

論文の内容の要旨

論文題目 Thermodynamics of the oceanic general circulation:
 entropy increase rate of a fluid system
 (海洋大循環の熱力学：流体系のエントロピー生成率)

氏名 下川信也

1. はじめに

海洋系は熱フラックス・塩分フラックスを通してその外系とつながっている開放散逸系と考えることができる。開放散逸系のエントロピー生成率はその系の安定性と関係していることが知られている。その考え方にはエントロピー生成率最小の原理 (Gransdorff and Prigogine, 1964) とエントロピー生成率最大の原理(以下、MEP, Sawada, 1981)の2つがある。非平衡度及び非線形度の高い系においては後者が成立している可能性を示すいくつかの証拠がある。例えば、Paltridge(1975)は気候系において水平熱輸送に伴うエントロピー生成率が最大となる状態で安定となっている可能性を示した。しかし、海洋系について MEP を検証した研究はまだない。その海洋系には同一境界条件下の多重解が存在することが知られている (Stommel, 1961)。しかし、その多重解間の遷移のメカニズムについてはよくわかっていない。また、流体力学の分野では、いわゆる乱流の最大輸送説が知られている(乱流シアフロー Malkus, 1954; ベナール型熱対流 Busse, 1970)。しかし、これらの物理的意味についてはよくわかっていない。我々はこれらの問題に対して熱力学的な視点からのアプローチを試みた。本研究の目的は、

- ・大規模な開放散逸系 (海洋系) とその外系における熱と物質 (塩分) の輸送に伴うエントロピー生成率を計算する方法を開発すること
- ・その方法を海洋大循環モデルに適用することによって、海洋大循環系のエントロピー生成率を評価し、海洋系の多重解間の遷移において MEP を検証すること
- ・その方法と従来のローカルな散逸に基づくエントロピー生成率の計算方法を結びつけることによって、乱流の最大輸送説と MEP の関係を調べること

の3つである。

2. 開放散逸系のエントロピー生成率

海洋系とその外系の熱と塩分の輸送によるエントロピー生成率 \dot{S} (グローバル表現) は、非圧縮及び単位体積あたり熱容量が一定であると仮定すると、次のようになる。

$$\dot{S} = \int \rho c / T \partial T / \partial t dV + \int F_h / T dA - \alpha k \int \partial C / \partial t \ln C dV - \alpha k \int F_s \ln C dA \quad (1)$$

S はエントロピー、 ρ は密度、 c は定積比熱、 T は温度、 F_h は海表面での外向き熱フラックス、

α は塩分イオンの解離の効果 (=2)、 k はボルツマン定数、 F_s は海表面での外向き塩分フラックス、 V は海洋の全体積、 A は海表面の全面積を表す。右辺第一項は海洋系の熱輸送によるエントロピー増加率、第二項は外系の熱輸送によるエントロピー増加率、第三項は海洋系の塩分輸送によるエントロピー増加率、第四項は外系の塩分輸送によるエントロピー増加率を表す。この合計が全系の熱と塩分の輸送によるエントロピー生成率となる。この方法は、大循環モデルで表現できないようなミクロな物理過程を直接的には含んでいないので、大循環モデルにも適用することができる。

3. 数値モデルと実験方法

使用した海洋大循環モデルは GFDL の MOM ver.2 である。モデル領域は、東西 72 度、南北 140 度の大西洋を模した、南極周極流のある矩形海洋である（水平解像度は 4 度、鉛直解像度は 12 層、深さは 4500m 一定）。実験は、次の 3 つの段階に分かれる。

(1) リスト・リング境界条件下でのスピニアップ(5000 年)

(2) 北半球高緯度への塩分の擾乱を含む混合境界条件下での積分(500 年)

(3) その擾乱を取り除いた混合境界条件下での積分(1000 年)

(1) のリスト・リング温度・塩分及び風応力は、緯度のみの関数で赤道対称である。また、初期場は、速度は 0、温度は深さと緯度の関数、塩分は 34.9‰ で一定である。(2) の塩分の擾乱 Δ は、 $2 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で北緯 46 度より北に適用され、淡水フラックスに換算するとおおよそ -0.1 m year^{-1} に相当する。(1) の結果、北沈込をもつ定常状態 (NRBC) に達する。(2) の結果、擾乱によって規定される状態に移る。(3) の結果は、次の 3 つに分かれる；(a) 擾乱によって規定された状態に留まる。(b) 初期状態へ戻る。(c) 擾乱とは独立の別の状態へ移る。結果として、新しい定常状態が得られた場合は、その定常状態を初期状態として(2)と(3)を繰り返す。新しい定常状態が得られなかった場合は、与える擾乱の大きさを変えて(2)と(3)を繰り返す。このような一連の実験により、同一境界条件下での多重解が得られる。

4. 数値実験の結果

上記(1)の実験からは、定常状態では、全系の熱輸送によるエントロピー生成率は $1.9 \times 10^{11} \text{ W K}^{-1}$ 、全系の塩分輸送によるエントロピー生成率は $3.6 \times 10^8 \text{ W K}^{-1}$ であること、及び、外系のエントロピー増加率は熱輸送によるものも、塩分輸送によるものも、ともに正、海洋系のエントロピー増加率は熱輸送によるものも、塩分輸送によるものも、ともにほぼ 0 であることがわかった。これらの結果は、定常状態では、塩分輸送によるエントロピー生成率は熱輸送によるエントロピー生成率に比べて第一義的には無視できること、及び、海洋系の定常的な循環にともなう熱と塩分の輸送によって生成されたエントロピーが海表面を通してすべて外系に排出され海洋系を含む全系を最終的な平衡へと向かわせていることを示す。また、上記(2)と(3)の実験の結果、同一境界条件下での多重解（図 1、3 つの北沈込をもつ定常状態；N1, N2, N3 と 4 つの南沈込をもつ定常状態；S1, S2, S3, S4、NRBC はリスト・リング境界条件下での唯一の定常状態）が得

られた。南沈込間の遷移においては、擾乱の符号に関わらず、常にエントロピー生成率の大きい状態に遷移している (r04, r05, r14, r15)。また、その遷移後の状態に正負の擾乱を与えても、もとのエントロピー生成率の小さな状態に戻ることはない (r08, r09, r18, r19)。これらの結果は、海洋系の非可逆的な遷移を示し、MEP を支持する (図 2)。一方、北沈込から南沈込への遷移においては、エントロピー生成率の小さな状態に遷移している (r12, r13)。ただ、これらの場合には、現状の循環の沈込域に直接その循環を壊すような向きに擾乱が加えられており、その結果現状の循環が完全に崩壊してしまっている。これらの場合においても、循環が崩壊したあとの時間発展においては MEP に矛盾しないことが示される (この点の詳細については、原論文を参照されたい)。

5. MEP と乱流の最大輸送説の統一的解釈

本研究で導出したグローバル表現と従来から知られているローカル表現を結びつけると、エントロピー生成率最大の条件 (定常状態、物質の輸送は無視) は、次のようになる。

$$\dot{S} = \int F/T dA \quad (2a)$$

$$= \int \mathbf{F} \cdot \text{grad}(1/T) dV + \int \Phi/T dV = \text{Max.} \quad (2b)$$

ここで、 F は境界での外向き熱輸送、 \mathbf{F} は熱の輸送フラックス、 Φ は散逸関数、(2b) の右辺第一項は熱伝導によるエントロピー生成率、第二項は粘性散逸によるエントロピー生成率を表す。ここで、ベナール型熱対流における熱輸送 F が最大の条件は (2a) の右辺の F が最大の場合に対応し、乱流シアフローにおける運動量輸送 τ が最大の条件は (2b) の右辺の $\Phi (= \tau \Delta U)$ が最大の場合に対応する。以上から、MEP は乱流の最大輸送説を含んだ、より汎用性の高い概念であることがわかる。

6. 今後の展望

以上、考察してきたように、MEP は、非常に汎用性の高い概念であると考えられる。しかし、一方で、MEP の背後にある物理的な意味は必ずしも明確ではなく、現在までに得られている MEP に対するサポートはすべて経験的あるいは実験的なものである。この点にはさらなる研究が必要と思われる。

参考文献：

- Busse, F. H. 1970. *J.Fluid.Mech.* 41, 219-240.
 Gransdorff, P. and I. Prigogine 1964. *Physica* 30, 351-374.
 Malkus, W. V. R. 1954. *Proc. Roy. Soc. London A* 225, 196-212.
 Paltridge, G. W. 1975. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 104, 927-945.
 Sawada, Y. 1981. *Prog. Theor. Phys.* 66, 68-76.
 Stommel, H. 1961. *Tellus* 13, 224-230.

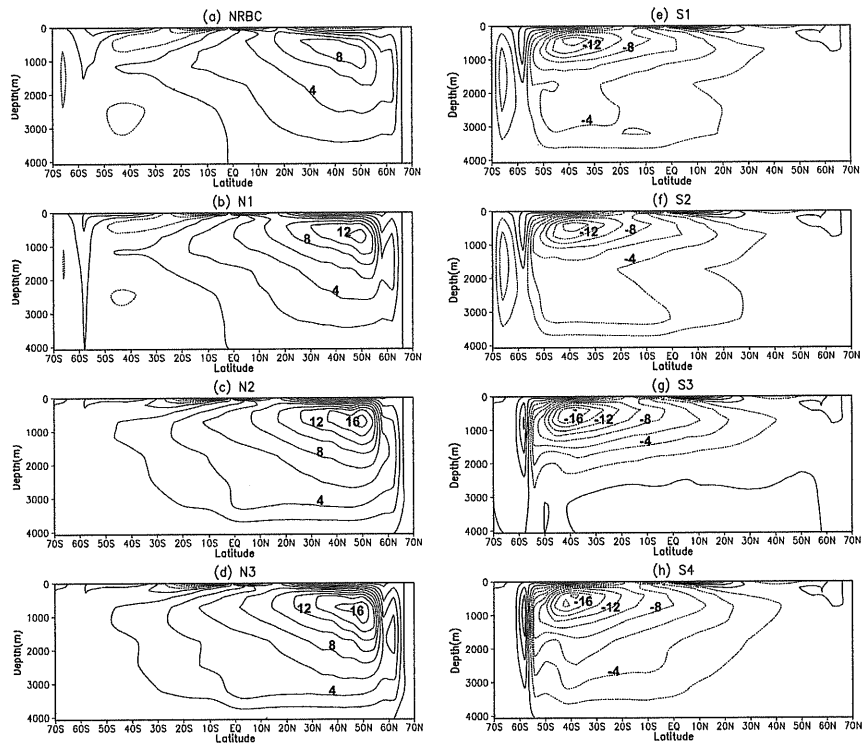


図 1 同一混合境界条件下での多重解 (子午面平均流線関数)。(a)NRBC, (b)N1, (c)N2, (d)N3, (e)S1, (f)S2, (g)S3, (h)S4。コンター間隔は $2SV(10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1})$ 。

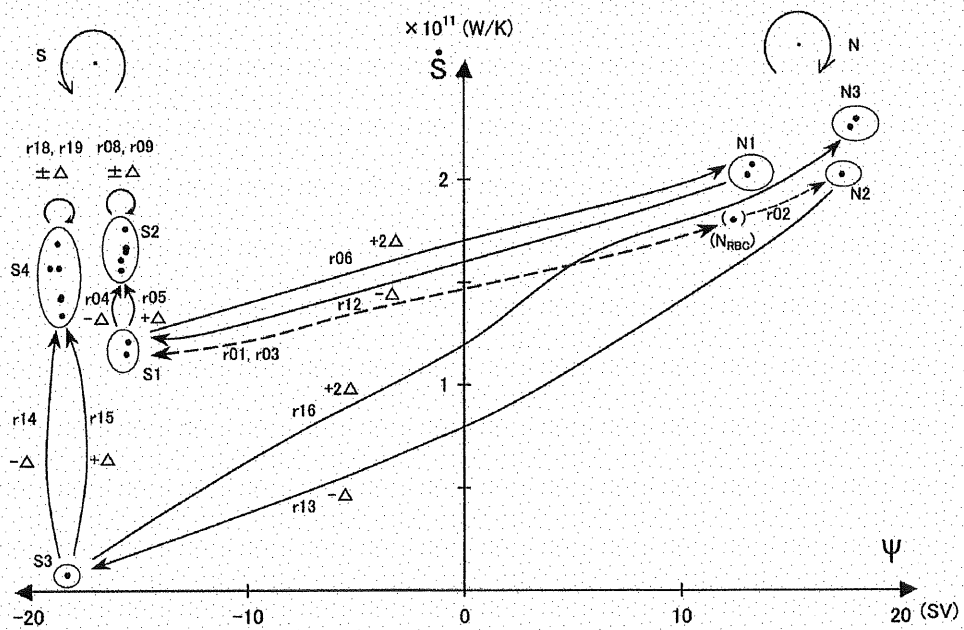


図 2 遷移実験のまとめ。縦軸はエントロピー生成率、横軸は子午面平均流線関数の最大値。点は各実験の遷移前と遷移後の定常状態、矢印は遷移の方向、矢印の側の記号は実験番号と与えた擾乱。