

海洋情報システムにおける潮流・潮汐予報

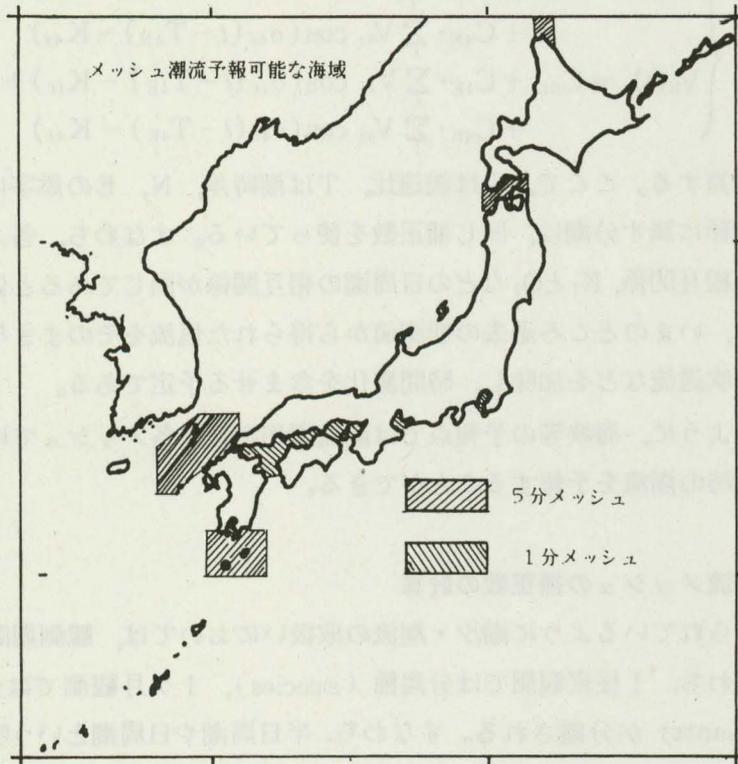
小田巻 実 ・ 熊谷 武
沿岸調査課

Tide and Tidal Current Prediction in
Maritime Safety Information System

Minoru Odamaki, Takeshi Kumagai
Coastal Surveys and Cartography Div.

1. はじめに

海上保安庁では1985年10月より海洋情報システムの運用が開始され、各管区本部および保安部署においても各種情報を手軽に引き出すことができるようになった。潮汐・潮流の予報についても、今までは潮汐表を利用するのが主であったが、今後は海洋情報システムを介してさらに詳しい予報値が得られるようになった。潮汐では、特定の港湾に限らず、日本の沿岸ならばどこでも、高潮低潮の時刻と潮高および毎時の潮高が得られるようになった。潮流については、予報地点を多くしただけでなく、第1図に示す海域では1分あるいは5分メッシュによる毎時の潮流予報値が計算される。この潮流予報値は、



第 1 図

海流や風の情報とともに、救難時の漂流経路の予測に使用される。本稿では、各メッシュの潮流予報計算について紹介する。

2. 潮流の予報計算

潮流予報には、主要海峡など(1)地点毎の予報と(2)メッシュ単位の予報がある。前者は潮流の主方向に投影された調和定数により転流・最強流および毎時流速を予報するもので、現在、87ヶ所が予報される。使用している調和定数は、15昼夜と数昼夜観測の資料によるものが大半で、分潮数は10分潮程度である。計算式は従来の潮汐・潮流予報のものと同じで、ある時刻 t の流速を $v(t)$ とすると、

$$(1) \quad v(t) = \sum_i f_i \cdot H_i \cos((V_0 + u)_i + \sigma_i \cdot t - K_i) + H_0$$

と表わされる。ここで、 f_i と $(V_0 + u)_i$ は、月と太陽と予報地点で決まる天文引数、 σ_i は各分潮の角速度、 H_i と K_i は、観測値を調和分解して得られた各分潮の流速振幅と遅角である。添字の i は各分潮を意味し、(1)式は、各分潮を合成することを示している。分潮数が多いほど変化を詳しく表現できるので、精度を高めるためには1ヶ月以上の観測によって調和定数を多く求める必要がある。ただし、鳴門海峡と関門海峡では水面差による計算を行っている。なお、以下では天文引数を省略し流速振幅を V で表わす。

メッシュ単位の予報計算では、近くの海峡予報点を標準点に選び、東西・南北両成分毎に補正数(潮時差、流速比)を各メッシュに与え、標準点の予報式を補正することによって毎時の潮流ベクトルを求めている。いま、標準点の予報式を分潮種ごとに分けて、

$$(1)' \quad V(t) = V_0 + \sum_i V_{1i} \cos(\sigma_{1i}t - K_{1i}) + \sum_i V_{2i} \cos(\sigma_{2i}t - K_{2i}) + \sum_i V_{4i} \cos(\sigma_{4i}t - K_{4i})$$

とし、右辺は第1項から順に長周期潮、日周潮、半日周潮、1/4日周潮である。ただし、この式では天文引数は省略している。メッシュ点では、分速成分ごとに各分潮種の補正数を与えて、

$$(2) \quad \begin{cases} V_N(t) = C_{0N} + C_{1N} \cdot \sum_i V_{1i} \cos(\sigma_{1i}(t - T_{1N}) - K_{1i}) + C_{2N} \cdot \sum_i V_{2i} \cos(\sigma_{2i}(t - T_{2N}) - K_{2i}) \\ \quad + C_{4N} \cdot \sum_i V_{4i} \cos(\sigma_{4i}(t - T_{4N}) - K_{4i}) \\ V_E(t) = C_{0E} + C_{1E} \cdot \sum_i V_{1i} \cos(\sigma_{1i}(t - T_{1E}) - K_{1i}) + C_{2E} \cdot \sum_i V_{2i} \cos(\sigma_{2i}(t - T_{2E}) - K_{2i}) \\ \quad + C_{4E} \cdot \sum_i V_{4i} \cos(\sigma_{4i}(t - T_{4E}) - K_{4i}) \end{cases}$$

として計算する。ここで、 C は流速比、 T は潮時差、 N 、 E の添字は北方東方成分を示している。(2)式では同じ分潮種に属す分潮は、同じ補正数を使っている。すなわち、各メッシュと標準点では、 M_2 と S_2 などの半日周潮の相互関係、 K_1 と O_1 などの日周潮の相互関係が同じであると仮定している。また長周期成分(C_{0N} 、 C_{0E})は、いまのところ過去の観測値から得られた恒流をそのまま与えていて、時間変化を考えていないが、将来は、吹送流などを加味し、時間変化を含ませる予定である。

以上のように、海峡等の予報点では潮流調和定数、各メッシュでは流速や潮時の補正数を与えることにより、任意時の潮流を予報することができる。

3. 潮流メッシュの補正数の計算

よく知られているように潮汐・潮流の取扱いにおいては、観測期間によって求められる分潮の特性が異なる。すなわち、1昼夜観測では分潮種(species)、1ヶ月観測では分潮群(groups)、1年の観測では分潮(constituents)が分離される。すなわち、半日周潮や日周潮という呼称は分潮種に対応し、その日その日に変化し、大潮や小潮で変わってしまう。 M_2 潮と S_2 潮は半日周潮に属し、その重なり具合で大潮小潮の変化を生じさせている。 M_2 潮や S_2 潮などは、分潮(constituents)に対応し、15昼夜以上の長期観測から求められる。現行の潮流観測のやり方においてはconstituentsを求める長期観測点を中心に配置し、流れのパターンを求める1昼夜観測点を適宜配置するようにしている。前述のように1昼夜観測では分潮種しか算出できないので、長期点と比較することにより、基準状態に改正し、全域の観測点の状態を統一したうえで、潮流楕円要素の分布を描いている。基準状態としては、日周潮では平均回帰潮、

$$(3) \quad V_1 = V_{K1} + V_{O1}, \quad K_1 = (K_{K1} + K_{O1}) / 2,$$

半日周潮では平均大潮、

$$(4) \quad V_2 = V_{M2} + V_{S2}, \quad K_2 = K_{M2}$$

1/4日周潮では平均大潮

$$(5) \quad V_4 = V_{M4} + V_{MS4}, \quad K_4 = K_{M4}$$

としている。ここで、(3), (4), (5)式は, constituentsから基準状態の分潮種の流速 V と遅角 K を算出する時の関係を表わしている。なお, 北方東方分速の調和定数と潮流楕円要素の関係を Appendix に記しておく。

メッシュ上に割りふる潮流楕円要素は, 長軸の方向, 振幅, 遅角および長軸と短軸の比である。最初に長軸の方向の分布から主流線パターン描き, 反流域などがある場合には方向を変えて遅角を 180° 増減させることが必要である。このように調整された潮流楕円要素の分布から各メッシュ上にその値を読み取る。この読取値をパンチして計算プログラムに入力する。計算プログラムでは, 楕円要素を東方北方分速に変換して (Appendix 参照), 標準点の基準状態との補正数を計算する。各メッシュの分速毎の調和定数を V, K , 経度を L , 標準点の主方向調和定数を V_M, K_M , 経度を L_M とすると, 流速比 C と潮時差 T は,

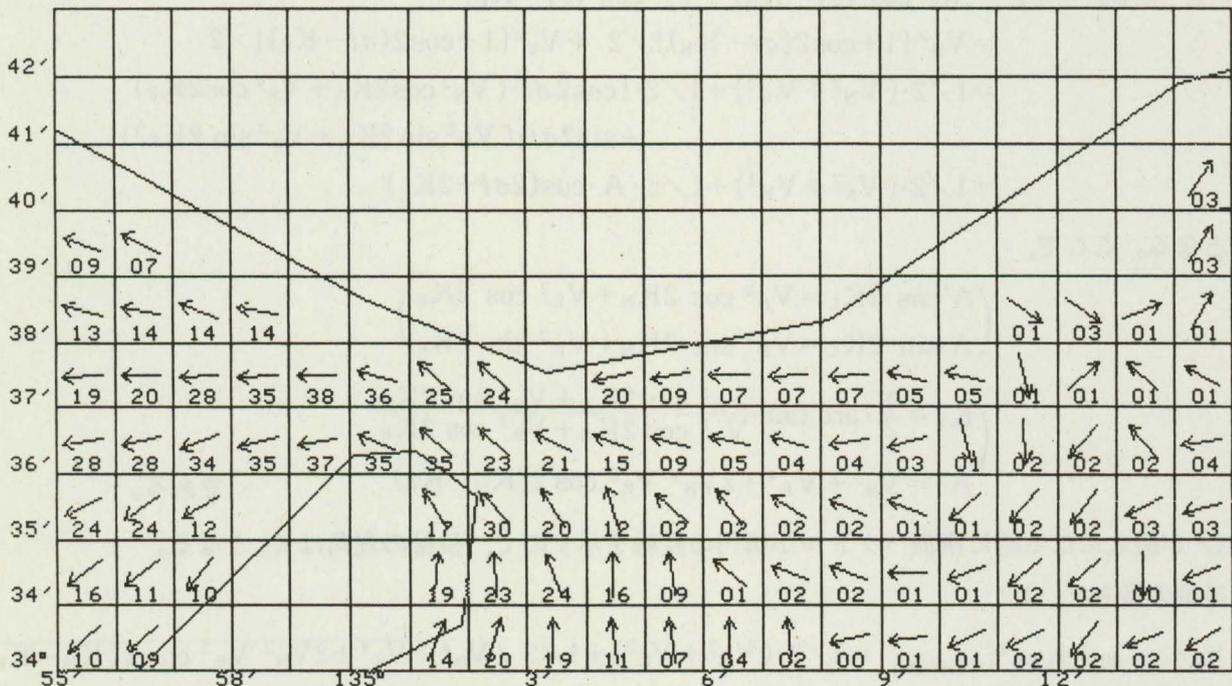
$$(6) \quad C = V / V_M$$

$$(7) \quad T = (K - K_M) / \sigma + (L_M - L) \cdot n / \sigma$$

として計算される。ここで n は各分潮種の波数である。調和定数の遅角は, 通常, 月または太陽の子午線上経過時を基準とした角度で表わされる。つまり, 経度の異なる地点では, 遅角の基準が異なるため, 同一の時刻系で表わすためには, 遅角に経度の補正を加える必要がある。(7)式の右辺第2項はそのためのものであるが, 今回は区域が狭いため省略した。分潮種の角速度 σ は, 1日, 半日, $1/4$ 日をそれぞれ $15, 30, 60^\circ$ 時とした。

4. 実際の運用と問題点

海峡の潮流予報については, 調和定数を与えるだけなので, 運用の準備をするのは比較的容易であったが, メッシュの補正数ファイルの作成については困難な点がいくつかあった。例えば, 現行の潮流図を見てもわかるように, 大半の海域では半日周潮のみを扱っていて日周潮が含まれていない。そのため今回は瀬戸内海



第 2 図

や東京湾などでは半日周潮流のみを与え、他の分潮種はその補正数を代用した。すなわち日周潮流と1/4日周潮流の補正数は、

(8) $C_{N1}=C_{N2}$, $T_{N1}=T_{N2}$, $C_{E1}=C_{E2}$, $T_{E1}=T_{E2}$, $C_{N4}=C_{N2}$, $T_{N4}=T_{N2}$, $C_{E4}=C_{E2}$, $T_{E4}=T_{E2}$.
 とした。ここで注意を要するのは、標準点の上げ潮の方向とメッシュの楕円長軸の方向が反対の時には(8)式をそのまま適用することができないことである。半日周潮流の場合、流向を逆にすると、潮時差は遅角に 180° を加えて6時間の違いとなるが、この潮時差をそのまま日周潮流に置き換えると6時間では 90° しかない。従って、流向を標準点とメッシュで逆にする時には、角度 180° の差となるように、(7)式までさかのぼって、半日周潮で約6時間、日周潮で約12時間、1/4日周潮で約3時間の補正をする必要がある。1985年10月の運用当初においては(8)式をそのまま適用していたため、直線的な流向変化を示すはずの日周潮流の流向が回転したりする不具合が生じていた。現在(1985年11月)では、この点は修正済である。各メッシュに日周潮流、半日周潮流、1/4日周潮流の補正数がすべてそろっていれば、以上の問題はない。対馬海峡、津軽海峡は、日周潮流が大きいため、半日と1日の両方が与えられている。

第2図は、実際に海洋情報システムの端末から出力した1985年10月21日12時の明石海峡付近の潮流の概況である。このような図形出力は本庁のみであるが、予報数値の出力はいずれの端末でも可能である。

今後、この潮流・潮汐予報の精度向上を図るとともに、潮流以外の吹送流、沿岸流などの流れについても予報するようにしたいと考えているので、何か気付かれた点がありましたら担当(沿岸調査課観測・解析)までお知らせ下さい。

Appendix

(A) 北方、東方分速の調和定数から潮流楕円要素を計算する。

各分速を、 $v_N = V_N \cos(\sigma t - K_N)$, $v_E = V_E \cos(\sigma t - K_E)$ とする。

潮流ベクトルの長さをLとすると、

$$\begin{aligned} L^2 &= v_N^2 + v_E^2 = V_N^2 \cos^2(\sigma t - K_N) + V_E^2 \cos^2(\sigma t - K_E) \\ &= V_N^2 \{1 + \cos 2(\sigma t - K_N)\} / 2 + V_E^2 \{1 + \cos 2(\sigma t - K_E)\} / 2 \\ &= 1/2 \cdot (V_N^2 + V_E^2) + 1/2 \cdot \{ \cos 2\sigma t \cdot (V_N^2 \cos 2K_N + V_E^2 \cos 2K_E) \\ &\quad + \sin 2\sigma t \cdot (V_N^2 \sin 2K_N + V_E^2 \sin 2K_E) \} \\ &= 1/2 \cdot (V_N^2 + V_E^2) + 1/2 \cdot A \cdot \cos(2\sigma t - 2K_L) \end{aligned}$$

となる。ここで、

$$\begin{cases} A \cos 2K_L = V_N^2 \cos 2K_N + V_E^2 \cos 2K_E \\ A \sin 2K_L = V_N^2 \sin 2K_N + V_E^2 \sin 2K_E \end{cases}$$

$$\begin{cases} K_L = \frac{1}{2} \cdot \arctan \frac{V_N^2 \sin 2K_N + V_E^2 \sin 2K_E}{V_N^2 \cos 2K_N + V_E^2 \cos 2K_E} \\ A^2 = V_N^4 + V_E^4 + 2V_N^2 V_E^2 \cos 2(K_N - K_E) \end{cases} \quad \text{である。}$$

L^2 が最大になる時に潮流ベクトルが楕円の長軸を示すので、長軸の遅角は K_L となる。

長軸の長さ V_L は、

$$V_L^2 = v_N^2 + v_E^2 \Big|_{\sigma t = K_L} = 1/2 \cdot (V_N^2 + V_E^2) + 1/2 \sqrt{V_N^4 + V_E^4 + 2V_N^2 V_E^2 \cos 2(K_N - K_E)}$$

長軸の方向 θ_L は,

$$\theta_L = \arctan \{ V_E \cos(K_L - K_E) / V_N \cos(K_L - K_N) \}$$

長軸の遅角 K_L は

$$K_L = 1/2 \cdot \arctan \{ (V_N^2 \sin 2K_N + V_E^2 \sin 2K_E) / (V_N^2 \cos 2K_N + V_E^2 \cos 2K_E) \}$$

となる。

短軸の長さ V_S は

$$V_S^2 = 1/2 \cdot (V_N^2 + V_E^2) - 1/2 \cdot \sqrt{V_N^4 + V_E^4 + 2V_N^2 V_E^2 \cos 2(K_N - K_E)}$$

短軸の遅角 K_S は

$$K_S = K_L + 90^\circ$$

短軸の方向 θ_S は

$$\theta_S = \arctan \{ V_E \cos(K_S - K_E) / V_N \cos(K_S - K_N) \} \quad \text{となる。}$$

楕円の長軸と短軸の比 r は,

$$r = (\theta_L - \theta_S) / |\theta_L - \theta_S| \cdot V_S / V_L$$

とする。 r が正の時は時計まわり, r が負の時は反時計まわり, r が 0 の時は直線的な変化を示す。

(B) 潮流楕円要素から北方, 東方分速の調和定数を計算する。

わかっている値は, 長軸の長さ V_L , 遅角 K_L , 方向 θ_L および長軸と短軸の比 r である。

この時, 短軸の長さ V_S , 遅角 K_S , 方向 θ_S は, (A) の関係から,

$$V_S = |r| \cdot V_L, \quad K_S = K_L + \text{sign}(r) \cdot 90^\circ, \quad \theta_S = \theta_L + 90^\circ \quad \text{となる。}$$

長軸成分 (方向 θ_L) を $v_L = V_L \cdot \cos(\sigma t - K_L)$, 短軸成分 (方向 θ_S) を $v_S = V_S \cos(\sigma t - K_S)$ として, 北向きの軸 (方向 0°) に投影すると

$$\begin{aligned} v_N &= v_L \cos \theta_L + v_S \cos \theta_S = V_L \cdot \cos(\sigma t - K_L) \cdot \cos \theta_L - V_S \cdot \cos(\sigma t - K_S) \cdot \sin \theta_L \\ &= \cos \sigma t \cdot \{ V_L \cdot \cos K_L \cdot \cos \theta_L - V_S \cdot \cos K_S \cdot \sin \theta_L \} + \sin \sigma t \cdot \{ V_L \sin K_L \cos \theta_L - V_S \sin K_S \sin \theta_L \} \\ &= \cos \sigma t \cdot \{ V_L \cos K_L \cos \theta_L + r V_L \sin K_L \cdot \sin \theta_L \} + \sin \sigma t \cdot \{ V_L \sin K_L \cos \theta_L - r V_L \cos K_L \sin \theta_L \} \\ &= \cos \sigma t \cdot V_N \cos K_N + \sin \sigma t \cdot V_N \sin K_N = V_N \cos(\sigma t - K_N) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} V_N \cos K_N = V_L \{ \cos K_L \cos \theta_L + r \sin K_L \sin \theta_L \} \\ V_N \sin K_N = V_L \{ \sin K_L \cos \theta_L - r \cos K_L \sin \theta_L \} \end{cases}$$

となる。よって, 北方分速の振幅 V_N , 遅角 K_N は

$$V_N = V_L \cdot \sqrt{\cos^2 \theta_L + r^2 \sin^2 \theta_L}$$

$$K_N = \arctan \{ (\sin K_L \cos \theta_L - r \cos K_L \sin \theta_L) / (\cos K_L \cos \theta_L + r \sin K_L \sin \theta_L) \}$$

となる。同様に東向きの軸 (方向 90°) に投影すると,

$$\begin{aligned} v_E &= v_L \sin \theta_L + v_S \sin \theta_S = V_L \cdot \cos(\sigma t - K_L) \cdot \sin \theta_L + r \cdot V_L \cdot \sin(\sigma t - K_L) \cdot \cos \theta_L \\ &= V_L \cdot \cos \sigma t \cdot (\cos K_L \sin \theta_L - r \sin K_L \cos \theta_L) + V_L \cdot \sin \sigma t \cdot (\sin K_L \sin \theta_L + r \cos K_L \cos \theta_L) \\ &= V_E \cos(\sigma t - K_E) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} V_E \cos K_E = V_L (\cos K_L \sin \theta_L - r \sin K_L \cos \theta_L) \\ V_E \sin K_E = V_L (\sin K_L \sin \theta_L + r \cos K_L \cos \theta_L) \end{cases}$$

となる。よって, 東方分速の振幅 V_E , 遅角 K_E は,

$$V_E = V_L \sqrt{\sin^2 \theta_L + r^2 \cos^2 \theta_L}$$

$$K_E = \arctan \{ (\sin K_L \sin \theta_L + r \cos K_L \cos \theta_L) / (\cos K_L \sin \theta_L - r \sin K_L \cos \theta_L) \}$$

報告者紹介



Minoru Odamaki

小田巻 実 昭和61年3月現在,
本庁水路部沿岸調査課沿岸調査官



Takeshi Kumagai

熊谷 武 昭和61年3月現在,
本庁水路部沿岸調査課沿岸調査官付