

地球温暖化が大規模波動形成に与える影響

岩崎 俊樹・望月 泰・小玉 知央(東北大・理)

1. はじめに

筆者らは波動平均流相互作用に基づく大気大循環のエネルギー変換の新しい診断法を開発している。(Iwasaki, 2001; Uno and Iwasaki, 2006)。これを用いてMRI/JMA-GCMによるCO2倍増実験結果を解析し、温暖化が波動エネルギー形成に与える影響を調べる。とくに、冬季北半球の停滞性波動と非定常波動への変換効率を議論する。

2. 解析手法

新しいエネルギー変換スキームでは、あらゆる物理量の帯状平均値を質量荷重付き温位面平均で定義する(Iwasaki, 1989)。Lorenz (1955)流に4Box (帯状平均有効位置エネルギー P_Z 、帯状平均運動エネルギー K_Z 、渦有効位置エネルギー P_E と渦運動エネルギー K_E)に分けて描くと、その連結は従来の等圧面帯状平均の場合とは大きく異なる。すなわち $P_Z \rightarrow P_E$ (平均有効位置エネルギーから渦有効位置エネルギーへの変換)は発生しない。代わりに、対角線の $K_Z \rightarrow P_E$ (平均運動エネルギーから渦有効位置エネルギーへの変換)が発生する。さらに、渦有効位置エネルギー P_E と渦運動エネルギー K_E の和を波動エネルギー W とみなせば、図1のような直列型(カスケード型)のエネルギー変換スキームが得られる。

平均有効位置エネルギーから渦運動エネルギーへの変換は次式で表され、

$$C(P_Z, K_Z) = - \left\langle v^* \left(\frac{\partial \Phi_{\dagger}}{\partial y} \right)_{p_{\dagger}} \right\rangle \quad (1)$$

平均子午面循環に伴う有効位置エネルギーの減少率を意味している。帯状平均運動エネルギーから波動エネルギーへの変換は次式のように波

動平均流相互作用で記述される。

$$C(K_Z, W) = - \left\langle \overline{u^* \nabla \cdot \mathbf{F}} \right\rangle + \varepsilon \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{F} はEPフラックスである。以上のように、波動エネルギー W を定義することによって、波動平均流相互作用を直接表現することができる。さらに、EPフラックスを定常成分 \mathbf{F}_S と非定常成分 \mathbf{F}_T の寄与に分け、停滞性波動と非定常波動へのエネルギー変換を議論する。

3. GCM データ

解析には、MRI/JMA-GCM2.3 (Yukimoto et al., 2006)のT42L45バージョンの大気大循環モデル(AGCM)の出力を用いた。標準実験では

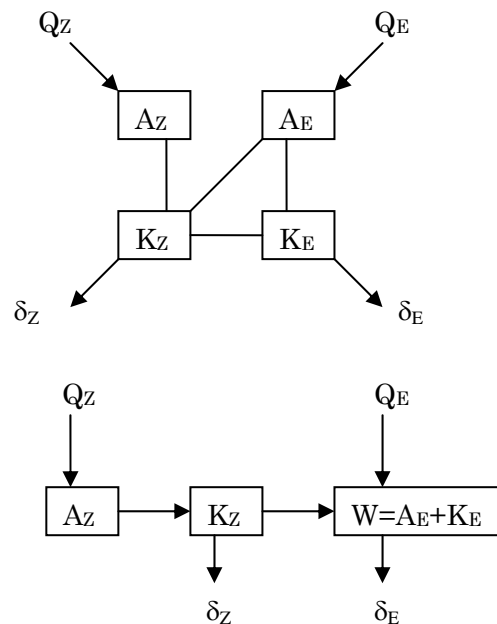


図1. 質量荷重付帯状平均に基づく大気大循環のエネルギー変換スキーム。 Q 、 δ は非断熱加熱による有効位置エネルギーの生成率、摩擦による運動エネルギーの散逸を表す。上：4 Box 下：3 Box

気候値の CO₂ と SST/ICE (海面水温と海氷) を用いた。また、2xCO₂ の温暖化実験に用いる SST/ICE は同モデルの結合実験結果を 2070-2080 年について平均して作成した。統計的に有為な情報を引き出すため 30 年間積分した。さらに、インパクトの原因を探るため CO₂ と SST/ICE のどちらか一方を温暖化時の値に設定した補助的な実験を行ない、CO₂ を倍増し SST/ICE を現在気候値としたものを直接効果、逆に、CO₂ を現在気候のまま、SST/ICE のみ、温暖化の値を設定したものを間接効果と呼ぶ (Kodama et al, 2007)。

3. 結果

図 2 は帯状平均気温のモデル気候値とその温暖化効果である。地上気温は高緯度での上昇が大きいので下層の傾圧性は弱まる。これに対して、対流圏中層以上では気温上昇の中心

は熱帯側で大きいので、逆に傾圧性は強化される。また、図 3 は平均東西風の気候値である。気温の変化に対応して、対流圏の中層以上で偏西風の強化が顕著である。また、MRI/JMA-GCM は極渦の気温低下が著しく、その結果、極夜ジェットも強化される。

図 4 はエネルギー変換ダイアグラムである。帯状平均有効位置エネルギー A_z と帯状平均運動エネルギー K_z は温暖化によって数パーセント程度増加し、波動エネルギー W は数パーセント減少する。このエネルギー変化は、ある意味で、 K_z から W への変換効率が温暖化により減少することと、整合している。

図 5 は波動エネルギー W の緯度分布を定常と非定常に分けて示した。定常波動のエネルギーは冬季北半球で顕著になるが、これは主として山岳によって励起された波数 3 程度の超長波によるものである。また、主たる非定常波動は

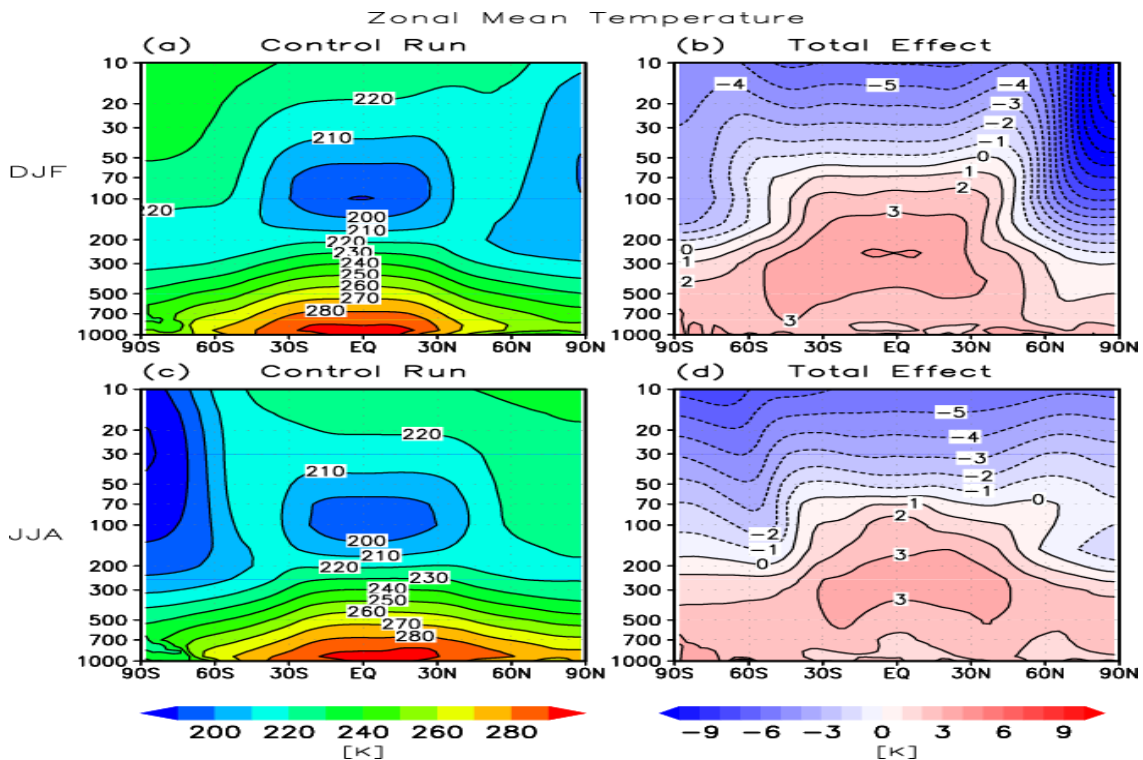


図 2 帯状平均気温に対するモデル気候値(30年平均値)の子午面断面図
(a) DJF の気候値 (b) DJF の変化 (c) JJA の気候値 (d) JJA の変化

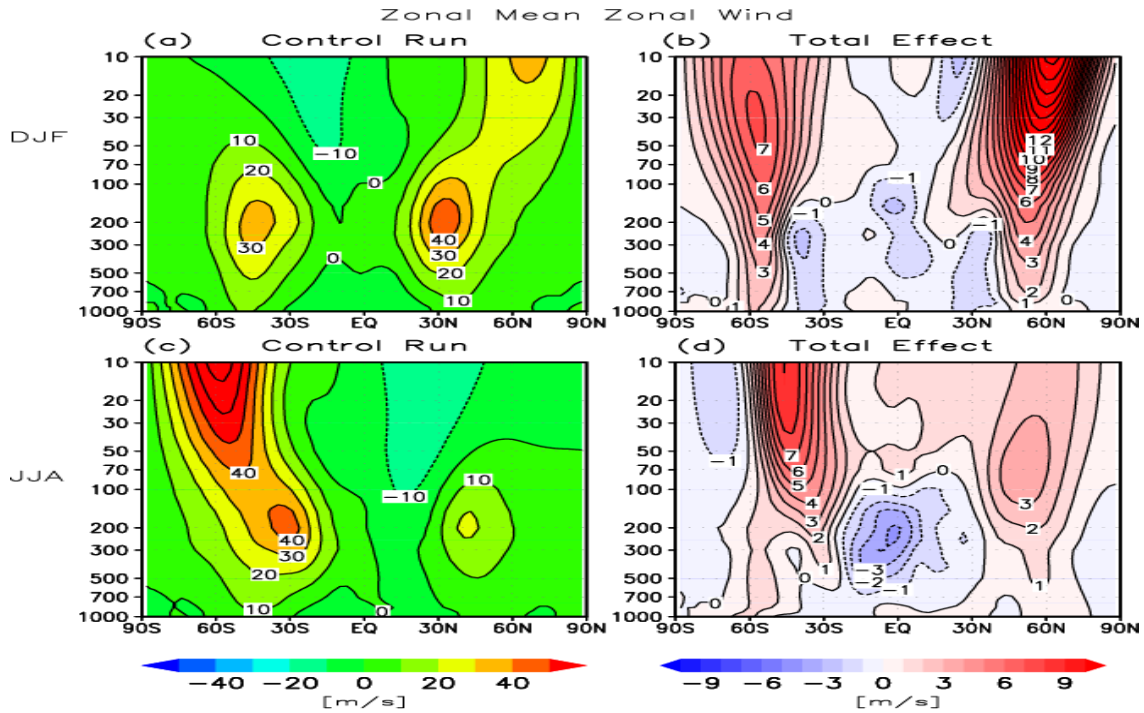


図3 帯状平均東西風に対するモデル気候値(30年平均値)の子午面断面図
 (a) DJFの気候値 (b) DJFの変化 (c) JJAの気候値 (d) JJAの変化

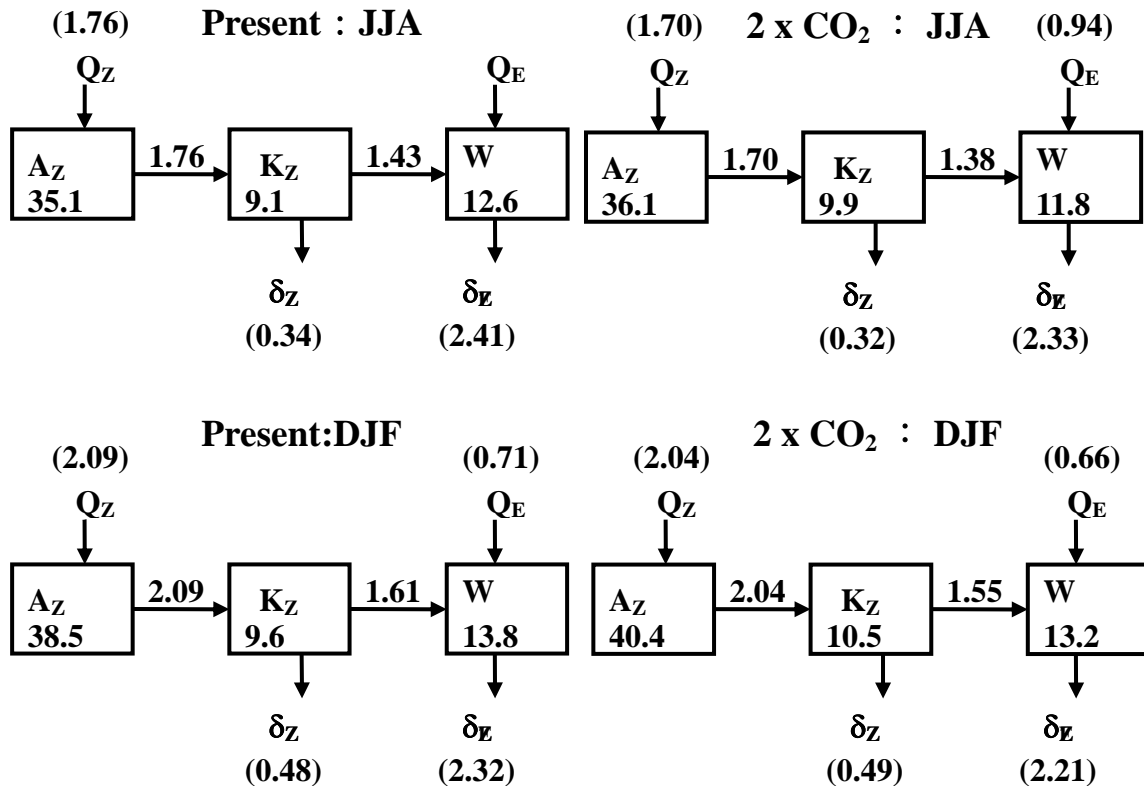


図 4 エネルギーダイアグラム。エネルギー (10^5J/m^2)、エネルギー変換率 (W/m^2)。

傾圧不安定波(温帯低気圧)である。温暖化に伴い、定常波動のエネルギーが北緯 30-60 度にかけて 2 割程度減少する。これに対し、非定常波のエネルギーは増加するとともにその分布は高緯度側にシフトする。実際に定常波動の振幅は減少し、その結果として、極東地域の気温の上昇は全球平均値より大きくなる(図省略)。

定常波と非定常波の応答の違いを検討するため、力学的な波動平均流相互作用に伴うエネルギー変換項($Kz \rightarrow W$)と非断熱加熱に伴う有効位置エネルギー生成率 Q_e を調べた(図 6 及び図 7)。その結果、力学的変換と非断熱の両方において、定常波のエネルギー生成が減少し、非定常波の生成は増加した。さらに、直接効果と間接効果を比較すると、間接効果のほうが寄与が大きい。すなわち、以上の効果は海面水温(および海氷の変化)を通じて、生じていることが分かった。

4. まとめ

新しいエネルギーダイアグラムを用いて、温暖化実験結果を解析した。冬季北半球では、停滞性超長波のエネルギーが減少し、非定常波動のエネルギーが増加した。波動平均流相互作用による力学的な変換効率と非断熱加熱による生成の両者の変化が寄与している。

(謝辞)本研究は気象研究所との共同研究である。

参考文献

Iwasaki, JMSJ, 67, 293-312(1989)
 Iwasaki, JAS, 58, 3036-3052(2001)
 Kodama et al., JGR, 112, D16, 10.1029/2006JD008219 (2007).
 Lorenz, Tellus, 7, 157-167.(1955)
 Tanaka et al., JAS, 61, 3277-3295(2004)
 Uno and Iwasaki, JAS, 63, 3277-3295(2006)
 Yukimoto et al., JMSJ, 84, 333-363 (2006)

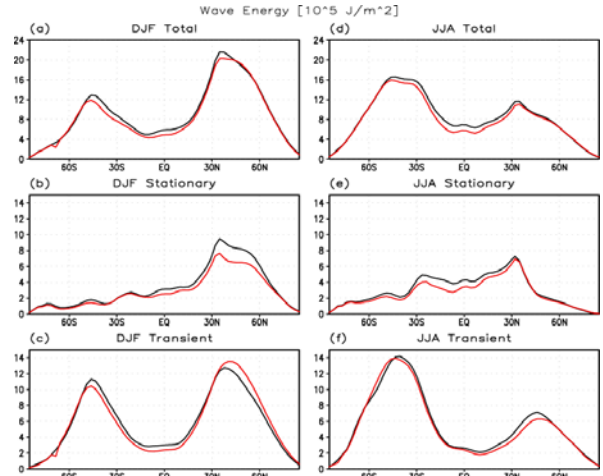


図5 DJFとJJAの波動エネルギー(10^5Jm^{-2})

上:総和、中:定常、下:非定常 黒:現在、赤:温暖化

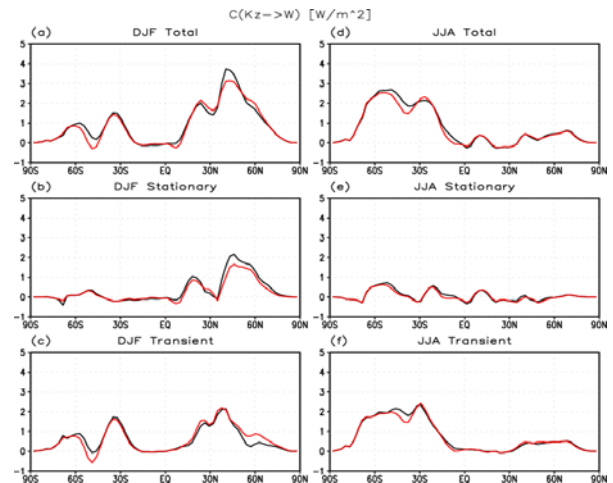


図6 力学的な波動エネルギーの生成。(Wm⁻²)

他は図5に同じ。

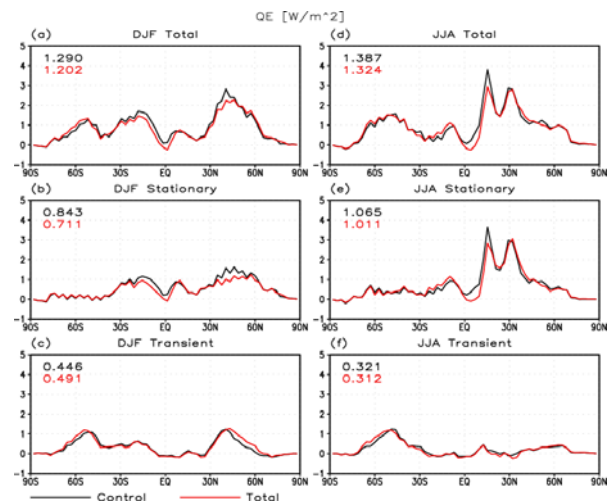


図7 非断熱加熱による波動エネルギーの生成。

(Wm⁻²)他は図5に同じ。