

論文の内容の要旨

論文題目 Parameterization of tide-topography interaction at straits and application to water exchange between the Sea of Okhotsk and the North Pacific

(海峡における潮汐と海底地形の効果及びオホーツク海と北太平洋の海水交換過程への適用)

氏名 勝又 勝郎

オホーツク海は北太平洋中層水の起源水の形成場所として近年注目され、北太平洋への流出量の評価が重要な研究課題となっている。しかしオホーツク海と北太平洋との海水交換量の評価とそのメカニズムの解明は十分ではない。両海を区切るクリル諸島は数十の海峡を持つが、最大深度 1500m を越える深い海峡は二箇所だけである。ムシル海峡（東経 153.5 度北緯 48.25 度）と北ウルップ水道（東経 151.5 度北緯 46.5 度）である。これらの海峡では冬期の激しい気象条件や政治的な問題に阻まれて、ほとんど観測がなされてこなかった。一方理論的にも、海峡部における強い潮汐流のために、従来積分則 (Island Rule, Godfrey(1989) *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*) や力学計算による正確な見積りは不可能であった。

筆者の属するグループでは 1999 年 8 月～9 月に両海峡における初の直接流速観測を試みた。その結果、ムシル海峡では潮汐を取り除いた残差流が顕著な二層交換流であること、上層が 1.6 Sv の流量でオホーツク海から太平洋に向かい下層は 1.3 Sv で逆向きに流れていること、小潮でも残差流と潮汐流は同程度の強さを持つこと、などが明らかになった。同時に行われた親潮観測でも 2～4 Sv 程度のオホーツク水の太平洋への流出を確認している。

以上の結果を考慮し、数か月から季節周期程度の変動を説明できるオホーツク海と北太平洋の海水交換の力学過程を二層モデルを用いて考察した。観測から示唆されるように海峡部の潮汐の効果は無視できず、これを陽に取り入れた新たな定式化を試みる。以下の考察では北太平洋を仮想的に、内部領域と西岸境界域に分けて考える。前者は主に風と海底地形によって駆動され、後者は主に前者からの流入出によって駆動される。すなわち、今考えている時間スケールでは西岸境界域から内部領域への影響は無視できるものとし、内部領域の流れは風と海底地形によって駆動され既知のものとする。西岸境界域の状況は以下のように質量と渦度のバランスによって求める。順圧流量は非発散であるから流線関数 Ψ が導入される。上下層の運動方程式をフラックス形に書き直し和を取り、図 1 左図の経路 $A E F B$ に従って線積分すると、時間変化項・非線形項・外力項を無視する近似を用いて、海峡における順圧流量を表す島の周りの流線関数 Ψ_I は

$$\Psi_I = \frac{f_N \Psi_F - f_S \Psi_E}{f_N - f_S} + \frac{1}{f_N - f_S} \int_E^F f(h_1 \mathbf{u}_1 + h_2 \mathbf{u}_2) \cdot (\mathbf{k} \times dt) \quad (1)$$

と表される。ここで添字 E, F は図中の E 点 F 点における値を示し、 dt は積分経路上の微小ベクトル、 \mathbf{k} は鉛直単位ベクトルである。右辺は全て内部領域の量であるから既知。上層流量は非発散ではないため、ムシル海峡の上層の流量 T_K と北ウルフ水道の上層の流量 T_B の二つの変数を陽に求めなければいけない。そのためには図 1 右の積分経路をとる。未知数は T_K, T_B に加え T_S, T_N の計 4 であるから 4 つの式が必要である。積分経路 C_1, C_2, C_3 上での流量保存式の積分と C_2 上での運動方程式の積分 $q_N T_N - q_S T_S + \int_R^Q f \mathbf{u}_1 \cdot (\mathbf{k} \times dt) = 0$ で得られる。なお順圧の場合と同様に、時間変化項・非線形項・外力項は無視してある。結果は

$$T_K = \int_Q^P h_1 \mathbf{u}_1 \cdot (\mathbf{k} \times dt) - \frac{1}{q_N - q_S} \int_R^Q (q_S h_1 - f) \mathbf{u}_1 \cdot (\mathbf{k} \times dt) \quad (2)$$

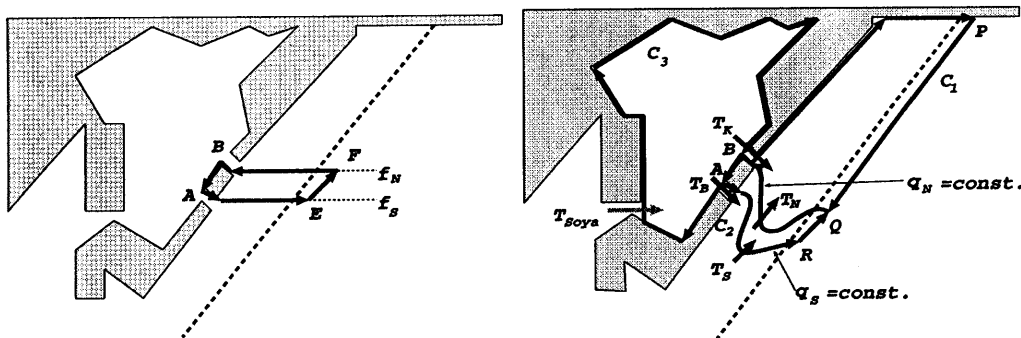


図 1: 順圧流量を求める積分経路 (左) と上層の流量を求める積分経路 (右)。点線は仮想的な内部領域と西岸境界域を分ける境界。

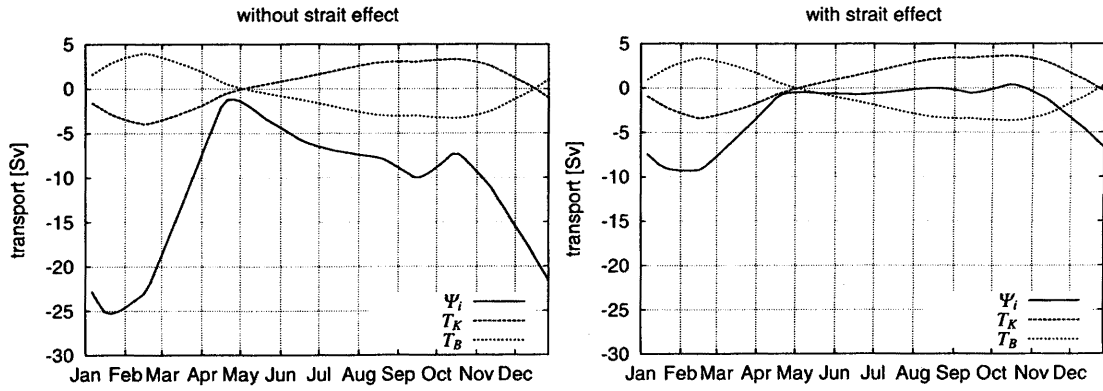


図 2: 左図は海峡における潮汐と海底地形の効果のない場合の順圧流量、ムシル海峡上層流量、北ウルップ水道上層流量。右図は効果のある場合。

$$T_B = -T_K \quad (3)$$

となる。

内部領域としては緯度経度 0.5 度の格子間隔を持つ二層モデルを 80 年間気候値の風で駆動した結果を用いた。西岸境界域の力学バランスから東経 151 度北緯 40 度から東経 171 度北緯 60 度を結ぶ線を西岸境界部と内部領域を分割する線とした。渦位の値 q_N, q_S は気候値から $q_N = 2.8 \times 10^{-7}, q_S = 2.6 \times 10^{-7} [\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}]$ と定め、その値を用いて P, Q, R の各点の位置を求めた。以上の値を (1)(2)(3) の右辺に用いて得られた 1999 年の結果を図 2 左に示す。上層の流れ T_K, T_B に注目すると、従来の水塊分析などによる見積りでは一年を通じてムシル海峡からオホーツク海に北太平洋水が流入し北ウルップ水道からオホーツク水が流出していると思われていたが、夏期の間はそれが逆転していることが示されている。この結果は我々の観測結果とも一致する。一方、順圧流量 Ψ_I は海峡における潮汐と海底地形の効果の無い場合は 20 Sv を越え、過去の様々な見積りより大きすぎる事が分かる。これは (1) の導出に際して無視した項のなかで無視すべきではない項があったことを意味する。時間変化項・非線形項・風応力が小さいことはモデルの結果の解析からも分かるが、海底地形項（底圧力トルク項）摩擦項（水平拡散）は無視できないことがオーダー見積りから分かる。以下では、海峡部におけるこの二つの項の効果を積分則に取り入れることを提唱する。前述のように海峡においては潮汐流が無視できないため、潮汐流の入った考察を行う。

二層の水平鉛直二次元の流れで、小さな海底地形 $b(x)$ を越える順圧潮汐流 $U(t)$ によって発生する応答を支配する方程式は、

$$(\partial_t + U_1(t)\partial_x)u_1 = -\partial_x p + A\partial_x^2 u_1$$

$$\begin{aligned}
-(\partial_t + U_1(t)\partial_x)\eta + H_1\partial_x u_1 &= -A\partial_x^2\eta \\
(\partial_t + U_2(t)\partial_x)u_2 &= -\partial_x p - g'\partial_x\eta + A\partial_x^2 u_2 \\
(\partial_t + U_2(t)\partial_x)\eta + H_2\partial_x u_2 &= A\partial_x^2\eta + U_2(t)\partial_x b
\end{aligned}$$

である。ここに H_i は潮汐が無いときの各層の厚さ、 u_i は流速変動、 η は密度界面の変位、 p は蓋有り近似での順圧圧力、 g' は有効重力である。とくに $U_i = U_{Si} + U(t)$ であり、 U_{Si} は潮汐が無いときの各層の流れ、 $U(t)$ は潮汐による時間変化する順圧な往復流である ($i = 1, 2$ はそれぞれ上層下層)。観測からも分かるように、実際の海峡では内部衝撃波や碎波といった非線形性の卓越する現象が生じているが、それらの効果をこの線形モデルでパラメタ化した項が $A\partial_x^2$ を含む項である。係数 A は運動量と質量に対し同一と仮定する。以上の式をフーリエ変換とラプラス変換によって解くことで海峡の流れの解析的表現を得る。これらの式を特性曲線形式に書き直すと、外力が時空間に非一様に分布するため長時間平均を取っても残差流が存在することが示される。

この局所的な海峡の効果を大洋スケールの積分則に組み込むため、潮汐の時間スケール (\sim 日) は積分則の時間スケール (\sim 数か月) に比べて十分小さいため前者の時間平均 (すなわち残差流) が後者に影響を与える、と仮定する。具体的には、拡散項と海底地形項に現れる各層の流速は $U_{Si} + U(t) + u_i$ と表現される。第一項は長い時間スケールで変動する (短い潮汐時間スケールでは定常) 成分、第二項は潮汐スケールで振動する往復流、第三項が応答である。これらの潮汐スケールの長時間平均を取ると第一項と第三項の時間平均 (残差流) が残り、これが積分則に影響を与える。定常流 U_{Si} は、海峡断面を長方形で近似して流量を海峡幅と層厚で割れば得られる。残差流は U_{S1}, U_{S2} の関数であるから海峡における地形 $h(x)$ 、海峡幅 W 、基本成層 H_1, H_2 、潮汐流 $U(t)$ を与えれば (1+ 拡散項・海底地形項)(2+ 拡散項) (3+ 拡散項) の三式に対し未知数が Ψ_I, T_K, T_B であり、問題が閉じることになる。図 2 右によると、上層流量はほとんど変化を受けないのに対し順圧流量が大きく減少していることが分かる。つまり海峡における潮汐と海底地形の効果は下層の流れを妨げるように働く。

また、NCEP の再解析風応力を用いた計算では、図 2 の様に上層流の向きが夏冬で逆転する年 (1998、1999 年等) と逆転しない年 (1993 年から 1997 年等) が存在するといった、顕著な経年変動があることが示された。