

潮汐調和分解のための最適観測パターン[†]

伊能康平^{*1}, 土屋主税^{*2}

Optimized observation cycle for the tidal harmonic analysis[†]

Kohei INO^{*1} and Chikara TSUCHIYA^{*2}

Abstract

The Japan Coast Guard observes the tidal time series using the Autonomous Ocean Vehicle (AOV) to precisely determine datum levels. As the AOVs utilize solar energy for their observation equipment, interruptions of observation caused by the power shortage due to decrease in the amount of sunshine in the winter becomes an operational issue. In this paper, we investigate whether short observations during interruptions or prolonged observation are effective to obtain reliable tidal harmonic constants. We found that short observations of more than 24 hours during interruptions or observations from the next year on the same date as the interruption make the tidal harmonic constants close to the value calculated from no missing data. The results of this study can be used as index for deciding the implementation of observation in winter or making plans for observation using AOVs.

1 はじめに

海上保安庁では、外洋に面した自然海岸付近や自記験潮器を設置できない離島において、最低水面を精密に決定するため、自律型海洋観測装置 (Autonomous Ocean Vehicle : AOV) により潮位を観測している。AOV は、米国 Liquid Robotics 社が開発した Wave Glider に複数の観測機器を搭載した海洋観測プラットフォームである (西村・他, 2017; 松永・他, 2018; 伊能・他, 2021)。AOV は太陽光発電により観測機器等の電力を得ることで、無人で燃料を用いずに、オペレーターが設定した海域を自律的に航行しつつ、長期間海象を観測できる。

AOV は機体に搭載された GNSS アンテナの上下動を高精度に決定することで潮位を観測している。GNSS の 1 Hz 観測データは、移動平均による波浪成分の除去や GNSS アンテナ高の補正により、1 時間間隔の水面の地球楕円体高データとして整理される (土屋・他, 2019)。この潮位データを調和分解することで、潮汐由来の周期を持つ振動の振幅と位相、すなわち、各分潮の調和定数を求める。調和分解にはいくつかの方法があるが、海上保安庁では最小二乗法を用いている。算出された調和定数から、天文最低低潮面 (Lowest Astronomical Tide 以下 LAT という) を計算する。LAT は、平均的な気象条件の下で任

[†] Received September 10, 2021; Accepted November 5, 2021

* 1 沿岸調査課 Coastal Surveys Division

* 2 企画課 Administration and Planning Division

意の天文学的条件から予測される最低潮位で、1年間以上の観測から得られる調和定数を用いた19年以上の潮汐推算により算出することとされている（佐藤・熊谷，2017）。

AOVによる観測の問題点として、観測機器の電力を太陽光に依存しているため、曇天・雨天が継続すると、電力不足となることがある。そのような場合は、AOVの航行を制御するために必要な電力を確保するために、観測を中断することがある（伊能・他，2021）。

最小二乗法による調和分解は、原理的にデータに欠測があっても調和定数を算出でき（彦坂・他，1966）、欠測期間の長さに対する調和定数の応答は土屋（2020）で報告されている。土屋（2020）では、欠測のない常設験潮所の1年分の潮位データを用いて、いくつかの欠測パターンに対する調和定数の応答を調べている。欠測パターンとしては間欠的な欠測と連続的な欠測の2つが設定された。間欠的な欠測は、観測期間のうち、10%の期間の欠測が複数回、観測期間を通じて均等に起こるように設定された。具体的には、観測開始時を時間経過0%、終了時を時間経過100%としたときに、時間経過の2～12%を欠測としたものを10%の間欠的な欠測、時間経過の2～12%と52～62%を欠測としたものを20%の間欠的な欠測などとした。連続的な欠測は、欠測期間を10%ずつ延長する設定であった。具体的には、時間経過の2～12%を欠測とした10%の連続的な欠測、時間経過の2～22%を欠測としたものを20%の連続的な欠測などとした。結果として、間欠的に欠測する場合は観測期間全体のうち80%が欠測しても調和定数には変化がほとんどないこと、連続的な欠測の場合は観測期間全体の30%を超えない範囲であれば調和定数には変化がほとんどないことが示された。

本稿では、信頼できる調和定数が得られるAOVの運用方法を検討するため、土屋（2020）と同様に、様々なパターンの欠測を生じさせた常設験潮所の潮位データを調和分解する。欠測の条件としては、30%を超える連続的な欠測の間に3日

間以下のごく短い観測を行う、あるいは、30%を超える連続的な欠測が生じた場合に観測期間を延長することで、欠測のない条件に近い調和定数を得られるか調べた。

2 解析方法

調和分解には横須賀験潮所における1時間間隔の潮位データを使用した。潮位データの期間は、開始時は2013年4月1日0時とし、終了時は2014年4月4日23時から2015年4月4日23時までの間で解析条件により変更した。各解析条件における潮位データの期間は3章で述べる。調和分解のコードは土屋（2020）に記載された、Pythonで記述されたAOV用調和分解プログラムを使用した。なお、AOVデータの調和分解においては、年ごとの変動が大きいSa、Ssa分潮は、近隣の常設験潮所の値を使用している（伊能・他，2021）。この常設験潮所のSa、Ssa分潮は、通常、10年分の観測値を1年ずつ調和分解して得られた10個の値をベクトル平均することで算出され、潮汐表の推算などに利用されている（伊能・土屋，2022）。本稿で行う解析は、AOV観測への応用を念頭に置いたものであるため、AOVデータの調和分解と同じく、Sa、Ssa分潮は潮汐表の推算などに利用されている横須賀験潮所の値とする。

また、AOV用調和分解プログラムにより、調和分解で得られた調和定数から求めた推算値と観測値間の二乗平均誤差の平方根（Root Mean Square Error 以下RMSEという）を算出する。RMSEの算出にあたっては、欠測とした部分についても推算値を算出し、欠測のない観測値データとの差を求めている。最後に、沿岸海象データ処理プログラム（Ver. 5.2）を使用し、各条件のLATを算出した。LATの算出にあたっては今回使用した潮位データが推算期間の中間になるように、2004年から19年間分の潮位を推算した。なお、RMSE及びLATの算出においても、AOVデータを解析する場合と同様に、Sa、Ssa分潮は横須賀験潮所の値を使用する。

3 欠測期間の設定及び結果

3.1 観測期間の30%以上の連続的な欠測

年度初めの4月1日から翌年度の4月4日まで観測を行う場合に、冬季に十分な発電ができない状況が継続することで長期間の欠測が生じることを想定する。観測期間の30%程度の連続的欠測であれば、調和定数はほとんど変化しないことから、30%以上欠測する場合を考える。まず、2013年4月1日から2014年4月4日まで欠測が生じない場合（条件1）、10月15日から2月14日までの4か月間の欠測が生じた場合（条件2）、10月1日から2月28日までの5か月間の欠測が生じた場合（条件3）、9月15日から3月14日の6か月間の欠測が生じた場合で調和分解を行った（条件4）（Fig. 1）。

各条件で得られた調和定数がどれだけ観測値を再現できるかを見るために、観測値と各条件で得られた調和定数による推算値を重ねて表示する（Fig. 2）。欠測がない場合は観測値と推算値が全体的に重なっている。欠測が長くなるにつれて、欠測部分の観測値と推算値に差が生じる。

次に、各条件のRMSE及びLATをTable 1に示す。気象庁験潮所における潮位のRMSEは日本沿岸で全般的に8~12 cm程度と報告されている（近澤・他, 2012）。そこで、本稿では目安として、許容できるRMSEを12 cmとする。

条件1のRMSEは8.84 cmであった。条件2のRMSEは9.17 cm、条件3のRMSEは9.71 cmとなり、やや誤差は拡大したものの、許容できる範囲といえる。条件4のRMSEは12.29 cmとなり、許容できないほどの誤差が生じた。なお、い



Fig. 1. The setting of missing values.

図1. 欠測の設定.

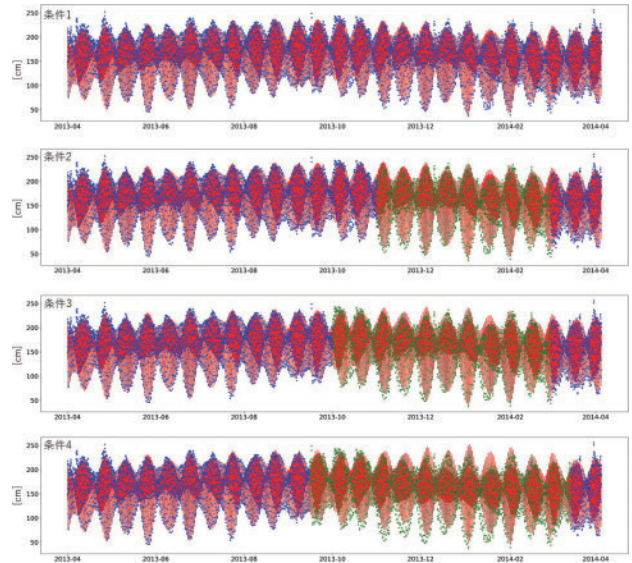


Fig. 2. The observed values and values predicted under each pattern. Blue dots indicate the observed values used for the harmonic analysis. Green dots indicate the observed values set as missing. Red lines indicate the predicted values. The tidal heights are on the zero of the gauge.

図2. 観測値と各条件の推算値. 青点が調和分解に用いた観測値, 緑点が欠測とした観測値, 赤線が推算値を示す. ゼロ位は観測基準面.

Table 1. RMSE and LAT of each pattern. RMSE stands for the root mean square error between observed values without missing periods and predicted values calculated from the harmonic constants. LAT stands for the difference from the mean sea level to the lowest value among the predicted values of the 19-year period. Blue characters indicate values obtained from the pattern without missing periods. Red characters indicate unacceptable value.

表1. 各条件のRMSE及びLAT. RMSEは欠測がない観測期間の観測値と各条件の調和定数から計算された推算値間の二乗平均誤差の平方根を示す. LATは各条件の平均水面から19年分の推算値のうち最低値までの差を示す. 青字は欠測がない条件で得られた数値, 赤字は許容できない条件及び数値をそれぞれ示す.

	条件	RMSE(cm)	LAT(m)
条件1	欠測なし	8.84	-1.29
条件2	4か月間欠測	9.17	-1.34
条件3	5か月間欠測	9.71	-1.31
条件4	6か月間欠測	12.29	-1.28

ずれの条件でも欠測がない条件のLATとの差は5 cm 以内にとどまった。

次に、どの分潮が欠測による誤差の要因となっているかを調べる。観測期間が同一である、欠測がない条件と欠測がある条件間における各分潮の推算値の差は次式であらわされる。なお、以下では欠測がない条件から算出した調和定数を真値と呼ぶこととする。

$$A_{i0}f_i \cos(\omega_i t + V_i + u_i - \kappa_{i0}) - A_{i1}f_i \cos(\omega_i t + V_i + u_i - \kappa_{i1}) \quad \text{式 (1)}$$

ここで、添え字 i は各分潮を表し、 A_{i0} 及び κ_{i0} は真値の振幅及び遅角、 A_{i1} 及び κ_{i1} は欠測がある条件で算出した調和定数の振幅及び遅角、 f_i 及び u_i は太陽の昇降点の18.6年の周期変化に伴う振幅及び遅角の補正項、 ω_i は各分潮の角速度、 t は時刻、 V_i は各分潮の天文引数を示す。

三角関数の加法定理より式 (1) を次のとおり変形する。

$$\begin{aligned} &= A_{i0}f_i \{ \cos(\omega_i t + V_i + u_i) \cos(\kappa_{i0}) + \sin(\omega_i t + V_i + u_i) \sin(\kappa_{i0}) \} - A_{i1}f_i \{ \cos(\omega_i t + V_i + u_i) \cos(\kappa_{i1}) + \sin(\omega_i t + V_i + u_i) \sin(\kappa_{i1}) \} \\ &= f_i \{ \cos(\omega_i t + V_i + u_i) (A_{i0} \cos(\kappa_{i0}) - A_{i1} \cos(\kappa_{i1})) + \sin(\omega_i t + V_i + u_i) (A_{i0} \sin(\kappa_{i0}) - A_{i1} \sin(\kappa_{i1})) \} \end{aligned}$$

さらに、三角関数の合成定理より以下のとおり変形できる。

$$\begin{aligned} &= f_i \sqrt{(A_{i0} \cos(\kappa_{i0}) - A_{i1} \cos(\kappa_{i1}))^2 + (A_{i0} \sin(\kappa_{i0}) - A_{i1} \sin(\kappa_{i1}))^2} \sin(\omega_i t + V_i + u_i + \alpha) \\ &= f_i \sqrt{A_{i0}^2 + A_{i1}^2 - 2A_{i0}A_{i1} \cos(\kappa_{i0} - \kappa_{i1})} \sin(\omega_i t + V_i + u_i + \alpha) \end{aligned}$$

ただし、 α は以下の関係を満たす。

$$\cos \alpha = \frac{A_0}{\sqrt{A_{i0}^2 + A_{i1}^2}} \quad \sin \alpha = \frac{A_1}{\sqrt{A_{i0}^2 + A_{i1}^2}}$$

上式より、欠測がない条件と欠測がある条件間で、各分潮の推算値の差は最大で

$$f_i \sqrt{A_{i0}^2 + A_{i1}^2 - 2A_{i0}A_{i1} \cos(\kappa_{i0} - \kappa_{i1})} \quad \text{となる。}$$

以下では、 f_i を除した、

$\sqrt{A_{i0}^2 + A_{i1}^2 - 2A_{i0}A_{i1} \cos(\kappa_{i0} - \kappa_{i1})}$ を欠測がある条件で算出した調和定数の真値からの差とする。

条件1～4における各分潮の振幅、遅角及び各分潮の真値からの差をTable 2に示す。

欠測期間が長くなるにつれて、隣り合う分潮との周波数差が小さい $P_1 \sim \text{PSI}_1$ 分潮について真値からの差が拡大した。これが欠測により誤差が拡大する主な要因と考えられる。

3.2 長期的な欠測期間中のスポット観測

土屋 (2020) では間欠的な欠測の場合、欠測が全体の80%となっても調和定数がほとんど変化しなかった。これを踏まえ、冬季の中断期間にごく短い間欠的な観測（以下ではスポット観測と呼ぶ）を行うことで、連続的な欠測を間欠的な欠測とし、真値に近い調和定数が得られるか調べる。土屋 (2020) における間欠的な欠測の条件では、ある間欠的な欠測と次の間欠的な欠測間の観測期間は、最短で観測期間全体の2%、すなわち1週間程度と設定されていた。実際の運用に際して、十分な充電ができない冬季に1週間連続した観測を行うことは電力不足のリスクがあるほか、海況によっては安定してデータを取得できないことも考えられる。そこで、より短期間の観測でも調和定数が真値に近づくか検証する必要がある。

3.2.1 毎月のスポット観測

RMSE が許容できない値となった1年間のうち6か月間欠測した場合（条件4）を元に、中断期間中にスポット観測を行う条件を設定した（Fig. 3）。まず、欠測期間中毎月初めに3日間の観測を行った場合（条件5）及び1日間の観測を行った場合（条件6）で調和分解を行った。

スポット観測によりどのように推算値が変化したかを見るために、スポット観測を行わなかった条件4とスポット観測を行ったいくつかの条件の推算値を観測値と重ねて表示する（Fig. 4）。

スポット観測を行う前の条件4に比べて、スポット観測を行った条件では欠測部分の観測値と推算値が合うようになったことが分かる。

各条件のRMSEをTable 3に示す。毎月スポット観測を行った場合、RMSEは許容できる程度まで縮小した。次にスポット観測を行った場合の各分潮の調和定数に着目する。スポット観測を行

Table 2. Harmonic constants of each pattern and the differences from their true value. Red characters indicate the constants with difference over 2 cm from the true value.

表2. 条件1～4における調和定数とその真値からの差. 真値からの差が2 cm以上となった分潮を赤字で示している.

	条件1		条件2			条件3			条件4		
	振幅(cm)	遅角(deg)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)
Sa	8.98	166.54	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00
Ssa	0.96	119.01	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00
Mm	1.59	143.16	1.88	163.87	0.69	0.63	135.34	0.97	1.73	118.97	0.71
MSf	0.35	122.79	0.51	303.40	0.86	0.84	227.81	0.99	0.51	220.93	0.66
Mf	0.23	38.73	1.02	135.99	1.07	1.88	175.75	2.05	1.35	156.07	1.47
2Q1	0.48	132.20	0.48	132.78	0.00	0.46	140.08	0.07	0.58	129.84	0.10
SIG1	0.68	136.70	0.75	146.91	0.15	0.78	154.20	0.24	0.78	159.98	0.31
Q1	3.87	152.03	3.88	150.81	0.08	3.89	152.26	0.03	3.99	150.93	0.14
RHO1	0.82	147.71	0.82	146.91	0.01	0.86	152.81	0.08	0.82	157.36	0.14
O1	18.88	159.45	19.12	159.59	0.24	19.12	159.92	0.29	19.24	160.04	0.41
MP1	0.47	189.29	0.60	187.67	0.13	0.56	190.00	0.09	0.48	193.40	0.04
M1	0.94	160.67	0.92	164.39	0.06	0.86	169.26	0.16	0.95	178.39	0.29
CHI1	0.33	188.20	0.53	205.37	0.24	0.49	202.65	0.19	0.33	215.29	0.15
PI1	0.38	167.92	0.45	205.50	0.28	0.55	250.98	0.63	0.61	300.82	0.91
P1	7.94	177.89	8.03	181.83	0.56	7.74	188.61	1.48	5.84	199.53	3.31
S1	0.91	53.53	1.62	67.53	0.77	2.76	89.06	2.09	6.13	130.12	5.98
K1	24.11	178.14	24.06	180.20	0.87	23.27	183.22	2.26	18.57	191.05	7.30
PSI1	0.51	242.21	1.10	249.72	0.60	1.89	268.19	1.45	5.04	297.31	4.77
PHI1	0.35	161.54	0.55	132.32	0.30	0.93	133.50	0.64	2.23	139.05	1.91
THE1	0.15	226.37	0.25	212.59	0.11	0.36	214.27	0.22	0.23	219.20	0.08
J1	1.40	191.91	1.39	185.35	0.16	1.35	187.70	0.11	1.42	186.66	0.13
SO1	0.30	319.12	0.44	315.89	0.14	0.46	321.74	0.16	0.39	318.42	0.09
OO1	0.53	208.91	0.50	193.97	0.14	0.47	197.08	0.12	0.53	191.98	0.16
OQ2	0.10	172.53	0.18	177.18	0.08	0.26	162.57	0.16	0.29	191.96	0.20
MNS2	0.27	165.28	0.29	161.17	0.03	0.26	173.72	0.04	0.31	149.33	0.09
2N2	0.74	164.52	0.78	167.74	0.06	0.80	169.65	0.09	0.76	169.22	0.06
MU2	1.10	158.40	1.07	156.31	0.05	1.02	153.19	0.13	1.03	153.36	0.12
N2	5.84	150.12	5.92	151.04	0.12	6.00	150.77	0.17	5.87	150.70	0.07
NU2	1.28	140.66	1.36	136.93	0.12	1.11	136.70	0.19	1.30	137.74	0.07
OP2	0.49	316.89	0.14	251.07	0.45	0.28	188.68	0.70	0.45	206.88	0.77
M2	40.42	151.95	40.27	151.62	0.28	40.23	151.48	0.38	40.23	151.28	0.51
MKS2	0.54	292.37	0.48	228.77	0.54	0.43	202.89	0.69	0.36	187.89	0.72
LAM2	0.40	160.70	0.54	156.40	0.14	0.41	162.31	0.02	0.58	166.90	0.19
L2	1.48	155.54	1.42	155.11	0.06	1.55	154.00	0.08	1.45	155.44	0.03
T2	0.98	168.78	1.33	182.10	0.44	1.11	185.92	0.34	1.09	189.08	0.38
S2	19.71	180.37	20.18	180.97	0.51	19.82	182.14	0.62	19.92	183.28	1.03
R2	0.34	352.80	0.83	7.96	0.51	0.99	49.03	0.85	1.60	51.91	1.46
K2	5.36	174.50	5.02	169.89	0.54	5.38	165.04	0.89	5.36	159.41	1.41
MSN2	0.05	271.60	0.03	81.78	0.08	0.05	279.23	0.01	0.06	303.70	0.03
KJ2	0.45	3.26	0.46	10.77	0.06	0.42	10.11	0.06	0.39	15.45	0.11
2SM2	0.09	329.67	0.07	238.16	0.12	0.06	224.24	0.12	0.08	236.31	0.12
MO3	0.58	263.15	0.51	270.77	0.10	0.51	274.78	0.13	0.50	278.92	0.17
M3	0.80	139.83	0.78	141.09	0.03	0.80	140.43	0.01	0.80	138.90	0.01
SO3	0.52	251.15	0.46	251.18	0.06	0.46	252.14	0.06	0.49	252.86	0.03
MK3	0.51	250.09	0.42	243.29	0.11	0.40	241.40	0.13	0.36	239.62	0.17
SK3	0.16	36.15	0.08	176.96	0.23	0.10	182.95	0.25	0.14	174.95	0.28
MN4	0.09	228.63	0.09	257.18	0.04	0.06	251.53	0.04	0.07	27.21	0.16
M4	0.74	212.35	0.64	216.49	0.11	0.60	217.87	0.15	0.61	209.50	0.13
SN4	0.18	229.67	0.12	205.86	0.09	0.15	194.80	0.10	0.14	162.70	0.18
MS4	0.53	260.78	0.46	267.12	0.09	0.41	269.41	0.14	0.42	266.23	0.12
MK4	0.15	225.75	0.19	269.08	0.13	0.18	286.87	0.17	0.17	288.16	0.17
S4	0.33	295.34	0.21	261.85	0.19	0.22	257.92	0.20	0.20	246.32	0.25
SK4	0.20	186.70	0.09	188.29	0.11	0.10	202.22	0.11	0.12	176.28	0.08
2MN6	0.06	191.09	0.04	168.80	0.03	0.03	195.01	0.03	0.03	183.19	0.03
M6	0.13	207.63	0.10	201.99	0.03	0.10	208.01	0.03	0.08	208.08	0.05
MSN6	0.05	230.01	0.04	225.38	0.01	0.05	228.73	0.00	0.03	223.21	0.02
2MS6	0.19	225.92	0.15	223.74	0.04	0.14	222.18	0.05	0.13	218.11	0.06
2MK6	0.03	106.36	0.02	136.32	0.02	0.02	127.15	0.01	0.03	86.28	0.01
2SM6	0.09	260.33	0.10	255.19	0.01	0.09	254.19	0.01	0.08	240.25	0.03
MSK6	0.01	254.57	0.01	109.43	0.02	0.01	59.25	0.02	0.03	85.85	0.04

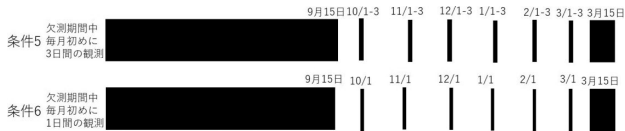


Fig. 3. The settings for conducting monthly short observations during the missing 6 months period.

図 3. 6 か月間の欠測期間中に毎月スポット観測を行う設定.

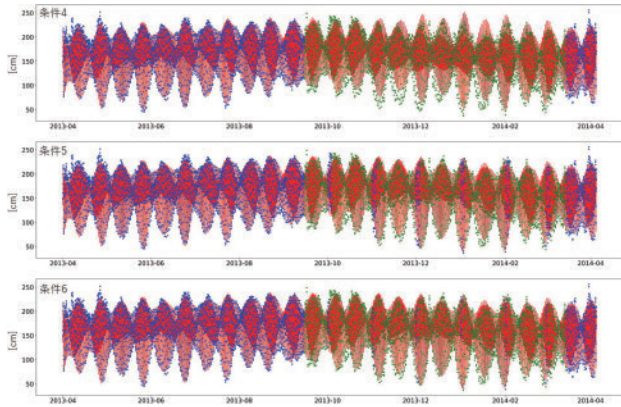


Fig. 4. The observed values and values predicted under each pattern including the monthly short observations. Blue dots indicate the observed values used for the harmonic analysis. Green dots indicate the observed values set as missing. Red line indicate the predicted values. The tidal heights are on the zero of the gauge.

図 4. 毎月スポット観測を行った条件における観測値と各条件の推算値. 青点が調和分解に用いた観測値, 緑点が欠測とした観測値, 赤線が推算値を示す. ゼロ位は観測基準面.

Table 3. RMSE and LAT of each pattern in which monthly short observations were conducted during the missing period. Blue characters indicate values obtained by the pattern without missing period. Yellow characters indicate values obtained by the pattern in which short observations were not conducted during the missing period.

表 3. 毎月スポット観測を行った条件における RMSE 及び LAT. 青字は欠測のない条件で得られた数値, 黄色字は欠測期間にスポット観測を行っていない条件で得られた数値をそれぞれ示す.

条件	RMSE(cm)	LAT(m)
条件1	8.84	-1.29
条件4	12.29	-1.28
条件5	9.51	-1.33
条件6	9.48	-1.32

わなかった条件 4 に対し、スポット観測を行った条件の調和定数がどのように変化したかを調べるために、真値と条件 4 の各分潮の差と、真値と条件 5 (欠測期間中毎月初めに 3 日間の観測)、6 (欠測期間中毎月初めに 1 日間の観測) の各分潮の差を比較する (Table 4). 欠測により真値との差が拡大した $P_1 \sim PSI_1$ 潮は、スポット観測を行うことで真値に近づいた.

3.2.2 1 日間のスポット観測

さらに、スポット観測が 1 日間でも十分か検証した. 欠測の設定を Fig. 5 に示す.

まず、連続した欠測期間がなるべく短くなるように、欠測期間の中間日にあたる 12 月 15 日に観測した場合 (条件 7) で調和分解を行った. 次に、1 日間のスポット観測を大潮の頃に行った場合小潮の頃に行った場合で調和分解にどのような影響があるかを調べるために、12 月 15 日前後の大潮もしくは小潮の日にスポット観測を行う条件で調和分解を行った (条件 8 ~ 11). さらに、スポット観測の時期による調和分解への影響を調べるため、欠測期間の各月 1 日にスポット観測を行う条件で調和分解を行った (条件 12 ~ 17). スポット観測によりどのように推算値が変化したかを見るために、スポット観測を行わなかった条件 4 とスポット観測を行ったいくつかの条件の推算値を観測値と重ねて表示する (Fig. 6).

多くの条件でスポット観測を行う前の条件 4 に比べて、スポット観測を行った条件では欠測部分の観測値と推算値が合うようになったことが分かる. ただし、10 月 1 日のみスポット観測を行った条件 12 は条件 4 と同様に推算値と観測値のずれが目立った.

次に各条件の RMSE を Table 5 に示す. いずれの条件でも RMSE は許容できる程度まで縮小した. スポット観測を近傍する時期における大潮の日と小潮の日に行った場合で大きな差は見られなかった. 各月 1 日にスポット観測を行った条件 12 ~ 17 では、スポット観測が連続的な欠測の端に近い条件 12 及び 17 においては、RMSE の縮

Table 4. Harmonic constants under each pattern in which monthly short observations were conducted during the missing period, and the differences between the constants and their true values. Red characters indicate the constants with over 2 cm difference from their true values. Blue characters indicate the constants whose difference from the true value became less than 2 cm as a result of the short observations.

表 4. 欠測期間中に毎月スポット観測を行った条件における調和定数とその真値との差。赤字は真値との差が 2 cm 以上であることを示す。青字はスポット観測により真値との差が 2 cm 未満になった調和定数を示す。

	条件4			条件5			条件6		
	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)
Sa	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00
Ssa	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00
Mm	1.73	118.97	0.71	2.24	155.14	0.76	1.99	133.87	0.49
MSf	0.51	220.93	0.66	1.63	214.32	1.68	1.03	200.02	1.01
Mf	1.35	156.07	1.47	1.14	173.23	1.31	1.56	161.75	1.70
2Q1	0.58	129.84	0.10	0.71	140.17	0.24	0.56	137.07	0.09
SIG1	0.78	159.98	0.31	0.70	158.49	0.26	0.82	159.41	0.33
Q1	3.99	150.93	0.14	4.04	150.93	0.19	4.03	151.88	0.16
RHO1	0.82	157.36	0.14	0.64	158.58	0.23	0.72	152.59	0.12
O1	19.24	160.04	0.41	19.14	159.98	0.31	19.22	159.91	0.37
MP1	0.48	193.40	0.04	0.45	193.18	0.04	0.45	194.87	0.05
M1	0.95	178.39	0.29	0.89	171.62	0.18	0.90	173.21	0.20
CHI1	0.33	215.29	0.15	0.46	207.98	0.19	0.41	207.90	0.15
PI1	0.61	300.82	0.91	0.51	171.98	0.13	0.68	187.51	0.35
P1	5.84	199.53	3.31	7.98	178.66	0.11	8.26	179.40	0.38
S1	6.13	130.12	5.98	1.12	68.29	0.33	1.13	61.37	0.26
K1	18.57	191.05	7.30	23.83	178.96	0.44	23.70	178.51	0.44
PSI1	5.04	297.31	4.77	0.66	266.53	0.29	0.64	290.16	0.48
PHI1	2.23	139.05	1.91	0.58	171.18	0.24	0.70	173.50	0.36
THE1	0.23	219.20	0.08	0.31	198.62	0.19	0.28	198.28	0.16
J1	1.42	186.66	0.13	1.45	190.09	0.07	1.43	189.34	0.07
SO1	0.39	318.42	0.09	0.35	306.94	0.09	0.34	318.28	0.04
OO1	0.53	191.98	0.16	0.66	206.20	0.13	0.58	191.72	0.17
OQ2	0.29	191.96	0.20	0.34	175.39	0.24	0.31	190.58	0.22
MNS2	0.31	149.33	0.09	0.27	139.39	0.12	0.32	152.19	0.08
2N2	0.76	169.22	0.06	0.81	163.20	0.07	0.79	170.85	0.10
MU2	1.03	153.36	0.12	0.88	156.64	0.22	0.99	152.03	0.16
N2	5.87	150.70	0.07	5.74	150.10	0.10	5.85	150.43	0.03
NU2	1.30	137.74	0.07	1.34	141.18	0.06	1.29	138.46	0.05
OP2	0.45	206.88	0.77	0.29	209.32	0.64	0.42	205.08	0.75
M2	40.23	151.28	0.51	40.19	151.41	0.44	40.22	151.32	0.49
MKS2	0.36	187.89	0.72	0.41	207.87	0.65	0.39	199.11	0.68
LAM2	0.58	166.90	0.19	0.67	162.28	0.27	0.61	164.86	0.21
L2	1.45	155.44	0.03	1.40	156.13	0.08	1.43	156.42	0.05
T2	1.09	189.08	0.38	1.40	177.14	0.45	1.44	169.68	0.46
S2	19.92	183.28	1.03	20.26	180.94	0.58	20.18	180.30	0.47
R2	1.60	51.91	1.46	0.96	17.29	0.67	0.85	10.69	0.54
K2	5.36	159.41	1.41	5.14	167.16	0.71	5.08	167.56	0.69
MSN2	0.06	303.70	0.03	0.07	326.48	0.06	0.06	307.92	0.04
KJ2	0.39	15.45	0.11	0.54	13.05	0.12	0.48	13.90	0.09
2SM2	0.08	236.31	0.12	0.10	194.34	0.18	0.08	199.24	0.15
MO3	0.50	278.92	0.17	0.54	273.82	0.11	0.52	274.93	0.13
M3	0.80	138.90	0.01	0.89	138.39	0.09	0.84	139.18	0.04
SO3	0.49	252.86	0.03	0.55	257.32	0.06	0.51	253.16	0.02
MK3	0.36	239.62	0.17	0.36	252.46	0.15	0.35	245.45	0.16
SK3	0.14	174.95	0.28	0.09	188.32	0.24	0.12	176.35	0.26
MN4	0.07	27.21	0.16	0.02	273.85	0.08	0.04	1.36	0.12
M4	0.61	209.50	0.13	0.69	214.14	0.05	0.63	211.42	0.11
SN4	0.14	162.70	0.18	0.19	200.11	0.09	0.15	177.65	0.15
MS4	0.42	266.23	0.12	0.52	265.88	0.05	0.45	266.97	0.10
MK4	0.17	288.16	0.17	0.17	284.22	0.16	0.18	279.34	0.15
S4	0.20	246.32	0.25	0.27	256.07	0.21	0.23	249.65	0.24
SK4	0.12	176.28	0.08	0.13	193.41	0.07	0.14	184.81	0.06
2MN6	0.03	183.19	0.03	0.06	201.06	0.01	0.04	216.32	0.03
M6	0.08	208.08	0.05	0.09	221.90	0.05	0.08	208.94	0.05
MSN6	0.03	223.21	0.02	0.06	232.07	0.01	0.05	228.69	0.00
2MS6	0.13	218.11	0.06	0.15	230.18	0.04	0.13	222.41	0.06
2MK6	0.03	86.28	0.01	0.01	137.08	0.02	0.02	109.53	0.01
2SM6	0.08	240.25	0.03	0.11	253.52	0.02	0.09	248.91	0.02
MSK6	0.03	85.85	0.04	0.01	134.25	0.02	0.02	113.74	0.03

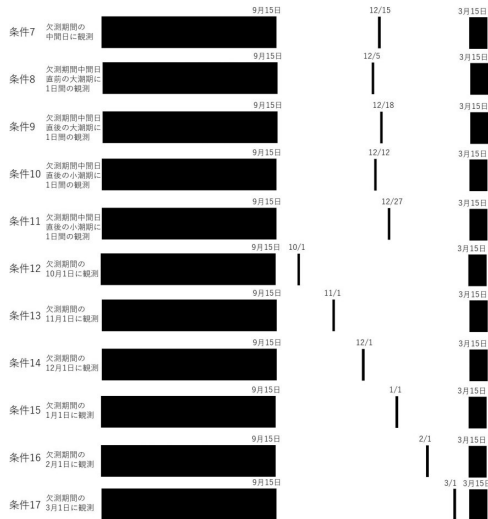


Fig. 5. The settings for conducting one-day short observation during missing period.

図 5. 欠測期間中に 1 日間のスポット観測を行う設定.

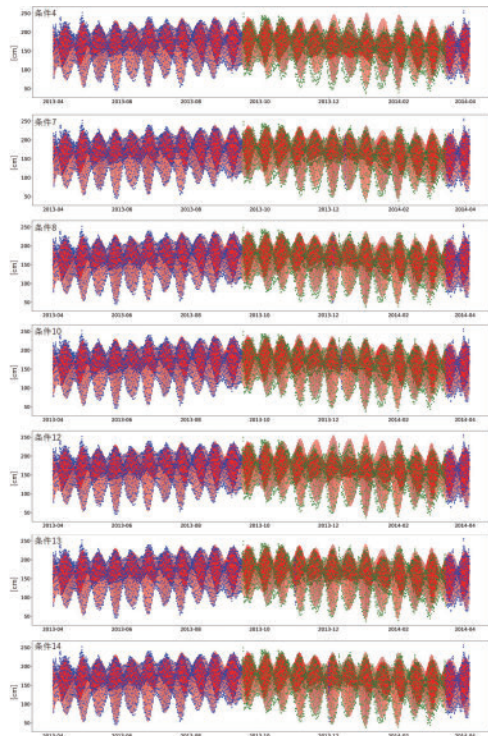


Fig. 6. The observed values and values predicted under each pattern including the one-day short observation. Blue dots indicate the observed values used for the harmonic analysis. Green dots indicate the observed values set as missing. Red line indicates the predicted values. The tidal heights are on the zero of the gauge.

図 6. 1 日間のスポット観測を行った条件における観測値と各条件の推算値. 青点が調和分解に用いた観測値, 緑点が欠測とした観測値, 赤線が推算値を示す. ゼロ位は観測基準面.

Table 5. RMSE and LAT of each pattern in which one-day short observation was conducted during the missing period. Blue characters indicate values obtained by the pattern without missing period. Yellow characters indicate values obtained from the pattern in which short observations were not conducted during the missing period.

表 5. 1 日間のスポット観測を行った条件における RMSE 及び LAT. 青字は欠測がない条件で得られた数値, 黄色字は欠測期間にスポット観測を行っていない条件で得られた数値をそれぞれ示す.

	条件	RMSE(cm)	LAT(m)
条件1	欠測なし	8.84	-1.29
条件4	6か月間欠測	12.29	-1.28
条件7	欠測期間の中間日に観測	9.63	-1.32
条件8	欠測期間中間日直前の大潮期に1日間の観測	9.75	-1.32
条件9	欠測期間中間日直後の大潮期に1日間の観測	9.62	-1.34
条件10	欠測期間中間日直前の小潮期に1日間の観測	9.75	-1.29
条件11	欠測期間中間日直後の小潮期に1日間の観測	9.63	-1.34
条件12	欠測期間の10月1日に観測	11.97	-1.36
条件13	欠測期間の11月1日に観測	9.8	-1.32
条件14	欠測期間の12月1日に観測	9.6	-1.33
条件15	欠測期間の1月1日に観測	9.61	-1.31
条件16	欠測期間の2月1日に観測	9.66	-1.32
条件17	欠測期間の3月1日に観測	10.39	-1.29

小幅が他の条件に比べて小さかった.

さらに, 各条件の調和定数に着目する. スポット観測を行わなかった条件 4 に対し, スポット観測を行った条件の調和定数がどのように変化したかを調べるために, 真値と条件 4 の各分潮の差と, 真値と条件 7 (欠測期間の中間日に観測), 8 (欠測期間中間日直前的大潮期に 1 日間の観測), 10 (欠測期間中間日直前の小潮期に 1 日間の観測) の各分潮の差を比較する (Table 6).

欠測により真値との差が拡大した $P_1 \sim \text{PSI}_1$ 潮は, 1 日間のスポット観測を行うことで真値に近づいた. また, スポット観測が大潮の場合でも小潮の場合でも, 近傍する時期ならば調和定数はほぼ同程度に真値に近づいた. 欠測により真値との差が大きくなる $P_1 \sim \text{PSI}_1$ 分潮は日潮不等を反映するものである. なお, 日潮不等は月が赤道面から離れる夏至, 冬至の朔望, 春分, 秋分の上下弦の頃に大きくなり, 月が赤道面付近にいる夏至, 冬至の上下弦, 春分, 秋分の朔望の頃に小さくな

Table 6. Harmonic constants under each pattern in which one-day short observation was conducted on the middle day of the missing period or on the spring/neap tide immediately before it, and the differences between the constants and their true value. Red characters indicate the constants with over 2 cm difference from the true value. Blue characters indicate the constants whose difference from the true value became less than 2 cm as a result of the short observations.

表 6. 欠測期間の中間日、その直前の大潮期もしくは小潮期に1日間のスポット観測を行った条件における調和定数とその真値との差。赤字は真値との差が2 cm 以上であることを示す。青字はスポット観測により真値との差が2 cm 未満になった調和定数を示す。

	条件4			条件7			条件8			条件10		
	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)
Sa	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00
Ssa	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00
Mm	1.73	118.97	0.71	1.64	118.57	0.69	1.74	119.79	0.69	1.68	119.80	0.67
MSf	0.51	220.93	0.66	0.50	210.79	0.60	0.55	221.35	0.69	0.46	220.19	0.61
Mf	1.35	156.07	1.47	1.23	158.83	1.36	1.33	154.15	1.44	1.38	159.44	1.51
2Q1	0.58	129.84	0.10	0.59	130.75	0.11	0.58	128.93	0.10	0.58	127.69	0.11
SiG1	0.78	159.98	0.31	0.79	159.37	0.31	0.78	160.30	0.31	0.77	160.27	0.31
Q1	3.99	150.93	0.14	3.97	151.12	0.12	3.97	151.06	0.12	3.99	151.13	0.13
RHO1	0.82	157.36	0.14	0.81	156.71	0.13	0.81	156.31	0.12	0.80	154.93	0.10
O1	19.24	160.04	0.41	19.25	160.02	0.42	19.24	160.03	0.41	19.25	160.05	0.42
MP1	0.48	193.40	0.04	0.47	193.11	0.03	0.47	193.46	0.03	0.48	194.11	0.04
M1	0.95	178.39	0.29	0.94	176.28	0.26	0.94	176.44	0.26	0.92	175.68	0.24
CHI1	0.33	215.29	0.15	0.36	214.34	0.16	0.35	213.58	0.15	0.37	212.85	0.15
PI1	0.61	300.82	0.91	0.97	202.06	0.69	0.89	206.24	0.64	1.17	174.79	0.79
P1	5.84	199.53	3.31	8.62	182.39	0.94	8.37	183.45	0.90	8.93	172.57	1.26
S1	6.13	130.12	5.98	1.75	69.72	0.91	1.89	83.79	1.20	1.02	312.59	1.49
K1	18.57	191.05	7.30	23.24	180.39	1.27	22.77	181.01	1.78	23.42	173.92	1.88
PS11	5.04	297.31	4.77	1.42	291.11	1.15	1.73	294.66	1.48	1.19	4.68	1.53
PH11	2.23	139.05	1.91	1.01	156.05	0.66	1.12	154.61	0.77	1.12	186.36	0.82
THE1	0.23	219.20	0.08	0.22	201.77	0.10	0.23	202.92	0.11	0.20	196.79	0.10
J1	1.42	186.66	0.13	1.43	189.87	0.06	1.44	189.12	0.08	1.46	190.35	0.07
SO1	0.39	318.42	0.09	0.38	322.71	0.08	0.38	320.59	0.08	0.40	323.88	0.10
OO1	0.53	191.98	0.16	0.50	190.84	0.16	0.50	188.95	0.18	0.50	190.14	0.17
OQ2	0.29	191.96	0.20	0.26	189.06	0.17	0.28	194.42	0.19	0.31	196.63	0.22
MNS2	0.31	149.33	0.09	0.30	146.78	0.10	0.30	151.13	0.08	0.30	154.49	0.06
2N2	0.76	169.22	0.06	0.76	169.91	0.07	0.74	168.66	0.05	0.74	167.03	0.03
MU2	1.03	153.36	0.12	1.05	153.67	0.10	1.03	154.12	0.11	1.01	153.93	0.12
N2	5.87	150.70	0.07	5.85	150.62	0.05	5.86	150.63	0.06	5.89	150.60	0.07
NU2	1.30	137.74	0.07	1.29	138.18	0.06	1.29	138.19	0.06	1.30	136.59	0.09
OP2	0.45	206.88	0.77	0.45	205.54	0.78	0.44	208.31	0.76	0.47	208.64	0.78
M2	40.23	151.28	0.51	40.25	151.27	0.51	40.22	151.28	0.51	40.26	151.31	0.48
MKS2	0.36	187.89	0.72	0.37	189.60	0.72	0.38	185.36	0.75	0.35	185.00	0.73
LAM2	0.58	166.90	0.19	0.59	165.02	0.19	0.58	167.27	0.19	0.61	166.18	0.22
L2	1.45	155.44	0.03	1.45	155.43	0.03	1.47	155.78	0.01	1.47	155.49	0.01
T2	1.09	189.08	0.38	1.08	168.95	0.10	0.99	174.50	0.10	1.20	157.61	0.30
S2	19.92	183.28	1.03	19.64	181.44	0.37	19.57	182.17	0.63	19.55	180.10	0.18
R2	1.60	51.91	1.46	0.91	54.22	0.80	1.14	61.43	1.06	0.45	48.94	0.38
K2	5.36	159.41	1.41	5.40	164.35	0.95	5.50	162.78	1.12	5.40	167.74	0.64
MSN2	0.06	303.70	0.03	0.06	274.26	0.01	0.05	301.80	0.03	0.06	253.61	0.02
KJ2	0.39	15.45	0.11	0.40	15.36	0.10	0.42	15.46	0.10	0.41	18.43	0.12
2SM2	0.08	236.31	0.12	0.08	240.58	0.12	0.08	228.25	0.13	0.10	245.27	0.13
MO3	0.50	278.92	0.17	0.49	279.25	0.17	0.51	277.62	0.15	0.51	280.35	0.18
M3	0.80	138.90	0.01	0.80	138.45	0.02	0.81	137.98	0.03	0.79	139.38	0.01
SO3	0.49	252.86	0.03	0.49	253.34	0.04	0.50	254.00	0.03	0.50	251.39	0.02
MK3	0.36	239.62	0.17	0.36	240.24	0.17	0.37	241.18	0.16	0.37	238.60	0.16
SK3	0.14	174.95	0.28	0.14	175.72	0.28	0.13	177.40	0.27	0.14	167.89	0.27
MN4	0.07	27.21	0.16	0.08	23.45	0.17	0.07	27.45	0.16	0.07	30.76	0.16
M4	0.61	209.50	0.13	0.61	208.74	0.14	0.62	209.42	0.12	0.61	209.62	0.13
SN4	0.14	162.70	0.18	0.14	165.27	0.17	0.14	165.31	0.17	0.14	161.76	0.18
MS4	0.42	266.23	0.12	0.41	266.99	0.13	0.43	266.19	0.11	0.42	266.29	0.12
MK4	0.17	288.16	0.17	0.18	286.22	0.17	0.17	290.58	0.17	0.18	288.51	0.17
S4	0.20	246.32	0.25	0.20	248.04	0.24	0.20	248.32	0.24	0.20	246.63	0.25
SK4	0.12	176.28	0.08	0.13	176.23	0.08	0.12	173.15	0.09	0.12	176.80	0.08
2MN6	0.03	183.19	0.03	0.03	179.02	0.03	0.03	184.40	0.03	0.03	185.16	0.03
M6	0.08	208.08	0.05	0.08	206.89	0.05	0.08	208.52	0.05	0.08	205.62	0.05
MSN6	0.03	223.21	0.02	0.03	227.55	0.02	0.03	223.69	0.02	0.04	221.92	0.01
2MS6	0.13	218.11	0.06	0.13	216.86	0.06	0.14	218.32	0.05	0.13	219.95	0.06
2MK6	0.03	86.28	0.01	0.03	84.20	0.01	0.03	86.11	0.01	0.03	92.31	0.01
2SM6	0.08	240.25	0.03	0.08	240.63	0.03	0.08	241.69	0.03	0.08	237.93	0.03
MSK6	0.03	85.85	0.04	0.02	86.50	0.03	0.03	86.68	0.04	0.03	71.89	0.04

る。本稿における観測期間中の秋分は2013年9月23日、冬至は2013年12月22日、春分は2014年3月21日である。冬至付近において、大潮の日は日潮不等が比較的大きく、小潮の日は日潮不等が比較的小さくなる。どちらの日にスポット観測を行った場合でも調和定数は同程度であったことを踏まえると、欠測期間のほぼ中間に1日間のスポット観測を行った場合は、日潮不等の大小が調和分解に及ぼす影響は小さいと考えられる。

次に、真値と条件4の各分潮の差と、真値と条件12（欠測期間の10月1日に観測）、13（欠測期間の11月1日に観測）、14（欠測期間の12月1日に観測）の各分潮の差を比較した（Table 7）。条件13、14の調和定数は真値に近づいた。一方、条件12の調和定数は十分真値に近づかなかった。さらに、真値と条件4の各分潮の差と、真値と条件15（欠測期間の1月1日に観測）、16（欠測期間の2月1日に観測）、17（欠測期間の3月1日に観測）の各分潮の差を比較する（Table 8）。条件15、16の調和定数は真値に近づいた。一方、条件17の調和定数は十分真値に近づかなかった。条件12、17の調和分解が真値に近づかなかった原因としては、スポット観測が長期的な欠測期間の端に近く、スポット観測を行っても、最も長い欠測期間がさほど短くならなかったためと考えられる。

また、条件13（朔の2日前である11月1日に観測）、条件14（朔の2日前である12月1日に観測）、条件15（朔である1月1日に観測）、条件16（朔の1日後である2月1日に観測）の $P_1 \sim PSI_1$ 分潮の真値との差を比較すると、条件14～16の間では同程度で、条件13だけやや大きくなった。条件13と条件16では最も長い欠測期間の長さはどちらも4.5か月程度だが、条件16の方が2週間程度冬至に近く日潮不等が大きい。

まとめると、1日間のスポット観測により調和定数を真値に近づけるためには、まずは最も長い欠測期間を短くすることが重要と思われる。また、欠測期間のほぼ中間においては、日潮不等が

小さい日のスポット観測でも真値に近い調和定数が得られた。一方、スポット観測が欠測期間のほぼ中間以外に行われ、かつ、最も長い欠測期間の長さが同程度の条件を比較すると、日潮不等が大きい日にスポット観測を行った方が、やや調和定数が真値に近づいた。スポット観測が欠測期間の中間からずれる場合は、日潮不等が大きい日にスポット観測を行った方が、調和分解がより真値に近づく可能性がある。

3.2.3 合計24時間のスポット観測

最後に、スポット観測をどれだけ短くできるか検証する。スポット観測を合計24時間行うものとして、1回の観測を12時間、6時間等と変化させた条件で調和分解を行った（Fig. 7）。なお、各条件について、各観測を行う時間帯をそろえた条件とずらした条件で調和分解を行った。

スポット観測によりどのように推算値が変化したかを見るために、スポット観測を行わなかった条件4とスポット観測を行ったいくつかの条件の推算値を観測値と重ねて表示する（Fig. 8）。

24時間未満のスポット観測を、同じ時間帯に行った条件18、24では推算値の振幅が観測値より大きくなった。一方、24時間未満のスポット観測を、時間をずらして行った条件19、25では条件4に比べて欠測部分の観測値と推算値が合っている。

各条件のRMSEを、6か月連続して欠測した条件4と比較すると、条件18を除き縮小した。スポット観測が同じ時間帯で行われた場合より、スポット観測が異なる時間帯で行われた場合の方がより誤差が縮小した。ただし、スポット観測が同じ時間帯で行われた場合のLATは真値から15 cm程度の差が生じた（Table 9）。

合計24時間のスポット観測を行った条件の調和定数が、スポット観測を行わなかった条件4に対しどのように変化したかを調べるために、真値と条件4の各分潮の差と、真値と条件18（欠測期間中に同じ時間帯に12時間×2回の観測）、19（欠測期間中に時間をずらした12時間×2回の観

Table 7. Harmonic constants under each pattern in which one-day short observation was conducted during the missing period, and the differences between the constants and their true value. The one-day short observations were performed on the 1st of October, November or December. Red characters indicate the constants with over 2 cm difference from the true value. Blue characters indicate the constants whose difference from the true value became less than 2 cm as a result of the short observations.

表7. 欠測期間中に1日間のスポット観測を行った条件における調和定数とその真値との差。1日間のスポット観測は10月1日、11月1日もしくは12月1日に設定した。赤字は真値との差が2 cm以上であることを示す。青字はスポット観測により真値との差が2 cm未満になった調和定数を示す。

	条件4			条件12			条件13			条件14		
	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)
Sa	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00
Ssa	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00
Mm	1.73	118.97	0.71	1.70	123.92	0.56	1.80	117.74	0.77	1.86	119.05	0.77
MSf	0.51	220.93	0.66	0.63	230.94	0.81	0.51	211.10	0.61	0.55	204.53	0.61
Mf	1.35	156.07	1.47	1.17	161.29	1.31	1.39	160.38	1.52	1.21	162.29	1.35
2Q1	0.58	129.84	0.10	0.54	132.21	0.06	0.57	129.35	0.09	0.59	131.58	0.11
SIG1	0.78	159.98	0.31	0.81	157.25	0.29	0.79	160.11	0.32	0.80	158.21	0.30
Q1	3.99	150.93	0.14	4.01	150.77	0.16	3.98	151.20	0.12	3.99	151.03	0.14
RHO1	0.82	157.36	0.14	0.79	157.32	0.14	0.82	155.72	0.11	0.81	154.86	0.10
O1	19.24	160.04	0.41	19.21	159.99	0.38	19.24	160.04	0.41	19.24	160.01	0.41
MP1	0.48	193.40	0.04	0.50	194.40	0.05	0.47	193.05	0.03	0.47	193.12	0.03
M1	0.95	178.39	0.29	0.95	178.25	0.29	0.94	176.79	0.26	0.94	176.01	0.25
CHI1	0.33	215.29	0.15	0.35	212.90	0.15	0.35	212.63	0.15	0.36	213.38	0.15
PI1	0.61	300.82	0.91	1.27	269.36	1.40	0.90	212.96	0.69	1.02	199.94	0.73
P1	5.84	199.53	3.31	8.05	205.50	3.82	8.33	184.83	1.06	8.75	181.41	0.96
S1	6.13	130.12	5.98	6.52	96.93	5.89	2.11	87.14	1.44	1.55	60.39	0.66
K1	18.57	191.05	7.30	22.46	193.55	6.45	22.60	181.41	2.01	23.39	179.50	0.91
PS1	5.04	297.31	4.77	4.28	269.39	3.83	1.87	296.55	1.63	1.21	297.15	1.01
PHI1	2.23	139.05	1.91	1.65	121.34	1.40	1.20	155.34	0.85	0.99	161.72	0.64
THE1	0.23	219.20	0.08	0.27	210.84	0.13	0.23	202.40	0.11	0.23	199.12	0.12
J1	1.42	186.66	0.13	1.38	187.61	0.11	1.43	188.80	0.08	1.43	189.20	0.07
SO1	0.39	318.42	0.09	0.36	319.98	0.06	0.38	322.89	0.08	0.37	323.00	0.07
OO1	0.53	191.98	0.16	0.55	189.06	0.19	0.53	189.42	0.18	0.51	191.54	0.16
OQ2	0.29	191.96	0.20	0.29	199.99	0.21	0.27	190.08	0.18	0.31	192.46	0.22
MNS2	0.31	149.33	0.09	0.34	149.34	0.11	0.29	149.39	0.08	0.32	151.38	0.09
2N2	0.76	169.22	0.06	0.79	170.08	0.09	0.74	168.84	0.06	0.77	169.89	0.08
MU2	1.03	153.36	0.12	1.00	152.03	0.15	1.03	154.57	0.10	1.05	153.20	0.11
N2	5.87	150.70	0.07	5.86	150.34	0.03	5.85	150.86	0.08	5.88	150.73	0.07
NU2	1.30	137.74	0.07	1.30	139.37	0.04	1.32	137.80	0.08	1.31	137.20	0.08
OP2	0.45	206.88	0.77	0.42	203.50	0.76	0.45	209.59	0.76	0.45	205.93	0.77
M2	40.23	151.28	0.51	40.21	151.32	0.49	40.25	151.32	0.47	40.24	151.28	0.50
MKS2	0.36	187.89	0.72	0.35	193.61	0.69	0.38	192.71	0.71	0.38	189.69	0.73
LAM2	0.58	166.90	0.19	0.61	165.93	0.21	0.58	164.60	0.18	0.57	166.43	0.18
L2	1.45	155.44	0.03	1.42	155.50	0.06	1.43	156.25	0.05	1.45	156.27	0.04
T2	1.09	189.08	0.38	1.32	187.77	0.51	1.47	176.93	0.52	1.21	173.56	0.25
S2	19.92	183.28	1.03	20.30	182.72	1.01	20.37	181.21	0.72	19.92	181.51	0.45
R2	1.60	51.91	1.46	1.57	36.70	1.35	1.23	20.14	0.94	1.05	40.13	0.86
K2	5.36	159.41	1.41	5.11	160.39	1.31	4.97	163.99	1.02	5.24	163.69	1.01
MSN2	0.06	303.70	0.03	0.07	313.16	0.05	0.07	303.17	0.04	0.06	298.77	0.03
KJ2	0.39	15.45	0.11	0.39	14.52	0.10	0.43	15.53	0.10	0.43	16.90	0.11
2SM2	0.08	236.31	0.12	0.07	227.72	0.12	0.07	220.68	0.13	0.08	231.10	0.13
MO3	0.50	278.92	0.17	0.49	278.58	0.17	0.49	277.27	0.16	0.49	279.19	0.17
M3	0.80	138.90	0.01	0.81	139.33	0.01	0.79	139.32	0.01	0.80	139.15	0.01
SO3	0.49	252.86	0.03	0.48	253.67	0.05	0.48	251.76	0.04	0.48	253.11	0.04
MK3	0.36	239.62	0.17	0.37	239.76	0.16	0.35	240.42	0.18	0.36	240.04	0.17
SK3	0.14	174.95	0.28	0.15	174.35	0.29	0.14	174.78	0.28	0.14	174.47	0.28
MN4	0.07	27.21	0.16	0.07	28.38	0.16	0.07	24.52	0.16	0.08	30.75	0.17
M4	0.61	209.50	0.13	0.61	209.45	0.13	0.61	208.74	0.14	0.61	209.49	0.13
SN4	0.14	162.70	0.18	0.14	162.03	0.18	0.15	163.74	0.18	0.14	161.88	0.18
MS4	0.42	266.23	0.12	0.42	266.42	0.12	0.41	266.19	0.13	0.42	266.44	0.12
MK4	0.17	288.16	0.17	0.17	288.80	0.17	0.17	285.98	0.16	0.17	289.26	0.17
S4	0.20	246.32	0.25	0.20	246.80	0.25	0.20	246.68	0.25	0.20	245.47	0.25
SK4	0.12	176.28	0.08	0.12	176.82	0.08	0.12	175.46	0.09	0.11	176.94	0.09
2MN6	0.03	183.19	0.03	0.03	190.83	0.03	0.03	192.51	0.03	0.04	182.13	0.02
M6	0.08	208.08	0.05	0.08	204.88	0.05	0.08	206.97	0.05	0.08	202.89	0.05
MSN6	0.03	223.21	0.02	0.03	217.84	0.02	0.03	222.86	0.02	0.03	209.54	0.02
2MS6	0.13	218.11	0.06	0.13	217.91	0.06	0.14	216.56	0.06	0.13	216.81	0.06
2MK6	0.03	86.28	0.01	0.03	85.40	0.01	0.03	91.30	0.01	0.03	97.06	0.00
2SM6	0.08	240.25	0.03	0.08	242.70	0.03	0.08	238.76	0.03	0.08	241.68	0.03
MSK6	0.03	85.85	0.04	0.03	76.86	0.04	0.02	90.47	0.03	0.03	92.28	0.04

Table 8. Harmonic constants under each pattern in which one-day short observation was conducted during the missing period, and the differences between the constants and their true value. The one-day short observations were set to be performed on the 1st of January, February or March. Red characters indicate the constants with over 2 cm difference from the true value. Blue characters indicate the constants whose difference from the true value became less than 2 cm as a result of the short observations.

表 8. 欠測期間中に 1 日間のスポット観測を行った条件における調和定数とその真値との差。1 日間のスポット観測は 1 月 1 日, 2 月 1 日もしくは 3 月 1 日に設定した。赤字は真値との差が 2 cm 以上であることを示す。青字はスポット観測により真値との差が 2 cm 未満になった調和定数を示す。

	条件4			条件15			条件16			条件17		
	振幅(cm)	逆角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	逆角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	逆角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	逆角(deg)	真値との差(cm)
Sa	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00
Ssa	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00
Mm	1.73	118.97	0.71	1.76	119.86	0.70	1.74	123.65	0.58	1.74	127.00	0.49
MSf	0.51	220.93	0.66	0.55	216.86	0.67	0.67	217.97	0.78	0.72	205.26	0.76
Mf	1.35	156.07	1.47	1.32	153.76	1.43	1.54	152.56	1.65	1.70	154.23	1.81
2Q1	0.58	129.84	0.10	0.59	128.54	0.12	0.58	131.28	0.10	0.58	133.83	0.10
SIG1	0.78	159.98	0.31	0.78	159.51	0.30	0.78	161.70	0.33	0.74	161.29	0.31
Q1	3.99	150.93	0.14	3.98	151.07	0.13	3.97	151.35	0.11	3.96	151.49	0.10
RHO1	0.82	157.36	0.14	0.81	155.58	0.11	0.80	156.59	0.13	0.78	155.48	0.12
O1	19.24	160.04	0.41	19.25	160.02	0.42	19.24	160.04	0.41	19.22	160.04	0.39
MP1	0.48	193.40	0.04	0.47	193.45	0.03	0.46	193.54	0.04	0.47	191.80	0.02
M1	0.95	178.39	0.29	0.94	175.80	0.25	0.93	175.34	0.24	0.93	175.56	0.24
CHI1	0.33	215.29	0.15	0.37	212.28	0.15	0.37	211.98	0.15	0.38	210.87	0.15
PI1	0.61	300.82	0.91	0.98	183.59	0.62	0.82	185.10	0.47	0.25	210.44	0.26
P1	5.84	199.53	3.31	8.60	176.76	0.68	8.26	178.40	0.33	6.77	183.60	1.38
S1	6.13	130.12	5.98	0.59	39.90	0.36	0.92	84.01	0.48	2.97	133.13	2.95
K1	18.57	191.05	7.30	23.13	177.06	1.08	22.81	178.73	1.32	20.55	182.48	3.94
PS11	5.04	297.31	4.77	1.12	323.90	1.16	1.39	305.44	1.25	2.96	303.46	2.75
PHI1	2.23	139.05	1.91	1.03	170.68	0.69	1.04	159.33	0.69	1.55	148.13	1.21
THE1	0.23	219.20	0.08	0.22	197.86	0.11	0.24	199.80	0.13	0.24	203.81	0.12
J1	1.42	186.66	0.13	1.45	189.63	0.08	1.44	189.83	0.07	1.44	188.99	0.08
SO1	0.39	318.42	0.09	0.38	321.81	0.08	0.39	319.47	0.09	0.38	317.18	0.08
OO1	0.53	191.98	0.16	0.49	188.83	0.18	0.52	187.50	0.20	0.55	189.97	0.18
OQ2	0.29	191.96	0.20	0.27	189.69	0.18	0.31	190.32	0.22	0.31	189.70	0.22
MNS2	0.31	149.33	0.09	0.31	147.05	0.10	0.30	151.99	0.07	0.29	149.99	0.08
2N2	0.76	169.22	0.06	0.76	167.94	0.05	0.75	169.94	0.07	0.75	170.22	0.07
MU2	1.03	153.36	0.12	1.03	152.88	0.12	1.02	153.69	0.12	1.02	152.97	0.13
N2	5.87	150.70	0.07	5.87	150.55	0.05	5.86	150.71	0.06	5.86	150.73	0.07
NU2	1.30	137.74	0.07	1.30	137.28	0.08	1.29	137.60	0.07	1.30	137.36	0.08
OP2	0.45	206.88	0.77	0.43	207.73	0.75	0.46	207.90	0.77	0.46	206.66	0.78
M2	40.23	151.28	0.51	40.24	151.26	0.52	40.22	151.28	0.51	40.22	151.28	0.51
MKS2	0.36	187.89	0.72	0.37	189.46	0.72	0.37	189.39	0.72	0.36	188.82	0.72
LAM2	0.58	166.90	0.19	0.58	167.10	0.19	0.58	166.88	0.19	0.58	166.83	0.19
L2	1.45	155.44	0.03	1.46	156.40	0.03	1.45	155.79	0.03	1.45	155.46	0.03
T2	1.09	189.08	0.38	1.10	168.75	0.12	1.13	184.00	0.32	1.13	189.87	0.41
S2	19.92	183.28	1.03	19.67	181.37	0.35	19.96	182.72	0.85	20.00	183.33	1.07
R2	1.60	51.91	1.46	0.90	50.83	0.78	1.44	47.11	1.27	1.66	49.48	1.50
K2	5.36	159.41	1.41	5.36	164.48	0.94	5.27	160.52	1.30	5.32	158.97	1.44
MSN2	0.06	303.70	0.03	0.05	297.97	0.02	0.06	294.88	0.02	0.06	295.40	0.02
KJ2	0.39	15.45	0.11	0.42	18.08	0.12	0.39	15.09	0.11	0.41	14.77	0.09
2SM2	0.08	236.31	0.12	0.08	233.50	0.13	0.09	229.93	0.14	0.09	226.90	0.14
MO3	0.50	278.92	0.17	0.51	279.37	0.17	0.51	277.04	0.15	0.52	277.74	0.15
M3	0.80	138.90	0.01	0.81	138.74	0.02	0.81	138.23	0.02	0.82	138.77	0.02
SO3	0.49	252.86	0.03	0.50	253.80	0.03	0.50	252.71	0.02	0.50	252.18	0.02
MK3	0.36	239.62	0.17	0.36	241.49	0.16	0.36	241.72	0.16	0.35	241.07	0.17
SK3	0.14	174.95	0.28	0.13	177.00	0.27	0.13	173.98	0.27	0.13	176.33	0.27
MN4	0.07	27.21	0.16	0.07	26.62	0.16	0.05	24.98	0.14	0.07	11.59	0.15
M4	0.61	209.50	0.13	0.61	209.44	0.13	0.63	210.53	0.11	0.61	211.19	0.13
SN4	0.14	162.70	0.18	0.14	163.86	0.18	0.15	171.05	0.16	0.14	170.28	0.16
MS4	0.42	266.23	0.12	0.42	265.82	0.12	0.44	266.35	0.10	0.43	267.37	0.11
MK4	0.17	288.16	0.17	0.17	290.08	0.17	0.17	280.23	0.15	0.19	285.61	0.17
S4	0.20	246.32	0.25	0.20	245.27	0.25	0.22	249.71	0.24	0.21	247.76	0.24
SK4	0.12	176.28	0.08	0.11	175.33	0.09	0.14	180.24	0.06	0.13	183.24	0.07
2MN6	0.03	183.19	0.03	0.03	188.93	0.03	0.04	191.67	0.02	0.03	201.96	0.03
M6	0.08	208.08	0.05	0.08	210.71	0.05	0.08	211.70	0.05	0.07	213.71	0.06
MSN6	0.03	223.21	0.02	0.03	228.47	0.02	0.04	228.92	0.01	0.04	237.52	0.01
2MS6	0.13	218.11	0.06	0.14	219.17	0.05	0.14	220.14	0.05	0.13	221.57	0.06
2MK6	0.03	86.28	0.01	0.03	91.30	0.01	0.03	100.25	0.00	0.02	77.36	0.02
2SM6	0.08	240.25	0.03	0.08	241.10	0.03	0.08	243.70	0.03	0.08	243.94	0.03
MSK6	0.03	85.85	0.04	0.03	87.15	0.04	0.02	97.73	0.03	0.02	92.55	0.03

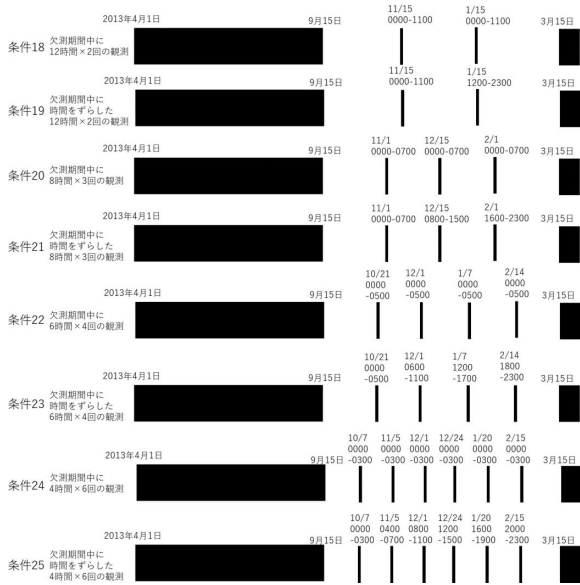


Fig. 7. The settings for conducting a total 24 hours' of observation during the missing 6 months period.

図 7. 欠測期間中に合計 24 時間の観測を行った設定.

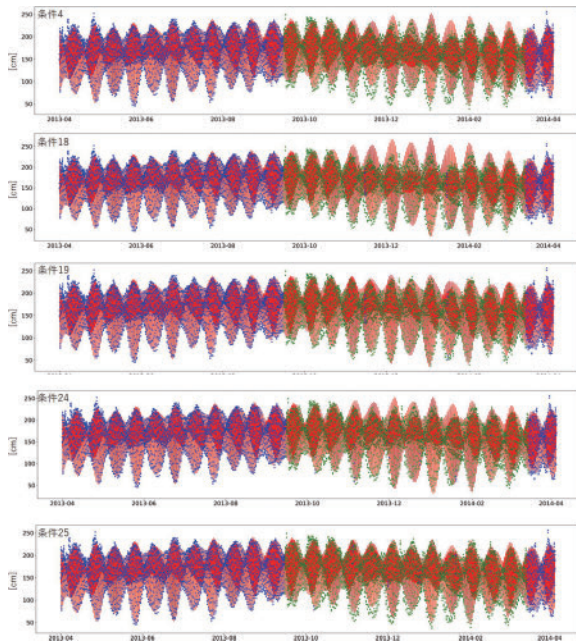


Fig. 8. The observed values and values predicted under each pattern including the total of 24 hours' of observation. Blue dots indicate the observed values used for the harmonic analysis. Green dots indicate the observed values set as missing. Red line indicates the predicted values. The tidal heights are on the zero of the gauge.

図 8. 欠測期間中に合計 24 時間のスポット観測を行った条件における観測値と推算値. 赤線が推算値, 青点が調和分解に用いた観測値, 緑点が欠測とした観測値を示す. ゼロ位は観測基準面.

Table 9. RMSE and LAT for each pattern in which a total of 24 hours of observations were conducted during the 6-month missing period. Blue characters indicate values obtained from the pattern without the missing period. Yellow characters indicate values obtained from the pattern with no short observations conducted during the missing period. Red characters indicate unacceptable values. LAT with over 10 cm difference from their true values are also indicated with red characters.

表 9. 欠測期間中に合計 24 時間のスポット観測を行った条件における RMSE 及び LAT. 青字は欠測がない条件で得られた数値, 黄色字は欠測期間中にスポット観測を行っていない条件で得られた数値, 赤字は許容できない数値をそれぞれ示す. なお, LAT は欠測がない条件から 10 cm 以上ずれた場合を赤字とした.

条件	RMSE(cm)	LAT(m)
条件1 欠測なし	8.84	-1.29
条件4 6か月間欠測	12.29	-1.28
条件18 欠測期間中に12時間×2回の観測	14.35	-1.44
条件19 欠測期間中に時間をずらした12時間×2回の観測	10.23	-1.36
条件20 欠測期間中に8時間×3回の観測	11.19	-1.41
条件21 欠測期間中に時間をずらした8時間×3回の観測	9.52	-1.33
条件22 欠測期間中に6時間×4回の観測	11.83	-1.43
条件23 欠測期間中に時間をずらした6時間×4回の観測	10.57	-1.25
条件24 欠測期間中に4時間×6回の観測	11.14	-1.44
条件25 欠測期間中に時間をずらした4時間×6回の観測	10.11	-1.25

測), 24 (欠測期間中に同じ時間帯に 4 時間×6 回の観測), 25 (欠測期間中に時間をずらした 4 時間×6 回の観測) の各分潮の差を比較した (Table 10).

$P_1 \sim PH_1$ 分潮の調和定数は, 条件 18 を除き, スポット観測を行わなかった条件 4 と比べて真値に近づいた. ただし, 連続 24 時間以上のスポット観測を行った条件よりは真値との差が大きかった. K_1 分潮等の約 24 時間周期の分潮は日潮不等を反映するものであり, 観測期間が 24 時間未満の場合は, 日潮不等の成分を観測できず, 十分真値に近づかなかったと考えられる.

最後に, スポット観測が 1 日の特定の時間帯に行われた場合の LAT が真値から最大 10 cm 以上の差が生じた原因を考察する. 条件 18, 19 における欠測期間中の観測日である 11 月 15 日と 1 月 15 日について, 欠測がない条件 (条件 1), 条件

Table 10. Harmonic constants under each pattern in which total of 24 hours' of observations were conducted during the 6 month missing period, and the differences between the constants and their true value. Red characters indicate the constants with over 2 cm difference from the true value. Blue characters indicate the constants whose difference from the true value became less than 2 cm as a result of the short observations.

表 10. 欠測期間中に 24 時間のスポット観測を行った条件における調和定数とその真値との差. 赤字は真値との差が 2 cm 以上であることを示す. 青字はスポット観測により真値との差が 2 cm 未満になった調和定数を示す.

	条件4			条件18			条件19			条件24			条件25		
	振幅(cm)	逆角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	逆角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	逆角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	逆角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	逆角(deg)	真値との差(cm)
Sa	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00
Ssa	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00
Mm	1.73	118.97	0.71	1.70	117.83	0.73	1.64	117.53	0.72	1.73	118.77	0.71	1.76	118.18	0.74
MSf	0.51	220.93	0.66	0.53	217.38	0.66	0.53	207.59	0.61	0.53	219.11	0.67	0.55	220.92	0.69
Mf	1.35	156.07	1.47	1.31	152.78	1.42	1.34	154.06	1.45	1.35	155.70	1.47	1.36	157.35	1.48
ZQ1	0.58	129.84	0.10	0.56	128.98	0.09	0.63	128.73	0.15	0.60	127.87	0.13	0.58	129.36	0.10
SIG1	0.78	159.98	0.31	0.73	162.26	0.32	0.86	153.78	0.29	0.77	158.91	0.29	0.81	160.75	0.34
Q1	3.99	150.93	0.14	4.01	150.55	0.17	3.90	152.32	0.04	3.95	151.14	0.10	3.98	150.80	0.14
RHO1	0.82	157.36	0.14	0.85	154.13	0.10	0.83	161.92	0.20	0.82	157.92	0.15	0.81	155.40	0.11
O1	19.24	160.04	0.41	19.21	160.25	0.42	19.25	159.57	0.37	19.26	160.08	0.43	19.22	160.01	0.39
MP1	0.48	193.40	0.04	0.48	191.49	0.02	0.47	197.67	0.07	0.50	193.67	0.05	0.46	196.22	0.06
M1	0.95	178.39	0.29	0.99	178.32	0.30	0.90	173.16	0.20	0.97	176.31	0.26	0.91	176.27	0.25
CHI1	0.33	215.29	0.15	0.32	219.53	0.18	0.43	212.49	0.19	0.34	214.92	0.16	0.42	213.83	0.19
PI1	0.61	300.82	0.91	2.24	262.28	2.30	1.02	118.04	0.83	1.57	228.60	1.42	0.28	73.90	0.49
P1	5.84	199.53	3.31	9.71	214.17	5.75	8.41	165.32	1.85	9.85	195.04	3.26	6.32	178.73	1.62
S1	6.13	130.12	5.98	9.25	91.61	8.55	2.36	307.82	2.75	5.47	67.44	4.59	2.56	144.58	2.73
K1	18.57	191.05	7.30	22.95	200.84	9.33	26.36	172.44	3.37	24.93	189.39	4.88	21.15	180.54	3.11
PS11	5.04	297.31	4.77	6.12	269.85	5.67	2.21	126.02	2.48	3.42	251.29	2.92	2.08	301.41	1.87
PH11	2.23	139.05	1.91	2.44	120.11	2.19	0.88	301.38	1.17	1.32	113.20	1.12	1.03	149.30	0.69
THE1	0.23	219.20	0.08	0.25	226.76	0.10	0.33	174.55	0.26	0.26	208.84	0.13	0.21	208.78	0.08
J1	1.42	186.66	0.13	1.42	184.81	0.18	1.37	197.92	0.15	1.39	188.06	0.09	1.42	190.20	0.05
SO1	0.39	318.42	0.09	0.38	318.79	0.08	0.35	325.44	0.06	0.37	319.56	0.07	0.41	312.20	0.12
OO1	0.53	191.98	0.16	0.62	186.18	0.24	0.37	202.00	0.17	0.53	189.17	0.18	0.51	184.59	0.22
OO2	0.29	191.96	0.20	0.26	198.57	0.18	0.31	190.62	0.22	0.32	193.27	0.23	0.29	192.98	0.20
MNS2	0.31	149.33	0.09	0.29	147.67	0.09	0.32	149.63	0.09	0.30	151.79	0.07	0.28	156.76	0.04
2N2	0.76	169.22	0.06	0.79	169.04	0.08	0.74	169.20	0.06	0.77	168.29	0.06	0.74	168.84	0.06
MU2	1.03	153.36	0.12	1.01	153.05	0.13	1.04	154.23	0.10	1.04	152.90	0.12	1.06	154.29	0.09
N2	5.87	150.70	0.07	5.87	150.76	0.07	5.87	150.54	0.05	5.85	150.64	0.05	5.85	150.77	0.07
NU2	1.30	137.74	0.07	1.31	136.65	0.10	1.28	137.81	0.06	1.28	137.56	0.07	1.30	137.54	0.07
OP2	0.45	206.88	0.77	0.43	203.60	0.77	0.46	206.62	0.78	0.46	206.29	0.78	0.47	209.03	0.78
M2	40.23	151.28	0.51	40.22	151.33	0.48	40.24	151.29	0.50	40.23	151.32	0.48	40.24	151.30	0.49
MKS2	0.36	187.89	0.72	0.34	187.04	0.71	0.37	189.88	0.72	0.35	183.25	0.73	0.37	183.66	0.75
LAM2	0.58	166.90	0.19	0.58	169.62	0.19	0.61	167.13	0.22	0.58	166.47	0.19	0.56	166.47	0.17
L2	1.45	155.44	0.03	1.46	155.82	0.02	1.45	155.20	0.03	1.43	155.79	0.05	1.45	155.96	0.03
T2	1.09	189.08	0.38	1.89	195.26	1.10	1.25	174.93	0.29	1.31	191.92	0.56	0.78	160.93	0.23
S2	19.92	183.28	1.03	21.45	183.26	2.03	19.98	181.61	0.51	20.32	183.37	1.21	19.08	181.77	0.79
R2	1.60	51.91	1.46	2.59	17.83	2.29	1.11	39.34	0.91	1.81	41.13	1.60	1.00	87.03	1.08
K2	5.36	159.41	1.41	4.39	154.50	1.94	5.23	163.13	1.06	5.16	158.13	1.51	5.74	164.79	1.01
MSN2	0.06	303.70	0.03	0.14	303.35	0.10	0.07	283.89	0.02	0.07	310.76	0.04	0.06	280.69	0.01
KJ2	0.39	15.45	0.11	0.38	19.08	0.13	0.41	18.64	0.12	0.38	17.92	0.13	0.44	10.55	0.06
2SM2	0.08	236.31	0.12	0.08	217.49	0.14	0.08	236.65	0.12	0.10	234.53	0.14	0.06	219.76	0.12
MO3	0.50	278.92	0.17	0.51	278.90	0.16	0.46	280.95	0.20	0.48	277.59	0.17	0.50	282.81	0.20
M3	0.80	138.90	0.01	0.78	139.16	0.02	0.81	136.96	0.04	0.82	139.98	0.02	0.82	138.58	0.03
SO3	0.49	252.86	0.03	0.50	252.92	0.03	0.46	255.99	0.07	0.50	251.74	0.02	0.48	253.52	0.05
MK3	0.36	239.62	0.17	0.38	243.76	0.14	0.35	238.51	0.18	0.39	241.47	0.14	0.37	239.59	0.16
SK3	0.14	174.95	0.28	0.15	184.57	0.30	0.15	170.92	0.29	0.15	176.80	0.29	0.13	178.91	0.27
MN4	0.07	27.21	0.16	0.08	27.33	0.17	0.07	39.57	0.16	0.09	17.48	0.17	0.07	44.33	0.16
M4	0.61	209.50	0.13	0.61	209.88	0.13	0.61	210.26	0.13	0.63	209.47	0.12	0.60	209.51	0.14
SN4	0.14	162.70	0.18	0.14	162.25	0.18	0.14	157.57	0.19	0.13	159.60	0.18	0.16	164.07	0.18
MS4	0.42	266.23	0.12	0.43	266.37	0.11	0.42	265.75	0.12	0.44	265.85	0.10	0.40	266.33	0.14
MK4	0.17	288.16	0.17	0.15	289.13	0.16	0.18	284.86	0.16	0.15	283.63	0.15	0.20	286.79	0.18
S4	0.20	246.32	0.25	0.21	243.91	0.26	0.20	246.27	0.25	0.21	243.94	0.26	0.20	244.56	0.26
SK4	0.12	176.28	0.08	0.11	169.27	0.10	0.13	173.87	0.08	0.11	178.87	0.09	0.12	179.75	0.08
2MN6	0.03	183.19	0.03	0.03	184.81	0.03	0.04	188.34	0.02	0.03	181.26	0.03	0.03	190.60	0.03
M6	0.08	208.08	0.05	0.08	205.47	0.05	0.08	210.74	0.05	0.08	207.47	0.05	0.09	205.50	0.04
MSN6	0.03	223.21	0.02	0.03	226.91	0.02	0.03	212.87	0.02	0.02	227.00	0.03	0.03	233.70	0.02
2MS6	0.13	218.11	0.06	0.13	219.16	0.06	0.14	218.87	0.05	0.14	224.06	0.05	0.14	218.51	0.05
2MK6	0.03	86.28	0.01	0.03	105.61	0.00	0.03	77.79	0.01	0.04	114.45	0.01	0.03	93.68	0.01
2SM6	0.08	240.25	0.03	0.08	244.49	0.03	0.08	238.12	0.03	0.09	246.52	0.02	0.09	243.11	0.03
MSK6	0.03	85.85	0.04	0.04	90.52	0.05	0.02	86.64	0.03	0.02	92.96	0.03	0.02	82.77	0.03

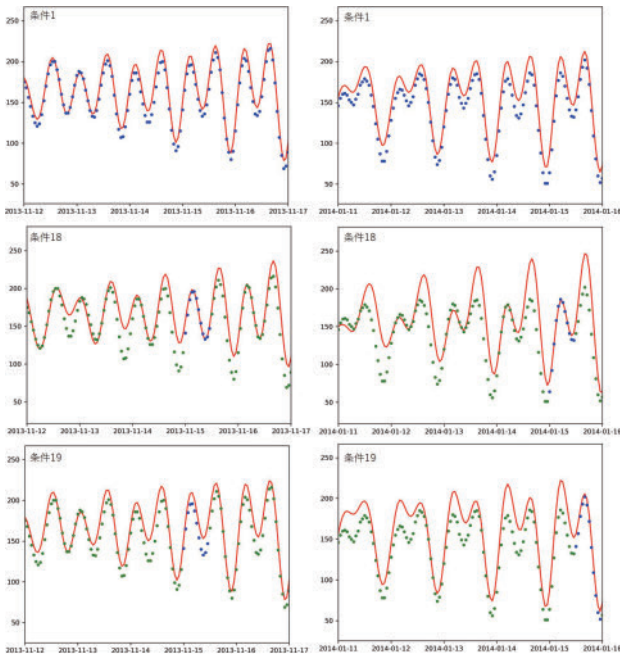


Fig. 9. The observed values and values predicted during the period of the short observations. Blue dots indicate the observed values used for the harmonic analysis. Green dots indicate the observed values set as missing. Red line indicates the predicted values. The tidal heights are on the zero of the gauge.

図 9. スポット観測を行った期間における観測値と推算値. 赤線が推算値, 青点が調和分解に用いた観測値, 緑点が欠測とした観測値を示す. ゼロ位は観測基準面.

18, 条件 19 のそれぞれで得られた調和定数から算出した推算値を示す (Fig. 9).

条件 18 では日潮不等のうち, 低い高潮と高い低潮しか観測できていない. 一方, 条件 19 では低低潮, 高い低潮, 低い高潮, 高高潮が観測できている. 同じ時間帯の観測では日潮不等のうち, 片方の低潮, 高潮しか観測できていないため, 日潮不等を反映する日周潮の振幅が適切に算出できていないと考えられる. 次に条件 1 (欠測なし), 条件 4 (6 か月間欠測), 条件 18 ~ 25 (欠測期間中に合計 24 時間スポット観測を実施) の主要四分潮の振幅の和と, 欠測による誤差の主要な要因となっていると思われる $PI_1 \sim PHI_1$ の振幅の和を示す (Table 11).

主要四分潮の振幅の和がいずれの条件でも大き

Table 11. The sum of amplitude of four major tidal constants and $PI_1 \sim PHI_1$ under each pattern in which a total of 24 hours of observations were conducted during the 6-month missing period. Blue characters indicate values obtained from the pattern without the missing period. Yellow characters indicate values obtained from the pattern with no short observations conducted during the missing period. Red characters indicate the values with over 10 cm difference from the values without the missing period.

表 11. 欠測期間中に合計 24 時間のスポット観測を行った条件における主要四分潮及び $PI_1 \sim PHI_1$ の振幅の和. 青字は欠測がない条件及び数値, 黄色字は欠測期間中にスポット的な観測を行っていない条件で得られた数値, 赤字は欠測がない条件の値から 10 cm 以上差があることを示す.

条件	主要四分潮の振幅の和(cm)	$PI_1 \sim PHI_1$ の振幅の和(cm)
条件1 欠測なし	103.12	34.3
条件4 6か月間欠測	97.96	38.43
条件18 欠測期間中に12時間×2回の観測	103.83	32.71
条件19 欠測期間中に時間をずらした12時間×2回の観測	105.83	41.24
条件20 欠測期間中に8時間×3回の観測	103.62	45.02
条件21 欠測期間中に時間をずらした8時間×3回の観測	103.39	34.71
条件22 欠測期間中に6時間×4回の観測	103.79	47.9
条件23 欠測期間中に時間をずらした6時間×4回の観測	99.2	34.26
条件24 欠測期間中に4時間×6回の観測	104.74	46.58
条件25 欠測期間中に時間をずらした4時間×6回の観測	99.69	33.42

く変わらなかったのに対し, $PI_1 \sim PHI_1$ の振幅和は, スポット観測を1日の同じ時間帯のみに行った条件で真値より 15 cm 程度大きくなった. $PI_1 \sim PHI_1$ 分潮の振幅和が大きくなったことが, スポット観測が1日の同じ時間帯のみに行われた場合に LAT の真値からの差が大きくなった主な原因と考えられる. スポット観測により取得されたデータの長さが 24 時間未満の場合は, $PI_1 \sim PHI_1$ の振幅を過剰に算出する可能性があることから, 調和分解の際には, それらのデータを除いたほうが無難と言える.

3.3 観測期間の延長

次に, 6 か月間の欠測が生じた際に, 観測期間を延長することで, 誤差を縮小できるか調べた.

3.3.1 単純な観測期間の延長

観測期間を 1 か月間ずつ 1 年分延長した条件

26 から条件 31 で調和分解を行った (Fig. 10). 延長した期間でも冬季には欠測することを想定した.

観測期間の延長によりどのように推算値が変化したかを見るために, 観測期間を延長する前の条件 4 と観測期間を延長したいくつかの条件の推算値と観測値を重ねて表示する (Fig. 11).

観測期間を延長した条件では, 条件 4 と比べ, 欠測期間の観測値と推算値があっているように見える. 各条件の RSME と LAT を Table 12 に示す. 観測期間を延長すると RMSE は小さくなった. 観測期間を 1 年間延長した条件 31 の RMSE がやや大きくなっているのは 2 年目の観測にも欠測が含まれているためと考えられるが, それでも観測期間が単年の条件 4 よりは誤差が縮小した. LAT はいずれの条件でも欠測がない条件からの差は 5 cm 未満であった.

次に観測期間を延長した場合の調和定数を調べた (Table 13). なお, ここで示す調和定数の真値との差は, 観測期間が 1 年間の条件 1 の調和定数との差ではなく, 欠測がないまま各条件と同じだけ観測期間を延長して調和分解を行って得られた調和定数との差を意味する. 例えば, 条件 26

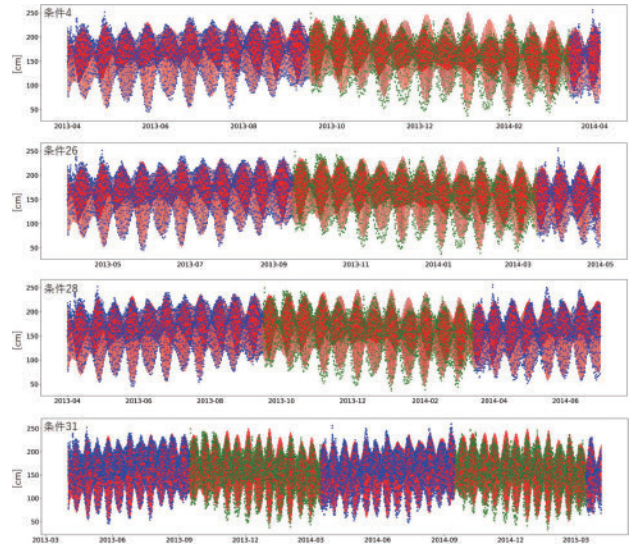


Fig. 11. The observed values and values predicted under each pattern with extended observation period. Blue dots indicate the observed values used for the harmonic analysis. Green dots indicate the observed values set as missing. Red line indicates the predicted values. The tidal heights are on the zero of the gauge.

図 11. 観測期間を延長した各条件における観測値と推算値. 赤線が推算値, 青点が調和分解に用いた観測値, 緑点が欠測とした観測値を示す. ゼロ位は観測基準面.

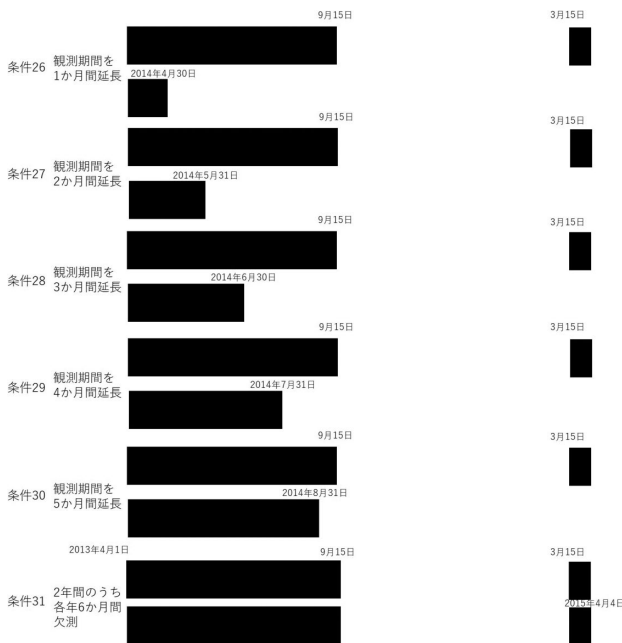


Fig. 10. The settings for extended observation period.

図 10. 観測期間を延長した条件.

Table 12. RMSE and LAT under each pattern with extended observation period. Blue characters indicate values obtained from the pattern without the missing period. Yellow characters indicate values obtained from the pattern with the missing period and without the extension of the observation period.

表 12. 観測期間を延長した条件における RMSE 及び LAT. 青字は欠測がない条件で得られた数値, 黄色字は欠測を含むが観測期間を延長していない条件で得られた数値をそれぞれ示す.

	条件	RMSE(cm)	LAT(m)
条件1	1年間欠測なし	8.84	-1.29
条件4	1年間のうち6か月間欠測	12.29	-1.28
条件26	観測期間を1か月間延長	10.66	-1.26
条件27	観測期間を2か月間延長	10.22	-1.29
条件28	観測期間を3か月間延長	10.34	-1.28
条件29	観測期間を4か月間延長	10.2	-1.27
条件30	観測期間を5か月間延長	9.47	-1.28
条件31	2年間のうち各年6か月間欠測	11.3	-1.3

Optimized observation cycle for the tidal harmonic analysis

Table 13. Harmonic constants under each pattern with extended observation period and the differences between the constants and their true values. Red characters indicate the constants with over 2 cm difference from the true value.

表 13. 観測期間を延長した条件における調和定数及びその真値との差. 赤字は各条件の真値との差が2 cm 以上であることを示す.

	条件4			条件26			条件28			条件31		
	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)
Sa	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00
Ssa	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00
Mm	1.73	118.97	0.71	1.76	153.19	0.22	0.36	353.08	0.95	1.08	351.58	1.33
MSf	0.51	220.93	0.66	0.34	113.92	0.32	1.07	34.83	0.32	2.09	34.79	1.17
Mf	1.35	156.07	1.47	1.95	157.58	1.74	3.19	153.26	1.88	2.96	141.23	2.08
2Q1	0.58	129.84	0.10	0.61	133.81	0.11	0.74	142.71	0.17	0.71	142.13	0.17
SIG1	0.78	159.98	0.31	0.73	158.34	0.27	0.67	147.28	0.19	0.59	148.11	0.09
Q1	3.99	150.93	0.14	4.01	151.17	0.13	4.01	150.14	0.13	3.98	149.38	0.16
RHO1	0.82	157.36	0.14	0.81	156.32	0.11	0.72	158.30	0.11	0.67	144.40	0.09
O1	19.24	160.04	0.41	19.24	159.90	0.35	19.16	159.54	0.23	19.15	160.12	0.34
MP1	0.48	193.40	0.04	0.48	203.93	0.09	0.27	216.67	0.14	0.41	181.58	0.04
M1	0.95	178.39	0.29	0.98	174.75	0.23	0.98	172.46	0.17	0.87	173.38	0.17
CHI1	0.33	215.29	0.15	0.37	231.04	0.21	0.30	240.16	0.21	0.28	190.45	0.06
PI1	0.61	300.82	0.91	0.31	297.87	0.61	0.34	249.96	0.51	0.53	293.30	0.85
P1	5.84	199.53	3.31	6.08	189.79	2.34	6.70	191.36	2.05	6.59	196.05	2.75
S1	6.13	130.12	5.98	4.35	133.96	4.33	4.12	118.49	3.93	4.88	114.89	4.57
K1	18.57	191.05	7.30	19.53	184.96	5.26	20.84	187.24	4.85	21.49	189.76	5.33
PSI1	5.04	297.31	4.77	3.55	305.79	3.34	3.34	289.19	3.10	3.68	276.34	3.25
PHI1	2.23	139.05	1.91	1.60	150.03	1.31	1.50	128.58	1.19	1.43	124.02	1.23
THE1	0.23	219.20	0.08	0.19	183.87	0.10	0.21	171.93	0.10	0.22	224.36	0.07
J1	1.42	186.66	0.13	1.43	190.03	0.07	1.39	190.30	0.06	1.30	190.87	0.03
SO1	0.39	318.42	0.09	0.32	304.08	0.07	0.24	305.74	0.02	0.30	302.93	0.12
OO1	0.53	191.98	0.16	0.59	202.53	0.11	0.63	202.89	0.10	0.74	219.03	0.10
OO2	0.29	191.96	0.20	0.23	193.39	0.14	0.21	177.96	0.11	0.09	179.34	0.04
MNS2	0.31	149.33	0.09	0.30	157.64	0.05	0.28	152.64	0.05	0.36	152.33	0.06
2N2	0.76	169.22	0.06	0.76	167.17	0.05	0.73	164.45	0.04	0.82	167.28	0.06
MU2	1.03	153.36	0.12	1.02	154.85	0.11	1.01	157.16	0.09	1.08	163.54	0.03
N2	5.87	150.70	0.07	5.89	149.99	0.03	5.80	149.38	0.03	5.84	149.87	0.08
NU2	1.30	137.74	0.07	1.26	139.82	0.06	1.22	143.81	0.01	1.17	141.93	0.02
OP2	0.45	206.88	0.77	0.57	213.02	0.69	0.39	183.33	0.60	0.34	142.09	0.74
M2	40.23	151.28	0.51	40.32	151.18	0.43	40.37	150.83	0.41	40.40	150.67	0.47
MKS2	0.36	187.89	0.72	0.53	187.03	0.68	0.68	206.68	0.57	0.82	209.16	0.75
LAM2	0.58	166.90	0.19	0.51	164.80	0.15	0.58	156.86	0.16	0.35	143.13	0.05
L2	1.45	155.44	0.03	1.51	156.02	0.00	1.50	152.67	0.03	1.59	149.55	0.12
T2	1.09	189.08	0.38	0.95	186.96	0.29	1.11	188.45	0.34	1.19	200.89	0.71
S2	19.92	183.28	1.03	19.66	183.15	0.96	19.97	182.47	0.80	20.33	183.40	1.35
R2	1.60	51.91	1.46	1.46	60.21	1.37	1.37	47.10	1.18	1.76	36.47	1.57
K2	5.36	159.41	1.41	5.49	160.67	1.30	5.16	162.63	1.10	4.95	160.04	1.37
MSN2	0.06	303.70	0.03	0.01	268.40	0.02	0.04	276.25	0.02	0.11	283.89	0.07
KJ2	0.39	15.45	0.11	0.43	12.03	0.09	0.40	359.91	0.06	0.41	2.29	0.07
2SM2	0.08	236.31	0.12	0.07	181.05	0.14	0.01	295.65	0.08	0.05	195.94	0.10
MO3	0.50	278.92	0.17	0.48	276.01	0.15	0.42	276.58	0.14	0.39	269.31	0.11
M3	0.80	138.90	0.01	0.81	140.77	0.00	0.83	141.01	0.01	0.83	141.92	0.03
SO3	0.49	252.86	0.03	0.46	251.09	0.05	0.36	255.18	0.08	0.33	265.03	0.04
MK3	0.36	239.62	0.17	0.36	242.62	0.15	0.29	244.05	0.16	0.27	239.93	0.08
SK3	0.14	174.95	0.28	0.11	169.20	0.26	0.13	128.69	0.20	0.13	142.95	0.29
MN4	0.07	27.21	0.16	0.10	358.69	0.16	0.11	5.13	0.15	0.11	336.62	0.13
M4	0.61	209.50	0.13	0.62	203.67	0.14	0.58	198.43	0.14	0.54	193.93	0.09
SN4	0.14	162.70	0.18	0.14	182.94	0.15	0.15	173.44	0.14	0.14	169.96	0.07
MS4	0.42	266.23	0.12	0.41	260.17	0.12	0.37	260.38	0.12	0.32	266.82	0.05
MK4	0.17	288.16	0.17	0.21	276.02	0.16	0.24	275.50	0.15	0.26	274.74	0.15
S4	0.20	246.32	0.25	0.22	245.07	0.24	0.22	230.23	0.22	0.24	219.90	0.30
SK4	0.12	176.28	0.08	0.11	191.47	0.10	0.11	248.92	0.10	0.11	224.68	0.09
2MN6	0.03	183.19	0.03	0.03	178.70	0.02	0.02	197.39	0.03	0.02	179.25	0.02
M6	0.08	208.08	0.05	0.07	203.72	0.05	0.05	188.35	0.05	0.02	181.62	0.03
MSN6	0.03	223.21	0.02	0.03	207.91	0.02	0.02	201.72	0.02	0.02	209.03	0.01
2MS6	0.13	218.11	0.06	0.12	216.47	0.06	0.09	211.29	0.07	0.05	188.39	0.04
2MK6	0.03	86.28	0.01	0.05	101.86	0.01	0.04	133.82	0.00	0.03	53.23	0.01
2SM6	0.08	240.25	0.03	0.07	238.24	0.03	0.05	230.65	0.04	0.03	227.94	0.02
MSK6	0.03	85.85	0.04	0.03	105.22	0.03	0.02	160.92	0.03	0.02	101.81	0.02

の場合、1年1か月間欠測なしで観測した場合の調和定数との差を示している。

誤差の主要因であった日周潮については、観測期間の延長前に比べて真値に近づいたものの、真値との差は2 cm 以上となった。

3.3.2 2年目の観測を1年目の欠測期間に行う条件

次に、2年目に、1年目の欠測期間に追加観測期間を設定し、追加観測期間を1か月ずつ6か月分延長した条件 32 から 36 とした (Fig. 12)。

2年目の観測を1年目の欠測期間に行ったことによりどのように推算値が変化したかを見るために、観測期間を延長する前の条件 4 と観測期間を延長したいくつかの条件の推算値と観測値を重ねて表示する (Fig. 13)。

2年目の観測を1年目の欠測期間に行った条件では、条件 4 や単純に観測期間を延長した場合と比べ、1年目の欠測期間の観測値と推算値が

2年目の観測を1年目の欠測期間に行った条件では、観測期間を延長するにつれ、RMSE は小さくなった (Table 14)。次に、調和定数を比較



Fig. 12. The settings for the pattern in which the second year's observation is performed on the dates of missing period of the first year.

図 12. 2年目の観測を1年目の欠測期間に行った条件。

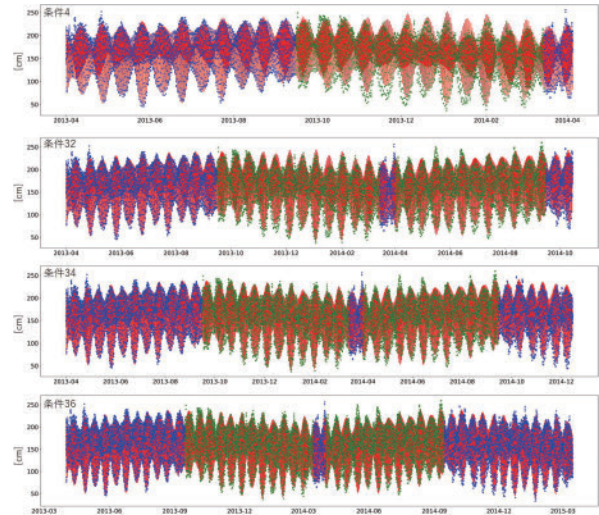


Fig. 13. The observed values and values predicted under each pattern in which the second year's observation is performed on the dates of missing period of the first year. Blue dots indicate the observed values used for the harmonic analysis. Green dots indicate the observed values set as missing. Red line indicates the predicted values. The tidal heights are on the zero of the gauge.

図 13. 2年目の観測を1年目の欠測期間に行った条件における観測値と推算値。赤線が推算値、青点が調和分解に用いた観測値、緑点が欠測とした観測値を示す。ゼロ位は観測基準面。

Table 14. RMSE and LAT of each pattern in which observations were performed the second year on the dates of the first year's missing period. Blue characters indicate values obtained from the pattern without the missing period. Yellow characters indicate values obtained from the pattern with the missing period and without the extension of the observation period.

表 14. 2年目の観測を1年目の欠測期間に行った条件における RMSE 及び LAT。青字は欠測のない条件で得られた数値、黄色字は欠測を含むが観測期間を延長していない条件で得られた数値をそれぞれ示す。

条件	RMSE(cm)	LAT(m)
条件1 1年間欠測なし	8.84	-1.29
条件4 1年間のうち6か月間欠測	12.29	-1.28
条件32 1年目の欠測期間に1か月間の観測	10.73	-1.33
条件33 1年目の欠測期間に2か月間の観測	10.33	-1.35
条件34 1年目の欠測期間に3か月間の観測	10.17	-1.32
条件35 1年目の欠測期間に4か月間の観測	10.03	-1.29
条件36 1年目の欠測期間に6か月間の観測	9.4	-1.3

すると、2年目の観測を1年目の欠測期間に行った条件では、 $P_1 \sim \text{PSI}_1$ の真値との差は2 cm未満となった (Table 15).

単純に観測期間を延長した場合に比べて、2年目の観測を1年目の欠測期間に行った方が、 $P_1 \sim \text{PSI}_1$ が真値に近づいた理由を考える。長期調和分解に必要な観測期間は365.25日であり、この日数は、隣り合う分潮間の周波数差の逆数の最大値を意味する。つまり、周波数の近い分潮を分離するために、365.25日間の観測が必要になっている。周波数が近い2つの分潮の角速度を ω_1 、 ω_2 とすると、2つの分潮を組み合わせた $2\pi/(\omega_1 - \omega_2)$ 周期のうなりが生じ、これを相合周期という (村上, 1981)。60分潮での調和分解において、隣り合う分潮との周波数差が小さい分潮群 $\text{PI}_1 \sim \text{PHI}_1$ の相合周期は365.22～365.26日となる。このうなりを1年以上観測した場合、観測1日目と観測366日目はうなりのほぼ同じ位相をとらえることになり、366日目の観測の、この分潮群の分解への貢献は小さくなると考えられる。単純に観測期間を延長した場合は、その365日前にも観測が行われていたため、 $\text{PI}_1 \sim \text{PHI}_1$ 分潮の分解結果がそれほど変わらなかったと考えられる。

3.3.3 延長期間にスポット観測を行う条件

最後に、スポット観測と観測期間の延長を組み合わせる。観測2年目に、1年目の欠測期間にあたる期間にスポット観測を行う条件を設定した (Fig. 14)。

2年目に、1年目の欠測期間に観測を行ったことによりどのように推算値が変化したかを見るために、観測期間を延長する前の条件4と延長期間にスポット観測を行った条件の推算値と観測値を重ねて表示する (Fig. 15)。

どの条件でも、条件4と比べ、観測値と推算値はより重なった。延長期間にスポット観測を行った条件のRMSEをTable 16に示す。いずれの条件でもRMSEは許容できる値となった。

次に、いくつかの条件の調和定数を比較した (Table 17)。条件40を除き、 $P_1 \sim \text{PSI}_1$ の真値と

の差は2 cm未満となった。唯一 $P_1 \sim \text{PSI}_1$ の真値との差が2 cm未満とならなかった条件についても、スポット観測を行わなかった場合に比べて真値に近い調和定数が得られた。条件40はスポット観測を行った日が1年目の欠測期間の端に近いことから、他の条件に比べ、真値からの差が十分小さくならなかった可能性がある。

4 まとめ

AOVを用いた潮位観測において、冬季に観測が中断することを想定し、中断期間中のスポット観測、もしくは、観測期間の延長により、真値に近い調和定数が得られるかを調べた。

欠測期間の中間に1日～数日間程度のスポット観測を行うことで、真値に近い調和定数を得られることがわかった。一方、スポット観測の継続時間が24時間未満の場合、調和定数は真値に十分近づかず、特に、スポット観測を1日の同じ時間帯のみに行った条件ではLATの振幅が過大に算出された。AOV観測においては、電力が不足しがちな冬季であっても、点検直後等の電力に余裕がある時に数日程度観測を行うことで、より真値に近い調和定数を得られると言える。

また、長期間連続的に欠測した場合は、翌年に欠測期間と同じ月日に観測を行うことで、調和定数が真値に近づくことが示された。例えば、機器の不具合等で長期間観測が中断した際は、中断期間の分だけ観測期間を延長することでも調和定数は真値に近づくが、翌年に、前年の中断期間と同じ月日に観測を行うことで、より真値に近い調和定数を得られると言える。また、翌年に、前年の中断期間と同じ月日に観測を行う場合、その観測がスポット観測であっても有効であった。

謝 辞

本研究は、本庁AOV担当の杉山主任沿岸調査官からの、AOV観測において冬季に欠測した条件で2年間観測した場合に調和定数へどのように影響するのか、十一管区AOV担当の大泊海洋調査官からの、中断を挟みながら潮位の観測を行っ

Table 15. Harmonic constants under each pattern in which second year's observation is performed the second year on the dates of the missing period of the first year, and the differences between the constants and their true values. Red characters indicate the constants with over 2 cm difference from the true value. Blue characters indicate the constants whose difference from the true value became less than 2 cm as a result of the extension of the observation period.

表 15. 2年目の観測を1年目の欠測期間に行った条件における調和定数とその真値との差。赤字は真値との差が2 cm以上であることを示す。青字は観測期間を延長することで真値との差が2 cm未満になった値を示す。

	条件4			条件32			条件34			条件36		
	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	遅角(deg)	真値との差(cm)
Sa	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00
Ssa	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00
Mm	1.73	118.97	0.71	2.62	122.31	2.09	2.49	109.64	1.74	2.07	98.47	1.27
MSf	0.51	220.93	0.66	0.37	196.79	1.56	0.93	191.77	1.70	0.50	214.47	1.27
Mf	1.35	156.07	1.47	1.51	158.31	0.36	0.92	124.98	0.50	0.53	122.41	0.28
2Q1	0.58	129.84	0.10	0.57	141.70	0.02	0.58	149.66	0.05	0.55	150.16	0.03
SiG1	0.78	159.98	0.31	0.68	156.92	0.26	0.72	152.12	0.22	0.73	156.69	0.22
Q1	3.99	150.93	0.14	3.86	152.12	0.05	3.77	151.57	0.06	3.86	151.18	0.01
RHO1	0.82	157.36	0.14	0.92	144.69	0.16	0.89	150.36	0.14	0.80	149.05	0.06
O1	19.24	160.04	0.41	19.34	160.47	0.57	19.38	159.78	0.43	19.19	158.91	0.22
MP1	0.48	193.40	0.04	0.63	206.21	0.27	0.41	219.73	0.23	0.39	174.80	0.02
M1	0.95	178.39	0.29	0.87	178.86	0.29	0.87	177.15	0.23	0.92	163.69	0.04
CH1	0.33	215.29	0.15	0.56	211.64	0.32	0.51	220.73	0.30	0.30	208.97	0.16
PI1	0.61	300.82	0.91	0.60	219.40	0.40	0.75	160.37	0.31	0.62	161.09	0.18
P1	5.84	199.53	3.31	7.54	187.26	1.39	8.04	176.06	0.18	7.96	176.47	0.13
S1	6.13	130.12	5.98	3.01	106.33	2.70	0.89	67.88	0.31	0.96	72.88	0.32
K1	18.57	191.05	7.30	22.19	183.46	2.86	24.17	178.21	0.04	24.12	178.13	0.03
PS11	5.04	297.31	4.77	2.38	286.61	2.25	0.77	242.03	0.33	0.81	255.85	0.34
PH11	2.23	139.05	1.91	1.18	147.41	0.92	0.32	167.20	0.04	0.46	173.98	0.07
THE1	0.23	219.20	0.08	0.04	214.93	0.12	0.20	176.78	0.15	0.20	176.63	0.11
J1	1.42	186.66	0.13	1.52	184.32	0.26	1.37	185.99	0.14	1.42	186.30	0.13
SO1	0.39	318.42	0.09	0.22	286.56	0.10	0.19	278.20	0.10	0.14	273.76	0.08
OO1	0.53	191.98	0.16	0.86	192.58	0.35	0.74	195.27	0.27	0.65	186.05	0.26
OQ2	0.29	191.96	0.20	0.39	205.46	0.30	0.27	203.91	0.20	0.20	198.28	0.14
MNS2	0.31	149.33	0.09	0.35	137.27	0.10	0.31	137.27	0.07	0.33	134.88	0.08
2N2	0.76	169.22	0.06	0.73	166.87	0.04	0.73	164.62	0.05	0.72	162.97	0.06
MU2	1.03	153.36	0.12	1.03	155.45	0.15	1.05	157.82	0.12	1.04	156.48	0.12
N2	5.87	150.70	0.07	5.97	150.02	0.11	5.93	149.31	0.08	5.87	148.42	0.09
NU2	1.30	137.74	0.07	1.22	142.80	0.06	1.24	145.06	0.07	1.18	143.08	0.04
OP2	0.45	206.88	0.77	0.14	153.12	0.42	0.01	181.83	0.37	0.43	11.86	0.08
M2	40.23	151.28	0.51	40.11	151.64	0.31	40.12	151.81	0.29	40.38	151.33	0.10
MKS2	0.36	187.89	0.72	0.60	236.67	0.37	0.58	260.31	0.25	0.47	286.47	0.33
LAM2	0.58	166.90	0.19	0.52	163.12	0.23	0.62	158.32	0.25	0.53	158.32	0.18
L2	1.45	155.44	0.03	1.55	158.33	0.18	1.52	158.31	0.18	1.44	157.94	0.16
T2	1.09	189.08	0.38	1.47	190.65	0.66	1.16	156.15	0.30	1.24	159.38	0.22
S2	19.92	183.28	1.03	20.53	182.34	1.09	19.76	179.22	0.30	19.77	179.51	0.13
R2	1.60	51.91	1.46	1.50	24.69	1.16	0.62	318.61	0.37	0.47	317.93	0.20
K2	5.36	159.41	1.41	5.01	160.76	1.23	5.04	173.31	0.33	5.21	174.00	0.12
MSN2	0.06	303.70	0.03	0.14	8.33	0.14	0.08	27.35	0.12	0.12	28.21	0.11
KJ2	0.39	15.45	0.11	0.35	350.80	0.07	0.28	352.07	0.12	0.28	350.06	0.10
2SM2	0.08	236.31	0.12	0.07	157.24	0.12	0.01	19.95	0.06	0.04	357.84	0.03
MO3	0.50	278.92	0.17	0.56	282.70	0.17	0.47	279.24	0.13	0.46	270.42	0.08
M3	0.80	138.90	0.01	0.83	144.92	0.02	0.84	145.72	0.03	0.83	146.20	0.03
SO3	0.49	252.86	0.03	0.44	254.45	0.05	0.35	252.56	0.01	0.27	256.79	0.05
MK3	0.36	239.62	0.17	0.41	241.05	0.06	0.32	246.72	0.06	0.26	234.09	0.10
SK3	0.14	174.95	0.28	0.08	153.59	0.19	0.13	26.02	0.07	0.31	71.27	0.09
MN4	0.07	27.21	0.16	0.10	43.30	0.15	0.09	57.03	0.13	0.07	120.19	0.10
M4	0.61	209.50	0.13	0.58	201.81	0.05	0.55	206.06	0.07	0.52	202.97	0.07
SN4	0.14	162.70	0.18	0.12	122.68	0.16	0.13	120.29	0.15	0.12	129.42	0.12
MS4	0.42	266.23	0.12	0.35	266.57	0.06	0.31	272.45	0.09	0.31	271.79	0.08
MK4	0.17	288.16	0.17	0.10	271.62	0.12	0.11	243.63	0.09	0.09	285.94	0.11
S4	0.20	246.32	0.25	0.21	278.45	0.05	0.23	285.01	0.04	0.29	305.17	0.06
SK4	0.12	176.28	0.08	0.08	79.02	0.16	0.12	96.68	0.16	0.14	142.65	0.11
2MN6	0.03	183.19	0.03	0.03	203.66	0.01	0.02	201.88	0.02	0.02	187.98	0.02
M6	0.08	208.08	0.05	0.07	203.19	0.00	0.05	203.40	0.01	0.03	185.73	0.03
MSN6	0.03	223.21	0.02	0.03	220.40	0.01	0.02	203.36	0.01	0.01	162.74	0.01
2MS6	0.13	218.11	0.06	0.12	216.71	0.01	0.09	210.37	0.02	0.06	204.20	0.02
2MK6	0.03	86.28	0.01	0.05	83.41	0.02	0.05	120.43	0.03	0.01	96.06	0.01
2SM6	0.08	240.25	0.03	0.07	237.42	0.03	0.06	229.17	0.02	0.05	228.08	0.02
MSK6	0.03	85.85	0.04	0.04	97.07	0.05	0.02	123.20	0.03	0.01	146.14	0.02

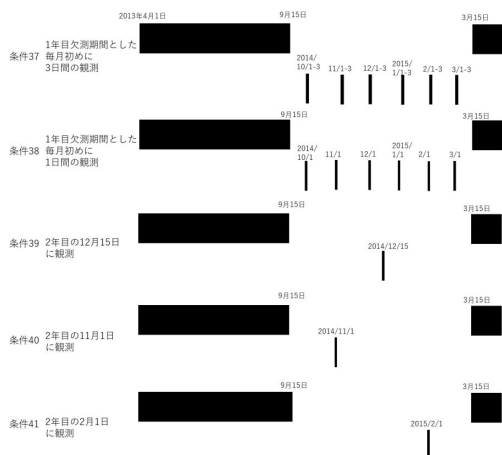


Fig. 14. The settings for the pattern in which short observation is performed the second year on the missing period of the first year.

図 14. 観測 2 年目に、スポット観測を 1 年目の欠測期間に行った条件.

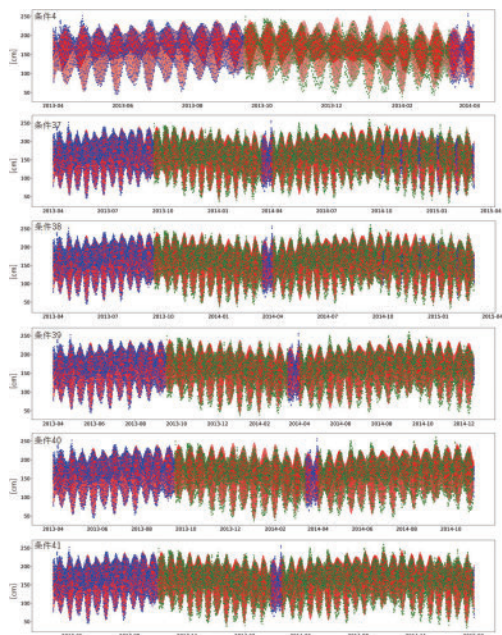


Fig. 15. The observed values and values predicted under each pattern in which short observation is performed the second year on the missing period of the first year. Blue dots indicate the observed values used for the harmonic analysis. Green dots indicate the observed values set as missing. Red line indicates the predicted values. The tidal heights are on the zero of the gauge.

図 15. 観測 2 年目に、スポット観測を 1 年目の欠測期間に行った条件における観測値と推算値。赤線が推算値、青点が調和分解に用いた観測値、緑点が欠測とした観測値を示す。ゼロ位は観測基準面。

Table 16. RMSE and LAT of each pattern in which short observation is performed the second year on the missing period of the first year. Blue characters indicate values obtained from the pattern without the missing period. Yellow characters indicate values obtained from the pattern with the missing period and without the extension of the observation period.

表 16. 観測 2 年目に、スポット観測を 1 年目の欠測期間に行った条件における RMSE 及び LAT. 青字は欠測がない条件で得られた数値, 黄色字は欠測を含むが観測期間を延長していない条件で得られた数値をそれぞれ示す.

条件	RMSE(cm)	LAT(m)
条件1	8.84	-1.29
条件4	12.29	-1.28
条件37	10.38	-1.33
条件38	10.59	-1.34
条件39	10.8	-1.33
条件40	10.8	-1.35
条件41	10.65	-1.32

た場合に調和定数へどのように影響するのか、という問いを契機に行われました。効率的な AOV 観測のために検証すべきテーマの提案に感謝いたします。

文 献

近澤昌寿・橋口祥治・大久保沙貴 (2012) 日本沿岸における潮位偏差の地域性及び季節性について, 測候時報, 79, S1-S24.

彦坂繁雄・赤木 登・矢野雄幸 (1966) 最小自乗法による潮汐調和分解とその精度について, 水路部研究報告, 1, 27-32.

伊能康平・杉山伸二・金 敬洋・土屋主税・野澤理香・小河原秀水・吉 宣好・中山浩一郎・永蔵克己・内村 忍 (2021) 自律型海洋観測装置 (AOV) の運用と観測の現状, 海洋情報部研究報告, 59, 126-142.

伊能康平・土屋主税 (2022) 潮汐表の計算について, 海洋情報部研究報告, 60, 1-15.

西村一星・増田貴仁・糸井洋人・土屋主税・加藤弘紀・松坂真衣・佐藤勝彦・田中友規・野坂琢磨・石田雄三 (2017) 自律型海洋観測装置

Table 17. Harmonic constants of each pattern in which short observation is performed the second year on the missing period of the first year, and the differences between the constants and their true values. Red characters indicate the constants with over 2 cm difference from the true value. Blue characters indicate the constants whose difference from the true value became less than 2 cm as a result of the extension of the observation period.

表 17. 観測 2 年目に、スポット観測を 1 年目の欠測期間に行った条件における調和定数とその真値との差。赤字は真値との差が 2 cm 以上であることを示す。青字は観測期間を延長することで真値との差が 2 cm 未満になった値を示す。

	条件4			条件38			条件39			条件40			条件41		
	振幅(cm)	経角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	経角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	経角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	経角(deg)	真値との差(cm)	振幅(cm)	経角(deg)	真値との差(cm)
Sa	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00	8.98	166.54	0.00
Ssa	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00	0.96	119.01	0.00
Mm	1.73	118.97	0.71	1.85	107.36	1.20	2.07	110.23	1.32	2.11	115.52	1.25	1.86	112.03	1.02
MSf	0.51	220.93	0.66	0.25	115.26	0.81	0.04	144.89	0.86	0.06	152.71	1.15	0.26	140.36	0.92
Mf	1.35	156.07	1.47	2.02	105.05	1.57	1.82	140.31	1.20	1.90	135.17	1.05	1.67	125.03	1.13
ZQ1	0.58	129.84	0.10	0.61	124.25	0.21	0.58	133.12	0.11	0.57	135.24	0.09	0.60	136.39	0.12
SIG1	0.78	159.98	0.31	0.88	154.29	0.34	0.76	157.54	0.30	0.77	157.14	0.31	0.82	155.59	0.27
Q1	3.99	150.93	0.14	4.07	151.97	0.22	4.01	151.62	0.18	4.03	151.38	0.17	4.02	152.13	0.19
RHO1	0.82	157.36	0.14	0.92	165.86	0.35	0.89	159.35	0.24	0.87	159.03	0.29	0.88	160.88	0.25
O1	19.24	160.04	0.41	19.70	161.44	1.02	19.68	161.17	0.92	19.61	160.96	0.86	19.74	161.31	1.02
MP1	0.48	193.40	0.04	0.49	184.55	0.17	0.44	193.59	0.12	0.44	192.43	0.05	0.44	193.04	0.18
M1	0.95	178.39	0.29	0.76	197.87	0.54	0.76	192.18	0.46	0.78	190.45	0.46	0.73	194.42	0.50
CHI1	0.33	215.29	0.15	0.40	209.05	0.19	0.39	201.80	0.11	0.38	203.31	0.12	0.40	203.34	0.16
P11	0.61	300.82	0.91	0.92	211.47	0.64	0.98	203.57	0.66	0.97	236.30	0.86	0.86	183.39	0.43
P1	5.84	199.53	3.31	8.60	184.67	1.20	8.59	182.27	0.97	8.17	191.84	2.04	8.35	177.00	0.42
S1	6.13	130.12	5.98	2.14	64.36	1.41	1.57	68.21	0.96	3.52	92.25	3.04	0.48	58.79	0.22
K1	18.57	191.05	7.30	24.48	179.39	0.63	23.57	178.79	0.63	22.77	184.45	2.86	23.43	176.03	1.12
PSI1	5.04	297.31	4.77	0.93	246.89	0.42	1.25	293.01	1.18	2.53	280.15	2.33	1.02	318.05	1.13
PHI1	2.23	139.05	1.91	0.36	153.57	0.08	0.99	157.36	0.71	1.29	139.61	1.06	0.96	166.06	0.60
THE1	0.23	219.20	0.08	0.25	161.88	0.21	0.23	177.73	0.16	0.22	186.34	0.17	0.22	176.24	0.15
J1	1.42	186.66	0.13	1.55	192.15	0.22	1.49	190.56	0.17	1.49	189.75	0.15	1.50	191.08	0.19
SO1	0.39	318.42	0.09	0.34	304.76	0.15	0.38	314.78	0.17	0.38	312.64	0.15	0.36	313.59	0.18
OO1	0.53	191.98	0.16	0.80	199.48	0.21	0.61	191.91	0.30	0.59	191.11	0.27	0.56	189.11	0.27
OO2	0.29	191.96	0.20	0.39	211.49	0.36	0.34	197.91	0.27	0.32	201.06	0.24	0.30	209.75	0.26
MNS2	0.31	149.33	0.09	0.35	136.91	0.09	0.35	146.38	0.07	0.33	146.03	0.06	0.33	140.10	0.06
2N2	0.76	169.22	0.06	0.75	165.16	0.03	0.77	165.10	0.01	0.75	165.66	0.03	0.76	167.24	0.04
MU2	1.03	153.36	0.12	1.12	156.83	0.12	1.03	154.90	0.17	1.05	155.42	0.16	1.08	156.17	0.13
N2	5.87	150.70	0.07	5.85	150.56	0.15	5.88	150.53	0.09	5.89	150.66	0.11	5.87	150.44	0.12
NU2	1.30	137.74	0.07	1.19	138.15	0.11	1.25	138.19	0.16	1.25	137.57	0.16	1.22	138.03	0.14
OP2	0.45	206.88	0.77	0.40	202.76	0.88	0.43	204.49	0.78	0.42	202.30	0.79	0.38	203.47	0.80
M2	40.23	151.28	0.51	40.10	151.01	0.45	40.11	151.15	0.43	40.11	151.17	0.42	40.11	151.07	0.43
MKS2	0.36	187.89	0.72	0.28	185.23	0.80	0.35	191.42	0.80	0.35	193.12	0.78	0.33	190.60	0.84
LAM2	0.58	166.90	0.19	0.56	159.83	0.23	0.56	159.40	0.20	0.56	162.03	0.24	0.58	158.52	0.21
L2	1.45	155.44	0.03	1.58	158.48	0.20	1.55	160.05	0.23	1.55	158.75	0.18	1.58	159.29	0.22
T2	1.09	189.08	0.38	1.09	157.25	0.15	1.10	170.14	0.11	1.20	186.21	0.35	1.05	164.34	0.04
S2	19.92	183.28	1.03	19.37	180.01	0.38	19.69	181.30	0.42	20.08	182.56	0.85	19.55	180.88	0.41
R2	1.60	51.91	1.46	0.26	59.53	0.42	0.86	45.35	0.74	1.41	39.24	1.14	0.68	46.36	0.65
K2	5.36	159.41	1.41	5.51	167.30	0.75	5.38	162.85	1.16	5.20	159.64	1.35	5.38	163.70	1.06
MSN2	0.06	303.70	0.03	0.02	149.48	0.09	0.04	298.50	0.03	0.03	305.69	0.06	0.03	242.51	0.05
KJ2	0.39	15.45	0.11	0.38	8.19	0.08	0.45	7.19	0.11	0.43	12.02	0.14	0.45	4.89	0.09
2SM2	0.08	236.31	0.12	0.05	237.17	0.10	0.06	242.08	0.09	0.05	244.32	0.07	0.05	245.24	0.10
MO3	0.50	278.92	0.17	0.53	279.23	0.16	0.53	280.66	0.15	0.54	280.87	0.15	0.51	279.70	0.15
M3	0.80	138.90	0.01	0.83	140.55	0.05	0.79	139.07	0.09	0.80	139.94	0.06	0.81	139.38	0.08
SO3	0.49	252.86	0.03	0.47	253.49	0.15	0.49	254.70	0.13	0.49	253.83	0.10	0.48	255.87	0.16
MK3	0.36	239.62	0.17	0.36	229.77	0.11	0.37	237.77	0.09	0.36	238.25	0.09	0.38	235.65	0.09
SK3	0.14	174.95	0.28	0.12	164.25	0.34	0.14	171.84	0.32	0.14	174.51	0.27	0.15	166.79	0.37
MN4	0.07	27.21	0.16	0.08	34.90	0.13	0.08	38.72	0.12	0.07	27.88	0.10	0.09	28.27	0.13
M4	0.61	209.50	0.13	0.63	207.18	0.07	0.61	209.36	0.07	0.63	209.10	0.08	0.61	207.97	0.07
SN4	0.14	162.70	0.18	0.14	163.25	0.07	0.14	163.22	0.09	0.15	159.18	0.11	0.15	164.14	0.08
MS4	0.42	266.23	0.12	0.41	268.45	0.06	0.43	265.50	0.05	0.42	266.75	0.04	0.43	266.92	0.07
MK4	0.17	288.16	0.17	0.19	284.89	0.14	0.19	290.93	0.19	0.18	285.97	0.15	0.20	288.28	0.17
S4	0.20	246.32	0.25	0.22	253.94	0.19	0.19	252.79	0.15	0.21	252.09	0.13	0.20	251.91	0.19
SK4	0.12	176.28	0.08	0.09	169.23	0.07	0.10	172.27	0.04	0.09	169.54	0.06	0.10	169.39	0.07
2MN6	0.03	183.19	0.03	0.03	160.59	0.01	0.03	189.48	0.01	0.03	174.46	0.01	0.03	169.64	0.01
M6	0.08	208.08	0.05	0.09	212.67	0.04	0.08	205.43	0.02	0.07	206.77	0.00	0.09	207.28	0.03
MSN6	0.03	223.21	0.02	0.02	239.52	0.01	0.03	219.55	0.00	0.04	225.63	0.01	0.03	228.79	0.01
2MS6	0.13	218.11	0.06	0.14	211.94	0.05	0.13	219.24	0.03	0.14	219.01	0.03	0.13	216.27	0.04
2MK6	0.03	86.28	0.01	0.04	77.89	0.03	0.03	79.70	0.01	0.03	67.89	0.01	0.04	73.51	0.03
2SM6	0.08	240.25	0.03	0.06	251.01	0.02	0.07	242.47	0.02	0.07	242.99	0.02	0.07	243.00	0.03
MSK6	0.03	85.85	0.04	0.04	68.89	0.05	0.03	75.90	0.05	0.03	86.93	0.04	0.03	68.88	0.05

(AOV) の運用に向けて, 海洋情報部研究報告, 54, 74-83.

松永智也・山崎哲也・糸井洋人・加藤弘紀・増田貴仁・西村一星・土屋主税・佐藤勝彦・田中友規・野坂琢磨・石田雄三・下田 力・楠本仁麦 (2018) 自律型海洋観測装置 (AOV) の運用, 海洋情報部研究報告, 56, 68-78.

村上和男 (1981) 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.

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.

土屋主税 (2020) 欠測の多い潮位データの最小二乗法による調和分解, 海洋情報部研究報告, 58, 109-125.

要 旨

海上保安庁では, 精密な最低水面の調査のために自律型海洋観測装置 (Autonomous Ocean Vehicle : AOV) を用いた潮位観測を行っている. AOV は太陽光発電により観測機器の電力を得ており, 冬季の日照量減少に伴う電力不足による観測の中断が運用上の課題となる. そこで, 冬季の観測中断中のごく短期間の観測または観測期間の延長により調和定数が欠測のない場合の値に近づくか調べた. その結果, 中断期間中の 24 時間以上の観測または翌年に中断期間と同じ月日に観測することで, 調和定数が欠測のない場合の値に近づくことが明らかになった. 本研究の成果は AOV による冬季の潮位観測実施の判断及び観測計画立案の指標として活用されることが望ましい.