

潮汐の調和定数と予報精度

桑木野文章*・熊谷 武*

TIDAL HARMONIC CONSTITUENTS AND ACCURACY OF PREDICTION FOR TIDE

Fumiaki Kuwakino,* and Takesi Kumagai*

Received 1982 November 5

Abstract

For the purpose of enhancing the accuracy of tidal prediction, a review of the tidal harmonic constants and an examination of the number of constituents to be used for the prediction were studied by using the long-term observation data obtained at Kasima, Hirosima, Sibaura and Muroran. The results obtained are summarized as follows:

The constituents of the short-period group can be satisfactorily determined to a certain degree even if they are computed from the data obtained from a one-year observation.

However, taking into account such factors as synodic periods among different constituents, the existence of constituents corresponding to meteorological variations, etc., it is considered that tidal constituents should be determined from such data that make up the mean of those for several years. Since the amplitudes of the constituents of the long-period group (Mm, Mf, MSf, Sa and Ssa) can be recognized as a composite of the constituents of astronomical tides and meteorological tides, they should necessarily be computed from the data obtained by longer period observations. These values are also obtainable from the values of daily mean sea levels for a long period.

As for the number of constituents to be used for prediction, the accuracy in prediction stated in the Tide Tables would be retained even by those 38 constituents presently employed. However, these 38 constituents do not always correspond to the order of amplitudes of necessary constituents at individual places while local peculiarities may be seen in such an order. It also seems that accuracy in prediction tends to be raised approximately in proportion to the sum of amplitudes of constituents used.

Taking the case of Sibaura for example, the following differences were found as compared to the actual observation data:

In the case of using 38 constituents, the departure of tidal height is 6.9 cm on average with a standard deviation of 9.6 cm; the departure of tidal hour is 7.2 minutes on average with a standard deviation of 16.6 minutes. In the case of using 110 constituents, the departure of

* 海象課 Oceanographic Division

tidal height is 5.9 cm on average with a standard deviation of 8.7 cm; the departure of tidal hour is -0.9 minute on average with a standard deviation of 13.7 minutes.

In conclusion, it can be said that the larger the number of constituents used, the higher the accuracy obtained in tidal prediction.

Key words: Least square method 110 harmonic constituents.

Accuracy of tidal predictions.

Departure of tidal heights.

1. まえがき

潮汐表の子報値は、1か年あるいは数か年間の潮汐観測資料から最小自乗法によって60分潮の調和定数を算出し、このうち38分潮を用いて計算されたものである。「予報値は、いずれも常態のものであって異常気象による影響や副振動等は加味されていないが、予報精度は潮時で一般に20~30分以内、潮高で30cm以内である。ただし昇降が非常に小さい時とか日潮不等のために1日1回潮に近く相次ぐ高低潮の差が少ない場合には、時として1時間以上の差を見ることもあるが、また、異常な気象等の際には著しい潮高の差を生ずることがある。」とされている。本報告では、実際の潮位と予報値との差に大きな影響を与える気象について検討し、次に、潮汐表の子報値の根拠となる調和定数について分潮数を多くした場合、どの程度の予報精度の向上が望めるのか、また、現在予報に使用している38分潮の構成の是非等を検討する。

2. 調和分解による調和定数の算出

(1) 最小自乗法

毎時の潮高 $H(t)$ は三角関数の和として

$$H(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos(\sigma_i t - \chi_i) = A_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos \sigma_i t + \sum_{i=1}^n b_i \sin \sigma_i t \quad (1)$$

$$\text{ただし } a_i = A_i \cos \chi_i, \quad b_i = A_i \sin \chi_i \quad (2)$$

と表わすことができる。ここで A_0 は平均水面、添字は分潮の種類を示し σ_i , A_i , χ_i はそれぞれ各分潮の角速度、振幅、遅角である。係数 a_i , b_i を求めることができれば、(2)式により調和定数を求めることができる。最も最終的には、天体の運行に基づく展開であるため、厳密な三角級数で表わせず、振幅、遅角ともに天文因数、天文引数により補正しなければならない。今、ここで求める分潮数を m 、観測個数を n とすれば(1)式の正規方程式は

$$\sum_{t=1}^n A_0 + \sum_{i=1}^m a_i \sum_{t=1}^n \cos \sigma_i t + \sum_{i=1}^m b_i \sum_{t=1}^n \sin \sigma_i t = \sum_{t=1}^n H(t) \quad (3)$$

$$\sum_{t=1}^n A_0 \cos \sigma_j t + \sum_{i=1}^m a_i \sum_{t=1}^n \cos \sigma_i t \cos \sigma_j t + \sum_{i=1}^m b_i \sum_{t=1}^n \sin \sigma_i t \cos \sigma_j t = \sum_{t=1}^n H(t) \cos \sigma_j t$$

$$\sum_{t=1}^n A_0 \sin \sigma_j t + \sum_{i=1}^m a_i \sum_{t=1}^n \cos \sigma_i t \sin \sigma_j t + \sum_{i=1}^m b_i \sum_{t=1}^n \sin \sigma_i t \sin \sigma_j t = \sum_{t=1}^n H(t) \sin \sigma_j t$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

となる(小田巻 1981)。 (3)式の左辺の各係数は、 $t = n_1$ から $t = n_2$ までとすれば

$$\sum_{t=n_1}^{n_2} \cos \sigma_i t = C(\sigma_i) \quad \sum_{t=n_1}^{n_2} \sin \sigma_i t = S(\sigma_i)$$

$$\sum_{t=n_1}^{n_2} \cos \sigma_i t \cos \sigma_j t = \begin{cases} \{C(\sigma_i - \sigma_j) + C(\sigma_i + \sigma_j)\} / 2 & (i \neq j) \\ \{N + C(\sigma_i + \sigma_j)\} / 2 & (i = j) \end{cases}$$

$$\sum_{t=n_1}^{n_2} \sin \sigma_i t \sin \sigma_j t = \begin{cases} \{C(\sigma_i - \sigma_j) - C(\sigma_i + \sigma_j)\} / 2 & (i \neq j) \\ \{N - C(\sigma_i + \sigma_j)\} / 2 & (i = j) \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{t=n_1}^{n_2} \sin \sigma_i t \cos \sigma_j t = \begin{cases} \{S(\sigma_i - \sigma_j) + S(\sigma_i + \sigma_j)\} / 2 & (i \neq j) \\ \{S(\sigma_i + \sigma_j)\} / 2 & (i = j) \end{cases}$$

ここで

$N' = n_1 + n_2$, $N = n_2 - n_1 + 1$, ω を σ_i あるいは $\sigma_i \pm \sigma_j$ とすれば

$$C(\omega) = \frac{\cos(N'\omega/2) \cdot \sin(N\omega/2)}{\sin(\omega/2)} \quad S(\omega) = \frac{\sin(N'\omega/2) \cdot \sin(N\omega/2)}{\sin(\omega/2)}$$

と表わせる。この展開式からわかるように欠測がなく、観測個数が奇数の場合には、 $t = -n$ から $t = n$ までとして(4)式に代入すれば各係数は非常に簡単な形となる。欠測がある場合には、(4)式で欠測期間にかかる係数を求め、欠測がないとした係数から差し引いて補正すればよい。このようにして求めた $(2m+1)$ 元連立方程式をガウス・ザイデルの反復法、ガウスの消去法等で解けば、未知数 a_i , b_i を求めることができる。

(2) 観測期間の長・短による調和解結果の相違の検討

Table 1. Tidal harmonic constants

DURATION	PLACE POSITION KASIMA 35°55'13"N, 140°41'50"E.				MEAN	JAN. 2 1976 - JAN. 14 1979
	JAN. 2 1976 - JAN. 6 1977	JAN. 6 1977 - JAN. 9 1978	JAN. 11 1978 - JAN. 14 1979			
CONSTITUENTS	H(CM) X(DEG.)	H(CM) X(DEG.)	H(CM) X(DEG.)	H(CM) X(DEG.)	H(CM) X(DEG.)	H(CM) X(DEG.)
SA	10.93 189.74	13.08 185.69	9.36 197.85	11.08 190.49	11.08 190.60	
SSA	1.34 238.94	1.75 241.11	2.99 333.07	1.52 291.94	1.52 291.08	
NM	0.75 127.70	0.78 234.37	1.03 159.59	0.64 170.37	0.61 168.34	
MSF	1.38 103.16	1.57 235.17	1.41 323.94	0.26 264.44	0.27 263.70	
MF	1.02 129.34	2.20 145.06	0.83 15.40	0.94 126.00	1.01 123.51	
201	0.40 164.42	0.43 139.16	0.63 151.87	0.48 164.05	0.49 164.45	
SIG1	0.51 164.26	0.62 154.48	0.48 127.28	0.53 144.46	0.53 145.64	
O1	3.82 161.99	3.87 143.72	3.92 142.85	3.85 142.85	3.87 142.58	
MO1	0.68 157.96	0.91 143.89	0.82 138.78	0.80 146.10	0.81 147.15	
O1	19.04 153.17	19.27 154.26	19.18 153.84	19.16 153.76	19.35 153.54	
MP1	0.31 184.29	0.26 170.15	0.38 156.43	0.31 169.26	0.31 171.00	
M1	0.93 167.86	0.82 160.21	0.88 152.68	0.87 160.40	0.71 166.11	
CH1	0.28 157.70	0.26 129.74	0.28 171.56	0.26 153.69	0.29 154.58	
P11	0.55 120.67	0.59 156.70	0.46 154.31	0.53 160.79	0.54 161.14	
P1	7.73 171.17	7.90 171.74	7.80 170.12	7.81 171.01	7.81 171.05	
S1	0.52 110.20	0.24 337.50	0.44 339.06	0.39 326.28	0.39 327.41	
K1	23.87 173.54	23.93 174.23	23.89 173.33	23.90 173.70	24.02 173.88	
PS1	0.07 17.75	0.42 90.41	0.34 71.60	0.26 77.38	0.25 76.61	
PH1	0.38 111.36	0.23 138.89	0.49 116.60	0.36 119.58	0.37 119.53	
THE1	0.27 199.54	0.23 172.74	0.35 208.12	0.27 195.95	0.28 191.38	
J1	1.19 184.89	1.20 198.58	1.17 193.46	1.18 192.32	1.18 192.80	
S01	0.23 257.98	0.12 329.03	0.14 269.34	0.14 277.13	0.15 276.94	
001	0.74 216.23	0.68 210.54	0.73 205.51	0.71 210.79	0.75 210.88	
002	0.06 295.77	0.14 185.56	0.15 136.77	0.08 171.03	0.07 158.92	
MS2	0.24 127.05	0.10 140.47	0.17 140.52	0.17 134.17	0.18 134.03	
2N2	0.56 144.78	0.45 165.71	0.40 161.23	0.47 144.07	0.47 143.50	
M12	0.66 139.54	0.66 144.41	0.65 139.27	0.66 141.08	0.66 141.49	
N2	4.21 120.56	4.00 120.27	3.94 119.43	4.05 120.10	4.05 120.13	
M12	0.81 112.23	0.97 112.76	0.90 117.44	0.90 114.15	0.92 113.77	
OP2	0.18 15.72	0.38 335.70	0.10 255.59	0.18 337.55	0.17 337.55	
M2	30.53 124.03	30.62 127.57	30.89 127.18	30.68 124.91	30.63 124.96	
MKS2	0.16 273.16	0.52 274.26	0.05 324.37	0.24 277.10	0.27 275.29	
LAM2	0.34 117.64	0.37 144.79	0.33 139.42	0.34 134.26	0.34 136.58	
L2	1.26 140.84	1.18 139.19	1.19 135.80	1.21 138.66	1.13 136.46	
T2	0.93 140.45	0.77 156.55	0.98 158.91	0.88 151.84	0.88 151.99	
S2	14.45 159.54	14.33 160.87	14.41 159.81	14.40 160.08	14.39 160.08	
M2	0.15 37.44	0.38 2.73	0.11 85.73	0.18 28.50	0.18 29.84	
K2	3.86 153.60	3.76 154.81	4.06 153.56	3.89 153.98	3.93 154.26	
MSN2	0.09 18.89	0.07 10.87	0.06 327.27	0.07 2.77	0.07 6.59	
KJ2	0.28 355.88	0.29 325.80	0.26 339.93	0.27 340.36	0.27 340.24	
2SN2	0.09 67.11	0.13 35.05	0.09 33.94	0.10 42.49	0.10 41.02	
M03	0.23 319.82	0.21 316.45	0.25 259.68	0.19 344.07	0.19 340.40	
M3	0.54 115.54	0.33 118.86	0.55 116.21	0.54 116.18	0.54 116.07	
S03	0.03 54.24	0.11 123.50	0.05 11.49	0.04 87.36	0.04 85.67	
MK3	0.04 31.76	0.16 88.03	0.05 187.70	0.06 93.50	0.06 91.91	
SK3	0.28 71.80	0.34 66.20	0.27 60.45	0.30 66.22	0.30 66.27	
MH4	0.06 354.55	0.08 132.43	0.08 341.12	0.07 341.61	0.07 343.35	
M4	0.15 99.15	0.26 43.10	0.18 85.67	0.19 79.14	0.19 79.58	
SN4	0.01 150.37	0.02 79.94	0.04 175.50	0.02 167.02	0.02 152.49	
MS4	0.08 237.90	0.07 14.67	0.08 229.35	0.04 256.34	0.04 253.84	
MK4	0.01 239.20	0.12 79.05	0.06 175.16	0.04 110.23	0.04 110.06	
S4	0.14 185.88	0.08 176.23	0.09 190.90	0.10 184.85	0.10 185.25	
SK4	0.06 87.44	0.09 78.38	0.04 111.75	0.06 88.80	0.06 88.26	
2MK6	0.03 201.16	0.02 250.64	0.02 250.64	0.02 214.59	0.02 212.74	
M6	0.02 106.24	0.04 277.69	0.03 319.84	0.03 298.10	0.03 298.96	
MSN6	0.01 221.55	0.01 35.22	0.02 206.07	0.01 209.19	0.01 203.47	
2MS6	0.06 61.47	0.01 163.03	0.03 29.53	0.03 57.31	0.03 59.19	
2MK6	0.02 283.78	0.02 327.35	0.02 192.88	0.01 271.75	0.01 269.37	
2SH6	0.03 97.52	0.02 184.67	0.02 155.65	0.02 139.17	0.02 142.90	
MSK6	0.02 40.17	0.03 306.66	0.01 232.25	0.01 324.84	0.01 320.63	

第二港湾建設局鹿島港工事事務所所管の鹿島験潮所で観測された1976年1月から3か年の連続観測資料を用いて次の計算を行なった。

- i. 1か年(369日間)の資料を用いて三組の調和定数及びその平均調和定数の算出
- ii. 3か年連続観測資料を用いての調和定数の算出

これらの結果を第1表に示す。1か年ごとの三組の調和定数の比較では短周期分潮は、相合周期が半年あるいは1年である分潮(例えば、S₂分潮に関してT₂, R₂, K₂分潮)以外の振幅、遅角ともにほとんど変わらない。しかし、長周期分潮は各年の振幅、遅角ともに変動している。これはその成因から分かるように年々の気象状態の変動が反映されているものと考えられる。この点については後述する。また、3か年の平均調和定数と3か年連続資料による調和定数との比較では、各分潮の振幅、遅角ともにほぼ一致する結果が得られている。従って、調和分解の期間を長くすることにより高精度の調和定数が得られると判断される。

(3) 110分潮の算出と吟味

水路部所管の広島、芝浦、室蘭の各験潮所の1974年1月から1か年間の観測資料を用いて110分潮の算出を試みた。この結果を第2表に示す。また、付録として110分潮の分潮名や引数等を掲げた(Sangbok D. Hahn 1980)。60分潮に追加された50分潮はすべて浅海潮で短周期分潮である。通常、潮候曲線から毎時潮高値を採取

Table 2. Tidal harmonic constants obtained from data in 1974

PLACE POSITION	HIROSIMA 34°20'57"N, 132°28'18"E.		SIBAUWA 35°38'1"N, 139°45'25"E.		MURORAN 45°20'32"N, 140°57'25"E.		PLACE POSITION	HIROSIMA 34°20'57"N, 132°28'18"E.		SIBAUWA 35°38'1"N, 139°45'25"E.		MURORAN 45°20'32"N, 140°57'25"E.	
	CONSTITUENTS	H(CM)	K(DFG.)	H(CM)	K(DFG.)	H(CM)		K(DFG.)	CONSTITUENTS	H(CM)	K(DFG.)	H(CM)	K(DFG.)
SA	17.09	142.12	10.51	147.63	4.63	143.75	M3	0.59	356.33	1.28	158.99	0.06	104.47
SSA	2.93	268.41	1.23	250.16	4.25	242.03	S03	0.09	212.94	0.20	271.50	0.06	354.70
NM	0.24	114.36	0.93	46.14	0.85	164.35	MK3	0.17	158.17	0.43	312.06	0.06	333.39
MSF	0.90	6.45	1.81	41.23	0.67	46.41	2M03	0.06	163.60	0.13	324.42	0.05	297.72
MF	1.37	322.84	2.12	24.70	2.28	330.75	SK3	0.24	206.94	0.50	75.15	0.29	70.20
ZQ1	0.79	175.25	0.65	138.71	0.66	131.52	2MNS4	0.13	137.70	0.11	134.27	0.04	27.85
SI01	1.09	221.06	0.80	157.85	0.80	128.23	3MK4	0.18	136.77	0.35	126.30	0.14	6.78
O1	4.57	183.34	3.88	150.82	4.08	130.46	3MS4	0.09	110.91	0.20	233.10	0.01	78.36
RH01	1.03	180.47	0.92	139.10	0.90	141.29	MH4	0.72	31.42	0.20	290.53	0.10	303.15
O1	2.72	194.08	19.82	160.90	19.15	148.69	MV4	0.09	84.83	0.15	19.51	0.06	313.02
MP1	1.57	286.63	0.22	184.41	0.31	216.82	2MSK4	0.15	288.60	0.71	252.82	0.09	158.86
M1	0.66	200.04	0.72	178.87	0.79	158.64	M4	1.95	47.71	0.92	200.78	0.24	100.53
CH11	0.40	177.73	0.24	221.70	0.22	179.70	SN4	0.27	55.40	0.09	247.15	0.04	139.41
PI1	0.66	221.77	0.44	148.08	0.38	124.91	3MK4	0.23	224.89	0.26	16.58	0.06	321.23
P1	9.34	215.72	8.01	73.60	8.62	143.30	MS4	1.82	75.66	0.17	265.26	0.34	242.46
S1	1.07	101.63	0.91	48.30	0.53	315.56	MK4	0.65	66.59	0.36	311.81	0.06	275.91
K1	31.26	217.30	25.27	179.56	23.70	165.43	2MSN4	0.13	330.79	0.15	358.51	0.08	138.14
PS11	0.65	237.27	0.50	197.83	0.14	279.22	S4	0.26	116.75	0.47	299.22	0.72	186.44
PH11	0.40	183.12	0.44	161.75	0.22	171.05	SK4	0.10	160.27	0.30	265.53	0.10	78.98
THE1	0.07	201.61	0.22	214.20	0.28	172.47	3MK5	1.19	28.28	0.17	79.53	0.11	238.15
J1	1.55	244.80	1.28	194.59	1.21	172.00	MS	0.44	169.03	0.05	195.91	0.10	12.12
SO1	1.53	2.89	0.43	244.56	0.14	197.21	MS05	1.20	54.82	0.16	124.12	0.13	304.12
001	0.97	279.64	0.78	212.67	0.72	191.05	3M05	1.47	59.67	0.17	136.18	0.15	276.67
2MN2S2	0.31	186.39	0.09	3.25	0.06	203.72	MSK5	0.87	101.93	0.08	195.54	0.03	148.21
3MSK2	0.16	264.09	0.18	245.99	0.04	144.42	2(MN)S6	0.30	254.36	0.03	79.94	0.10	74.64
3MS2S2	0.29	264.33	0.07	744.68	0.12	252.80	3MS56	0.55	252.91	0.03	221.76	0.11	42.45
002	0.19	207.50	0.30	56.23	0.15	110.13	4MK6	0.51	221.79	0.04	182.60	0.78	190.99
MNS2	0.42	0.88	0.51	173.02	0.20	137.66	4MS6	0.94	262.42	0.03	219.38	0.12	297.76
MVS2	0.33	48.39	0.27	208.45	0.08	109.90	2MSNK6	0.10	316.18	0.02	257.61	0.30	232.56
2N2	2.65	260.36	1.07	158.02	0.26	91.76	2MN6	1.53	139.05	0.06	82.57	2.21	133.67
MU2	0.57	8.89	1.52	170.13	0.59	122.63	2MV6	0.55	105.50	0.03	111.20	0.56	156.77
SNK2	0.33	243.34	0.05	209.29	0.12	99.28	3MSK6	0.30	321.04	0.05	239.99	0.47	334.78
MA2	0.43	130.75	0.18	47.24	0.15	15.73	M6	3.23	148.25	0.08	108.87	3.55	197.09
N2	18.76	266.82	7.63	150.49	4.54	86.37	MSN6	0.84	182.41	0.02	330.18	0.95	172.08
MU2	3.55	271.03	1.55	151.20	0.90	86.35	4MN6	0.71	300.01	0.01	261.55	0.73	42.49
0P2	0.88	261.44	0.91	33.69	0.14	160.73	2MS6	4.24	182.72	0.13	151.57	3.50	252.59
MA2	0.92	174.97	1.23	103.73	0.31	266.68	2MK6	1.30	183.06	0.04	122.70	0.42	290.08
M2	102.11	278.36	48.80	153.94	33.92	104.69	3MSN6	0.91	5.85	0.60	327.95	0.62	88.20
MB2	0.51	109.60	1.17	89.11	0.37	214.53	MK6L6	0.23	207.16	0.04	224.52	0.29	193.14
MKS2	1.14	7.88	0.78	272.65	0.06	244.38	2SM6	1.06	237.99	0.02	181.98	0.27	241.64
LAM2	1.44	305.09	0.86	148.23	0.34	106.25	MSK6	0.75	218.05	0.04	183.17	0.12	51.84
L2	4.08	307.97	1.69	170.31	0.95	137.37	2(MN)S8	0.09	14.63	0.01	224.86	0.05	267.23
2S2K2	0.32	37.53	0.45	238.43	0.04	8.61	3MN8	0.18	330.60	0.01	297.45	0.04	285.37
T2	2.42	303.07	1.43	156.14	1.08	148.03	M8	0.19	12.27	0.02	103.62	0.03	158.24
S2	41.84	309.13	24.03	183.30	15.78	143.13	2MSV8	0.22	33.78	0.02	184.52	0.01	266.08
02	0.42	132.11	0.21	132.11	0.17	142.18	3MS8	0.37	22.44	0.01	98.52	0.09	102.41
K2	12.03	307.06	6.45	179.42	4.28	135.98	3MK8	0.17	102.84	0.01	95.88	0.01	334.59
MSV2	0.34	336.29	0.05	50.52	0.02	54.43	MSNK8	0.06	185.15	0.01	92.69	0.04	62.38
MSH2	0.63	137.42	0.32	262.91	0.03	254.56	2(MS)S8	0.20	91.50	0.01	215.10	0.07	351.26
KJ2	0.54	88.02	0.44	3.69	0.21	322.84	2MSK8	0.12	141.60	0.02	97.69	0.06	8.60
2S2H2	1.22	168.00	0.11	323.47	0.03	59.06	4MS10	0.48	27.88	0.01	187.67	0.03	250.88
SKH2	0.34	186.79	0.02	295.16	0.16	60.01	2MS10	0.13	73.10	0.02	204.30	0.03	323.67
M03	0.14	84.89	0.08	290.94	0.11	232.74	4MS12	0.01	298.70	0.01	72.56	0.03	10.37
M03	0.27	150.73	0.04	80.07	0.17	337.46	5MS12	0.08	206.69	0.01	69.77	0.02	44.22
2MP3	0.17	213.11	0.03	71.87	0.02	283.83	4MS212	0.10	263.12	0.01	238.93	0.01	147.14

る場合、ほぼ2~3時間以下の周期成分を平滑化する前処理を行なっている。従って、追加分潮のうち1/8, 1/10, 1/12日周潮等の高次分潮は意味を持たない。これら分潮の中で注目すべきものは、M₂分潮の季節変動を表わすMA₂, MB₂両分潮である。そこで両分潮について水路部所管の25か所の験潮所及び横浜市所管の横浜験

潮所の1974年の観測資料から両分潮を算出した。この結果を第3表に示す。両分潮ともに振幅が顕著なのは、浦河、東京港(芝浦)・千葉・横須賀・横浜及び神湊(八丈島)であり、MA₂のみでは徳山、MB₂のみでは佐世保・大泊・名瀬・巖原の各港である。両分潮の振幅、遅角の安定度を調べるため鹿島の3か年について算出した結果、第4表に示されるように両分潮の振幅は年により変動している。なお両分潮については、長周期分潮の項で検討する。

Table 3 Amplitude and phase lag of MA₂, MB₂-constituents at various places obtained from the data in 1974

CONSTITUENTS PLACE	MA ₂		MB ₂		CONSTITUENTS PLACE	MA ₂		MB ₂	
	H(CM)	K(DFG.)	H(CM)	K(DFG.)		H(CM)	K(DFG.)	H(CM)	K(DFG.)
MONBETU	0.47	202.98	0.46	163.29	KURE	0.94	163.83	0.27	73.30
URAKAWA	1.57	292.42	1.44	159.51	HIROSIMA	0.92	174.97	0.51	109.60
MURORAN	0.31	266.68	0.37	234.52	TOKUYAMA	1.19	201.85	0.81	75.34
OMINATO	0.65	114.71	0.56	39.69	OITA	0.58	208.24	0.69	97.10
KAMAISI	0.35	282.31	0.13	195.10	MOZI	0.13	258.71	0.65	297.95
TIBA	1.30	92.61	1.22	90.05	HAKATA	0.51	348.62	0.85	272.36
SIBAURA	1.23	103.73	1.17	89.11	SASERO	0.64	170.24	1.26	196.69
YOKOHAMA	1.05	97.68	1.08	94.64	ODOMARI	0.59	84.23	1.21	34.68
YOKOSUKA	1.12	101.39	1.08	91.64	NISINOOMOTE	0.63	2.67	0.31	32.08
KOZU SIMA	0.85	30.21	0.77	9.36	NAZE	0.76	311.12	1.50	306.33
MIYAKE SIMA	0.85	40.80	0.49	337.19	IZUHARA	0.70	43.59	1.14	250.42
HATIZYO SIMA	1.15	282.72	1.14	167.62	MAIZURU	0.14	109.69	0.17	22.71
MINAMI-IZU	0.72	58.57	0.47	36.26	AWA SIMA	0.63	331.23	0.72	102.77

Table 4 Amplitude and phase lag of MA₂, MB₂-constituents at KASIMA

PLACE	KASIMA		KASIMA		KASIMA	
DURATION	JAN. 2 1976 - JAN. 4 1977		JAN. 6 1977 - JAN. 9 1978		JAN. 11 1978 - JAN. 14 1979	
CONSTITUENTS	H(CM)	K(DFG.)	H(CM)	K(DFG.)	H(CM)	K(DFG.)
MA ₂	0.40	358.69	0.74	342.27	0.21	353.37
MB ₂	0.11	64.38	0.51	48.45	0.25	165.59

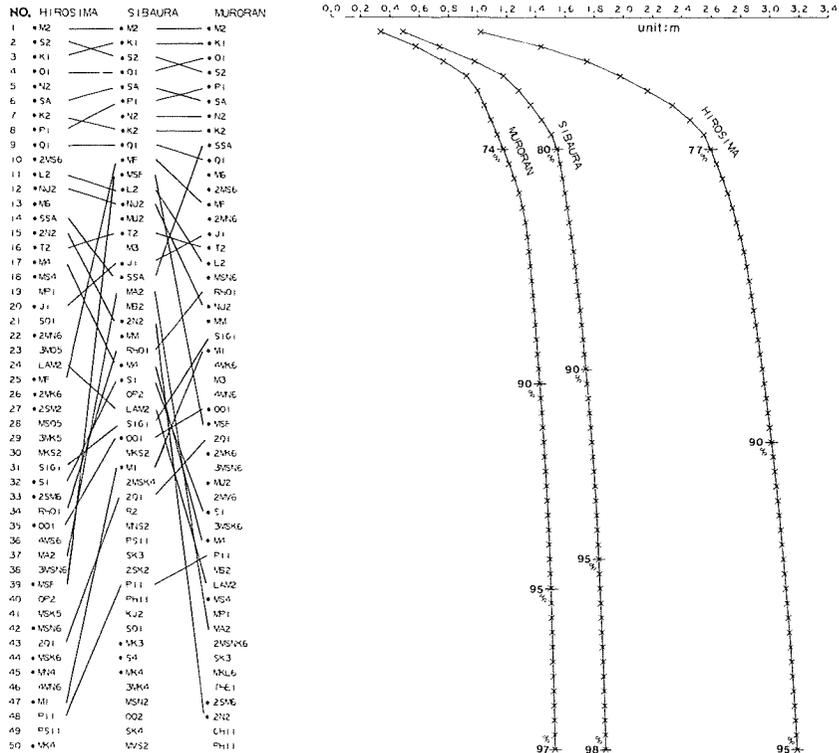


Figure 1 The order of amplitude magnitude until 50 ranks and accumulative lines of amplitude magnitude within 110-constituents

第1図に3地点における110分潮の振幅の大きい順に50番目までのリスト, その振幅累積和の図表及び全振幅和(広島港: 336.34cm, 東京港(芝浦): 193.58cm, 室蘭港: 159.17cm)に対する百分率を示してある。各地点により上位9分潮(M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , K_2 , P_1 , N_2 , S_a , Q_1)を除いて順位が大きく異なり, 広島港で1/5日周潮群, 東京港(芝浦)で1/3日周潮群が, また, 広島, 室蘭の各港では1/6日周潮群が上位に位置付けされている。一方, ・印を付した分潮は現在潮汐予報に使用している分潮であるが, 場所によって, これら特徴的な分潮は必ずしも含まれていない。

3. 潮位に及ぼす気圧の影響

(1) 潮位と気圧の関係

日平均潮位と日平均気圧*を用いて潮位に対する気圧の影響について調べた。潮位に対する気圧の影響あるいは長周期調和定数を日平均潮位から求める場合, 次の補正を必要とする(中野 1975)。今, ある分潮のd日の0時から23時までの潮高の日平均値(y)は

$$y = \frac{fH \sin 12\sigma}{24 \sin \sigma/2} \cos \{ (V_0 + u) + \sigma(24d + 11.5) - \kappa \}$$

ここで, f , $(V_0 + u)$, σ , H , κ はそれぞれ天文因数, 天文引数, 角速度, 振幅, 遅角である。この式から分潮の角速度が15 (deg./hour) の整数倍の角速度を有する分潮は, 日平均潮位に全く影響を及ぼさないが, それ以外の分潮で振幅の大きい分潮はある周期で日平均潮位に影響を与える(Hirosi Endo 1968)。その分潮としては, 振幅からみて, M_2 , O_1 , N_2 の3分潮を考えればよい。これら短周期分潮の振幅を1cmとして, 日平均潮位に及ぼす係数及び周期は次のとおりである。従って, 単純に日平均潮位を描画すると長周期分潮の周期とこれら短周期分潮の影響による周潮とが合成された曲線に気圧変動等が反映されたものになる。よって, 以

Constituents	Coefficient (cm)	Period (day)
M_2	0.03516	14.77
O_1	0.07537	7.10
N_2	0.05445	9.61

下に述べる日平均潮位は上述の補正を施したものである。

広島, 東京(芝浦), 室蘭の各港の1974年の日平均潮位と日平均気圧により, 日々の各々の差を用いて回帰直線($y = ax + \beta$; x , y : 気圧, 潮位差, a : 気圧係数)を求めた結果は次のとおりである。この結果から, 一般に

	α	β	Coefficient of correlation	Contribution ratio
Hirosima	-1.05	-0.02	0.80	0.64
Sibaura	-1.04	-0.01	0.86	0.75
Muroran	-1.09	-0.02	0.93	0.87

いわれるように, 気圧が1mb上昇(下降)すれば潮位は約1cm下降(上昇)することが分かる。気圧を補正した日平均潮位を気圧補正潮位(L)とすれば, 次式で求めることができる。

$$L = l - \alpha(P - P_0)$$

ここで、 l , α , P , P_0 はそれぞれ日平均潮位, 気圧係数, 日平均気圧, 永年平均気圧である。永年平均気圧は1969年から1973年までの5か年間の資料から、広島港：1015.5mb, 東京港(芝浦)：1013.9mb, 室蘭港：1012.9mbとした。

第2図に3地点の日平均潮位, 日平均気圧, 日平均予報潮位, 気圧補正潮位及び(日平均潮位一日平均予報潮位：A)と(気圧補正潮位一日平均予報潮位：B)を示し、A及びBの月別偏差を第3図に示す。ただし、各地点の潮位は基本水準面(DL)上の値に修正してある。当然、気圧補正を行うことにより偏差の幅を縮小させるが、まだほかの気象・海況等の影響が残っている。

(2) 日平均潮位, 気圧補正潮位等からの長周期分潮の算出

1か年間の日平均潮位, 日平均気圧及び気圧補正潮位から最小自乗法を用いて長周期分潮の調和定数を求めた(赤木ほか 1967)。この結果を第5表に示す。ただし、気圧の遅角は 180° 反転してある。

日平均潮位から求められた長周期分潮の調和定数は毎時潮高値から得られた調和定数とほぼ同値である。当

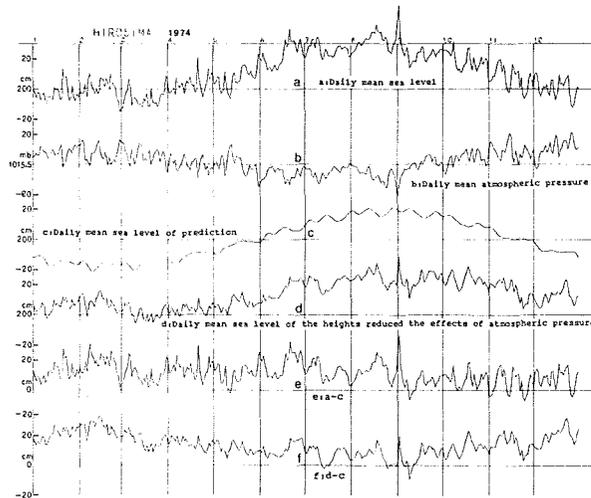


Figure 2-1 Curves of daily mean sea level, daily mean atmospheric pressure, etc.

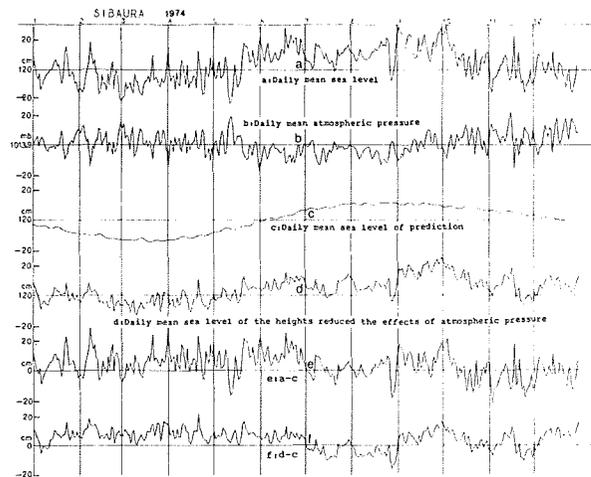


Figure 2-2 Curves of daily mean sea level, daily mean atmospheric pressure, etc.

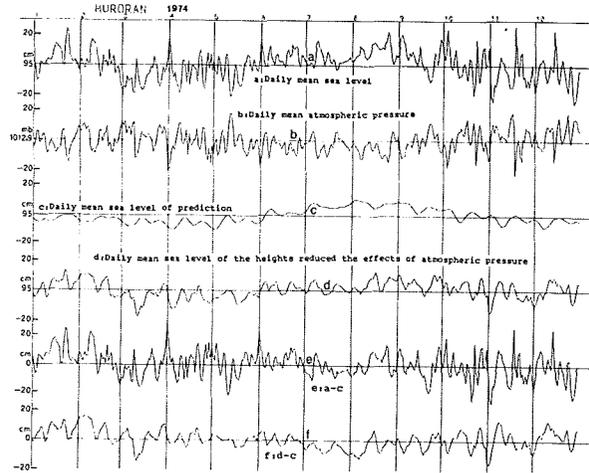


Figure 2-3 Curves of daily mean sea level, daily mean atmospheric pressure, etc.

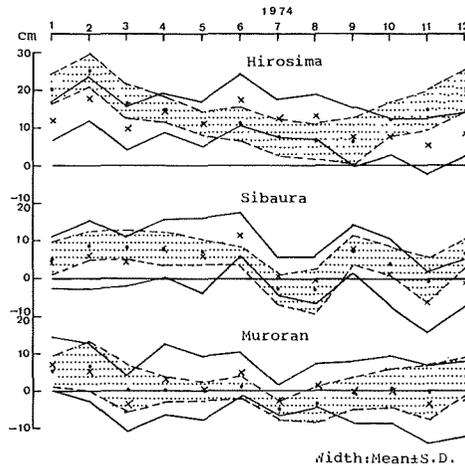


Figure 3 Monthly deviation curves

- : (daily mean sea level) - (daily mean sea level of predictions)
- × : Mean values
- : (daily mean sea level of the heights reduced the effects of atmospheric pressure) - (daily mean sea level of predictions)
- : Mean values

然、気圧補正潮位から求められた長周期分潮の振幅は、気圧変動を反映している日平均潮位から求められた振幅より小さくなっている。気圧変動には半日周期、日周期等の周期成分は考えられないので日平均気圧をそのまま調和分解すると、 M_m 、 MS_f 、 M_f の各分潮の振幅は日平均潮位から求められた振幅とほぼ同程度の値が得られている。このことは、これら分潮の振幅は気圧変動にほぼ支配されていることを意味している。また注目されるのは、 S_a 、 S_{sa} 分潮である。 S_a 分潮は一種の気象潮であって、海水の上層の密度変化、海面の気圧変化によるものとされており、毎年振幅・位相が変化する。 S_{sa} 分潮は天文潮にもあるが気圧変化等によって生じるものが大部分と考えられている。しかし、上述の結果から両分潮は太陽の位置変化による天文潮成分と気圧変動等による気象潮成分の合成されたものと考えられることができる。気圧補正潮位と日平均気圧及び潮汐表のそれぞれの S_a 、 S_{sa} 分潮を用いた3地点の季節変化を示した第4図により明瞭である。また、第3図の(気圧補

Table 5 Harmonic constants of long-period constituents obtained from (a) the heights of daily mean sea level (b) the values of daily mean atmospheric pressure (c) tidal heights reduced the effects of atmospheric pressure in 1974, and(d) harmonic constants of long-period constituents adopted in Tide tables.

		Hirosima		Sibaura		Muroran	
		H(cm)	κ (deg.)	H(cm)	κ (deg.)	H(cm)	κ (deg.)
a	S _a	17.25	141.91	10.52	147.26	4.57	143.18
	S _{sa}	2.95	268.87	1.25	246.03	4.26	260.90
	M _m	0.29	131.94	0.88	46.69	0.80	158.17
	MS _f	0.92	5.37	1.80	43.49	0.66	47.38
	M _f	1.35	320.40	2.19	21.44	2.34	331.59
b	S _a	8.56	107.19	4.93	102.50	3.25	100.54
	S _{sa}	1.48	274.82	2.04	259.30	1.33	260.57
	M _m	0.57	331.08	0.67	337.30	0.49	275.44
	MS _f	0.93	4.59	1.18	51.94	1.23	86.37
	M _f	1.49	333.61	1.93	354.54	2.18	10.36
c	S _a	11.32	167.44	7.83	173.60	3.10	188.46
	S _{sa}	1.50	263.05	0.87	98.57	2.92	260.25
	M _m	0.85	144.84	0.90	90.88	1.11	134.94
	MS _f	0.02	147.76	0.60	33.53	0.84	296.77
	M _f	0.36	213.72	0.99	83.29	1.51	266.85
d	S _a	18.08	152.65	12.08	168.73	5.85	153.29
	S _{sa}	1.00	336.86	1.80	198.99	2.88	271.44
	M _m	1.82	238.94	0.54	117.94	2.16	196.03
	MS _f	0.78	267.67	0.10	119.65	1.50	81.09
	M _f	1.24	205.95	0.35	152.53	1.21	186.76

正潮位-日平均予報潮位)の月別偏差が冬期に正方向、夏期に負方向の弓状を呈しているのは、長周期分潮に天文潮成分と気象潮成分が合成されていることによる。このように長周期分潮は気象(特に気圧)の影響により変動することが理解される。

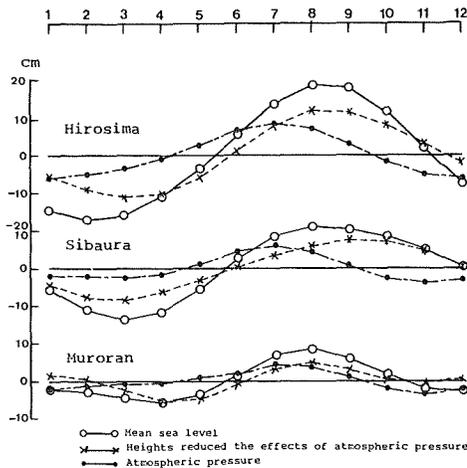


Figure 4 Seasonal change curves

ここで前述したMA₂, MB₂分潮とS_a分潮との関係について述べる。1か年の観測資料を1か月ごとに調和分解を行ない、M₂分潮の振幅をフーリエ解析すると1年周期の変動が認められ、その振幅とMA₂, MB₂分潮との振幅は良く一致すると報告されている(筋野ほか 1982)。またMA₂, MB₂分潮の引数がそれぞれM₂+S_a,

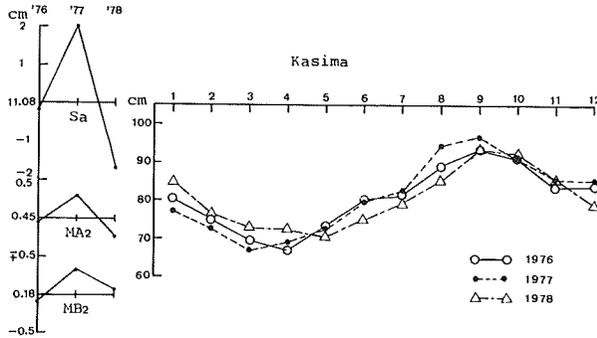


Figure 5 Variations of amplitude magnitude of Sa, MA₂, MB₂-constituents and monthly mean sea level at Kasima.

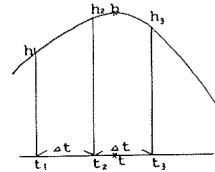
M₂-S_aであることから、M₂分潮の季節変動を意味している。第5図に示すようにMA₂、MB₂両分潮ともS_a分潮の振幅変化に対応して変化する。このことは、特にS_a分潮の構成成分のうち気象潮成分の振幅変動に対応して変動するものと推察される。

4. 多数の調和定数を用いての潮汐予報精度の検討

今、 Δt 時間ごとに得られた観測値、予報値を用いて高低潮時刻及びその潮高を求めるには、二次式の近似を用い、次式で算出される。時間間隔 Δt は観測値で1時間、予報値では15分を用いた。

$$\text{潮高}(h) = h_2 - \frac{(h_1 - h_3)^2}{8(h_1 - 2h_2 + h_3)}$$

$$\text{潮時}(t) = t_2 + \frac{h_1 - h_3}{2(h_1 - 2h_2 + h_3)} \cdot \Delta t$$



潮汐表では高低潮時刻及び潮高を予報しているので、高低潮時刻及び潮高のそれぞれの観測値と予報値の偏差を1974年1月から4月までの広島・東京(芝浦)・室蘭の3港について、次の二通りの方法で計算してみた。

- i. (観測値-各予報値)の偏差
- ii. (気圧補正潮位-各予報値)の偏差

ここで言う気圧補正潮位とは、前述の気圧係数(α)を用いて、その日の毎時潮高を補正したものである。また、予報計算に用いる調和定数を算出した調和分解の期間は、次のとおりである。

	短周期分潮	長周期分潮 (S _a , S _{sa})
広島	1964年1月から1か年	1964年から1980年 } 月平均水面値から求めた値
芝浦	1963年9月から1か年	
	1965年1月から1か年	
室蘭	1968年6月から1か年	1967年から1980年

これらの期間から60分潮(P₆₀)を算出し、潮汐表作成に用いるのはこのうち38分潮**(P₃₈)である。110分潮(P₁₁₀)は各地点ともに1974年の1か年である。長周期分潮については(i)の場合、各予報値とも上記期間で得られた調和定数を用い、(ii)の場合、S_a、S_{sa}、M_m、MS_r、M_rの各分潮は各予報値とも気圧補正潮位から得られた調和定数すなわち、天文潮成分を用いた。

その偏差の結果を第6表に示す。表の上段には(観測値-予報値)の偏差を、下段には(気圧補正潮位-予報値)の偏差、潮高及び潮時の偏差の平均値(Mean)、標準偏差(S.D.)及び最大偏差(Max.(正), Min.(負))を表わしている。

Table 6 Departure of the heights and times of high and low water between observation and prediction from Jan. to Apr. in 1974

		Heights (cm)					Times (min.)			
		Mean	S.D.	Max.	Min.	coefficient of variation	Mean	S.D.	Max.	Min.
H I R O S I M A	P ₃₈	14.0	9.3	62	-10	4.65	-1.0	9.0	41	-31
		11.7	8.0	51	-10	4.00	-1.0	9.1	40	-31
	P ₆₀	14.0	8.7	63	-9	4.35	-1.4	8.3	25	-39
		11.7	7.3	52	-9	3.65	-1.4	8.5	25	-39
	P ₁₁₀	13.6	7.7	59	-5	3.85	-0.7	6.8	25	-28
		11.2	6.4	48	-6	3.20	-0.8	7.0	25	-28
S I B A U R A	P ₃₈	6.9	9.6	47	-19	8.00	-7.2	16.6	80	-67
		4.2	6.8	30	-16	5.67	-7.4	17.2	79	-103
	P ₆₀	6.9	9.4	46	-15	7.83	-7.5	15.5	57	-66
		4.2	6.6	31	-13	5.50	-7.7	16.1	57	-87
	P ₁₁₀	5.9	8.7	37	-17	7.25	-0.9	13.7	65	-65
		3.2	6.3	28	-16	5.25	-1.1	14.2	65	-65
M U R O R A N	P ₃₈	3.2	10.8	38	-22	11.37	5.2	37.1	140	-199
		1.1	7.9	36	-22	8.32	7.5	35.4	147	-131
	P ₆₀	3.2	10.7	36	-21	11.26	4.6	38.0	139	-193
		1.1	7.7	34	-22	8.11	7.7	35.1	146	-164
	P ₁₁₀	2.8	10.2	35	-22	10.74	0.8	35.9	135	-180
		0.8	7.7	35	-19	8.11	3.1	32.3	135	-122

S.D.: Standard Deviation

基本水準面上平均水面までの高さを Z_0 と称し、日本では M_2, S_2, K_1, O_1 の各分潮の振幅和にほぼ等しく、広島・東京(芝浦)・室蘭の各港の Z_0 値はそれぞれ200cm, 120cm, 95cmである。変化係数とは $S.D./Z_0 \times 100$ (%)で表わされ各地点を一律に比較できる数量のことである。この結果、潮高及び潮時の偏差は P_{38}, P_{60}, P_{110} ともに潮汐表に明記している精度をほぼ満足していることがわかる。また、分潮数を増やすことによって若干の精度向上を望めることもわかる。(気圧補正潮位-予報値)の偏差は依然として生じているが、この偏差の原因として、平均水面の変動、日平均気圧を用いての毎時潮高の補正、気圧以外の気象及び海況変動等が考えられる。平均水面の変動は前述したように各観測値を基本水準面上の値に換算した結果、各地点の基本水準面決定時の平均水面と1974年の平均水面との間に広島港： $+11.3$ cm, 東京港(芝浦)： $+3.5$ cm, 室蘭港： $+0.9$ cmの差異があることによる。

室蘭港では、約4時間周期で全振幅30~40cmの海面変動がかなりの頻度で生じている。第6図は数日間の子報値と観測値を描いたものである。この海面変動発生期について風との対応を図の下段に示す。ただし、風速はその日に観測された最大風速で、風向はそのときのものである。

このように、室蘭港に吹き込む風すなわち、風向がNNW~Wの範囲で、風速が6~7m/sec以上である程度速吹したときに、このような海面変動が生じる傾向にある。この統計期間が冬期であることから、上記の風向・風速が生じ易く、この短周期海面変動が子報誤差を大きくしているものと推察される。

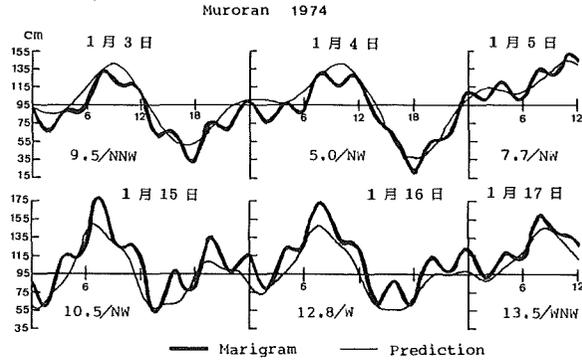


Figure 6 Mariagram and prediction curves at MURORAN

5. まとめ

(1) 潮汐調和定数について短期・長期観測資料から得られた結果を検討すると、次に要約される。

i. 短周期分潮は、短期(1か年:369日)の資料から相合周期の長い分潮を除き精度の高い調和定数が得られる。

ii. 長周期分潮(S_a , S_{sa} , M_m , MS_t , Mr)は天文潮成分と気象潮成分の合成と考えられ、気象潮成分の変動により年ごとに振幅が変動する。また、 MA_2 , MB_2 分潮もその影響を受け同様な振幅変動をする。

iii. M_2 , N_2 , O_1 分潮の影響を除いた日平均潮位値を用いて長周期分潮の調和定数を得ることが可能で、その成果は予報に十分使用できる。

iv. 調和分解の期間を数年と言った長期間を用いることにより、高精度の調和定数を得ることができる。

(2) 潮汐予報精度について

潮汐表に明記してある予報精度は十分保たれているが、予報精度の向上には、次の事柄を考慮すべきものと考えられる。

i. 予報精度は、使用分潮の振幅和にほぼ比例して向上する。

ii. 振幅の大きい分潮の順序は、主要9分潮を除き海域により大きく異なり、かつ1/3, 1/5, 1/6日周潮等の浅海潮効果に海域特性がみられる。

iii. 長周期分潮(S_a , S_{sa} , M_m , MS_t , Mr)及び M_2 分潮の季節変化を表わす MA_2 , MB_2 分潮は、気圧変動により振幅変化を生じるので、数年の平均値を使用すべきである。

潮汐表の作成にあたっては、1/8, 1/10, 1/12日周潮群を除く多数の分潮を使用することによって、現時点での可能な限りの精度の高い予報値を提供することができると考えられる。

6. あとがき

吟味された天文潮、浅海潮及び長周期分潮を用いての予報値でもなお潮位偏差を生じる。この原因は、前述のように長周期分潮は平均的なものを用いざるを得ないことで、日々の潮高にはその時点での気圧と平均気圧との偏差による変動部分や風向、風速の効力及び海況変動等によるものと思われる。異常潮位等による災害防止の資料として、より高精度の短期潮位予報の提供を図るには、このような海域特性の解明に取組むことが要と思われる。

終わりに、使用した計算機は水路部編暦課に設置してある日本電気㈱のACOSシステム700によった。また、この報告をまとめるにあたり、有益なご教示・助言をいただいた海象課長二谷頼男氏及び小田卷実氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- 赤木 登・佐藤 静・多賀谷魁威 1967：長周期潮 S_a , S_{sa} を求める簡便法とその成果，水路部研究報告第3号，13-23ページ
- Hirosi Endo 1968：Spectral Analysis of Daily Mean Sea Level Records Along The Coast of Japan, *Rep. Hydrogr. Res. Japan*, No. 4, pp. 5-19
- 中野猿人 1975：潮汐学（復刻版），生産技術センター，東京
- Sangbok D. Hahn 1980：Tidal Harmonic Constituents at Busan, *Annu. Rev. of the Korean Natn. Committee for IUGG*, PP. 1-6
- 小田卷 実 1981：最小自乗法による潮汐・潮流の短期調和分解の一つの試み，水路部研究報告第16号，71-82ページ
- 筋野義三・桑木野文章・小田卷 実・伊藤友孝・熊谷 武 1982：マラッカ・シンガポール海峡の潮汐と潮流，水路部研究報告第17号，257-287ページ

* 気象月報 1974（気象庁）

**

** 38分潮である理由は、昭和30年に購入した42分潮を使用する潮候推算器に基づいており、 M_8 , M_{10} , M_{12} , $2SM_6$ の4分潮が算出され得なかったことによる。38分潮の構成は、次のとおりである。

S_a , S_{sa} , M_m , MS_f , M_f , Q_1 , O_1 , M_1 , P_1 , S_1 , K_1 , J_1 , OO_1 , $2N_2$, μ_2 , N_2 , ν_2 , M_2 , L_2 , T_2 , S_2 , K_2 , $2SM_2$, MO_3 , MK_3 , MN_4 , M_4 , SN_4 , MS_4 , MK_4 , S_4 , $2MN_6$, M_6 , MSN_6 , $2MS_6$, $2MK_6$, $2SM_6$, MSK_6

Appendix Harmonic constituents, with arguments and speeds

Constituents	Argument			Angular speed per mean solar hour	
	V	u	f	Expression	Speed (deg./hour)
Sa	h	0	1	η	0.0410686
Ssa	2h	0	1	2η	0.0821373
Mm	s-p	0	Mm	$\sigma - \tilde{\omega}$	0.5443747
MSf	-M ₂	-M ₂	M ₂	S ₂ -M ₂	1.0158958
Mf	2s	Mf	Mf	2σ	1.0980331
2Q ₁	-4s+h+2p+270°	O ₁	O ₁	$\theta + \eta - 4\sigma + 2\tilde{\omega}$	12.8542862
σ_1	-4s+3h+270°	O ₁	O ₁	$\theta + 3\eta - 4\sigma$	12.9271398
Q ₁	-3s+h+p+270°	O ₁	O ₁	$\theta + \eta - 3\sigma + \tilde{\omega}$	13.3986609
ρ_1	-3s+3h-p+270°	O ₁	O ₁	$\theta + 3\eta - 3\sigma - \tilde{\omega}$	13.4715145
O ₁	-2s+h+270°	O ₁	O ₁	$\theta + \eta - 2\sigma$	13.9430356
MP ₁	M ₂ -P ₁	M ₂	M ₂	M ₂ -P ₁	14.0251729
M ₁	-s+h+90°	M ₁	M ₁	$\theta + \eta - \sigma$	14.4920521
χ_1	-s+3h-p+90°	J ₁	J ₁	$\theta + 3\eta - \sigma - \tilde{\omega}$	14.5695476
π_1	-2h+192°	0	1	$\theta - 2\eta + \tilde{\omega}_1$	14.9178647
P ₁	-h+270°	0	1	$\theta - \eta$	14.9589314
S ₁	180°	0	1	θ	15.0000000
K ₁	h+90°	K ₁	K ₁	$\theta + \eta$	15.0410686
ψ_1	2h+168°	0	1	$\theta + 2\eta - \tilde{\omega}_1$	15.0821353
ϕ_1	3h+90°	0	1	$\theta + 3\eta$	15.1232059
θ_1	s-h+p+90°	J ₁	J ₁	$\theta - \eta + \sigma + \tilde{\omega}$	15.5125897
J ₁	s+h-p+90°	J ₁	J ₁	$\theta + \eta + \sigma - \tilde{\omega}$	15.5854433
SO ₁	-O ₁	-O ₁	O ₁	S ₂ -O ₁	16.0569644
OO ₁	2s+h+90°	OO ₁	OO ₁	$\theta + \eta + 2\sigma$	16.1391017
2MN2S ₂	2M ₂ +N ₂	3M ₂	M ₂ ³	2M ₂ +N ₂ -2S ₂	26.4079379
3MSK ₂	3M ₂ -K ₂	3M ₂ -K ₂	M ₂ ³ ×K ₂	3M ₂ -(S ₂ +K ₂)	26.8701753
3M2S ₂	3M ₂	3M ₂	M ₂ ³	3M ₂ -2S ₂	26.9523127
OQ ₂	O ₁ +Q ₁	2O ₁	O ₁ ²	O ₁ +Q ₁	27.3416964
MNS ₂	M ₂ +N ₂	2M ₂	M ₂ ²	M ₂ +N ₂ -S ₂	27.4238337
M ν S ₂	M ₂ + ν_2	2M ₂	M ₂ ²	M ₂ + ν_2 -S ₂	27.4966873
2N ₂	-4s+2h+2p	M ₂	M ₂	$2(\theta + \eta) - 4\sigma + 2\tilde{\omega}$	27.8953548
μ_2	-4s+4h	M ₂	M ₂	$2\theta - 4\sigma$	27.9682084
SNK ₂	N ₂ -K ₂	M ₂ -K ₂	M ₂ ×K ₂	S ₂ +N ₂ -K ₂	28.3575922
NA ₂	N ₂ -Sa	M ₂	M ₂	N ₂ -Sa	28.3986609
N ₂	-3s+2h+p	M ₂	M ₂	$2(\theta + \eta) - 3\sigma + \tilde{\omega}$	28.4397295
ν_2	-3s+4h-p	M ₂	M ₂	$2\theta + 4\eta - 3\sigma - \tilde{\omega}$	28.5125831
OP ₂	O ₁ +P ₁	O ₁	O ₁	O ₁ +P ₁	28.9019669
MA ₂	M ₂ -Sa	M ₂	M ₂	M ₂ -Sa	28.9430356

Constituents	Argument			Angular speed per mean solar hour	
	V	u	f	Expression	Speed (deg./hour)
M ₂	-2s + 2h	M ₂	M ₂	2(θ + η) - 2σ	28.9841042
MB ₂	M ₂ + Sa	M ₂	M ₂	M ₂ + Sa	29.0251728
MKS ₂	M ₂ + K ₂	M ₂ + K ₂	M ₂ × K ₂	M ₂ + K ₂ - S ₂	29.0662415
λ ₂	-s + p + 180°	M ₂	M ₂	2θ - σ + ω̄	29.4556253
L ₂	-s + 2h - p + 180°	L ₂	L ₂	2(θ + η) - σ - ω̄	29.5284789
2SK ₂	-K ₂	-K ₂	K ₂	2S ₂ - K ₂	29.9178627
T ₂	-h + 282°	0	1	2θ - η + ω̄ ₁	29.9589333
S ₂	0	0	1	2θ	30.0000000
R ₂	h + 258°	0	1	2θ + η - ω̄ ₁	30.0410667
K ₂	2h	K ₂	K ₂	2(θ + η)	30.0821373
MS ν ₂	M ₂ - ν ₂	0	M ₂ ²	M ₂ + S ₂ - ν ₂	30.4715211
MSN ₂	M ₂ - N ₂	0	M ₂ ²	M ₂ + S ₂ - N ₂	30.5443747
KJ ₂	K ₁ + J ₁	K ₁ + J ₁	K ₁ × J ₁	K ₁ + J ₁	30.6265120
2SM ₂	-M ₂	-M ₂	M ₂	2S ₂ - M ₂	31.0158958
SKM ₂	K ₂ - M ₂	K ₂ - M ₂	K ₂ × M ₂	S ₂ + K ₂ - M ₂	31.0980331
MQ ₃	M ₂ + Q ₁	M ₂ + O ₁	M ₂ × O ₁	M ₂ + Q ₁	42.3827651
MO ₃	M ₂ + O ₁	M ₂ + O ₁	M ₂ × O ₁	M ₂ + O ₁	42.9271398
2MP ₃	2M ₂ - P ₁	2M ₂	M ₂ ²	2M ₂ - P ₁	43.0092770
M ₃	-3s + 3h + 180°	$\frac{3}{2}$ M ₂	(M ₂) ^{3/2}	3(θ + η) - 3σ	43.4761563
SO ₃	O ₁	O ₁	O ₁	S ₂ + O ₁	43.9430356
MK ₃	M ₂ + K ₁	M ₂ + K ₁	M ₂ × K ₁	M ₂ + K ₁	44.0251729
2MQ ₃	2M ₂ - Q ₁	2M ₂ - O ₁	M ₂ ² × O ₁	2M ₂ - Q ₁	44.5695475
SK ₃	K ₁	K ₁	K ₁	S ₂ + K ₁	45.0410686
2MNS ₄	2M ₂ + N ₂	3M ₂	M ₂ ³	2M ₂ + N ₂ - S ₂	56.4079380
3MK ₄	3M ₂ - K ₂	3M ₂ - K ₂	M ₂ ³ × K ₂	3M ₂ - K ₂	56.8701754
3MS ₄	3M ₂	3M ₂	M ₂ ³	3M ₂ - S ₂	56.9523127
MN ₄	M ₂ + N ₂	2M ₂	M ₂ ²	M ₂ + N ₂	57.4238337
Mν ₄	M ₂ + ν ₂	2M ₂	M ₂ ²	M ₂ + ν ₂	57.4966873
2MSK ₄	2M ₂ - K ₂	2M ₂ - K ₂	M ₂ ² × K ₂	2M ₂ + S ₂ - K ₂	57.8860711
M ₄	M ₂ + M ₂	2M ₂	M ₂ ²	M ₂ + M ₂	57.9682084
SN ₄	N ₂	M ₂	M ₂	S ₂ + N ₂	58.4397295
3MN ₄	3M ₂ - N ₂	2M ₂	M ₂ ²	3M ₂ - N ₂	58.5125831
MS ₄	M ₂	M ₂	M ₂	M ₂ + S ₂	58.9841042
MK ₄	M ₂ + K ₂	M ₂ + K ₂	M ₂ × K ₂	M ₂ + K ₂	59.0662415
2MSN ₄	2M ₂ - N ₂	M ₂	M ₂	2M ₂ + S ₂ - N ₂	59.5284789
S ₄	0	0	1	S ₂ + S ₂	60.0000000
SK ₄	K ₂	K ₂	K ₂	S ₂ + K ₂	60.0821373
3MK ₅	3M ₂ - K ₁	3M ₂ - K ₁	M ₂ ³ × K ₁	3M ₂ - K ₁	71.9112441
M ₅	$\frac{1}{2}(5M_2)$	$\frac{5}{2}M_2$	M ₂ ^{5/2}	$\frac{1}{2}(5M_2)$	72.4602605

Constituents	Argument			Angular speed per mean solar hour	
	V	u	f	Expression	Speed (deg./hour)
MSO ₅	M ₂ + O ₁	M ₂ + O ₁	M ₂ × O ₁	M ₂ + S ₂ + O ₁	72.9271398
3MO ₅	3M ₂ - O ₁	3M ₂ - O ₁	M ₂ ³ × O ₁	3M ₂ - O ₁	73.0092771
MSK ₅	M ₂ + K ₁	M ₂ + K ₁	M ₂ × K ₁	M ₂ + S ₂ + K ₁	74.0251728
2(MN) ₆	2M ₂ + 2N ₂	4M ₂	M ₂ ⁴	2M ₂ + 2N ₂ - S ₂	84.8476674
3MNS ₆	3M ₂ + N ₂	4M ₂	M ₂ ⁴	3M ₂ + N ₂ - S ₂	85.3920422
4MK ₆	4M ₂ - K ₂	4M ₂ - K ₂	M ₂ ⁴ × K ₂	4M ₂ - K ₂	85.8542795
4MS ₆	4M ₂	4M ₂	M ₂ ⁴	4M ₂ - S ₂	85.9364168
2MSNK ₆	2M ₂ + N ₂ - K ₂	3M ₂ - K ₂	M ₂ ³ × K ₂	2M ₂ + S ₂ + N ₂ - K ₂	86.3258006
2MN ₆	2M ₂ + N ₂	3M ₂	M ₂ ³	2M ₂ + N ₂	86.4079380
2M ^ν ₆	2M ₂ + ^ν ₂	3M ₂	M ₂ ³	2M ₂ + ^ν ₂	86.4807915
3MSK ₆	3M ₂ - K ₂	3M ₂ - K ₂	M ₂ ³ × K ₂	3M ₂ + S ₂ - K ₂	86.8701754
M ₆	3M ₂	3M ₂	M ₂ ³	3M ₂	86.9523127
MSN ₆	M ₂ + N ₂	2M ₂	M ₂ ²	M ₂ + S ₂ + N ₂	87.4238337
4MN ₆	4M ₂ - N ₂	3M ₂	M ₂ ³	4M ₂ - N ₂	87.4966873
2MS ₆	2M ₂	2M ₂	M ₂ ²	2M ₂ + S ₂	87.9682084
2MK ₆	2M ₂ + K ₂	2M ₂ + K ₂	M ₂ ² × K ₂	2M ₂ + K ₂	88.0503457
3MSN ₆	3M ₂ - N ₂	2M ₂	M ₂ ²	3M ₂ + S ₂ - N ₂	88.5125832
MKL ₆	M ₂ + K ₂ + L ₂	M ₂ + K ₂ + L ₂	M ₂ × K ₂ × L ₂	M ₂ + K ₂ + L ₂	88.5947204
2SM ₆	M ₂	M ₂	M ₂	2S ₂ + M ₂	88.9841042
MSK ₆	M ₂ + K ₂	M ₂ + K ₂	M ₂ × K ₂	M ₂ + S ₂ + K ₂	89.0662415
2(MN) ₈	2M ₂ + 2N ₂	4M ₂	M ₂ ⁴	2M ₂ + 2N ₂	114.8476674
3MN ₈	3M ₂ + N ₂	4M ₂	M ₂ ⁴	3M ₂ + N ₂	115.3920422
M ₈	4M ₂	4M ₂	M ₂ ⁴	4M ₂	115.9364169
2MSN ₈	2M ₂ + N ₂	3M ₂	M ₂ ³	2M ₂ + S ₂ + N ₂	116.4079380
3MS ₈	3M ₂	3M ₂	M ₂ ³	3M ₂ + S ₂	116.9523127
3MK ₈	3M ₂ + K ₂	3M ₂ + K ₂	M ₂ ³ × K ₂	3M ₂ + K ₂	117.0344499
MSNK ₈	M ₂ + N ₂ + K ₂	2M ₂ + K ₂	M ₂ ² × K ₂	M ₂ + S ₂ + N ₂ + K ₂	117.5059710
2(MS) ₈	2M ₂	2M ₂	M ₂ ²	2M ₂ + 2S ₂	117.9682084
2MSK ₈	2M ₂ + K ₂	2M ₂ + K ₂	M ₂ ² × K ₂	2M ₂ + S ₂ + K ₂	118.0503457
4MS ₁₀	4M ₂	4M ₂	M ₂ ⁴	4M ₂ + S ₂	145.9364168
3M2S ₁₀	3M ₂	3M ₂	M ₂ ³	3M ₂ + 2S ₂	146.9523127
4MSN ₁₂	4M ₂ + N ₂	5M ₂	M ₂ ⁵	4M ₂ + S ₂ + N ₂	174.3761463
5MS ₁₂	5M ₂	5M ₂	M ₂ ⁵	5M ₂ + S ₂	174.9205210
4M2S ₁₂	4M ₂	4M ₂	M ₂ ⁴	4M ₂ + 2S ₂	175.9364168

1) $\theta, \eta, \sigma, \bar{\omega}, \bar{\omega}_1$ 地球子午線に対する平均太陽の角速度: $\theta = 15.000000000$ (deg./hour)太陽の平均角速度: $\eta = 0.0410686390$ (")太陽の平均角速度: $\sigma = 0.5490165304$ (")太陽近地点の平均角速度: $\bar{\omega} = 0.0046418367$ (")太陽近地点の平均角速度: $\bar{\omega}_1 = 0.0000019612$ (")

2) s, h, p, N

太陰の平均黄経 : $s = 277.025 + 129.38481(Y-1900) + 13.17640(D+l)$

太陽の平均黄経 : $h = 280.190 - 0.23872(Y-1900) + 0.98565(D+l)$

太陰の近地点の平均黄経 : $p = 334.385 + 40.66249(Y-1900) + 0.11140(D+l)$

太陰の昇交点の平均黄経 : $N = 259.157 - 19.32818(Y-1900) - 0.05295(D+l)$

ここで、Yは西暦年

DはY年の1月1日からの経過日数

lは $\frac{1}{4}(Y-1901)$ の整数部分.

3) f, u

	Coefficients for each items combining "f"				Coefficients for each items combining "u"		
	1	cos N	cos 2N	cos 3N	sin N	sin 2N	sin 3N
M _m	1.0000	-0.1300	0.0013	0.0000	0.00	0.00	0.00
M _f	1.0429	0.4135	-0.0040	0.0000	-23.74	2.68	-0.38
O ₁	1.0089	0.1871	-0.0147	0.0014	10.80	-1.34	0.19
K ₁	1.0060	0.1150	-0.0088	0.0006	-8.86	0.68	-0.07
J ₁	1.0129	0.1676	-0.0170	0.0016	-12.94	1.34	-0.19
OO ₁	1.1027	0.6504	0.0317	-0.0014	-36.68	4.02	-0.57
M ₂	1.0004	-0.0373	0.0002	0.0000	-2.14	0.00	0.00
K ₂	1.0241	0.2863	0.0083	-0.0015	-17.74	0.68	-0.04
L ₂	$f \cos u = 1 - 0.2505 \cos 2p - 0.1102 \cos(2p - N) - 0.0156 \cos(2p - 2N) - 0.0370 \cos N$ $f \sin u = -0.2505 \sin 2p - 0.1102 \sin(2p - N) - 0.0156 \sin(2p - 2N) - 0.0370 \sin N$						
M ₁	$f \cos u = 2 \cos p + 0.4 \cos(p - N)$ $f \sin u = \sin p + 0.2 \sin(p - N)$						

資料：海洋観測指針，1963：日本海洋学会