

# 潮汐残渣流に伴う $MS_f$ 潮成分の挙動

安 田 秀 一\*

## 1. ま え が き

潮流の 25 時間平均値や 15 日平均値は通常恒流と呼ばれ、その成因には風、海水の密度分布、潮汐流の非線形効果等のものが掲げられる。そのうち潮汐流の非線形効果に起因する潮汐残渣流はその永続性から物質輸送には極めて大きい影響を及ぼすことが知られており、調和解析等によって得られた恒流成分が潮汐残渣流であるかどうかを判定することは、海域での物質分布を予測する上からも重要なことと考えられる。既報<sup>1)</sup>では単純化した解析解の中で潮汐残渣流は振動流の振幅の二乗に比例することを示したが、このことは 25 時間平均潮流が大潮期で大きく小潮期で小さくなることを意味しており、本研究では、この大潮期と小潮期における残渣流の強さの違いが潮汐流の分潮である  $MS_f$  潮成分の存在に対応しているとして潮汐残渣流に伴う  $MS_f$  潮成分の挙動を理論と実験によって解析した。水平的な残渣流には陸岸境界層によるものと剝離によるものがあることを既報でも述べたが、本報でも陸岸境界層によるものについては解析解を導き、非線形性の強い剝離タイプのものについては水理実験によって調べた。また湾内に進入する基本潮汐は  $M_2$  潮と  $S_2$  潮とした。 $M_2$  潮と  $S_2$  潮の両方を含めた場合の現象の 1 周期は  $MS_f$  潮成分の 1 周期と同じで、本報ではこれで平均したものを 15 日平均と呼び  $M_2$  潮周期で平均したものは習慣上 25 時間平均と呼ぶ。

## 2. 陸岸境界層による潮汐残渣流と $MS_f$ 潮流

理論解析のための内湾地形は、既報<sup>1)</sup>同様水深が一定  $h$  で湾長は  $L$  の矩形を想定したが、幅については解析解を単純化したいことから半無限的にあるものとした。潮汐は湾口から一様に進入するとして湾内の鉛直平均潮流は既報と同様な方程式で支配されると考える。進入する潮汐は  $M_2$  潮と  $S_2$  潮であるとし、基本方程式は既報同様、基本振動成分を支配するものと、それから非線形項を通して二次的に生じる残渣成分等を支配するものに分けられると仮定する。(報告 2), 3) 参照) それによると基本振動流に関する解は次のようになる。

$$u_i(x, y, t) = U_i \left(1 - \frac{x}{L}\right) \{\sin \omega_i t - e^{-\beta_H y} \sin(\omega_i t - \beta_i y)\} \dots\dots\dots (1)$$

但し、 $i$  は  $M_2$  潮成分または  $S_2$  潮成分を表しており、各潮汐の振幅を  $\eta_i$  とすると、境界層外の湾口における潮流の振幅は  $U_i = \omega_i \eta_i L / h$ 、そして  $\beta_i = (\omega_i / 2\nu_H)^{1/2}$ 、 $\omega_i$  は振動数、 $\nu_H$  は水平粘性係数である。 $M_2$  潮と  $S_2$  潮の振幅は 2 倍以上と異なるものの振動数は非常に近いいためそれぞれが形成する  $\beta_i^{-1}$  で表される境界層厚はほとんど同じである。基本振動成分から残渣流等の二次の成分への橋渡しは既報にもあるように  $u_i \xi_i$  ( $\xi$  は過度) によって行われ、基本振動成分が  $M_2$  潮と  $S_2$  潮の場合にはこの非線形項は

$$u_i \xi_i = (u_m + u_s)(\xi_m + \xi_s) = u_m \xi_m + u_s \xi_s + u_m \xi_s + u_s \xi_m \dots\dots\dots (2)$$

のように分解できる。但し添字  $m$  は  $M_2$  潮、 $s$  は  $S_2$  潮を表している。(1) 式を (2) 式の各項に代入することによって、右辺第一項は  $M_2$  潮による定常成分と  $M_4$  潮を、第二項は  $S_2$  潮による定常成分と  $S_4$  潮を、第三項と第四項は  $M_2$  潮と  $S_2$  潮の相互作用による複合潮に関するもので  $MS_f$  潮と  $MS_4$  潮をそれぞれ生成する項である。既報<sup>1), 2)</sup> などのように潮汐波が 1 種類のときには非線形効果によって生じる二次的な成分は定常(残渣)成分と倍潮成分のみであったが、本報のように湾内に進入する潮汐波が 2 種類のときには上記のような複合潮成分が新たに生じてくる。これらの各成分を支配する方程式は既報<sup>1)</sup>と同様な流線関数を導入することによって次のように得ることができる。

$$\frac{\partial^3 \psi_j}{\partial t \partial y^2} - \nu_H \frac{\partial^4 \psi_j}{\partial y^4} = \frac{\partial(u_i \xi_i)_j}{\partial x} \dots\dots\dots (3)$$

添字  $j$  は二次的に発生する各成分を表す。各成分の解は陸岸で流線関数と流速の値が 0、 $y \rightarrow \infty$  で流速が一定値に収束する(過度が 0)という条件のもとで導くことができる。 $x$  方向の依存性は既報<sup>1), 2), 3)</sup>と同様に考える。ここで、倍潮の  $M_4$  潮成分と  $S_4$  潮成分、そして複合潮である  $M_2$  潮と  $S_2$  潮の和の振動数をもつ  $MS_4$  潮成分は、潮汐振動流が形成する境界層内とその近辺のみで生じ、 $y$  が大きい所でも生成される残渣成分とは速度分布

\* 正会員。中国工業技術試験所 内海水利研究室

が異なる<sup>3)</sup>ため、本報ではこれらの解法は省略し、残渣成分と対応性のよい  $M_2$  潮と  $S_2$  潮の差の振動数(周期 14.8 日)をもつ  $MS_f$  潮成分のみを解法する。解法は正規モード解法によって行い、その時の  $y$  方向依存性は (3) 式より

$$\frac{d^4 W}{dy^4} - i \frac{\omega_f}{\nu_H} \frac{d^2 W}{dy^2} = Q(y) \quad \dots\dots\dots (4)$$

を解くことによって得られる。ここに  $\phi_f(x, y, t) = \text{Real}\{W(y)(1-x/L)e^{i\omega_f t}\}$  で添字  $f$  は  $MS_f$  潮を表し、 $Q(y)$  は (2) 式の  $u_s \xi_m + u_m \xi_s$  の  $MS_f$  潮成分の  $y$  方向依存の部分に相当し、次のとおりである。

$$\begin{aligned} Q(y) = & [e^{-\beta_m y} (\sin \beta_m y - \cos \beta_m y) \\ & - e^{-\beta_s y} (\sin \beta_s y - \cos \beta_s y) \\ & - 2e^{-(\beta_m + \beta_s)y} \sin(\beta_m - \beta_s)y] \\ & + i[e^{-\beta_m y} (\sin \beta_m y + \cos \beta_m y) \\ & + e^{-\beta_s y} (\sin \beta_s y + \cos \beta_s y) \\ & - 2e^{-(\beta_m + \beta_s)y} \cos(\beta_m - \beta_s)y] \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

速度分布は  $\partial \phi_f / \partial y$  より得られ、次のようになる。

$$\begin{aligned} u_f(x, y, t) \equiv \frac{\partial \phi_f}{\partial y} = & \frac{U_m U_s}{\omega_m L} \{ [a_1 + e^{-\beta_n y} (a_2 \cos \beta_n y \\ & + a_3 \sin \beta_n y) + a_4 e^{-\beta_m y} \cos \beta_m y \\ & + a_5 e^{-\beta_s y} \cos \beta_s y \\ & + e^{-(\beta_m + \beta_s)y} (a_6 \cos \beta_f y \\ & + a_7 \sin \beta_f y)] \cos \omega_f t \\ & + \{b_1 + e^{-\beta_n y} (b_2 \cos \beta_n y \\ & + b_3 \sin \beta_n y) + b_4 e^{-\beta_m y} \sin \beta_m y \\ & + b_5 e^{-\beta_s y} \sin \beta_s y \\ & + e^{-(\beta_m + \beta_s)y} (b_6 \cos \beta_f y \\ & + b_7 \sin \beta_f y)] \sin \omega_f t \} \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$  は  $\beta_m, \beta_s, \beta_f (= \beta_s - \beta_m), \beta_n (= \sqrt{(\omega_s - \omega_m)/2\nu_H})$  を繁雑に含んだ定数である。

残渣成分については、対象海域を  $y \rightarrow \infty$  にしている点の違いはあるものの既報のものと同様でそのうち  $M_2$  潮による残渣成分  $u_{r_m}$  は

$$\begin{aligned} u_{r_m}(x, y, t) \equiv \frac{\partial \phi_{r_m}}{\partial y} = & \frac{U_m^2}{\omega_m L} \left( \frac{1}{4} e^{-2\beta_m y} \right. \\ & \left. + e^{-\beta_m y} \sin \beta_m y - \frac{1}{4} \right) \\ & \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

のように得られ、 $S_2$  潮による残渣成分は suffix  $m$  を  $s$  に変えたものとして求められる。図-1 には  $M_2$  潮と  $S_2$  潮による残渣成分を、図-2 には  $MS_f$  潮成分の振幅と、その大潮時からの位相遅れをそれぞれ表した。振動流が形成する境界層厚は  $\beta_m^{-1} (= \sqrt{2\nu_H/\omega_m})$  が 1 から 2 の範囲にあると考えられ、この境界層の縁あたりに位相遅れのピークが見られるが、これは  $M_2$  潮と

$S_2$  潮の振動数が非常に近いことと残渣流が逆転することによるもので、ここでは  $MS_f$  潮の振幅も小さく現象として特異なものが生じている訳ではない。 $M_2$  潮と  $S_2$  潮による残渣成分の和は 15 日平均残渣流に相当するが、さらにこれに  $MS_f$  潮成分を加えたものが 25 時間平均残渣流と考えることができる。それを大潮期から小潮期にかけて、さらに小潮期から大潮期にかけての 15 日間にお

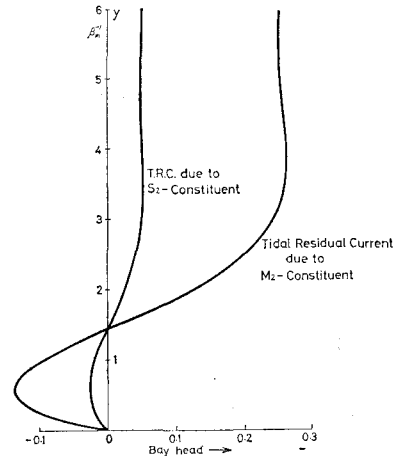


図-1  $M_2$  潮と  $S_2$  潮による潮汐残渣流の分布、横軸は  $U_m^2/\omega_m L$  で規格化

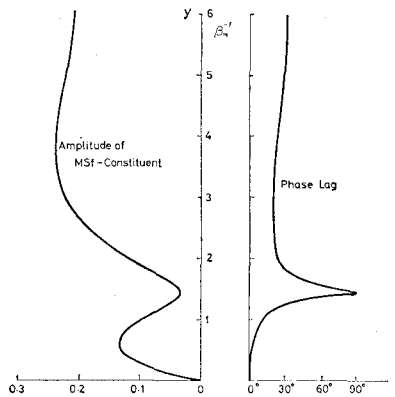


図-2  $MS_f$  潮成分の振幅分布と位相遅れ、振幅の横軸は  $U_m U_s/\omega_m L$  で規格化

ける変動を 図-3 に描いた。当モデルの解析解によると、境界層内では大潮小潮とはほぼ同時に 25 時間平均残渣流は極大極小をとるが、境界層を離れるに従って

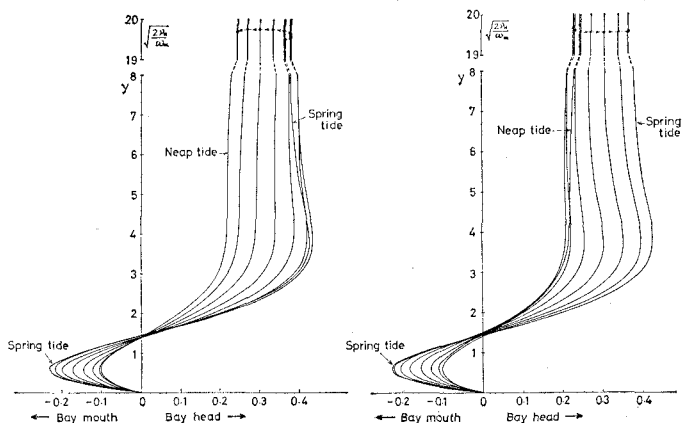


図-3 25 時間平均残渣流の大潮→小潮→大潮にかけての変動

$MS_f$  潮の位相のために極値は遅れて現れ、その値は最大  $36^\circ$  ( $M_2$  潮で 2.9 周期) であった。

### 3. 水理実験における潮汐残渣流と $MS_f$ 潮流

非線形効果の大きい剝離タイプの潮汐残渣流と  $MS_f$  潮流については水理実験によって解析した。水槽の大きさ (湾内  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ , 湾口  $1\text{ m}$ ) や平均水深 ( $8\text{ cm}$ ) は既報<sup>1)</sup>と同じで、 $M_2$  潮の振幅と周期はそれぞれ  $0.8\text{ cm}$  と  $202\text{ s}$ ,  $S_2$  潮は  $0.3\text{ cm}$  と  $195\text{ s}$  を与えた。粗度条件は底面がモルタル仕上げのままの状態 (以下滑条件) と、そのままでは残渣流が強くなりすぎるため底面に約 200 個の  $5\text{ cm}$  立方のブロック片を均質に敷き並べた状態 (以下粗条件) の二ケースで行った。また当合成潮実験の参考のために周期を  $M_2$  潮のままで振幅を  $M_2$  潮と  $S_2$  潮の和 ( $1.1\text{ cm}$ ) にした大潮期実験と、振幅を  $M_2$  潮と  $S_2$  潮の差 ( $0.5\text{ cm}$ ) にした小潮期実験も行った。合成潮実験では  $MS_f$  潮の 1 周期は  $M_2$  潮と  $S_2$  潮の設定周期より  $5\text{ 分 } 30\text{ 秒}$  ( $1\text{ 時間 } 33\text{ 分 } 50\text{ 秒}$ ) となり、流速計等を用いる通常の方法で湾内の分布の状態がわかるほど多くの点で測流するには多大の時間と労力を要する。このため測量は長尺フィルムで多数の浮子 (径  $33\text{ mm}$ ) の移動を写真撮影することによって、 $M_2$  潮で半周期毎の潮流ベクトル図を作成し、湾内 34 の固定点で読み取ってオイラー値とした。大潮期実験と小潮期実験では 10 分の 1 周期毎の潮流ベクトル図を作成して流速値を読み取った。

測得した流速値は調和解析をして定常成分 (残渣成分) や振動成分を求めた。図-4 は合成潮実験における滑・粗各条件の 15 日平均残渣流である。また図-5 は  $MS_f$  潮成分の潮流楕円要素で、図-6 は潮流楕円要

素の矢印の時点の位相遅れを等値線にして表した。位相遅れの値は大潮期に 25 時間平均残渣流が極大値になる時に  $0^\circ$  となる。図-5 の中には残渣成分と  $MS_f$  潮成分の対応性を見るために、15 日平均残渣流の向きと  $MS_f$  潮成分の長軸の向きのずれが  $30^\circ$  以上の時には  $\triangle$  で囲み、 $20^\circ \sim 30^\circ$  の時には  $\circ$  で囲んだ。図-7 と図-8 に

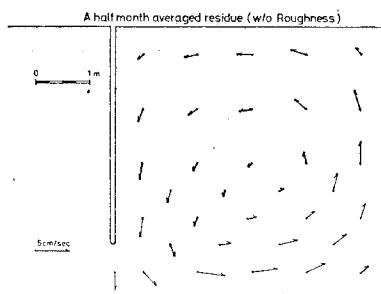


図-4 (a) 15 日平均潮汐残渣流 (滑条件)

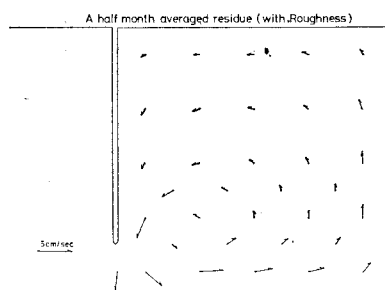


図-4 (b) 15 日平均潮汐残渣流 (粗条件)

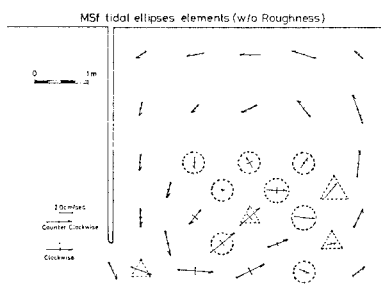


図-5 (a)  $MS_f$  潮成分の潮流楕円要素 (滑条件)

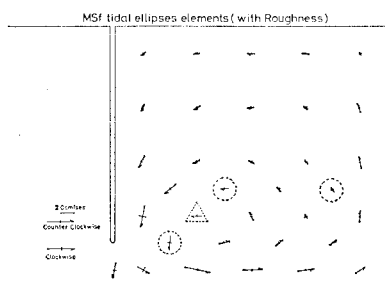


図-5 (b)  $MS_f$  潮成分の潮流楕円要素 (粗条件)

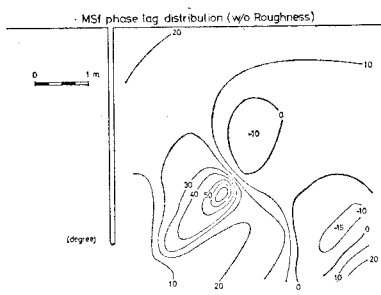


図-6 (a)  $MS_f$  潮成分の位相遅れ分布 (滑条件)

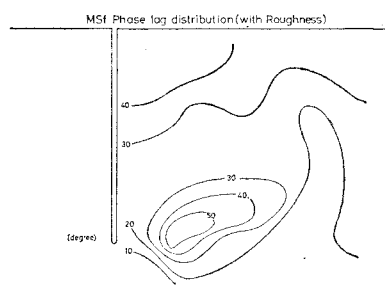


図-6 (b)  $MS_f$  潮成分の位相遅れ分布 (粗条件)

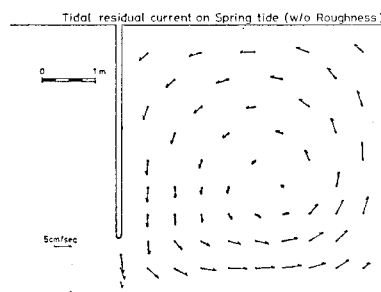


図-7 (a) 大潮期実験の潮汐残渣流 (滑条件)

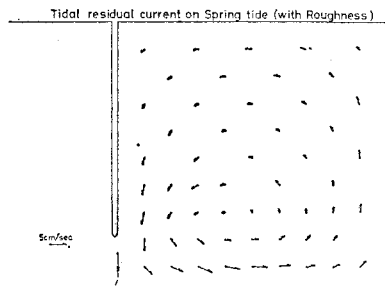


図-7 (b) 大潮期実験の潮汐残渣流 (粗条件)

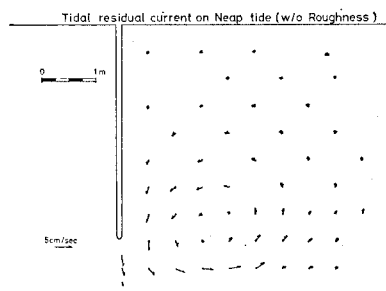


図-8 (a) 小潮期実験の潮汐残渣流  
(滑条件)

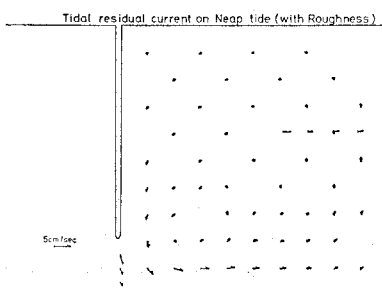


図-8 (b) 小潮期実験の潮汐残渣流  
(粗条件)

はそれぞれ大潮期実験と小潮期実験における残渣流ベクトルを描いた。これらはいずれも潮汐を発生させた後、数周期を経て残渣流が定常状態になった場合のものを表している。この図によると、滑条件では大潮期で残渣成分は非常に強く残渣流の形成する環流の中心も湾奥部に深く入り込んで湾内いっばいに卓越しているが、小潮期では残渣流が単に弱くなるだけではなく環流の中心も湾口に近付いて径も小さく、大潮期のように湾内いっばいに卓越することもない。粗条件でも同様な傾向は見られるが、大潮期と小潮期の違いは滑条件よりも小さい。大潮期と小潮期における残渣流のこのような違いが合成潮実験での  $MS_F$  潮成分に反映しているものと考えられるが、図-5 や 図-6 を見ると  $MS_F$  潮流は特に滑条件で大きく小潮を見せ、25 時間平均残渣流が単純に大潮で大複雑な様相小さくなる訳ではないことがわかる。

尚当実験に際しては湾口部近くと湾奥部の 2 点で潮位を連続測定しているが潮汐の  $MS_F$  潮成分は水位計の精度 ( $\pm 0.1$  mm) 以上には得られなかった。

#### 4. 考 察

理論解析での単純化したモデルでは振動流によって生成される定常流 (残渣流) は振動成分の振幅の二乗に比例し、速度分布は振動流の強さによらず同じ形を保つ。これは残渣流自身には非線形効果がないとして二次の項までしか考慮しなかったことによるが、非線形効果を含めた場合にはさらに異なったものになると思われる。非線形効果の強い剝離による潮汐残渣流は大潮期と小潮期で強さのみならず残渣流が形成する環流の径などの速度ベクトル分布も異なるために、各地点での残渣流の強さは潮汐振幅の二乗に比例しているとは言いがたい。当理論解析においては残渣流と  $MS_F$  潮流はよく対応しているが、水理実験の滑条件の場合では、湾中央部付近で  $MS_F$  潮の振幅が大きく 15 日平均残渣成分との対応性が悪くなっている。湾内への粗度抵抗の投入は摩擦抵抗を強めて相対的に流れの非線形効果を弱め、その時の 15 日平均残渣成分と  $MS_F$  潮成分はよく対応している。

実験の滑条件における 15 日平均残渣流をみると残渣

流が形成する環流の中心がいびつな長円になっており、一見不自然な感じもする。これは第 2 節でも述べたように 15 日平均残渣流が  $M_2$  潮による残渣成分と  $S_2$  潮による残渣成分の和から成り立っているため、潮汐振幅の大きい  $M_2$  潮と小さい  $S_2$  潮では環流の中心位置がずれていることによるのであろうと考えられる。現象的には小潮期に

は湾口近くにあった 25 時間平均残渣流の環流の中心が大潮期になるに従って湾中央部の方へ移動したことによるものである。大潮期と小潮期の残渣流の速度分布が似かよっている粗条件では環流の中心もいびつになることもなく、大潮期・小潮期の 25 時間平均残渣流と 15 日平均残渣流は同じような分布を示している。

図-6 を見ると、残渣流が形成する環流の近くでは  $MS_F$  潮の位相遅れの極大域があるが、特に粗条件の場合はこの領域では 15 日平均残渣流と  $MS_F$  潮成分も小さく、第二節で述べた解析解による境界層の縁にある位相遅れの極大域と同じようなものと考えられる。滑条件の場合には 25 時間平均残渣流の環流の中心が大潮期から小潮期にかけて移動するということがあって、15 日平均残渣成分よりも  $MS_F$  潮成分のほうが大きい箇所もあり、両成分の流れの向きも  $30^\circ$  以上違う所もあったりで残渣流系は複雑な様相を呈している。滑条件の  $MS_F$  潮の位相遅れ図の右下部に位相の進みが見られる。合成潮実験の各潮時のベクトル図 (本報では省略) から判断すると、これも環流の径や中心位置の 15 日間での変動によるものようである。 $MS_F$  潮の位相は概して湾内では遅れる傾向にあるといえるが、これは残渣流が定常状態になるには潮汐を与えて数周期を要することと関連しており、解析解の境界層外の位相遅れも同様のことと思われる。

#### 5. あとがき

25 時間平均残渣流の大潮から小潮にかけての変動が潮汐分潮の  $MS_F$  潮に対応し、それが基本潮汐流の非線形効果の中で密接に関連していることがわかった。陸岸境界層による残渣流系で、振動流が形成する境界層内では  $MS_F$  潮の位相は大潮期とほぼ同時期に極大値をとるが、実験結果を含めて全般的には湾内では 25 時間平均残渣流のピークは大潮期よりも遅れる傾向にあることがわかった。

最後に、従来潮流データの調和解析は潮汐の延長として取り扱われており、15 日に近い周期の潮汐分潮としては  $M_F$  潮成分 (周期 13.66 日) のみを考慮することが

多かったが、潮汐に比べて非線形効果の大きい潮流系では  $MS_f$  潮を考慮することのほうが、恒流成分の成因の判定材料としても有用であろうと考える。しかし潮流の15日間観測結果を調和解析すると観測期間中に潮汐流以外のノイズが入ると  $MS_f$  潮として捕えられることもあり、本報で取扱った非線形効果としての  $MS_f$  潮を有意な値として取り出すには現段階では1年間ぐらいの長期間の観測データが要るのではないかとと思われる<sup>4)</sup>。

本研究は環境庁一括計上の公害防止技術特別研究「瀬戸内海における海水交換性および負荷影響度の研究」の一環として行ったものである。また実験においては山崎宗広技官に御協力いただいた。

## 参 考 文 献

- 1) 安田秀一・早川典生：潮汐残渣流の生成機構と潮汐水理模型での再現性について，第26回海講論文集，pp. 532~536, 1979.
- 2) Yasuda, H.: Generating Mechanism of the Tidal Residual Current due to the Coastal Boundary, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 35, pp. 241~252, 1980.
- 3) Yasuda, H.: Tide-induced Vertical Circulation in a Bay with Homogeneous Water, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 37, pp. 74~86, 1981.
- 4) 高杉由夫・田辺弘道・肥後竹彦・宝田盛康・安田秀一：広湾における一年間潮流観測結果について，中国工業技術試験所報告，No. 7, pp. 1~17, 1979.