

大阪湾潮流観測データの解析

村上和男*・森川雅行**・坂口達也***・早川典生****

1. はじめに

近年、環境保全が社会的問題となるに従って、日本各地で盛んに流況（潮流）測定が実施されている。通常、潮位の長期間に渡る観測はしばしば見られるが、潮流においては機器の係留やデータの記録に種々の問題が存在し、観測期間は、長くてもほとんどの場合 30 日間程度である。今回、大阪湾の泉南沖の海上観測塔¹⁾で観測された、1978 年から 1981 年にわたる表層・中層・底層における三層での毎正時の潮流の同時記録を入手する機会を得た。

本論文では、4 年間に渡る潮流データを分析し、泉南沖の海況変動特性を調べた。その結果、現地では主要四分潮特に M_2 潮が卓越していることが確認できたほかに、現地の恒流は年スケールでは海域への淡水流入量に大きな影響を受け、月スケールでは流入量の他に風および密度成層の影響を強く受けていることがわかった。

2. 観測データ

海上観測塔 (MT 局) は、
図-1 に示すように大阪湾の泉南沖約 5km、東経 $135^{\circ}14'$ 分 25.9 秒北緯 $34^{\circ}25'$ 分 48.7 秒に位置している。潮流観測は水面下 3, 9, 16m の表層・中層・底層の三層で毎正時実施されている。表層・底層では水平 2 成分、中層では鉛直方向も含めた 3 成分の超音波流速計を使用し、毎正時前 10 分間の 1 秒毎データを平均操作して毎正時のデータとしている。観測塔では潮流以外に波高・潮位・水温等が観測されている。今回、取得した観測データは 1978 年 1 月 1 日 1 時から 1981 年 11 月 30 日 24 時にかけてのものである。図-2 は、観測データの一例で 1979 年 6

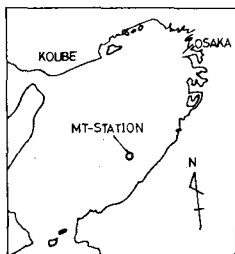


図-1 潮流観測塔位置図

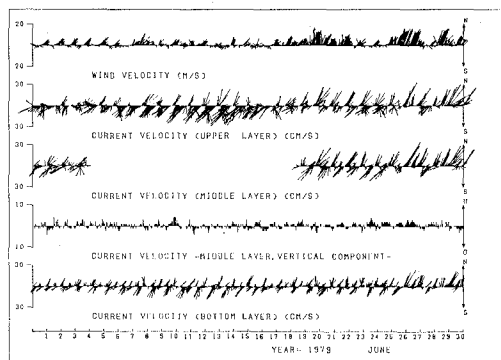


図-2 潮流ベクトル

月のものである。上段のベクトル図は、観測塔の上空 25 m で風車型自記風向風速計により測定された風である。

全期間に渡る潮流データからは、全体として現地では 1 日 2 回の転流があり、南西方向の流れが卓越していることがわかった。また、表層は風や波などの影響を受けて流れの周期性が一定していないのに対して、中層や下層は安定している傾向がみられた。流れの大きさは中層が表層より少し大きく、底層は小さくなっていた。

3. 潮流データの解析

(1) 調和解析による検討

4 年間の潮流データを年間・月間・15 日間で区切り、流れの東方、北方成分に対して調和分解を実施し、調和定数値および恒流の変化を検討した。調和分解には、計算値と実測値との誤差の最小化を行なう最小自乗法による方法²⁾を用いた。調和分解は、年間については 1 月 1 日より 364 日間 (1981 年は 333 日間)、8 737 個 (1981 年は 7 993 個)、月間については各月 1 日から 30 日間、721 個、15 日間については各月 1, 16 日から 15 日間、361 個のデータを用いて、それぞれ 28, 13, 10 の分潮に分解した。これらの分離分潮を表-1 に示す。

まず、調和定数値の検討を行なう。年間データの調和分解結果より、現地では東方、北方成分ともに半日周期流 M_2 , S_2 , 日周潮流 K_1 , O_1 が大きく、特に M_2 潮が卓越していることがわかった。各年各層の主要四分潮 (K_1 , O_1 , M_2 , S_2) の調和定数値の値を表-2, 表-3 に

* 正会員 工 修 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海水汚染水理研究室長

** 正会員 工 修 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海水汚染水理研究室

*** 正会員 工 修 (株)日本工営

**** 正会員 Ph. D. 長岡技術科学大学助教授 建設系学科

表-1 観測期間と分離分潮²⁾

観測期間	分 離 分 潮
1 年 間	$S_a, S_{sa}, M_m, M_{sf}, M_f, Q_1, O_1, M_1, \pi_1, P_1$ $K_1, J_1, 2N_2, \mu_2, N_2, \nu_2, M_2, L_2, T_2, S_2, K_2$ $M_3, M_4, MS_4, M_6, 2MS_6, 2SM_6, M_8$
1 か月間	$Q_1, O_1, P_1(K_1), \mu_2, N_2(\nu_2), M_2, L_2, S_2(K_2)$ M_4, MS_4
15 日 間	$Q_1, O_1, P_1(K_1), N_2, M_2, S_2(K_2), M_4, MS_4$

() 内の分潮は、平衡潮論により分離

表-2 年間データによる調和定数値 (東方成分)

年 度		O_1		K_1		M_2		S_2	
		U (cm/s)	κ (°)	U (cm/s)	κ (°)	U (cm/s)	κ (°)	U (cm/s)	κ (°)
1978	表層	2.09	140.1	2.63	162.0	1.99	247.7	0.82	239.5
	中層	2.03	136.1	3.61	165.3	6.17	236.6	1.93	242.4
	底層	0.88	134.1	1.65	145.5	4.72	217.9	1.34	222.5
1979	表層	3.13	149.5	4.40	160.6	3.99	235.0	1.40	224.3
	中層	2.59	132.1	3.73	165.3	6.97	233.8	2.10	237.6
	底層	1.07	112.6	1.25	138.2	5.21	211.6	1.39	209.2
1980	表層	3.76	145.5	4.48	173.6	5.11	237.3	1.61	227.0
	中層	3.18	141.7	4.33	164.4	7.87	234.5	2.10	239.5
	底層	1.11	121.1	1.68	129.8	5.58	214.6	1.46	216.6
1981	表層	4.07	142.8	4.78	177.7	4.97	235.3	1.72	222.1
	中層	2.68	144.5	4.10	163.0	7.57	234.5	2.28	238.1
	底層	0.96	108.1	1.61	126.9	5.67	215.9	1.64	216.8

表-3 年間データによる調和定数値 (北方成分)

年 度		O_1		K_1		M_2		S_2	
		V (cm/s)	κ (°)	V (cm/s)	κ (°)	V (cm/s)	κ (°)	V (cm/s)	κ (°)
1978	表層	3.25	101.0	3.93	127.8	8.47	247.9	2.56	268.2
	中層	2.71	134.3	4.70	152.5	10.41	240.8	3.29	258.4
	底層	2.59	150.7	3.66	165.6	8.29	230.1	2.68	248.7
1979	表層	3.50	116.3	4.67	136.5	9.46	244.0	2.69	260.2
	中層	3.03	127.5	4.87	154.7	10.32	239.8	3.31	256.9
	底層	2.64	140.3	3.70	165.2	8.43	228.6	2.61	245.3
1980	表層	3.45	123.5	4.75	148.3	9.69	244.3	2.81	258.3
	中層	3.37	134.5	4.64	156.2	10.50	239.7	3.38	255.3
	底層	2.70	142.4	3.40	163.6	8.72	228.2	2.71	244.0
1981	表層	3.60	119.6	5.20	146.9	9.95	244.0	2.96	261.1
	中層	3.40	135.7	4.27	155.2	10.27	240.7	3.18	253.7
	底層	2.93	143.4	3.61	164.0	9.39	229.0	2.71	241.8

表-4 年間データによる調和定数値 (潮位)

年 度	O_1		K_1		M_2		S_2	
	ζ (cm)	κ (°)	ζ (cm)	κ (°)	ζ (cm)	κ (°)	ζ (cm)	κ (°)
1978	19.13	179.6	25.78	201.8	29.54	210.7	17.64	225.3
1979	18.68	183.2	25.32	202.5	29.78	211.6	17.27	225.2
1980	19.07	180.8	25.39	202.6	30.88	210.0	17.19	225.3
1981	19.12	180.3	25.49	203.1	30.13	211.8	17.16	225.6

示す。また、潮流と同時に観測されている潮位の調和分解結果を表-4に示す。潮位の調和定数値は潮流に比べて安定している。潮流の調和定数値の振幅は、北方成分の方が大きく、安定しているのに対し、東方成分は各年

度で値のばらつきが大きく、特に表層で著しい。次に、現地の潮流・潮汐の性質を以下の式(1)によって分類することにする。

$$\text{半日周潮型} \quad \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} < 0.25$$

$$\text{混合潮型} \quad 0.25 < \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} < 1.25 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{日周潮型} \quad 1.25 < \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$$

これらの値を表-5に示す。この表より、泉南沖では潮

表-5 潮型指数

年 度	東 方 成 分			北 方 成 分			潮 位
	表 層	中 層	底 層	表 層	中 層	底 層	
1978	1.68	0.70	0.42	0.65	0.54	0.57	0.95
1979	1.40	0.70	0.35	0.67	0.58	0.54	0.94
1980	1.23	0.75	0.40	0.66	0.58	0.54	0.92
1981	1.32	0.69	0.35	0.68	0.57	0.54	0.94

汐が日周潮型に近い混合潮型であるのに対して、潮流は全体的にみて半日周潮型に近い混合潮型である。北方成分は、あまり値が変化しないが、東方成分は水深が浅くなるにつれて日周潮流が大きくなり、表層では日周潮型となっている。これは東方成分が日周期の風の影響を受けているためと考えられる。

次に、月間データを調和分解した結果から、主要四分潮の卓越は、年データの場合と同様であった。それらの月による変動は振幅はかなり変動するが、位相は安定している。その変化を中層の M_2 潮について 図-3 に示

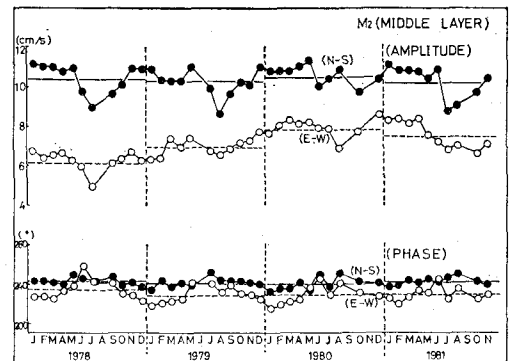


図-3 月間データによる調和定数値

す。欠測が30%を超える月は値をプロットしていない。各年度の横線は年間データから得られた調和定数値で、月間データから求められた値は、この線を平均にして変動している。変化の傾向として、各層で夏期に若干小さくなっている。4年間の各月の M_2 潮の振幅と位相の平均値と標準偏差を表-6に示す。潮位は振幅、位相ともに分散が小さいのに対して、潮流では振幅の分散が大き

表-6 月間データによる M_2 潮の平均値と標準偏差

層	東方成分				北方成分			
	$\bar{U}$	σ_U	κ	σ_κ	$\bar{V}$	σ_V	κ	σ_κ
表層	4.21	1.33	240.1	13.8	9.59	1.11	245.1	4.0
中層	7.15	0.81	234.8	4.4	10.42	0.69	240.4	2.4
底層	5.29	0.65	215.5	4.3	8.69	0.96	229.0	3.0
潮位	30.18	1.2	210.5	2.0				

く、その傾向は表層で著しい。潮位の M_2 潮の振幅も夏期に小さくなる傾向がみられたが、潮流とは弱い正の相関がある程度である。

次に現地で実際によく実施されている 15 日間データによる調和定数値を、1979 年の底層の M_2 潮について 1 月間データの調和分解結果とともに 図-4 に示す。15

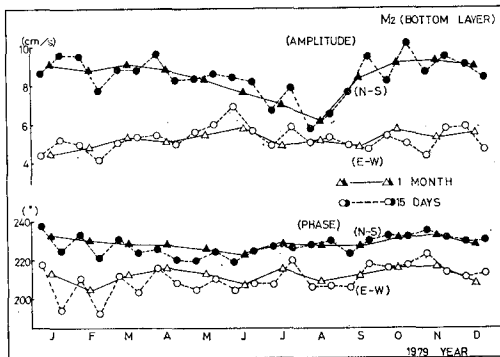


図-4 15 日間データによる調和定数値

日間データの結果は、1 カ月間データの結果を追従するかのよう動く。分解の精度は観測期間が短いので当然低下するが、図-4 が示すように、調和定数値のばらつきは 1 カ月観測と比べてあまり小さくなく、観測が比較的容易であることを考えれば有効な手法であるといえる。

次に、調和分解により得られる非調和定数値つまり恒流について検討する。年間データから求めた恒流を図-5 に示す。4 年間のデータをすべて用いて調和分解した結果も示してある。各層で恒流は南西流で、相対的に下層の値が小さい。各年度の恒流量と淀川の年平均流量(枚方地点)との関係を 図-6 に示す。この図から明らか

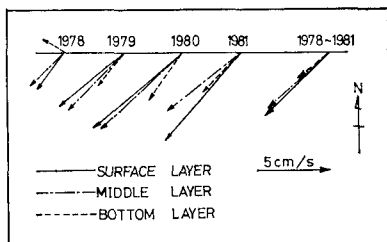


図-5 年間データによる恒流

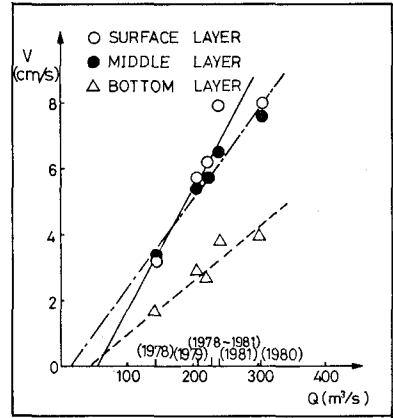


図-6 恒流と淀川の年平均流量との関係

に両者には正の相関が見られる。淀川の年平均流量は現地海域への淡水流入量を代表していると考えられる。したがって、年間スケールでの泉南沖の恒流発生要因として、淡水の海域への流入量が重要な役割を果たすと考えられる。

月間データの調和分解から求めた各層の恒流を 1979 年度について 図-7 に示す。実線の矢印が生データから

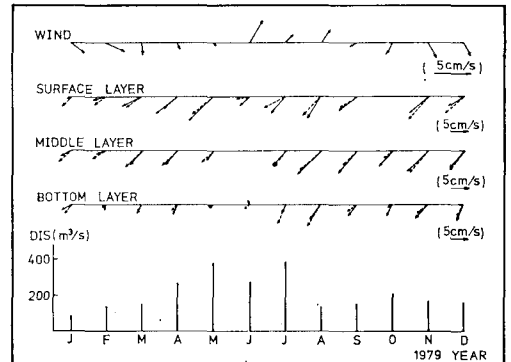


図-7 月間データによる恒流

求めた恒流である。恒流量は表層と中層とであまり変わらず、底層で小さくなっている。特に夏期においてはその割合が大きくなっている。下段の棒グラフは淀川の月平均流量を示し、全体的にみて流量の多い月は恒流が大きくなっている。上段のベクトルは月間の風を平均したもので、その月の風を代表していると考えてよい。月の平均風は各年でほぼ同じ傾向を示し、夏期には南風、冬期には西風が卓越している。この風の影響により、夏期の表層は淡水流入量が多いにもかかわらず、恒流が小さくなっていると考えられる。また、夏期の底層において恒流が小さいのは、密度成層により河川の影響が底層まで及ばないためと考えられる。

ここで、月間データの調和分解は、1 カ月以上の長周期の潮流成分の影響を受けており、求めた恒流は厳密な

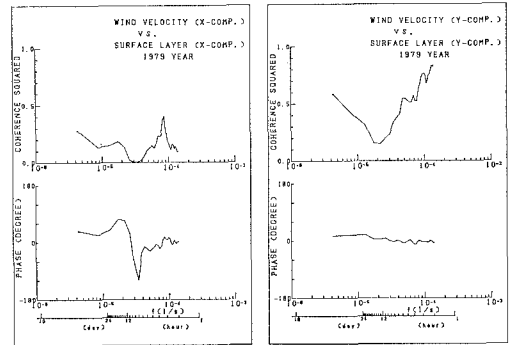
意味で非調和成分値とはいえない。そこで4年間のデータの調和解により太陽年周潮流 S_a 、太陽半年周潮流 S_{sa} を求め、生データからこれらの潮流成分を除去したのについて調和解を実施した。こうして得た恒流を破線で示してある。長周期成分の除去により、恒流はほぼ南西を向くようになり、年全体の傾向が似かよってくる。これは長周期成分が河川や風の影響を受けているためである。

(2) スペクトル解析による検討

各年の1月1日1時から、8192個(約341日)のデータをFFTによりフーリエ級数表示し、スペクトルを計算した。データの欠測は、風の場合はその数が少ないので線形補間、潮流の場合は年間データの調和解により得た調和定数値を用いて補間した。求めた1次スペクトルに対して16個の三角形フィルター⁴⁾をかけている。自由度は48である。図-8に1979年の風のスペクトル分布を示す。各年度において風のスペクトルの分布形にあまり差はみられない。パワーのピークとしては、周波数 1.14×10^{-5} (1/s) (周期 24.39 時間) と 2.28×10^{-5} (1/s) (12.19 時間) にみられ、前者のピークが高く、また2つのピークとも東方成分が大きい。図-9に1979年の中間層の潮流のスペクトル分布を示す。各年での潮流

ロススペクトルを求め、コヒーレンスとフェイズを計算した。また、目的変数を潮流、説明変数を風とした回帰分析を行ない、風の東方・北方の各成分が流れに与える影響を調べた。なお、これらの検討にあたっては、潮汐変動を除去した低周波変動に注目するため、潮流データには25時間、風のデータには24時間の移動平均の操作を施した。

1979年9月1日から1024個(約43日間)のデータについて求めた風と表層流とのコヒーレンスとフェイズを図-10に示す。この期間は、図-2からわかるよう



(a) 東方成分

(b) 北方成分

図-10 コヒーレンスとフェイズ

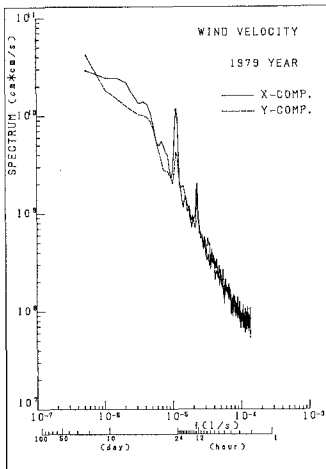


図-8 風のスペクトル

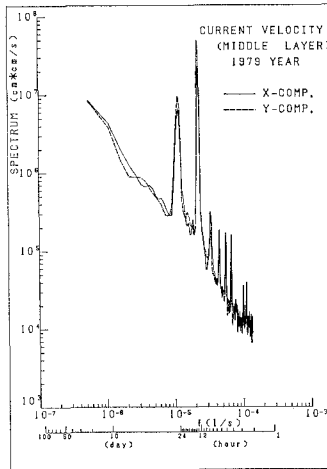


図-9 中間層のスペクトル

のスペクトルの分布形に差はみられず、ピークとしては周波数 2.22×10^{-5} (1/s) (12.49 時間)、 1.14×10^{-4} (1/s) (24.37 時間) に顕著なものが見られ、半日周潮、日周潮の卓越を示している。さらに、高周波側に潮汐周期に対応して小さなピークが見られる。半日周潮と日周潮の大きさについては、調和解により得た関係と同様なものが確認された。

4. 風と流れの相関

風の流れに対する影響を調べるために、風と流れのク

に南風が卓越している。東方成分より北方成分が高いコヒーレンスを示し、相関が強い。これは特に5時間よりも短周期側でこの傾向が強い。この傾向は風と中層、風と底層とのコヒーレンスについて同様であるが、底層になるにつれてコヒーレンスは低下している。フェイズについては、北方成分は24時間よりも長周期側で風が遅れに対して遅れているが、他の周期では遅れはない。東方成分については変動が大きくなっている。他の期間に対する計算ではほとんどの場合東方成分よりも北方成分のコヒーレンスが高く、現地の流れは南北方向の流れの影響を強く受けていることがわかる。次に、

同じデータを以下のような式で表すことを考え、重回帰分析を行った。

$$u_i(t) = a_{0i} + a_{1i} \cdot w_x(t - \tau_{xi}) + a_{2i} \cdot w_y(t - \tau_{yi}) \quad i=1,2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 w_x 、 w_y は風の東方・北方成分 (m/s)、 u_1 、 u_2 は潮流の東方・北方成分 (cm/s)、 τ_{xi} 、 τ_{yi} は風の潮流に影響を及ぼすまでの遅れ (h)、 a_{0i} 、 a_{1i} 、 a_{2i} は定数である。結果の一覧を表-7に示す。()内の値は各変数を平均0、分散1に基準化した時の値である。遅れは変数間の相互相関が最大となる時間とした。F値は分析の有

表-7 重回帰分析表

層	a_0	a_1	τ_1	a_2	τ_2	F
表層 u_1	-6.04	-0.005 (-0.001)	3	1.10 (0.63)	2	337.6
表層 u_2	-7.15	-0.31 (-0.07)	3	1.52 (0.79)	4	639.5
中層 u_1	-4.54	-0.21 (-0.06)	8	1.13 (0.74)	6	495.5
中層 u_2	-4.93	0.18 (0.05)	5	0.99 (0.66)	5	488.7
底層 u_1	-1.57	-0.30 (-0.18)	17	0.48 (0.65)	20	214.8
底層 u_2	-1.81	0.30 (0.13)	6	0.51 (0.51)	10	303.3

意性を示すもので有意水準 5% に対しては、説明変数 2, データ数 120 以上の場合、F 値は 3.07 以上でなければならない。表-7 より流れの東方・北方成分ともに強い南風の影響を受けていることがわかる。流れと風の東方成分が負の相関を示しているのは、この期間の風と流れともに、北方成分が強く東方成分については精度がよくないためと考えられる。他の期間についても同様の解析を実施した。得られた定数に一定の傾向がみられたが、その値はかなり変動し、今後さらに変数の取り方等を検討する必要がある。

5. おわりに

大阪湾の泉南沖の観測塔での年間の潮流観測データの

解析から得た主要な結論は以下の通りである。

(1) 泉南沖では主要四分潮 K_1, O_1, M_2, S_2 , 特に M_2 潮が卓越している。

(2) 年間スケールでの恒流は海域への淡水流入量により大きな影響を受け、月間スケールでの恒流は淡水量の他に、風および密度成層の影響を受ける。

(3) 一定方向に卓越した風が吹いた場合、風と流れは強い相関を持ち、南北方向の風が流れに与える影響が大きい。

最後に、研究を実施するにあたり、貴重なデータを提供していただくとともに、種々の助言を受けた第三港湾建設局の関係者の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 第三港湾建設局：土砂による海水汚濁の予測方法手法開発のための調査研究（通年報告書），pp. 329～382, 1980.
- 2) 村上和男：最小自乗法による潮汐・潮流の調和分解とその精度，港湾技研資料 No. 369, 38 p., 1981.
- 3) 彦坂繁雄：潮汐（海波科学基礎講座——海波物理 III），東海大学出版会，1971.
- 4) 力石国男・光易 恒：スペクトル計算法と有限フーリエ級数，九州大学応用力学研究所報，第 39 号，pp. 77～104, 1973.
- 5) 奥野忠一・芳賀敏郎・久米 均・吉澤 正：多変量解析法，日科技連出版社，pp. 25～157, 1971.