

潮汐表の計算について[†]

伊能康平^{*1}, 土屋主税^{*2}

On the calculation of the tide table[†]

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

Abstract

This article reviews the algorithms used for various calculations such as predicting the tidal heights and currents for the tide table, using the tide table, and obtaining tidal harmonic constants.

1 はじめに

潮汐表は、SOLAS 条約により船舶備蓄義務のある航海用刊行物の 1 つであり、水路業務法第四条で定められた水路図誌のうち個別的かつ専門的な水路書誌である特殊図誌の 1 つとして、海上保安庁から毎年刊行されている。海図には各地の港の潮位の概要が潮信記事として掲載されており、その詳細な時刻等を知るために潮汐表が用いられる。IHO は、重要な港の潮汐予報は、そこを管理する国の機関が認めたものでなければならないと決議している。そのため各国は、IHO の勧告に従った記載方法による潮汐表を刊行している。

日本の潮汐表には、主要 74 港の高低潮の高さ及び時刻、東京、名古屋及び神戸については毎時の潮位、21 地点の潮流の最強流速及び時刻と転流時刻のほか、主要港の潮汐及び主要地点の潮流を各地の港等の潮汐及び潮流に換算する改正数表などを掲載している。翌年 1 年間の上記の潮汐・潮流の推算値を記載した潮汐表が毎年 3 月初旬頃に刊行される。国立天文台が編纂する理科年表に

は、潮汐表からの引用で、東京の潮汐が掲載されている。

令和 3 年版の潮汐表には、編集等の関係から平成 17 年版から掲載を取りやめた潮汐と潮流の性質と潮汐表の掲載項目の関係を記した「潮汐解説」が再び掲載されている。主要港の高低潮や主要な地点の最強流速などから、任意の地点の潮高や流速を計算するための補正式は、「改正数使用例」、「任意の潮高を求める表」及び「任意の流速を求める表」として潮汐表に掲載されている。しかし、潮汐表の推算値を得る詳細な計算方法は、潮汐表の編集担当職員が管理する FORTRAN のプログラムと、業務資料のマニュアルに部分的に記載されているに過ぎなかった。近年では、海洋情報部職員の養成機関である海上保安学校海洋科学課程において、プログラミング言語 Python の習得を目的とした科目があり、Python によるプログラムを扱うことができる職員が多い。このため、潮汐表に掲載する推算値を得るためのプログラムのブラックボックス化を防ぐため、筆者は従

[†] Received September 10, 2021; Accepted October 24, 2021

* 1 沿岸調査課 Coastal Surveys Division

* 2 企画課 Administration and Planning Division

来の FORTRAN プログラムを Python に書き換えた。

潮汐表は潮汐と潮流の推算値であることから、調和定数があれば推算対象の時刻を問わず算出可能である。ところが、計算の実装環境によって丸め誤差の扱い等が異なるため、高低潮の数値が 1 cm 程度、その出現時刻が 1 分程度異なることがある。潮汐表は海上保安庁の公式刊行物であることから、その数値を再利用して外部に提供するにあたって、この 1 cm、1 分の誤差を問題視されることがある。従来は潮汐表編集用の数値が記載されたテキストファイルは、そのような二次利用を前提としていなかったため、外部提供用には別の環境で同様の計算を行っていた。今後は、潮汐表作成用の推算値それ自体が、海洋情報部業務の成果物であるとして、成果物データの管理指針を作成し、二次利用を行っていくこととなる。

本総説では、利用者の便となるよう、潮汐表の掲載値を計算するアルゴリズム及び掲載値から任意の場所の潮汐や潮流を計算するアルゴリズムの詳細をレビューする。このレビューは、潮汐表用推算プログラムの Python 化の過程で整理したものであり、データ管理にも必須のものとする。

2 潮汐表掲載値を得るための計算

2.1 推算

各時刻 t の推算値 $H(t)$ は次の式で求められる。

$$H(t) = Z_0 + \sum_{i=1}^n f_i H_i \cos(\omega_i t + V_{0i} + u_i - \kappa_i)$$

ここで、 Z_0 は、潮汐においては、最低水面から平均水面までの高さを表す。各地の港の最低水面から平均水面までの高さは、海上保安庁のウェブサイトで公開されている、「平均水面、最高水面及び最低水面一覧表」に掲載されている。潮流においては恒流と呼ばれる平均流である。添え字の i は潮汐を構成する周波数成分を表す番号である。この周波数成分を分潮と呼び、日本では 60 個の分潮を使用している。 ω_i が各分潮の角速度で、[度/時] の単位で表される。時刻 t の単位

は時 (hour) である。推算対象地点の各分潮の振幅と位相はそれぞれ H_i と κ_i で表される。 κ_i は遅角とも呼ばれる。調和定数というときは、ある地点の 60 の分潮の振幅と遅角のセットを表す。 V_{0i} は平衡潮汐の位相と呼ばれる。 f_i と u_i は分潮 i の 8.9 年及び 18.6 年周期の変動に対応する振幅及び遅角の修正項で、天文因数及び天文引数とそれぞれ呼ばれる。

2.1.1 調和定数

調和定数は地点ごとに与えられる、時間に依存しない定数である。水位又は流速の時系列データを調和分解して得られる。海上保安庁と気象庁が所管する常設験潮所の水位データから得られた調和定数は、それぞれのウェブサイトで公開されている (海上保安庁, 2021; 気象庁, 2021)。調和定数については第 4 章でも触れている。

2.1.2 平衡潮汐の位相、天文因数及び天文引数

平衡潮汐の位相、天文因数及び天文引数は、推算や、のちに述べる調和分解を行う期間の長さに比べその時間変化が緩やかであることから、時刻 t によらない一定の値を使用する。これらの定数は、月の平均黄経 s 、月の近地点の平均黄経 p 、太陽の平均黄経 h 、月の昇交点の平均黄経 N という 4 つの天文パラメータにより求める。これらの天文パラメータは、潮汐表の計算では、海上保安庁が発行した天体位置表 1996 年版の数値を、2000 年 1 月 1 日を元期として線形化した下記の式で算出する。なお、下式では、 s 、 p 、 h 、 N 、 D に、推算期間の開始と中間の日の値を表す添え字をそれぞれ d と m として付している。

$$s_d = 211.728 + 129.38471(Y - 2000) + 13.176396(D_d + l)$$

$$h_d = 279.974 - 0.23871(Y - 2000) + 0.985647(D_d + l)$$

$$p_d = 83.298 + 40.66229(Y - 2000) + 0.111404(D_d + l)$$

$$N_m = 125.071 - 19.32812(Y - 2000) - 0.052954(D_m + l)$$

$$p_m = 83.298 + 40.66229(Y - 2000) + 0.111404(D_m + l)$$

ここで、 Y は年、 D は Y 年における1月1日からの経過日数、 l は $\text{int}((Y+3)/4) - 500$ で与えられる、2000年の年初から Y 年の年初までの間のうるう日の数をそれぞれ表す。

これらの天文パラメータと、その地の経度 L を用いて、平衡潮汐の位相 V_{0i} は次のように計算される。

$$V_{0i} = -\alpha_{0i}L + \alpha_{1i}s_d + \alpha_{2i}h_d + \alpha_{3i}p_d + \alpha_{4i}$$

係数の α_{0i} , α_{1i} , α_{2i} , α_{3i} , α_{4i} は、分潮ごとに決まった係数であり、Table 1の通り与えられる。天文因数と天文引数 f_i と u_i は、以下の10の分潮の f_i と u_i の和積で与えられる (Table 1)。

まず、Mm, Mf, O₁, K₁, J₁, OO₁, M₂, K₂の f_i と u_i は、次の式で計算されている。

$$f_i = \beta_{0i} + \beta_{1i} \cos(N_m) + \beta_{2i} \cos(2N_m) + \beta_{3i} \cos(3N_m)$$

$$u_i = \gamma_{1i} \sin(N_m) + \gamma_{2i} \sin(2N_m) + \gamma_{3i} \sin(3N_m)$$

そして、L₂分潮及びM₁分潮については、次の式で計算されている。

$$f_i = (x^2 + y^2)^{1/2}$$

$$u_i = \tan^{-1}(y/x)$$

ここで、 x と y は、L₂分潮については、次の式で計算されている。

$$X = 1 - 0.2505 \cos(2p_m) - 0.1102 \cos(2p_m - N_m) - 0.0156 \cos(2p_m - 2N_m) - 0.0370 \cos(N_m)$$

$$Y = -0.2505 \sin(2p_m) - 0.1102 \sin(2p_m - N_m) - 0.0156 \sin(2p_m - 2N_m) - 0.0370 \sin(N_m)$$

M₁分潮については、次の式で計算される。

$$X = 2 \cos(p_m) + 0.4 \cos(p_m - N_m)$$

$$Y = \sin(p_m) + 0.2 \sin(p_m - N_m)$$

係数の β_{0i} , β_{1i} , β_{2i} , β_{3i} , γ_{1i} , γ_{2i} , γ_{3i} は、分潮ごとに決まった係数であり、Table 2の通り与えられる。

Table 1. Coefficients for calculating V_{0i} , f_i and u_i of tidal constituents.

表 1. 各分潮の V_{0i} の計算時の係数、 f_i 及び u_i .

	α_{0i}	α_{1i}	α_{2i}	α_{3i}	α_{4i}	f_i	u_i
Sa	0	0	1	0	0	1	0
Ssa	0	0	2	0	0	1	0
Mm	0	1	0	-1	0	f_{Mm}	u_{Mm}
MSf	0	2	-2	0	0	f_{M2}	$-u_{M2}$
Mf	0	2	0	0	0	f_{Mf}	u_{Mf}
2Q1	1	-4	1	2	270	f_{O1}	u_{O1}
SIG1	1	-4	3	0	270	f_{O1}	u_{O1}
Q1	1	-3	1	1	270	f_{O1}	u_{O1}
RHO1	1	-3	3	-1	270	f_{O1}	u_{O1}
O1	1	-2	1	0	270	f_{O1}	u_{O1}
MP1	1	-2	3	0	90	f_{M2}	u_{M2}
M1	1	-1	1	0	90	f_{M1}	u_{M1}
CH1	1	-1	3	-1	90	f_{J1}	u_{J1}
PI1	1	0	-2	0	193	1	0
P1	1	0	-1	0	270	1	0
S1	1	0	0	0	180	1	0
K1	1	0	1	0	90	f_{K1}	u_{K1}
PS1	1	0	2	0	167	1	0
PH1	1	0	3	0	90	1	0
THE1	1	1	-1	1	90	f_{J1}	u_{J1}
J1	1	1	1	-1	90	f_{J1}	u_{J1}
SO1	1	2	-1	0	90	f_{O1}	$-u_{O1}$
OO1	1	2	1	0	90	f_{OO1}	u_{OO1}
OQ2	2	-5	2	1	180	f_{O1}^2	u_{O1}^2
MNS2	2	-5	4	1	0	f_{M2}^2	$2u_{M2}$
2N2	2	-4	2	2	0	f_{M2}	u_{M2}
MU2	2	-4	4	0	0	f_{M2}	u_{M2}
N2	2	-3	2	1	0	f_{M2}	u_{M2}
NU2	2	-3	4	-1	0	f_{M2}	u_{M2}
OP2	2	-2	0	0	180	f_{O1}	u_{O1}
M2	2	-2	2	0	0	f_{M2}	u_{M2}
MKS2	2	-2	4	0	0	$f_{M2} * f_{K2}$	$u_{M2} + u_{K2}$
LAM2	2	-1	0	1	180	f_{M2}	u_{M2}
L2	2	-1	2	-1	180	f_{L2}	u_{L2}
T2	2	0	-1	0	283	1	0
S2	2	0	0	0	0	1	0
R2	2	0	1	0	257	1	0
K2	2	0	2	0	0	f_{K2}	u_{K2}
MSN2	2	1	0	-1	0	f_{M2}^2	$2u_{M2}$
KJ2	2	1	2	-1	180	$f_{K1} * f_{J1}$	$u_{K1} + u_{J1}$
2SM2	2	2	-2	0	0	f_{M2}	$-u_{M2}$
MO3	3	-4	3	0	270	$f_{M2} * f_{O1}$	$u_{M2} + u_{O1}$
M3	3	-3	3	0	180	$f_{M2}^{3/2}$	$(3/2)u_{M2}$
SO3	3	-2	1	0	270	f_{O1}	u_{O1}
MK3	3	-2	3	0	90	$f_{M2} * f_{K1}$	$u_{M2} + u_{K1}$
SK3	3	0	1	0	90	f_{K1}	u_{K1}
MN4	4	-5	4	1	0	f_{M2}^2	$2u_{M2}$
M4	4	-4	4	0	0	f_{M2}^2	$2u_{M2}$
SN4	4	-3	2	1	0	f_{M2}	u_{M2}
MS4	4	-2	2	0	0	f_{M2}	u_{M2}
MK4	4	-2	4	0	0	$f_{M2} * f_{K2}$	$u_{M2} + u_{K2}$
S4	4	0	0	0	0	1	0
SK4	4	0	2	0	0	f_{K2}	u_{K2}
2MN6	6	-7	6	1	0	f_{M2}^3	$3u_{M2}$
M6	6	-6	6	0	0	f_{M2}^3	$3u_{M2}$
MSN6	6	-5	4	1	0	f_{M2}^2	$2u_{M2}$
2MS6	6	-4	4	0	0	f_{M2}^2	$2u_{M2}$
2MK6	6	-4	6	0	0	$f_{M2}^2 * f_{K2}$	$2u_{M2} + u_{K2}$
2SM6	6	-2	2	0	0	f_{M2}	u_{M2}
MSK6	6	-2	4	0	0	$f_{M2} * f_{K2}$	$u_{M2} + u_{K2}$

Table 2. Coefficients for calculating f_i and u_i .表 2. f_i と u_i の計算のための係数.

	β_{0i}	β_{1i}	β_{2i}	β_{3i}	γ_{1i}	γ_{2i}	γ_{3i}
Mm	1.0000	-0.1300	0.0013	0.0000	0.00	0.00	0.00
Mf	1.0429	0.4135	-0.0040	0.0000	-23.74	2.68	-0.38
O1	1.0089	0.1871	-0.0147	0.0014	10.80	-1.34	0.19
K1	1.0060	0.1150	-0.0088	0.0006	-8.86	0.68	-0.07
J1	1.0129	0.1676	-0.0170	0.0016	-12.94	1.34	-0.19
OO1	1.1027	0.6504	0.0317	-0.0014	-36.68	4.02	-0.57
M2	1.0004	-0.0373	0.0002	0.0000	-2.14	0.00	0.00
K2	1.0241	0.2863	0.0083	-0.0015	-17.74	0.68	-0.04

2.1.3 特殊な地点の潮流の推算

関門海峡、来島海峡西水道、鳴門海峡の潮流については、推算値に特殊な処理を追加している。

関門海峡は早瀬瀬戸の中央部の東側で潮流が最大となるが、船舶通航量が多く、直接観測することができない。早瀬瀬戸を見下ろす火ノ山下潮流信号所の前面海域では、平成12年から18年まで海底設置型の ADCP による観測が行われ、調和定数が算出された。この調和定数を使用した潮流推算値に対し、早瀬瀬戸中央部の最強流速は、西流のとき2.0倍、東流のとき2.4倍であったことから、この倍率を掛けた値を関門海峡の最強流速として掲載している。来島海峡西水道でも、海底設置型 ADCP の観測をもとに求められた調和定数を用いて推算を行い、それに、南南東流のとき1.25倍、北北西のとき1.23倍の倍率を掛けた値を来島海峡西水道の最強流速として掲載している。

鳴門海峡の潮流は、いずれも淡路島沿岸の、海峡北部の阿那賀と、海峡南部の福良の潮位観測により求められた調和定数から、海峡を挟む南北の水位差を求め、水位差と潮流が一定の関係にあると仮定して求められた潮流の調和定数により算出されている（難波・坂口，2005）。このような調和定数は水位差定数と呼ばれている。

2.1.4 潮汐表の推算期間

潮汐の推算は、1年分をまとめて行う。それに対し、潮流の推算は1日ごとに行う。潮汐は1cm単位、潮流は0.1kt単位で潮汐表に掲載され

るが、潮汐の標準港の高低潮の差は10cm以上あるのに対し、潮流の上げ潮流・下げ潮流の流速差は1ktに満たない地点もある。潮流はその振幅が小さいため、わずかながら時間変化する平衡潮汐の位相、天文因数及び天文引数を1年間一定と仮定した際の誤差が無視できないと考えられる。

潮汐表には毎年1月1日から12月31日の推算値が掲載されるが、前の年の12月31日の最後が極大値だった場合、その年の1月1日は極小値から始まることが求められる。潮汐の推算においては、このような連続性を保つため、1月1日の推算値は、その年の天文パラメータによる推算値と、前の年の天文パラメータによる推算値の平均値とし、12月31日の推算値は、その年の天文パラメータによる推算値と、翌年の天文パラメータによる推算値の平均値としている。

2.1.5 平均水面について

験潮所における観測では、平均水面は一定の期間の平均値で与えられるため、験潮所の観測基準面上の平均水面は、厳密に言えば平均する期間により異なる。推算の式では、平均水面はその定義から必ず Z_0 となり、実際の平均水面の変動を反映しない。推算に用いる Z_0 は、主要四分潮の振幅の和により定義されるが、厳密に一致しているわけではなく、周囲の観測地点との整合性等により適当な値に丸められていることがある。

2.2 ホームページの推算と潮汐表の推算の違い

潮汐・潮流推算値は、海上保安庁からだけでも、潮汐表ばかりでなく、海洋情報部ウェブサイトの潮汐・潮流推算のページ、リアルタイム験潮データページ、各管区ウェブサイトのコンテンツ等としても提供されている。特に、潮汐・潮流推算のページでは、西暦元年から2100年までの任意の1日の推算を可能にしており、12世紀の源平合戦の日付で瀬戸内海における潮流を推測するなどの活用事例が時折ある。

潮汐・潮流推算のページでは、2000年1月1

日元期で線形化された天文パラメータの代わりに、下記の式により天文パラメータを算出している (齊藤, 1989).

$$s_d = 335.723436 + 481267.887361 t_{Md} + 3.38888 \times 10^{-3} t_{Md}^2 + 1.83333 \times 10^{-6} t_{Md}^3$$

$$p_d = 225.397325 + 4069.053805 t_{Md} - 1.02869 \times 10^{-2} t_{Md}^2 - 1.22222 \times 10^{-5} t_{Md}^3$$

$$h_d = 280.6824 + 36000.769325 t_{Sd} + 7.22222 \times 10^{-4} t_{Sd}^2$$

$$N_m = 33.272936 - 1934.144694 t_{Mm} + 2.08028 \times 10^{-3} t_{Mm}^2 + 2.08333 \times 10^{-6} t_{Mm}^3$$

$$p_m = 225.397325 + 4069.053805 t_{Mm} - 1.02869 \times 10^{-2} t_{Mm}^2 - 1.22222 \times 10^{-5} t_{Mm}^3$$

ここで、月の元期から推算対象日までの時間 t_{Md} 、太陽の元期から推算対象日までの時間 t_{Sd} 、月の元期から推算対象年の7月1日までの時間 t_{Mm} は、推算対象日をユリウス通日で表した J_d 、推算対象年の7月1日をユリウス通日で表した J_m を用いて次の式によって得られる。

$$t_{Md} = (J_d - 2378496) / 36525$$

$$t_{Sd} = (J_d - 2415021) / 36525$$

$$t_{Mm} = (J_m - 2378496) / 36525$$

2.3 ピークの推定

潮汐表には、潮汐の高潮、低潮の時刻とその潮位、潮流の流速ゼロである転流の時刻と、上げ潮流、下げ潮流が最強となる時刻とその速さを掲載している。これらのピークを推定するため、まずは6分間隔で潮汐、潮流の推算を行っている。潮汐については、1月1日と12月31日は、当年の天文パラメータによる推算値と、前後の年の天文パラメータによる推算値の平均値を採用している。

潮汐のピークは、3つの時刻の推算値を二次関数にフィッティングし、その極値として求めている (Fig. 1)。潮汐は一般に半日周期で高低潮を繰り返すので、潮汐表利用者も、高潮、低潮が1日にあわせて4回程度並んでいることをイメージすると考えられる (Fig. 2)。一方、Fig. 3のようにピーク付近で同程度の潮位がなだらかに続く場合

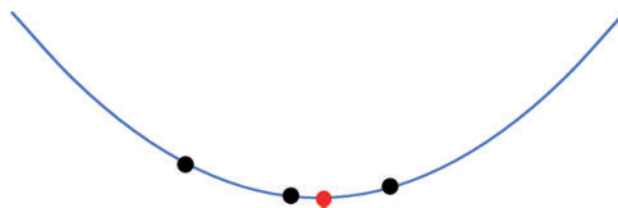


Fig. 1. Calculation of tidal peak. Black dots stand for the predicted values. Blue line stands for the quadratic function that fits the three predicted values. Red dot stands for the calculated tidal peak.

図1. 潮汐のピークの算出。黒点が推算値、青線が3つの推算値を通る二次関数、赤点が潮汐のピーク。

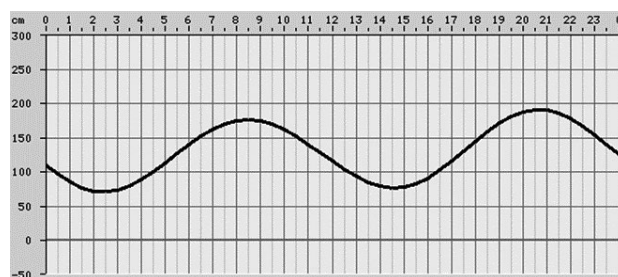


Fig. 2. An image of a usual daily tide.

図2. 一般的な1日の高低潮のイメージ。

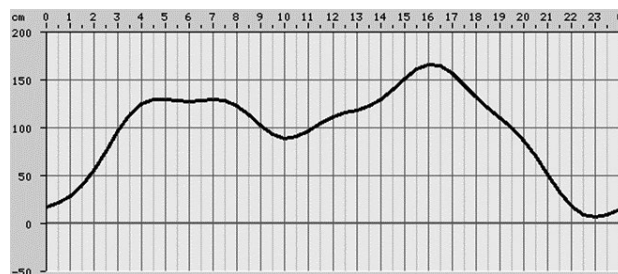


Fig. 3. An image of a tide when the same level continued gently near the high water.

図3. 高潮付近で同程度の潮位がなだらかに続いた場合の潮汐のイメージ。

や、Fig. 4のように振幅が小さく比較的日周潮が卓越した場合には、1日に4個以上のピークが検出されることがある。これらは航海者にとっては過剰な情報であり、一般的なイメージに合った高潮、低潮の並びを掲載するため、ピークの取捨選択を行っている。

このアルゴリズムについては、従来のプログラムでは、複雑な条件分岐が存在していた。まずは従来の方法についてレビューする。

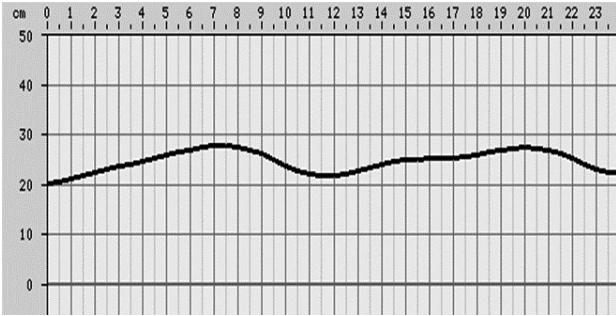


Fig. 4. An image of a tide when the amplitude was small and the diurnal tide was relatively predominant.

図 4. 振幅が小さく比較的日周潮が卓越した場合の潮汐のイメージ。

2.3.1 潮汐のピークの種類

連続する4つのピークが、短い時間で生じていたり、相次ぐピークの潮位の差が小さかったりする場合を考える。本節ではある時刻 t_1 に検出されたピークの潮位を h_1 、次の極値 h_2 の時刻が t_2 、これに続く極値 h_3 の時刻が t_3 、最後の極値 h_4 の時刻が t_4 と表記する。ピーク自体を (t_1, h_1) のように表記する。ピークとなる時刻の差、ピークの潮位の差を次のように定義する (Fig. 5)。

$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= t_2 - t_1 \\ \Delta t_2 &= t_3 - t_2 \\ \Delta t_3 &= t_4 - t_3 \\ \Delta t_4 &= t_4 - t_1 \\ \Delta h_1 &= |h_2 - h_1| \\ \Delta h_2 &= |h_3 - h_2| \\ \Delta h_3 &= |h_4 - h_3| \\ \Delta h_4 &= |h_4 - h_1| \end{aligned}$$

有意なピークであるかどうかは、ピークとなる時刻の差とピークの差の積 ($\Delta t_j \Delta h_j$, 添え字の j)

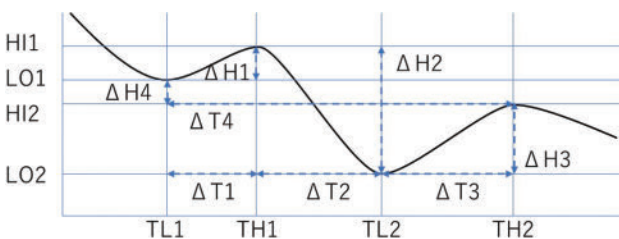


Fig. 5. The definition of time and level of peaks and their difference.

図 5. ピークとなる時刻及び潮位とその差の定義。

はピークの検出順を表す) により判断する。ピークとなる時刻の差とピークの差の積の単位は [時・cm] とする。Fig. 5 はピークが低潮から始まっているが、本節の議論は高潮から始まっている場合もまったく同じように成り立つ。

ピークの取捨選択は、あるピークが検出されたら、その後の4つの連続するピークの時刻と潮位を用いて行われる。これらのピークの相対的な位置によって、全体的な形を次の5つのパターンに分類し、イメージしやすいように名前を付けておく。

1. 双子潮 (Fig. 6). 大局的なピークの中央に凹みができて、3つのピークが連続している。4つ目のピークはこれらからずっと離れたところにある。
2. 短時間で連続する高低潮 (Fig. 7). 4つのピークが非常に近い。
3. 潮の踊り場 (Fig. 8). 大局的に2つの隣接したピークの中に、小さなピークが2つ

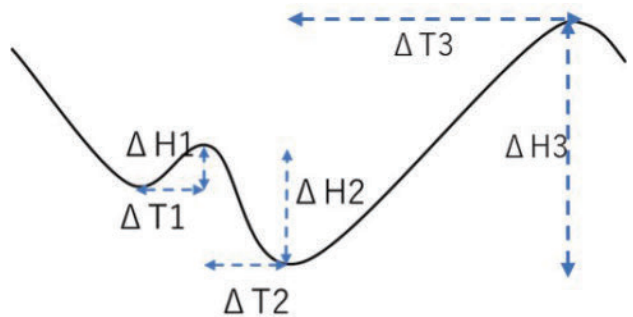


Fig. 6. An image of a twin tide.

図 6. 双子潮のイメージ。

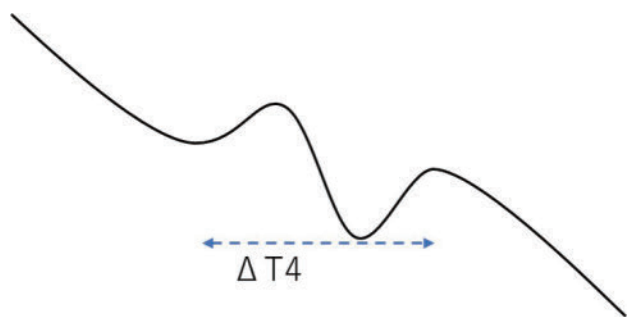


Fig. 7. The image of successive high and low waters in a short time.

図 7. 短時間で連続する高低潮のイメージ。

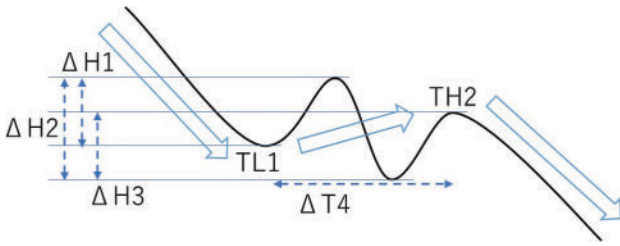


Fig. 8. An image of the landing of tides.
 図 8. 潮の踊り場のイメージ.

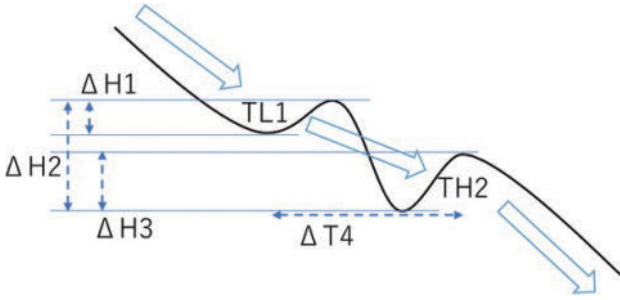


Fig. 9. An image of the slide of tides.
 図 9. 潮の滑り台のイメージ.



Fig. 10. An image of unclear and successive high and low waters.
 図 10. はっきりしない相次ぐ高低潮のイメージ.

ある.

4. 潮の滑り台 (Fig. 9). 大局的にはなだらかに潮位低下あるいは潮位上昇しているものの、中央の2つのピークがわずかに目立ち、その前後に小さなピークがある.
5. はっきりしない相次ぐ高低潮 (Fig. 10). 大局的に極大、極小が現れる前の、なだらかに潮位低下あるいは潮位上昇しているときに、2つ小さなピークがある.

2.3.2 従来の方法

まずは従来の潮汐のピークを取捨選択について述べる.

$\Delta t_1 \Delta h_1 \geq 1.5$ のときは、ピークとして (h_1, t_1) を採用し、 (h_2, t_2) 以降は次のピークを取捨選択を行う.

$\Delta t_1 \Delta h_1 < 1.5$ かつ $\Delta t_2 \Delta h_2 < 1.5$ かつ $\Delta t_3 \Delta h_3 \geq 1.5$ のときは、双子潮 (Fig. 6) であり、 (h_1, t_1) と (h_2, t_2) のうちより凸の方 (低潮ならばより小さい値、高潮ならばより大きい値) をピークとして採用し、その時刻は平均の値の $(t_1 + t_2) / 2$ とする. 次の判定は、 (h_4, t_4) から行う.

$\Delta t_1 \Delta h_1 < 1.5$ かつ $\Delta t_2 \Delta h_2 < 1.5$ かつ $\Delta t_3 \Delta h_3 < 1.5$ かつこの4つのピークの起こる時間が1.5時間を超えない ($\Delta t_4 < 1.5$) 時、短時間で連続する高低潮 (Fig. 7) であり、これらすべてを採用しない. 次の判定は、 (h_4, t_4) の次に起こるピークから行う.

$\Delta t_1 \Delta h_1 < 1.5$ かつ $\Delta t_2 \Delta h_2 < 1.5$ かつ $\Delta t_3 \Delta h_3 < 1.5$ かつこの4つの極値の起こる時間が1.5時間を超え ($\Delta t_4 \geq 1.5$), かつ、 $\Delta h_1 + \Delta h_3 \geq \Delta h_2$ のときは、潮の踊り場 (Fig. 8) であり、 (t_1, h_1) と (t_4, h_4) を高低潮として採用する. この場合、 (t_2, h_2) と (t_3, h_3) を削除する. 逆に、 $\Delta h_1 + \Delta h_3 < \Delta h_2$ のときは、潮の滑り台 (Fig. 9) であり (t_2, h_2) と (t_3, h_3) は極値とはならないため、4つすべてを高低潮として採用しない. 次の判定は、 (t_4, h_4) の次に起こるピークから行う.

$\Delta t_1 \Delta h_1 < 1.5$ かつ $\Delta t_2 \Delta h_2 \geq 1.5$ かつ $\Delta t_3 \Delta h_3 \geq 1.5$ のときは、相次ぐ高低潮がはっきりしない場合 (Fig. 10) であり、 $\Delta t_1 > 1.5$ のときは、 (h_1, t_1) と (h_2, t_2) をピークとして採用する. $\Delta t_1 \leq 1.5$ のときは、 (h_1, t_1) と (h_2, t_2) をピークとして採用しない. 次の判定は、 (h_3, t_3) から行う.

なお、 $\Delta t_1 \Delta h_1 < 1.5$ かつ $\Delta t_2 \Delta h_2 \geq 1.5$ かつ $\Delta t_3 \Delta h_3 < 1.5$ のときも、 $\Delta t_1 \Delta h_1 \geq 1.5$ のときと同じく (h_1, t_1) を採用し、 (h_2, t_2) 以降は次の判定を行うことになるが、意図ははっきりしない.

条件分岐についてまとめると Fig. 11 のようになる.

このようにしてピークを取捨選択したのち、採用されたピークが、次のピークと1時間以内にあるばあい、もとのピークを不採用とする.

高低潮の時刻は、○分-30秒から○分 29.999...秒までを○分として表記する.

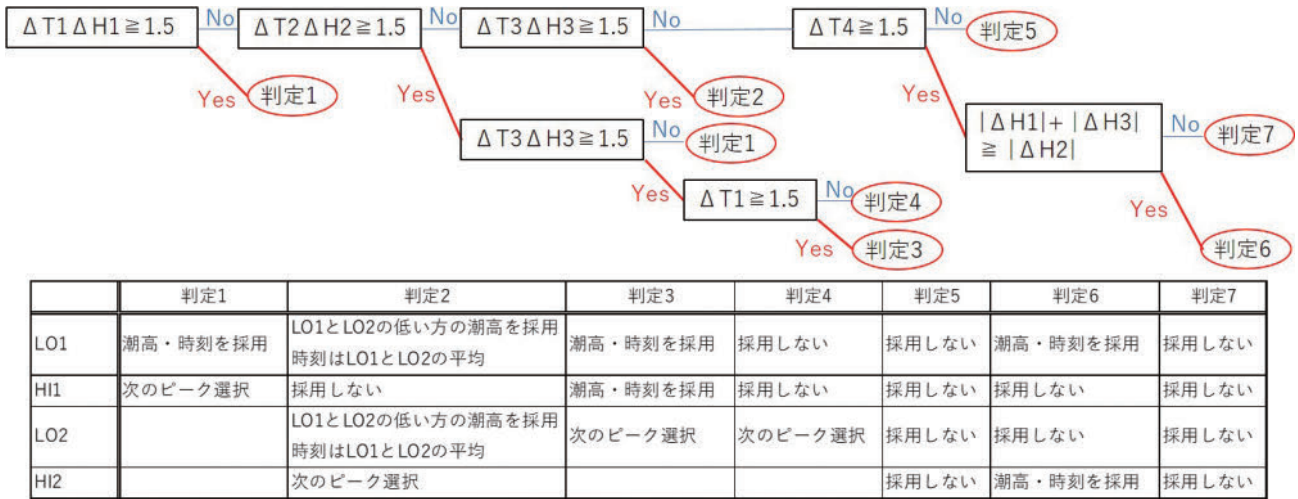


Fig. 11. The conventional conditional branch for peak choice.

図 11. 従来のピークの取捨選択の条件分岐.

2.3.3 一般的な方法への移行

次に、移行後の潮汐のピークの取捨選択について述べる。海上保安庁以外の国の機関では、気象庁が全国各地の天文潮位の予測値を潮位表として公開している。潮汐表と潮位表は同じ調和定数から高潮、低潮の数値を算出している。しかし、潮汐のピークの算出方法の違いにより、潮汐表に記載されているが、潮位表に記載されていない高潮、低潮があった (Fig. 12)。この差異は相次ぐ高低潮がはっきりしない場合にあらわれたものであり、記載の有無が航行に与える影響は少ないと思われる。一方、機関ごとに異なる内容を提供していることは利用者の混乱を招く恐れがあるため、海上保安庁の潮汐のピークの取捨選択を気象庁と同様の方法へと移行した。

移行後の潮汐のピークの取捨選択は、沿岸開発技術ライブラリー No. 13 潮位を測る (海象観測情報の解析・活用に関する研究会編, 2002) の方法に基づいている。

$\Delta t_1 \Delta h_1 \geq 1.5$ かつ $\Delta t_1 > 1$ のときは、ピークとして (h_1, t_1) を採用し、 (h_2, t_2) 以降は次のピークの取捨選択を行う (判定 A)。

判定 A 以外の場合で $\Delta t_2 \Delta h_2 \geq 1.5$ かつ $\Delta t_2 > 1$ のときは、 (h_1, t_1) と (h_2, t_2) をピークとして採用しない。次の判定は、 (h_3, t_3) から行う (判定 B)。

判定 A 及び B 以外の場合で $\Delta t_3 \Delta h_3 \geq 1.5$ かつ $\Delta t_3 > 1$ のときは、 (h_1, t_1) と (h_3, t_3) のうちより凸の方 (低潮ならばより小さい値、高潮ならばより大きい値) をピークとして採用し、その時刻は平均の値の $(t_1 + t_3) / 2$ とする。次の判定は、 (h_4, t_4) から行う (判定 C)。

判定 A, B 及び C 以外の場合で $\Delta t_4 \Delta h_4 \geq 1.5$ かつ $\Delta t_4 > 1$ のときは、 (t_1, h_1) と (t_4, h_4) をピークとして採用する。次の判定は、 (t_4, h_4) の次に起こるピークから行う (判定 D)。

判定 A, B, C 及び D 以外の場合は (h_1, t_1) , (h_2, t_2) , (h_3, t_3) , (h_4, t_4) をピークとして採用しない。次の判定は、 (t_4, h_4) の次に起こるピークから行う (判定 E)。

移行後の条件分岐についてまとめると Fig. 13 のようになる。

2.3.4 潮流のピークの取捨選択

潮流は、流速の極値である上げ潮流の最強流と下げ潮流の最強流の間に、流速がゼロとなる転流が生じる。また、上げ潮流と下げ潮流の流速が同符号の場合は、転流が生じない。これらの取捨選択は、このような制約条件を満たす、以下に記載するアルゴリズムで実装されている。

最強流については、流速の微分量がゼロとなる値を求めるため、流速の微分量が連続する 2 つの

3 稚 内 WAKKANAI

緯度 45° 24' N. 経度 141° 41' E.

稚内
WAKKANAI

2020 年

1 月		2 月	
時刻 Time	潮高 Ht.	時刻 Time	潮高 Ht.
h m	cm	h m	cm
1 04 04	25	16 05 19	20
14 20	5	13 19	3
		21 10	11
		23 20	10
		E	
2 04 30	22	17 03 42	15
14 38	6	13 12	5
		21 33	12
		23 20	10
		●	
3 04 41	18	18 00 46	10
13 34	7	03 20	11
●E		07 43	8
22 30	14	13 04	6
		21 52	14
		19 30	18
		S	
4 00 48	13	19 08 34	3
04 01	14	19 30	18
12 45	7		
22 43	15		
5 11 35	6	20 09 17	-1
23 04	18	20 05	22
6 10 14	5	21 09 56	-3
23 34	20	20 52	24
7 09 45	3	22 10 31	-4
		21 50	26
		N	
8 00 11	23	23 11 02	-4
09 53	0	22 59	27
		S	
9 00 53	25	24 11 25	-3
10 19	-1		
10 01 38	27	25 00 18	27
10 54	-3	11 41	-2
		●	
11 02 26	29	26 01 39	26
11 36	-3	11 56	-2
		○	
12 03 17	29	27 02 38	26
12 24	-4	12 18	-1
		19 07	12
		20 57	11
13 04 10	29	28 03 18	24
13 14	-3	12 41	0
		19 27	11
		21 42	10
		E	
14 05 03	27	29 03 49	21
13 58	-2	12 56	1
		19 47	10
		22 21	9
		P	
15 05 56	24	30 04 15	18
14 08	0	12 42	2
20 51	11	AE	
22 14	10	20 00	10
		23 03	8
		31 04 34	15
		12 13	3
		20 07	11
		23 54	8
		15 00 02	4
		05 04	9
		08 29	8
		11 47	4
		18 25	14

時刻: 9hE.

日	満潮		干潮	
	時分	cm	時分	cm
1月 1	4 4	25		
2	4 30	22		14 20 5
3	上弦 4 41	18		14 38 6
4	4 1	14		13 34 7
5			22 43 15	12 45 7
6			23 4 18	
7				11 35 6
8	0 11	23		9 45 3
9	0 53	25		9 53 0
10	1 38	27		10 19 -1
11				10 54 -3
12	望 2 26	29		11 36 -3
13	3 17	29		
14	4 10	29		12 24 -4
15	5 3	27		13 14 -3
16	5 56	24		13 59 -2
17				14 8 0
18	下弦 5 19	20	21 10 11	13 19 3
19	3 42	15	21 33 12	23 20 10
20	3 20	11	21 52 14	13 4 6
21			19 30 18	8 34 3
22			20 5 22	9 17 -1
23				
24			20 52 24	9 56 -3
25	朔 0 18	27	21 50 26	10 31 -4
26			22 59 27	11 2 -4
27				11 25 -3
28				11 41 -2
29				11 56 -2
30				12 18 -1
31				12 41 0
2月 1	上弦 4 41	11	19 27 11	12 56 1
2			19 47 10	12 42 2
3			20 0 10	12 13 3
4			20 7 11	12 13 3
5				
6			20 11 13	11 52 3
7			20 19 15	11 26 3
8			20 22 17	10 17 2
9			20 17 19	9 16 0
10			20 35 21	9 17 -2
11			22 47 22	9 41 -4
12				10 15 -5
13	望 1 34	24		10 55 -6
14	2 38	25		11 38 -7
15	3 36	25		
16				12 19 -7
17				
18			18 51 9	12 52 -5
19			19 6 9	12 35 -2
20			19 25 10	12 2 0
21			19 39 11	11 56 3
22			18 25 14	0 2 4
23				
24			18 3 18	6 57 1
25			18 34 21	8 3 -2
26			19 16 23	8 53 -5
27			20 8 23	9 34 -5
28			21 15 22	10 9 -5
29				
30				10 35 -4
31				10 49 -3
1月 1				10 55 -2
2			17 24 11	19 30 10
3			17 37 10	20 28 7
4			17 55 10	21 13 5
5				
6				
7				
8				
9	朔 0 10	21		
10	2 35	21	17 24 11	10 55 -2
11	3 15	20	17 37 10	11 9 -2
12	3 46	19	17 55 10	11 28 -2
13				20 28 7
14				21 13 5
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				
25				
26				
27				
28				
29				

Fig. 12. The difference between the tide tables published by Japan Coast Guard and Japan Meteorological Agency. Black squares indicate the values printed only on the tide table published by Japan Coast Guard. 図 12. 潮汐表と潮位表の差違. 四角で囲った部分は潮汐表にのみ掲載された値であることを示す.

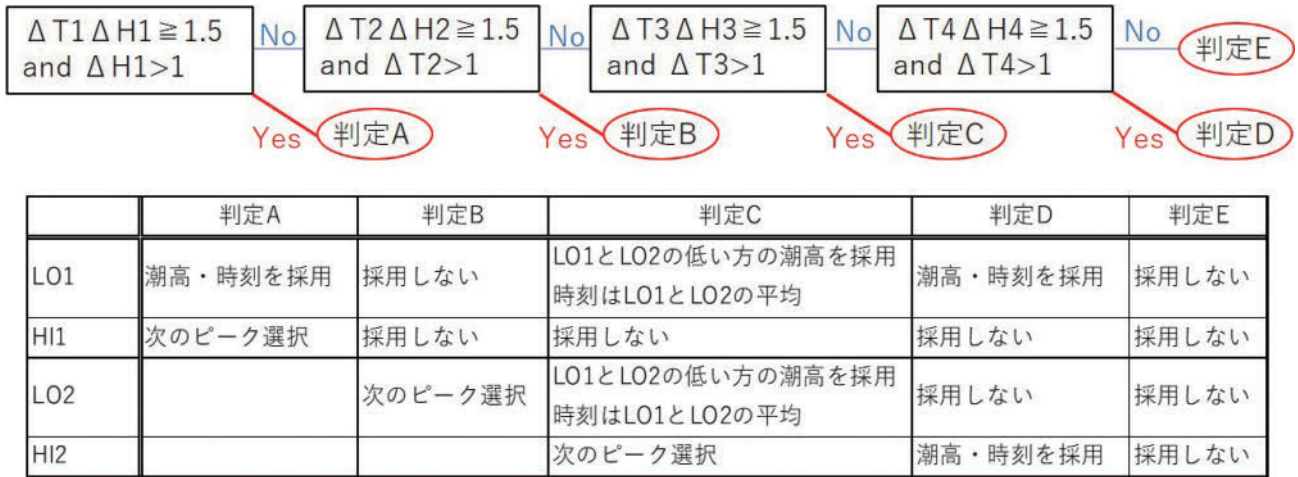


Fig. 13. The present conditional branch for peak choice.
 図 13. 移行後のピークの取捨選択の条件分岐.

データで符号が異なるとき，次のようにして，上げ下げ時刻を 2^{-7} 時間（約 0.5 分）の精度まで求める。

ある時刻の流速微分量の符号が，その 6 分前の流速微分量の符号と異なるとき，次の処理を開始する。その時刻の 2^{-1} 時間（30 分）前の流速微分量と， 2^{-2} 時間（15 分）前の流速微分量の符号が異なるか確認する。この 2 つの流速微分量の符号が同一であれば， 2^{-2} 時間（15 分）前の流速微分量と， 2^{-3} 時間（7.5 分）前の流速微分量の符号が異なるか確認する。もし 2 つの流速微分量の符号が異なる場合は，その期間をさらに 2 つに分け，前半の期間について同じ判定を行う。これを 6 回繰り返す。最後に，符号が異なる 2 つの流速微分量の時刻のうちはじめの時刻を最強流の時刻として採用する。

転流時刻は，同じ処理を流速について行い， 2^{-7} 時間の精度まで求める。

ピークの取捨選択は次の通りである。1 時間以内に転流時刻が 3 つ続いたとき，転流時刻をその 3 つの転流時刻の平均とし，3 つの転流時刻に挟まれた 2 つの潮流極値（上げ潮流と下げ潮流 1 つずつ）を採用しない。1 時間以内に潮流極値が 3 つ続いたとき，それが上げ潮流 2 つと下げ潮流 1 つならばその 3 つの極値のうち最大のものを上げ潮流最強として採用し，上げ潮流最強時刻は 3 つ

の潮流極値の時刻の平均とする。上げ潮流 1 つと下げ潮流 2 つならば，その 3 つの極値のうち最小のものを下げ潮流最強として採用し，下げ潮流時刻は 3 つの潮流極値の時刻の平均とする。

転流に関連して，さらに次の処理が行われる。潮流極値の絶対値が 0.05 kt 未満の場合，潮汐表には 0.0 kt と表記されるため，この極値の前後の転流時刻を採用しない。絶対値 0.05 kt 未満の潮流極値が 3 回続いた場合，潮流極値を 0.0 kt とし，それが起こる時刻をその平均とする。それ以外の場合で，絶対値 0.05 kt 未満の潮流極値が 2 回続いた場合，潮流極値を 2 回とも採用せず，その時刻の平均を転流時刻とする。

得られた最強流，転流の時系列に，絶対値 0.05 kt 未満の潮流極値が 2 回続いた場合，潮流極値を 2 回とも採用せず，その時刻の平均を転流時刻とする。

上げ下げ潮流時刻，転流時刻は，○分 00 秒から○分 59.999...秒までを○分として表記する。

前後に転流のない上げ潮流，下げ潮流の時刻には，アスタリスク（「*」マーク）を記載する。

2.4 改正数

潮汐表は，紙面の数の制約から，主要な 74 港の潮汐の高低潮の時刻及びその高さ，主要な 21 地点の潮流の転流時刻，上げ潮流・下げ潮流の時

刻及びその強さについては、毎日の推算値を掲載している。これらの港及び地点を標準港及び標準地点と呼ぶ。標準港や標準地点の推算値を用いて、その他の約700の補助港の高低潮、約300の補助地点の転流、上げ潮流、下げ潮流を推定するには、改正数と呼ばれる係数を用いる必要がある。以下に、その改正数の算出アルゴリズムをレビューする。

2.4.1 潮高比

補助港の高低潮の高さを求めるには、潮高比と呼ばれる、標準港の当日の潮高に乗ずる数値で、その地の潮高の概数を求めるための改正数を用いられる。潮高比は、標準港の M_2 分潮及び S_2 分潮の振幅 H_{0M_2} , H_{0S_2} と、補助港の M_2 分潮及び S_2 分潮の振幅 H_{M_2} , H_{S_2} を用いて、次のように計算される。

$$\text{潮高比} = (H_{M_2} + H_{S_2}) / (H_{0M_2} + H_{0S_2})$$

2.4.2 流速比

補助地点の上げ潮流、下げ潮流の速さを求めるための改正数は、流速比と呼ばれる。流速比は、標準地点と補助地点の大潮期の最強流速の比で与えられる。大潮期の最強流速は、大潮改正計算(佐藤・土屋, 2021)と呼ばれる計算によって得られた、大潮期の1日分の流速の時系列のうち、上げ潮流、下げ潮流の方向の最大のものである。

なお、大潮改正計算は次の式で与えられる。

$$V = A_1 \cos(\omega_1 t - \kappa_1) + A_2 \cos(\omega_2 t - \kappa_2) + A_4 \cos(\omega_4 t - \kappa_4) + C$$

ここで、 t , ω , C はそれぞれ時間、角速度、恒流成分であり、変数の添え字 1, 2, 4 はそれぞれ1太陰日を単位とする1日周期、半日周期、4分の1日周期をそれぞれ表している。 A_1 は K_1 分潮と O_1 分潮の振幅の和、 A_2 は M_2 分潮と S_2 分潮の振幅の和、 A_4 は M_4 分潮と MS_4 分潮の振幅の和で、 κ_1 は K_1 分潮と O_1 分潮の遅角の平均、 κ_2 は M_2 分潮の遅角、 κ_4 は M_2 分潮の遅角の2倍の量である。

2.4.3 潮時差

補助港の高低潮の時刻、補助地点の転流、上げ潮流、下げ潮流の時刻を求めるための改正数は、いずれも潮時差と呼ばれる。潮時差は、標準港(標準地点)の M_2 分潮の遅角 κ_{0M_2} , 経度 L_0 , 標準時 S_0 , 補助港(補助地点)の M_2 分潮の遅角 κ_{M_2} , 経度 L , 標準時 S を用いて、次のように与えられる。

$$\text{潮時差} = (\kappa_{M_2}/29) - (\kappa_{0M_2}/29) + (31/450)(L_0 - L) + (S - S_0)$$

潮流の潮時差は、潮汐表には、上げ潮流から下げ潮流への転流、下げ潮流から上げ潮流への転流、上げ潮流、下げ潮流のそれぞれの時刻について掲載されている。観測が行われた当時、大潮改正計算や周囲の観測結果の分布等により、それぞれ別々の値が推定されたようであり、毎年の潮汐表の編集においても、前年の掲載値を引き続き掲載している。一方、新たな観測結果に対しては、潮流の潮時差を、転流、上げ潮流、下げ潮流のそれぞれについて別々の数値を算出することはなく、上記の式で一様に求めている。

2020年の推算値を掲載した潮汐表は「平成32年潮汐表」として発刊している。平成32年は存在しない年号ではあるが、潮汐表が刊行されるのは前年3月初旬であり、次の年号である令和が定められていなかったため、この名称となっている。平成32年潮汐表では、来島海峡西水道を標準地点として追加し、これまで来島海峡中水道を標準地点としていた4つの補助地点の改正数を、来島海峡西水道を標準地点とするよう変更した。変更にあたっては、平成31年潮汐表に掲載されている潮時差から、中水道と西水道の潮時差を引くことによって、これらの地点の転流、上げ潮流、下げ潮流の潮時差を求めた。

2.5 非調和定数

潮汐の主要な成分はおよそ1日の周期をもつ K_1 分潮と O_1 分潮、およそ半日の周期をもつ M_2 分潮と S_2 分潮である。それらの振幅の比によって、各地の潮汐は日周潮型と半日周潮型に分類さ

れる。日本では、英国水路部 (UKHO) と同様の分類を採用している。

$$\text{半日周潮型} : \pi H_{S2} > 2 (H_{K1} + H_{O1})$$

$$\text{日周潮型} : \pi H_{S2} < 2 (H_{K1} + H_{O1})$$

日周潮型の港では、潮汐表には、潮汐の非調和定数として、平均高高潮、平均低い高潮、平均高い低潮、平均低低潮を掲載している。これらの値は、下記の式で、時刻 t を 0 時から 25 時まで 1 時間間隔で計算して求めている。

$$H(t) = Z_0 + H_{M2} \cos(30t - \kappa_{M2}) + \{2(H_{K1} + H_{O1}) / \pi\} \cos(15t - (\kappa_{K1} + \kappa_{O1}) / 2)$$

半日周潮型の港では、潮汐表には、大潮平均高潮、小潮平均高潮、小潮平均低潮、大潮平均低潮を掲載している。

$$\text{大潮平均高潮} : Z_0 + H_{M2} + H_{S2}$$

$$\text{小潮平均高潮} : Z_0 + H_{M2} - H_{S2}$$

$$\text{小潮平均低潮} : Z_0 - H_{M2} + H_{S2}$$

$$\text{大潮平均低潮} : Z_0 - H_{M2} - H_{S2}$$

潮流の非調和定数は、大潮改正計算により、上げ潮流、下げ潮流のそれぞれについて、平均流速及び最強流速を掲載している。最強流速は 2.4.2 項のとおりであるが、平均流速は、その式のうち 4 分の 1 日周期成分を除いて計算される。大潮改正計算の結果の利用にあたっては、近年では恒流成分を必ず含めるようにしている。

潮流の非調和定数である最強流速は、海図にも潮流矢符として掲載される。

2.6 LAT

LAT は、1 年以上の潮汐観測により求められた調和定数を用いて 19 年間の推算を行い、その最も低い値として定義される (佐藤・熊谷, 2017)。1997 年に IHO で海図基準面として LAT が採用され、海図基準面として LAT 以外を採用する場合には、水路図誌に海図基準面と LAT の差を記載するよう勧告された。このため、平成 11 年潮汐表から、標準港における海図基準面と LAT、HAT の差を掲載している。

3 潮汐表を活用するための計算

航海者にとっては、入港、出港の前後の時刻における天文潮位が重要となる。潮汐表の標準港の高潮、低潮の高さと時刻、潮汐の改正数である潮高比と潮時差、任意の潮位を求める表を組み合わせると、これらを求めることができる。同様の計算は潮流についても可能である。船舶免許の試験においては、このような潮汐表の活用が問われている。

3.1 補助港の高低潮、補助地点の上げ・下げ潮流・転流

補助港の高潮・低潮の時刻、補助地点の上げ潮流最強・下げ潮流最強、転流の時刻を求めるには、潮時差を用いる。補助港の高潮については、標準港の高潮の時刻から、補助港の潮時差を引けばよい。低潮も同様である。上げ潮流最強、下げ潮流最強、上げ潮流から下げ潮流への転流、下げ潮流から上げ潮流への転流の時刻を求めるための潮時差は、それぞれの欄に掲載された値を用いる。

高潮・低潮の高さを求めるには、標準港の Z_0 、潮高比、補助港の Z_0 を用いる。補助港の高潮については、標準港の高潮の高さから標準港の Z_0 を減じたのち、潮高比をかけ、その値に補助港の Z_0 を加えて求める。上げ潮流最強、下げ潮流最強の流速を求めるには、流速比を用いる。補助地点の上げ潮流最強の強さは、標準地点の上げ潮流最強の強さに流速比を掛けて求める。

LAT については、上記のような比例関係はない。LAT は、18.6 年周期の振幅の変調に依存した年に、年周期、半年周期の分潮の振幅と遅角に依存した季節に現れる。近隣の港ではほぼ同様の時期に LAT が現れることが期待されるものの、上記で述べた日々の高潮と低潮のように同じ日の低潮を LAT として定義しているとは限らない。そのため、LAT の改正数を掲載しておらず、補助港の LAT を標準港の LAT から求めることは出来ない。

3.2 任意時の潮位及び流速

潮汐表には任意時の潮高を求める表を掲載している。この表の値は、低潮と高潮の間の潮位変化を正弦波と見なし、次の式で得られる定数である。Aは相次ぐ高低潮時の差を、Bは低潮時から所要時までの時間をそれぞれ示す。

$$\text{表値} = (1/2) - (1/2) \cos \{\pi(B/A)\}$$

なお、同手法の英国及び中国の潮汐表との比較検討が毕・桑島(1998)に記されている。

流速についても任意時の流速を求める表を掲載している。この表の値は、転流と最強流速の間の流速の変化を正弦波と見なしたもので、次の式で得られる定数である。Aは相次ぐ転流時と最強時の差を、Bは転流時からの時間をそれぞれ示す。

$$\text{表値} = \sin \{(\pi/2)(B/A)\}$$

4 潮汐表の元資料

4.1 調和定数

潮汐表の掲載値は調和定数を元資料としている。水位や流速の長期間観測値の時系列に、周期2時間以下の擾乱を取り除くフィルターをかけ、毎正時の水位や流速の時系列を得る。水位や流速の1時間間隔の時系列を調和分解して調和定数を得る。調和分解には最小二乗法によるものが主に用いられる(小田巻, 1981; 土屋, 2020)。その式などは土屋(2020)に記載した。

潮流の観測値は、流速の北方成分と東方成分からなるベクトルである。それぞれの成分を別々に調和分解することによって、北方成分の調和定数と、東方成分の調和定数が得られる。分潮ごとに、次の式によって、潮流の長軸方向 θ が求められる(Parker, 2007)。

$$\theta = \tan^{-1}((A_2 \sin a + B_2 \cos a)/(A_1 \sin a + B_1 \cos a))$$

$$2a = \tan^{-1}((W_E^2 \sin 2\kappa_E + W_N^2 \sin 2\kappa_N)/(W_E^2 \cos 2\kappa_E + W_N^2 \cos 2\kappa_N))$$

ここで、 W_E 、 W_N はそれぞれ東方、北方成分の振幅、 κ_E 、 κ_N は東方、北方成分の遅角であり、 A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 はそれぞれ下記の通りである。

$$A_1 = W_E \cos \kappa_E; B_1 = W_E \sin \kappa_E; A_2 = W_N \cos \kappa_N;$$

$$B_2 = W_N \sin \kappa_N$$

潮汐表には、主方向に射影された調和定数が用いられる。主方向の振幅 W_{MJ} と遅角 κ_{MJ} はそれぞれ次のように与えられる。

$$\kappa_{MJ} = \tan^{-1}((W_N \sin \kappa_N \cos \theta + W_E \sin \kappa_E \sin \theta)/(W_N \cos \kappa_N \cos \theta + W_E \cos \kappa_E \sin \theta))$$

$$W_{MJ} = (W_N \cos \kappa_N \cos \theta + W_E \cos \kappa_E \sin \theta)/\cos \kappa_{MJ}$$

潮流の観測は、流速計の設置、観測期間中の維持に多大なコストがかかることから、多くの観測を行うことができず、潮汐表の標準地点であっても、年々更新することはない。一方、潮汐の調和定数は、海上保安庁をはじめ、気象庁、国土地理院、各地方整備局、地方自治体等が設置し観測を継続している常設験潮所の長期間の潮位記録があるため、5年に1度、過去10年間の記録を用いて更新されている。海上保安庁と気象庁は潮汐表及び潮位表の掲載値の統一のため、更新とともに調和定数を交換している。近年では海上保安庁の常設験潮所の調和定数を海上保安庁が、それ以外の機関の常設験潮所の調和定数を気象庁が更新している。

更新にあたっては、まず、各年の1月1日から369日分の1時間間隔の水位時系列データについて最小二乗法による調和分解を行う。調和分解により得られた10年分の調和定数をベクトル平均することで更新後の調和定数を得る。ベクトル平均の際は、欠測時間、観測値と推算値間の二乗平均誤差の平方根(RMSE: Root Mean Square Error)及び主要四分潮の振幅・位相の標準偏差をもとにどの年のどの調和定数をベクトル平均の計算に使用するかを選択する。

欠測時間が500時間以上、1000時間未満の年は、長周期潮(ここではSa, Ssa, Mm, MSf, Mf)のみをベクトル平均の計算に使用する。欠測時間が1000時間以上の年の調和定数はベクトル平均の計算に使用しない。

RMSEについて、2021年に調和定数を更新した際は、近澤・他(2012)において気象庁の験潮所における潮位偏差の標準偏差は三宅島で20 cm

程度、その他のほとんどの地点は 10 cm 程度とされていることを踏まえ、それを大きく上回る年の調和定数をベクトル平均の計算に使用しないこととした。具体的には、海上保安庁の常設検潮所のうち、黒潮の影響を受けるとされる三宅島、八丈島は 25 cm 以上、それ以外の地点は 15 cm を基準とした。

主要四分潮の振幅・位相の標準偏差 σ は以下の式によって求める。対象期間内のある分潮の各年の振幅を H_i 、遅角を κ_i 、 n を計算に用いる年数とすると、ある分潮の平均ベクトル OP は次の式であらわされる。

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \frac{1}{n} \sum (H_i \cos \kappa_i, H_i \sin \kappa_i) \\ &= \frac{1}{n} \sum (x_i, y_i) = (\bar{x}, \bar{y}) \end{aligned}$$

さらに、 x, y 成分の標準偏差 σ_x, σ_y は次の式であらわされる。

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \\ \sigma_y &= \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \end{aligned}$$

ここで、 σ を次の式で定義する。これは、平均ベクトルの終点 P を中心とし、標準偏差 σ_x, σ_y を長軸、短軸の半径とした楕円方程式である。

$$\sigma = \frac{\{(x - \bar{x})^2 \sigma_y^2 + (y - \bar{y})^2 \sigma_x^2\}}{\sigma_x^2 \sigma_y^2}$$

上式の σ をもとに、以下のスコアを定義する。基準として、主要四分潮のスコアの合計が 14 以上となる年の調和定数はベクトル平均の計算に使用しないこととしている。

- $0 \leq \sigma < 0.5$ の場合 0
- $0.5 \leq \sigma < 1.0$ の場合 1
- $1.0 \leq \sigma < 1.5$ の場合 2
- $1.5 \leq \sigma < 2.0$ の場合 3
- $2.0 \leq \sigma < 2.5$ の場合 4
- $2.5 \leq \sigma < 3.0$ の場合 5
- $3.0 \leq \sigma < 3.5$ の場合 6
- $3.5 \leq \sigma < 4.0$ の場合 7
- $4.0 \leq \sigma$ の場合 8

4.2 月資料

潮汐・潮流表の日付の下段には月の満ち欠け（朔、上弦、望、下弦）及び位置（遠地点、近地点、最南、最北、赤道上）が記されている。これらの満ち欠け及び位置の日付は、月等の位置を計算するために必要なパラメータが格納されている DE430 という暦から算出している (Folkner et al., 2014)。

5 推算値の誤差

潮汐表に掲載している推算値には異常な気象の影響、副振動は加味されていない。標準港の潮時は一般に 20 ~ 30 分以内、潮高は 30 cm 以内で実際の潮汐と一致するが、異常な気象等の際は著しい差を生じることがある。また、標準地点の転流時は一般に 20 ~ 30 分以内、最強流速は 30% 以内で実際の潮流と一致するが、やはり異常な気象等の際は著しい差を生じることがある。これらの推算値の誤差については潮汐表でも説明されている。

6 潮汐表の掲載地点の見直し

海図には、各地の港の海図基準面である最低水面から平均水面までの高さ (Z_0) と、高潮、低潮の平均潮位が潮信記事として掲載されている。海図に潮信記事が掲載されている港の任意の時刻の潮位は、潮汐表を用いて概算されるため、海図に掲載されたすべての港の潮位の情報を潮汐表に記載する必要がある。海図の改版等により、海図に掲載される港に入れ替えがあると、潮汐表に掲載する港もそれに対応して毎年見直される。

7 まとめ

本稿では潮汐及び潮流の天文推算値を得る計算、潮汐表に掲載するピークを選択するアルゴリズム、潮汐表に掲載している改正数及び非調和定数を得る計算、補助港の高低潮や補助地点の上げ下げ潮流を得るアルゴリズム、調和定数を得る計算について一通りレビューした。天文推算値を得る計算では、対象とする期間の違いから、潮汐表

で用いるパラメータとウェブサイトで用いている天文パラメータの違いも論じた。ピークの選択アルゴリズムについては、手法の合理化も行った。

潮汐表には掲載値が多いため、本稿で改めて見直したアルゴリズムを含め掲載項目の1つ1つを十分管理する必要がある。書誌の出版に当たっては平成29年・平成30年潮汐表の潮流情報の差し替えのような事例がないよう今後とも注意を払っていくことにする。

IHOでは、潮汐表に関する技術勧告は長い間更新されてこなかったが、冊子版と並行して、デジタル版の潮汐表の刊行を行う国があることから、2019年には、デジタル版の潮汐表に関する決議が採用された。デジタル版の潮汐表は冊子版のpdf化でもよく、また、冊子版の潮汐表の技術決議に準じたhtml等のインタラクティブな表示方法でもよいとされている。これらの表示方法の例が技術勧告にそのまま掲載されているのも特徴である。日本ではデジタル版の潮汐表に関する議論は進んでいないものの、利用者の便を満たすよう、必要に応じて潮汐表の改善を進めていきたい。

謝 辞

海上保安学校海洋科学教官室鈴木充広室長からは、天文パラメータ及び月資料の計算に対しコメントを頂いた。また、匿名の査読者及び査読補助者から頂いたご意見により本原稿は改善された。ここに記して感謝の意を表する。

文 献

毕 修穎・桑島 進 (1998) 潮汐表から任意の潮時、潮高を求める方法—各国手法の比較と新手法の提案—, 日本航海学会誌, 136, 4-11.
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.
Folkner, W. M., J. G. Williams, D. H. Boggs, R. S. Park, and P. Kuchynka (2014) The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431,

Interplanetary Network Progress Report, 196, 1.

海象観測情報の解析・活用に関する研究会編 (2002) 潮位を測る, (一財) 沿岸技術研究センター.

海上保安庁 (1992) 日本沿岸潮汐調和定数表.

海上保安庁 (1996) 天体位置表.

海上保安庁 (2021) 潮汐調和定数, 2021年9月10日閲覧.

気象庁 (2021) 潮汐調和定数, 2021年9月10日閲覧.

難波 徹・坂口澄雄 (2005) 鳴門海峡潮流観測報告, 海洋情報部技報, 23, 104-111.

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, 16, 71-82.

Parker, Bruce B. (2007) Tidal analysis and prediction, NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3.

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.

佐藤 敏・土屋主税 (2021) 海図の潮流矢符, 日本航海学会誌, 215, 53-58.

斉藤国治 (1989) 古天文学 パソコンによる計算と演習, 恒星社厚生閣.

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

潮汐表の掲載値を得る計算, 潮汐表を活用するための計算, 調和定数を得る計算のそれぞれについて, そのアルゴリズムを整理して示した。