

海洋前線帯上の鉛直流形成に対する力学的・熱力学的寄与

宮坂貴文・中村 尚（東京大学先端科学技術研究センター）

1. はじめに

西岸境界流は低緯度の暖水の中緯度へ運び、そこで膨大な熱が大気へ受け渡されるため、中緯度の気候循環に影響を及ぼすことが指摘されてきた。Minobe et al. (2008; 2010) は北大西洋の湾流上に下層大気の収束と非断熱加熱が偏在化される傾向にあり、上昇流もまた湾流上に極大を持つことを指摘した。

しかし、中緯度の暖流は海洋前線帯を形成し、それに伴う強い南北温度勾配は下層大気の傾圧性の形成・維持を通じて移動性擾乱活動を活発化される働きがある。移動性擾乱は乾燥力学によっても鉛直流を形成する働きがあることを考えると、海洋前線帯付近の鉛直流形成について非断熱加熱にのみ着目するのは妥当では無く、乾燥力学との相対的な重要性について踏み込んで考察するべきである。

そのため、本研究では移動性擾乱活動が活発な冬季について、準地衡オメガ方程式に基づく診断により、非断熱加熱と乾燥力学による鉛直流形成に対する相対的な重要性について議論する。

2. 手法

ERA-interim 再解析の 6 時間データを用いた。水平解像度は 0.75 度で、2008 年 12 月から 2009 年 2 月を解析対象期間とした。移動性擾乱を本研究では 5.25 日移動平均からの偏差で定義した。

鉛直流を力学的に診断するため、準地衡オメガ方程式を用いた。次式の右辺第 1 項は非断熱加熱に伴う項で、右辺第 2～3 項を乾燥

過程に伴うものと本研究では表記する。

$$\left(\nabla_h^2 + \frac{f^2}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2}\right) \omega = \frac{1}{\theta_p} \nabla_h^2 \left(\frac{J}{c_p} \left(\frac{p_{00}}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \right) + \frac{1}{\theta_p} \nabla_h^2 (-\mathbf{v}_g \cdot \nabla_h \theta) - \frac{f}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} (-\mathbf{v}_g \cdot \nabla_h (f + \zeta_g))$$

移動性擾乱に伴う典型的な循環偏差場を抽出するため、ラグ合成図解析を行った。700 hPa 南北風の移動性擾乱成分が極大を持つ時刻に基づいた 20 例を合成した。

3. 季節平均鉛直流

北大西洋の海洋前線帯上の 700 hPa での鉛直 p 速度は、海洋前線の南側上で顕著な上昇流、北側上で弱い下降流が見られる（図 1a）。準地衡オメガ方程式は下降流を過大評価気味ではあるが概ね観測を再現することが確認でき（図 1b）、非断熱加熱と乾燥過程の相対的な寄与について考察することが可能であると考えられる。海洋前線帯域（図 1 内の枠）で領域平均した鉛直流は、再解析が $-0.028 \text{ [Pa s}^{-1}]$ （負値が上昇流）であるのに対し、非断熱加熱と乾燥過程によって励起される鉛直流診断成分はそれぞれ $-0.023 \text{ [Pa s}^{-1}]$ 、 $0.008 \text{ [Pa s}^{-1}]$ であり、観測される上昇流は基本的に非断熱加熱によるもので、乾燥過程は弱く相殺する傾向にあることを示唆する。北西太平洋でも似たような結果が得られ、再解析データの鉛直 p 速度の領域平均が $-0.033 \text{ [Pa s}^{-1}]$ 、非断熱加熱と乾燥過程による鉛直流がそれぞれ $-0.025 \text{ [Pa s}^{-1}]$ と $0.027 \text{ [Pa s}^{-1}]$ であり、乾燥過程が過大評価なものの、非断熱加熱が上昇流の主要因であった。

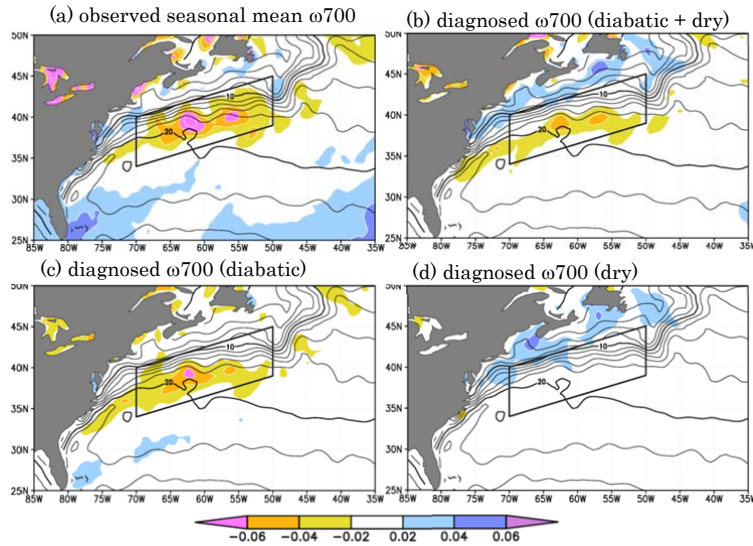


図 1: (a) 700 hPa における季節平均の鉛直 p 速度。(Pa s^{-1}) 再解析データに基づく。(b) 準地衡オメガ方程式に基づく鉛直 p 速度。(Pa s^{-1}) 非断熱加熱と乾燥過程に伴う成分の和。(c-d) (b)と同じだが、(c) 非断熱加熱に伴う成分のみ、(d) 乾燥過程に伴う成分のみ。

なお、乾燥過程による下降流は熱的間接循環と関連していると考えられ、実際、乾燥過程による下降流の大部分は移動性擾乱に伴う乾燥過程で説明でき (図 1d, 2a)、移動性擾乱による極向き熱輸送の極大の赤道側に位置している。太平洋でも同様の傾向であった (図略)。

4. 移動性擾乱に伴う鉛直流変動

海洋前線帯では移動性擾乱活動が活発であり、移動性擾乱に伴う鉛直流変動も海洋前線帯域で大きい (図 3a)。北大西洋の海洋前線帯域における 700 hPa での鉛直 p 速度の

標準偏差は、図 3 の枠内で平均すると $0.32 [\text{Pa s}^{-1}]$ であった。移動性擾乱成分について線形化した準地衡オメガ方程式によって診断した鉛直流偏差の標準偏差は $0.28 [\text{Pa s}^{-1}]$ とやや過小評価なものの、海洋前線帯に極大を持つ様子など良い再現性を示すことが確認できる (図 3b)。なお、各グリッドにおいて再解析の鉛直流偏差とオメガ方程式によって診断した鉛直流の相関係数を評価すると 0.75 以上を示し、振幅だけでなく変動の時間発展も良い再現性を示す (図略)。

再解析の鉛直 p 速度偏差に対する準地衡オメガ方程式で診断した鉛直 p 速度偏差を

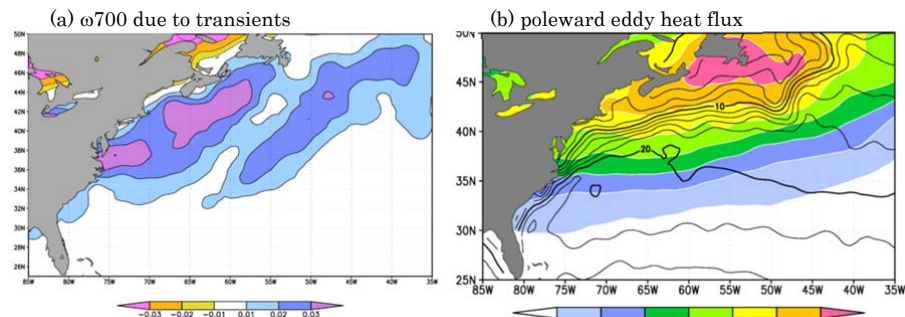


図 2: (a) オメガ方程式に基づいて診断した季節平均 700 hPa 鉛直 p 速度。(Pa s^{-1})。但し、移動性擾乱に伴う乾燥過程のみによる成分。等値線間隔は図 1 の半分である。(b) 移動性擾乱に伴う極向き熱輸送の季節平均 (K m s^{-1})。

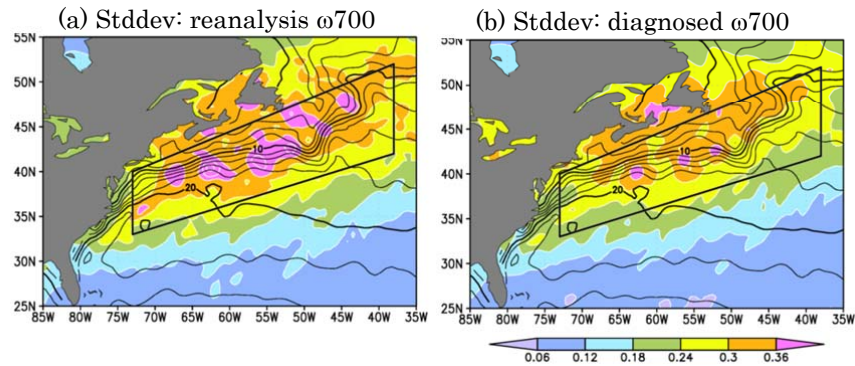


図 3: 移動性擾乱に伴う 700 hPa 鉛直 p 速度の標準偏差 (Pa s^{-1})。 (a) 再解析 (b) オメガ方程式に基づいて診断した鉛直 p 速度 (Pa s^{-1})。

評価することで、鉛直流変動をもたらす要因の評価を行うと、乾燥過程と非断熱加熱はそれぞれ海洋前線帯のそれぞれ北側と南側で寄与が大きく(図 4a-b)、両者の比は相対的な重要性を表し、海洋前線帯の北側では乾燥過程が非断熱加熱の寄与を凌駕し、南側では非断熱加熱の寄与の方が凌駕していることが分かった。なお、海洋前線帯の南側であっても乾燥過程は非断熱加熱の半分相当の寄与があり、乾燥過程は南側であっても無視できない点に留意すべきである。そして、北西太

平洋で同様の解析を行ったところ、定量的にもほぼ同様の結果が得られることが分かった(図略)。

線形回帰に基づく解析は、移動性擾乱が通過する際の全位相を含んだ解析に相当するため、ラグ合成図解析を行うことで上昇流時の時間発展について解析を行った。北西太平洋の海洋前線帯上の地点(160E, 40N)での南北風を基準時系列として 20 例を合成して、低気圧が海洋前線帯上を発達しながら東進する際の循環場を抽出し(図 5 左列)、そう

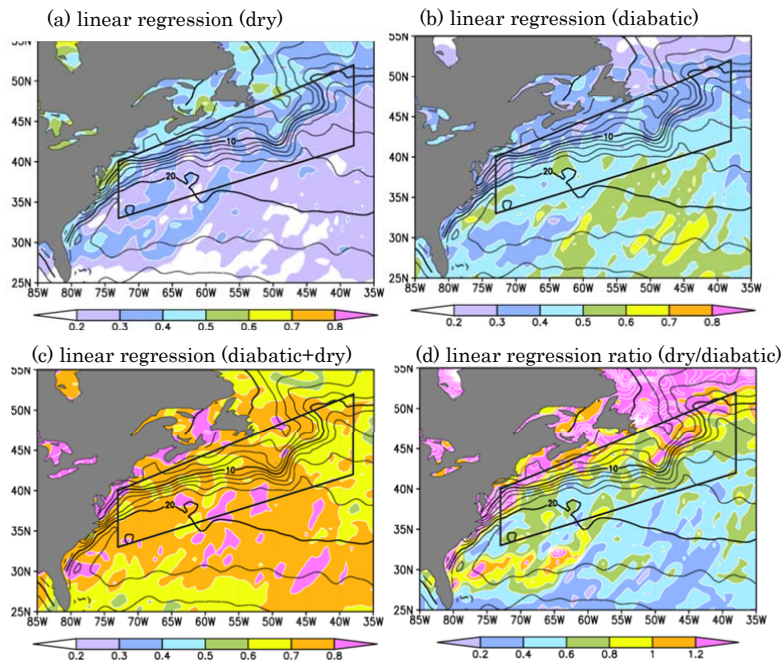


図 4: (a-c) オメガ方程式によって診断した移動性擾乱に伴う (a) 乾燥過程 (b) 非断熱加熱 (c) 乾燥過程と非断熱加熱によって励起される鉛直流偏差の、再解析の移動性擾乱に伴う鉛直流偏差に対する線形回帰。観測される 1 [Pa s^{-1}]あたりの線形回帰 (Pa s^{-1})。 (d)は(a)の(b)に対する比。

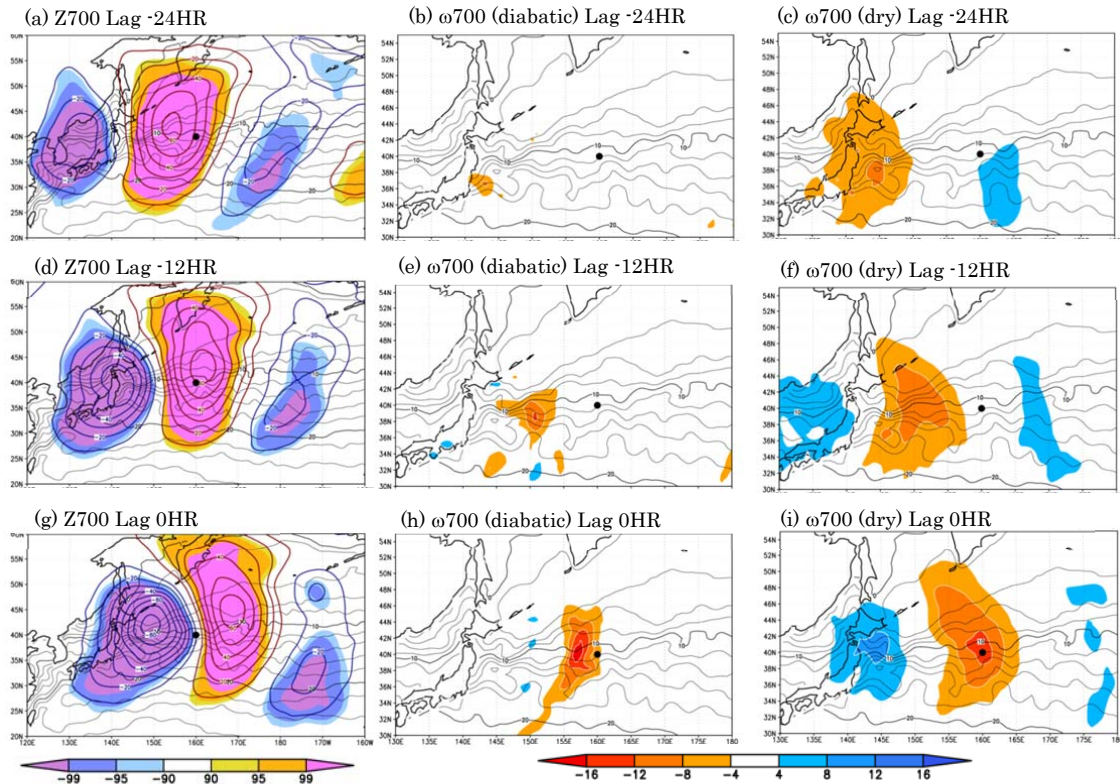


図 5: ラグ合成図。(a,d,g) 700 hPa 高度場偏差 (10m 毎の等値線)と統計的有意性(90,95,99%の陰影)。オメガ方程式によって診断した 700hPa における (b,e,h) 非断熱加熱および (c,f,i) 乾燥過程に伴う鉛直 p 速度(hPa hr^{-1})。 (a-c) はラグ-24 時間、(d-f)はラグ-12 時間、(g-i)はラグ 0 時間。

した循環場にオメガ方程式を適用した (図 5 中・右列)。すると、低気圧の東側で非断熱加熱と乾燥過程の両者が上昇流を励起する働きを持つことが分かる。但し、それらの働きには違いが見られ、非断熱加熱は狭い範囲に非常に強い上昇流を急激に発達させるのに対し (図 5 中列)、乾燥過程は広範囲に強い上昇流を持続的にもたらしことが分かった (図 5 右列)。なお、上昇流のピーク値は非断熱加熱に伴う成分が $-18 [\text{hPa/hr}]$ と、乾燥過程に伴う成分の $-13 [\text{hPa/hr}]$ より強いものの、上昇流の強い領域で平均した場合はそれぞれ $-8.6 [\text{hPa/hr}]$ と $-9.3 [\text{hPa/hr}]$ であり、非断熱加熱より乾燥過程の方が強い上昇流を励起することが分かった。

5. まとめ

再解析データに基づく循環場に対して準地衡オメガ方程式を適用し、中緯度海洋前線帯上の下部対流圏での鉛直流に対する非断熱加熱と乾燥過程の相対的な寄与を北大西洋と北西太平洋において評価した。

季節平均の上昇流は主に非断熱加熱によって励起され、乾燥過程はむしろ熱的間接循環により上昇流を弱めるように働くことが分かった。しかし、非断熱加熱の生成に寄与すると思われる移動性擾乱に伴う変動成分については、海洋前線帯の南側では非断熱加熱の方が寄与が大きいものの、乾燥過程も非断熱加熱の半分程度の寄与があることが分かった。そして北側では乾燥過程の方が寄与

が大きく、乾燥過程が無視できないほど重要であることが示唆された。そして、降水形成に重要な上昇流偏差に着目すると、ピーク値こそ非断熱加熱の方が寄与が大きい、上昇流が強い領域での平均値ではほぼ同程度であり、乾燥過程の重要性を示唆するものである。

ただ、準地衡オメガ方程式は準地衡近似に従っており、総観規模以下の空間スケールの現象の評価には誤差が大きいと思われるため、より詳細な解析が必要である。

参考文献

- Minobe, S., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, S.-P. Xie and R. J. Small, 2008: Influence of the Gulf Stream on the troposphere, *Nature*, **452**, 206-209.
- Minobe, S., M. Miyashita, A. Kuwano-Yoshida, H. Tokinaga and S.-P. Xie, 2010: Atmospheric response to the Gulf Stream: seasonal variations: *J. Climate*, **23**, 3699-3719.