

潮位変動からみた瀬戸内海の貫流に関する考察

安 田 秀 一*

1. 序

瀬戸内海の海況の形成維持には、潮流や気象要因が様々に影響し合っていることが知られているが、内海を貫く恒流（貫流；ここでは潮流の 25 時間平均値の断面平均流と定義する）については、もしそれが存在すれば海水交換や物質分散への効果は大きいものと想像され、物質分布等の海況形成維持には無視できないものと考えられる。日高¹⁾は 40 年以上も前にすでに貫流に注目し、それに関連した潮流観測から極めて小さいものならば存在しうると述べ、速水・宇野木²⁾は瀬戸内海沿岸およびその近辺の潮位を調べて貫流の存在を示唆した。また小長・西山³⁾は水島重油流出事故に関連して平均潮位の勾配が流出重油の拡散に影響しているのではないかと考察もしているが貫流について言及するには至っていない。樋口・武岡⁴⁾は瀬戸内海の模型実験で黒潮の形状によって小さいながらも内海部に東流や西流が発生することを述べている。このように貫流については他にもいろいろと取り沙汰されているが未だに確かな事実は見出されていない。著者の勤務する中国工業技術試験所では瀬戸内海の物質分布や海水交流に関する研究を続けており著者も物質輸送に大きい影響を与えるものとして潮流のシアや潮汐残渣流についての研究を行ってきたが、大きいスケールでの物質分散を考えるには、やはり貫流の存在は無視できないものと考え、何とかその値を見積ろうとしたのが本報である。

ところで、瀬戸内海に貫流を引き起こすものとしてまず考えられるものは内海の縦方向成分をもつ風の応力であろう。瀬戸内海では冬の季節風は西から東向きの成分が卓越し、夏から秋にかけては「コチ」と呼ばれる東風が吹き、これらはかなりの体積輸送を生み出すものと考えられる。また Kreeke⁵⁾は湾口が二つある閉鎖的な内湾では潮汐の非線形効果によって貫流が発生することを、非常に単純化したモデルで示したが、瀬戸内海の紀伊水道付近と豊後水道付近では地形や潮汐の振幅・位相等も異なり両水道での非線形効果の違いによって貫流が発生することは十分に考えられる。さらに瀬戸内海の外

側では黒潮が流れており、この流れによる head 差が両水道を経て内海部に海面勾配を生じ、概して黒潮の影響による貫流は平均的に東向きに生成され则认为られる。また黒潮は非常に大きいスケールで平均した場合には定常流と見なせるが、実際の流軸は蛇行等を伴って時間的に変動しており、その変動は内海の海水の流動にも影響するものと思われる。本研究ではこれらのうち黒潮による潮位の挙動に注目して、それらを調べることから貫流について検討・考察した。

2. 瀬戸内海の潮汐と摩擦係数の推算

貫流の成因としては前節のようなものが考えられるが、その値を知るには瀬戸内海のもつ摩擦力を明らかにしなければならない。本研究では摩擦力の推算のために、瀬戸内海を一次元化した時の潮汐分布の解析解を導き、それを現地の振幅や位相にあてはめ最適な摩擦係数を求めるという方法をとった。

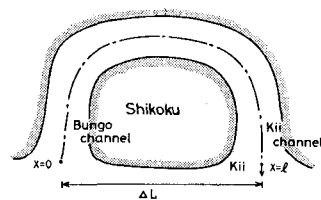


図-1 一次元化した瀬戸内海

摩擦係数は速度に比例する形のものに注目し、理論解析のためのモデル海も水深・幅とも一定の極めて単純なものを想定した（図-1）。運動方程式と連続式は、

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - Ru \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

のように単純化できるとし（ u は内海の軸方向の断面平均流速、 η は変動潮位、 h は水深、 R は摩擦係数）これから次のような波動方程式を導いた。

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + R \frac{\partial \eta}{\partial t} = gh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

瀬戸内海の水の出入りは主に豊後・紀伊の両水道であるとして豊後水道の入り口（ $x=0$ ）での潮汐の条件を η

* 正会員 中国工業技術試験所内海水利研究室

$=\eta_B \sin \omega t$, 紀伊水道の入り口 ($x=l$) で $\eta = \eta_K \sin(\omega t + \delta)$ とすると (3) 式の解は次のように得ることができる。

$$\eta(x, t) = \{e^{px}(C_{1R} \cos qx - C_{1i} \sin qx) + e^{-px}(C_{2R} \cos qx + C_{2i} \sin qx)\} \sin \omega t + \{e^{px}(C_{1R} \sin qx + C_{1i} \cos qx) + e^{-px}(C_{2R} \cos qx - C_{2i} \sin qx)\} \cos \omega t$$

$$C_{1R} = \eta_B - C_{2R}$$

$$C_{2R} = -[\eta_K \{e^{pl} \cos(ql - \delta) - e^{-pl} \cos(ql + \delta)\} - \eta_B e^{2pl} + \eta_B \cos 2ql] / 4(\cosh^2 pl - \cos^2 ql)$$

$$C_{1i} = -[\eta_K \{e^{pl} \sin(ql - \delta) + e^{-pl} \sin(ql + \delta)\} - \eta_B \sin 2ql] / 4(\cosh^2 pl - \cos^2 ql)$$

$$C_{2i} = -C_{1i}$$

$$p = \frac{\omega}{\sqrt{gh}} \sqrt{\frac{\sqrt{1+\xi^2}-1}{2}}$$

$$q = \frac{\omega}{\sqrt{gh}} \sqrt{\frac{\sqrt{1+\xi^2}+1}{2}}, \quad \xi = \frac{R}{\omega} \dots \dots (4)$$

ω は両水道から進入する潮汐の振動数で δ は両水道入口での潮汐の位相差である。この解を見ると $\cosh^2 pl = \cos^2 ql$ の時に $\eta(x, t)$ は ∞ となり, $\delta=0$, $\eta_B=\eta_K$, $\xi=0$ の条件を加えると $\omega l/\sqrt{gh} = n\pi$ ($n=1, 3, 5, \dots$) の時に内海が完全に共振することがわかる。湾口が2つある内湾の潮汐の特徴を知るために 図-2 に $\omega l/\sqrt{gh}$ が 2, 3, 4, 10 の場合の内海部での振幅と位相の分布を各摩擦係数毎に表した。それによると摩擦の効果は, 湾内の振幅の増幅率を抑え, 位相については $\omega l/\sqrt{gh}$ が小さい場合には内部での遅れを大きくし, $\omega l/\sqrt{gh}$ が大きい

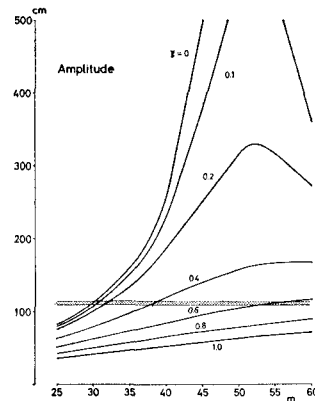


図-3 内海の代表水深と摩擦による潮汐振幅の増幅率

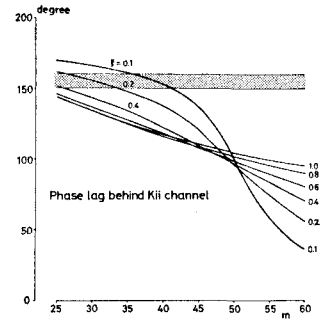


図-4 内海の代表水深と摩擦による潮汐の位相遅れ

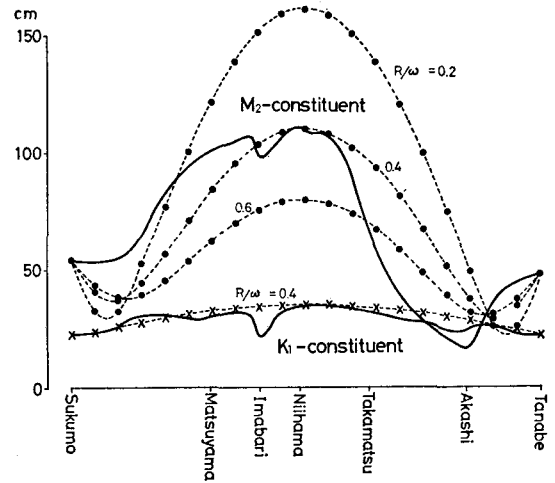


図-5 一次元化した瀬戸内海での潮汐の振幅分布 (実線は現地の値の分布)

場合には逆に位相遅れを小さくしている。瀬戸内海の水理模型実験では摩擦抵抗を強調することによって内部での振幅が小さくなり位相がやや速くなったが⁶⁾, このことは 図-2 の $\omega l/\sqrt{gh}=4$ の場合によく対応している。

解析から見地との振幅に一致する適当な摩擦係数を求めようとする時, 内海の代表寸法 (長さ・水深) を明らかにせねばならない。図-3, 図-4 には内海の長さを 500 km と仮定して水深を変えた場合の内海中央部の M_2 潮の振幅と位相を各摩擦係数ごとに表した。図中の黒帯が現地のものであるがこれらによると内海の代表水深は 35~40 m として ξ は 0.2~0.4 の間が適当と思われる。図-5 は内海の長さを 500 km, 水深を 38 m と

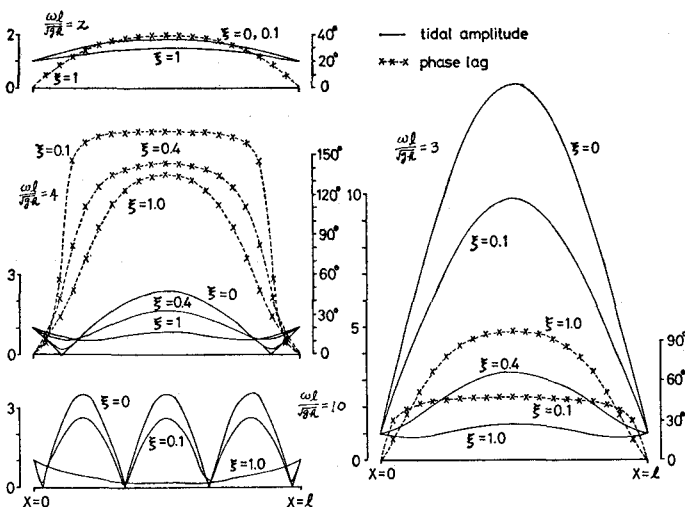


図-2 モデル化した内海の代表寸法と摩擦による潮汐振幅の増幅率と位相遅れの分布

して宿毛(豊後入口)で 53 cm, 田辺(紀伊入口)で 49 cm の振幅を与えた場合の内海内部での振幅の分布を表したものである。それによると $\xi(=R/\omega)=0.4$ を与えればそれほど間違った値ではないようである。この図中に $R=0.4 \times \omega$ (ω は M_2 潮の振動数)を与えた場合の K_1 潮の振幅分布も表した。

瀬戸内海は, 潮汐の点から単純に考えるとその第一モードの固有振動周期が M_2 周期よりわずかに長く, 図-2 の $\omega l/\sqrt{gh}=4$ に近い状態で K_1 潮については $\omega l/\sqrt{gh}=2$ に近いと考えることができる。ちなみにその固有振動周期は摩擦がないとして $\omega l/\sqrt{gh}=\pi$ より $2l/\sqrt{gh}$ となり前述の値を代入すると 14 時間 24 分である。

3. 黒潮を定常流とした時の貫流

黒潮の存在による海面昇降は, 最も単純なモデルで Stommel⁷⁾ の図-6 に表されているが, それによると黒

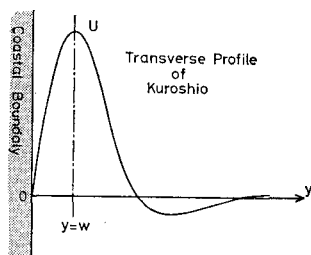


図-6 模式化した黒潮の速度分布

潮の横方向の地衡流バランスのための海面勾配の他に上流から下流へも海面はかなり傾斜していることを示している。この傾斜に対しては摩擦力がバランスしている訳であるが, ここでは黒潮を定常流として摩擦が水平粘性率 ν_H で与えられる場合の豊後・紀伊沖間の海面傾斜を見積ってみる。今, 黒潮の横方向の速度分布の形状を図-6 のようなものと考え, 黒潮の縦 (x^*) 方向の変化はほとんどないとして運動方程式を $g\partial\eta/\partial x^* = \nu_H \partial^2 u/\partial y^2$ と表し $y=0$ から $y=W$ までは $u(y) = U(2-y/W)y/W$ なる二次関数で表されるものとする, x 方向の ΔL 間の海面傾斜 $\Delta\eta$ は,

$$\Delta\eta = \frac{2\nu_H U}{gW^2} \dots\dots\dots (5)$$

のように書き表され, $\nu_H=5 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $W=80 \text{ km}^3$, $\Delta L=300 \text{ km}$ とすると $\Delta\eta \approx 0.024U$ となり, U (黒潮の主軸の流速) を 100 cm/sec とすると 2.4 cm, 200 cm/sec とすると 5 cm となる。(5) 式は黒潮の流速が速くなる時には $\Delta\eta$ は大きくなり, また W , つまり黒潮が陸岸から離れるほど $\Delta\eta$ は小さくなることを示している。

内海での貫流を (1) 式と同程度の近似度で表すとその断面平均流速は定常解から $u_s = -g\Delta\eta/Rl$ のようになり R を $\xi=0.4$ とすると $u_s \approx 0.35\Delta\eta$ で上記の値より 2

cm/sec の貫流が発生しうることになる。これは代表水深の 38 m と平均幅の 30 km をかけると 2×10^4 トン/sec 余りの流量となり, 単純に計算すると 300 日たらずで内海の水は入れ代わることになり, 潮汐によるものよりもはるかに大きい海水交換能力をもつ。

4. 瀬戸内海の平均潮位の変動と黒潮

両水道間の潮位の差(内海の海面勾配)を現存の潮位データから絶対値として正確に取り出すことはむづかしく前節の検証もできないが, 図-7 には瀬戸内海およびその近辺での 25 時間平均潮位の 1 年間の変動を表わした。それによると全体的に潮位は S_a 成分が顕著に現われ, その振幅は約 20 cm となっている。また 8 月の後半には全域的に 2 つの潮位のピークが見られるがこれはどちらも台風による気圧の影響である。その他の局所的な変動もほとんど高気圧や低気圧によるものであるが, 7 月後半から 8 月上旬にかけての極小値は気圧からは算定できなかった。ところで確かに潮位変動は一見全体的

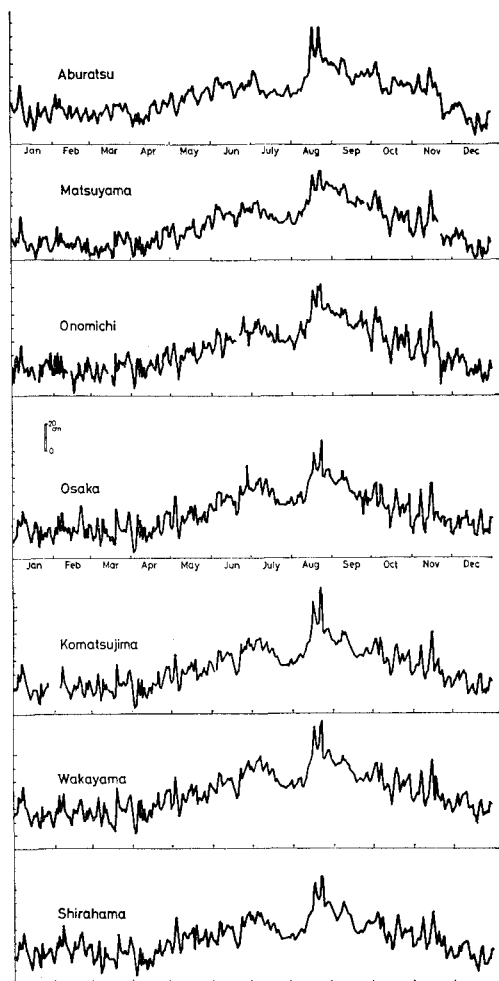


図-7 瀬戸内海周辺の 25 時間平均潮位の変動

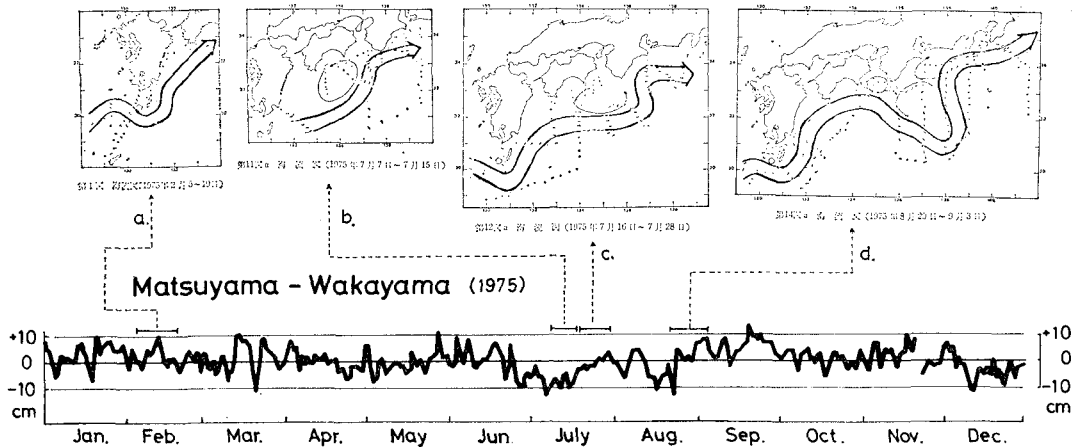


図-8 松山と和歌山の潮差の変動と黒潮の流軸

に起こっているように見えるが、よく見ると部分的には少しずれている。そこで次には瀬戸内海の西の松山から東の和歌山の値を差し引いて図-8に表した。先にも述べたように潮位については絶対値で数 cm の議論はできないことから、差の一年間の平均値を 0 として縦軸を決めた。それによると潮位差（海面勾配）は 1 年間を通じてかなり変動しており貫流はもし存在してもかなり変動しうることが同われる。太平洋岸の潮位は黒潮の形状によって大きく変動することが知られているが⁹⁾、海上保安庁からは約 2 週間間隔での黒潮についての情報が出版されており¹⁰⁾、それによると黒潮の流軸の様子と内海の海面勾配は非常によく対応しているようである。図-8 の中には文献 9) による黒潮流軸図を抜粋して潮位差と対応させて表した。文献 10) によると 1 月から 3 月までは小さな変動を伴いながら流軸は九州から東海沖にかけて太平洋岸にかなり接近しており、図-8 にはこの時期の海面勾配は東向きの傾向が顕著に現れている。4 月頃からは黒潮流軸は九州沖から徐々に離岸して 6 月の中旬頃までは豊後水道沖では離岸して紀伊水道沖では接岸する形を示して、海面勾配もやや西向きの傾向が見られる。離岸域はこの頃から次第に東進し、7 月中旬には図-8 の (b) のように変形して海面勾配もかなり強い西向きを維持している。この西向きの海面勾配は黒潮が潮ノ岬に接近してそこで堰のようになったため、図中に見られる四国沖の反流と同起源のものと考えられる。それ以後、黒潮は (c) のように両水道と四国の沖で離岸し、海面勾配もほとんど見られない。しかし 8 月に入ってまた次第に九州側から接岸し始め、10 月までは 1 月、2 月と同様に九州から紀伊水道沖にかけて接岸し、勾配は特に 9 月に東向きに強く現れている。前述の (5) 式は陸岸と黒潮主軸との距離 W が小さいほど $\Delta\eta$ は大きく、 W が大きい時には $\Delta\eta$ は小さいことを示しているが上述の

ことはこれを裏付けており、さらにそれに黒潮の蛇行が加わることによって貫流は刻々と変化していると考えることができる。図-9 には図-8 の潮位差の有意性を吟

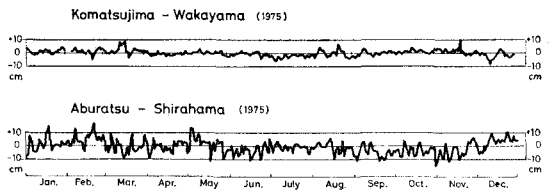


図-9 潮差の変動

味するために、ごく近辺の小松島（紀伊水道の四国側）と和歌山との潮位差と、瀬戸内海と近接する最も遠い位置に存在すると思われる、宮崎県の油津と紀伊半島の先端近くの白浜との潮位差を表した。それによると小松島と和歌山の潮位差の変動はそれほど大きくなく、図-8 の変動は十分に有意なものと考えられる。また油津と白浜の潮位差は図-8 のものとは必ずしも対応しているとは言えず、瀬戸内海へはもっと内寄りの潮位が影響していると思われる。また先に図-7 の 7 月後半の全域的な潮位の低下は気圧からは説明できないと述べたが、黒潮の流軸を調べることにによりこれは黒潮の離岸による太平洋岸での海面下降と考えることができる。

図-8 の潮位差の値はその年平均値が 0 になるように与えたが、これは変動に注目したもので実際には第 3 節で示したような黒潮の定常成分による東から西への潮位差があるはずで、全体的に第 3 節で見積った値ほど縦座標を下げたものがより適切な潮位差の値を表すと考えられる。またこの潮位差変動は 25 時間平均をとっており、貫流がそれと同時に変動するとは思えないが、数日間での平滑化を行っても 9 月頃の潮位差は 7~8 cm あり、これに定常流によるものを加えると 10 cm 以上の潮位

差が見積られ、この時の断面平均貫流は 4 cm/sec 前後になると推算することができる。これは流量にすると 4×10^4 トン/sec を超え、明石海峡のような狭窄部では 20 cm/sec 前後の貫流が推定できる。

5. ま と め

瀬戸内海の平均海面およびその勾配は外側を流れる黒潮に強く影響をうけることがわかった。またその海面勾配から見積られる貫流の強さは断面平均流速で数 cm/sec 程度と推定され、瀬戸内海の海水交流に大きな影響を与えているものと考えられる。本報告は潮位の解析から貫流のオーダーを検討する程度に留まるが、瀬戸内海の場合の形成維持機構を考える時には無視できないものであることが示唆され、さらに検討・調査を要する問題であると思われる。

摩擦の見積りは最も単純化した速度の一次に比例する形で展開したが、一般には速度の二乗に比例すると言われており、それに従うと、潮流よりはるかに値の小さい貫流では摩擦はかなり小さくなるはずで、海面勾配による貫流の大きさは本研究で見積りよりもさらに大きくなるものと思われる。海面勾配による内海内部の反応の

詳細についてはさらに瀬戸内海の水利模型等を使って明らかにしたい。

参 考 文 献

- 1) 日高孝次: 瀬戸内海の東向流について, 海と空, Vol. 17, pp. 11~14, 1937.
- 2) 速水頌一郎・宇野木早苗: 瀬戸内海における海水の交流と物質の拡散, 第 17 回海講演文集, pp. 385~393, 1970.
- 3) 小長俊二・西山勝暢: 瀬戸内海東部の表面流について——油流出に関連して——, 海と空, Vol. 51, No. 2, pp. 17~23, 1976.
- 4) 樋口明生・武岡英隆・北川吉男: 瀬戸内海における海水交流の実験的研究 (II), 京都大学防災研究所年報, 第 19 号 B, pp. 411~422, 1976.
- 5) Van de Kreeke, J.: Tide-induced mass transport; a flushing mechanism for shallow lagoons, Jour. Hydraulic Res., 14, No. 1, pp. 61~67, 1976.
- 6) 安田秀一・樋口明生・早川典生: 潮汐水利模型の縮率効果について, 第 24 回海講演文集, pp. 577~581, 1977.
- 7) Stommel, H.: The westward intensification of wind-driven ocean circulation, Trans. Amer. Geophys. Union, 29, pp. 202~206, 1948.
- 8) Munk, W. H.: On the wind-driven ocean circulation, Jour. Meteorol., 7 (2), pp. 79~93, 1950.
- 9) 黒潮総合研究グループ: 黒潮大蛇行と冷水塊, 昭和 52 年度文部省科学研究報告, 142 p., 1978.
- 10) 海上保安庁水路部: 海洋速報, 第 1 号~第 24 号, 1975.