

論文内容の要旨

論文題目

The Influence of Bottom Topography on Seasonal Variation of the Western Boundary Current — Energetics of JEBAR —

〔 西岸境界流の季節変動に及ぼす海底地形の影響 — JEBAR のエネルギー論 — 〕

氏名 梅津 功

1 背景

代表的な西岸境界流である黒潮の流量季節変動は、Sverdrup 流量変動に比べて著しく小さいことが知られている（例えば Isobe and Imawaki 2002, 図1）。Kagimoto and Yamagata (1997) は現実的な海底地形を組み込んだ GCM により、PN 線と 25 ° N 線を通過する流量の季節変動を再現した。一方、Sakamoto and Yamagata (1996) は、2 層プラネタリー地衡流(PG)モデルに理想化された大陸斜面を導入し、「傾圧性と海底地形の相互効果」(JEBAR)によって変動幅の縮小を説明できることを示した。さらに、冬に蓄えられたポテンシャルエネルギー(PE)が夏に運動エネルギー(KE)として解放されることを示唆した。

JEBAR は局所鉛直モード展開による解釈 (Anderson and Corry 1985) に代わる新しいパラダイム構築の可能性を秘めている。しかし、JEBAR の概念の有用性は十分に理解されているとはいえない (Cane et al. 1998)。それゆえ、多方面から JEBAR の本質をさらに掘り下げる必要がある

2 目的

本研究は 2 層 PG モデルを用いて、JEBAR のエネルギー論を展開することが大きな目的である。特に、エネルギー変換に注目して、数値実験結果のエネルギー収支解析と理論的考察を行い、海底地形が西岸境界流に及ぼす影響を次の点を目標に追究する。

- ・エネルギー論的立場からの JEBAR の定式化とその解釈
- ・エネルギー変換のメカニズムの解明
- ・輸送量の季節変動特性を支配する海底地形の特定

以下にその成果を要約して示す。

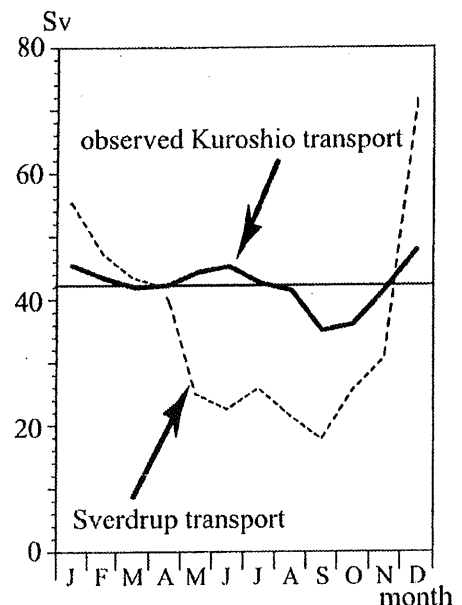


図 1: 観測された黒潮流量と Sverdrup 流量の季節変動。

3 PG 方程式と 2 種類のエネルギー方程式

3.1 PG 方程式

本研究では、現象が Sverdrup スケールであることに着目して、Planetary Geostrophic 方程式を採用する。次の式が出発点となる。

$$fk \times \mathbf{v}_i = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p_1 + \delta_{2i} g' \nabla h_1 + \delta_{1i} \frac{\boldsymbol{\tau}}{\rho_0 h_1} - r \mathbf{v}_i$$

$$h_{ii} + \nabla(h_i \mathbf{v}_i) = 0$$

3.2 通常のエネルギー方程式

通常の運動方程式から求められるエネルギー方程式は次のとおりである。

$$0 = W_p + C_{pk} + \boldsymbol{\tau}^x u_1 - 2r(K_1 + K_2)$$

$$\Phi_i + \nabla \cdot \mathbf{S} = -C_{pk} \quad (1)$$

$$K_i = \frac{1}{2} \rho_0 h_1 |\mathbf{v}_i|^2 : \text{KE 密度}, \quad \Phi = \frac{1}{2} \rho_0 g' h_1^2 : \text{PE 密度},$$

$$\mathbf{S} = \rho_0 g' h_1^2 \mathbf{v}_1 : \text{PE フラックス}, \quad W_p = -\mathbf{V}_B \cdot \nabla p_2 = -\nabla \cdot (p_2 \mathbf{V}_B) : \text{下層圧力による仕事}$$

$$C_{pk} = -\mathbf{v}_1 \cdot \nabla \Phi : \text{PE から KE への変換率}, \quad \mathbf{V}_B = \mathbf{v}_1 h_1 + \mathbf{v}_2 h_2 : \text{順圧輸送量}$$

通常のエネルギー方程式 (1) を全計算領域で平均すると、

$$0 = \langle C_{pk} \rangle + \langle \boldsymbol{\tau}^x u_1 \rangle - \langle 2r(K_1 + K_2) \rangle$$

$$\langle \Phi_i \rangle = -\langle C_{pk} \rangle \quad (2)$$

となる。この定式化では、エネルギー変換と輸送量との関係や、海底地形の効果はわかりにくい。

3.3 新しいエネルギー方程式

順圧輸送量 \mathbf{V}_B に注目して展開したエネルギー方程式は次のとおりである。

$$0 = W_p + A + \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{V}_B / H - 2rK_B$$

$$\Phi_i + \nabla \cdot \mathbf{S} = -A - A_C$$

$$A = -(\mathbf{V}_B \cdot \nabla \Phi) / H = -[\nabla \cdot (\Phi \mathbf{V}_B)] / H \quad (3)$$

$$A_C = C_{pk} - A$$

$$K_B = \rho_0 \mathbf{V}_B^2 / 2H : \text{順圧 KE 密度}$$

A は PE から順圧 KE への変換率を表す。(3)を全計算領域で平均すると、

$$0 = \langle A \rangle + \langle \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{V}_B / H \rangle - \langle 2rK_B \rangle$$

$$\langle \Phi_i \rangle = -\langle A \rangle - \langle A_C \rangle \quad (4)$$

$$\langle A \rangle = -\langle [\nabla \cdot (\Phi \mathbf{V}_B)] / H \rangle$$

となる。(4)では JEBAR が陽に表現されている。特に、 $\langle A \rangle$ はエネルギー方程式における JEBAR 項と解釈できる。

4 モデル

モデル海域は6000 km×2000 kmの矩形領域であり、上層、下層の厚さはそれぞれ1000 m、3000 mである。亜熱帯の風系を模した緯度分布の風応力を与え、冬に最大、夏にゼロとなるように時間変化させた。他のパラメータにも亜熱帯循環に典型的な値を与えた。海底地形は緯度によらない Gauss 型とし、海嶺の位置・幅・高さに対する依存性、海溝と大陸斜面の影響、現実的な海底地形の場合について調べた。

5 結果と考察

計算結果の輸送量(図 2)を見ると、平坦な海底の場合、輸送量は風応力に対応して冬に最大、夏にゼロとなる。一方、海嶺が存在する場合、夏でも海嶺上で順圧流が励起されるので輸送量が存在する。このように傾圧性と海底地形があれば、外力がなくとも輸送量が存在しうることがわかる。これと冬の地形性ベータ効果とを合わせて、輸送量の季節変動が小さくなる。ここまでは渦度の力学によっても理解できる(Sakamoto and Yamagata 1996)。今回初めて行われたエネルギー収支解析からは、 $\langle Cpk \rangle$ が夏に正、冬に負となり、輸送量変動幅縮小と符合していることが確認された(図 3)。 $\langle A \rangle$ を見ると、海底地形の違いによる季節変動の仕方の相違がより明瞭である。

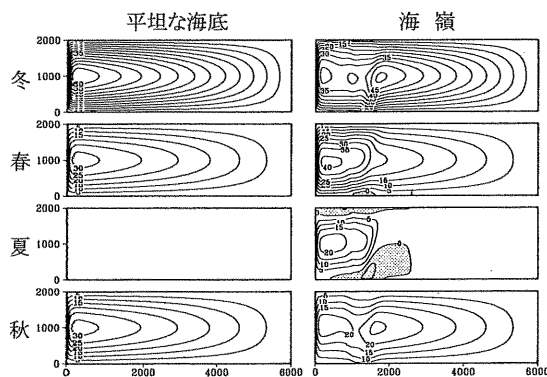


図 2: 順圧輸送量に関する流線関数。
海嶺軸は西岸から1000 kmの位置にある。
コンター間隔は5 Sv。

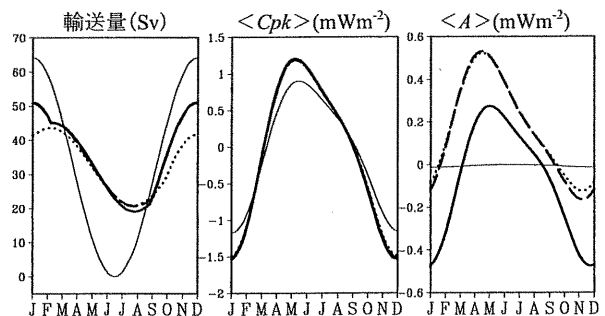


図 3: 順圧輸送量、 $\langle Cpk \rangle$ 、 $\langle A \rangle$ の季節変動。
細実線:平坦海底、太実線:海嶺、点線:大陸斜面+海嶺+海溝1、
破線:大陸斜面+海嶺+海溝2。海溝1=幅大、西岸からの距離
2000 km。海溝2=幅小、西岸からの距離1400 km。

Wp 、 Cpk 、 A の水平分布を比較すると(図 4)、これらが海嶺付近でバランスしており、かつ冬と夏とで符号が反転している。また、 A は Cpk よりも Wp とのバランス度が高い。したがって、JEBARと密接に関係しているエネルギー変換 A の季節変動のメカニズムを理解するためには Wp の力学に注目すればよい。海嶺が存在すると、下層の圧力勾配が東西成分をもつようになり、東西成分の大きい V_B に対して仕事をなす。順圧調節は傾圧調節に比べてはるかに早い(PGでは瞬時)ので、下層の流れと ∇p_2 は夏と冬とで向きが逆転し、これに対応して Wp の符号も反転する(図 5)。 Wp と A の局所的等価性により、エネルギー変換の向きも冬と夏とで反転することがわかる。実際、上層と下層の流速分布を調べたところ、上層ではつねに高気圧性の循環が見られるのに対し、下層の循環は、冬に高気圧性、夏に低気圧性になっていることが確認できた。

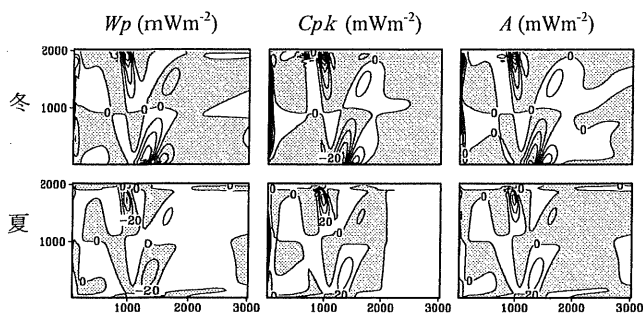


図4: W_p 、 C_{pk} 、 A の水平分布。コンター間隔は 20 mWm^{-2} 。影の部分は値が負の領域。

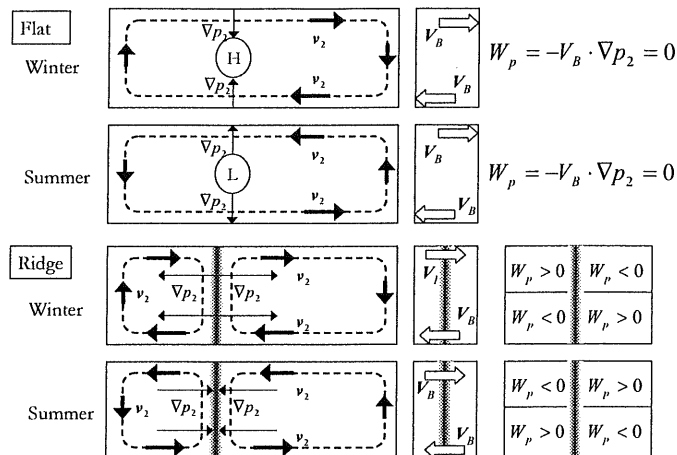


図5: 下層の流れ(破線)、下層圧力勾配の向きを示す模式図。 V_B は東西成分が卓越していると考え、圧力勾配力が V_B になす仕事 W_p の符号も示す。

海嶺が西岸に近く、幅が広く、高さが増すほど、エネルギー変換率の季節変動は増幅され、輸送量の季節変動は抑制されることがわかった。海嶺の代わりに同じ規模の海溝を設けた場合、海溝は海嶺と同じ役割を担うこと、すなわち、JEBAR は起伏の向きに依存しないことがわかった。大陸斜面が存在する場合、夏の PE→KE の解放が顕著であった。現実的な地形を設けた場合(図3)、輸送量の季節変化はもっとも抑制され、エネルギー変換も強調される。また、冬の KE→PE 変換には海嶺が、冬の PE→KE 変換には大陸斜面が支配的であることもわかった。

6 まとめ

本研究で得られた知見を以下に箇条書きで示す。

- ・新しいエネルギー方程式(3)、(4)は、PE と輸送量を直接結び付けているので、通常エネルギー方程式(1)、(2)に比べて、海底地形が輸送量の季節変動に及ぼす効果を理解するのに適している。
- ・エネルギー収支解析を行い、海底地形が PE↔KE 変換を促進すること、及びその向きが夏と冬で逆転することを確認した。
- ・このエネルギー季節反転が、下層の圧力勾配力のなす仕事の反転と局所的に等価であることを簡単な理論的考察により示した。後者は全領域で平均すると消えるため、大域的な効果としてエネルギー変換が現われる。これがエネルギー論から見た JEBAR にほかならない。
- ・海嶺が冬の KE→PE 変換に、大陸斜面が夏の PE→KE 変換に大きく寄与している。したがって、現実的な海底地形は季節変動をさらに抑制する。
- ・JEBAR は局所鉛直モード展開によらない普遍的な概念であり、海洋循環変動の大域的な理解に有効である。