

# ロスビー波の砕波と飽和理論によるブロッキングと北極振動の励起メカニズム

## Excitation mechanism of blocking and Arctic Oscillation by the Rossby wave breaking and saturation

○ 田中博, 筑波大学計算科学研究センター, 茨城県つくば市, tanaka@sakura.cc.tsukuba.ac.jp  
H. L. Tanaka, Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305, Japan

In this study, energy spectrum of the barotropic component of the atmosphere is examined in the framework of the 3D normal mode decomposition. The energy slope which is proportional to the squared phase speed  $E = mc^2$  was derived by Tanaka et al. (2004) based on the criterion of the Rossby wave breaking and saturation. The barotropic energy generated at synoptic scales cascades up to the Rhines scale. It is found that the atmospheric blocking occurs when the energy level at the Rhines scale exceeds the Rossby wave saturation spectrum of  $E = mc^2$ . It is also found that the accumulated energy at the Rhines scale is ultimately transferred to zonal motion to excite the Arctic Oscillation.

### 1. はじめに

大気大循環の長周期変動の多くは順圧的な構造を持つ。これは大気の傾圧不安定擾乱が基本場の傾圧性を解消する際に、擾乱のエネルギーを傾圧成分から順圧成分に変換することによる。順圧成分に溜まったエネルギーは2次元流体力学の束縛の中で総観規模からRhines scaleに逆カスケードを生じ、準停滞性プラネタリー波の振幅が増幅する。傾圧不安定のプロセスにおいて、総観規模の傾圧成分からエネルギーを供給されて増幅する順圧ロスビー波は、順圧渦位の南北勾配が逆転する臨界振幅に達すると砕波する。この砕波条件からロスビー波の飽和スペクトルを導くと、波のエネルギーEはロスビー波の位相速度cの2乗に比例することが示された。その比例定数は単位面積あたりの大気質量mとなり、 $E=mc^2$ の飽和スペクトルが導かれる。これは図1のように解像度を上げた解析データからも検証できる(寺崎作成)。図中では比例定数をaとした。本研究では、順圧大気のエネルギースペクトルとそこでのエネルギー流の解析から、大気中で発現するブロッキングと北極振動(AO)が、特徴的で明瞭なエネルギー流により理解できることをデータ解析により確認した。

### 2. ロスビー波の飽和エネルギースペクトル

大気の順圧成分のエネルギーは傾圧不安定波の増幅の際に傾圧成分から供給される。そのため指数関数的に増幅する順圧ロスビー波は、ポテンシャル渦度の南北微分が負になる臨界振幅で砕波し飽和する。この臨界振幅の条件から、増幅する波の流速がロスビー波の位相速度よりも大きくなる時に、波が砕波するという条件が導かれ、そこから、波のエネルギーEの飽和スペクトルが $E=mc^2$  スペクトルとなる。ここで、mは単位面積あたりの空気の質量である。大気全エネルギー(運動エネルギーと位置エネルギーの和)をEとし、それを3次元ノーマルモードに展開する。そしてノーマルモードの位相速度cの関数としてエネルギースペクトルを表すと、順圧成分に対し $E=mc^2$  というエネルギースペクトルが見出せる。大気の順圧成分に見られたこの $E=mc^2$  乱流スペクトルは、ロスビー波の飽和理論により説明可能であり、これまでのエンストロフィーカスケード慣性小領域とは別の解釈が可能であることが示された。

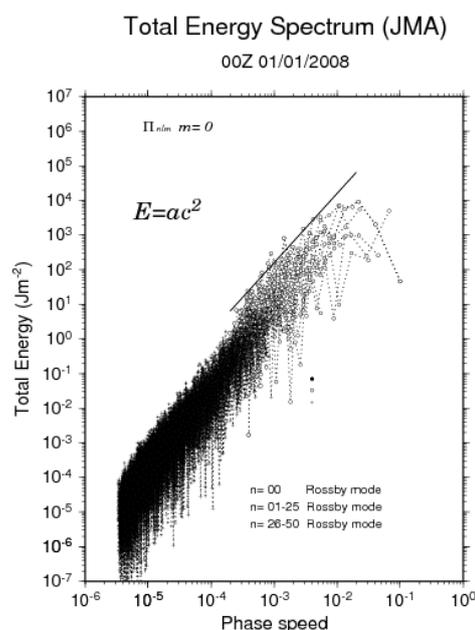


Fig. 1 Energy spectrum in phase speed domain.  
(by Koji Terasaki with JMA NuSDaS data.)

### 3. 位相速度空間におけるエネルギーフラックス

横軸にロスビー波の位相速度を取って解析した特徴的なエネルギースペクトルに対し、位相速度空間におけるエネルギーフラックスを解析した結果、波-波相互作用は図2のようになり、波-帯状流相互作用は図3のようになった。用いたデータは50年間のNCEP-NCAR再解析であり、高波数側でスムージングが行われているため、スペクトルは高波数側でやや落ちてしまう。

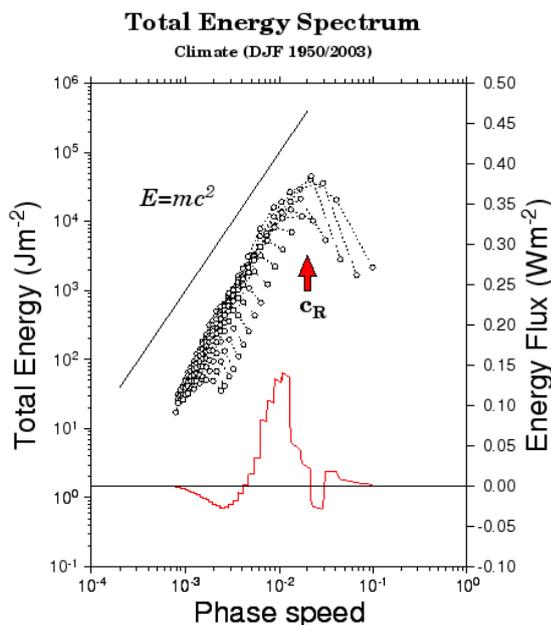


Fig. 2 Energy spectrum and wave-wave interactions in the phase speed domain. Energy peak is located at the Rhines scale denoted by an arrow where the upscale energy cascade terminates.

波一波相互作用の結果は、総観規模で大気の傾圧成分から生成された順圧エネルギーが、逆カスケードによりRhines scaleにまで輸送されることを示している。エネルギーの一部は総観規模からメソ擾乱へとカスケードしていることも明らかになった。Rhines scaleよりも左の領域は乱流領域であり、強い非線形性により逆カスケードが可能であるが、Rhines scaleの右側では、位相速度で特徴付けられる線形項が非線形項に勝り、ノーマルモードとしての波領域が形成される。この波領域には波一波相互作用による逆カスケードが到達できないため、エネルギー輸送はRhines scaleで遮断され、そのためそこにエネルギーピークが形成される。Rhines scaleはロスビー波の西進速度と平均帯状流による輸送速度がバランスするスケールであり、ロスビー波は停滞波となる。ここにエネルギーが過剰に蓄積されると、停滞性のロスビー波が $E=mc^2$ の碎波条件を越えて渦位の南北傾度が逆転し、ブロッキングとなる。

一方、図3の波一帯状流相互作用の50年平均値によると、エネルギーはRhines scaleからその右側のさらに大きなスケールへと輸送される。ロスビー波の振動数と波数の比の極限値から、帯状流に関しての位相速度を求め、帯状流のエネルギーを同一の位相速度空間にプロットすると、図中の黒丸のようなスペクトルになり、南北モード3でエネルギー輸送が遮断されていることがわかる。この南北モード3とは、北極振動の構造を特徴づけるモードであり、ここにエネルギーが過剰に蓄積されると、ポーラーゼットが強化され、同時に亜熱帯ゼットが弱化する。

図中の青線は、波一波相互作用によるフラックスと波一帯状流相互作用によるフラックスを足したもので、全フラックスを表す。解析の結果は、総観規模擾乱で生成されたエネルギーが、逆カスケードにより、Rhines scaleを越えて帯状流の南北波数3の北極振動モードに達することを示している。総観規模擾乱の活動により、亜熱帯ゼットの運動量がポーラーゼットに運ばれて、北極振

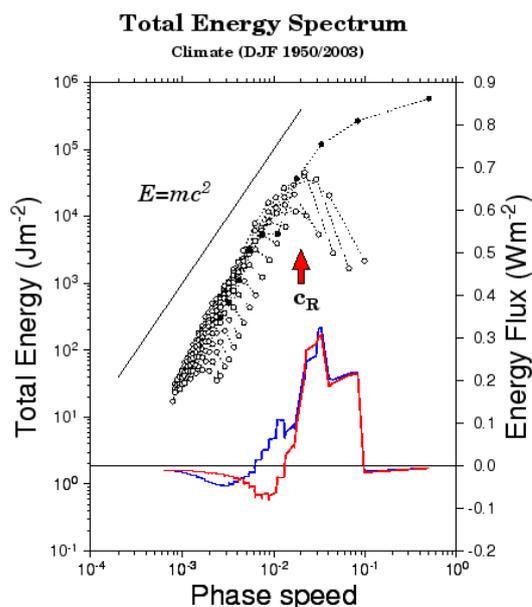


Fig. 3 Energy spectrum and zonal-wave interactions (red line) in the phase speed domain. Blue line denotes the sum of zonal-wave and wave-wave interactions.

を励起する特徴を示している。

#### 4. ブロッキングと北極振動

最後に、ブロッキングの形成と北極振動の励起に重要と考えられるこれらのエネルギーフラックスの事例解析を行った。図4は1989年2月にアラスカ付近で大型のブロッキングが発生した際の波一波相互作用によるエネルギーフラックスを、図2の気候値と比較したものである。解析結果によると、ブロッキングが形成される段階で、総観規模擾乱からRhines scaleに向かって、年平均の2倍以上の逆カスケードが発生していることがわかる。その結果、ロスビー波が停滞波となるRhines scaleに、半年の2倍のエネルギーが蓄積され、エネルギーレベルはロスビー波の碎波条件である $E=mc^2$ を越える。しかし、乱流領域と波領域の中間のRhines scaleでは、碎波条件である渦位の転倒を起こしても、非線形相互作用による波の完全碎波は起こらないため、渦位が転倒したまま長期間停滞する。これがブロッキングである。つまり、ブロッキングとは、逆カスケードにより大規模場に向かって輸送されるエネルギーがRhines scaleで過剰に蓄積され、 $E=mc^2$ で示される飽和スペクトルを越えて長期間停滞するロスビー波として解釈することができる。

一方、図3の波一帯状流相互作用によるエネルギーフラックスを、北極振動指数が正の時と負の時に分けてコンポジットした結果を図5に示す。比較のために図3で示した年平均値も添えてある。解析結果によると北極振動指数が正の時には、帯状流の南北波数3へ向かうエネルギー流は年平均の倍となり、逆に北極振動指数が負の時には、年平均の半分となることが示された。フラックスの湧き出しはどちらの場合もRhines scaleにあるので、停滞性ロスビー波からのエネルギー供給であることが明らかである。

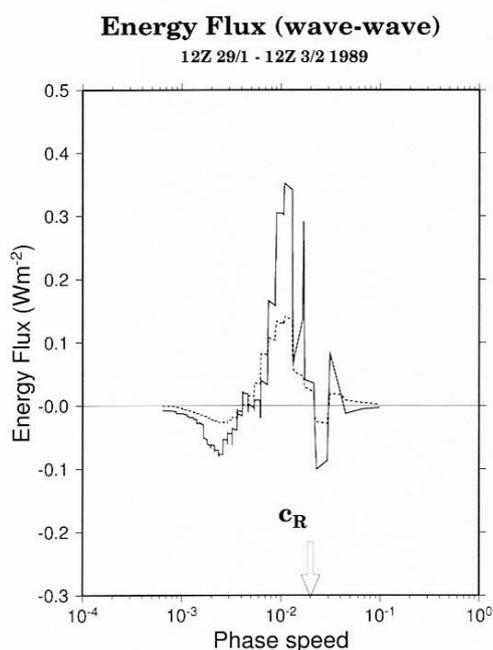


Fig. 4 Energy flux by the wave-wave interaction in phase speed domain for the climate in Fig. 2 and for the period when a large-scale blocking occurs near Alaska in 1989.

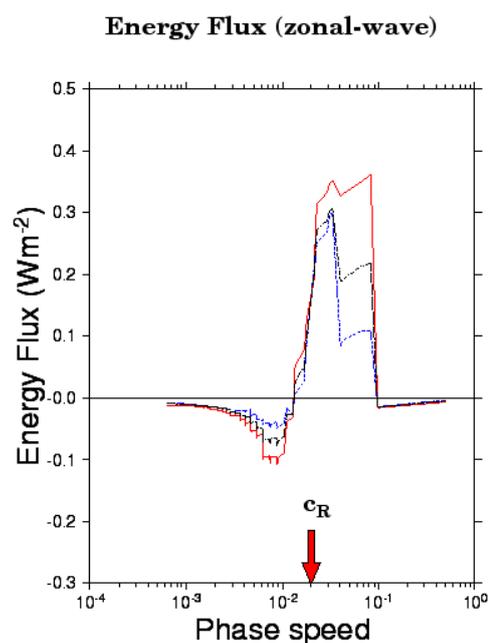


Fig. 5 Energy flux by the zonal-wave interaction in phase speed domain for the climate in Fig. 3 (black) and for the composite of the AO positive (red) and AO negative (blue).

## 5. まとめ

本研究の結果、傾圧不安定により総観規模擾乱の傾圧成分から順圧成分に供給された順圧エネルギーは、2次元流体力学の束縛の中で逆カスケードを生じ、これがブロッキングや北極振動といった大気の大規模変動のメカニズムとなっていることを示した。順圧大気におけるエネルギーの逆カスケードは非線形項が卓越する乱流領域で生じる。しかし、3次元スケールを示す位相速度が増大するにつれて、線形項が卓越する波領域となるため、線形項と非線形項がバランスするRhines scaleで逆カスケードが切断され、そこにエネルギーが蓄積される。この際、それぞれのスケールで渦位が南北に転倒するような波の振幅が、波の碎波条件を定め、これにより $E=mc^2$ というエネルギースペクトルが導かれる。しかし、乱流領域から波領域にシフトするRhines scaleでは、この臨界飽和点を越えてエネルギーが蓄積され、渦位が南北に転倒しても、完全碎波が起こらないままロスビー波として長期間停滞する。これがブロッキングに他ならない。つまり、ブロッキングとは、逆カスケードにより大規模場に向かって輸送されるエネルギーが、Rhines scaleで過剰に蓄積され、 $E=mc^2$ で示される飽和スペクトルを越えて長期間停滞するロスビー波、として解釈することができる。

一方、ブロッキングとしてRhines scaleに過剰に蓄積されるエネルギーは、波-帯状流相互作用によって帯状流に持ち去ることが可能である。帯状流の南北波数3にそのエネルギーが過剰

に輸送されると、その特徴的な南北構造によりポーラージェットが強化されると同時に亜熱帯ジェットが弱められる。これが北極振動のメカニズムであり、帯状流への輸送が過剰の時、北極振動指数が正となり、不足すると指数が負となる。南北波数3で特徴付けられる北極振動の空間構造は、順圧力学場における特異固有解理論によって理解することができる。このように、ブロッキングと北極振動という異なる現象が、順圧大気におけるエネルギーの逆カスケード、ロスビー波の飽和理論、特異固有解理論により、体系的に理解することが可能となる。

## 参考文献

- (1) Tanaka, H.L., Y. Watarai, and T. Kanda, 2004: Energy spectrum proportional to the squared phase speed of Rossby modes in the general circulation of the atmosphere. *Geophys. Res. Letters*, 31(13), 13109, doi: 10.1029/2004GL019826.
- (2) Tanaka, H.L. and K. Terasaki, 2005: Energy Spectrum and Energy Flow of the Arctic Oscillation in the Phase Speed Domain. *SOLA*, 3, 25-28
- (3) Terasaki, K. and H. L. Tanaka, 2007: Barotropic Energy Spectrum by the Rossby Wave Saturation in the Zonal Wavenumber Domain, *SOLA*, Vol. 3, pp.25-28.