

HF レーダーによる東京湾の表層流の測定結果 と潮流および風との関連

THE CHARACTERISTICS OF SURFACE TIDAL CURRENT OBTAINED BY HF
RADAR AND ITS RELATION TO SURFACE WIND IN TOKYO BAY

黒部和弘¹・村上和男²

Kazuhiro KUROBE, Kazuo MURAKAMI

¹ 学生会員 武蔵工業大学大学院 都市基盤工学専攻 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤一丁目 28-1)

² フェロー 博(工) 武蔵工業大学 工学部都市工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤一丁目 28-1)

The surface tidal current is influenced by sea-surface wind. So, we investigated the influence of sea-surface wind on tidal current data observed by HF Radar. At first, we carried out harmonic analysis in order to know sinusoidal tidal components. Then we studied the relationship between sea-surface wind and the 25 hours running mean values of tidal current by using multi-regression method. From the study, we obtained following results. (1) Tidal current obtained by HF Radar is strongly influenced by sea-surface wind. (2) The influence in shallow area is larger than the one in deep area. (3) The influence in summer is a little bit larger than the one in winter.

Key Words : High Frequency radar, Tokyo bay, Marine wind, Surface flow

1. はじめに

近年, 我が国の海洋では漂流ゴミや重油タンカーの座礁による油の流出が問題になっており, 海洋における生態系や環境に悪影響を与えている. 東京湾もその例外ではなく, これらの問題が発生している.

対策としてそれぞれの移動経路を予測し, 回収効率を上げることが挙げられる. 漂流ゴミや油は表層流によって流れるため, 表層流の解析が重要となっている. 最近では, 表層流の解析に海洋短波レーダー (HF レーダー) が用いられるようになってきている. この HF レーダーは, 広域の流れを平面的に測定可能な計測器で, 非常に有力な装置である. しかし, 表層の流れは海上風の影響を受けていると考えられる. 従って HF レーダーの有効性についての検討が必要である.

本研究では上記のような研究背景をふまえて, 東京湾の表層の挙動を調べるために HF レーダーを用いて解析を行っている. この HF レーダーはレーダー波を海水面に照射し, その反射波を解析し, 表面流を測定するものである. しかし, HF レーダーの観測データは表面流の測定結果であるので, 潮流や海上風の影響など様々な要因が含まれている. そこで, HF レーダーの観測データと海上風データを比較することにより, HF レーダーの観測データが海上風の影響を受けたデータなのかを明らかにするこ

とを目的としている.

2. HF レーダーの概要

沿岸域の高度利用や, 海の安全, 環境保全に役立つ情報を迅速に提供するために, 今まで様々な海洋調査が行われてきた. しかし, これまでの海洋調査では, 流速計を海上の船舶から吊るすか, 海中に係留して, 複数の調査地点で海流の向きや流速を直接測定する方法が用いられてきた. しかし, この方法では荒天時に測定できず, また地点ごとの「点」のデータから全体を推測することによる誤差や, 個々の地点での測定する時刻の違いによって生じる誤差が生じていた. この点, 本研究で用いている海洋レーダーは, 陸上からの遠隔操作が可能であることから, 天候に関係なく, いつでも測定が可能であると同時に, 海上の広い範囲を「面」的に, かつ同時に短時間で調べることができる¹⁾. その利用例として, 近年多発しているタンカーの座礁事故による油の漂流, ゴミの漂着問題が挙げられる. 油やゴミの漂流を解析するためには, 表層流が最も重要な流れとなる. そのため, 表層流の平面的な把握ができる海洋レーダーは, 表層流の解析に有効な手段になると考えられる. なお, 無風時での気象条件下でのレーダー流速計の測定結果と, 従来の係留系による流速計

(ADCP など) による測定結果との照合調査により良い一致が得られていて (村上ら, 1997²⁾), このことから, レーダー流速計による流れ測定の精度は測定条件が整えば問題ないものと思われる。

図-1 に海洋レーダーによる流れの測定原理を示す。海洋レーダーは, 陸上から海に向かって電波を発信し, 波で反射して返ってくる (ブラック散乱) 電波を受信・解析することにより, 表層における海流の向きや速さ, 波高などのデータを取得するものである。

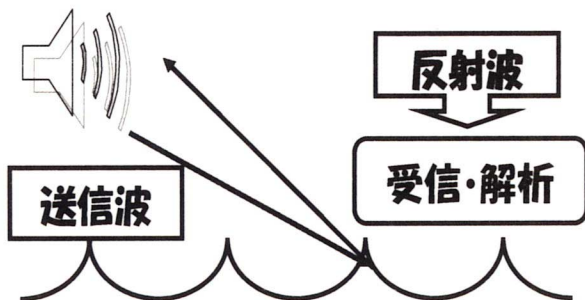


図-1 海洋レーダーの測定原理

次に海洋レーダーの種類について示す。

海洋レーダーは, 我が国では HF レーダー (High Frequency : 短波レーダー), VHF レーダー (Very High Frequency), DBF 海洋レーダー (Digital Beam Forming), X バンド海洋レーダーの 4 種類が利用されている。本研究ではこの中の HF レーダーを用いている。表-1 に海洋レーダーの種類とその性能について示す。表-1 より HF レーダーは最大観測距離が長いが, 距離分解能が三倍になっていることが分かる。このことから, HF レーダーは広範囲の流れの測定に有効であり, 他の二つは HF レーダーより周波数が大きく観測範囲は狭いものの, 精度良く測定できるということが分かる。

表-1 海洋レーダーの性能比較

	HFレーダー	VHFレーダー	DBF海洋レーダー
周波数(MHz)	24.515	41.9	41.9
設置面積(m ²)	66×6	15×15	40×7
距離分解能(km)	1.5	0.5	0.5
速度分解能(cm/s)	4.78	2.89	2.13
最大観測距離(km)	50	25	25
波長	12.2	7.16	7.16

なお, 海洋レーダーの測定水深は (1) 式, (2) 式により求められる。

$$\begin{aligned} \text{測定水深} &= \text{共鳴する波浪の波長} / 13 & (1) \\ \text{共鳴する波浪の波長} &= \text{レーダー波の波長} / 2 & (2) \end{aligned}$$

レーダー波の波長は HF レーダーが 12.2m, VHF レーダー, DBF 海洋レーダーが 7.16m である。これらより, 海洋レーダーの測定水深は HF レーダー

が約 50cm, VHF レーダー, DBF 海洋レーダーが約 30cm となる。

3. 解析データの概要

本研究では, 表層流の解析を行うために流れのデータと海上風データの 2 種類を用いている。以下にデータの諸条件を示す。

(1) 流れのデータ

流速, 流向のデータは東京湾環境情報センター³⁾が計測しているデータを用い, 東京湾の表層流を解析している。これらのデータは, HF レーダーにより観測されている。東京湾環境情報センターでは, これらの観測結果を Web に一般公開している。HF レーダーは A,B,C の 3 地点 (表-2 に示す) に設置され, 周波数が 24.515MHz のレーダー波を照射し観測を行っている。HF レーダーにより観測可能な範囲を図-2 (全 241 箇所) に示す³⁾。解析に用いたデータ期間は 2006 年 8 月と 12 月の 2 ヶ月である。

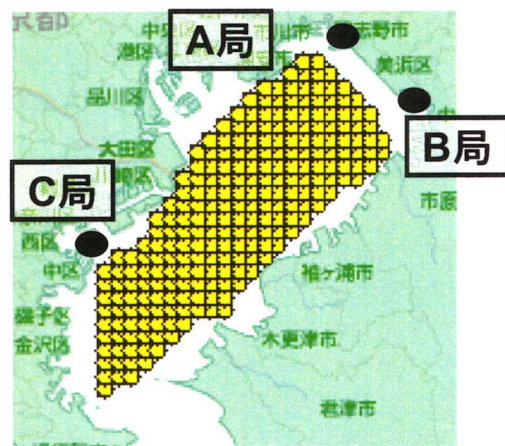


図-2 HF レーダーの観測範囲

表-2 HF レーダーの設置場所

A局	千葉県千葉市中央区川崎
B局	千葉県習志野市芝園
C局	神奈川県横浜市鶴見区大黒ふ頭

この観測結果には, 全 241 測点の 2006 年 8 月 1 日の 0 時から 8 月 31 日の 23 時までと, 2006 年 12 月 1 日 0 時から 12 月 31 日の 23 時までの東西, 南北の流速成分の値が整理されている。本稿では, このデータを用い解析を行っている。

(2) 海上風データ

風速、風向のデータは東京湾環境情報センターが千葉灯標で、国土交通省が第二海堡で計測しているデータをそれぞれ使用している。観測地点の概要を図-3に示す。また、図-4(上:1月,下:7月)に千葉灯標における2006年1月と7月のデータを例として示す。観測結果から観測期間内では夏場に南風が吹き、冬場では北風が吹いていることが分かる。第二海堡における海上風の解析は、国土交通省の発表しているデータを用いている。



図-3 観測地点の概要図

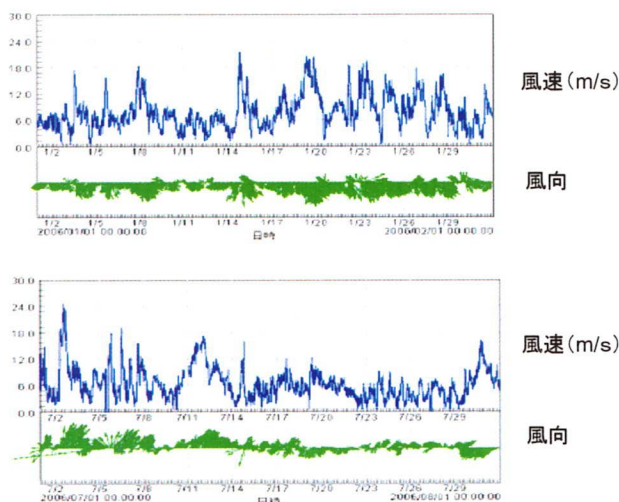


図-4 千葉灯標における2006年1月と7月の海上風

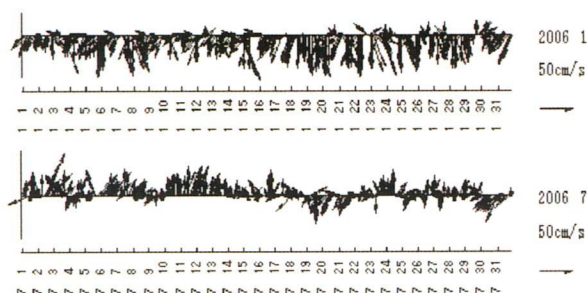


図-5 第二海堡における2006年の海上風

図-5にこの結果例として2006年1月と7月の結果を示す。観測結果から観測期間内では、千葉灯標と同様に夏場に南風が吹き、冬場では北風が吹いていることが分かる。

以上より、2地点の海上風データの解析結果から、以下のことが分かった。

千葉灯標、第二海堡の2地点で同じような風向を示している。また、一般的に言われている夏場には南風、冬場には北風が吹くことが2地点共に確認ができた。今回は千葉灯標のデジタルデータが入手できなかったこと、及び以上のことから千葉灯標、第二海堡での海上風の挙動が似ていると判断できるので、本研究では、HFレーダー観測に与える海上風の影響を考える際に、2地点の海上風を同一のものと仮定し、第二海堡のデータを東京湾の海上風データとして取り扱っている。

4. 解析結果

HFレーダーから得られた観測結果に潮流成分が含まれていることを確認をするために、調和解析を実施した。その結果の一例を図-6に示す。図-6は下から順に調和解析結果の合成値、実測値を示す。また、調和解析結果から各測点でM₂潮の潮流楕円を作成した。その結果の一例を図-7に示す。

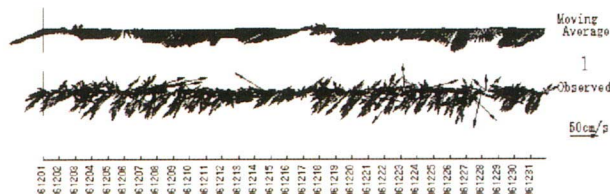


図-6 測点1の調和解析結果



図-7 2006年12月のM₂潮流楕円の分布の一例

図-7から潮流楕円は、湾口部で大きく、湾中央部と湾奥部で小さくなっていることが分かる。また、ここには示さないが、2006年8月でも同様の結果が得

られた。このことから東京湾における潮流は、湾口部で大きく湾奥部へ向かうほど小さくなっていると考えることができる。

次に、潮流以外の成分について考察する。図-8に2006年12月の測点1における観測結果と調和解析結果の合成値をそれぞれ東西方向、南北方向に分離した結果を示す。太線が実測値、細線が調和解析結果である。実測値から潮流成分を差し引いた結果が潮流以外の成分流と考えられる。しかしながら、図-8の結果から、これらの差の値には、未だ潮流成分の流れが多く含まれているものと考えられる。そこで、ここでは、より良く潮流成分を取り除くために、HFレーダーの観測結果に25時間の移動平均を施した⁴⁾。その結果の一例を図-9に示す。図-9に示すのは2006年8月の測点1における結果である。図-9の上の図から、12時間、24時間周期の潮流成分はほぼ取り除けたものと考えられる。次に移動平均値と海上風データとの比較を行っていく。

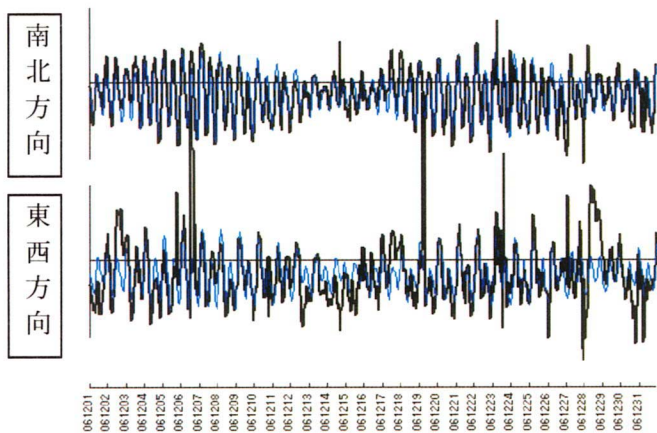


図-8 東西方向、南北方向それぞれについて調和解析

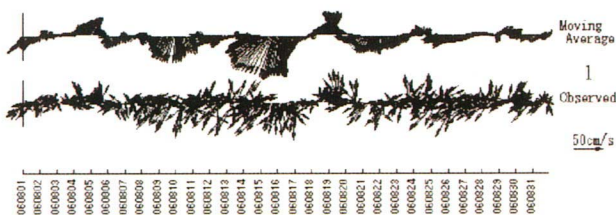


図-9 移動平均法を用いた解析結果

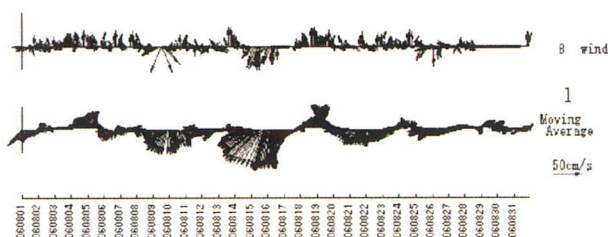


図-10 移動平均値と海上風データ (2006年8月)

図-10に2006年8月の測点1の移動平均値(下)と海上風データ(上)との関係を示す。図-10から、例えば8月15日から8月17日に北風が吹いている際に南西方向の流れになっており、8月18日と19日に南風が吹いている際に北方向への流れになっていることが分かる。また、ここには示さないが、他の測点や2006年12月でも同様のことが分かった。このことから、移動平均値と海上風の傾向が似ていることが分かる。従って、潮流以外の成分流は風の影響を強く受けているものと考えられる。また、どの程度相関関係があるのか相関係数を求め検討を行った。相関係数を求める際に用いたパラメータを以下に示す。表-3に求めた2006年8月の相関係数の一例を示す。

U: 移動平均値の東西方向の流速
V: 移動平均値の南北方向の流速
W_x: 海上風の東西方向の風速
W_y: 海上風の南北方向の風速

表-3 2006年8月の各パラメータの相関係数の一例

St.	U-W _x	U-W _y	V-W _x	V-W _y
1	0.294	0.490	0.197	0.571
2	0.272	0.450	0.184	0.579
3	0.260	0.413	0.189	0.557
4	0.255	0.395	0.200	0.571
5	0.278	0.506	0.167	0.534
6	0.266	0.467	0.189	0.557
7	0.259	0.455	0.199	0.574
8	0.241	0.450	0.225	0.598
9	0.302	0.595	0.168	0.547
10	0.294	0.579	0.187	0.566
11	0.280	0.557	0.217	0.596
12	0.245	0.511	0.216	0.593
13	0.219	0.475	0.221	0.598
14	0.290	0.633	0.174	0.543
15	0.284	0.618	0.188	0.560
16	0.275	0.602	0.210	0.595
17	0.245	0.573	0.225	0.612
18	0.231	0.551	0.228	0.613
19	0.225	0.539	0.202	0.598
20	0.268	0.634	0.175	0.542
21	0.271	0.635	0.200	0.579
22	0.254	0.615	0.213	0.603
23	0.244	0.594	0.217	0.606
24	0.249	0.601	0.217	0.620
25	0.257	0.601	0.216	0.614

ここで、 S_t は測点番号(1~25)、 $U-W_x$ はUと W_x の相関係数、 $U-W_y$ はUと W_y の相関係数、 $V-W_x$ はVと W_x の相関係数、 $V-W_y$ はVと W_y の相関係数を示す。

表-3から $U-W_y$ と $V-W_y$ の相関が高いことが分かる。このことから、2006年8月では、どの方向の流れも南北方向の海上風の影響を受けていると考えら

していることがわかる。この原因として、夏期と冬期で海上風の影響を受ける水深が異なるためであると考えられる。村上ら⁶⁾の東京湾における潮流観測の結果によれば、夏期は上下層で水温差、密度差があり、平均流が上下層で異なった結果が得られているので、季節により東京湾内の海象の特徴が異なると考えられる。水温、密度に差がある夏期では、風の影響を受ける水深は密度の低い上層であると考えられる。一方、水温、密度の差が夏期より小さい冬期では、夏期より深い層までが風の影響を受けると考えられる。このことから、冬期より夏期の方が偏回帰係数の値が大きくなったと考えられる。

次に東京湾内のどの地点で上記のような傾向が見られるのかを偏回帰係数の分布図を作成して調べた。その結果を図-11 (2006 年 8 月)、図-12 (2006 年 12 月) に示す。

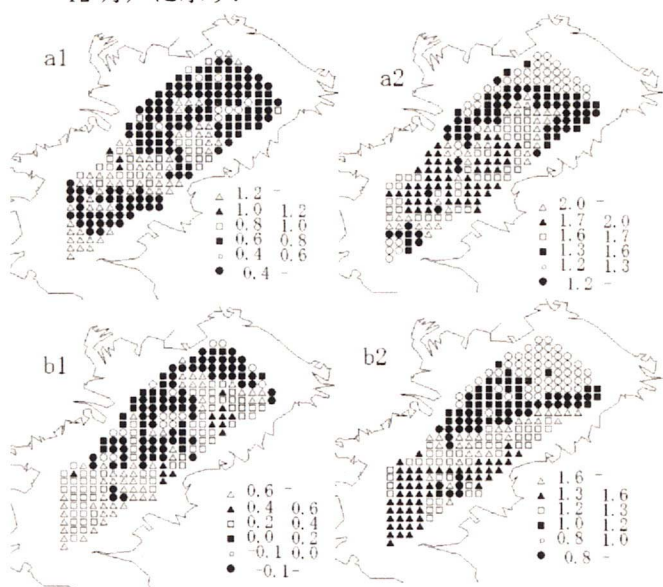


図-11 2006 年 8 月の偏回帰係数の分布図

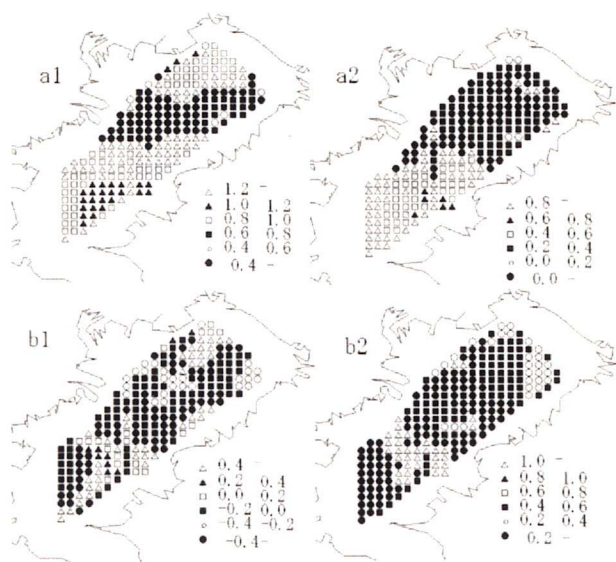


図-12 2006 年 12 月の偏回帰係数の分布図

これらの図で偏回帰係数の値は暖色系の色の方が大きく、冷色系の色の方が小さいことを示している。

図-11、図-12 から千葉県側の海域で偏回帰係数の値が大きくなっていることが分かる。これは、この地域の水深が浅く、浅い海域ほど風の影響を強く受けているためであると考えられる。

5. 結論

HF レーダーでの流れの観測結果が何の外力の影響を受けた流れを測定しているのかを明らかにするために、まず、HF レーダーの観測結果の調和分解を行った。その結果、東京湾では潮流成分は湾口部で大きく、湾奥部で小さくなっている結果が得られた。

次に潮流成分以外の流れを調べるために 25 時間の移動平均を施した。移動平均により潮流成分を取り除いたところ、移動平均値は海上風の傾向とほぼ一致していた。このことから、潮流以外の流れは、風による吹送流が卓越していることが示された。また、東京湾のどの地域で海上風の影響を受けているか調べるために重回帰分析を行った。その結果、東京湾内で水深の浅い千葉県側で海上風の影響が大きいことが示された。また、表層流に及ぼす風の影響が大きいのは、混合期の 12 月よりも躍層期の 8 月の方が大きいことが示された。しかし、今回の解析は、8 月と 12 月の 2 ヶ月間のみの結果であるので、今後は他の月でも解析を行い、更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) (財) 電力中央研究所 電中研ニュース 422
<http://criepi.denken.or.jp/jp/serc/criepi/index.html>
- 2) 徳田正幸, 村上和男, 渥美泰彦, 永松宏: VHF 海洋レーダの開発と流れ観測, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 1276-1280, 1997
- 3) 東京湾環境情報センター
<http://www.tbeic.go.jp/>
- 4) 堀川明: 共立出版株式会社, ランダム変動の解析, pp. 15-17, 2005
- 5) 奥野忠一, 久米均, 芳賀敏郎, 吉澤正: 多変量解析, 日科技連出版社, pp. 31-32 1971
- 6) 村上和男, 森川雅行: 東京湾の長周期流れの特性について, 沿岸海洋研究ノート, 第 25 巻, 第 2 号, pp. 146-155, 1988