sup>3)</sup>。しかし、基地局から遠く離れてレーダ照射面が広がった場合には、どのような流速を代表しているかは明確ではない。また、この表面流速には、地衡流以外に潮流や吹送流などの非地衡流成

\*1 九州大学大学院総合理工学府  
\*2 九州大学応用力学研究所  
\*3 海洋研究開発機構  
\*4 情報通信研究機構  
\*5 (現)琉球大学工学部

分が含まれているため、地衡流と比較する際にはこれらを除きなければならない。

そこで本稿では、HF 表面流速を長時間平均して非地衡流成分を除去した場合について、空間スケールや黒潮の存在の有無を考慮しつつ、海面高度計で求めた地衡流速と比較を行う。次節ではデータと解析手法について述べ、比較結果を第 3 節に示す。第 4 節では、前節までの結果をまとめると同時に結果に対する考察を行う。

## 2. データと解析手法

海面力学高度偏差は、衛星軌道直下の測線で約 7km 間隔に得られる。軌道直下の測点では海面力学高度偏差の傾きから、軌道に直交する方向成分のみの地衡流速を求めることができる。しかし、流速をベクトルとして捉えるためには、軌道沿いの海面力学高度偏差を格子点上に内挿する必要がある。軌道間の距離は数百 km ほど離れているため、内挿したデータの分解能は粗くなり、その距離よりも小さな現象を捉えることはできない。今回の比較では、空間スケールの依存性を考慮するので、衛星軌道沿いの測線上に場所を限定し、かつ軌道に直交する成分のみを対象とすることで、分解能の高い流速の比較を行う。

使用した海面高度は、フランスの AVISO が提供する衛星海面高度計 TOPEX/POSEIDON と Jason-1 の軌道沿いデータ<sup>4)</sup>で、約 10 日ごとに 7km 間隔で得られ、潮汐や気圧補正が行われている。Fig.1 に軌道の位置を示す。ここでは HF レーダの観測期間である 2001 年 7 月から 2004 年 3 月までの 2.5 年平均からの偏差として海面力学高度偏差を求めた。さらに、軌道上の各測点における海面力学高度偏差の傾きから、軌道に直交する方向の地衡流速  $V_{alt}$  を算出した。なお海面高度は、衛星が同測点を約 10 日おきに通過した際に計測される瞬間的な値であるが、海面力学高度偏差は準地衡流平衡が成立しているため、より長い時間スケールの

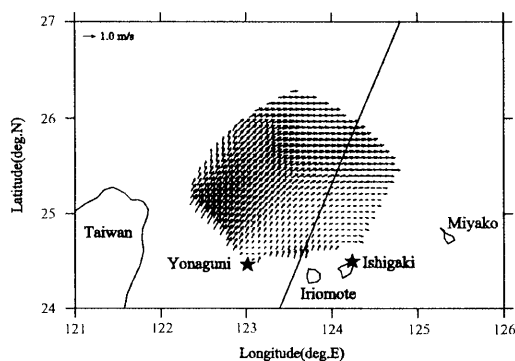


Fig.1 The 2.5-year mean velocity obtained by the HF radar. The intensity of the velocity is indicated at the top left corner of the panel. Star marks show positions of the HF radars, on Yonaguni and Ishigaki Islands. The oblique line indicates the satellite subtrack used in this study.

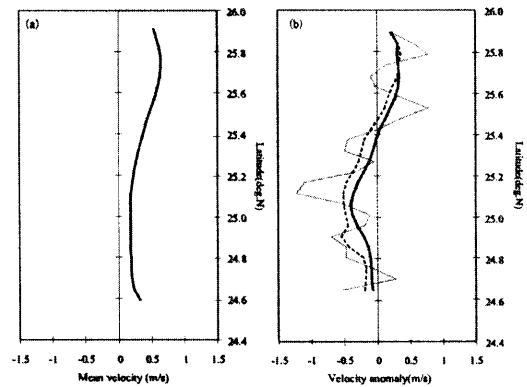


Fig.2 The 2.5-year mean HF velocity component normal to the subtrack shown in Fig.1, against latitude on the subtrack; southeastward velocity is defined as positive (a). The daily-mean HF velocity anomaly ( $V_{HF}$ ) along the satellite subtrack on 30 May, 2003 (b). Geostrophic velocity anomaly ( $V_{alt}$ ) from the altimetry data with 70-km smoothing (or no smoothing) is also plotted by a broken (or gray) line.

流速場を代表していると考えてよい。

一方、HF レーダによって観測された表面流速は、NICT によって 7km 間隔に格子化された 30 分おきのデータで、2001 年 7 月から 2004 年 3 月までの約 2.5 年分を使用した。この表面流速に含まれる非地衡流成分の 1 つである潮流を除去するために、各格子点で日平均を求めた。そして、軌道沿いの海面高度計の測点上に線形内挿して、軌道に直交する 2.5 年平均 (Fig.2a) と、それからの偏差  $V_{HF}$  を求めた。このように処理を行った HF レーダの表面流速  $V_{HF}$  と、海面高度計から求めた地衡流速  $V_{alt}$  を比較する。なお、軌道に直交する成分の 2.5 年平均流で見ても (Fig.2a)、北緯 25.4° 以北に 0.5m/s 以上の強い流れが見られ、黒潮が存在していることがわかる。ここでは、北緯 25.4° 以北を平均的に黒潮が存在している領域とし、それより南側を外洋域として扱うことにする。

HF 表面流速  $V_{HF}$  と、高度計の地衡流速  $V_{alt}$  を軌道沿いで比較した例を示す (Fig.2b)。Fig.2b は、2003 年 5 月 30 日の地衡流速偏差  $V_{alt}$  と HF 日平均流速偏差  $V_{HF}$  である。 $V_{HF}$  (黒の実線) は、北緯 25.4° 付近を境に北では正の流速偏差、南では負の流速偏差を示している。それに対し、 $V_{alt}$  (灰色の実線) は、例えば北緯 25.1° から 25.3° までのおよそ 20km の距離で流速変動が 1m/s を越えるという、日平均以上の流速としては非現実的な小スケールの流れが存在している。これは、海面高度計が計測した海面力学高度偏差に、地衡流平衡していない海面高度成分が含まれているためだと考えられる。過去の高度計のデータ解析においても、30km から 40km の内部変形半径程度の平滑化が必要であると報告されている<sup>5)</sup>。実際に、この例で海面力学高度偏差を軌道沿いに 70km ほど移動平均を施したところ、 $V_{alt}$  (黒の

破線)は  $V_{HF}$  と同じような振幅と空間スケールの流速変動を示した。

### 3. 結果

#### 3.1 比較結果の空間スケールへの依存性

先程の例では、ある程度大きな空間スケールをもった HF 表面流速  $V_{HF}$  に対して、高度計の地衡流速  $V_{alt}$  を軌道沿いに平滑化することによって両者の流速がよく一致した。そこで、全ての期間について、海面力学高度偏差を様々な平滑化距離で移動平均した場合について調べた (Fig.3)。ここでは、観測対象となる現象のスケールの違いにも考慮して、黒潮の存在する領域と外洋域に海域を分割して、両者の流速を比較する。ただし、Fig.1 に示すように、各領域のレーダ基地局からの距離は異なっており、レーダ基地局から遠方ほどレーダの照射面が広がるので、黒潮が存在する領域のほうが  $V_{HF}$  に空間平滑化がかかっていると考えられる。

$V_{HF}$  と  $V_{alt}$  の比較は、各海域における全期間・全測点の両者の流速の rms 差を求めて行った。rms 差の計算式は、

$$\sqrt{\frac{\sum (V_{HF} - V_{alt})^2}{N}} \quad (1)$$

であり、ここで  $N$  はデータの個数を表し、黒潮域では総数約 9 万個、外洋域では総数約 28 万個を用いた。

Fig.3 では、黒潮域と外洋域ともに、40km から 50km 程度までは、海面力学高度偏差の平滑化距離が長くなるにつれて大幅に rms 差が減少する。これは先程の例に示したように、海面力学高度偏差に含まれる地衡流平衡になっていない海面高度成分が、空間平滑化によって除去されたためであると考えられる。

40km から 50km よりもさらに平滑化を施すと、rms 差の減少はゆるやかになり、やがて最小値となってから、rms 差が僅かずつ増加する傾向が、領域に関わらず共通して見られた。これらの最小値の存在は、観測された HF 表面流速  $V_{HF}$  が持つ空間スケールに合わせて地衡流速  $V_{alt}$  を平滑化したときに両者の差が最小となることを示唆しており、 $V_{alt}$  の平滑化が不十分であっても過剰であっても rms 差が逆に大きくなると考えられる。

ただし、rms 差が最小となる海面力学高度偏差の平滑化距離は、黒潮域と外洋域では異なっており、黒潮域では 70km ほど、外洋域では 150km 程度であった。レーダの照射面の大きさから考えると、遠方にある黒潮域のほうが広がるため、 $V_{HF}$  の観測できる空間分解能は粗くなると考えられるが、この場合は逆の結果が得られた。そこで、 $V_{alt}$  の空間スケールに対する  $V_{HF}$  の空間スケールを次のように考えてみる。

まず、黒潮域における HF 表面流速  $V_{HF}$  の空間スケールを

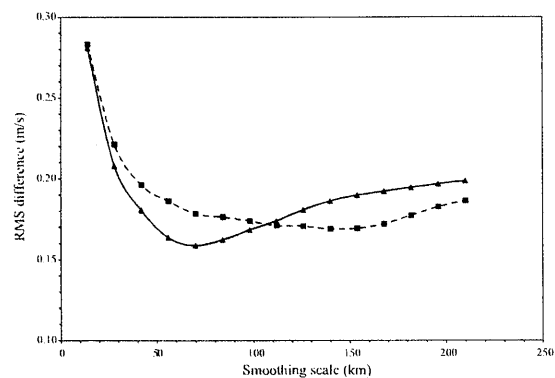


Fig.3 The rms difference between the daily-mean HF velocity ( $V_{HF}$ ) and the smoothed geostrophic velocity ( $V_{alt}$ ) is plotted against spatial smoothing scale of  $V_{alt}$ . Results in the Kuroshio area are shown by a solid line, while these in the offshore area are shown by a broken line.

考える。レーダの基地局から測点までの距離を平均的に 250km とすると、ビーム角  $16^\circ$  程度で視線に直交する方向のビーム幅は 62km ほどとなる。これは、Fig.3 における海面力学高度偏差の軌道沿いの平滑化距離である 70km とほぼ等しく、HF レーダの観測分解能が  $V_{HF}$  の空間スケールを決めていると考えられる。

一方、外洋域のビーム幅について考えると、レーダ基地局から測点までの平均的な距離を 50km とすると、30km 程度となる。しかし、Fig.3 で地衡流速  $V_{alt}$  との比較が最小となることで推定した  $V_{HF}$  の持つ空間スケールは 150km 程度であり、レーダのビーム幅よりもはるかに大きなスケールとなっている。これは、空間スケールの大きな中規模渦が支配的となる外洋域では、黒潮域の場合と異なり、現象スケールの方が観測分解能よりも大きくなっているためであると考えられる。すなわち、黒潮域においても外洋域においても、現象のスケールと観測分解能のうち、どちらか大きい方が  $V_{HF}$  の空間スケールとなっており、黒潮域では後者が、外洋域では前者が選択されていると考えられる。

#### 3.2 比較結果の時間スケールへの依存性

前節では、HF 表面流速  $V_{HF}$  の空間スケールが黒潮域と外洋域でどのように異なっているかを考察した。ただし、HF 表面流速  $V_{HF}$  は、日平均データを使うことで潮流成分を除去してあるものの、吹送流など一日平均をしてもまだ除去できない非地衡流成分が含まれており、これらの成分が前節の結果に影響を与えている可能性もある。そこで、HF 表面流速  $V_{HF}$  の時間平均日数を延ばしてさらに非地衡流成分を除去した場合を考え、前節の比較がどのように変化するかを考察する。比較の方法は、 $V_{HF}$  を求める際の平均日数を様々に変えて、3.1 節と同様の解析を行った。

黒潮域の結果 (Fig.4) は、全体的に見ると、 $V_{alt}$  を軌道沿

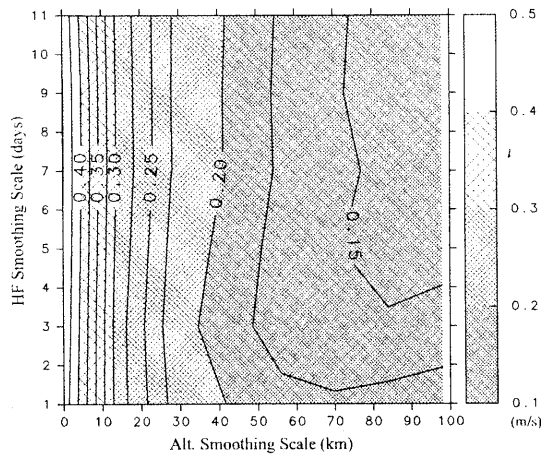


Fig.4 The rms difference between the geostrophic velocity ( $V_{alt}$ ) and the HF velocity ( $V_{HF}$ ) in the Kuroshio area.  $V_{alt}$  is smoothed over various spatial scales along the satellite subtrack (horizontal axis), while  $V_{HF}$  is averaged over various temporal scales (vertical axis).

いに平滑化するほど、また  $V_{HF}$  を時間平均するほど、rms 差が小さくなる傾向が見られた。しかし、一般的に平滑化を強くかけるほど信号の変動強度そのものが減少するため、rms 差も小さくなることが考えられる。そこで、両者の流速の変動強度で rms 差を規格化することを考える。変動強度は次式のように地衡流速  $V_{alt}$  と HF 表面流速  $V_{HF}$  のそれぞれの分散値の和として、

$$\sqrt{\frac{\sum V_{alt}^2 + \sum V_{HF}^2}{N}} \quad (2)$$

で求めた。求めた変動強度 (Fig.5) を見ると、予想通り、空間方向と時間方向に平滑化をかけるにつれて減少していくという結果が得られた。

式(1)で求めた rms 差を、式(2)に示した流速の変動強度で規格化した結果を Fig.6 に示す。 $V_{HF}$  を平均する日数によ

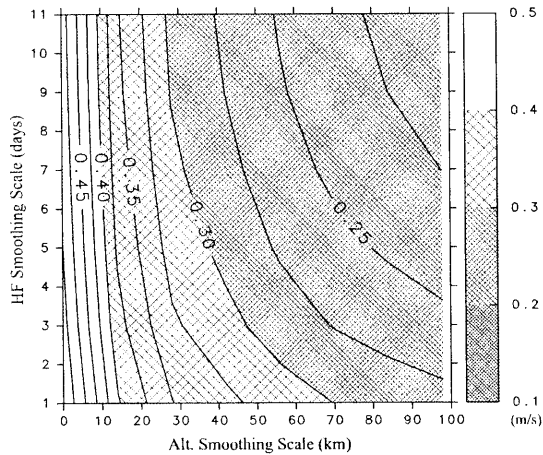


Fig.5 The rms of  $V_{alt}$  and  $V_{HF}$  in the Kuroshio area, Eq.(2). The spatial and temporal smoothing scales for those velocities are the same as Fig.4.

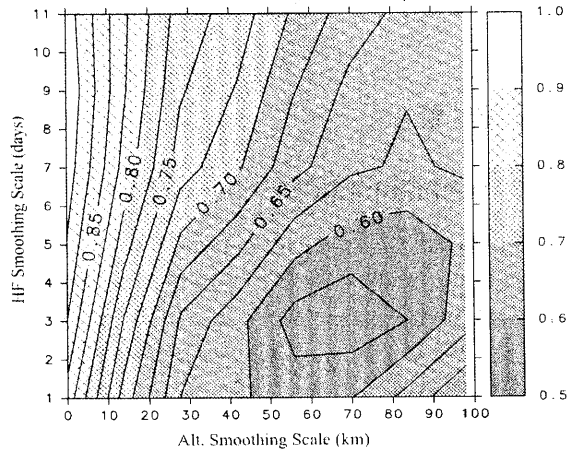


Fig.6 The same as Fig.4 but normalized by the rms shown in Fig.5.

らず、3.1節で見たように、 $V_{alt}$  を 40km から 50km ほど平滑化するまでは rms 差が大きく減少する傾向を持ち、さらに平滑化をしていくと rms 差が減少から増加に転じる最小値が存在していることが確認できる。ただし、最小値となるときの平滑化距離は、 $V_{HF}$  の平均日数が増加するにつれて長くなり、Fig.6 に示すように下部中央から右上へと斜めに存在している。これは、 $V_{HF}$  を平均する日数が増えるほどその空間スケールが増加することを意味しており、時間と空間のスケールに比例関係のある位相速度の存在が示唆される。例えば、黒潮の蛇行のように空間スケールが小さくて速く移動する現象が存在していれば、平均する時間スケールを長くすることで空間にも平滑化がかかったような  $V_{HF}$  が得られると考えられる。

なお、Fig.6 の中で最も rms 差が小さくなるのは  $V_{HF}$  を 3 日平均した場合であり、これは 1 日平均の結果よりも非地衡流成分が除去されたためであると考えられる。ただし、3 日以上さらに平均していくと、かえって rms 差は増加している。これは、黒潮域では現象の時間スケールそのものが短いため、平均日数を増やして非地衡流成分を除去する効果よりも、比較する時間のずれによって生じた  $V_{HF}$  と  $V_{alt}$  の差の方が大きくなっていくためと考えられる。

外洋域についても黒潮域と同様の手法で、規格化した rms 差を求めた (Fig.7)。外洋域においても、3.1節と同じように、 $V_{alt}$  の平滑化距離に応じて、rms 差の大幅な減少に続き 100km 程度までゆるやかに減少した。この結果は  $V_{HF}$  の平均日数に因らず確認できるが、黒潮域で見られたような  $V_{HF}$  の平均日数に対応した空間スケールの変化は見られなかった。また、rms 差を最小にする平均日数は、黒潮域が 3 日に対して、外洋域で 5 日であった。これらは黒潮域に比べて外洋域で流速場の時空間スケールが大きく位相速度が小さい現象が支配的であったためと考えられる。

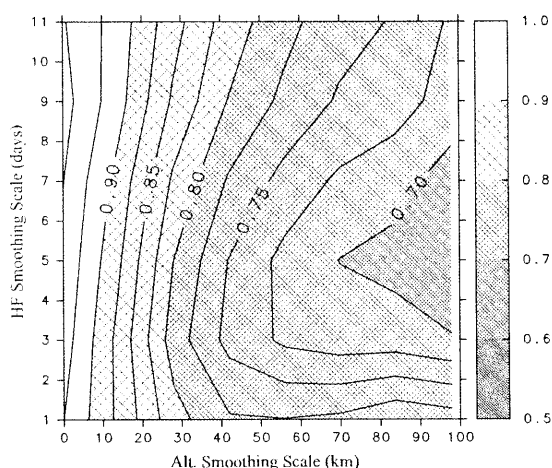


Fig.7 The same as Fig.6 but in the offshore area.

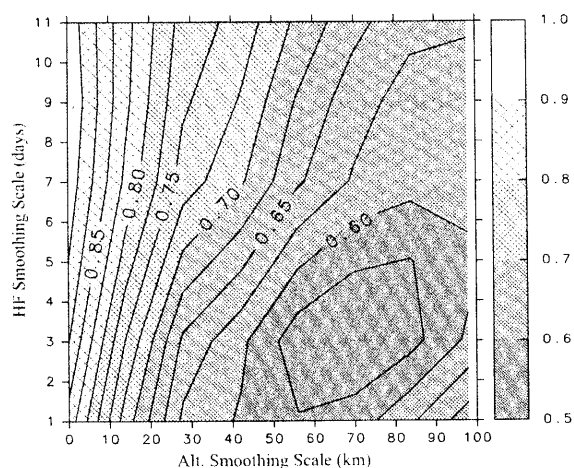


Fig.8 The same as Fig.6 but the wind-driven current estimated from wind speed data is removed from the HF velocity.

#### 4. まとめと考察

衛星軌道沿いの海面力学高度偏差から求めた地衡流速  $V_{alt}$  と、軌道上の測点に内挿した HF 表面流速  $V_{HF}$  を、黒潮の有無によって海域を分け、空間スケールの違いに留意しながら比較した。両者の rms 差を最小にするのは、黒潮域では軌道沿いに海面力学高度偏差を 70km ほど平滑化した場合であり、外洋域では 150km 程度の距離で平滑化した場合であった。このように領域によって両者の空間スケールが異なっているのは、各海域に存在する現象の空間スケールと平滑化スケールの大小関係が要因として挙げられた。外洋域では支配的な現象の空間スケールが大きいので、HF 表面流速  $V_{HF}$  が計測している高い空間分解能は実際にはそれほど必要ではなく、たとえ高度計と HF レーダを併用してもそれほど改善されないだろうと考えられる。一方、黒潮域では現象の空間スケールが小さいので、当初の予想通り、HF 表面流速  $V_{HF}$  と高度計の地衡流速  $V_{alt}$  を併用することで記述が改善される。ただし、HF レーダの平滑化はレーダの視線方向に依存するため、データの取り扱いには注意が必要である。

$V_{HF}$  に含まれる吹送流成分の影響を見るために、 $V_{HF}$  を平均する日数を変えて調べてみたところ、上記の結論には大きな影響がないことがわかった。ただし、時間平均処理によって、特に黒潮域で観測対象とすべき準地衡流の短周期変動までも失われてしまう可能性がある。なお、吹送流成分は、別途に風速データを用意することで吹送流を推定して除去することもできる<sup>6)</sup>。例として、QuikSCAT 衛星から得られた 7 日平均風速<sup>7)</sup>を用いて吹送流を除去し、Fig.6 と同様の方法で求めた規格化した rms 差を Fig.8 に示す。これを見ると、除去前の Fig.6 に比べて、規格化した rms 差は全体的に値が小さくなるのがわかる。ただし、ここで使用した吹送

流の推定式は水深 15m における漂流ブイの曳航体のために作られたものである。このため、 $V_{HF}$  に含まれる海面付近の吹送流として扱うには過小評価されている可能性がある。

以上のように、HF レーダによって得られる表面流速  $V_{HF}$  は、適切に空間スケールを考慮すれば、海面高度計から求めた地衡流速  $V_{alt}$  とよく一致しており、両者を併用することで黒潮上流域の記述は向上すると考えられる。ただし、 $V_{HF}$  の時間分解能を生かすためには、 $V_{HF}$  に含まれる非地衡流成分を単純な時間平均以外の方法で精度良く除去する必要がある。今後の課題として、潮流や吹送流の推定式の構築が必要である。

#### 参考文献

- 1) K. Ichikawa: Variation of the Kuroshio in the Tokara Strait Induced by Meso-Scale Eddies. *J. Oceanogr.*, 57, 55-68, 2001.
- 2) 市川香: 衛星海面高度計資料を用いた海面変動の研究. *海の研究*, 第11巻, 第2号, 305-319, 2002.
- 3) 佐藤健治, 松岡建志, 児島正一郎, 藤井智史: 東シナ海の黒潮流入部における遠距離海洋レーダ観測. *沿岸海洋研究*, 第41巻, 第2号, 119-127, 2004.
- 4) Ssalto/Duacs User Handbook: (M)SLA and (M)ADT Near-Real Time and Delayed Time Product. SALP-MU-P-EA-21065-CLS, Edition 1.2, 42p., June, 2004.
- 5) S. Ito, K. Uehara, T. Miyao, H. Miyake, I. Yasuda, T. Watanabe and Y. Shimizu: Characteristics of SSH Anomaly Based on TOPEX/POSEIDON Altimetry and *in situ* Measured Velocity and Transport of Oyashio on OICE. *J. Oceanogr.*, 60, 425-437, 2004.
- 6) P. P. Niiler, N. A. Maximenko, G. G. Panteleev,

T. Yamagata, and D. B. Olson: Near-surface dynamical structure of the Kuroshio Extension. *J. Geophys. Res.*, 108(C6), 3193, doi:10.1029/2002JC001461, 2003.

7) QUIKSCAT SCATTEROMETER MEAN WIND FIELD PRODUCTS USER MANUAL. C2-MUT-W-03-IF, Ver.1.0, February, 2002.