

火ノ山下潮流信号所における潮流予報法の改良[†]

佐藤 敏*

Improvement on Tidal Current Prediction at the Hinoyamashita[†] Tidal Stream Signal Station

Satoshi SATO*

abstract

The Hinoyamashita Tidal Stream Signal Station has been predicting the next day's tidal current at Hayatomo Seto in the Kanmon Strait, to provide vessels with precise information of the tidal current. However, the prediction is not so accurate, because the present method of the prediction was developed for an old computer of very slow cpu and very small memory. In this paper, a new method of prediction is developed, which is improvement on the present one. And I present it is remarkably superior to the present one.

1. はじめに

響灘と周防灘を結ぶ船舶航行の要衝である関門海峡早鞆瀬戸では、最強時には10knot程度に達する非常に強い潮流が発生し、航行の難所となっている。航行の安全のため、港則法施行規則第44条の3項には「潮流をさかのぼり早鞆瀬戸を航行する汽船は、潮流の速度を超えて3ノット以上の速度を保つこと」と規定されており、潮流の現況及び予報の情報提供が求められている。このため、水路部では潮汐表により、早鞆瀬戸の潮流予報を行っており、その歴史は大正6年に実施された浮標追跡と潮汐観測以来、約80年の長きに亘っている。また、火ノ山下潮流信号所では、早鞆瀬戸の海底に ADCP を設置して潮流をリアルタイムで監視し、潮流の予報値の補正を行いながら、潮流の現況値と以後の傾向（流れが強まるか弱まるかの傾向）を提供している。ただし、ADCPは Fig. 1 に示すように航路の中央部ではなく、航路から外れた岸よりに設置されているため、潮流の値は最

強流地点に換算した係数（江上・井上，1996）を乗じて提供されている。

火ノ山下潮流信号所のシステムにおいても、潮流情報の提供を行うのに潮流がどのように変化していくかを把握している必要があるため、潮流予報の計算を行っているが、この予報計算は潮汐表とは異なる方法で実施されている。潮汐表では、過去において一定の期間実施された関門海峡の両端の潮汐観測データから求められた潮汐の調和定数（60分潮：分潮の種類は海上保安庁水路部（1993）に示されている）により海峡の両端の水位差を推算し、それに基づき、潮流を予報しているのに対し、火ノ山下潮流信号所のシステムではリアルタイムに潮流が得られるので、そのデータを利用して、順次、潮流の調和定数を改訂しながら予報を行っている。つまり、その方法は潮流のリアルタイム予報（小田巻，1983）に先鞭をつけたものであるが、システムの構築時には、計算を実施するのに十分なメモリー容量のある計算機が安価ではなかったため、予報精度に関してはやや

[†] Received 1996 December 20th ; accepted 1997 February 13th.

* 海上保安庁水路部海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Hydrographic Department, Maritime Safety Agency.

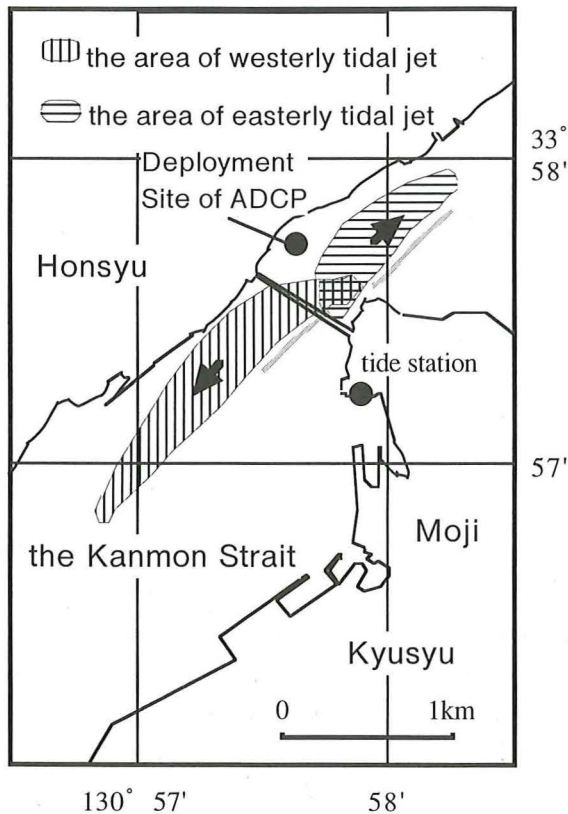


Fig. 1 Deployment site of ADCP and the areas of tidal jet in the Kanmon Strait.

不十分な予報システムが構築せざるを得なかった。したがって、計算機の機能が当時比べて飛躍的に向上した現在、システムの改良が求められている。

以下では、火ノ山下潮流信号所 ADCP データの解析を行い、潮流予報方法の改良について検討を行う。

2. 火ノ山下潮流信号所 ADCP で観測される潮流の特徴

火ノ山下潮流信号所の ADCP のデータは潮流予報に活用するために一定の期間が経つと消去されるようになってきているので、磁気媒体にデータは記録されていない。このため、ラインプリンタ用紙に印字されている記録を第七管区海上保安本部水路部により1994年1年分のデータ（サンプリング間隔15分）を入力していただき、潮流データの解析を行った。

1994年1年分の約35,000個の全データを Fig. 2

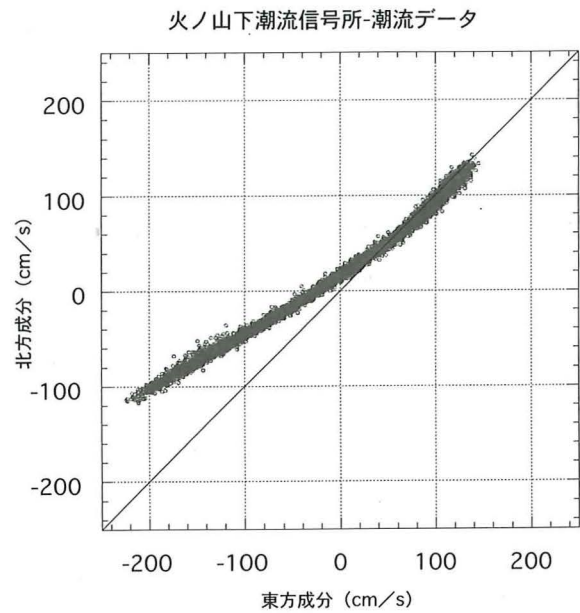


Fig. 2 Scatter diagram of the ADCP data of 1994.

に示した。図から明らかなように、火ノ山下潮流信号所の ADCP 設置場所においては東流時と西流時の流向が180度反対の方向になるのではなく、東流時には45度の方向に流れるのに対して、西流時には247度を中心とする方向に向かい、20~25度ずれている。また憩流時の流れにも特徴がある。東流から西流に転じる時も、逆に西流から東流に転じる時も、弱いながらも岸に向かう流向を示しながら転じており、航路の中央に向かう方向の流向は現われない。

流れの強さについては西流が東流に比べて大きくなっている。流向が35~55度のものを東流とし、237~257度の流れを西流として、それに当てはまる1994年の全データを単純平均して比較すると、西流と東流の大きさの比は年平均で1.15となる。上にも記したように火ノ山下潮流信号所 ADCP は航路から外れた岸よりの設置されているため、最強流地点の値に換算している。関門海峡では航路の掘り下げ工事が続けられており、流れが変化するため、第七管区海上保安本部水路部は測量船「はやとも」で観測を行い、年々、その換算値を更新しているが、1994年当時の換算値は、東流が2.0倍、西流が1.7倍であるので、最強流域での流速値は東流も西流も同程度であると考えられる。

関門海峡の潮流は、「小潮期(特に春秋及び強

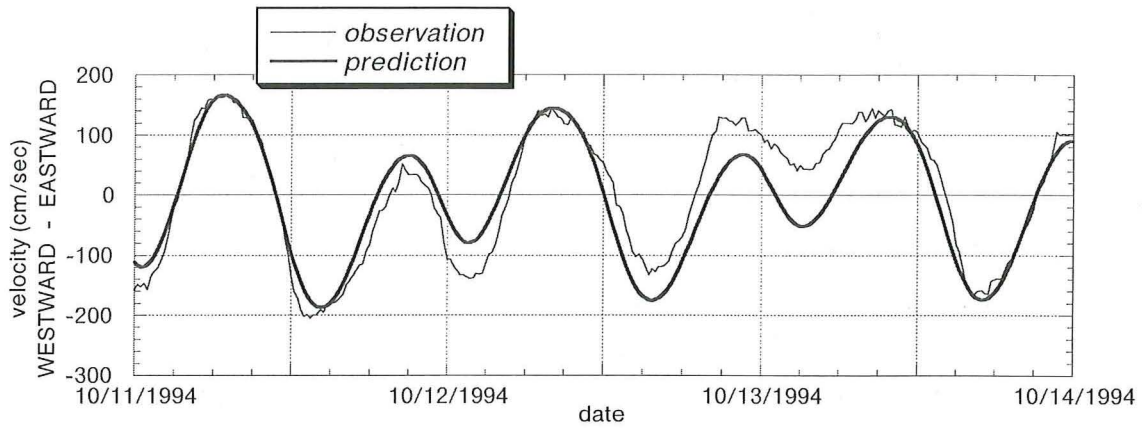


Fig. 3 Time variations of the ADCP data and the predicted tidal current from Oct. 11th to 13th, 1994.

い北～西風が連吹したときの冬季)には、1日1回の西流と10数時間も続く1日1回の東流との流況が2～3日間にわたることがある」と海図に記載されているような現象が起こる。また、逆に1日1回の東流と10数時間も続く西流が生じることもある。これらの現象のうち、潮汐表において予報されるものもあるが、気象の影響により生じる場合は、潮汐表において予報することは不可能である。Fig. 3は1994年10月11日から13日までの火ノ山下潮流信号所 ADCP による45度方向の流れの時系列変化と予報値を示したものである。なお、この予報値は、後述するように1994年1年分のデータから得られた60分潮の調和定数から推算したものである。この時、台風29号は東シナ海を通

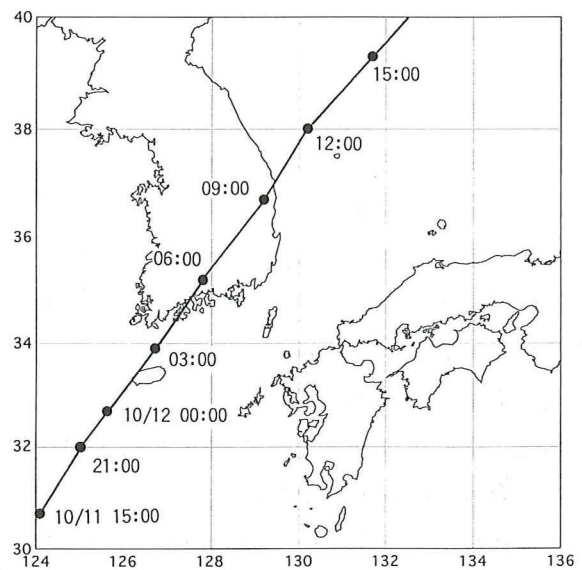


Fig. 4 The path of the typhoon.

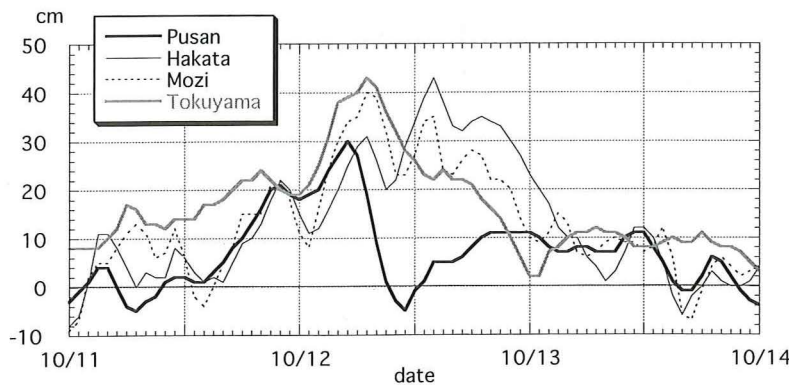
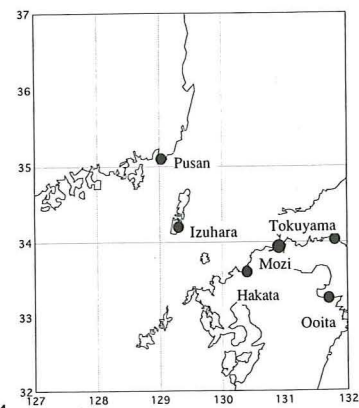


Fig. 5 Differences between observed sea levels and predicted sea levels at 4 tide stations, Pusan, Hakata, Moji, and Tokuyama.



過して、10月12日の午前中に朝鮮半島西岸に上陸、その後、温帯低気圧になり日本海を北東に進んだ (Fig. 4). Fig. 3 の潮流の変化と台風29号の経路とを比較すると、朝鮮半島に上陸して関門海峡に最接近した12日の午前までの台風が近づいてくる間は、流れは推算値に比べて西流になる方向にずれ、その後、台風が離れていくと、流れは東流の方向にずれ、12日の夜から約20時間東流が続く。このような流れは台風の通過に伴う気象の影響により生じているものである。

Fig. 5 に、門司、博多、釜山、徳山の4ヵ所の驗潮所の水位の推算値からの偏差(実測値-推算値)を示した。釜山では台風が接近している間は徐々に偏差が大きくなり、台風が最接近した時にそのピークとなるが、台風が離れていくとすぐに偏差は小さくなる。一方、対岸の博多では、台風が接近している間に偏差が大きくなるのは釜山と同様であるが、台風通過後も偏差は大きくなり、最接近の数時間後に偏差はピークとなる。瀬戸内海の徳山では10月1ヵ月間の偏差の平均が9 cmを超え、実測値が推算値よりも高くなっていた。関門海峡を挟む博多と徳山との潮位偏差の差を見ると、台風通過前は徳山の偏差が大きいが、偏差の差は10月1ヵ月間の偏差の差の平均値程度であり、海峡両端の平均水面の高さの差はあまりないと考えられるが、台風通過後は博多の偏差が大きく、日本海側の水位が高くなり、その傾向が翌日まで継続する。Fig. 6 には、下関と巖原の風速と巖原の気圧の時系列変化を示す。風速の北方成分、東方成分は流れと同様に吹きさる方向で示しており、正の値がそれぞれ、南風、西風となる。下関では台風通過前は南東風が徐々に強くなり、通過すると南西風になる。

これらの水位偏差と風の時間変化から、関門海峡の潮流の変化は以下のようにして起こったと考えられる。台風が近づいて来るときは、台風の通過する日本海側が瀬戸内海に比べて気圧が低くなるとともに、東風により周防灘側の水位が上昇して、周防灘から響灘に流れる西流になる。最接近後は気圧差は解消されるが、台風通過後の西風に

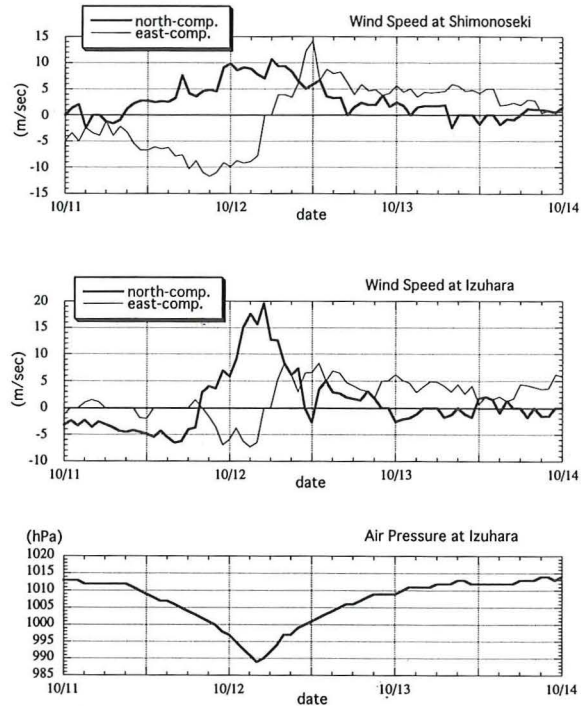


Fig. 6 Time variations of wind speed at Shimonoseki and Izuhara, and air pressure at Izuhara.

より九州北岸の水位は上昇し、関門海峡の両端では水位差が形成されて東流になる。このように関門海峡の流れは気圧や風の影響を大きく受けているのである。

3. 予報方法の改良と現用方法との比較

火ノ山下潮流信号所では ADCP 設置当時から、ADCP で得られた過去15日間の北方および東方成分の流速毎時データ各360個により調和分解を行い、その調和定数により1日間の予報を行っている。調和定数が算出される分潮は当初8分潮 (K1, O1, Q1, M2, S2, N2, MS4, M4)であったが、ADCP 設置の数年後にプログラムが改訂され、M3とM5を加え10分潮となっている。この10分潮の調和定数は15日間のデータから最小二乗法により求められるが、恒流成分については、予報する時間に近い時点の状況を反映するように、最後の24時間の平均値を恒流としている。

以上の予報の計算では予報値と実測値との間に明らかに差異が生じることがある(東, 1989)。ひとつには、この方法では前節のような気象の影響による流れの変化を予報できないので、そのよう

な場合には差異が生じる。また、差異が生じる別のケースとして次のようなこともある。Fig. 7に45度方向の実測値と予報値を示したように、計測される潮流の曲線が正弦曲線が歪んだ曲線で、転流から急に強くなり、流れの強い時間がしばらく続くような曲線となることがあり、現在の予報方法では実測値のような歪んだ曲線は生まれず、差異が生じることがある。

気象の影響の問題の解決は容易ではないので、主として後者の問題点を解決する方法として以下のふたつの潮流予報の方法を試した。

1番目の方法(以下では、Method-1という)は、分潮数を増やして対応する方法で、1994年1年間のデータを使って60分潮を算出して予報を行う方法である。

火ノ山下潮流信号所の1994年1年間の潮流デー

タ(45度—225度方向の成分)により算出した60分潮の調和定数はTable 1の通りである。これからM2潮成分が卓越していることがわかる。

60分潮による予報は潮汐表の予報方法と同一である。ただし、潮汐表は関門海峡の両端での潮汐観測により算出された海峡の両端の水位差の60分

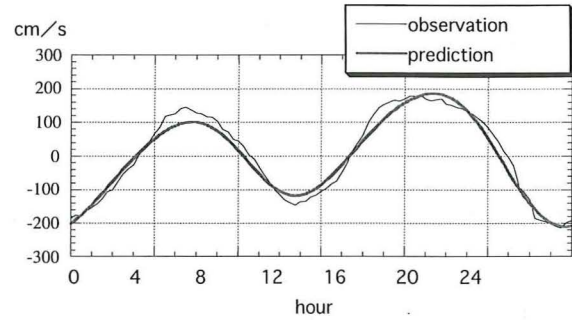


Fig. 7 Tidal current curves of the ADCP and the prediction.

Table 1. Harmonic constants of northeast component of the ADCP data.

SYMBOL	H(CM/S)	K(DEG.)	G(DEG.)	SYMBOL	H(CM/S)	K(DEG.)	G(DEG.)
SA	5.25	302.06	302.43	M2	133.34	88.88	87.80
SSA	2.75	192.56	193.30	MKS2	2.14	247.24	246.91
MM	3.75	196.51	201.41	LAM2	5.63	114.41	117.57
MSF	4.45	220.56	229.70	L2	8.26	109.19	113.01
MF	2.28	240.77	250.65	T2	3.78	129.85	137.54
2Q1	0.64	299.12	283.84	S2	47.95	113.50	121.56
SIG1	2.98	106.71	92.08	R2	1.30	222.98	231.42
Q1	5.17	331.30	320.92	K2	16.96	111.45	120.25
RH01	2.40	292.93	283.21	MSN2	2.43	334.76	347.72
O1	34.57	338.81	333.33	KJ2	1.02	237.37	251.08
MP1	4.31	152.21	147.47	2SM2	3.60	352.73	9.94
M1	1.81	44.83	44.30	M03	8.43	346.74	340.18
CH11	1.36	315.71	315.87	M3	0.82	18.09	16.48
PI1	0.51	50.72	54.01	S03	4.00	8.08	10.67
P1	10.31	1.61	5.28	MK3	5.95	12.41	15.74
S1	2.00	249.43	253.46	SK3	2.88	53.63	66.10
K1	46.40	11.74	16.14	MN4	2.69	310.37	303.32
PS11	0.91	331.74	336.51	M4	7.07	330.73	328.58
PH11	0.43	269.37	274.51	SN4	0.28	200.02	202.11
THE1	1.98	52.06	60.71	MS4	4.97	343.94	350.93
J1	0.68	130.28	139.58	MK4	1.51	134.89	142.62
S01	6.63	234.48	248.03	S4	0.55	335.42	351.56
001	0.87	74.74	89.02	SK4	0.12	57.24	74.11
OQ2	0.42	146.53	130.67	2MN6	2.14	122.11	113.98
MNS2	2.37	255.39	240.27	M6	3.13	137.22	133.99
2N2	2.84	57.51	46.63	MSN6	1.11	104.29	105.30
MU2	9.72	280.38	270.16	2MS6	4.16	170.86	176.78
N2	23.58	71.64	65.67	2MK6	1.88	165.57	172.23
NU2	5.76	84.26	78.94	2SM6	1.44	174.19	189.25
OP2	1.64	175.98	174.17	MSK6	1.44	178.48	194.28

潮の調和定数から水位差を推算し、その水位差の推算値を二乗した値に係数を乗じて、早鞆瀬戸予報点の潮流予報値としている。海峡の最大流速は予報点の流速の西流時には1.3倍、東流時には1.1倍になると潮汐表には記載されている。一方、火ノ山下潮流信号所 ADCP のデータを海峡の最大流速への換算値は西流時1.7倍、東流時2.0倍である。したがって、この2つの関係を使って、潮汐表の予報値と火ノ山下潮流信号所データによる予報値との比較を行うことができる。Fig. 8は、火ノ山下潮流信号所の1997年1年間の最強流速予報値1410個を2つの関係を用いて潮汐表予報値に換算して比較したものである。西流の場合の最強流速はほぼ一致するが、東流の場合には潮汐表の値のほうが2割程度大きくなっており、違いが見られる。一方、転流時刻については、両者はよく一致している。Fig. 9は同じく1997年1年間1410個の転流時刻の時間差を比較したものであるが、90%以上がその差20分以内となっている。

2番目の方法(以下では、Method-2という)は、現在の方法を改良した方法であり、現在の方法に対して以下のような改良を行った。1) 現在1日1回である調和分解及び予報を実施する回数を1日数回に増やす。2) 調和分解に用いるデータの期間を15日間よりも長くすることにより、調和定

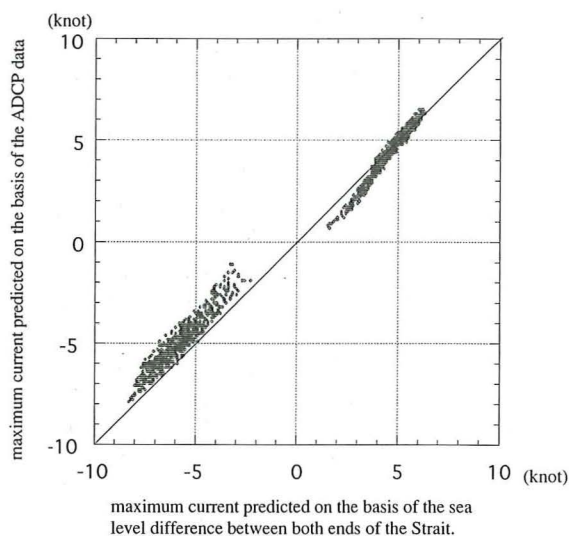


Fig. 8 Comparison between predicted maximum tidal currents in 1997.
+ : westerly current, - : easterly current.

数を求める分潮数を増やす。3) 予報を行う時間に近い時間のデータを重視して調和分解を行うため、最小二乗法を重み付の最小二乗法とする。4) 流れが強いときにピークを押さえられたように歪む潮流曲線を予報するために、実測流速に流速の二乗に比例する係数を乗じて曲線の歪みを修正して調和分解を行う。改良点は以上の4点であり、このうち1)については、すでに東(1989)により提案されているものである。

上記の4点の改良点について、具体的には以下のようにした。

1) 予報の間隔を3時間間隔とし、最新のデータの1時間後から4時間後までの予報を1日8回行う。

2) 30日間の毎時データ720個を用いて調和分解を行い、Table 2に示す31の周波数成分を算出して、予報を行う。予報値Uは(1)のように31の周波数成分の一次結合として表わされる。

$$U(t) = \sum_{i=1}^{720} V_i \cos(\sigma_i t - \kappa_i) \quad (1)$$

(V_i : 振幅, κ_i : 遅角, σ_i : 角振動数, t : 時間)

この31の周波数成分には、天文潮及びその倍潮または複合潮に含まれない成分もある。これは、潮流データのスペクトルをとるとFig.10のようにピークが周期が1日、1/2日、1/3日、1/4日、1/5日、1/6日、1/8日に現われるため、このピークに対応する周波数成分を選んだためである。また、1日よりも長い周波数成分も採用している。

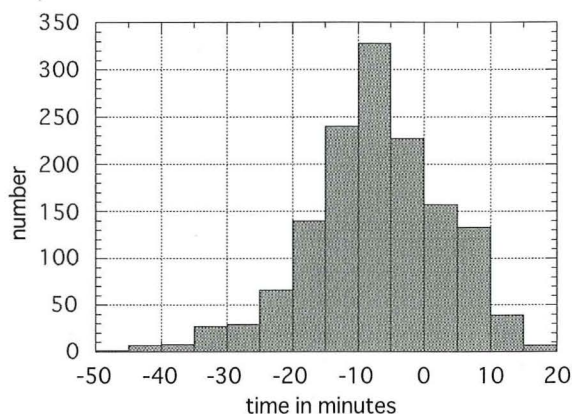


Fig. 9 Differences between predicted slack times in 1997.

Table 2. Angular frequencies of 31 components for Method-2. unit : degree/hour

1.016	1.560	2.725	5.200	12.927	13.399	13.943
14.570	15.041	15.513	16.057	27.342	27.968	28.440
28.984	29.528	30.000	30.544	31.016	42.927	44.025
45.041	57.968	58.984	60.000	72.070	74.179	86.408
86.952	87.968	115.936				

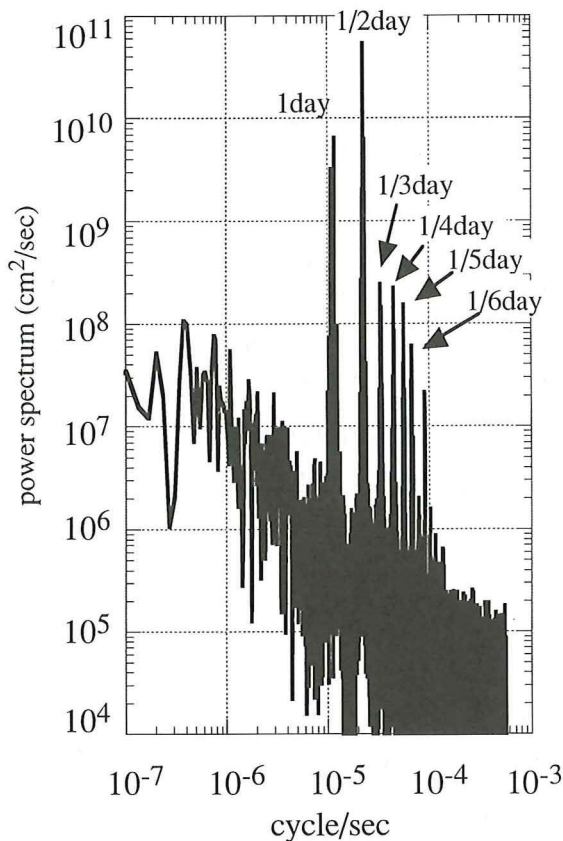


Fig.10 Power spectrum of the ADCP data.

3) 上に記した調和分解では、31の周波数成分の一次結合である予報値 U と実測値 u との30日間720個の誤差の二乗和を最小にするように振幅と遅角を決定するが、この最小二乗条件を

$$S = \sum_{j=1}^{720} w_j [U_j - u_j]^2 = \min. \quad (2)$$

($j=1$: 予報開始の30日前, $j=720$: 1時間前)
(w_j : 重み)

として、重み付の最小二乗条件とする。そして、予報する時間に近い時間の実測値を重視するため、重みを

$$w_j = 0.1 + ((j-1)/719.)^7 \quad (3)$$

と設定する。

4) 調和分解は実測値 u を

$$u^* = u(1 + \epsilon u^2) \quad (\epsilon : \text{係数}) \quad (4)$$

と実測値の二乗に比例する係数を乗じて変換し、ピークが押しえられたように歪む曲線を修正して調和分解を行う。このとき、最小二乗条件(2)は、

$$S = \sum_{j=1}^{720} w_j [U_j^* - u_j^*]^2 = \min.$$

($j=1$: 予報開始の30日前, $j=720$: 1時間前)

(5)

$$U^* = U(1 + \epsilon U^2) \quad (6)$$

となる。したがって、最小二乗法により求められるのは、 U^* の振幅と遅角となるので、推算については、 U^* を推算した後、(6)により U に変換することになる。 ϵ については、試行錯誤でいくつかの値を与えて計算したが、最終的には $1.3 \times 10^{-5} (\text{sec}^2/\text{m}^2)$ を用いた。

上記2方法が現用方法に比べて精度が向上しているかを検討するため1994年のデータを用いて比較を行った。比較にあたっては、火ノ山下潮流信号所 ADCP の潮流は、前節で述べたように東流と西流では完全に180度反対の方向に流れるわけではないが、往復流に近い流れとなっていることを考慮して、卓越する成分である北東-南西方向(45度-225度方向)の成分について現用方法と上記2方法とを適用した。比較には1994年1年間のデータを用いたが、Method-2の場合は予報するためには過去30日間のデータが必要であるので、最初の30日間の予報は行えない。このため、1月31日からの330日間について予報値と実測値とを比較した。また、60分潮を使う Method-1は調和分解に使ったデータの推算であり、予報にはなっていない。欠測データについては、前日及び翌日のデータにより補間して調和分解には利用したが、予報

Table 3. Comparison among the precision of three prediction methods, the present method, Method-1, and Method-2.

Method	rms of difference from the measured speed	the number of predicted speed which is over 0.5 knot faster or slower than the measured speed (total number : 30,203)	the number of predicted speed which is over 0.5 knot faster or slower than the measured speed (total number : 30,203)
present method	28.818	11,124 (36.8%)	2,080 (6.9%)
Method-1	19.587	5,088 (16.8%)	521 (1.7%)
Method-2 ($\epsilon=0$)	19.592	4,946 (16.4%)	482 (1.6%)
Method-2 ($\epsilon=1.3e^{-5}$)	17.551	3,602 (11.9%)	406 (1.3%)

値と実測値の比較には用いていない。したがって、比較を行ったデータの個数は31,680 (4個×24時間×330日)個ではなく、30,203個である。

比較結果を Table 3 にまとめた。Method-2については、 $\epsilon=0$ の場合についても、示している。Method-1についても Method-2についても、現用方法に比べて精度は格段に向上していることは明らかである。ただし、両者とも Fig. 4 に示したような気象の影響が大きく現われる時には、実測値との間に大きな差が生まれる。Method-1と Method-2について比較すると、やや Method-2が精度が高くなっており、また、この比較においては Method-1は純粋な予報でないことから、Method-2が優れていると考えられる。さらに、Method-2の $\epsilon=0$ の場合と $\epsilon=1.3 \times 10^{-5}$ の場合を比べると、潮流曲線に(4)により修正を加えた $\epsilon=1.3 \times 10^{-5}$ の場合が優れており、修正により予報精度が向上することを示している。

4. おわりに

第七管区海上保安本部水路部が入力した1994年の火ノ山下潮流信号所 ADCP データの解析を行った。その解析結果をもとに、火ノ山下潮流信号所で行う新しい潮流予報方法について検討を行った結果、現在の方法を改良することにより予報精度が向上することが明らかとなった。現在、火ノ山下潮流信号所はシステム改修中であるが、

改修終了後は前節の Method-2を基にした方法で潮流予報が行われるようになる。

新しい方法は現在の方法に比べると予報精度は向上するが、関門海峡の流れが気象の影響を大きく受ける場合には、現在の方法と同様に実際の流れとの間に大きな差が生じる。また、この予報は火ノ山下潮流信号所 ADCP が設置されている一点のみの予報であり、関門海峡全体の予報はできない。これらの点については、現在、日本水路協会事業として研究が進められており、近い将来、関門海峡全域について気象の影響も加味して流れが予報されるようになる。

最後に、本研究に協力していただいた海上保安庁灯台部及び第七管区海上保安本部水路部の関係者の皆様に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 江上亮, 井上紀子: 関門海峡における潮流分布図の作成について, 水路部技報, 14, 51-55, (1996)
- 東一之: 関門海峡における潮流の海象・気象に関する調査研究, 昭和63年度研究成果報告書, 海上保安庁, 159-163, (1989)
- 海上保安庁水路部: 日本沿岸潮汐調和定数表, 書誌第742号, (1993)
- 小田巻実: 潮汐・潮流予報システムに関する一考察, 水路部技報, 1, 61-65, (1983)