

低低潮の出現する時刻について[†]

中村 梓^{*1}, 土屋主税^{*2}, 堀之内龍一^{*3}

The time of lower low water[†]

Azusa NAKAMURA^{*1}, Chikara TSUCHIYA^{*2}, and Ryoichi HORINOUCHE^{*3}

Abstract

In many waters around Japan, it is well known that, among the low tides that occur twice a day during the spring tide, the tide level is lower in the middle of the night in the winter and in the daytime in the summer. We pointed out the approximate time of the lower low tide and showed its spatial distribution in Japan using the tide prediction equation. It is shown that, on the Pacific coasts, the lower low tide of the spring tide appears in the winter nighttime and in the summer daytime, although on the Japan Sea coasts, the lower low tide of the spring tide appears in the winter daytime and in the summer nighttime. It is also shown that this tendency does not depend on the year.

1 はじめに

日本の広い地域で一日 2 回生じる低潮のうち、最も低い低潮（以降、低低潮とする）が冬季は夜間に、夏季は昼間に現れる地域が多いことは、海に精通している人々にはよく知られている。特に、推算潮位が海図基準面を下回る「マイナス潮位」は、冬季の夜間に発生しやすい。冬季にマイナス潮位が発生しやすいのは、水温低下に伴う海水の体積の減少による潮位の年周期変化のためである。マイナス潮位が発生しやすい海域においては、普段見られない浅瀬の干出への乗揚げ事故等を防止するために、各管区本部海洋情報部が広報をしている。

一方、低低潮については出現する時刻が潮汐調和定数により決定されているだろうことは予想さ

れるものの、これまで低低潮の時刻と海域の傾向に着目して解説されたことはないようである。そこで、本報告では、低低潮に関する理解向上を目的とし、冬季と夏季の大潮における低低潮の出現する時刻を海域毎に整理した。潮汐調和定数は気象庁のウェブサイトに掲載されているものを使用した。

2 低低潮と日周潮成分

日潮不等は、約 12 時間で 1 往復する潮汐（以後、半日周潮成分という）に約 24 時間で 1 往復する潮汐（以後、日周潮成分という）が加わることで生じる。半日周潮成分によって 1 日 2 回の低潮が生じ、そのうち日周潮成分が負になる時間帯に現れるものが低低潮となる。

[†] Received September 29, 2020; Accepted November 4, 2020

* 1 大洋調査課 Offshore Surveys Division

* 2 沿岸調査課 Coastal Surveys Division

* 3 総務部政務課 Policy and Legal Affairs Division

日本付近での主な日周潮成分は K1 と O1 であり、同程度の振幅を持っている。このことから、K1 と O1 の位相を潮汐推算式から導くことで低低潮の出現する時刻を整理することができる。なお、位相とは、繰り返される現象の一周期のうち、ある特定の局面のことを指す。

2.1 各分潮の潮位が最低となる時刻

ある地点 S における時刻 t の潮位 $h_s(t)$ は次の式で推算される（海上保安庁, 1992）。

$$h_s(t) = \sum_i f_i H_{is} \cos(\omega_i t + V_{0i} + u_i - \kappa_{is}) \quad (1) \text{ 式}$$

(1) 式において、添え字の i は各分潮を表し、 ω_i はその角速度、 V_{0i} は天文潮の位相、 f_i と u_i は 18.6 年周期の振幅と遅角の修正項をそれぞれ表している。なお、遅角は天体の周期的な運動に対する分潮の振動の遅れ具合のことを指す。地点 S における分潮 i の振幅と遅角はそれぞれ H_{is} と κ_{is} で与えられている。分潮 i の位相を示したのが Fig. 1 である。

ある分潮が負となる位相は 90 度から 270 度までで、180 度のときがその分潮の最低潮位となる。(1) 式から、ある分潮の潮位が最低となる時刻 \tilde{T}_i は (2) 式となる。

$$\tilde{T}_i = \frac{180^\circ - (V_{0i} + u_i - \kappa_{is})}{\omega_i} \quad (2) \text{ 式}$$

時刻 \tilde{T}_i は分潮、推算日に依存する ω_i 、 $V_{0i} + u_i$ と、その地点の調和定数である κ_{is} により決まる。 $V_{0i} + u_i$ はその地点の経度にも依存するものであ

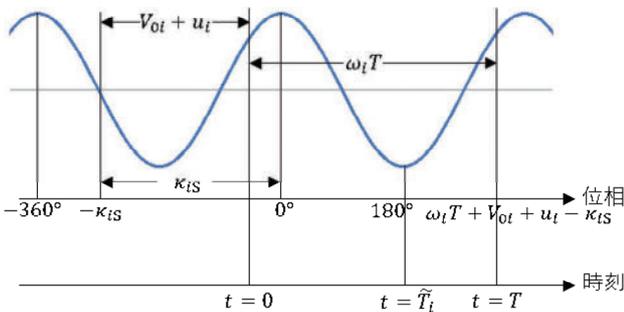


Fig. 1. Phase of a harmonic constituent i .

図 1. ある分潮 i の位相

る。

2.2 日周潮成分が低潮となる時刻

日周潮の潮位 $h_{1s}(t)$ は、振幅の大きな 2 つの分潮 K1 と O1 の合成波（以下、K1 と O1 の合成波は合成波と記載する）からなるため、(1) 式から以下の式が導かれる。

$$h_{1s}(t) = f_{K1} H_{K1s} \cos(\omega_{K1} t + V_{0K1} + u_{K1} - \kappa_{K1s}) + f_{O1} H_{O1s} \cos(\omega_{O1} t + V_{0O1} + u_{O1} - \kappa_{O1s})$$

ここで $p = f_{K1} H_{K1s}$ 、 $q = f_{O1} H_{O1s}$ 、 $c = V_{0K1} + u_{K1} - \kappa_{K1s}$ 、 $d = V_{0O1} + u_{O1} - \kappa_{O1s}$ とすると、

$$\begin{aligned} h_{1s}(t) &= p \cos(\omega_{K1} t + c) + q \cos(\omega_{O1} t + d) \\ &= (p+q) \cos\left(\frac{\omega_{K1} + \omega_{O1}}{2} t + \frac{c+d}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega_{K1} - \omega_{O1}}{2} t + \frac{c-d}{2}\right) \\ &\quad - (p-q) \sin\left(\frac{\omega_{K1} + \omega_{O1}}{2} t + \frac{c+d}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega_{K1} - \omega_{O1}}{2} t + \frac{c-d}{2}\right) \\ &= E \cos\left(\frac{\omega_{K1} + \omega_{O1}}{2} t + \frac{c+d}{2} + F\right) \end{aligned} \quad (3) \text{ 式}$$

となり、K1 と O1 の平均の角速度を持つ正弦波に形式上変形できる。ここで合成波の振幅 E は、

$$E = \left((p+q)^2 \cos^2\left(\frac{\omega_{K1} - \omega_{O1}}{2} t + \frac{c-d}{2}\right) + (p-q)^2 \sin^2\left(\frac{\omega_{K1} - \omega_{O1}}{2} t + \frac{c-d}{2}\right) \right)^{\frac{1}{2}},$$

合成波の位相の修正項 F は

$$F = \text{atan}\left(\frac{p-q}{p+q} \tan\left(\frac{\omega_{K1} - \omega_{O1}}{2} t + \frac{c-d}{2}\right)\right) \text{ とおいた。}$$

ω_{K1} と ω_{O1} は、その値の差はわずかであるため、

$$\frac{\omega_{K1} - \omega_{O1}}{2} \cong 0 \text{ とおける。従って、合成波の位相の}$$

修正項 F は $\tilde{F} = \text{atan}\left(\frac{p-q}{p+q} \tan\frac{c-d}{2}\right)$ のように近似できる。合成波の位相の修正項の近似値 \tilde{F} を用いて、合成波の潮位が最低となる時刻 \tilde{T}_i は、

$$\tilde{T}_i = \frac{360 - (c+d+2\tilde{F})}{\omega_{K1} + \omega_{O1}} \quad (4) \text{ 式と書ける。}$$

2.3 合成波の位相について

(4) 式を用いて日本各地の日周潮の潮位が最低となる時刻を求める前に、合成波の位相の性質を

修正項 F の近似無しについて考察をする。(3) 式のコサインの中には、時間に依存する項が二つある。すなわち、合成波の形式上の角速度による項 $\frac{\omega_{K1} + \omega_{O1}}{2}t$ と、位相の修正項 F 中にある $\frac{\omega_{K1} - \omega_{O1}}{2}t$ である。

まず、合成波の形式上の角速度 $\frac{\omega_{K1} + \omega_{O1}}{2}$ は、

M2 分潮の角速度のちょうど半分の値である。これは、 F に時間依存性がなければ、合成波と M2 分潮の位相は常に一致することになる。

次に、合成波の位相の修正項 F の時間変化を

考える。 F に含まれる時間変化項は $G = \frac{\omega_{K1} - \omega_{O1}}{2}t$

$+ \frac{c-d}{2}$ である。 F はもともと $(p-q) \sin(G)$ を正弦、 $(p+q) \cos(G)$ を余弦とするような位相である。この正弦、余弦のいずれも G で時間変

化し、360 度変化するのに $\frac{\omega_{K1} - \omega_{O1}}{2}$ の逆数である 27.32 日かかる。従って、 F が 360 度変化するのにかかる時間も 27.32 日であることが容易に想像できる。これを示すため、東京の調和定数を用い、2020 年 1 月 1 日を $t=0$ として、24 時間ごとに t を増加させて F を青点で、 G を橙点で描いたのが Fig. 2 である。 F も G も 27.32 日で 360 度増

合成波の位相の修正項の時間変化

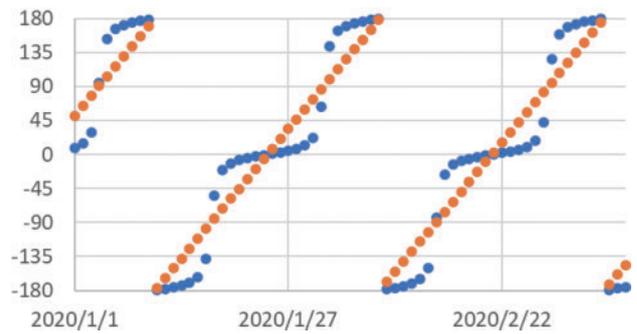


Fig. 2. The time series of the correction term, F for the the synthetic wave phase, and its simplification G , in Tokyo (see the text for details of F and G). The blue and orange dots represent F and G respectively.

図 2. 東京における合成波の位相の修正項 F と、 F を単純化した G の時間変化 (F と G の詳細は本文参照)。青色の点で F 、橙色の点で G を表した。

加している。なお、 F は 0 度付近と ± 180 度付近に現れ、そのあいだにはほとんど現れない。

ここで、大潮は 29.53 日ごとに現れることから、大潮と F が同位相となるのは 365.25 日ごととなる。このことから、大潮における一日 2 回の低潮の現れる時間が、夏季と冬季で昼夜逆転することが明らかとなる。

3 日本各地の日周潮が最低となる時刻

Fig. 3 は冬と夏の大潮にあたる 2020 年 1 月 11 日と 7 月 5 日の東京の推算潮位である。それぞれ

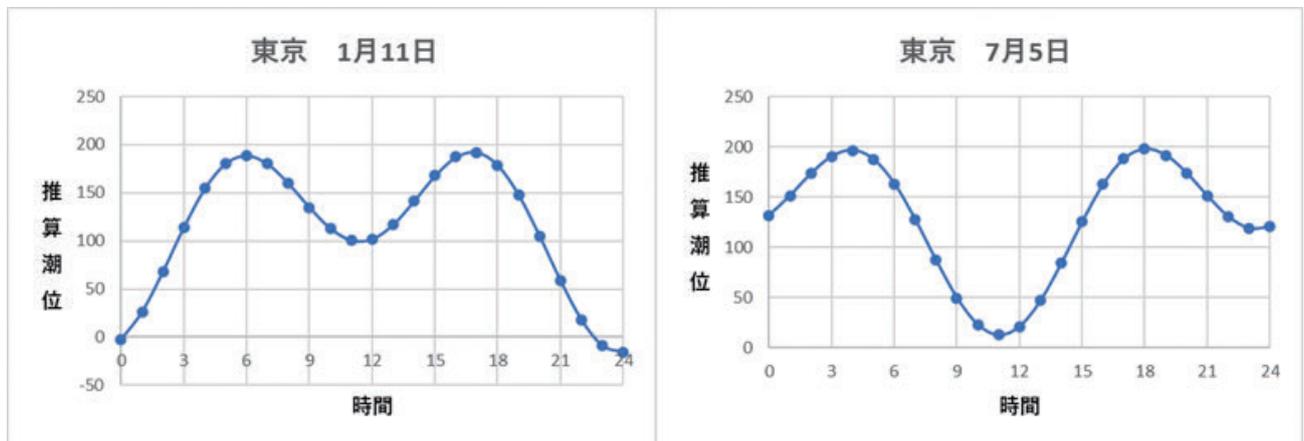


Fig. 3. Tide predictions in Tokyo on January 11th and July 5th, 2020.

図 3. 2020 年 1 月 11 日及び 7 月 5 日における東京の推算潮位

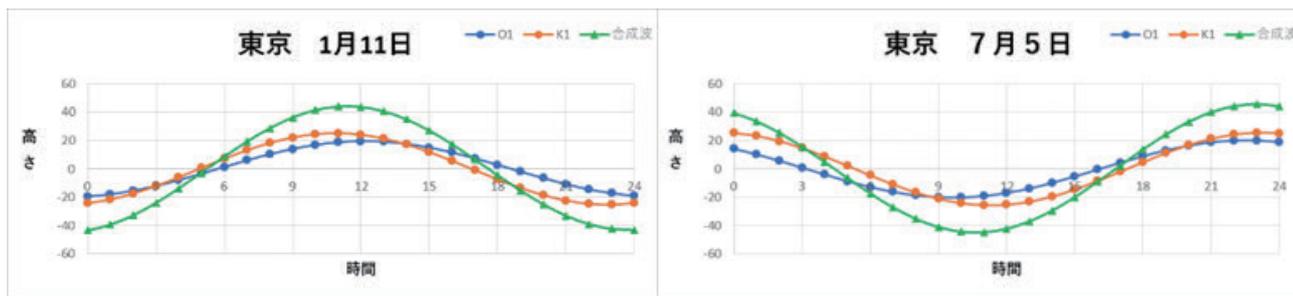


Fig. 4. Tide predictions for constituents K1 and O1 and the synthetic wave in Tokyo on January 11th and July 5th, 2020.
 図4. 2020年1月11日及び7月5日における東京のK1, O1及び合成波の推算値

夜間と昼間の低潮が低いことがわかる。Fig. 4には、K1とO1の24時間の推算値と(4)式から導いた合成波を示す。1月11日には、K1とO1の最低潮位はそれぞれ22時50分、01時03分に現れ、合成波の最低潮位は23時02分に現れる。一方、7月5日にはK1とO1の最低潮位はそれぞれ11時18分、9時38分に現れ、合成波の最低潮位は10時39分に現れる。なお、Fig. 4に作図したK1とO1の重ね合わせの潮位の最低となる時刻は、1月11日は23時44分、7月5日は10時38分となっている。(4)式で $\frac{\omega_{K1} - \omega_{O1}}{2}t$ をゼロとしたが、この近似は1日後には無視できない大きさになるようである。しかし、合成波の最低潮位の現れる時刻は、1日2回ある低潮が低低潮であるか高い低潮であるかの指標を与えるものである。すなわち、最低潮位の時刻そのものよりも、合成波が負偏差の時間帯が重要である。このため、合成波の最低潮位が現れる時刻は、前後数時間の幅で、最低潮位が現れる時間帯を示す意味合いを持つことに注意して、その結果を論じることとする。

実際、Fig. 3は単純に60分潮の和による作図で、その最低潮位は潮汐表によれば、1月11日は23時47分、7月5日は11時03分に現れる。(4)式で与えられる合成波の最低潮位が現れる時刻との差は1時間程度である。

Fig. 5とFig. 6は2020年1月11日と7月5日の70カ所の験潮所における合成波の最低潮位の出現時間帯の分布である。Figs. 5, 6から、太平

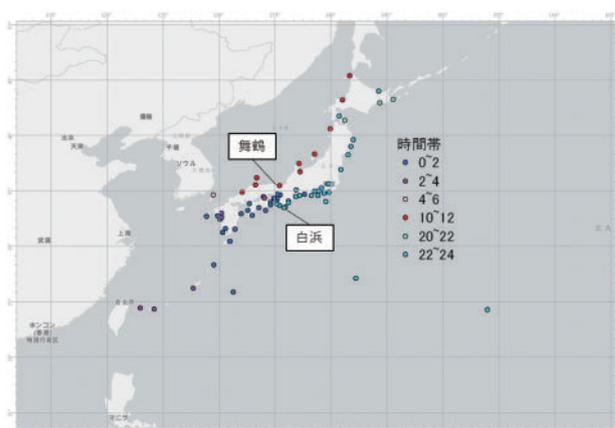


Fig. 5. The appearance time for the lower tide of synthetic wave at 70 locations in Japan on January 11th, 2020.

図5. 2020年1月11日の全国70カ所における合成波の最低潮位出現時間帯

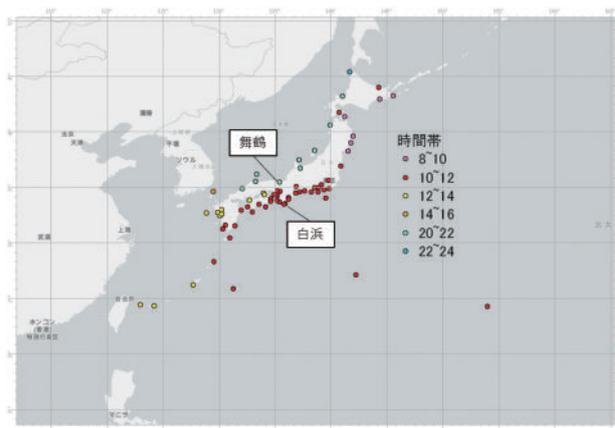


Fig. 6. The appearance time for the lower tide of synthetic wave at 70 locations in Japan on July 5th, 2020.

図6. 2020年7月5日の全国70カ所における合成波の最低潮位出現時間帯

洋側では冬季は夜間、夏季は昼間に低低潮が生じるが、日本海側では逆転する傾向があることがわかる。

この日本海側の低低潮の時刻は、日本海側の K1 と O1 の遅角の値を反映したものである。ともに経度 135 度 23 分である日本海側の舞鶴と太平洋側の白浜の K1 と O1 の振幅と遅角は Table 1 の通りである。

Table 1. Amplitude and Phase of K1 and O1 at Maizuru and Shirahama.

表 1. 舞鶴と白浜の K1 と O1 の振幅と遅角

地名	K1振幅	O1振幅	K1遅角	O1遅角
舞鶴	5.22	5.35	342.31	314.42
白浜	21.91	17.00	189.01	165.28

舞鶴では、振幅が小さく、遅角は太平洋側の白浜と比較し、大きな差がある。1月11日の舞鶴では10時18分に合成波の最低潮位が出現し、白浜では23時58分に出現する。7月5日の舞鶴では20時52分に合成波の最低潮位が出現し、白浜では10時44分に出現する。

4 過去 10 年の結果

3章で冬季、夏季の大潮における全国70カ所の験潮所での合成波の最低潮位の出現時間帯を示したのは2020年の1年分についてのみであった。2.3節で、合成波の位相は、大潮の周期の波と365.25日ごとに同位相になることを示した。このため、夏と冬の大潮の低低潮の出現時刻は、毎年2020年と同様となることが想像できる。しかし、今回の結果が年に依存しないことを示すため、時間帯の傾向ごとに各海域の代表的な験潮所を選択し、過去10年に遡って冬季、夏季の大潮における合成波の最低潮位の出現する時刻を Table 2 及び Table 3 にまとめた。代表的な験潮所は、稚内、宮古、東京、白浜、那覇、対馬比田勝、舞鶴を採用した。これをみても、合成波の最低潮位の出現時刻、つまり低低潮出現時刻は毎年ほぼ大きな変化がないことがわかる。

Table 2. The time for the lowest height of the synthetic wave in the winter spring tides of 2010 – 2020 in Wakkanai, Miyako, Tokyo, Shirahama, Naha, Tsushima Hidakatsu and Maizuru.

表 2. 稚内、宮古、東京、白浜、那覇、対馬比田勝、舞鶴における2010年から2020年の冬の大潮の合成波の最低潮位出現時刻

冬季採用日	稚内	宮古	東京	白浜	那覇	対馬	舞鶴
2020年1月11日	11:32:53	22:05:35	23:02:56	23:58:03	2:00:08	5:19:58	10:18:53
2019年1月22日	12:39:42	22:15:28	23:11:21	0:06:30	2:08:02	5:42:51	10:36:55
2018年1月4日	12:34:48	23:02:45	23:59:09	0:54:21	2:56:01	6:24:56	11:22:00
2017年1月14日	12:53:03	22:28:09	23:24:05	0:19:20	2:20:47	5:54:24	10:50:24
2016年1月26日	13:07:45	22:32:46	23:26:39	0:22:07	2:22:37	6:20:15	11:07:35
2015年1月7日	13:09:59	22:43:18	23:38:53	0:34:10	2:35:27	6:12:57	11:07:46
2014年1月17日	12:39:19	22:10:04	23:05:00	0:00:16	2:01:21	5:46:22	10:37:47
2013年1月28日	12:56:25	22:16:03	23:08:37	0:04:07	2:04:07	6:20:25	10:57:34
2012年1月10日	12:56:29	22:28:11	23:23:05	0:18:13	2:19:25	6:05:36	10:04:17
2011年1月20日	12:24:59	21:55:52	22:50:28	23:45:32	1:46:41	5:36:42	10:23:28
2010年1月31日	11:53:25	22:06:16	22:58:53	23:54:02	1:54:22	6:10:52	9:54:00

Table 3. The time for the lowest height of the synthetic wave in the summer spring tides of 2010 – 2020 in Wakkanai, Miyako, Tokyo, Shirahama, Naha, Tsushima Hidakatsu and Maizuru.

表 3. 稚内、宮古、東京、白浜、那覇、対馬比田勝、舞鶴における2010年から2020年の夏の大潮の合成波の最低潮位出現時刻

夏季採用日	稚内	宮古	東京	白浜	那覇	対馬	舞鶴
2020年7月5日	0:57:29	9:40:08	10:39:27	10:44:16	12:46:56	15:47:50	20:52:42
2019年7月17日	23:17:02	9:51:37	10:49:28	11:44:40	12:56:24	16:10:56	21:12:01
2018年7月27日	22:44:49	9:17:56	10:15:31	11:10:44	12:22:21	15:39:12	20:40:11
2017年7月8日	22:44:12	9:23:30	10:22:47	11:18:14	12:30:16	15:30:23	20:37:45
2016年7月18日	22:13:26	8:50:22	9:49:05	10:44:30	11:56:22	15:01:28	20:07:39
2015年7月30日	22:29:47	8:59:26	9:56:22	10:51:39	12:53:26	15:25:52	20:26:02
2014年7月11日	22:30:30	9:06:05	10:04:26	10:59:47	12:11:33	15:20:24	20:25:07
2013年7月22日	22:46:48	9:15:41	10:12:18	11:07:31	12:18:47	15:45:22	20:43:18
2012年7月4日	23:33:27	10:04:26	11:01:28	11:56:37	13:08:05	16:30:52	21:29:24
2011年7月15日	23:01:00	9:31:11	10:27:55	11:23:01	12:34:26	16:00:32	20:57:11
2010年7月27日	0:09:03	10:26:31	11:20:11	12:15:17	14:16:04	17:27:23	22:08:31

5 春季と秋季の合成波について

佐藤・熊谷(2017)によるとLATは、日本海沿岸では2~4月に、北海道オホーツク沿岸から房総半島までの太平洋岸の多くでは5月に、本州南岸、四国南岸、九州東岸と西岸、南西諸島の大多数で1月にLATが発生すると述べられている。そこで、春季と秋季の低低潮の出現する時刻についての検討も行った。Fig. 7に春季と秋季の大潮にあたる2020年4月8日と10月2日の東京のK1とO1の24時間の推算値を示す。夏季や冬季と違い、K1とO1はほぼ逆位相の関係にあり、日周潮成分は非常にわずかな潮差しか持たない。これはK1とO1の位相が13.66日ごとに一致し、

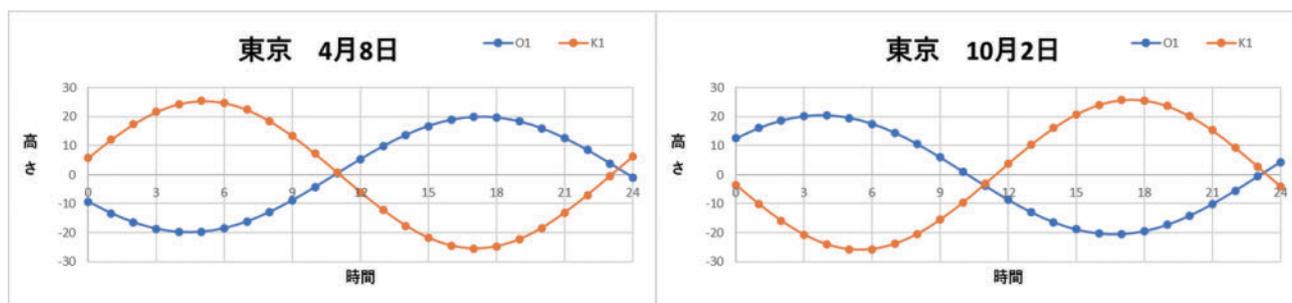


Fig. 7. Tide predictions for constituents K1 and O1 in Tokyo on April 8th and October 2nd, 2020.

図7. 2020年4月8日及び10月2日における東京のK1及びO1の推算値

13.66日周期の変化と大潮の29.53日周期の変化が、半年ごとに同じ位相となるためである。ここには示さないが、解析対象の全ての地点で、夏季と冬季の大潮でK1とO1がほぼ同位相であった。日本周辺のK1とO1の遅角では、春季と秋季の大潮ではK1とO1は逆位相となる。従って、春季と秋季の大潮の低低潮の時刻については、K1とO1の合成波の観点から本稿において正確に論じることは出来ないだろう。

6 まとめ

本報告では、日本の周辺海域における冬季と夏季の低低潮の出現する時刻を潮汐推算から導き、太平洋側では冬季は夜間、夏季は昼間に低低潮が生じるが、日本海側では逆転することを解説した。太平洋側では、冬季の夜間に沿岸を航行する際や船舶を係留する際には、管区海洋情報部からのマイナス潮位に関する情報に注意されたい。

文 献

海上保安庁 (1992) 日本沿岸潮汐調和定数表, 書誌 742.

気象庁 (2020) 潮位表掲載地点一覧表, <https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/suisan/station.php>

佐藤 敏・熊谷 武 (2017) 日本沿岸の Lowest Astronomical Tide について, 海洋情報部研究報告, 54, 84-94.

要 旨

日本周辺の多くの海域では、大潮期の1日2回の低潮のうち、冬季は夜中に、夏季は昼間により潮位が低くなることが知られている。潮汐推算の式を整理して、低低潮の出現時刻を概算し、日本全国の低低潮の出現時刻の傾向を示した。その結果、太平洋側では冬季の大潮期には夜中に、夏季の大潮期には昼間に低低潮が発生し、日本海側ではその逆の傾向となることがわかった。また、この傾向が年によらないことも示した。