

2. 潮汐・潮流予報システムに関する一考案

小田 巻 実・海象課

Prediction Model of Tide or Tidal Current
for Real Time Observation System

By

Minoru Odamaki: Oceanographic Division

1. はじめに

現在行われている潮汐・潮流の予報計算は、過去において、ある一定期間観測した資料によって算出された調和定数によって行なわれている。つまり、予報値（未来）と観測値（過去）は、一応独立して扱われ、切り離されている。しかるに、最近、驗潮システムの進歩によりテレメータ化が進められ（遠藤 宏、1982）、しかも、計算機まで含んだシステムが実現しつつある。このことは、過去の観測値の解析と、現在の値の観測と、未来の値の予報とを一連のシステムとして実時間的に結合できる可能性を示している。言い換えると、いままで月平均値とか日平均値といった平均操作によって抽出されていた地殻変動や海況変動に伴なり異常潮などの現象も実時間的に検出することは可能となる。このような時代に、旧態依然とした「観測-読取-調和分解-推算」という作業手順にこだわる必要はないと思われる。本報告では、驗潮テレメータなどに適合した実時間の解析・測定・予報システムのための初歩的な一考案を呈示し、将来の布石としたい。

2. 潮汐予報計算の概念の整理と新しい表現

現在の計算は、調和法と呼ばれる方式に基づいている。これは、準三角級数の和で表わされ、

$$d(t) = \sum_i f_i \cdot H_i \cdot \cos((V_0 + u)_i + \sigma_i t - K_i) \quad (1)$$

と書ける。ここで、 $d(t)$ は時刻 t の潮位を、 f_i 及び $(V_0 + u)_i$ は天文引数、 H_i は振幅、 σ_i は角速度、 K_i は位相のずれを示し、添字の i は各分潮を表わしている。ここで f 及び u は、月の公転軌道の変化に対する補正項であるが、煩雑になるため以下では省略する。調和定数と言われているものは H_i と K_i で、観測資料の調和分解によって決められる。いま、予報に用いる分潮数を M 個とし、(1)式をベクトル的に書きなおして、（以下では、スカラー積を \cdot 、ベクトル積を $*$ で表わす。）

$$d(t) = \sum_{i=1}^M H_i \cos(\sigma_i t - K_i) = a_0 + \sum_{i=1}^M a_i \cos \sigma_i t + \sum_{i=1}^M b_i \sin \sigma_i t = C \cdot R(t) \quad (2)$$

$$C = (a_0, a_1, b_1, \dots, a_M, b_M)^T, R(t) = (1, \cos \sigma_1 t, \sin \sigma_1 t, \dots, \cos \sigma_M t, \sin \sigma_M t)^T$$

と表わすことにする。 C, R はそれぞれ、 $2M+1$ 元のベクトルで、右辺の右肩の T の添字は転置されていることを示している。いま、等時間間隔に観測がなされ、第 N 回観測した時の調和定数の近似値を C_N とし、これを最小2乗法により求めることにすると、

$$B_N = \overset{\leftrightarrow}{A}_N * C_N = (R_1 \cdot d_1 + R_2 \cdot d_2 + \dots + R_N \cdot d_N) / N \quad (3)$$

（ d_j は第 j 回めの観測値）

と表わすことができる。ここで A_N は、正規方程式の係数行列で中味の要素は後述する。 R_i は

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos \sigma_1 \\ \sin \sigma_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \cos \sigma_M \\ \sin \sigma_M \end{pmatrix} = \vec{T} * R_1, \quad R_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2\sigma_1 \\ \sin 2\sigma_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \cos 2\sigma_M \\ \sin 2\sigma_M \end{pmatrix} = \vec{T} * R_2 = (\vec{T})^2 * R_1, \dots$$

$$R_j = (\vec{T})^{j-1} * R_1, \quad \vec{T} = \begin{pmatrix} 1, 0, 0, \dots, 0, \dots, 0, 0 \\ 0 \cos \sigma_1 - \sin \sigma_1, 0, \dots, \dots \\ 0 \sin \sigma_1, \cos \sigma_1, 0, \dots, \dots \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad \cos \sigma_2, \dots, \dots \\ \dots, \dots, \dots, \dots, \dots \\ 0, \dots, \dots, 0 \cos \sigma_M - \sin \sigma_M \\ 0, \dots, \dots, 0 \sin \sigma_M, \cos \sigma_M \end{pmatrix} \quad (4)$$

で計算されるベクトル列であり、 T は時間の遷移を示す行列である。 B_N は過去のデータの積和によるベクトルである。

以上が基本的な計算法である。つまり、 N 回観測された時、(3)式を解いて C_N を求め、(2)式により予報すればよい。次にこの計算方式の漸化式表現を考える。

$N+1$ 回目の観測が行なわれた時、(3)式と同じ表現を考えると

$$B_{N+1} = \vec{A}_{N+1} * C_{N+1} = \frac{N}{N+1} (R_1 * d_1 + R_2 * d_2 + \dots + R_N * d_N + R_{N+1} * d_{N+1}) \quad (5)$$

となる。これに(3)式を代入して

$$\vec{A}_{N+1} * C_{N+1} = \frac{N}{N+1} * B_N + \frac{1}{N+1} * R_{N+1} * d_{N+1} \quad (6)$$

となる。ところが、 \vec{A}_{N+1} と \vec{A}_N には

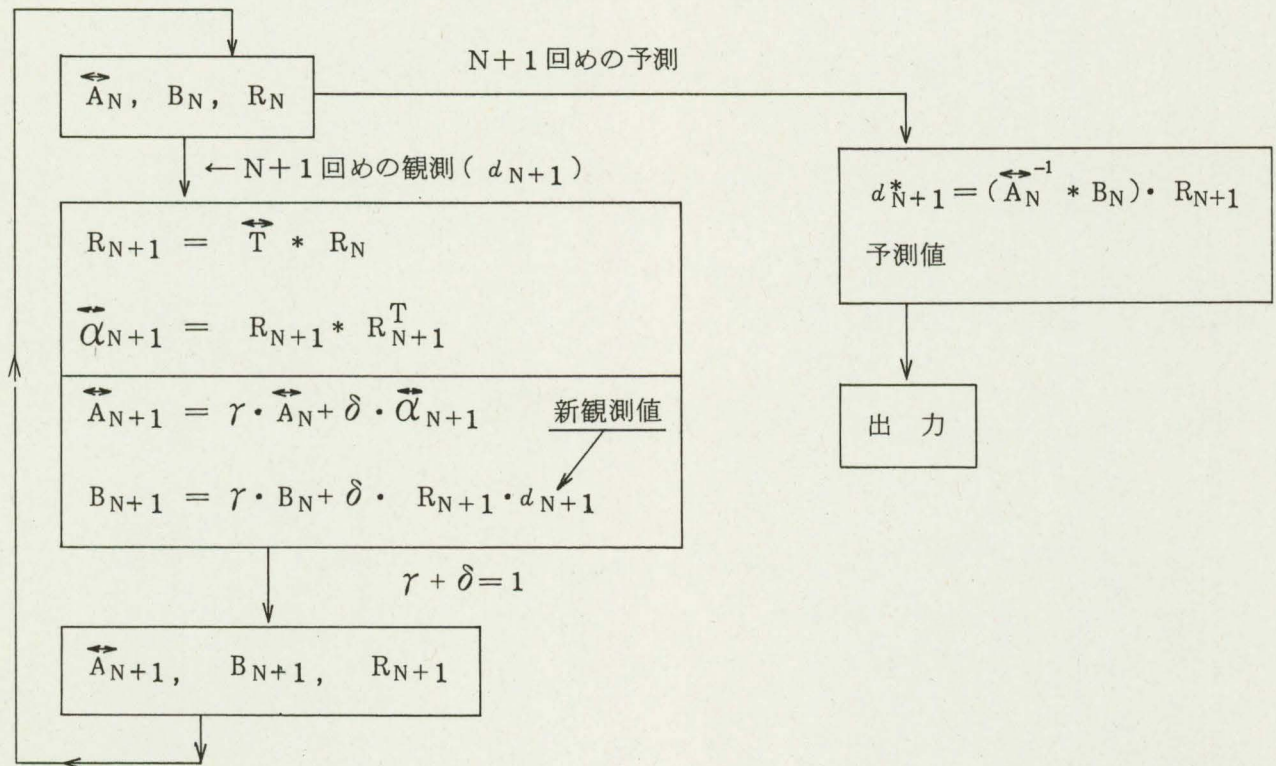
$$(N+1) * \vec{A}_{N+1} = N * \vec{A}_N + \vec{\alpha}_{N+1}, \quad \vec{\alpha}_{N+1} = R_{N+1} * R_{N+1}^T \quad (7)$$

ただし $\vec{A}_1 = R_1 \quad * \quad R_1^T = \begin{pmatrix} 1, 1, 0, \dots, 1, 0 \\ 1, 1, 0, \dots, 1, 0 \\ \dots, \dots, \dots, \dots, \dots \\ 1, 1, 0, \dots, 1, 0 \\ 0, 0, 0, \dots, 0, 0 \end{pmatrix}$

の関係がある。(7)式を書きなおして、

$$\vec{A}_{N+1} = \frac{N}{N+1} \vec{A}_N + \frac{1}{N+1} \vec{\alpha}_{N+1}$$

とする。この(6)式と(8)式をよく見ると、 $N+1$ 回めに新たに付け加えられる観測に対しては、 $1/N+1$ の比重しかかかっていない。これは、まったく当然のことであるが、調和分解して調和定数を求める立場からすると、ある程度観測値が蓄積されれば、新たな観測はほとんど意味がなくなるということである。ところが、前章で述べた実時間的な観測・解析・予報のためには、当然最新の観測値に対して大きな比重をかけたほうがよいと思われる。つまり、近くの過去のデータのほうが、未来の予測に対してより効果的であると考えられるので、(6)式と(8)式の係数を、 N が増しても変わらないように固定し、これによって新しいデータに重みをかけることを試みる。この計算プロセスのフローチャートを図1に示す。図の中で γ と δ は、比重をかけるためのパラメータである。



第1図 計算のフローチャート

まず、 N 回めまでの観測が終了しているとする。このとき、計算機の中には係数行列 A_N と N 回めまでの観測値による B_N と R_N が保存されている。 $N+1$ 回めの時刻に対する予測値を作るには右側のフローに従って計算する。 $N+1$ 回めの観測に対しては、左側のフローに従って新観測値を組み込んで計算し、次のステップのために A_{N+1} 、 B_{N+1} 、 R_{N+1} を保存する。そして、調和定数が欲しい場合には、ときに応じて(3)式に従って C を解けばよい。

以上のように、この計算では、観測・解析・予報が一連のものとして組み込まれ、データの個数には関係せず、過去のデータも B_N の中に集約的に表現されていることが特徴である。

3. 試 行

1ヶ月以上連続している潮流データに対して、上述の計算を適用してみた。今回は、北方成分のみ計算してみた。この計算の重要なファクタとしては、分潮の組み合わせの選択と前述の γ と δ の重みのパラメータである。この分潮の組み合わせと重みを変えた4つの場合を試してみた(第1表)。RUNIは、通常の15昼夜潮流調

和分解のうち算出に無理がある K_2 潮・ P_1 潮を除き、重みは(6)、(8)式のままのものである。RUN 2は、15 昼夜(360時間)を過ぎたところで重みを固定したケースである。RUN 3は、 N_2 潮、 Q_1 潮を除き、そのかわりに高次の1/3日周潮と1/6日周潮を加味した場合である。1/3日周潮は、日周潮と半日周潮の複合であるので M_2 潮と $K_1 \cdot O_1$ 潮の組み合わせによるもの、1/6日周潮は、半日周潮の3次の組み合わせであるので M_6 潮と $2MS_6$ 潮を入れた。この高次の分潮を入れることにより、波形の歪みがより表現されると期待される。RUN 4は、重みを現在のものに大きくかけるようにしたものである。

各ケースの試行のうち、361ステップ(16日め)と481ステップ(21日め)を図2にかかげる。RUN 1とRUN 2の16日はほとんど変わらないので一つの図で示した。16日頃は大潮時、21日頃は小潮にあたる。16日の頃のRUN 1(RUN 2)では、大きな傾向はよく合っているものの、細かい所(例えば波の山や谷が前傾してとがっている所)は不十分である。RUN 3やRUN 4では、細かい点も比較的よく合っているが、まだ不十分な点がある。21日の頃では、いずれの場合にも右側の山(午後)は比較的合っているのに左側の山(午前)の場合には予測値のほりが位相が遅れている。重みを大きくしたRUN 4の場合には、現在に近い観測値に重点があるため遅れは多少解消しているように見える。重みを更に大きくした場合どのように変化するのか、興味深い。が、ここで試行は打切った。

以上のように、いずれの場合にも完全に満足できる結果が得られているとは言えないが、今後、分潮の組み合わせ、重みなどを工夫すればもう少し良くなると思われる。

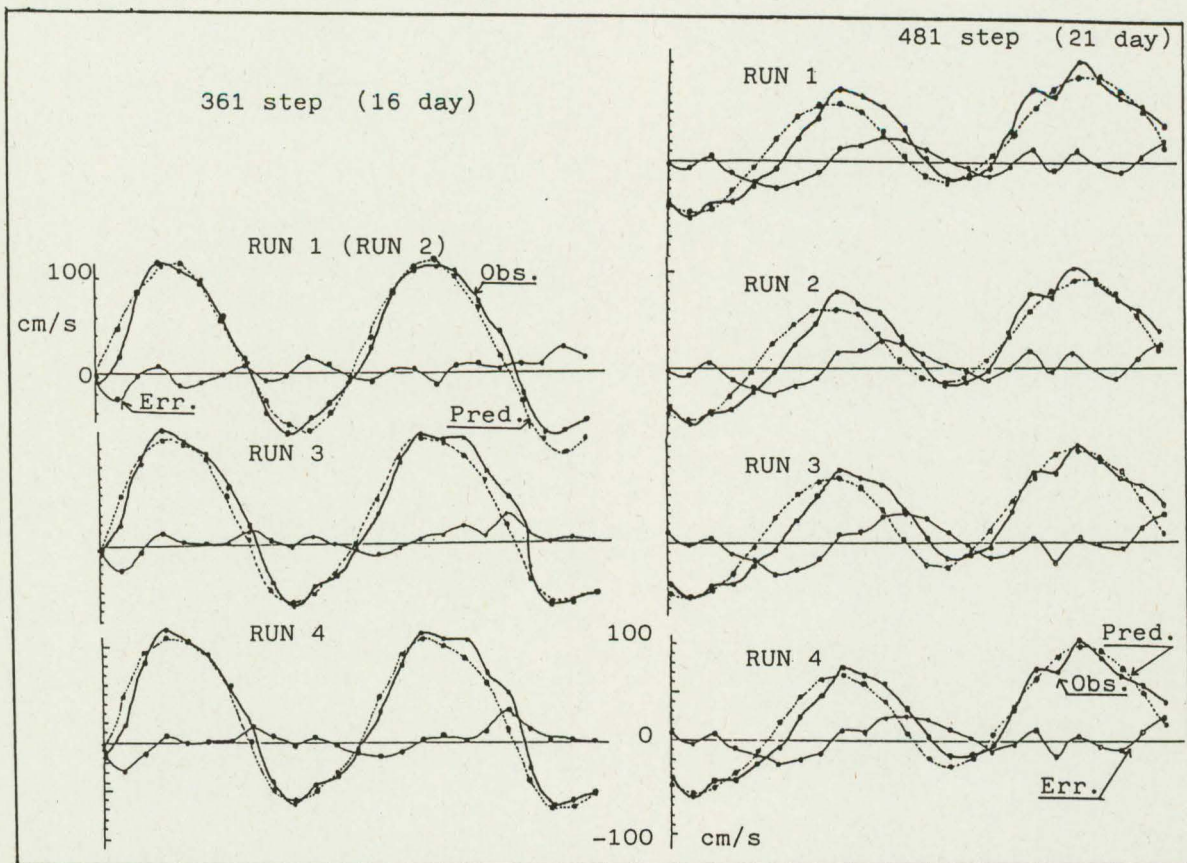
4. まとめと今後の方向

この試行は、「験潮テレメータという新しいハードウェアを得て、観測の実時間化に見合った解析・予報システムを考えたい。」と言うのが、その動機である。結果は未だ不十分で、まだまだ改良の余地がある。例えば、 A_N などの行列は多大なメモリを必要とするので、もっと圧縮した表現が必要である。また、分潮の組み合わせや重みの任意性は当たり外れが大きいので、自動的に最良の値に落ち着くような方法はないだろうか。更に、図2中にはエラーと書いたが、これは単に系統的に予報できない海水中の乱れなどではないだろうか。このように、この試行には、基本的な問題点が残されていると思われるが、今後、多種の観測がテレメータ化されてゆくとつれ、実時間的な解析・予報システムが要望されると考えられ、その際には、以上に示したような漸化的な表現が有効な手段となるとと思われる。

最後に、潮汐・潮流の実時間的観測・解析・予報システムには、その現象を起している原因としての起潮力や気圧・水温などの要素の入力が必要であり、そのような環境因子を取りこんだ多元的応答システムとしての表現が要求される。今後、その表現の構築と計算プログラムの開発をしたいと考えている。

参考文献

遠藤 宏(1982):遠隔験潮システムの概要、水路技報、投稿中



第2図 潮流データに適用したときの結果、右は小潮の頃、左は大潮の頃、小潮には誤差がめだつ

表1 各試行の時に採用した分潮の種類と重み

CASE	Components	Weights	δ
RUN 1	M2, S2, N2, K1, O1, Q1, M4, MS4	$N/(N+1)$	$1/(N+1)$
RUN 2	M2, S2, N2, K1, O1, Q1, M4, MS4	359/360	1/360
RUN 3	M2, S2, K1, O1, M4, MS4, MK3, MO3, M6, 2MS6	359/360	1/360
RUN 4	M2, S2, K1, O1, M4, MS4, MK3, MO3, M6, 2MS6	179/180	1/180