

海洋大循環の熱力学：エントロピー生成率の高い状態への非可逆的遷移

Irreversible transition to a state with higher entropy production in the oceanic general circulation

下川 信也[1]; 小澤 久[2]

Shinya Shimokawa[1]; Hisashi Ozawa[2]

[1] 防災科研; [2] 広島大・総合科学

[1] NIED; [2] Dept. Natural Env. Sci., Hiroshima Univ.

海洋循環は同一境界条件下の多重解をもつことが知られている (ref.1)。しかし、それらのうち現実にとどのような解が選ばれるか、それらの間の遷移はどのように起こるかといったことはよくわかっていない。一方、開放散逸系においてエントロピー生成率は、その系の安定性と関係することが知られている。例えば、MEP (エントロピー生成率最大の仮説) は、非線形非平衡系は最大エントロピー生成率をもつ状態で安定化することを主張する (ref.2)。しかし、海洋系について MEP を検証した研究はまだない。この研究の目的は、海洋大循環モデルを使って、海洋循環の多重解間の遷移について MEP を検証することにある。

本研究で使用した数値モデルは GFDL の MOM である。モデル領域は大西洋を模した周極流をもつ矩形海洋である。実験は3つの手順からなる (ref.3): (a) リストーリング境界条件下での 5000 年間の積分 (スピンアップ)、(b) 塩分の擾乱を与えた混合境界条件下での 500 年間の積分、(c) 擾乱を取り除いた混合境界条件下での 1000 年間の積分。これらの手順の結果、もし新しい定常状態が得られたならば、その定常状態を初期値として手順 (b) と (c) を繰り返す。もし新しい定常状態が得られなかったならば、塩分の擾乱の符号や大きさを変えて手順 (b) と (c) を繰り返す。結果として、一連の同一境界条件下の多重解が得られる。標準の塩分の擾乱 (図1参照) は、 $0.0000002 \text{ kg/m/m/s}$ ($= -0.1 \text{ m/year}$ 淡水フラックス換算) で、北緯 46 度より高緯度に与えられる。

エントロピー生成率は次のように計算される (I は積分、 d' は偏微分): $dS/dt = I[rc/T d'T/d't] dV + I[Fh/T] dA - ak I[d'C/d't \ln C] dV - ak I[Fs \ln C] dA$ 、ここで、 r は密度、 c は定積比熱、 T は温度、 $a=2$ は塩分のイオン解離度 (Na^+ と Cl^-)、 k はボルツマン定数、 C は海水の単位体積当たりの塩分の数密度、 Fh と Fs は単位表面積当たりの熱と塩分のフラックス (外向きを正) を表す。この式は全系のエントロピー増加率を表す (ref.4)。

実験の結果は図1に要約されている。S3 からスタートすると、擾乱の符号に関わらず、系は S4 に遷移する ($r14$ 及び $r15$)。一方、S4 からスタートすると、擾乱の符号に関わらず、系は S3 に戻らず、初期値である S4 に留まる ($r18$ 及び $r19$)。同様の傾向が S1 と S2 の間の遷移にも見られる。これらの遷移が起こったとき ($r04$, $r05$, $r14$ 及び $r15$)、最終状態のエントロピー生成率は初期状態のエントロピー生成率よりも常に大きい (図1)。これらの結果は、遷移はエントロピー生成率が増加する方向について非可逆であり、MEP を支持していることを示す。一方、北沈込 (N1 及び N2) からスタートして負の擾乱を与えたとき ($r12$ 及び $r13$) には、系はより小さなエントロピー生成率をもつ南沈込 (S1 及び S3) に遷移する。これらの結果は MEP に反しているように見える。しかし、このエントロピー生成率の減少は、塩分の負の擾乱が沈み込み域に与えられ初期の循環を完全に破壊してしまったときに限られることを示すことができる (ref.3)。また、初期の循環が破壊された後、新しい循環の発達に伴って、エントロピー生成率が増加することも示される。以上の結果はすべて MEP を支持している。

参考文献: 1) Stommel, H. (1961) *Tellus*, 13, 224-230., 2) Sawada, Y. (1981) *Prog. Theor. Phys.*, 66, 68-76., 3) Shimokawa, S. and H. Ozawa (2002) *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 128, 2115-2128., 4) Shimokawa, S. and H. Ozawa (2001) *Tellus*, A53, 266-277.

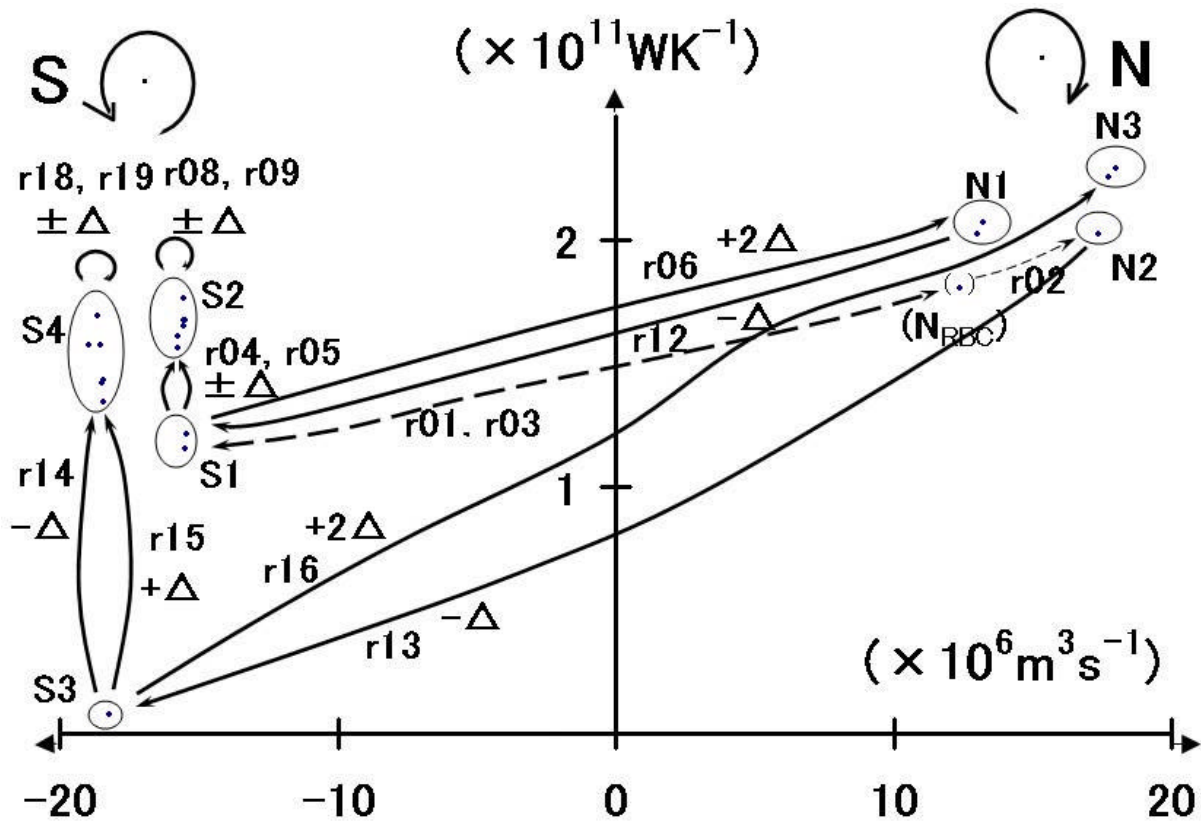


Fig.1. The relationship between transitions among multiple steady states and rates of entropy production. The vertical axis (S) indicates the rate of entropy production, and the horizontal axis (Ψ) shows the maximum value of the zonally integrated meridional stream function for the main circulation. The dots are corresponding to the steady states (initial and final states) of each experiment. The circles surrounding the dots show the circulation pattern (e.g. N1). The arrows show the direction of the transitions. The symbols besides the arrows show the experiment number and the perturbation used in the experiment (e.g. r04 and $-\Delta$).