

ブロッキングを含む準停滞性高気圧性偏差のエネルギー収支解析

西井和晃・中村尚・笹平康太郎・天野太史（東京大学先端科学技術研究センター）

1. はじめに

ブロッキング高気圧の発達には、大きく分けて移動性擾乱のようなブロッキングよりも短い時間スケールの擾乱からの強制と、ブロッキングと同程度の時間スケールの擾乱からの強制によるメカニズムが提唱されている（例えば Nakamura et al. 1997）。本研究では、擾乱のエネルギー収支解析を行うことにより、これらのメカニズムの寄与を定量的に評価することを目的とする。

2. 解析手法

本研究では JRA25 再解析データ (Onogi et al. 2007) を利用した。解析対象期間は 1979/1980 から 2009/2010 までの冬季（11月から3月）である。8日間の低周波フィルタを施した場から日毎気候平均場からのずれを偏差場として本研究で用いる。ブロッキング高気圧は Nakamura et al. (1997) と同様に、大振幅の高気圧性偏差として定義した。中高緯度では、このような高気圧性偏差のほとんどが渦位の碎波や切離した高気圧といったブロッキングの特徴を伴っている (Nishii et al. 2011)。北半球各地域で発達する顕著なブロッキングに伴うエネルギー収支を評価するため、再解析データの各格子点ごとに、そのまわり 500 km 以内に中心を持つ 250hPa 高気圧性偏差を抽出した。各格子点ごとに振幅の大きな 30 事例の偏差場を、Nakamura et al. (1997) に従い、

各事例の偏差場を大円に沿って移動させた後に合成した。このようにしてブロッキングに関係しない偏差場を除去することにより、ブロッキングに関係する偏差場のみを抽出した。この以後、この偏差場を長周期擾乱と呼ぶ。

移動性擾乱を 8 日間の高周波擾乱により抽出した。これに伴う各種のフラックスの合成図は、個々のブロッキングイベントごとにフラックスを計算した後にそれを合成することにより評価した。以後この擾乱を短周期擾乱と呼ぶ。

長周期擾乱に伴う運動エネルギー (KE) と有効位置エネルギー (APE) はそれぞれ以下の式で定義される。

$$KE = \frac{u'^2 + v'^2}{2}, APE = \frac{RT'^2}{2pS_p}$$

ここで、 (\prime) は偏差場を表し、 u と v は東西、南北風、 T は気温、 R は気体定数、 p は気圧である。 S_p は安定度であり、以下の式で与えられる。

$$S_p = -\frac{R\bar{T}}{C_p p} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial p}$$

C_p は定圧比熱、 $(-)$ は気候平均を表す。この和を長周期擾乱の全エネルギーと呼ぶ。また長周期擾乱に伴う順圧エネルギー変換 (CK) と傾圧エネルギー変換 (CP) はそれぞれ、

$$CK = \frac{v'^2 - u'^2}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) - u'v' \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)$$

$$CP = -\frac{R}{S_p p} (u'T' \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + v'T' \frac{\partial \bar{T}}{\partial y})$$

で与えられる。この和を長周期擾乱による全エネルギー変換と呼ぶ。また、短周期擾乱による順圧エネルギー変換(CK_{HF})と傾圧エネルギー変換(CP_{HF})はそれぞれ

$$CK_{HF} = -u' \left(\frac{\partial(u''u'')'}{\partial x} + \frac{\partial(u''v'')'}{\partial y} \right) - v' \left(\frac{\partial(u''v'')'}{\partial x} + \frac{\partial(v''v'')'}{\partial y} \right)$$

$$CP_{HF} = -\frac{RT'}{pS_p} \left(\frac{\partial(u''T'')'}{\partial x} + \frac{\partial(v''T'')'}{\partial y} \right)$$

で与えられる。()'は短周期擾乱を表し、本研究では8日間の高周波フィルタを施した場である。これらの和を短周期擾乱による全エネルギー変換と呼ぶ。

3. 結果

3.1 北欧上のブロッキング高気圧

合成図解析の事例としてまず北欧上のブロッキング高気圧の例を示す。北緯55度、東経10度の回りで発達した大振幅の高気圧性偏差イベントを30事例抽出した。

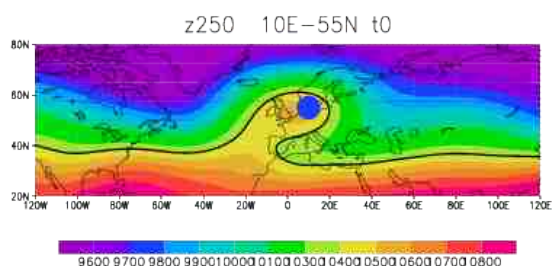


図1. 北緯55度、東経10度付近で発達したブロッキング高気圧30事例に伴う250hPa高度場の合成図(影:m). 等値線は10400mの等高線.

図1はピーク時の合成した250hPa高度場であり、偏西風の大きな蛇行と切離した高気圧というブロッキング高気圧の特徴が示されている。

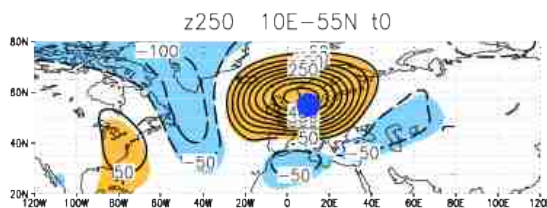


図2. 北緯55度、東経10度付近で発達したブロッキング高気圧30事例に伴う250hPa高度場偏差の合成図(等値線:m). 黄(青)色は正(負)偏差が95%以上有意な領域を示す.

図2は合成した250hPa高度場偏差であり、中心偏差が450mを越える大振幅の高気圧正偏差が北欧上に存在している。北西大西洋に低気圧性偏差、北米東岸には高気圧性偏差があり、これらの偏差がロスビー波列を構成していることを示唆している。

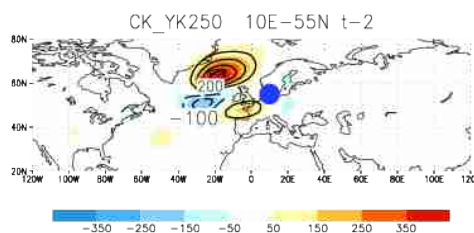


図3. 北緯55度、東経10度付近で発達したブロッキング高気圧30事例に伴うブロッキングのピーク2日前での250hPa面での順圧エネルギー変換変($m^2/s^2/day$).

図3はピーク2日前での対流圏上層(250hPa面)での順圧エネルギー変換の分布を示している。気候平均ジェットの出口にあたる偏差中心の北西で正の値が顕著である。

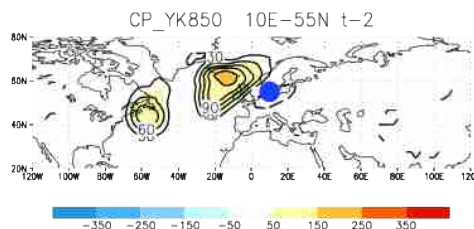


図4. 図3と同様。ただし、850hPa面での傾圧エネルギー変換変($m^2/s^2/day$).

図4は下層(850hPa)での傾圧エネルギー

変換の分布を示しており、偏差中心の上流側での正変換が顕著である。これは高気圧性偏差が高さとともに西に傾いていることを示している。また、上流側の低気圧と高気圧の間の北米大陸東岸で正の値が顕著である。

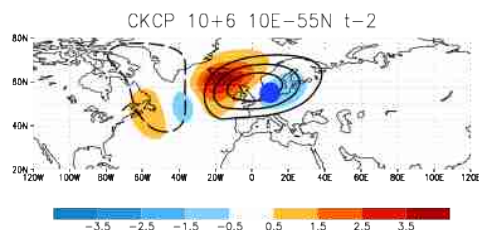


図5. 図3と同様。ただし長周期擾乱に伴う全エネルギー変換。地表から100hPa気圧面まで積分($10^6 \text{ J/m}^2/\text{day}$)。

図5は地表から100hPa気圧面まで鉛直積算した、全エネルギー変換の和の水平分布である。高気圧性偏差の上流側での正が顕著であり、図3と4でみた上層の順圧エネルギー変換と下層の傾圧エネルギー変換が寄与している。北米東岸の正の変換により生じた偏差場に伴うエネルギーは、ロスビー波に伴うエネルギーフラックスとして高気圧性偏差に到達し、高気圧の増幅に寄与すると考えられる。

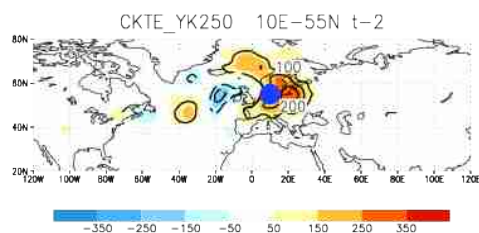


図6. 図3と同様。ただし短周期擾乱に伴う250hPa面での順圧エネルギー変換 ($\text{m}^2/\text{s}^2/\text{day}$)。

図6は250hPa面における移動性擾乱による順圧エネルギー変換を示す。偏差中心の周りで正になっており、偏差を増幅させよう

としていることがわかる。

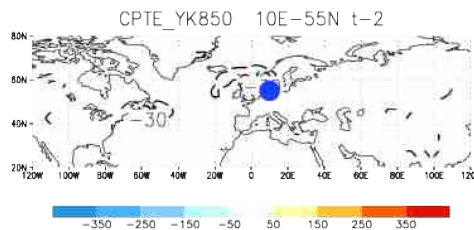


図7. 図6と同様。ただし短周期擾乱に伴う250hPa面での傾圧エネルギー変換 ($\text{m}^2/\text{s}^2/\text{day}$)。

一方、図7で示される850hPa面での移動性擾乱による傾圧エネルギー変換は、値が小さいが負であり、高気圧性偏差を弱化させるように働く。

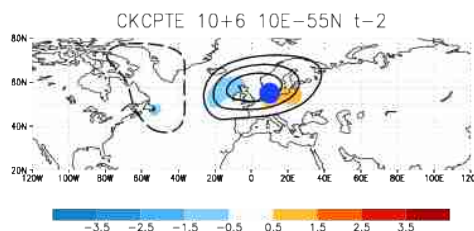


図8. 図5と同様。ただし短周期擾乱に伴う全エネルギー変換 ($10^6 \text{ J/m}^2/\text{day}$)。

図8は鉛直積算した移動性擾乱による全エネルギー変換の水平分布である。値は図5の偏差自体によるエネルギー変換に比べて小さいことが分かる。

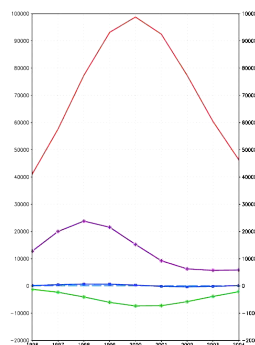


図9. 北緯55度、東経10度付近で発達したブ

ロッキング高気圧 30 事例に伴う全球平均、鉛直積算したエネルギーとエネルギー変換のピーク 4 日前から 4 日後までの時系列。赤線：長周期擾乱に伴う全エネルギー (J/m^2)。紫線：長周期擾乱に伴う全エネルギー変換 ($J/m^2/day$)。青線：短周期擾乱に伴う全エネルギー変換。緑線：非断熱加熱によるエネルギー変換。

エネルギーフラックスの寄与を除去するために、鉛直積分したエネルギー変換項を全球で平均した値の時間発展を図 9 に示す。長周期擾乱の全エネルギーも示している。これらの値はブロッキング高気圧そのもののみならず、上流のブロッキング高気圧に伴う偏差場によるエネルギー、及びエネルギー変換を含んでいることに注意されたい。

赤線で示され長周期擾乱の全エネルギーの和はピーク前に増加し、ピーク日に極大になる。ピーク日の前には紫で示される長周期擾乱による全エネルギー変換が大きく、一方青色で示される移動性擾乱によるエネルギー変換は小さい。

3.2 北半球各地のブロッキング高気圧に伴うエネルギー収支解析

前節で行った解析を北緯 20 度以北のすべての格子点のまわりの高気圧性偏差で繰り返した。そうして得られた偏差場に伴うエネルギー、及びエネルギー変換を北半球平均、鉛直積算した値を各基準格子点に代入した。なお、低緯度側の高気圧性偏差は必ずしもブロッキング高気圧の特徴を持っていないので、本節ではブロッキング高気圧の語は使用しない。

APE_YK+KE_YK change lag0-(lag-4) ($10^4 J/m/m$)

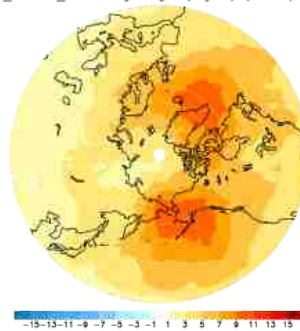


図 10. 各格子点上の周りで発達した高気圧性偏差の合成場に伴う、長周期擾乱による全エネルギーを全球平均、鉛直積算し、そのピーク日とピーク 4 日前との差を、各基準格子点に代入したものの分布 ($10^4 J/m^2$)。

図 10 は高気圧性偏差に伴う全エネルギーの和の、ピーク 4 日前からピーク日までの増加量である。北東太平洋と北部北大西洋での高気圧性偏差に伴って増加量が大きいがわかる。

CPCCK_YK sum lag0to(lag-4) ($10^4 J/m/m/day$)

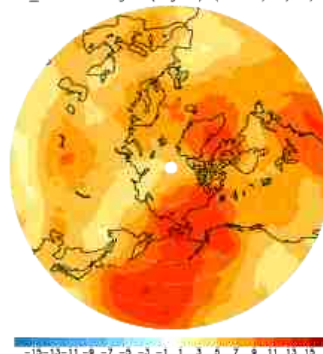


図 11. 図 10 と同様。ただし、長周期擾乱による全エネルギー変換を全球平均、鉛直積算し、それをピーク 4 日前からピーク日まで積算した値 ($10^4 J/m^2$)。

高気圧性偏差のピーク 4 日前からピーク日まで積算した、長周期擾乱による全エネルギー変換を図 11 に示す。図 10 で示されたエネルギー増加量の極大域に加え、対流圏下層の水平気温勾配の大きな北太平洋西部と北米大陸東岸での値が大きい。図には

示さないがこの2つの領域の極大は下層での傾圧エネルギー変換の極大が寄与している。

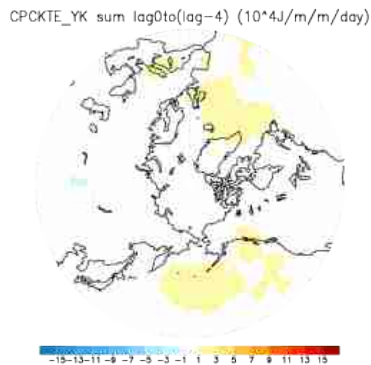


図12. 図11と同様。ただし、短周期擾乱による全エネルギー変換を全球平均。

短周期擾乱による長周期擾乱の全エネルギー増加への寄与の分布が図12である。北太平洋と北部北大西洋に極大があるものの、図11の長周期擾乱に伴うエネルギー変換に比べて非常に小さい。これは短周期擾乱による正の寄与を傾圧エネルギー変換が打ち消してしまうからである。

4. 結論

本研究では北半球各地で観測された、顕著な高気圧性偏差（ブロッキング高気圧）の発達に伴うエネルギー収支解析を行った。ブロッキング高気圧発達に寄与する長周期擾乱の全エネルギー変換は、北東太平洋、西部太平洋、北部北大西洋、北米東岸でのブロッキングに伴うものが大きい。一方短周期擾乱による寄与は北部北大西洋、北太平洋で極大であるものの、長周期擾乱による寄与に比べると小さい。図には示さないが、長周期と短周期擾乱による傾圧エネルギー変換の分布と値は互によく似ている。しか

し長周期擾乱は傾圧エネルギー変換も正であるのに対して、短周期擾乱は負である。これは、移動性擾乱の渦度輸送の効果が長周期擾乱を強める様に働く一方、熱輸送の効果は弱める様に働くことと整合的である (Lau and Nath 1991)。傾圧エネルギー変換の性質の違いが両者の正味としてのブロッキング発達への寄与の違いとして現れたと考えられる。

参考文献

- Lau, N.-C., and M. J. Nath, 1991: Variability of the Baroclinic and Barotropic Transient Eddy Forcing Associated with Monthly Changes in the Midlatitude Storm Tracks. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 2589-2613.
- Nakamura, H., M. Nakamura and J. L. Anderson, 1997: The role of high- and low-frequency dynamics in blocking formation, *Mon. Weather Rev.*, **125**, 2074-2093.
- Nishii, K., H. Nakamura, Y.J. Orsolini, 2011: Geographical dependence observed in blocking high influence on the stratospheric variability through enhancement and suppression of upward planetary-wave propagation, *Journal of Climate*, **24**, 6408-6423.
- Onogi, K., et al., 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **85**, 369-432.