

波動平均流相互作用に基づくエネルギーとその変換項の季節変化

望月 泰・岩崎 俊樹（東北大院・理）

1 はじめに

大気大循環，特に平均子午面循環の力学を理解することを目的として，波動平均流相互作用に基づく大気エネルギーの解析を行っている．この解析の特徴は，帯状平均場を作成する際に質量重み付けした等温位面帯状平均場を使用していることである．基本的な特徴は宇野 (2003) において報告され，計算の妥当性や夏季・冬季におけるエネルギー収支解析が行われた．本研究では 20 年分の NCEP/NCAR の再解析データを用いて両半球の波動エネルギーの変動要因についてその特徴を調べた．

2 帯状平均の定義

すべての変数に対して質量重み付けした等温位面帯状平均を用いている．帯状平均の定義は

$$\overline{A(y, \theta, t)}^* \equiv \frac{1}{L_x} \int A(x, y, \theta, t) \left(\frac{\partial p}{\partial \theta} / \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \right) dx \quad (2.1)$$

のように表される．鉛直座標には等温位面に沿って帯状平均した気圧を用いる．

図 1 は温位面上での質量荷重帯状平均に基づいても求めた DJF における子午面循環を示したものである．対流圏ではハドレー循環と中高緯度循環の 2 つの直接循環と，成層圏ではブリュワー・ドブソン循環が確かめられる．このような帯状平均場に基づく大気エネルギーの季節変化を以下で考える．

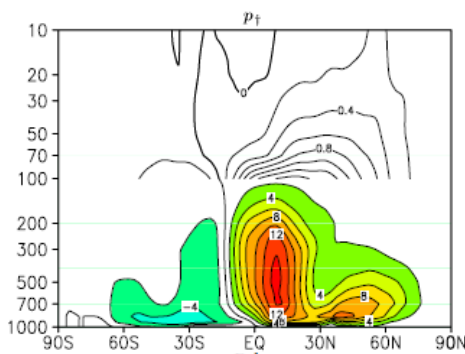


図 1: 子午面循環 (DJF) $10^{10} [kg/s]$

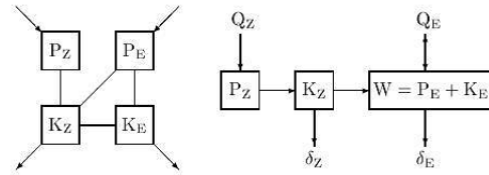


図 2: エネルギーダイアグラム

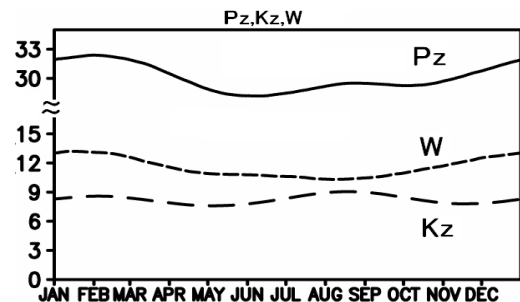


図 3: 3box のエネルギーの季節変化 大きいほうから $P_z, W, K_z [10^5 J/m^2]$

3 エネルギーの定式

3.1 エネルギーダイアグラム

今回用いる平均場の定義に従ったエネルギーダイアグラムを図 2 に示す．左は 4 ボックスモデルで，各エネルギーボックスは帯状有効位置エネルギー P_Z ，帯状運動エネルギー K_Z ，渦有効位置エネルギー P_E ，渦運動エネルギー K_E である．それらを結ぶ変換項は図のようになり，従来のロレンツモデルとは大きく異なっている (Iwasaki, 2001)．その他に， Q_Z, Q_E は非断熱加熱による P_Z, P_E の生成， δ_Z, δ_E は摩擦による K_Z, K_E からの散逸を示す．

さらに波動平均流相互作用に伴うエネルギー変換をより明確に表すため，右図のように K_E と P_E をまとめて波動エネルギー W とした．その結果，エネルギーの流れは $P_Z \rightarrow K_Z \rightarrow W$ となる．まとめる理由としては，波動において P_E と K_E 間の変換は相互に不断に起こっていることと，両者を区別した場合は EP-flux の屈折に伴って変換項 $C(K_Z, P_E)$ と変換項 $C(K_Z, K_E)$ が同時に起こっているように見えるため，波動の伝播という概念に適さないためである．

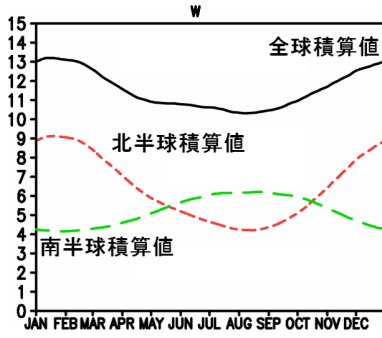


図 4: 波動エネルギー W [$10^5 J/m^2$]

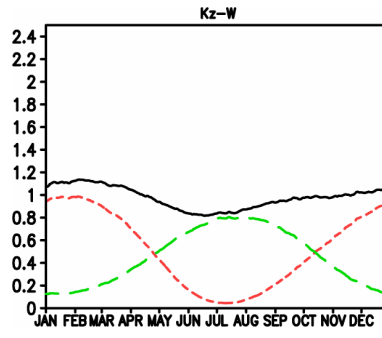


図 5: 変換項 $C(Kz, W)$ [W/m^2]

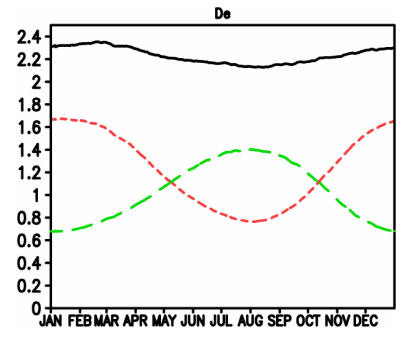


図 6: 消散項 δ_E [W/m^2]

3.2 エネルギー方程式

これら帯状平均場の定義に基づいたエネルギー方程式は Iwasaki(2001) で導かれている。

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle P_Z \rangle = -C(P_Z, K_Z) + Q_Z$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle K_Z \rangle = C(P_Z, K_Z) - C(K_Z, W) + \delta_Z$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle W \rangle = C(K_Z, W) + Q_E - \delta_E$$

$$C(P_Z, K_Z) = - \left\langle \frac{\bar{v}^*}{a} \left(\frac{\partial \Phi_{P\uparrow}}{\partial \phi} \right)_{P\uparrow} \right\rangle$$

$$C(K_Z, W) = \langle \bar{u}^* \nabla \cdot \mathbf{F} \rangle + \varepsilon$$

$$\langle W \rangle = \langle P_E \rangle + \langle K_E \rangle$$

$C(P_Z, K_Z)$ は子午面直接循環による有効位置エネルギーから帯状運動エネルギーへの変換を、 $C(K_Z, W)$ は帯状運動エネルギーから波動エネルギーへの変換を表す項である。ここで、 $C(K_Z, W)$ は EP-flux の収束・発散による波動エネルギーの生成と、 ε で表される渦による南北気圧傾度力の仕事をまとめた項から構成されているが、後者の寄与は非常に小さいことが確かめられている。最終的に波動の運動エネルギーが摩擦消散するという流れで大循環が構成される。

3.3 エネルギー消散項

消散項 δ_E は EP-flux による力学的生成項 $C(K_Z, W)$ と熱的生成項 Q_E の和と釣り合う。図 2 の 4 ボックスモデルを用いれば、 Q_E と δ_E を独立に評価することができる。 δ_E は波動エネルギー W と緩和時間 τ を用いると $\delta_E = W/\tau$ となり、この τ から波動エネルギー消散の速さを診断することができる。

4 結果

4.1 帯状有効位置エネルギー P_Z と帯状運動エネルギー K_Z の季節変化

全球平均した帯状有効位置エネルギー P_Z 、帯状運動エネルギー K_Z 、波動エネルギー W を図 3 に示す。 P_Z は DJF に最大となる一方、 K_Z は JAS に最大をとる。また K_Z は DJF にも極大となるピークを持つことがわかる。 W は DJF に最大を、JJA に最小となるが、1年を通して P_Z より小さく、 K_Z より大きいエネルギー量であることがわかる。

4.2 波動エネルギー W の季節変化

波動エネルギー W の全球・北・南半球積算値の季節変化を図 4 に示す。それぞれ北半球・南半球共に冬に W の量が多くなる。両半球冬の量を比較すると北半球のほうが南半球に比べ約 1.5 倍ほど大きい。このような違いが生じる原因をエネルギーの生成量と消散量のバランスから考える。

4.3 生成項 $C(K_Z, W)$ と Q_E の季節変化

$C(K_Z, W)$ の季節変化を図 5 に示す。両半球ともに冬に大きく、そのピーク値は北半球のほうが南半球に比べ変換が大きい。一方熱的生成項である Q_E (not shown) は季節変化も小さく、北半球と南半球の冬の違いも $C(K_Z, W)$ に比べて小さいことがわかってる。

4.4 消散項 δ_E の季節変化

消散項 δ_E の季節変化を図 6 に示す。客観解析データの場合、消散項 δ_E は $C(K_Z, K_E)$ と $C(P_E, K_E)$

| | $\langle W \rangle$ | τ | $C(K_Z, W)$ | Q_E |
|----|---------------------|--------|-------------|-------|
| NH | 9.1×10^5 | 6.30 | 0.98 | 0.70 |
| SH | 6.0×10^5 | 5.19 | 0.78 | 0.61 |

表 1: (NH,SH) の波動エネルギーの収支 . 単位: $\langle W \rangle$ は $[J/m^2]$, τ は day , $C(K_Z, W) \cdot Q_E$ は $[W/m^2]$

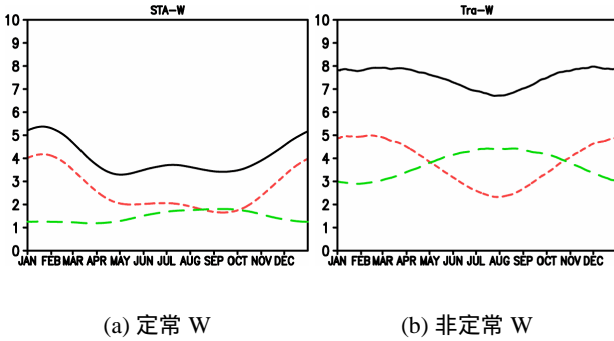


図 7: 定常波・非定常波に分けた W , $[10^5 J/m^2]$

の残差で与えられる . 図 5 を見るとこの項も両半球冬に大きく , 北半球のほうが南半球に比べ消散量が大きいことがわかる .

また , 消散項は $\delta_E = W/\tau$ より , 緩和時間 τ を各々の半球について求めてみると , 北半球は 6.30 日 , 南半球は 5.19 日ということがわかる .

消散項についてまとめると , 北半球は南半球に比べて消散するエネルギーの量は大きい , 消散するのに約 1.1 日程度より時間がかかるということがわかる .

4.5 波動エネルギーの収支

波動エネルギーの収支は平衡状態を仮定すると

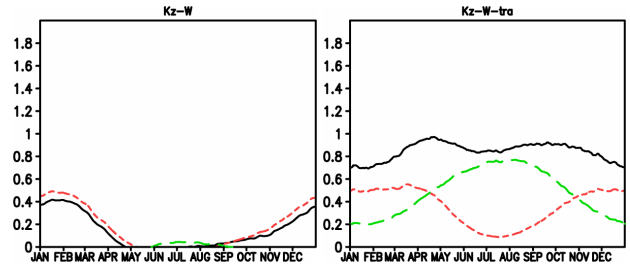
$$\frac{\partial}{\partial t} \langle W \rangle = C(K_Z, W) + Q_E - \delta_E = 0$$

となる . $\delta_E = W/\tau$ を用いて変形すると

$$\langle W \rangle = \tau \cdot \{C(K_Z, W) + Q_E\}$$

となる . それぞれ値を計算し , 表 1 にまとめた .

この表から , 南北半球の波動エネルギーの量の違いは主に力学的エネルギー生成項の違い , さらに緩和時間の違いに起因することがわかる .



(a) 定常 $C(K_Z, W)$ (b) 非定常 $C(K_Z, W)$

図 8: 定常波・非定常波に分けた $C(K_Z, W)$, $[W/m^2]$

5 定常波・非定常波の季節変化

5.1 波動エネルギー W

波動エネルギー W を定常と非定常に分けたのが図 7 である . 定常とは各格子点で気象要素 (気温と風) を季節平均した上で渦 (波動) エネルギーを評価したものであり , 非定常とは元の解析と定常波のエネルギーの差である .

非定常波動のエネルギーの季節変化はやや北半球の冬のほうが南半球に比べ大きな値を示すが , ほぼ同じような季節変化を示している . 一方定常波動のエネルギーは北半球の冬において非常に強いピークを示す一方 , 南半球は 1 年を通して非常に小さな値となっている . この北半球における定常波動によるエネルギーの存在が南北半球のエネルギー量の違いに寄与していると考えられる .

5.2 定常波・非定常波に分けた (K_Z, W)

定常・非定常に分けた (K_Z, W) を図 8 に示す . 非定常な (K_Z, W) をみると , 南半球のほうが北半球に比べ冬に大きなピークを持つが , 一方定常な (K_Z, W) は北半球にしか変換項が存在しない . 定常・非定常な波動生成をあわせると , 北半球の定常的な変換の寄与が大きいので北半球の冬において波動エネルギーの力学的生成項が大きくなる . 尚 , 先行研究などにより , 北半球では停滞性超長波の生成が盛んであることが原因であると考えられる . これに対し南半球ではほとんどが傾圧不安定波であると推定される (Tanaka, et.al, 2004) .

山岳強制などによる定常波動生成が原因だと考えられる .

| | Total | 定常成分 | 非定常成分 |
|----|-------|------|-------|
| NH | 6.30 | 9.44 | 4.82 |
| SH | 5.19 | 9.36 | 4.37 |

表 2: 定常・非定常に分けた緩和時間 [day]

5.3 定常波・非定常波に分けた緩和時間 τ

同様に τ についても両半球で定常と非定常に分けて計算し、結果を表にまとめた(表 2)。

表から、両半球ともに定常波動のほうが非定常波動に比べ緩和時間が大きいことがわかる。また § 5.1 の定常波動のエネルギー量の違いから、北半球は南半球に比べ定常波動の寄与が大きいことが推測され、北半球の緩和時間は南半球に比べて Total でも大きくなったと考えられる。

5.4 波動エネルギーの内訳

図 9 は波動エネルギー W を波動の位置エネルギーと運動エネルギーに分け、その比率を求めたものである。北半球と南半球の冬を比較すると、相対的に北半球のほうが値が大きいことがわかる。

このエネルギーの比率から緩和時間と波長に関する考察が得られる。まず $\langle P_E \rangle / \langle K_E \rangle$ は波長の 2 乗に比例し、さらに緩和係数 τ は

$$\tau = \frac{\langle W \rangle}{\delta_E} \propto \frac{\langle P_E \rangle + \langle K_E \rangle}{\langle K_E \rangle} = 1 + \frac{\langle P_E \rangle}{\langle K_E \rangle}$$

のように変形することができる。

図 9 から北半球においては $\langle P_E \rangle / \langle K_E \rangle$ の比率が大きく、つまり比較的長い波が多く存在しそれにより緩和時間が大きくなる。逆に南半球は比率が小さく比較的短い波が卓越し、それにより緩和時間の短い波が存在することがわかる。

以上のことから、北半球と南半球の緩和時間の違いは各々の半球に存在する波の波長が違うことに起因することがエネルギーの側面から理解された。

6 まとめ

波動平均流相互作用を正確に記述するために、質量で重み付けした等温位面帯状平均に基づく新しいエネルギー変換スキームに基づき、20 年分の NCEP/NCAR の再解析データを用いて全球大気の

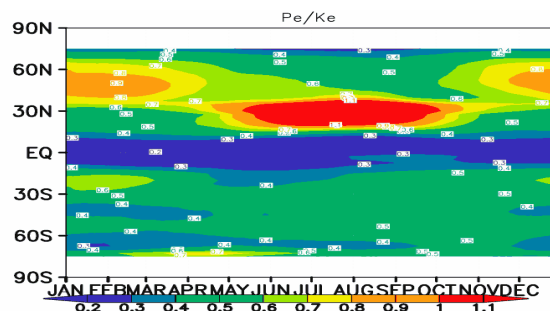


図 9: K_E と P_E の比率

エネルギーを解析し、3box のエネルギーの変化と北半球と南半球の波動エネルギーの変動要因を明らかにした。

- 全球積算値の帯状有効位置エネルギーと波動エネルギーは北半球冬に最大、夏に最小となる。一方帯状運動エネルギーは南半球冬に最大、北半球冬に極大となる
- 北半球冬の波動のエネルギーは南半球冬に比べ約 1.5 倍大きい。その理由として、定常的な波動の力学的エネルギー生成項が北半球のほうが大きいことと、北半球のほうが波長が長い波が含まれていることから緩和時間が大きいことが挙げられる。

7 今後の課題

今後はこの質量重み付けした等温位面帯状平均場のエネルギー解析ツールを用いて、AO や温暖化などの年々変動の現象解析を行っていきたい。

参考文献

- [1] Iwasaki, T., 2001: Atmospheric energy cycle viewed from wave-mean-flow interaction and lagrangian mean circulation. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3036-3052.
- [2] 宇野幸代, 岩崎俊樹, 2003: 波動平均流相互作用に基づく大気エネルギー収支解析「対流圏長周期変動と異常気象」研究集会
- [3] Tanaka, D., T. Iwasaki, S. Uno, M. Ujiie and K. Miyazaki, 2004: Eliassen-Palm flux diagnosis based on isentropic representation. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1565-1579.