



# 国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of  
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 212

March 2005

## HFレーダーによる東京湾のM<sub>2</sub>潮流観測

日向博文

HF radar measurements of M<sub>2</sub> tidal Current in Tokyo Bay

Hirofumi HINATA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management  
Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan

## HF レーダーによる東京湾の $M_2$ 潮流観測

日向 博文\*

### 要 旨

東京湾において最も支配的な流れの一つである  $M_2$  潮流の空間分布を HF レーダー観測によって求めた。HF レーダーと AD(C)P 観測結果から求めた  $M_2$  潮流楕円を比較した結果、HF レーダー視線方向流速誤差には偏りが存在し、そのため、十分な数の観測データを使い最小自乗法に基づいて潮流楕円を求めた場合でも、潮流楕円の精度は観測点におけるビーム交差角度の影響を受けることが明らかとなった。4 局の HF レーダー観測結果から湾内ほぼ全域における妥当な  $M_2$  潮流分布を得ることができた。このことは、東京湾全域における潮流分布を同時に精度良く把握するためには、すくなくとも 4 局以上の HF レーダーが必要であることを示唆している。位相は、湾内ほぼ全域で  $60-70^\circ$  の範囲であるが、富津岬沖で  $20-40^\circ$  程度位相が進んでいた。また、湾内の西側に比べて東側の位相が進んでいる様子は、既往の研究結果に見られたようには明確な形では現れなかった。

キーワード：  $M_2$  潮流、東京湾、HF レーダ、誤差分布

---

\* 沿岸海洋研究部主任研究官  
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所  
電話：(046)844-5023 Fax：(046)844-1145 e-mail: hinata-h92y2@ysk.nilim.go.jp

## HF radar measurements of $M_2$ tidal Current in Tokyo Bay

Hirofumi HINATA\*

### Synopsis

HF radar is a powerful instrument for measuring surface currents over a large area. A single HF radar installation can measure one velocity component of flow along radial radar beams emanating from the radar site. In order to obtain a surface current vectors, it is necessary to obtain measurements from at least two radars located in different site. HF radar and AD(C)P observations are performed to obtain the horizontal distribution of  $M_2$  tidal current in Tokyo Bay. A comparison is made between  $M_2$  tidal current ellipses derived from HF radars and those from AD(C)Ps at four stations and it reveals that the accuracy of the tidal current ellipse from HF radars strongly depends on the azimuthal difference between crossing two radar beams mainly due to observational error of the radial velocity components.  $M_2$  tidal current ellipse from four HF radars are consistent with those from AD(C)Ps, indicating that at least four HF radars are required to monitor  $M_2$  tidal current filed in the bay. From the four HF radars' results, the phase of  $M_2$  tidal current in the bay is generally between 60 – 70 degrees, while the phase proceeds 20 – 40 degrees off Futtsu Point. In contrast to the previous studies, the phase in the eastern region does not proceed compared to the western region.

**Key words:**  $M_2$  tidal current, Tokyo Bay, HF radar, Error velocity

---

\* Senior Researcher of Coastal and Marine Department.  
3-1-1, Nagase Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-844-5023 Fax : +81-46-844-1145 e-mail: hinata-h92y2@ysk.nilim.go.jp

目 次



1. はじめに .....	1
2. 観測および解析方法概要 .....	1
2.1 HF レーダーおよびAD(C)P 観測概要 .....	1
2.2 解析方法概要 .....	1
2.2.1. 2局以上のHF レーダー観測による流速ベクトルの合成方法 .....	2
2.2.2. 潮流楕円の計算方法 .....	4
3. HF レーダーとAD(C)P 観測結果の比較 .....	6
3.1 HF レーダー観測から求めた潮流楕円の特徴 .....	6
3.2 HF レーダーとAD(C)P 観測から求めた潮流楕円の比較 .....	6
3.2.1. Stn. 1 .....	6
3.2.2. Stn. 2 .....	6
3.2.3. Stn. 3 .....	7
3.2.4. Stn. 4 .....	7
4. 考察 .....	8
5. まとめ .....	10
謝辞 .....	10
参考文献 .....	11
付録 A .....	11
付録 B .....	13

## 1. はじめに

潮流は東京湾内において最も卓越した流れの一つであり、内湾域だけでなく内湾外洋間の物質輸送に対しても大きな影響を与えている（例えば、Yanagi et al., 1992）。ところが、1960 - 1970年代を中心に行われた埋め立ての影響、すなわち湾内平均水深が増加し、湾軸長が短くなった影響によって、湾内における潮流や潮汐残差流は、戦前に比べて10%から数十%程度小さくなっていることが、最近の研究によって指摘されている（例えば、岸ら, 1993; 宇野木・小西, 1998; 柳・大西, 1999）。今後も羽田空港再拡張等の大規模な開発が計画されており、将来的にも湾内における潮流分布が変化していく可能性がある。さらに、有明海に目を転じると、2000-2001年冬季に発生した養殖ノリの色落ちを契機とした湾内潮流変動に関する最近の議論（例えば、宇野木, 2002; 武岡, 2003; 柳・塚本, 2004）は、内湾域全体における潮流分布を長期間連続してモニタリングしていくことの重要性を明確な形で示した。

本研究では広域表層流動場を同時計測することが可能な短波海洋レーダー（以下、HFレーダー）を使って、①現時点における東京湾内湾域の潮流、その中でも最も卓越する $M_2$ 潮流の空間分布を把握することを第一の目的としている。また、②HFレーダーとAcoustic Doppler (Current) Profiler (AD(C)P) 観測データから求めた潮流楕円を、レーダービーム交差角度やHFレーダーからの距離が異なる4地点で比較することによって、HFレーダー観測データに基づく潮流楕円の精度に与えるビーム交差角度とHFレーダーからの距離の影響について議論する。さらに、これらの議論に基づいて、③将来HFレーダー沿岸域表層流況モニタリングシステムを開発する際におけるレーダー配置方法について、観測精度の観点から提案する。

本研究の概要を以下に示す。第2章では、観測概要および2個以上のHFレーダー視線方向流速データを使った潮流楕円の計算方法について紹介する。第3章では、HFレーダー観測結果とAD(C)P観測結果に基づいて計算した潮流楕円を比較する。続いて、第4章でその比較結果について、特にビーム交差角度やHFレーダーからの距離に着目して議論を行う。また、計測精度の観点からHFレーダー配置方法について提案すると共に、本観測から求めた東京湾内の $M_2$ 潮流分布を示す。最後に、第5章において本研究の主要な結論と今後の研究課題について述べる。

## 2. 観測および解析方法概要

### 2.1. HFレーダーおよびAD(C)P観測概要

フェイズドアレイ式HFレーダー（長野日本無線）、ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler, RD Instruments)、およびADP(Acoustic Doppler Profiler, Nortek)の設置位置を図-1に、観測概要を表-1と表-2に示す。なお、使用したHFレーダーは、日向ら(2003)が相模湾で、また、Yanagi et al., (2003)が東京湾で使用したものと同一である。HFレーダーの仕様、およびHFレーダーとADPによって計測された生データの比較結果については、これらの文献を参照されたい。1998年12月の観測（以下、Run1）では走水と横浜に、2002年10月から2003年2月に行った観測（以下、Run2）では、千葉と習志野にHFレーダーを同時設置した。電波の相互干渉を避けるため、Run1では1視線方向あたり2.5分間の、Run2では5分間の交互観測を行った。その結果、全12ビームを掃引するのに要した時間は、Run1では1時間、Run2では2時間となった。さらに、走水、横浜、千葉、習志野にHFレーダーを同時設置したと仮定した観測をRun3とした。Run3における潮流楕円分布は、Run1とRun2で計測された視線方向流速データを同時解析することによって求めた（2.2. 参照）。

AD(C)P観測データは、いずれも冬季（1998年12月 - 1999年1月、2003年2-3月）に計測されたものである。HFレーダー観測データとの比較には、海面付近における測定不可能な層を除いてデータが安定的（欠測率 < 10%）に取得された最上層のデータを用いた。

### 2.2. 解析方法概要

本研究では、複数のHFレーダーによって計測された視線方向流速を使って、最終的には、東西・南北方向1.5 km間隔の格子点上における $M_2$ 潮流を最小二乗法に基づいて求めた。Run1とRun2で計測されたデータの解析では、2方向の視線方向流速から格子点上における潮流楕円を求めている。しかしながら、Run3では、格子点毎にベクトル合成に使用可能な視線方向流速データ数が異なっている（図-1）。湾口部から湾中部にかけての東側の海域では4方向の、また、岸近くの海域では基本的に2方向の視線方向流速データが使用可能である。そこで、ここでは、2方向以上の任意の数の視線方向流速データから格子点毎の潮流楕円を求める方法の概要を紹介する。方法の詳細については付録Aを参照されたい。

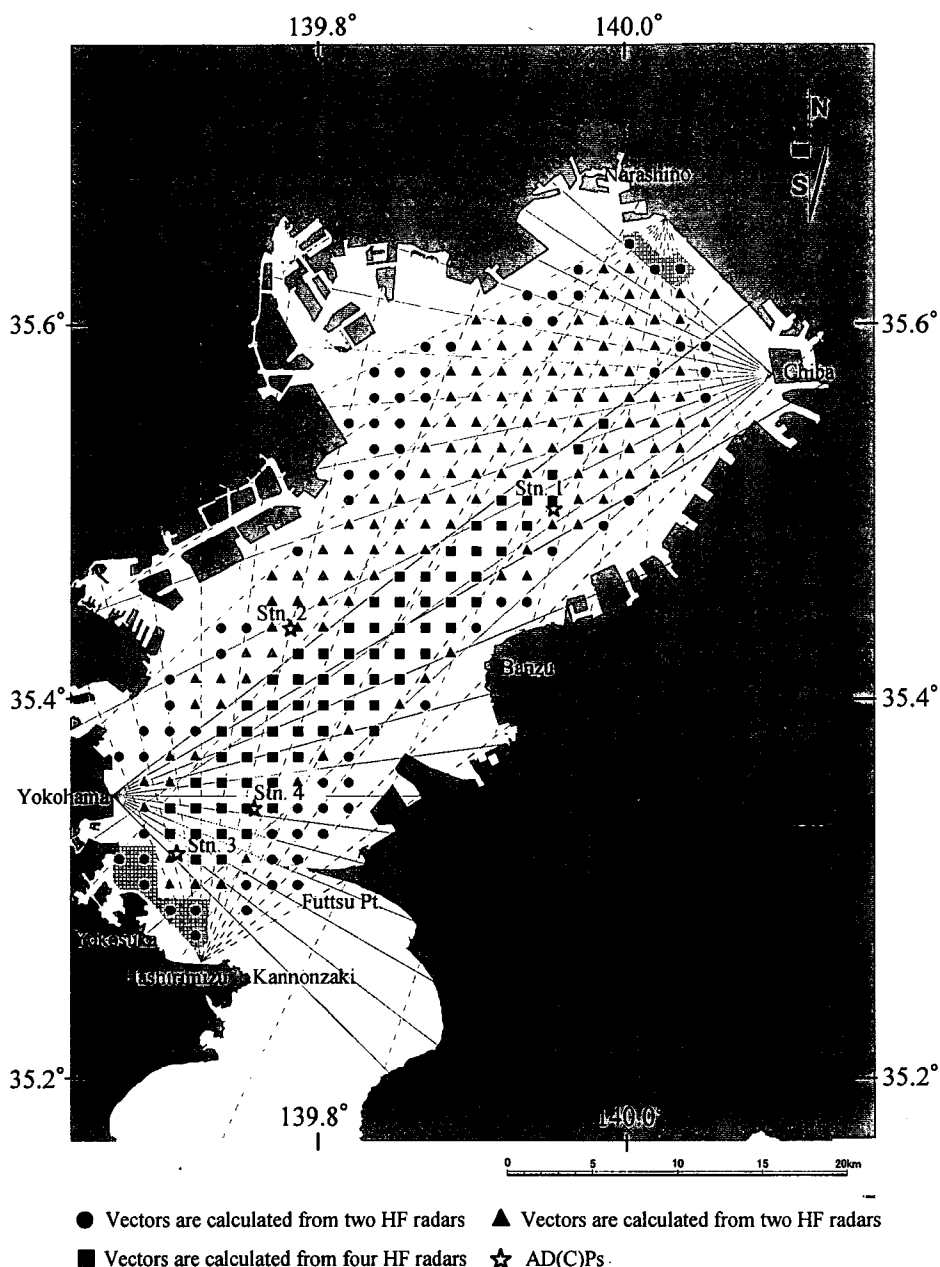


図-1 HFレーダーおよびAD(C)Pの配置

2.2.1. 2局以上のHFレーダー観測による流速ベクトルの合成方法

図-2に示すように注目する格子点を  $N$  本のビームが通過する場合、ビーム（視線）方向流速と流速ベクトルとの間には以下に示す幾何学的な関係が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} \sin \theta_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_2 \cos \theta_2 \\ \vdots \\ \sin \theta_N \cos \theta_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{r1} \\ U_{r2} \\ \vdots \\ U_{rN} \end{pmatrix} \quad (1)$$

上式で  $U_{ri}$ ,  $\theta_i$  ( $i=1 \dots N$ ) はそれぞれ格子点を通過す

るビーム方向の流速と方位角,  $u, v$  は格子点における流速の東西および南北成分である。ここで、①視線方向流速の誤差には偏りがない、②視線方向流速の誤差の分散は既知である、③各ビームの測定は互いに独立であり、共分散はゼロとする、④誤差の分布形は正規分布である、と仮定すると、東西・南北方向の流速成分の最適推定値は、以下の最小二乗条件

$$\sum_{i=1}^N (U_{ri} - \hat{U}_{ri})^2 / \sigma_i^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

を満たす  $(\hat{u}, \hat{v})$  となる (例えば, Gurgel, 1994)。こ

表-1 HF レーダー観測概要

Obs.	Period	Location			Direction (deg.)	Interval (hour)	Sampling Time (sec)	Num.
		Site	Latitude	Longitude				
Run1	1998/12/1 - 1998/12/23	Yokohama	35°20'56"N	139°39'34"E	22.5 ± 45.0	1	128	529
		Hashirimizu	35°15'38"N	139°43'02"E	97.5 ± 45.0			
Run2	2002/10/8 - 2003/2/28	Chiba	35°34'14"N	140°05'18"E	273.5 ± 45.0	2	256	1727
		Narashino	35°39'10"N	140°01'08"E	206.0 ± 45.0			
Run3		Run1 + Run2						

表-2 AD(C)P観測概要

Station	Period	Location		Water Depth (m)	Current Meter	Cell Size (m)	Analyzed Data (m)	Interval (min)	Num.
		Latitude	Longitude						
Stn. 1	2003/2/6 - 2003/3/11	35°30'11"N	139°56'34"E	20	ADCP	1	-3	20	4745
Stn. 2	2003/2/6 - 2003/3/11	35°26'20"N	139°46'17"E	33	ADCP	1	-7	20	4749
Stn. 3	2003/2/6 - 2003/3/11	35°19'01"N	139°42'04"E	52	ADCP	2	-14	20	4855
Stn. 4	1998/12/1 - 1999/1/12	35°20'30"N	139°45'06"E	21	ADP	1	-4	10	3599

で、 $\hat{U}_n, \sigma_r^2$  はそれぞれ各視線方向流速の最適推定値と観測誤差の分散である。各視線方向流速の観測誤差は HF レーダーや HF レーダーからの距離によらず一定 ( $\sigma_r$ ) であると仮定し、誤差二乗和の流速ベクトル  $\mathbf{u}=(u,v)$  に関する微分をゼロとおいて、実際に式 (2) を満たす  $(\hat{u}, \hat{v})$  を求めると以下のようになる。

$$\hat{\mathbf{u}} = \frac{1}{\det} \begin{pmatrix} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n & -\sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \\ -\sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n & \sum_{n=1}^N \sin^2 \theta_n \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} U_{r1} \\ U_{r2} \\ \vdots \\ U_{rN} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

ここに、

$$\det = \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n \sum_{n=1}^N \sin^2 \theta_n - \left( \sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \right)^2, \quad (4)$$

である。なお、上式は  $N=2$  の場合には 2 局の HF レーダーから流速ベクトルを求める一般的な方法 (例えば、藤井・徳田, 2001) と一致する。式 (3) から各ビーム視線方向流速の観測誤差が一定の場合、東西・南北方向流速成分の最適推定値は、視線方向の観測誤差に関係無くビーム方位に依存する。ただし、ここでは示さ

ないが、ビーム毎の視線方向観測誤差の違いを考慮した場合、流速成分の推定値は視線方向観測誤差に依存する (誤差が大きいビームの寄与率は相対的に小さくなる)。一方、東西・南北方向成分の推定誤差は、以下に示す誤差行列

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{u}}} = \frac{\sigma_r^2}{\sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n \sum_{n=1}^N \sin^2 \theta_n - \left( \sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \right)^2} \times \begin{pmatrix} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n & -\sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \\ -\sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n & \sum_{n=1}^N \sin^2 \theta_n \end{pmatrix}, \quad (5)$$

の対角成分となり (例えば、Gurgel, 1994)、視線方向の観測誤差やビーム方位に依存する。 $N=2$  の場合には、ビーム交差角度が  $90^\circ$  で東西・南北成分の推定誤差は最小 ( $\sigma_r^2$ ) となり、Nadai et al. (1999) の結果と一致する。ただし、誤差行列の対角成分は、基本的には生データに関する推定誤差であり、最小二乗法で求めた潮流成分の推定誤差には対応していない。しかしながら、実際は式 (5) から推測されるように、HF レーダー観測から求めた潮流楕円の精度は推定誤差、つまりビーム交差角度の影響を受けていた (第 3 章)。この点については第 4 章で考察する。

図-3 に Run1 - Run3 の HF レーダー配置に対応した

東西・南北流速成分の推定誤算分布を示す。2台のHFレーダー観測 (Run1, Run2) では、ビーム交差角が90°から大きくずれる湾奥部や湾口部において、推定誤差は視線方向流速の30倍以上になる。しかしながら、同時に4台のHFレーダーを設置したと仮定したRun3では、内湾のほぼ全域で東西・南北方向の推定誤差が視線方向誤差と同オーダーとなる。ただし、走水沖では他の海域に比べて推定誤差が非常に大きくなっている。これは、この海域では、千葉と習志野局により計測された視線方向流速から流速ベクトルを合成しており、さらに、この2局のビーム交差角度が90°から大きくずれているためである (図-1参照)。

2.2.2. 潮流楕円の計算方法

続いて、フェイズドアレイ式HFレーダーによって計測された視線方向流速成分から1.5 km 間隔の格子点上における潮流楕円を求める方法 (図-4) について説明する。フェイズドアレイ式HFレーダーはビームを方位角方向に掃引しながら視線方向流速を観測する。このため、格子点における流速ベクトルを求める際には、各レーダーのビーム方向における観測時刻を予めそろえておく必要がある。一般的には、ある注目する時刻 (通常は毎正時) を定めて、この時刻をはさむ前後の観測で得られた視線方向流速データを使い、直線補間によりその時刻における視線方向流速値を求める。その後、視線方向と角度方向に空間内挿することによって、1.5 km 間隔の直交格子点上における視線方向流速を求める。そして、最後に式(1) (ただし、N=2) に従って格子点上における流速ベクトルを合成する

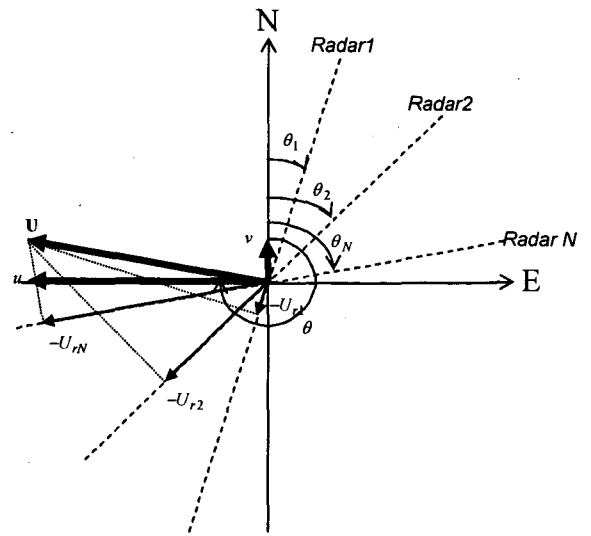


図-2 視線方向流速と流速ベクトルの幾何学的な関係 (例えば、藤井・徳田, 2001)。さらに、潮流を求める場合には、最小二乗法等を使って格子点上における東西・南北方向流速成分に関する調和定数を求め、その後、両者を合成して潮流楕円として結果を示すのが一般的である (図-4a)。12ビームの掃引に要する時間が1時間以内の場合には、この方法によって妥当なM<sub>2</sub>潮流楕円が求められている (例えば、徳田ら, 1997)。ところが、本観測ではM<sub>2</sub>潮流の周期 (12.42時間) に対して観測データの時間分解能 (最大で2時間) が不十分であり、通常的时间補間を行った場合、潮流流速のピークをカットしてしまう可能性がある。そこで、今回は図-4bに示すように時間補間を行わない方法を用いて各格子点における潮流楕円を求めた。

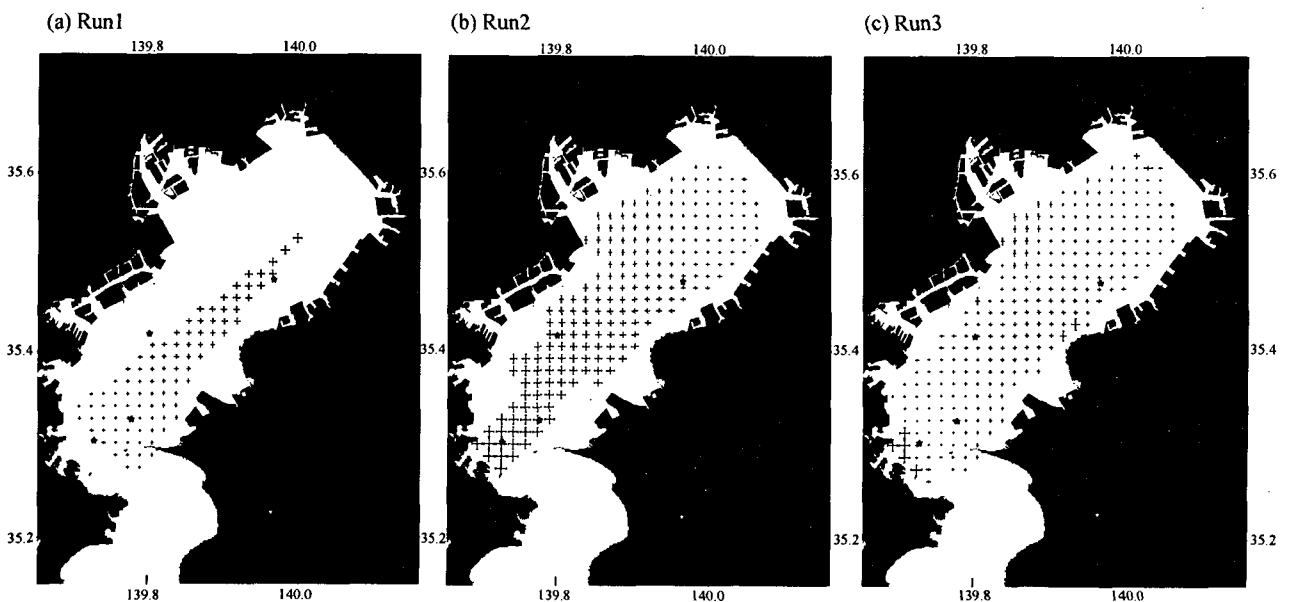


図-3 視線方向流速観測誤差で無次元化された東西・南北方向推定誤差分布



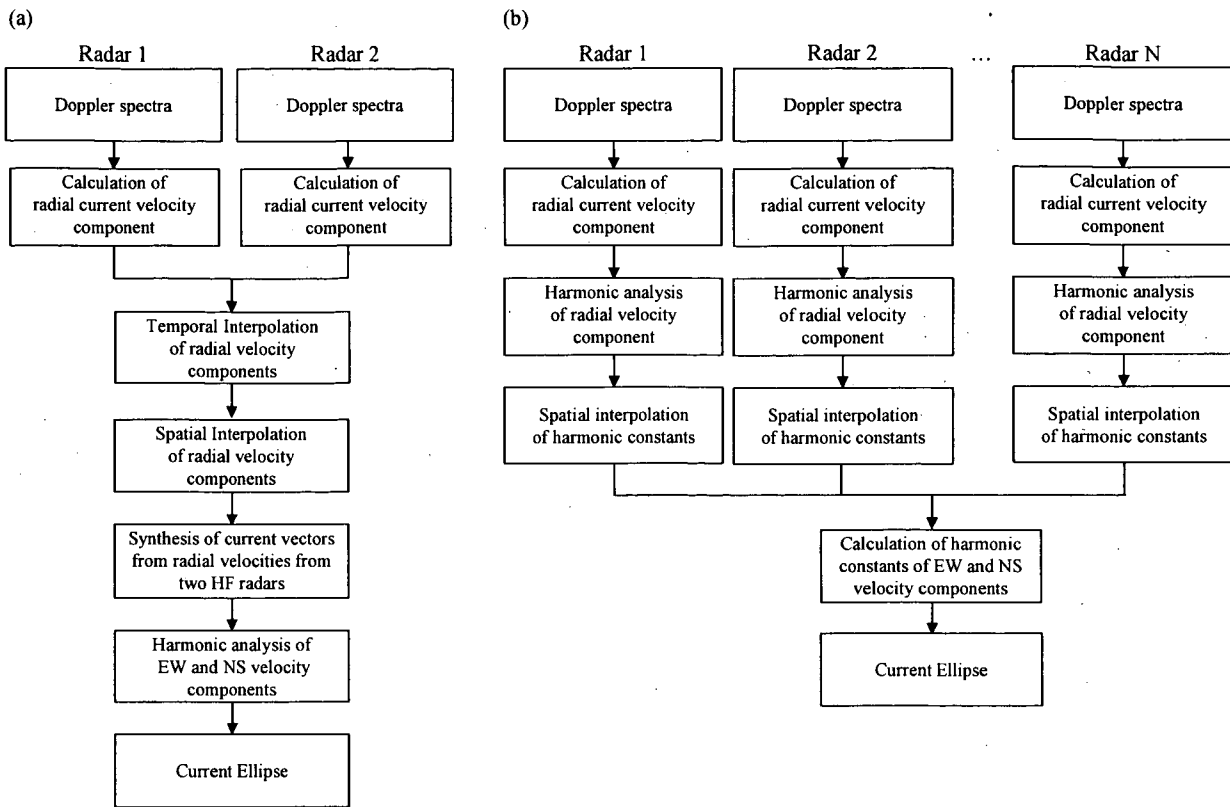


図-4 HFレーダー観測に基づく潮流楕円の計算方法。(a)既往の研究, (b)本研究.

まず, 各 HF レーダーによって得られた視線方向流速を用いて調和解析を行い, 潮流の各視線方向成分の調和定数 (振幅と位相) を求める. 続いて, 注目する格子点を囲む 4 点での視線方向潮流成分の調和定数を, 三角関数の加法公式を使って視線方向および角度方向に空間内挿し, その格子点における視線方向潮流成分の調和定数を求める. その後, 以下に示す手順に従って最大 4 個の視線方向調和定数から各格子点における  $M_2$  潮流の東西・南北方向成分の調和定数を計算し, 両者を合成することによって潮流楕円を求める.

最終的に求めるべき各格子点上における  $M_2$  潮流の東西・南北方向成分の振幅と位相をそれぞれ  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\delta_e$ ,  $\delta_n$  とする. 本解析では, 予め調和解析によって格子点上における視線方向潮流成分の振幅  $\bar{U}_n$  と位相  $\delta_i$  が求められているから, 式 (3) より以下の関係式が成り立つ.

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{U}_{r1} \cos(\omega t - \delta_1) \\ \bar{U}_{r2} \cos(\omega t - \delta_2) \\ \vdots \\ \bar{U}_{rN} \cos(\omega t - \delta_N) \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$= \begin{pmatrix} \bar{u} \cos(\omega t - \delta_e) \\ \bar{v} \cos(\omega t - \delta_n) \end{pmatrix}$$

したがって, 求めるべき振幅と位相は以下のようなる.

$$\begin{cases} \bar{u} = \sqrt{A_e^2 + B_e^2} \\ \delta_e = \tan^{-1} \frac{B_e}{A_e} \end{cases}, \quad \begin{cases} \bar{v} = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \\ \delta_n = \tan^{-1} \frac{B_n}{A_n} \end{cases} \quad (7)$$

ただし,

$$\begin{cases} A_e = u_e \cos(\delta_e) = c_{11} \bar{U}_{r1} \cos \delta_1 + c_{12} \bar{U}_{r2} \cos \delta_2 + \dots \\ \quad + c_{1N} \bar{U}_{rN} \cos \delta_N \\ B_e = u_e \sin(\delta_e) = c_{11} \bar{U}_{r1} \sin \delta_1 + c_{12} \bar{U}_{r2} \sin \delta_2 + \dots \\ \quad + c_{1N} \bar{U}_{rN} \sin \delta_N \\ A_n = v_n \cos(\delta_n) = c_{21} \bar{U}_{r1} \cos \delta_1 + c_{22} \bar{U}_{r2} \cos \delta_2 + \dots \\ \quad + c_{2N} \bar{U}_{rN} \cos \delta_N \\ B_n = v_n \sin(\delta_n) = c_{21} \bar{U}_{r1} \sin \delta_1 + c_{22} \bar{U}_{r2} \sin \delta_2 + \dots \\ \quad + c_{2N} \bar{U}_{rN} \sin \delta_N \end{cases} \quad (8)$$

である. ここに,  $N$  はビーム数,  $c_{ij}$  は, HF レーダーの配置 (ビーム方位) によって決まる視線方向流速の変換行列である. 以上より 2 局以上の HF レーダー視線方向潮流成分から各格子点における  $M_2$  潮流の東西・南北方向成分の調和定数が計算できたので, 最後に通常の方法 (例えば, 柳, 1993) に従って格子点毎の潮流楕円を求めれば良い. なお, AD(C)P 設置地点における潮

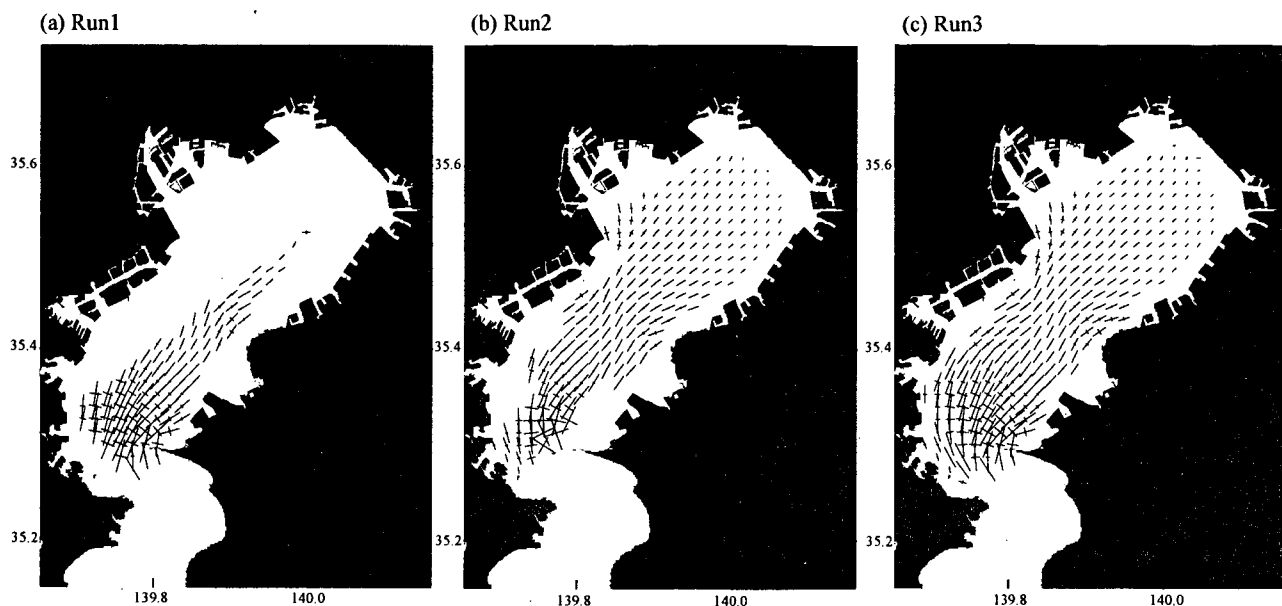


図-5 HFレーダー観測から求められた東京湾におけるM<sub>2</sub>潮流楕円. (a) Run1, (b) Run2, (c) Run3.

流楕円は、設置地点を囲む4つの格子点上における潮流の東西・南北成分の調和定数を空間補間して求めた。

### 3. HFレーダーとAD(C)P観測結果の比較

#### 3.1. HFレーダー観測から求めた潮流楕円分布の特徴

Run1 - Run3の観測結果から求めたM<sub>2</sub>潮流楕円の空間分布を図-5に示す。Run1の結果を見ると、推定誤差の大きい盤洲沖から湾奥部にかけての海域で、湾奥に向かって潮流楕円の長軸方向が交互に変化していることが分かる。最も湾奥に位置する潮流楕円は、その長軸方向が概ね東西方向を向いており非現実的と考えられる。

続いて、Run2の結果を見てみる。Run1とは異なり、湾奥部では潮流楕円の大きさや長軸方向が滑らかに変化している。潮流楕円は基本的に湾の主軸方向や海岸地形に沿った形となっており、長軸が非現実的な方向を向いていることはない。一方、推定誤差が大きな湾口部における潮流楕円分布を見ると、富津岬沖の海域で扁平率が急激に大きくなっていることが分かる。潮流楕円の長軸方向は、湾外に近づくにしたがって北北東から反時計回りに大きく回転し、その結果、富津岬西方沖では西北西となっている。また、走水沖の岸近くの海域で潮流楕円が急激に小さくなっている。

Run3の結果を見ると、湾内全域で潮流楕円の形や方向が連続的に変化していることが分かる。Run1やRun2の結果に見られた長軸方向や扁平率の不自然な変化は認められない。ただし、上述したように、走水沖の岸に近い格子点における潮流楕円はRun2の結果だけに基づい

ているため(図-1)、依然として小さいままである。

以上、Run1 - Run3の結果から求めた潮流楕円分布を比較した結果、Run1やRun2では、ビーム交差角度が小さく生データに関する推定誤差が大きい海域で潮流楕円の精度が低く、Run3では、走水沖など一部の海域を除いてほぼ妥当な潮流楕円分布が得られていると推測された。そこで、次に、AD(C)P観測に基づいて求めた潮流楕円と比較することによって、HFレーダー観測結果の精度についてより詳細に検討する。

#### 3.2. HFレーダーとAD(C)P観測から求めた潮流楕円の比較

各HFレーダー観測とAD(C)P観測によって求められた潮流楕円と各パラメータの値を図-6と表-3にそれぞれ示す。ただし、Stns. 1-3はRun1の計測範囲外(図-3a参照)にあり、それらの観測点ではRun1とADCP観測結果を比較することは出来なかった。

##### 3.2.1. Stn. 1

Run2におけるビーム交差角度は37.4°であり、東西・南北方向の推定誤差は視線方向流速誤差と同オーダーとなっている(図-3b)。図-6および表-3からRun2の結果はADCP観測結果と良く一致していることが分かる。パラメータの差はわずかであり、長軸方向で約8°、長軸長で約0.2 cm/s、遅角で約0.4°である。Run3の結果を見ると、Run2に比べて長軸方向と長軸長がADCP観測結果に近づいている。一方、短軸長や遅角についてはADCP観測結果との差が若干大きくなっているが、両者の差は小さいままである。

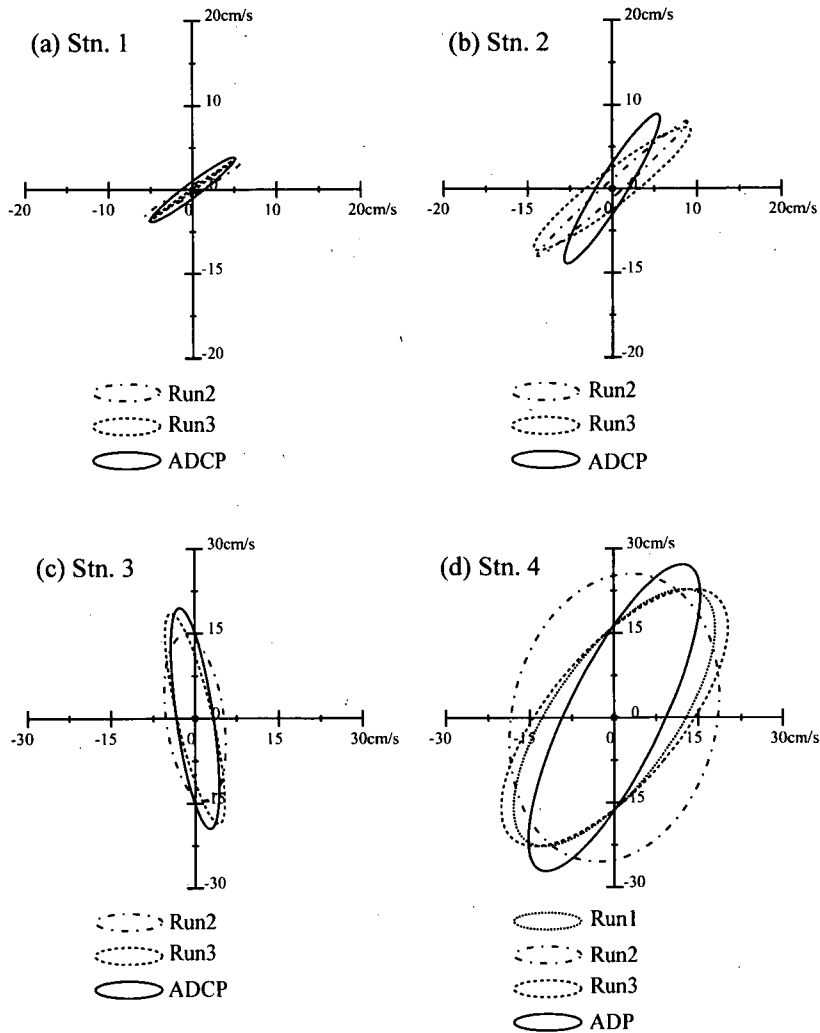


図-6 HFレーダーとAD(C)Pから求めたM<sub>2</sub>潮流楕円の比較

3.2.2. Stn. 2

Run2におけるビーム交差角度は19.3°と小さく、東西・南北方向の推定誤差は視線方向流速誤差の20倍程度である(図-3b)。しかしながら、Run2とADCP観測の結果を比較すると、両者は概ね一致していることが分かる。パラメータの差は、長軸方向が約16°、長軸長が約1.5 cm/s、遅角が約5°となっている。Run3とADCP観測結果との差は、Run2に比べて、長軸方向の差が4°程度大きくなっているが、長軸長、短軸長、および遅角の差は小さくなっている。

3.2.3. Stn. 3

Run2におけるビーム交差角度は13.7°と非常に小さく、東西・南北方向の推定誤差は視線方向流速誤差の50倍程度となる(図-3b)。Run2の結果をADCPの結果と比較すると、長軸方向については良く一致しているが、長軸長が約5 cm/s小さく、短軸長が約2 cm/s大きいため、扁平率はADCP観測結果の2倍となっている。Run3では、

Run2と比べて長軸方向についてはADCP観測結果との差(約5°)が若干大きくなっているが、長軸長、短軸長、および遅角はADCP観測結果に大幅に近づいていることが分かる。

3.2.4. Stn. 4

Run1におけるビーム交差角度(76.3°)は90°に近く、東西・南北方向の推定誤差は視線方向誤差と同オーダーである(図-3a)。ADP観測結果と比較すると、長軸長が約3 cm/s短く、反対に短軸長が約2.5 cm/s長いいため、扁平率で0.1程度の差が生じているが、全体としては概ね一致している。一方、Run2におけるビーム交差角度は14.9°であり、Stn. 3と同様に90°から大きくずれている。その結果、東西・南北方向の推定誤差は視線方向流速誤差の40-50倍程度となる(図-3b)。Run2の結果をADPの結果と比較すると、長軸方向の差(約13°)については他の測点における比較結果と比べて特に大きくはない。しかしながら、長軸長が約4 cm/s短く、反対に短軸

表-3 HFレーダーとAD(C)PによるM<sub>2</sub>潮流楕円の比較

Station	Obs.	Tidal Current Ellipse					EW Comp.		NS Comp.	
		D (deg.)	LH (cm/s)	SH (cm/s)	$\kappa$ (deg.)	EL	H (cm/s)	$\kappa$ (deg.)	H (cm/s)	$\kappa$ (deg.)
Stn. 1	Run1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Run2	28.9	6.5	0.5	63.2	0.1	5.7	65.7	3.2	54.9
	Run3	35.3	6.4	0.1	61.1	0.0	5.2	61.9	3.7	59.6
	ADCP	36.6	6.3	0.8	63.6	0.1	5.1	58.1	3.8	73.6
Stn. 2	Run1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Run2	42.0	12.0	0.8	69.2	0.1	8.9	72.8	8.1	64.8
	Run3	37.8	11.7	2.0	70.2	0.2	9.3	62.7	7.3	82.7
	ADCP	58.1	10.5	1.7	74.6	0.2	5.7	60.2	8.9	80.3
Stn. 3	Run1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Run2	97.7	14.8	5.2	42.3	0.4	5.5	153.4	14.7	45.0
	Run3	103.2	19.0	3.2	54.0	0.2	5.3	198.8	18.5	56.2
	ADCP	98.1	19.7	3.3	71.4	0.2	4.3	201.7	19.5	72.8
Stn. 4	Run1	54.3	26.9	10.9	56.5	0.4	18.0	85.8	22.7	40.2
	Run2	76.5	25.8	18.2	36.2	0.7	18.7	107.4	25.5	26.6
	Run3	49.7	28.1	11.6	45.3	0.4	20.2	71.4	22.7	25.9
	ADP	63.5	30.0	8.4	65.0	0.3	15.4	94.1	27.1	57.0

D: Direction counterclockwise from east LH: Major axis SH: Minor axis  
 $\kappa$ : Phase EL: Ellipticity H: Amplitude

長が約10 cm/sも大きいために、扁平率で0.4もの差が生じている。さらに位相は約29°進んでいる。これに対し、Run3では長軸長、短軸長、扁平率、および遅角が大幅にADP観測結果に近づいている。ただし、Run1の結果と比べると、長軸長以外は、Run1の結果の方がRun3に比べてADP観測結果に近い値となっている。

以上、HFレーダーとAD(C)Pによる潮流楕円の比較した結果をまとめると、以下ようになる。

- (1) 湾奥に位置するStns. 1,2では、Run2とRun3の結果に大きな差は無く、さらに、両者の観測結果ともADCP観測結果と良く一致していた。
- (2) Run2でのビーム交差角度が15°以下であるStns. 3,4においては、AD(C)P観測結果との間に非常に大きな差が生じた。
- (3) Stns. 3,4におけるRun3の結果は、Run2と比べるとAD(C)P観測結果に大幅に近づいた。ただし、Stn. 4では、Run1の結果が最もADP観測結果に近かった。

#### 4. 考察

ここでは、Stns. 3,4においてRun2とAD(C)Pの観測結果に大きな差が生じた原因について考察する。ビーム交差角度が比較的90°に近く、HFレーダーからの距離が近いStns. 1,2では、両者は良く一致していた。このことから、大きな差が生じた原因として、Stns. 3,4におけるビーム交差角度、およびHFレーダーと測点との距離の

影響が考えられる。距離の影響としては、HFレーダーからの距離に比例して隣り合うビームの間隔が広がることによるAD(C)Pとの比較誤差(吉川ら, 2004)と、S/N比が小さくなる結果生じる1次散乱ピークの読み取り誤差の影響が考えられる。

まずビーム交差角度の影響について調べるために、Run2に比べてビーム交差角度が90°に近いHFレーダーの組み合わせである習志野局と横浜局の視線方向調和定数を使って、Stns. 3,4における潮流楕円を求めた(図-7)。始めにStn. 4(ビーム交差角度118.9°)に着目すると、Run2と比べてADP観測結果に大幅に近づいていることが分かる。ここでは示さないが、潮流楕円の各パラメータは、Run1やRun3とほぼ同じ値となった。このことは、Stn. 4において、Run2(千葉局と習志野局の合成)の結果とADPの観測結果とに大きな差が生じた主な原因が、Stn. 4におけるビーム交差角度にあることを示している。Stn. 3におけるビーム交差角度はStn. 4に比べてさらに小さいことから、Stn. 3においてもビーム交差角度の影響によって大きな差が生じていたものと推測される。しかしながら、実際にStn. 3(ビーム交差角度93.7°)における比較結果について見てみると、習志野局と横浜局との合成結果は、Run2に比べて長軸長と長軸方向はADCP観測結果に近づいているが、扁平率や遅角はRun2に比べて差が大きくなっている。このことは、Stn. 3においてRun2とADCPの観測結果に大きな差が生じた原因として、ビーム交差角度の影響だけでなく、HF

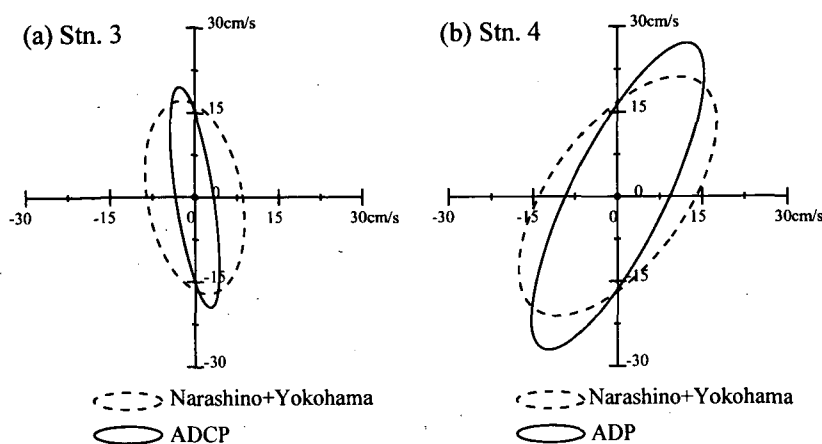


図-7 HF レーダー（習志野局－横浜局）とAD(C)Pから求めたM<sub>2</sub>潮流楕円の比較

レーダーからの距離に起因した誤差が大きな影響を与えていることを示唆している。ただし、現時点では距離に起因した2種類の誤差の寄与率については不明である。これらの結果から判断して、Stn. 3に比べて習志野局と千葉局からの距離が遠い横須賀沖における極端に小さな潮流楕円も、Stn. 3と同様に複合的な原因によって誤差が大きくなっていると推測される。さらに、習志野局と走水局から求めた湾奥部における潮流楕円も同様の理由によって誤差が大きくなっていると推測される（図-1中の斜線部）。

ところで、本研究では視線方向の観測誤差に偏りは無いと仮定した。この仮定が正しいとすると、十分な観測データに基づき最小自乗法を使って潮流成分を求めた場合、視線方向の観測誤差は打ち消されるため、潮流の視線方向成分が正確に求められるはずである。その結果、各格子点における潮流の東西・南北方向成分もまた正確に計算できると考えられる。しかしながら、調和解析に用いたRun2の観測データ数は十分（表-1）であるにも関わらず、実際はStns. 3,4ではAD(C)P観測結果との間に大きな差が生じた。習志野と横浜局の合成結果（図-7）も考慮に入れると、Stn. 4における比較結果は、最小二乗法で求めた視線方向調和定数にも観測誤差があることを、また、Stn. 3における比較結果は、その観測誤差はHFレーダーからの距離に依存している可能性を示している。

以上より、HFレーダー観測結果に基づいて潮流楕円分布を精度良く求めるためには、視線方向調和定数に関する観測誤差の影響をなるべく小さくするために、HFレーダーの配置、つまりビーム交差角度や対象海域とHFレーダーとの距離に注意を払う必要がある。具体的には、3局以上のHFレーダーを設置する場合、式(5)に基づいて東西・南北方向の推定誤差を計算し、対象海域

において推定誤差が概ね視線方向観測誤差と同オーダーとなるようHFレーダーの配置を決めれば良い。ただしStn.2における比較結果から、2局のHFレーダーに基づいて潮流楕円を求める場合、ビーム交差角度が20°程度以上あればほぼ妥当な潮流楕円が得られるものと考えられる。東京湾内湾域（富津岬－観音崎以北）について考えてみると、Run3のように内湾域における推定誤差が視線方向誤差と同程度になり、HFレーダーからの距離が45 km程度以内となるよう4局以上のHFレーダーを配置する必要があるだろう。

視線方向観測誤差や有効計測距離は個々のHFレーダーによって異なると考えられる。また、同一のHFレーダーによる観測データであっても、視線方向観測誤差は、観測時刻、HFレーダー設置場所、さらにはビーム毎に異なる可能性がある。しかしながら、視線方向流速誤差を観測毎に、しかも全ビームについて複数の地点で計測するのはほとんど不可能である。このような場合、得られた観測データから誤差を推定する方法が有効であると考えられる。その方法の一つとして、EOFに基づいた推定方法を付録Bに示す。この方法では、視線方向調和定数に関する観測誤差については推定することは出来ないが、生データに関する誤差のばらつき具合はうまく推定できる可能性がある。

富津沖では、Run1の結果の方がRun3の結果に比べて精度が良い可能性はあるが、現時点では、格子点毎に最適なHFレーダーの組み合わせを判断し、湾内全体の潮流楕円分布図を作成するのは難しい。また、AD(C)Pとの比較結果から判断して、Run3では東京湾内湾域におけるほぼ妥当な潮流楕円分布を求めることができたと考えられる。そこで、ここではRun3から求めた結果を現時点での東京湾内湾域におけるM<sub>2</sub>潮流分布とし、図-8に長軸・短軸、長軸振幅、および遅角の空間分布を示す。

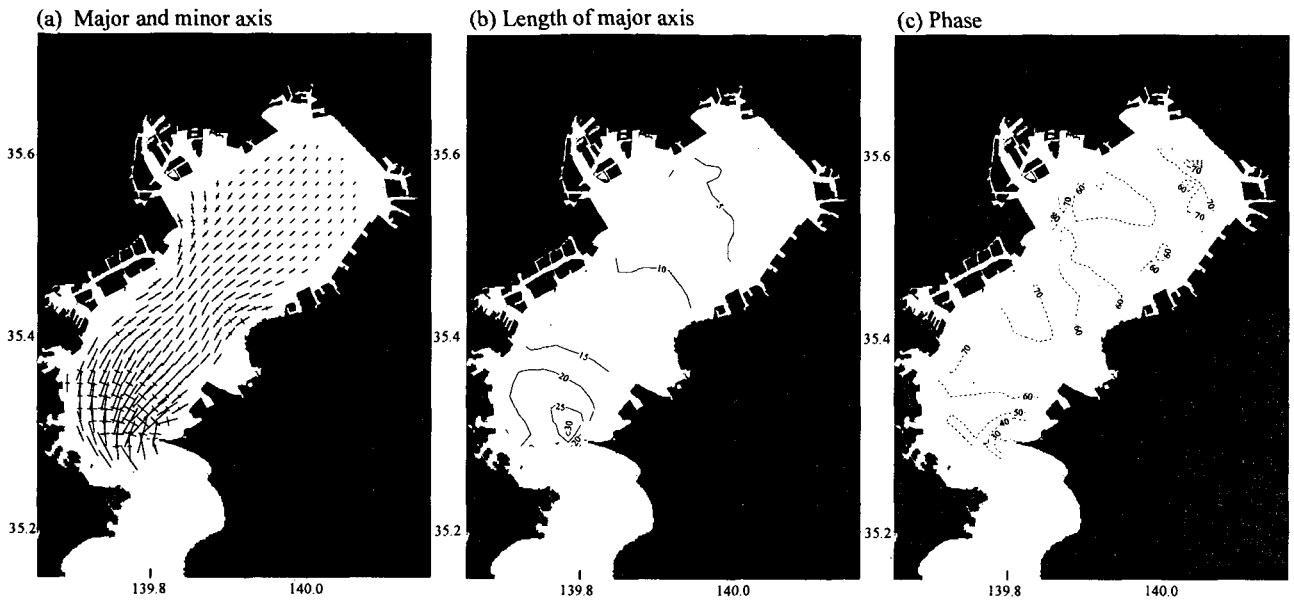


図-8 HFレーダー観測(Run3)によって求められた東京湾におけるM<sub>2</sub>潮流。  
(a)長軸・短軸, (b)長軸長, (c)位相. 位相は東経135°E基準.

ただし、上述した理由により図-1中に斜線部で示す海域の潮流楕円は除いてある。図を見ると、基本的に長軸長は、湾口部ほど大きく、富津岬沖で30 cm/sを超えており、湾奥では5 cm/s以下にまで小さくなっている。位相は大部分の海域で60-70°の範囲にあり、内湾域ではほぼ同時に上げ(下げ)潮最大となるが、富津岬沖では20-40°程度進んでいる。また、潮位の観測結果や潮流の計算結果(例えば、Guo and Yanagi, 1994)に見られるように、地球自転の効果によって東岸側の位相が西岸側に比べて進んでいる傾向は明確な形では見られない。現時点では、この原因については不明である。

## 5. まとめ

1998年から2003年にかけて行われたHFレーダー観測とAD(C)P観測から求められた潮流楕円を比較した。その結果、以下の結果が得られた。

- (1) 最小二乗法に基づいて求めた視線方向調和定数にも観測誤差があり、その観測誤差はHFレーダーからの距離に依存している可能性がある。
- (2) その結果、最小二乗法に基づいた調和解析を行う場合でも、解析精度はビーム交差角度やHFレーダーからの距離に依存すると考えられる。
- (3) 4局のHFレーダー視線方向流速の合成によって東京湾内湾域におけるほぼ妥当なM<sub>2</sub>潮流楕円の分布を求めることができた。
- (4) 東京湾全域の潮流を同時にしかも精度良く観測する

ためには、4局以上のHFレーダーを配置する必要がある。

(5) 2局のHFレーダーを用いた場合でも、ビーム交差角度20°以上(上限は不明)の海域であれば良好な調和解析結果を得ることが出来る。

(6) 比較結果に基づいて、潮流分布を精度良く求めるためのHFレーダー配置方法について提案した。

今後は、視線方向の観測誤差や観測誤差の偏りの空間分布、および継続的表層流動観測による潮流の季節変動や長期変動について把握していきたいと考えている。また、他の主要な分潮(K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>)についても同様な検討を行い、東京湾における主要4分潮の空間分布を求める予定である。それらの結果に基づいて、東京湾における浮遊物の短期的な漂流予測に役立てたいと考えている。

(2004年12月21日受付)

## 謝辞

本研究を進めるに際し、(株)国際航業金津伸好氏、九州大学応用力学研究所増田章教授、柳哲雄教授、吉川裕助教授、国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部の皆様には大変有益な助言をいただいた。HFレーダー観測を行うに当たって、横浜市、西部不動産、JFEスチール千葉工場、習志野市浄化センターには多大なご協力をいただいた。記して謝意を表します。なお、本研究の一部は、(旧)運輸施設整備事業団「運輸分野における基礎的研究推進制度」の補助を受けて行われたことを付記します。

参考文献

宇野木早苗・小西達男 (1998): 埋め立てに伴う潮汐・潮流の減少とそれが物質分布に及ぼす影響, 海の研究, 第7巻, pp.1-9.

宇野木早苗 (2002): 有明海における潮汐と流れの変化—諫早湾干拓事業の影響を中心として, 海と空, 第78巻, pp.19-30.

岸道郎・堀江毅, 杉本隆成 (1993): 東京湾をモデルで考える, 東京湾100年の環境変遷, 小倉紀雄編, 恒星社厚生閣, pp.139-153.

武岡英隆 (2003): 有明海におけるM<sub>2</sub>潮汐の変化に関する議論へのコメント, 沿岸海洋研究, 第41巻, pp.61-64.

徳田正幸・村上和男・渥美泰彦・永松宏 (1997): VHF沿岸海洋レーダの開発と流れの観測, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1276-1280.

日向博文・宮野仁・柳哲雄・粕谷智之・石丸隆・川村宏比 (2003): 大島西水道からの黒潮系暖水流入時における相模湾表層循環流の短周期変動特性, 海の研究, 第12巻, pp.167-184.

藤井智史・徳田正幸 (2001): HFレーダによる観測. 離上設置型レーダによる沿岸海洋観測, 土木学会, pp.68-89.

柳哲雄 (1993): 時間データの処理法. 海洋観測データの処理, 恒星社厚生閣, pp.15-57.

柳哲雄・大西和徳 (1999): 埋め立てによる東京湾の潮汐・潮流と底質の変化, 海の研究, 第8巻, pp.411-415.

柳哲雄・塚本秀史 (2004): 有明海における潮汐振幅の経年変動, 海の研究, 第13巻, pp.295-300.

吉川裕・増田章・丸林賢次・石橋道芳・奥野章・山下義幸 (2004): HFレーダ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, 第41巻, pp.109-117.

Box, G. E. P. and M. E. Muller (1958): A note in the generation of normal deviates, *Ann. Math. Stat.*, Vol. 29, pp.610-611.

Guo, X. and T. Yanagi (1994): Three dimensional structure of tidal current in Tokyo Bay, Japan, *La mer*, Vol. 32, pp.173-185.

Gurgel K.-W. (1994): Shipborne measurement of surface current fields by HF radar, *L'Onde Électrique*, Vol. 74, pp.54-59.

Nadai, A., H. Kuroiwa, M. Mizutori and S. Sakai (1999): Measurement of ocean surface currents by the CRL HF ocean surface radar of FMCW type. Part2. Current vector, *J. Oceanography*, Vol. 55, pp.13-30.

Preisendorfer, R. W. (1988): Selection rules for PCA, in *Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography, Developments in Atmospheric Science 17*, edited by Mobley C. D., Elsevier, NY, pp.192-252.

Yanagi, T., M. Shimizu, T. Saino and T. Ishimaru (1992): Tidal pump at the shelf edge, *J. Oceanography*, Vol. 48, pp.13-21.

Yanagi, T., M. Shimizu, M. Nomura and K. Furukawa (2003): Spring-neap tidal variations of residual flow in Tokyo Bay, Japan, *Con. Shelf. Res.*, Vol. 23, pp.1087-1097.

付録 A 任意の数 ( $N \geq 2$ ) の HF レーダ—視線方向流速から流速ベクトルを求める方法

HFレーダ—の視線方向流速観測誤差について以下の仮定を設ける.

①視線方向観測値の誤差

$$\varepsilon_i = U_n - U_n^0 \quad (i=1 \cdots N),$$

には偏りがない. すなわち,

$$\langle \varepsilon_i \rangle = 0 \quad (i=1 \cdots N),$$

②観測値の誤差の分散は既知である.

$$\langle \varepsilon_i^2 \rangle = \sigma_i^2 \quad (i=1 \cdots N).$$

③各 HFレーダ—の測定は互いに独立であり, 共分散はゼロとする.

$$\langle \varepsilon_i \varepsilon_{i'} \rangle = 0 \quad (i \neq i', i=1 \cdots n, i'=1 \cdots N).$$

④誤差の分布系は正規分布である.

$$P(\varepsilon_i) = (2\pi\sigma_i^2)^{-1/2} \exp\left[-\varepsilon_i^2/2\sigma_i^2\right] \quad (i=1 \cdots N).$$

⑤視線方向流速の真の値  $U_n^0$  を近似誤差なく再現することのできる流速成分  $(u, v)$  の組  $(u^0, v^0)$  が存在する.

図-2に示した幾何学的な関係から仮定⑤は保障される. ただし, 他の仮定については, 本文で述べた様に, 成り立っているかは正確には分からない.

幾何学的な関係から,

$$\begin{aligned} U \cos(\theta_1 - \theta) &= U_{r1} \\ U \cos(\theta_2 - \theta) &= U_{r2} \\ &\vdots \\ U \cos(\theta_N - \theta) &= U_{rN} \end{aligned}$$

となる。  $U \sin \theta = u$ ,  $U \cos \theta = v$  であるから、視線方向流速と求める流速成分との間には以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} v \cos \theta_1 + u \sin \theta_1 &= U_{r1} \\ v \cos \theta_2 + u \sin \theta_2 &= U_{r2} \\ &\vdots \\ v \cos \theta_N + u \sin \theta_N &= U_{rN} \end{aligned}$$

上式を表現の簡略化のために以下の様に行列で表す。

$$\begin{pmatrix} \sin \theta_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_2 \cos \theta_2 \\ \vdots \\ \sin \theta_N \cos \theta_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{r1} \\ U_{r2} \\ \vdots \\ U_{rN} \end{pmatrix}$$

すなわち、

$$\mathbf{A} \mathbf{u} = \mathbf{U}_r$$

各視線方向流速の観測値  $U_{r_i}$  が与えられた場合における推定値  $\hat{U}_{r_i}$  に関する尤度は、

$$\begin{aligned} L(\hat{\mathbf{U}}_r | \mathbf{U}_r) &= L(\mathbf{A} \hat{\mathbf{u}} | \mathbf{U}_r) = L(\hat{\mathbf{u}}) \\ &= (2\pi)^{-N/2} \prod_{i=1}^N \sigma_i^{-1} \exp \left[ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (U_{r_i} - \hat{U}_{r_i})^2 / \sigma_i^2 \right], \end{aligned}$$

となるので、結局、この尤度を最大にする、即ち

$$S(\mathbf{u}) \equiv \sum_{i=1}^N (U_{r_i} - \hat{U}_{r_i})^2 / \sigma_i^2 \rightarrow \min,$$

なる流速の東西・南北成分の推定値  $(\hat{u}, \hat{v})$  を求めれば良い (最小二乗条件)。この最小二乗条件を行列で表すと以下ようになる。

$$\begin{aligned} S(\mathbf{u}) &\equiv [\mathbf{U}_r - \hat{\mathbf{U}}_r(\mathbf{u})]^T \Sigma^{-1} [\mathbf{U}_r - \hat{\mathbf{U}}_r(\mathbf{u})] \\ &= [\mathbf{U}_r - \mathbf{A} \mathbf{u}]^T \Sigma^{-1} [\mathbf{U}_r - \mathbf{A} \mathbf{u}] \rightarrow \min \end{aligned}$$

ただし、

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{U}_r - \mathbf{U}_r^0, \Sigma \equiv \langle \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}^T \rangle = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_N^2 \end{bmatrix},$$

である。これが東西・南北成分  $(u, v)$  に関して最小となるためには、その微分がゼロとなればよい。

$$\frac{\partial S(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0}.$$

実際に計算すると、

$$(\mathbf{A}^T \sigma_0^2 \Sigma^{-1} \mathbf{A}) \hat{\mathbf{u}} = \mathbf{A}^T \sigma_0^2 \Sigma^{-1} \mathbf{U}_r,$$

となる。よって、

$$\hat{\mathbf{u}} = (\mathbf{A}^T \Sigma^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Sigma^{-1} \mathbf{U}_r = \mathbf{C} \mathbf{U}_r.$$

この時の東西・南北成分に関する誤差行列は、

$$\begin{aligned} \Sigma_{\hat{\mathbf{u}}} &= \langle (\hat{\mathbf{u}} - \mathbf{u}^0)(\hat{\mathbf{u}} - \mathbf{u}^0)^T \rangle = \langle (\mathbf{C} \mathbf{U}_r - \mathbf{C} \mathbf{U}_r^0)(\mathbf{C} \mathbf{U}_r - \mathbf{C} \mathbf{U}_r^0)^T \rangle \\ &= \langle \mathbf{C}(\mathbf{U}_r - \mathbf{U}_r^0)(\mathbf{C}(\mathbf{U}_r - \mathbf{U}_r^0))^T \rangle \\ &= \langle \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} (\mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon})^T \rangle = \langle \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C}^T \rangle = \mathbf{C} \langle \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}^T \rangle \mathbf{C}^T \\ &= \mathbf{C} \Sigma \mathbf{C}^T = (\mathbf{A}^T \Sigma^{-1} \mathbf{A})^{-1} \end{aligned}$$

となり、東西、南北成分の誤差 (分散) は、この誤差行列の対角成分  $(\Sigma_{\hat{u}_{11}}, \Sigma_{\hat{u}_{22}})$  にそれぞれ対応する。

続いて、実際に東西・南北成分の推定値と誤差行列を計算してみる。ただし、ここではすべて同一の長野日本無線社製フェイズドアレイ式 HF レーダーで計測した場合を考え、各レーダによる視線方向流速の観測誤差 (標準偏差) はすべて同じ ( $\sigma_r$ ) と仮定する。

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^T \Sigma^{-1} \mathbf{A} &= \frac{1}{\sigma_r^2} \mathbf{A}^T \mathbf{I} \mathbf{A} \\ &= \frac{1}{\sigma_r^2} \begin{pmatrix} \sin \theta_1 & \sin \theta_2 & \cdots & \sin \theta_N \\ \cos \theta_1 & \cos \theta_2 & \cdots & \cos \theta_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \theta_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_2 \cos \theta_2 \\ \vdots \\ \sin \theta_N \cos \theta_N \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{\sigma_r^2} \begin{pmatrix} \sum_{n=1}^N \sin^2 \theta_n & \sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \\ \sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n & \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n \end{pmatrix} \end{aligned}$$



$$(\mathbf{A}^T \Sigma^{-1} \mathbf{A})^{-1} = \frac{\sigma_r^2}{\sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n \sum_{n=1}^N \sin^2 \theta_n - \left( \sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \right)^2} \times \begin{pmatrix} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n & -\sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \\ -\sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n & \sum_{n=1}^N \sin^2 \theta_n \end{pmatrix}$$

となるから、求めるべき流速ベクトルは、

$$\mathbf{u} = \frac{1}{\det} \begin{pmatrix} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n & -\sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \\ -\sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n & \sum_{n=1}^N \sin^2 \theta_n \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cdots \sin \theta_N \\ \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cdots \cos \theta_N \\ \vdots \\ U_{rN} \end{pmatrix}$$

となる。ここに、

$$\det = \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n \sum_{n=1}^N \sin^2 \theta_n - \left( \sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \right)^2$$

である。結局、各 HF レーダーにより視線方向流速の観測誤差が同じ場合、東西・南北流速の推定値には視線方向観測誤差は関係なくなる。一方、東西・南北成分の推定誤差は、

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{u}}} = (\mathbf{A}^T \Sigma^{-1} \mathbf{A})^{-1} = \frac{\sigma_r^2}{\sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n \sum_{n=1}^N \sin^2 \theta_n - \left( \sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \right)^2} \times \begin{pmatrix} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_n & -\sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n \\ -\sum_{n=1}^N \sin \theta_n \cos \theta_n & \sum_{n=1}^N \sin^2 \theta_n \end{pmatrix}$$

の対角成分であるから、視線方向の観測誤差とビーム方向が関係する。また、東西・南北成分の共分散は一般にゼロでなくなる。以上より、任意の数 ( $N \geq 2$ ) の HF レーダー視線方向流速を用いて格子点上における流速ベクトルを計算できた。後は、本文 2.2.2. に示した手順で潮流楕円を求めれば良い。

## 付録 B EOF に基づく誤差評価について

経験的固有関数法(Empirical Orthogonal Function; EOF)を用いることによって、HF レーダー観測結果から観測誤差を推定する方法について考えてみる。残念ながら現時点ではこの方法を検証するだけの十分な精度の観測データが手元に無いので、ここではその方法の紹介と Nadai et al., (1999)らの理論との定性的な比較を行い、その可能性を示すにとどめる。

HF レーダ観測により得られたデータマトリックスを

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}(t, x)$$

$$t = 1, \dots, n; \quad x = 1, \dots, p,$$

とする。ここに  $t$  は時間を、 $x$  は流速が得られる地点を表している。共分散行列  $\mathbf{Z}^T \mathbf{Z}$  の固有値  $l_j$ 、固有ベクトル  $e_j(x)$  を用いると観測データは以下の様に表示る。

$$\mathbf{Z}(t, x) = \sum_{j=1}^p l_j^{1/2} \alpha_j(t) e_j(x)$$

$$t = 1, \dots, n; \quad x = 1, \dots, p; \quad l_1 > \dots > l_p,$$

ここに  $\alpha_j(t)$  は時間的に変動する各モードの振幅である。通常 HF レーダーの観測結果をモード分解した場合、数 100 あるいは 1000 以上のモードが求められる。しかしながら、そのモード全てに物理的意味があるわけではない。むしろ一般的にはそれらの大部分が物理的に意味の無いモードである。その主な要因は観測誤差である。(実際には、物理現象をとらえていたとしても、高次モードは観測範囲内において相関の(空間スケールが非常に)小さな現象であり、通常解釈には邪魔な存在であることが多い。)したがって、観測結果の物理的解釈を行う場合、何らかの客観的な方法によって得られたモードを物理的に”意味のある”モードと”無い”モードに分離する必要がある。すなわち、以下に示す  $p'$  を客観的に求めることが出来れば非常に有益である。

$$\mathbf{Z}(t, x) = \sum_{j=1}^{p'} l_j^{1/2} \alpha_j(t) e_j(x) + \sum_{j=p'+1}^p l_j^{1/2} \alpha_j(t) e_j(x).$$

つまり、このように客観的な分離が可能であれば、観測データから観測誤差(上式右辺第 2 項)を抽出することが出来るのである。そこで、ここでは、固有値の大きさに基づいて客観的に”意味のある”モードを選択する方法 (Preisendorfer, 1988) を用いることによって、HF 観測誤差を推定することを検討する。

固有値に基づく選択ルールには、3 種類 (Rule A4,

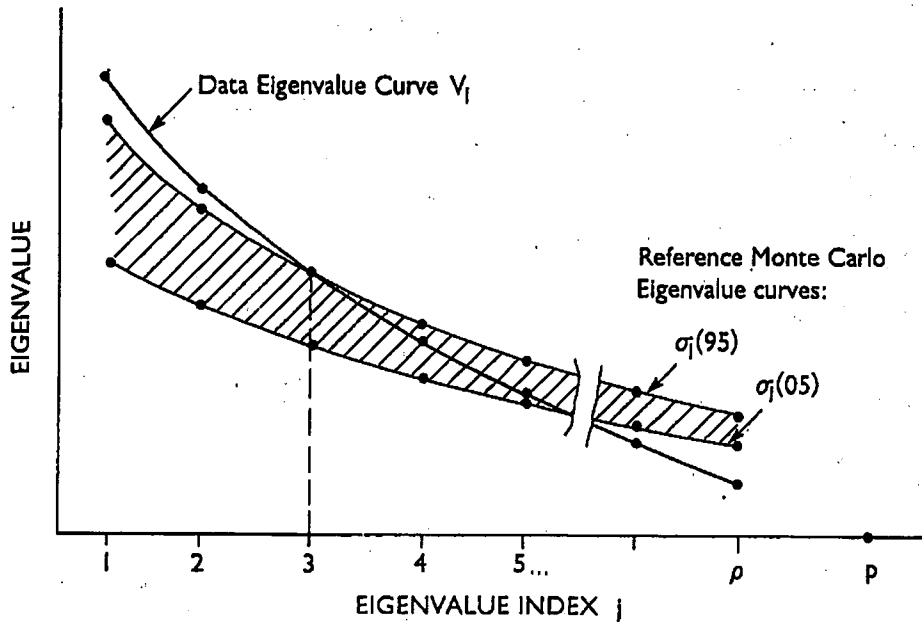


図-B1 RuleNの概念図(Preisendorfer, 1988). この場合  $p'=2$  となる.

RuleN, RuleM) あるが, ここではモンテカルロ法を利用するRuleNについて検討する. RuleNの基本的な考え方は, 観測結果から得られた固有値を適当な方法で作出したノイズなデータセットの固有値と比較し, それよりも大きければそのモードは物理的に意味があり, 小さければ意味がないとするものである. 具体的な手順を以下に示す.

まず, 適当な方法 (例えば Box and Muller, 1958) を用いて大きさ  $n \times p$  ( $n$ : 時間方向のデータ数,  $p$ : 測点数,  $n \geq p$ ) のランダムデータ行列  $\mathbf{R}$  と, このデータに対応する共分散行列  $\mathbf{S} = \mathbf{R}^T \mathbf{R}$  を作成する. このとき, 各点のランダムデータの時系列は  $N(0,1)$  (平均0, 分散1) となるようにしておく. これを (例えば) 100回繰り返し, 第  $\omega$  回目のランダムデータ行列を  $\mathbf{R}(\omega)$ ,  $\mathbf{S}(\omega)$  とする.  $\mathbf{S}(\omega)$  に関する固有値問題を数値的に解くことによって  $p$  個の固有値  $l_j (j=1, \dots, p)$  が得られる. ただし,

$$l_1(\omega) > \dots > l_p(\omega), \quad \omega = 1, \dots, 100.$$

さらに, 各固有値を各試行の平均値で規格化する.

$$U_j(\omega) = l_j(\omega) \left[ N^{-1} \sum_{n=1}^N l_n(\omega) \right]^{-1} \quad \begin{matrix} \omega = 1, \dots, 100 \\ j = 1, \dots, p. \end{matrix}$$

続いて, 各モードごとに大きさ順に並べ替え,

$$U_j(\omega_1) < \dots < U_j(\omega_{100})$$

大きい方と小さい方から5番目の固有値を抽出し,

$$\sigma_j(05) \equiv U_j(\omega_5)$$

$$\sigma_j(95) \equiv U_j(\omega_{95})$$

とする.  $n \times p$  の観測データ行列  $\mathbf{Z}$  に対しても同様に  $p$  個の固有値を求めた後, 平均値で規格化しておく.

$$d_1 > \dots > d_p,$$

$$V_j = d_j \left[ N^{-1} \sum_{n=1}^N d_j \right]^{-1}, \quad j = 1, \dots, p.$$

最後に, 観測データとランダムデータの固有値をモード毎に比較し,  $p'$  を決定する (図-B1).

$$p' \text{ は } V_j > \sigma_j(95) \text{ を満たす最大の } j$$

そのような  $j$  が存在しなければ  $p'$  は 0

これら一連の計算を独自でプログラミングするにはそれなりに時間を要するが, ランダムデータの作成方法 (例えば Box and Muller, 1958) は市販の参考書などにプログラムリストが掲載されている. また, Preisendorfer (1988) には観測データのサイズ ( $\beta = n/p$ ) に対応するランダムデータの固有値が表にまとめられている. さらにフリーで入手できるソフトウェアの中には (例えば CLIMLAB2000), ここで示した一連の手続き (EOF解析, Rule Nテスト) を行うことが可能なものもある.

RuleNにより抽出した高次モードを再合成して得られた流速の散布図の概念図を図-B2に示す. これらのデー

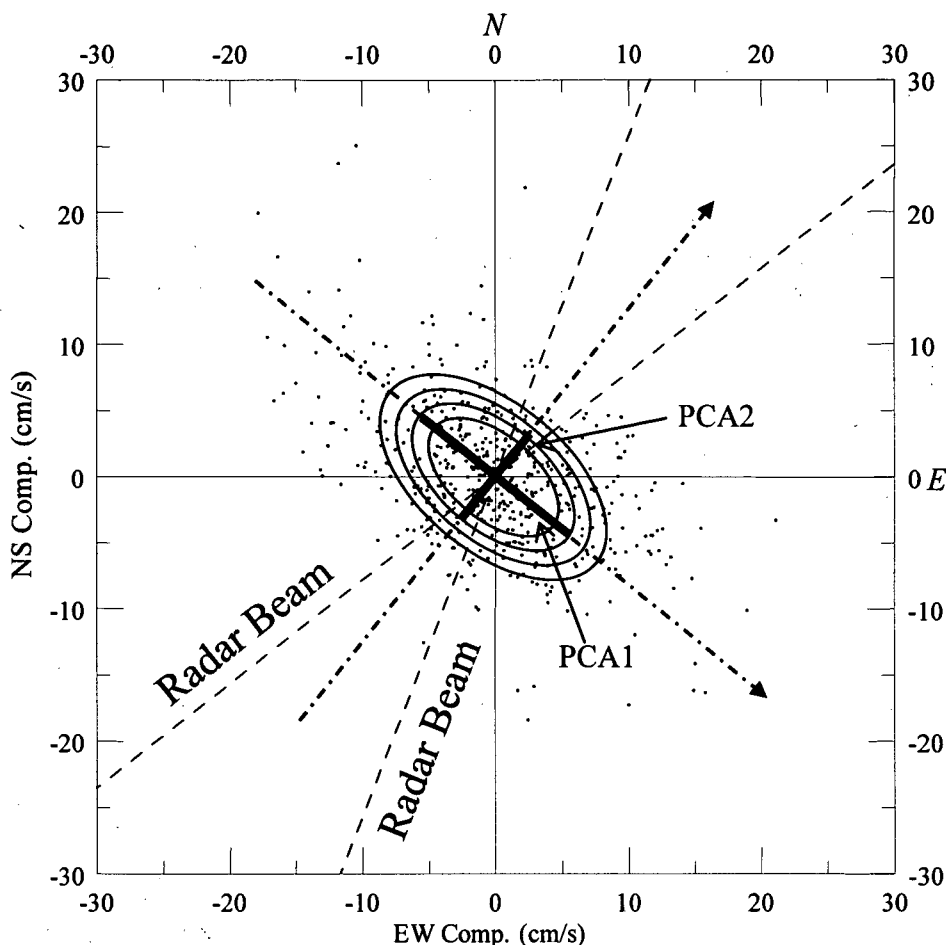


図-B2 レーダービーム、誤算流速分布と PCA1, PCA2 との関係

タの第1主成分 (PCA1) の方向が誤差確立密度関数の長軸方向と、第2主成分 (PCA2) の方向が短軸方向と一致するはずである。また、PCA1, PCA2の方向は固有ベクトルの向きを求めればよい。高次モードの再合成から得られた流速の東西成分  $u$  を、南北成分  $v$  をとすると、固有ベクトル  $\mathbf{x}$  は、以下に示す  $2 \times 2$  の分散共分散行列  $\mathbf{S}$  に関する固有方程式を解けばよい。

$$\mathbf{S}\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x},$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_u^2 & \sigma_{uv} \\ \sigma_{uv} & \sigma_v^2 \end{bmatrix}.$$

また、固有値  $\lambda$  は主成分方向の分散を表しているので、

$$r = \sqrt{\lambda_1 / \lambda_2}$$

は誤差確率密度関数の長軸と短軸の比率を表している。

また、誤差流速の大きさは

$$\sigma_v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{u^2 + v^2}$$

となる。ここに、 $n$  は観測データ数である。

現時点では比較用の実測データが不十分であるため、RuleNに基づいて抽出した成分と Nadai et al., (1999) による理論との定性的な比較を行った。具体的には、第1主成分方向と誤差確立密度関数の軸方向、長軸と短軸の比率 (確率密度関数である楕円の扁平度)、誤差流速の大きさの空間分布パターンについての比較を行った。なお、比較に用いた HF レーダー観測データは、2001年7-8月に湾奥で計測されたものであり、本文に示した観測データではない。格子点の数は128であり、その結果、各格子点における  $u, v$  に基づく共分散行列  $\mathbf{Z}^T \mathbf{Z}$  は256個の固有値を持つ。

実際に RuleN テストを行った結果、第9モード以上は物理的に意味がないと判断された。また、第9モード以上 (EOFs9-256) で全体の変動の約10%が説明可能であった。図-B3に異なるビーム交差角を持つ観測点における

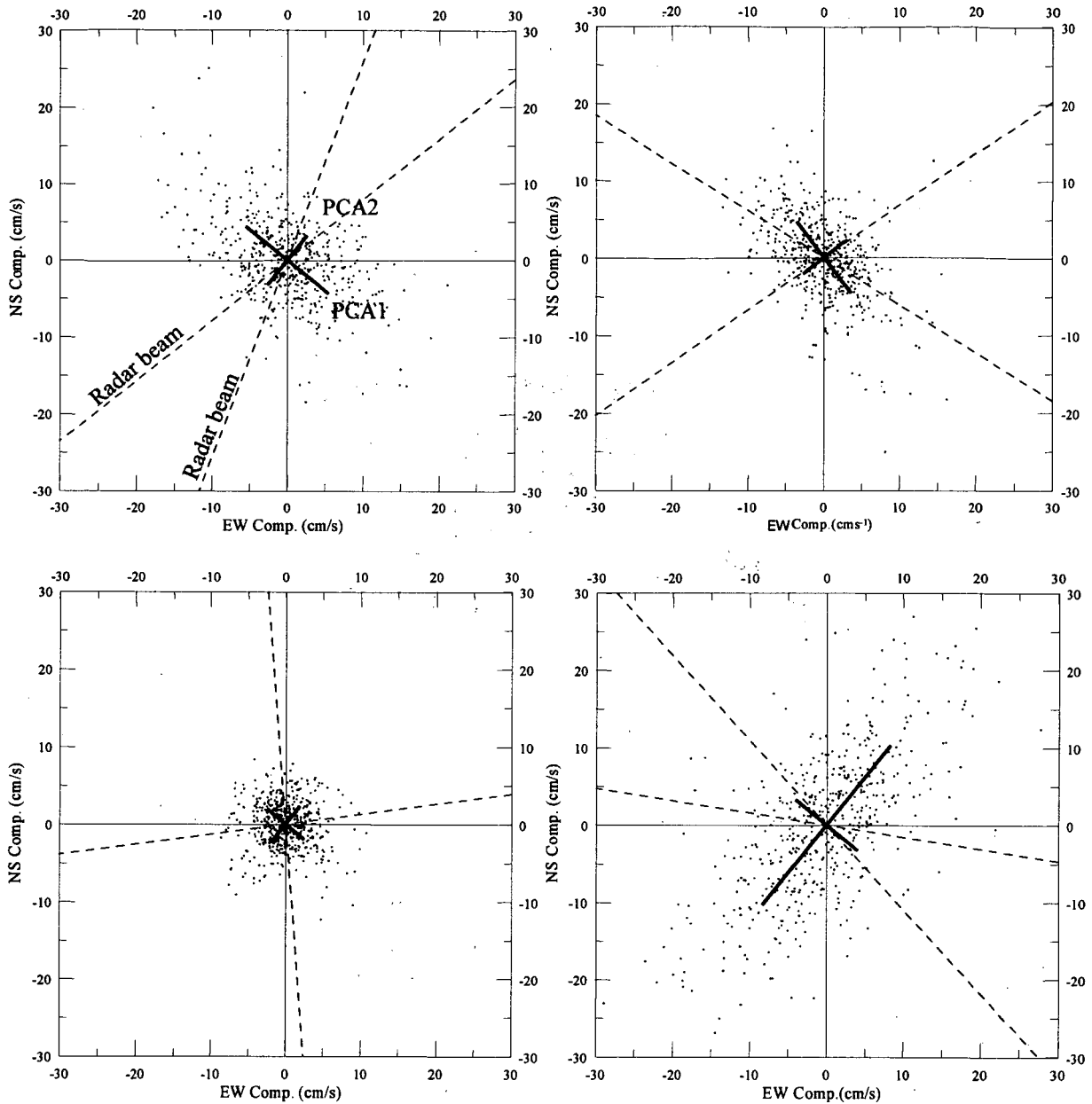


図-B3 EOFs9-256による再合成流速の分布とビーム交差角度との比較

高次モード(EOFs9-256)を用いて再合成した流速成分の分散図を示す。図中の点線はビーム方向を、実線は主成分分析より求めた第1, 第2主成分の方向を示す。実線の大きさは各主成分方向の標準偏差の2倍である。図から、RuleNテストによって分離された高次モードの流速が、下に示すNadai et al.,(1999)による誤差確立密度関数にほぼ従った分布をしていることが分かる。

$$P_v(V_E) = \frac{|\sin(\theta_1 - \theta_2)|}{2\pi\sigma_r^2} \times \exp\left(-\frac{f(\theta_1, \theta_2, u_E, v_E)}{2\sigma_r^2}\right)$$

$$f(\theta_1, \theta_2, u_E, v_E) = u_E^2(\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2) + 2u_E v_E(\sin \theta_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_2 \cos \theta_2) + v_E^2(\cos^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2)$$

ここに、 $u_E, v_E, \theta_1, \theta_2, \sigma_r^2$ はそれぞれ、観測誤差ベクトルの東西、南北成分、2本のレーダーの時計回りに測った北からの角度、視線方向の観測誤差である。つまり、ビーム交差角度が90°に近い場合、高次モードは、円形に近い分布形となり、90°から大きくずれる場合には、形は楕円となり、長軸と短軸が2本のビームを2等分する方向に存在していることが分かる。また、ここでは示さないが、誤差流速や扁平率(PCA2/PCA1)を比較すると、

全体的にNadai et al.,(1999)の予測結果と良く一致した。この方法には、どの程度の空間を対象として観測行列  $Z$  を作成するか、つまり、解析対象とする物理現象の空間スケールをどのように決めるかという問題点はある。しかしながら（まだ十分な検討は行っていないが）、筆者は、ここで示した結果は、今後このような誤差推定の試みを行う価値があることを示していると考えている。

---

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 212

March 2005

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

---

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1  
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5018