

温暖化に対する熱塩循環の長期応答と大気水蒸気輸送の役割：理論的考察

* 村上茂教・鬼頭昭雄・行本誠史・野田彰 (気象研究所気候研究部)

はじめに

2003年度春季大会 (P445) においても報告したように、大気海洋結合モデルによる温暖化実験において、多くのモデルが大西洋熱塩循環の弱まりを予測しており、そのメカニズムとモデル間の相違を明らかにするための実験 (CMIP Coordinated Experiments) が結合モデル相互比較実験 (CMIP) のサブプロジェクトの一つとして行われている。気象研究所も現時点での結合モデルの最新版 (MRI-CGCM2.3) を用いてこの相互比較に参加しているが、春季大会のポスターでも報告したように、気象研モデルによる実験結果には非常に興味深い点が見つかりました。それは、幾つかの実験ランの後半における熱塩循環の回復と高緯度側海水塩分濃度の増加であった。温暖化に伴う気温上昇は大気中の水蒸気量を増加させ、水循環を活発化することにより高緯度側に供給される淡水量を増加させるという常識から考えると、温暖化による大西洋高緯度塩分濃度の増加は一見直感に反する結果のようにも思える。そこで我々は、こうしたモデルの応答のメカニズムを探るために、簡単ボックスモデルを用いた理論的考察を行った。ここでは、その結果を紹介する。

ボックスモデルを用いた考察

考察に用いたのは Rahmstorf (1996) で導入された 4-box モデルである。このモデルは、南半球を含む大西洋低緯度を表すボックス 1、大西洋高緯度を表すボックス 2、及び大西洋中緯度表層を表すボックス 3 と同深層を表すボックス 4 の四つのボックスから構成され、大気等によるボックス間の水蒸気輸送のパターンにより、このモデルが生み出す熱塩循環の平衡解には次の二つの駆動モードが存在する (ただし、熱塩循環の方向は高緯度側のボックス 2 で沈み込が起るタイプのものに限定する)。

1) 熱塩駆動モード：高緯度側の海水が低緯度側の海水より相対的に冷たくかつ塩分濃度の高いことにより循環が起る。海水の南北温度差及び塩分濃度差は共に高緯度側の海水の密度を高め、循環を強める働きをしている。

2) 熱駆動モード：高緯度側の海水は低緯度側より塩分濃度が低いが、そのことより高緯度側の海水温が冷たいことの効果の方が勝って循環が起る。海水の温度差は循環を強める働きをするが、塩分濃度差は循環を弱める働きをする。

これらの二つのモードは、モデルの平衡解における南北温度差 $\Delta T = T_2 - T_1$ と南北塩分濃度差 $\Delta S = S_2 - S_1$ の具体的表現を、循環の強さ q を決定する関係式

$$q = k\Delta\rho = k(\beta\Delta S - \alpha\Delta T)$$

に代入して得られる方程式

$$q^2 = k\beta S_0 F - qk\alpha\Delta T$$

Atlantic THC regime diagram

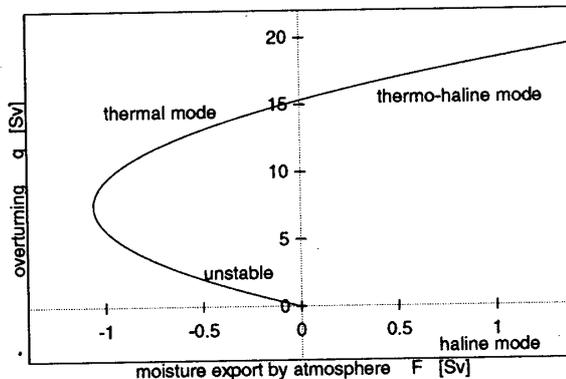


図 1: 熱塩循環のレジームダイアグラム

を考察することから得られ、解の状況はしばしば図 1 のレジームダイアグラムにより表現される。ここで、 F は中緯度を表すボックス 3 から低緯度を表すボックス 1 への大気等による水蒸気輸送量を表しており、その正負により熱塩循環の前述の二つのモードが決まる (S_0 は全平均塩分濃度)。考察の詳細は省略するが、結果は、ボックスモデルから得られる熱塩循環の描像のうち、「温暖化による大気側の水蒸気輸送の増大に対する最終平衡応答として、高緯度側での塩分濃度が増大するのは、熱塩循環の駆動モードが熱塩駆動モードにある場合に限る」というものであった。従って、CMIP Coordinated 実験における気象研モデルの結果は、我々のモデルの熱塩循環が熱塩駆動モードにあることを物語るものに他ならない。

結論

気象研結合モデルの現在気候における大西洋熱塩循環は Rahmstorf の 4-box モデルの描像に基づけば、熱塩駆動モードにある。この場合、温暖化に対する最終平衡応答としては、高緯度側の塩分濃度が現在より上昇し、かつ、場合によっては熱塩循環が現在より強くなるのが起こり得る。一方、熱塩循環が熱駆動モードにある場合には高緯度側の淡水供給量増加による短期的応答と長期応答とは一致し、熱塩循環は現在より弱い状態で平衡する。この結論は気象研結合モデルで用いられている淡水フラックス補正には (本質的に) 影響されない。ハドレーセンターのモデル (Thorpe et al. 2001) 等、他のモデルグループによる幾つかの実験における応答は、それらのモデルの熱塩循環が熱塩駆動モードにあることを示唆しており、Rahmstorf らの主張とは異なり、現実の大西洋熱塩循環は熱塩駆動モードにある可能性が高い (これは、海盆間の水蒸気輸送という観点から見れば、大西洋は他の海盆に水蒸気を輸出しているという見方と一致する)。ここでの帰結は更に、Stoufer and Manabe (2003) の超長期積分における熱塩循環の回復を合理的に説明する。