

相模湾・城ヶ島沖定点観測ブイ付近の流況解析†

植田義夫*, 峯 正之**, 中田尚宏***, 清水顕太郎***

Surface Current Analysis of Marine Meteorological Data Observed at Mooring Buoy Station off Joga-Shima Island in Sagami Bay.†

Yoshio UEDA*, Masayuki MINE**, Naohiro NAKATA*** and Kentarou SHIMIZU***

Abstract

Marine meteorological data observed at mooring buoy system off Joga-shima island in Sagami Bay were analyzed by BAYTAP-G program to obtain the tidal current harmonic constants and drift current induced by wind. The data were sampled every hour for the period from Jan. 1 to Dec. 31, in 1997. The observed current vector were analyzed in combination with wind vector. Through the above analysis, it has become clear that the wind effect enhances the diurnal components as much as 2 factor for the tidal current harmonic constants, which may arise from the sea-land breeze system predominant in Sagami Bay. The response coefficients of drift current correlated with discrete wind velocities were obtained for several cases by changing lag parameters. Through this analysis, it became clear that the general pattern of drift current was consistent with Ekman spiral system. The present study also made apparent the origin of the sudden enhancement of coastal current velocity (overfalls) in the Sagami Bay. One origin is the approach of Kuroshio branch into the Sagami Bay as already pointed out by several authors, and the other is the augmentation of the tidal current amplitude. The latter phenomenon is newly found and it may be triggered by the approach of the Kuroshio branch to the coastal region.

1. はじめに

相模湾は海陸風系の卓越する海域であることが知られており、このような特徴を有する沿岸域の流況は潮流や海流の影響とともに、風による吹送流の影響を強く受けているものと考えられる。従来の沿岸域の潮流観測では、15昼夜、もしくは32昼夜の流速観測のデータに25時間の移動平均処理をおこない、観測値から移動平均値を差し引いた残差から潮流の調和定数を決めている。しかし、

先に述べたように沿岸域では海流の不規則的変動や風による吹送流の影響も含まれており、潮流の調和定数の算出の際には、潮汐成分とその他の成分の分離をいかに行うかが、正確な調和定数の決定にとって不可欠な課題といえる。また、相模湾の沿岸流の特徴である沿岸急潮現象が黒潮の接岸に伴ってしばしば発生し、沿岸の定置網に被害を及ぼすだけでなく、沿岸の海洋レジャーに係わる海難を誘発する原因にもなっており、海難や流出油などの漂流予測の精度の向上にとっても、沿岸

† Received 1999 December 16th ; Accepted 2000 February 16th.

* 海洋研究室 Ocean Res. Lab., Hydrographic Dept., MSA, Japan

** 第三管区海上保安本部水路部 Hydrographic Dept., 3rd Regional Headquarter, MSA, Japan

*** 神奈川県水産総合研究所 Kanagawa Prefectural Fisheries Res. Inst.

域の急潮現象の解明が重要な課題となっている。

ここでは、相模湾城ヶ島沖の定点観測ブイにより観測された1年間の流れと風のデータをもとに、潮流成分とその他の不規則成分とを分離するため、BAYTAP-Gプログラムによる解析を試みたので、その結果を報告するとともに、解析過程で沿岸急潮現象に関する新たな知見を得ることができたので、その考察を併せて紹介する。

2. 観測データ

2.1 観測システムの概要

今回の解析に用いたデータは、城ヶ島沖に設置されている浮魚礁で観測されたデータである。この浮魚礁は神奈川県水産総合研究所が設置し、1995年3月より観測しているもので、沿岸域の定置網などに被害を及ぼす急潮現象などの予報を行うために利用されている(岩田ほか, 1997)。浮魚礁の設置地点を Fig. 1 にその概要を Table 1 に示した。観測システムは、流向・流速・風向・風速及び水温の観測値が、テレメータにより研究所へ自動伝送される仕組みになっており、このうち、風向、風速は10分間の平均値が毎正時に、流向・流速は1分間の平均値が30秒毎にデジタル記録される。今回の解析に用いたのは1997年1月1日から12月31日までの毎正時の観測データである。

2.2 観測データの概要

Fig. 2 は、1年間にわたり観測された、流れ、風、水温の毎時値の記録である。現在、北向き流速が70cm/sec(1.4ノット)以上の場合に急潮注意報が、また90cm/sec(1.8ノット)以上の場合には、急潮警報が、水産総合研究所から出されることになっ

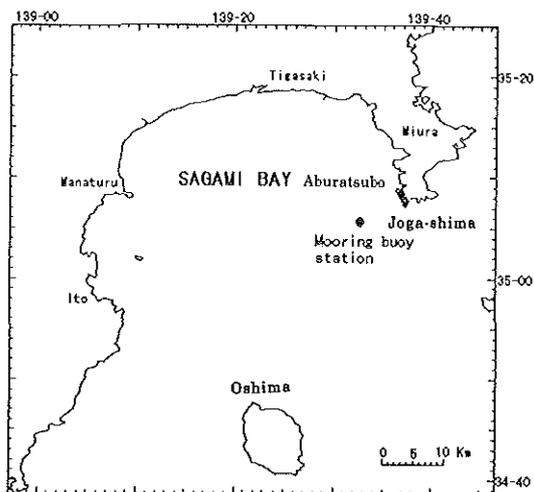


Fig. 1 Location map of mooring buoy station off Joga-shima island.

ている。この図 Fig. 2(a)から1997年では5月下旬と8月の中旬から下旬にかけて、約1.6ノットにも及ぶ急潮が発生したことがわかる。Table 2は1年間の流速及び風速に関する統計値をまとめたものである。東流成分及び北流成分の流速の頻度分布によると、ほぼ95%が、東流成分は流速25cm/sec以下、北流成分は27cm/s以下の値をとり、それ以上の流速をとる頻度は5%であることがわかる。これらの統計値は1996年の観測データをもとに岩田ほか(1997)が求めた値とほぼ一致する。

3. 解析方法と結果

3.1 解析方法の説明

BAYTAP-GとはBAYesian Tidal Analysis Program (Grouping method)の意味で、プログラムは石黒ほか(1984), Tamura et al. (1991)によって開発されたもので、主に地球潮汐等の解

Table 1 General aspect of the mooring buoy system off Joga-shima island in Sagami Bay.

Administration	Kanagawa Prefectural Fisheries Research Institute
Location	about 7.7km west to southwest off Joga-shima island, Latitude : 35°05'36" N, Longitude : 139°32'38"E Water depth is about 750m.
Observation period	Starting from March 10, 1995
Current meter	depth 3.0m below sea surface.
Observation item	Current direction, current velocity, wind direction, wind velocity, water temperature at 3.0m below sea surface.

Surface Current Analysis of Marine Meteorological Data Observed at Mooring Buoy Station off Joga-Shima Island in Sagami Bay.

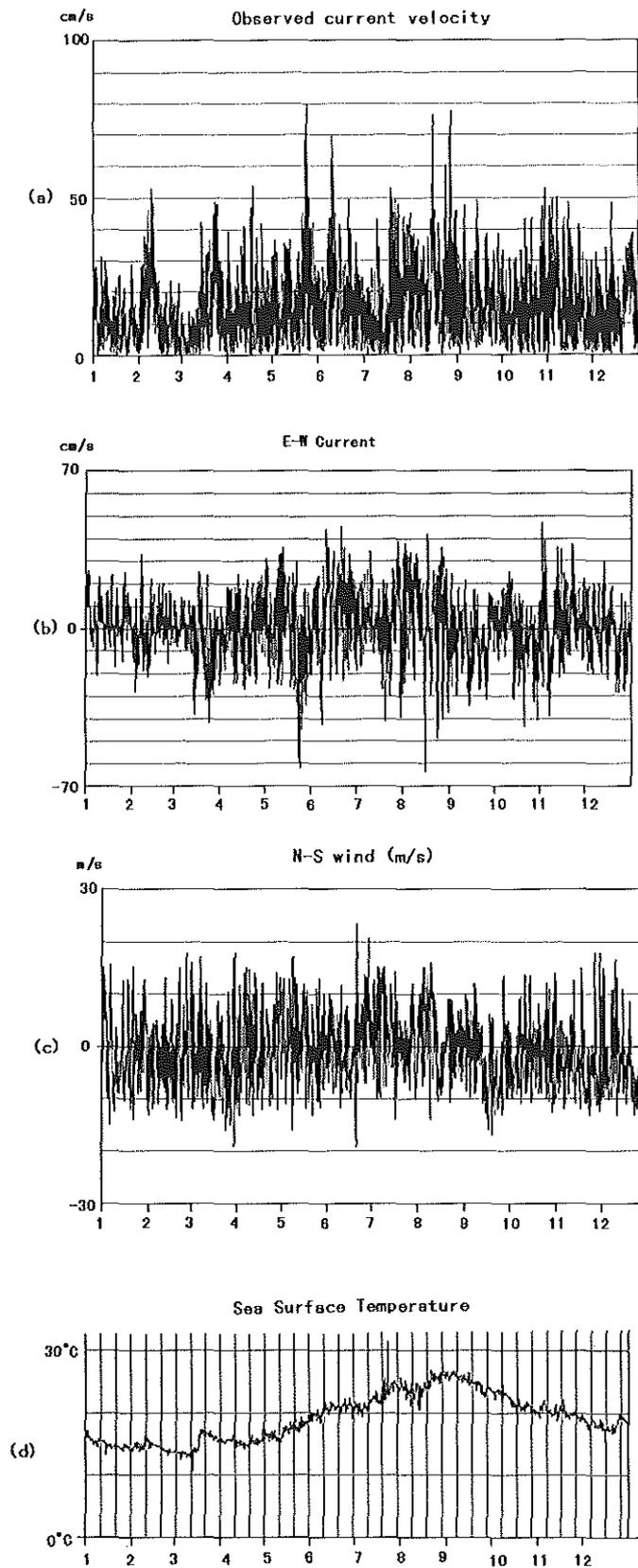


Fig. 2 Marine meteorological hourly data observed at the mooring buoy station from Jan 1 to Dec 31 in 1997.

- (a) Observed current velocity, unit in cm/sec.
- (b) E-W current., unit in cm/sec. Eastward is positive.
- (c) N-S wind, unit in m/sec. Northward is positive.
- (d) Sea surface temperature (°C)

Table 2 Statistics of observed data

	Current magnitude	Eastward current velocity	Northward current velocity	Wind magnitude	Eastward wind velocity	Northward wind velocity
	cm/sec	cm/sec	cm/sec	m/sec	m/sec	m/sec
mean	15.2	0.7	0.5	6.4	-0.4	-0.5
standard deviation	10.3	12.6	6.3	3.8	3.9	6.3
maximum	79.3	47.0	19.3	25.0	18.9	23.3
minimum	0.0	-63.7	-23.3	0.0	-19.9	-19.3

析に用いられる。

本プログラムは、地球潮汐と関連する地学現象の周期特性や、現象間の応答特性を解析するのに有用なプログラムである。例えば、潮流の北向き成分などの観測データ時系列を y_n 、それと併行して観測される風等のデータを x_n とする。このとき、 y_n は次式でモデル化される。

$$y_n = \sum_{m=1}^M (\alpha_m C_{mn} + \beta_m S_{mn}) + \sum_{k=0}^K b_k x_{n-k} + d_n + \epsilon_n \quad (1)$$

上式右辺の第1項は潮流成分、第2項は併行観測量 x の y への応答成分で、ここでは吹送流成分に相当する。第3項はトレンド成分、第4項は残差成分である。式中の、 K は最大ラグ数、 b_k 、 d_n 、 ϵ_n はそれぞれ k 番目の応答係数、 y_n に含まれるトレンド成分と残差を表す。 b_k は、風による吹送流を表す係数で、ここでは吹送流係数と呼ぶことにする。最大ラグ数がゼロの場合は、それぞれの時点の吹送流成分がそれと同時点の風に依存し、過去の風の影響が及ばないとした場合に相当する。

また、例えば最大ラグ数が6の場合には、吹送流は、現在を含め、過去6時間までの、風の毎時値に、吹送流係数の重みを掛け、その積算により与えられることになる。

α_m 、 β_m は調和定数で、振幅と位相要素 a_m 、 ϕ_m を用いれば、 $\alpha_m = a_m \cos \phi_m$ 、 $\beta_m = a_m \sin \phi_m$ となる。

上式において、 m は分潮群の番号、 M は分潮群の総数であり、 C_{mn} 、 S_{mn} は、分潮 m の j グループの理論角速度、振幅、位相を w_{mj}^* 、 a_{mj}^* 、 ϕ_{mj}^* としたとき、以下の式で与えられる理論値である。ここで、和は分潮群 m のなかの分潮番号 j について計算する。

$$C_{mn} = \sum_{j=1}^M a_{mj}^* \cos(w_{mj}^* n + \phi_{mj}^*) \quad (2)$$

$$S_{mn} = \sum_{j=1}^M a_{mj}^* \sin(w_{mj}^* n + \phi_{mj}^*) \quad (3)$$

式(2)、(3)からわかるように、分潮グループ内では、潮汐定数は一定であるとの仮定を設けており、このことが Grouping の意味するところである。

各潮汐定数、応答係数、及びトレンドは次式を最小にする最小2乗法により求められる。

$$J(d) = \sum_{n=1}^N \left\{ y_n - \sum_{m=1}^M (\alpha_m C_{mn} + \beta_m S_{mn}) - \sum_{k=0}^K b_k x_{n-k} - d_n \right\}^2 + \nu^2 \sum_{n=1}^N \{ d_n - 2d_{n-1} + d_{n-2} \}^2 \quad (4)$$

一般的な方法では、上式の第1項のみを最小化するのであるが、BAYTAP-G法ではトレンドそのものを未知数とし、その第二階差の2乗和に係数 ν^2 を掛けた項を付け加えた変数を最小化する。ここで ν^2 は超パラメーターと呼ばれる。 ν^2 が大きいと、トレンドは直線的な変動の少ない量となり、逆に小さいとトレンドは変化にとむ様相を示す。上式(4)の応答係数 b_k の最大ラグ数や超パラメーターの選択には、Akaike (1980) によるベイズ型情報量基準 (ABIC) を最小にするようにパラメーターを選択することが、単に残差を最小にするという従来の最小二乗法よりも、統計的に意味のあることが、理論的に証明されている。

以上が解析方法の概要であるが、併行観測量としては最大3種類までとることができる。今回の解析では、北向きと東向きの風速を併行観測量として組み込んだ。その場合、風による応答成分としての流れベクトルは、風により生じる流れ成分

(吹送流)を意味する。また、解析結果として出力されるトレンド成分は、潮流や吹送流以外の黒潮分岐流などの成分を表現することになる。解析の入力データ数は、最新版では毎時値として3年分のデータ処理が出来る仕様になっているが、今回は1年分のデータを用いて計算処理をおこなった。なを、BAYTAP-Gで出力される遅角の符号の付け方は、水路部の潮汐表の符号とは逆になっており、表には、水路部式の符号で、遅角の符号を示した。

3.2 解析結果

3.2.1 潮流の調和定数

1年間の毎時の東流、北流の各成分について、風の東西、南北成分を併行観測量として解析を行った。また、未知パラメーターである併行観測量のラグ項数については、最小のABIC値を取る項数を用いた。

Fig. 3は、ほぼ1年間に相当する、8520個の東流成分の毎時値の解析結果を示したものである。上から観測値、トレンド成分、潮流成分、風による応答成分(吹送流成分に対応する)、残差成分で、それぞれの標準偏差は、12.6cm/s, 6.9cm/s, 2.7cm/s, 4.9cm/s, 7.8cm/sとなる。Table 3-1には、今回の解析で求めた東流及び北流成分の潮流の調和定数を、またTable 3-2には吹送流係数を示した。Table 3-1に示した結果によると、東流成分では、日周期と半日周期の調和定数の振幅比は1.32となり、日周期成分が卓越することがわかる。これに対し、北流成分は0.61で、逆に1日周期よりも半日周期が卓越することがわかる。ちなみに油壺の潮汐については、同比は0.85の値を示し、半日周期が1日周期よりも大きいのが、卓越するという程ではない(Table 4)。

一方、併行観測量である風を考慮しない解析結果をTable 5に示す。ここではあらかじめ25時間の移動平均を求め、観測値から移動平均値を差し引いた残差を潮流成分として解析した。通常の潮流観測では、風による吹送流は考慮されていないため、潮流の調和解析として報告される値は、ここで示した値に対応するものと考えて良い。さて、

このようにして求めた調和定数の特徴は、東流成分、北流成分ともにK1, S1項の振幅が著しく大きい値を示すことである。また、日周期と半日周期との振幅比は東流成分が2.34、北流成分が1.21の値を示し、吹送流を考慮した場合(風の応答成分を解析に含めた場合)に比べ、約2倍程度大きくなっている。

以上の結果は、沿岸域の潮流解析には、風を考慮する必要があることを強く示唆するものと言える。風の影響がこのようにK1, S1分潮に大きな影響を与えていることは、日周期で変化する海陸風系が気象潮の項として、K1, S1分潮を大きくすることに現れていると考えられる。相模湾は海陸風系が特徴的に現れる海域であることが知られており(島本, 1989)、今回の結果は、このような風系を反映した結果と考えられる。

相模湾で観測されたこのような潮流成分については、潮汐波により生じる外部波としては大きすぎると考えられており、一般的には密度境界層に発生する内部波であるとの見方が多数を占めている(松山, 1988)。今回の観測ブイ付近の水深も700m以上という条件下での観測であり、外部潮汐としては大きすぎる値である。しかし内部潮汐とするには、年間を通じて周期性を有する現象であり、たとえ内部波としても、外部波との共振現象が引き金となって生じているものと推察される。この件については、急潮現象の項3.2.3でより詳しく検討する。

3.2.2 吹送流モデル

風により生ずる吹送流については、過去の風の影響が、現時点の流系にどのような影響を与えるかがひとつの重要な要素となっている。過去の何時間前までの風を考慮しなければならないかを正確に見積もることは、漂流予測の精度を確保する上でも、解明しなければならない重要な課題である。

Table 6は東流成分の1年分の毎時値の解析に際して、吹送流成分を求める最大ラグ数の変化に対する、ABIC値と残差の標準偏差の変化を表したものである。この結果では、標準偏差はラグ

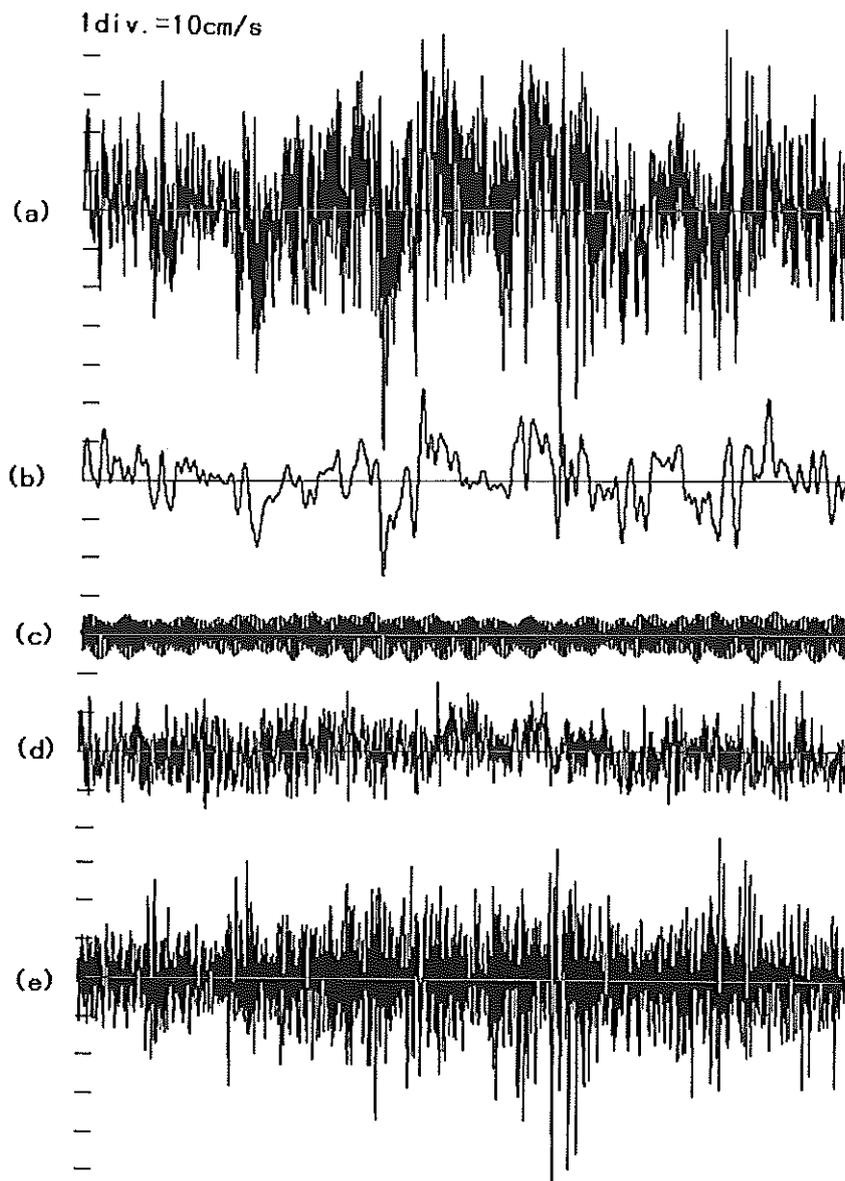


Fig. 3 Example of analyses of eastward current hourly data from Jan, 1 to Dec, 21, in 1997 by BAYTAP-G. Total data number is 8520 for one component.

- (a) Observed eastward current, whose mean value is 0.65 cm/s and standard deviation (sigma) is 12.60cm/s, respectively.
- (b) Trend component of eastward current.
- (c) Tidal component. Sigma is 2.70cm/s.
- (d) Response component (drift current). Sigma is 4.87 cm/s.
- (e) Residual component. Sigma is 7.77cm/s.

*Surface Current Analysis of Marine Meteorological Data Observed at Mooring
Buoy Station off Joga-Shima Island in Sagami Bay.*

Table 3 - 1 Results of analysis by BAYTAP-G for 1 year span date

	E-W CURRENT		N-S CURRENT	
span	1 year		1 year	
LAG	12		8	
ABIC	36705.7		36801.1	
σ	7.9		8.0	
	Harmonic constants		Harmonic constants	
Term	Amp (cm/s)	Phase (deg)	Amp (cm/s)	Phase (deg)
Q1	0.48	-17.9	0.35	-161.9
O1	0.78	24.5	0.53	-116.3
M1	0.48	-138.1	0.21	125.6
P1	1.13	118.4	1.18	38.2
S1K1	2.06	78.1	1.60	-9.8
J1	0.48	-1.4	0.20	145.6
OO1	0.71	139.8	0.35	73.8
2N2	0.36	67.0	0.15	-51.1
N2	0.61	-110.8	0.93	136.2
M2	2.72	-37.1	3.92	-168.6
L2	0.26	-6.2	0.37	-147.5
S2	0.89	-27.5	1.29	-148.3
K2	0.21	91.4	0.60	-6.0
M3	0.19	72.1	0.15	-153.0
Diurnal/Semidiurnal.	1.32		0.61	

Table 3 - 2 Response coefficient of drift current induced by wind

Lag	E-W current		N-S current	
	N-S wind	E-W wind	N-S wind	E-W wind
0	0.22 (0.03)	0.12 (0.04)	0.29 (0.03)	-0.12 (0.04)
1	0.15 (0.03)	0.05 (0.04)	0.16 (0.03)	-0.13 (0.04)
2	0.16 (0.03)	0.02 (0.04)	0.08 (0.03)	-0.09 (0.04)
3	0.14 (0.03)	-0.01 (0.04)	0.01 (0.03)	-0.08 (0.04)
4	0.12 (0.03)	-0.03 (0.04)	-0.02 (0.03)	-0.02 (0.04)
5	0.10 (0.03)	-0.05 (0.04)	-0.08 (0.03)	-0.00 (0.04)
6	0.06 (0.03)	0.00 (0.04)	-0.10 (0.03)	-0.02 (0.04)
7	0.03 (0.03)	-0.06 (0.04)	-0.14 (0.03)	0.00 (0.04)
8	0.01 (0.03)	-0.05 (0.04)	-0.17 (0.03)	0.06 (0.04)
9	-0.03 (0.03)	-0.06 (0.04)		
10	-0.06 (0.03)	-0.01 (0.04)		
11	-0.09 (0.03)	0.03 (0.04)		
12	-0.18 (0.03)	0.03 (0.04)		

Figures in parenthesis mean probable errors.

数の増加に伴い、減少傾向を示すが、その減少率はラグ数3以上で、急激に減少する。また ABIC 値はラグ数が12の時に最小値をとるが、それ以上では逆に増加傾向を示す。

一方、北流成分では、ラグ数が8の場合に ABIC 値は最小値をとる。東流、北流いずれの解析でも、ラグ数を多くすれば標準偏差は減少し、観測データそのものの近似では、より精度が向上することがわかるが、ABIC 値から判断する限り、東流成分はラグ12、北流成分ではラグ8の吹送流モデルが、統計的には信頼度の高い結果といえる。

しかし、この結果は実は、解析期間の長さによって異なるというやっかいな問題を抱えていることも今回の解析で明らかになった。ABIC 値はデータ数、標準偏差、解析パラメーターの数で決まるが、例えば32日間の毎時値(データ数768)を用いた場合、解析パラメーター数の増加が ABIC に大

きい影響を与え、ラグ数はゼロもしくは1の時に ABIC 値が最小値をとる。ちなみに約3ヶ月の毎時値(データ数2160)ではラグ数が2~3で ABIC 値が最小値をとることとなる。

以上のことから、ABIC 値の最小値を示す際の吹送流モデルが必ずしも物理的に最良のモデルとは判断できないことがわかる。このことから、統計的理論から提案された ABIC 値をもって、モデルの良否を判断するのは難しく、物理的意味や現実的制約等を考慮し、標準偏差の値を近似精度の基準として利用することが必要であると考えられる。

さて、今回の解析で求められた吹送流係数について考察すると、

Table 4 Main tidal harmonic constants at Aburatsubo tidal station near the mooring buoy

Term	Amp(cm/s)	Phase(deg)
O1	18.2	158.2
P1	7.6	174.5
K1	23.1	176.3
N2	5.7	138.8
M2	36.0	145.8
S2	16.8	173.2
K2	4.7	168.2
Diurnal/Semidiurnal	0.85	

Table 6 Characteristics of ABIC values and standard deviation(σ) of residuals for eastward current analysis by BAYTAP-G

Lag	ABIC(-36700)	σ (cm/s)
0	476.7	8.264
1	295.43	8.166
2	180.08	8.100
3	122.36	8.063
4	103.45	8.044
6	109.62	8.026
9	66.36	7.975
11	20.28	7.933
12	5.73	7.916
13	6.71	7.906
15	28.21	7.896
18	49.37	7.875

Table 5 Results of one year analysis neglecting the wind effects on surface current. 25 hours running mean values are deleted from raw current data and then analyzed.

Term	E-W CURRENT		N-S CURRENT	
	Amp(cm/s)	Phase(deg)	Amp(cm/s)	Phase(deg)
O1	1.10	18.8	0.62	-103.8
P1	1.50	128.4	1.46	49.6
S1	4.80	-45.0	3.62	-123.6
K1	2.01	81.0	1.56	-5.8
N2	0.62	-109.9	0.95	138.3
M2	2.66	-35.3	3.77	-168.2
S2	0.74	-30.1	1.28	-158.4
Diurnal/Semidiurnal	2.34		1.21	

*Surface Current Analysis of Marine Meteorological Data Observed at Mooring
Buoy Station off Joga-Shima Island in Sagami Bay.*

観測地点の緯度 ϕ は約 35° であるから、定常状態におけるエクマン吹送流の海面での流速 u_s は、流速を W として

$$u_s = 0.0126 W / \sqrt{\sin\phi} = 0.0166 W \text{ (m/sec)} \\ = 1.66 W \text{ (cm/sec)} \quad (5)$$

となる。

また、エクマン深度は風速 10 m/s の時、

$$D = 4.3 W / \sqrt{\sin\phi} = 5.68 W = 56.8 \text{ m} \quad (6)$$

観測深度は 3 m であるから、観測された流速 u_d と海面流速の比は

$$u_d/u_s = \exp(-\pi \cdot d/D) = \exp(-0.166) = 0.85 \quad (7)$$

よって、 $u_d = 1.41 W \text{ (cm/sec)}$

となる。

ここで、エクマン平衡が成り立っている場合の吹送流の北向き流速を u_n 、東向き流速を u_e 、北向きの風速を W_n 、東向きの風速を W_e とし、さらに線形法則が成り立つとすると、これらの各成分は、以下の行列で表すことが出来る。

$$\begin{pmatrix} u_n \\ u_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.41\cos\theta & -1.41\sin\theta \\ 1.41\sin\theta & 1.41\cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_n \\ W_e \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここで θ は風の方向に対するエクマン平衡流の偏角で、 45° である。よって上式は次式となる。

$$\begin{pmatrix} u_n \\ u_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.00 & -1.00 \\ 1.00 & 1.00 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_n \\ W_e \end{pmatrix} \quad (9)$$

この式は、風による吹送流が同時刻の風のみによるとした応答係数の最大ラグ数がゼロの解析結果に対応する。

Table 7 は最大ラグ数を変化させた場合の吹送流係数をまとめたもので図中には標準偏差 (σ) も示した。この表のラグ数ゼロの結果を上式の形式で表すと

$$\begin{pmatrix} u_n \\ u_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.376 & -0.374 \\ 0.617 & 0.220 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_n \\ W_e \end{pmatrix} \quad (10)$$

Table 7 Response coefficients for different lag parameters

lag		E-W current		N-S current	
max		N-S wind	E-W wind	N-S wind	E-W wind
0		0.617 (0.020) $\sigma=8.26$	0.220 (0.030)	0.376 (0.020) $\sigma=8.28$	-0.374 (0.030)
1	0	0.306 (0.029)	0.142 (0.037)	0.349 (0.030)	-0.194 (0.037)
	1	0.419 (0.029) $\sigma=8.17$	0.043 (0.037)	0.070 (0.030) $\sigma=8.24$	-0.321 (0.037)
2	0	0.263 (0.029)	0.128 (0.037)	0.359 (0.030)	-0.153 (0.037)
	1	0.201 (0.035)	0.038 (0.041)	0.149 (0.035)	-0.195 (0.041)
	2	0.346 (0.029) $\sigma=8.10$	-0.043 (0.037)	-0.097 (0.030) $\sigma=8.22$	-0.236 (0.037)
3	0	0.265 (0.029)	0.118 (0.037)	0.359 (0.030)	-0.141 (0.037)
	1	0.168 (0.035)	0.045 (0.041)	0.172 (0.035)	-0.163 (0.042)
	2	0.195 (0.035)	-0.005 (0.041)	0.047 (0.035)	-0.136 (0.042)
	3	0.249 (0.029) $\sigma=8.06$	-0.112 (0.037)	-0.206 (0.030) $\sigma=8.19$	-0.172 (0.037)
6	0	0.270 (0.029)	0.111 (0.037)	0.310 (0.029)	-0.130 (0.037)
	1	0.164 (0.035)	0.043 (0.041)	0.168 (0.035)	-0.140 (0.041)
	2	0.171 (0.035)	0.012 (0.041)	0.089 (0.035)	-0.097 (0.041)
	3	0.156 (0.035)	-0.025 (0.041)	0.016 (0.035)	-0.080 (0.041)
	4	0.122 (0.035)	-0.049 (0.041)	-0.029 (0.035)	-0.031 (0.041)
	5	0.095 (0.035)	-0.103 (0.041)	-0.120 (0.035)	-0.015 (0.041)
	6	-0.028 (0.029) $\sigma=8.03$	-0.126 (0.036)	-0.282 (0.029) $\sigma=8.05$	-0.028 (0.037)

となる。

一般的に応答係数の値そのものは減少しているが、もともとエクマン平衡が、今回の観測点のような沿岸域では完全に成立していないことを考えれば当然の結果であろう。この係数からは、東流成分は東向きの風 (W_e) よりもむしろ北向きの風 (W_n) の影響を強く受けることがわかる。一方、北流成分については、同時刻の北向きの風の影響が正の相関を示し、東向きの風は負の相関を示すことがわかる。北流成分については、風の東向き成分の係数がマイナスの符号を有しており、エクマン平衡モデルとよく一致する。ラグ数が1, 2, 3, 6の場合についての結果を見ると、東流、北

流成分とも、同一の向きに沿った吹送係数が最も大きく、時間経過とともに、逆相関を示す。

Fig. 4 は、吹送流の北向き成分について、ラグ数による違いを示したものである。ラグ数を変えても吹送流の変化は、ほぼ同じ様相を示すが、各ピーク値については、ラグ数の採り方により異なることがわかる。例えば図中、6月20日から21日にかけては、ラグ数ゼロでは吹送流の変動幅が13.4cm/sec でしか再現できないが、ラグ数6では24.1cm/sec の大きさまで再現することができる。一方、ラグ数12と6の場合との比較では、ラグ数を大きくすることにより、全体的に、変化の振幅は増大するが、瞬間的な個々のピーク値についてはむしろ

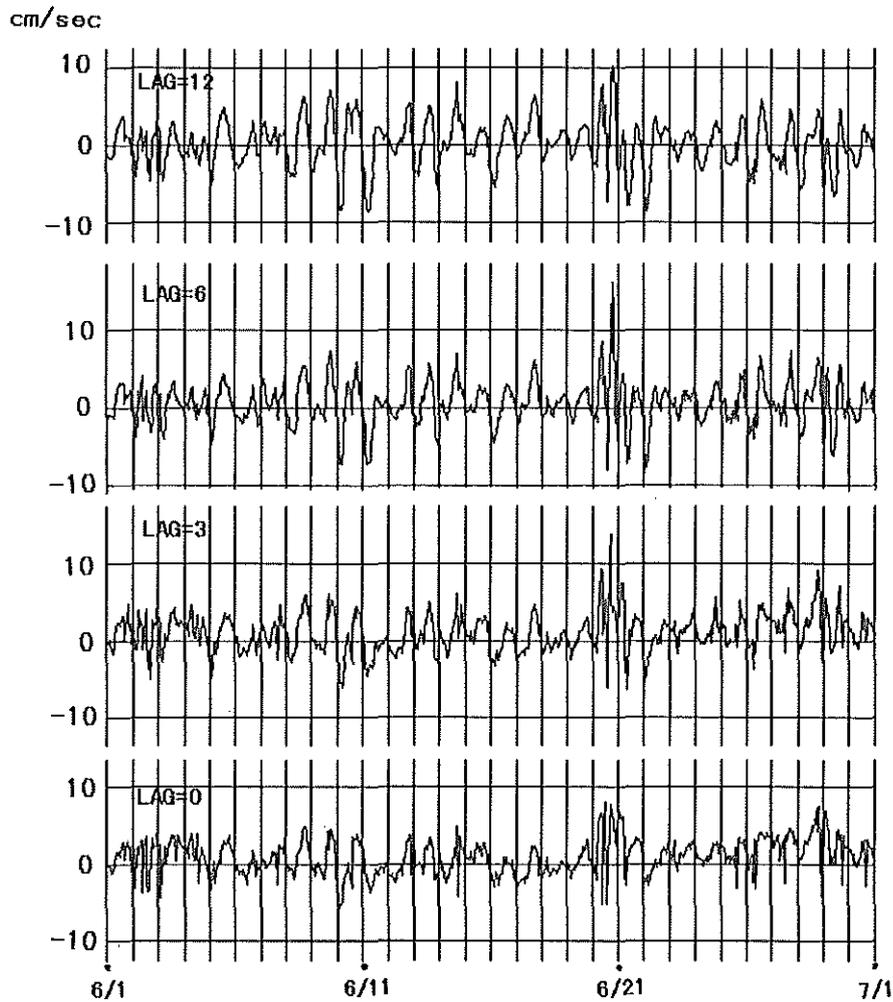


Fig. 4 Variation of calculated northward drift current for the period from June 1 to June 30, 1997 for several lag parameters. One division in vertical scale is 10 cm/sec.

Standard deviation for each lag parameter is as follows ; 2.97cm/s for lag=12, 2.75cm/s for lag=6, 2.44cm/s for lag=3 and 2.24cm/s for lag=0.

減少することがわかる。このようなことから、瞬間的な変化の極値を把えるためには、ラグ数を6以上にしてもそれほど大きな効果はないと言える。

3.2.3 相模湾の急潮現象

相模湾ではかねてより、黒潮の接近や台風の通過に伴って沿岸域を反時計回りに流れる急潮現象が発生することが知られている(宇田, 1953; 岩田ほか, 1998)。

Fig. 2に示した流速変化図では、1997年5月下旬、6月上旬、8月中下旬に急潮現象が生じたことがわかる。ここに示した各急潮期間の海洋速報(水路部発行)にも、黒潮の接近に伴う分岐流が相模湾に流入していたことが示されている。これらの急潮期間のデータを拡大表示したものがFig. 5である。5月では23日と24日に、6月は9日午後、8月は15日午後が発生していることがわかる。これらの図から、急潮には2つの現象が関係しあって生じていることがわかる。一つは、5月や6月の急潮のように半日周期の潮流成分の振幅が異常に増幅される現象であり、もう一つは、沿岸流のトレンド成分が増加する現象である。実際には、二つの現象が同時に発生し急潮を引き起こすこととなる。5月23日や6月9日の急潮は、これら二つの現象が重なって発生した例である。一方、8月15日の急潮は、半日周期の潮流の振幅はそれ程大きくないのに、トレンド成分が異常に増加して発生したものである。以上の急潮現象に見られるトレンド成分の増加は、宇田ほか(1953)によりすでに述べられているが、潮流成分の振幅の増加現象については、今まで報告された事例はない。

さらに、急潮とまでは言えないが、1日周期の潮流成分が増幅されて生じる速い潮流が発生していることもわかる(例えば、5月9日から12日、8月28, 29日等)。

上に述べた事実をより定量的に評価するため、1年間の潮流を32日間ごとに解析し、その間の調和定数の変化を調べた。東流成分の解析結果をFig. 6に示した。この図にも明らかなように、調和

定数は日周期成分、半日周期成分ともに月毎に激しい変動を描いている。このうち、P1, K1, S1の合成分潮については海陸風系が卓越する4月から5月にピーク値をとり、季節風が卓越する冬季には、その振幅項が減少することがわかる。半日周期成分については、季節的变化は、日周期成分ほど顕著ではないが、急潮が発生した5月には調和定数の振幅が増加したことが認められる。Table 8は1996年と1997年の観測点付近の水温躍層深度の季節変動をまとめたものである。躍層の深度は、一般的に知られている傾向に一致しており、冬季には深く、夏季に浅くなっている。Fig. 6との比較では、躍層深度の変化と調和定数の振幅変化との間に、必ずしも良い相関が認められないが、これについては、水温躍層深度の観測値そのものが、少ないため、比較にまで至らないのが実状である。

Fig. 7は、Fig. 3に示した東流成分の解析結果について、その一部分の5月後半の範囲を拡大表示したものである。図Fig. 7(a)の上段から、トレンドを除去した東流成分、潮流成分と吹送流成分の合成流、潮流成分、吹送流成分をそれぞれ表している。なを、潮流成分については3倍に拡大したものを表示している。潮流成分の振幅は6~7 cm/sの値で、これだけでは、実際の観測値を説明することは不可能である。吹送流成分は潮流成分よりも振幅は大きい、これらの合成流だけでは、やはり観測値を説明することは出来ない。しかし、本図の計算値と観測値の比較からは、急潮現象の解明に係わる重要な事実を指摘することができる。5月21日、22日では、吹送流の日周期成分と潮流の日周期成分の位相が同期していることが、図から認められる。このような同期した振動現象において、その各成分の単純和に比べ、観測値の振幅は2倍程度大きくなっている。このような現象は、二つの現象間で、共振現象が生じたためと推察される。

Fig. 7(b)には、吹送流成分と北向き・東向きの風速の変化を示したが、北向きの風は、日周期変化が顕著であることがわかる。このような日周期変化を示す風により、同じく、日周期成分が卓越し

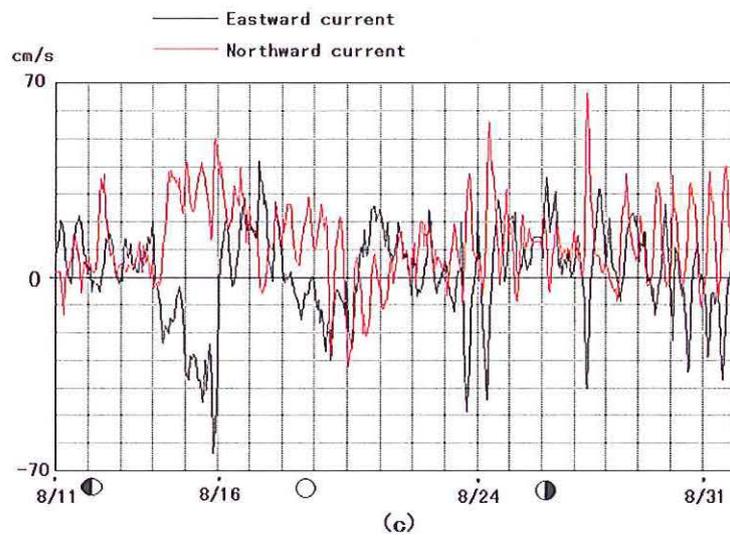
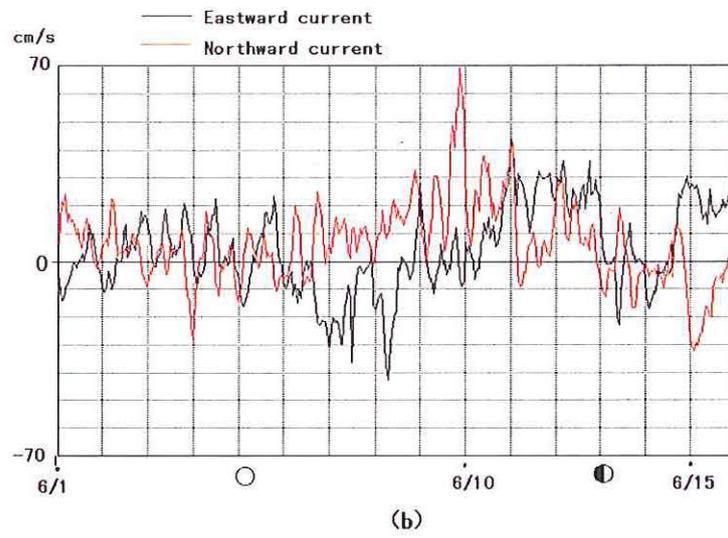
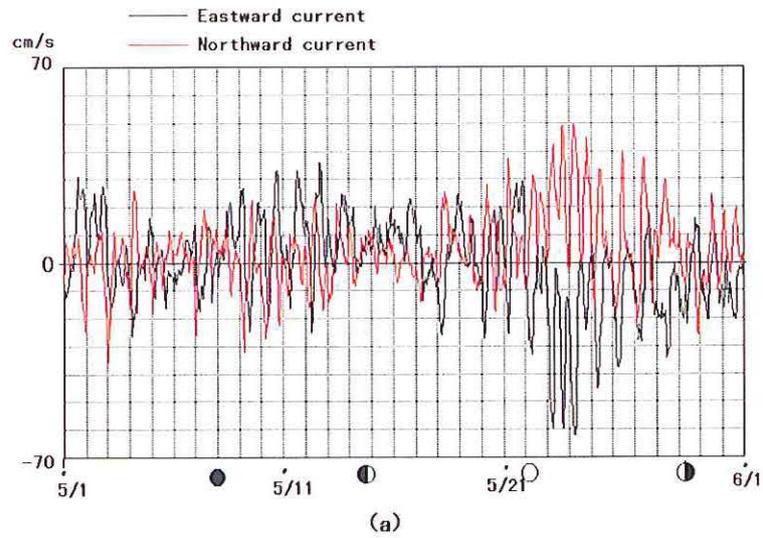
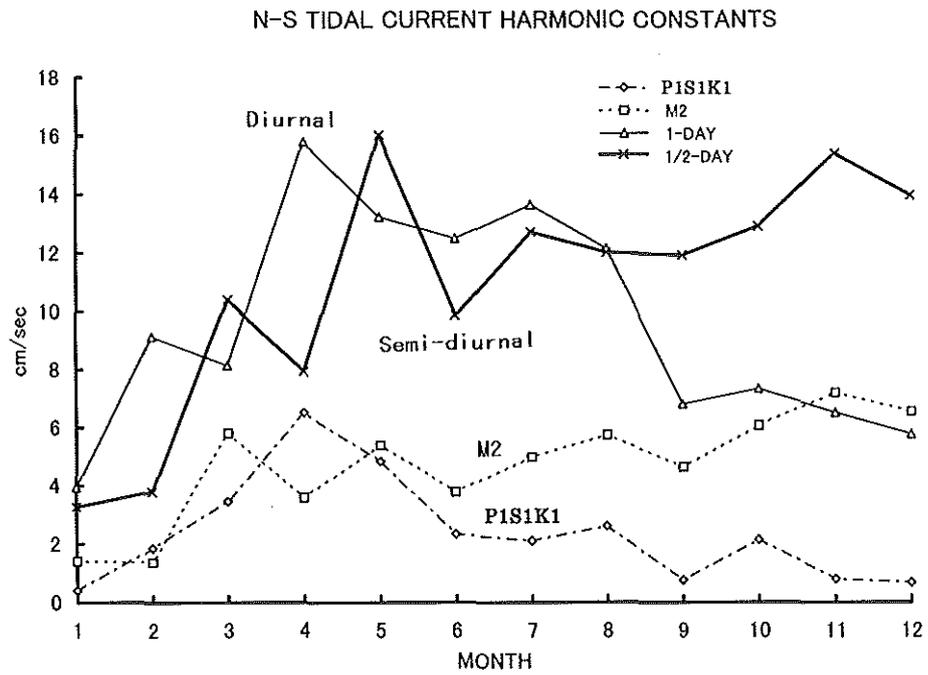
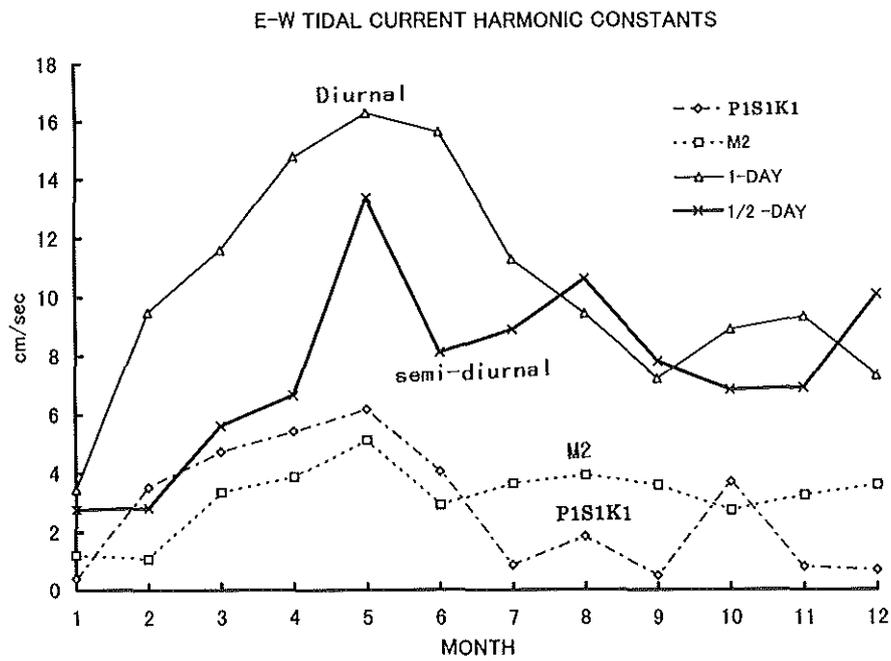


Fig.5 Records of currents on overfalls at the mooring station off Joga-shima island in Sagami Bay. Observed moon's shape are also shown below the x-axis.

*Surface Current Analysis of Marine Meteorological Data Observed at Mooring
Buoy Station off Joga-Shima Island in Sagami Bay.*



(a)



(b)

Fig. 6 Variation of tidal current harmonic constants.
(a) Harmonic constants of northward tidal current.
(b) Harmonic constants of eastward tidal current.

Table 8 Variation of thermocline depth near the mooring buoy

year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1996	104 m		117 m		18 m		7 m		9 m			
1997	78 m		132 m				11 m				63 m	

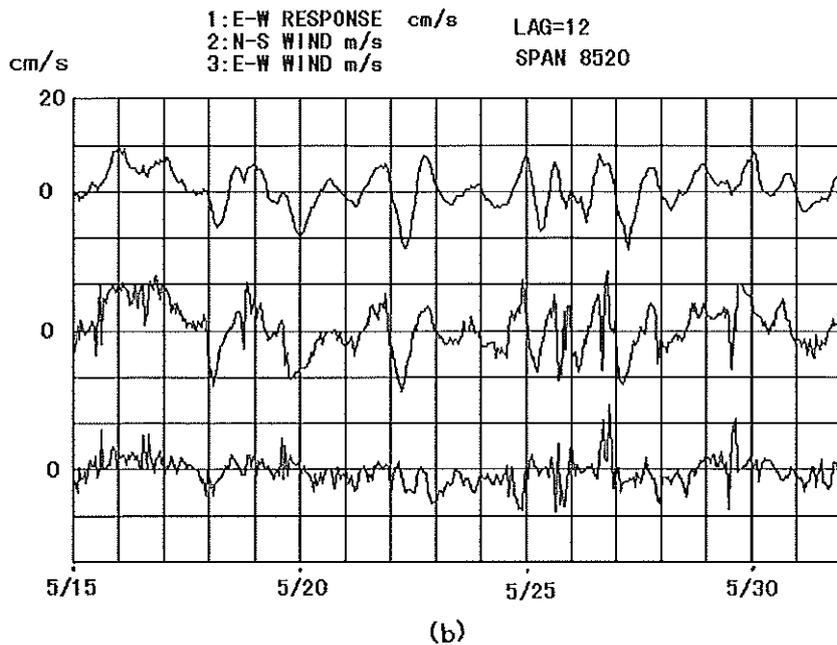
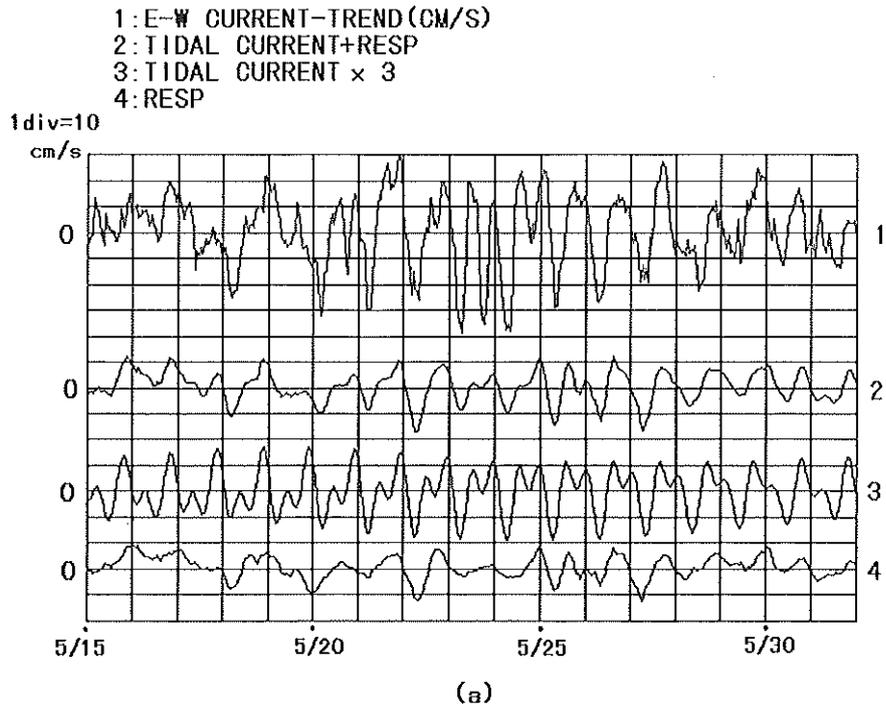


Fig. 7 Characteristic features of eastward current on overfalls. About one year ranging eastward current data were analyzed by BAYTAP-G under maximum lag parameter of 12.

(a) Magnified scope of the results shown in Fig.3 for the period from May, 15 to May 31, 1997.

- 1 : trend removed eastward current
- 2 : summation of tidal and drift components.
- 3 : three times of tidal component.
- 4 : response component (drift current).

(b) Response component (drift current) and related wind velocity.

- 1 : eastward response current (drift current) calculated from response coefficients.
- 2 : northward wind.
- 3 : eastward wind.

た吹送流が誘起されるものと考えられる。そして、誘起された吹送流と潮流成分が共振現象でさらに増幅したと推察されるのである。一方、23日の場合では、吹送流の半日周潮成分の振幅が潮流成分に比べ著しく増幅されていることがわかる。しかしこの場合でも、潮流の半日周期成分と同期して発生していることがわかる。この事実は、急潮の子報に道を開く可能性を示唆するものと考えられる。

以上述べたように、相模湾の急潮現象は、黒潮分岐流の接岸に伴って生じるトレンド成分の増加と、潮流成分の振幅の増幅現象が重なって生じるものであることが言える。潮流成分の振幅の増加の原因としては内部波とする考えもあるが、その場合には現象は不規則に生じることが予想され、潮流成分とほぼ同期する周期的現象を説明することは困難である。

急潮時に生じる潮流の振幅の増加現象の原因としては、日周潮の場合に見られる海陸風による吹送流との共振現象が一つの原因と考えられ、一方、半日周潮の潮流成分の振幅の増加については、このような現象が黒潮分岐流が強まった時期に発生していることから、密度境界層が浅くなり、外部波である潮汐波に関連する有効水深が浅くなり、潮流成分が増幅された可能性が考えられる。いずれにしても、これらの機構の解明には、表層流の観測とともに、観測点付近の密度躍層の深度の変化と沿岸流の鉛直シアの観測データが不可欠であり、それらの観測結果が大いに待たれるところである。

4. 結 論

- (1) 相模湾、城ヶ島沖の定点観測ブイでの1997年の1年分の流向・流速及び風の連続観測データを用いて、潮流の東流及び北流成分の調和定数をBAYTAP-Gの方法により決定した。
- (2) 相模湾のように海陸風系が顕著に現れる海域では、風の影響を考慮する場合としない場合では、潮流調和定数の日周潮の係数に2倍近くの差が生じることがわかった。風の影響を考慮し

ない場合には、海陸風系による吹送流成分が日周潮成分に含まれることになり、この分、日周潮の調和定数が増加するものと考えられる。

- (3) BAYTAP-Gで求めた城ヶ島沖での吹送流係数は、エクマン平衡のモデルにより定性的にはよく説明できることが確かめられた。また、ラグ数ゼロの場合から求めた吹送流係数の大きさは風速の単位をm/s、流速の単位をcm/sとした場合0.2から0.6となり、平衡流の場合にくらべ3割から6割程度の値となることが確かめられた。
- (4) 相模湾の急潮現象の原因は、①黒潮分岐流による沿岸流のトレンド成分の増加と、②潮流成分が吹送流と共振するために生じる潮流の振幅の増幅作用、が重なって生じると推察される。

謝 辞

BAYTAP-Gプログラムの利用に際し、有益な情報を提供していただいた、国立天文台 田村良明氏に感謝いたします。また、海上保安大学校石井春雄氏からは、貴重なコメントをいただいた、記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- Akaike, H.: Likelihood and the Bayes procedure, Bayesian Statistics. Eds. J.M. Bernardo, M. M. DeGroot, D. V. Lindley and A. F. M. Smith, University Press, Valencia, Spain, 143-166, (1980).
- 岩田静夫・渡部 勳・石戸谷博範・清水顕太郎：城ヶ島沖ブイにおける表層流の特徴，神水研研報，2，7-12，(1997)
- 岩田静夫・石戸谷博範・清水顕太郎・芝田厚：急潮予報と海洋情報，1998年度関東東海ブロック水産海洋連絡会資料，(1998)
- 石黒真木夫・佐藤忠弘・田村良明・大江昌嗣：地球潮汐データ解析 プログラム BAYTAP の紹介，統計数理研究所彙報，32，71-85，(1984).
- 松山優治：駿河湾及び相模湾の循環流と潮流，沿

- 岸海洋研究ノート, 26, 21-32, (1998).
- 小田卷 実: 海底環境の一つとしての相模湾の
海流, 月刊海洋, 23, 418-423, (1991).
- 島本高志: 関東地方南西部の海陸風について, 気
象研究会誌(東京管区), 22, 271, (1989).
- Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe and M. Ishiguro :
A procedure for tidal analysis with a
Bayesian information criterion, Geo-
physical Journal International, 104,
507-516, (1991).
- 宇田道隆: 相模湾の急潮とその予知について (第
1報), 日本海洋学会誌, 9, 1-8, (1953).