

学 位 論 文 題 名

On the role of synoptic disturbances in formation
and maintenance of blocking flows.

（ブロッキング現象の生成・維持過程における
総観規模擾乱の役割に関する数値的研究）

学位論文内容の要旨

中高緯度対流圏で観測されるブロッキング現象は、主として、大西洋東部や太平洋東部で発生し、偏西風が南北に大きく分流する循環場で特徴づけられる。また、ブロッキング現象は、一週間以上にも渡る持続性を持ち、一度発生すると、上流から東進してくる総観規模擾乱の進行を妨げる（ブロックする）ため、地域的な異常気象を引き起こす主要な要因として知られている。Shutts(1983)は、ブロッキング現象に伴う偏西風の分流で変形された総観規模擾乱によって生ずる渦度フラックスの収束発散の効果(eddy straining 効果)で、このブロッキング現象が定性的には維持されていることを示唆した。しかしながら、この eddy straining 効果が、基本場の分流構造を維持するのにどの程度寄与しているかという定量的評価や、その効果の基本場に対する依存性は明確になっていない。また、ブロッキング現象の生成に果たす eddy straining 効果の役割も議論されていない。本研究では、順圧準地衡風 β チャンネルモデルを用いて、まず、eddy straining 効果の有効性について詳細な検討を行った。一方、最近の観測データを用いた解析的研究(Nakamura et al. 1997)により、ブロッキング生成時に長周期変動成分の寄与が重要であることが指摘されている。そこで、本研究では、上記の数値モデルを用いて、長周期変動が存在する基本場において、ブロッキング現象のように分流を持つ流れ場がどのようなメカニズムで形成されるのかに関しても力学的に詳しく解析した。

まず、分流のある基本場を形成するために、順圧 β 平面準地衡風方程式の非粘性定常解である西風中のモドン解に相当する渦度強制を与えてモデルの定常解を求めた。その結果、このモデルには一様な西風中で孤立構造を持つ2つの定常解が存在することがわかった。一つはモドン解とよく似た南北双極子構造を持つ「ブロッキング解」であり、もう一方は帯状風が卓越する「帯状解」である。次に、安定な定常解を基本場と仮定し、基本場の分流域のはるか上流で総観規模擾乱を模した微小振幅の移動性擾乱を生成させた。この擾乱に伴うポテンシャル渦度(PV)フラックスの収束発散によって励起される二次流れと基本場との類似性を調べることで、eddy straining 効果の有効性を準線形の範囲で評価した。

「ブロッキング解」を基本場としたとき、擾乱に伴う時間平均したPVフラックスの分布は、チャンネル中央の基本場に伴う分流域の上流側で、北側と南側で発散・収束する双極子構造を持っていた。しかし、この分布を元に求められる二次流れ場は、基本場の双極子構造とは異なる四重極構造を持ち、それによって基本場の双極子構造は下流に移動する傾向を持つことが示された。一方、基本

場が「帯状解」の場合には、二次流れ場は、弱い分流を持つ基本場を維持する傾向にあった。すなわち、eddy straining 効果の有効性は基本場に依存することが分かった。さらに、「ブロッキング解」を基本場として、与える移動性擾乱の水平スケールをわずかに変化させた場合、PV フラックスの分布はほとんど変化しないが、二次流れ場は大きく変化することが示された。このことは、eddy strainig 効果は、総観規模擾乱の水平スケールにも大きく依存していることを示している。また、非線形モデルを用いた実験でも、移動性擾乱による eddy straining 効果は、「ブロッキング解」に伴う基本場の分流構造を粘性散逸に抗して維持するには定量的にも不十分であることが示された。

次に、現実大気を念頭におき、基本場に長周期変動が存在する場合におけるブロッキング現象の生成、維持に果たす eddy straining 効果を明らかにするため、上記のモデルに東西方向に Gauss 型の孤立山岳 (高さ h) を加えて同様の数値実験を行った。

まず、このモデルで、様々な一様東西風 (U) の大きさに対して、定常解や周期解を求め、その分岐構造を調べた。山岳の高さ h が 900 m の場合、一様東西風 U の大きさが 10 m/s から 20 m/s の範囲では、東西波数 4 の波成分が卓越する安定定常解からなる解の枝と、 $U > 12$ m/s で安定周期解が分岐する枝の 2 つが得られた。次に、これらの解を基本場とし、総観規模擾乱に相当する移動性擾乱を生成する渦度強制を与えて時間積分を行った。この渦度強制により生成される移動性擾乱は、位相速度 U を持つと仮定し、孤立山岳の風下側に存在する基本流に伴う気圧の谷付近で与えた。

例えば、 $h=900$ m、 $U=14$ m/s で存在する、周期が約 16 日の周期解を基本場と仮定し、移動性擾乱を強制すると、孤立山岳の風下側に存在する基本場の気圧の峰付近で、東西風が南北に分流し、それが 10 日以上持続するブロッキング状態に酷似した流れ場が出現することが示された。この分流を伴う流れのパターンは $U \leq 15$ m/s で頻繁に出現する。この流れ場の生成・維持過程において移動性擾乱や長周期変動の役割を定量的に示すため、流れ場の主成分分析をもとに、このモデルにおける典型的な分流を伴う流れ場 (以下、ブロッキング現象) を、以下の様に客観的に定義した。まず、流れ場の第一主成分は $U \leq 15$ m/s で、ブロッキング現象発生時に酷似した流れのパターンを持ち、 $U=14$ m/s においては、その寄与率は 81.4% に達する。このため、 $U=14$ m/s での第一主成分に伴うスコアの値が、その標準偏差を上回る日が 10 日以上連続した事例をブロッキングと定義した。また、その値が初めてその標準偏差を越えた時を、ブロッキングのオンセットと定義した。このように定義したブロッキングの出現頻度は、 $U \leq 15$ m/s では大変多いのに対し、 $U = 16$ m/s では急激に少なくなり、 $U = 17$ m/s では皆無となった。このことは、ブロッキング現象の出現は基本場に大きく依存していることを意味している。

次に、モデルの積分結果に 10 日のローパスフィルターを施したものを長周期変動成分、それ以外の成分を短周期変動成分と定義し、 $U = 14$ m/s で出現するブロッキング現象について、それぞれの変動成分がモデルで発生したブロッキング現象の生成過程にどのように寄与しているかを PV 方程式を用いて詳しく解析した。ここで、短周期変動成分の主要成分は、渦度強制により与えた移動性擾乱である。この解析により、ブロッキングの生成時には長周期変動成分と短周期変動成分との相互作用を表現する項が卓越し、長周期変動成分に伴う流れの場による短周期成分の PV の移流が増大することを契機として、移動性擾乱が持つ短い時間スケールでブロッキングが生成することが示された。

一方、時間変動する基本場における、移動性擾乱に伴う eddy straining 効果を定量的に見積もるため、短周期変動成分に伴う渦度フラックスの発散場にローパスフィルターを施したものを強制力として与え、PV 方程式を時間発展させた。その結果、時間積分の初期値としてブロッキングオ

ンセット 10 日前, 5 日前の長周期変動成分を与えた場合には, ブロッキングは発生しないことが示された. 一方, 時間積分の初期値としてブロッキングオンセット時の長周期変動成分を与えた場合には, ブロッキングは維持されることが示された. すなわち, 移動性擾乱に伴う eddy straining 効果は, ブロッキングの形成には重要ではないが, ブロッキング現象に伴って, 明瞭な分流場が形成されると, ブロッキング現象を維持するように機能し始めることが分かった. このことは, やはり eddy straining 効果の有効性が基本場の流れの場に強く依存することを意味している.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 久保川 厚

副 査 教 授 山 崎 孝 治

副 査 助教授 渡 部 雅 浩

副 査 教 授 木 本 昌 秀

(東京大学気候システム研究センター)

副 査 助教授 向 川 均 (京都大学防災研究所)

学 位 論 文 題 名

On the role of synoptic disturbances in formation and maintenance of blocking flows.

(ブロッキング現象の生成・維持過程における
総観規模擾乱の役割に関する数値的研究)

対流圏ブロッキング現象は、偏西風が南北に大きく分流する構造によって特徴づけられ、一度発生すると1週間以上に亘り持続するため地域的な異常気象を引き起こすことが知られている。しかし、粘性散逸に逆らって長期間安定して存在するブロッキングの維持機構や生成機構は必ずしも明らかにされていない。例えば、Shutts (1983)は、ブロッキングに伴う分流構造により変形を受けた総観規模擾乱によって生ずるポテンシャル渦度(PV)フラックスの収束発散の効果(eddy straining 効果)によってブロッキングが維持されていると主張しているが、eddy straining 効果の基本場依存性やブロッキング現象発生時におけるその役割は未解明のままである。さらに、近年、観測データの解析からブロッキング生成時に低周波変動成分の寄与が重要であること指摘されているが(Nakamura et al. 1997)、低周波変動が存在する場合のブロッキングの発生や維持に果たす総観規模擾乱の役割の詳細も不明なままである。

申請者は、上記のような問題を解明するため、等価順圧準地衡流 β チャンネルモデルを用いて詳しい解析を行った。非粘性等価順圧準地衡流モデルには、西風中のモドン解と呼ばれる分流を伴う非線型定常解が存在することが知られており、これまで、ブロッキングのモデルとして使用されてきた。申請者は、まず、このモドン解を基本場としたときの eddy straining 効果の有効性について詳細な検討を行った。ただし、現実にはエクマン摩擦も重要であるため、エクマン摩擦を含むモデルでモドン解に相当する渦度強制を与えた。その場合、このモデルにはモドン解とよく似た南北双極子構造を持つ「ブロッキング解」

と帯状風が卓越する「帯状解」の2つの定常解が存在することが判った。次に、安定な定常解を基本場と仮定し、基本場の分流域の上流で発生させた総観規模擾乱を模した微小振幅の移動性擾乱に伴う PV フラックスの収束発散によって励起される二次流れ場と基本場との類似性を調べ、これにより、eddy straining 効果の有効性を準線形の範囲で評価した。その結果、「ブロッキング解」を基本場としたときの二次流れ場は基本場を維持できるものではなかった。また、PV フラックスの分布は移動性擾乱のスケールにはあまり依存しないが、二次流れ場は大きく依存するため、eddy straining 効果は、総観規模擾乱の水平スケールに大きく依存することが示された。さらに、非線形モデルを用いた実験でも、移動性擾乱による eddy straining 効果は、少なくともこのモデル設定では、基本場の分流構造を粘性散逸に抗して維持するには定量的にも不十分であるという結果を得た。

次に、申請者は、基本場に低周波変動が存在する場合のブロッキング現象の生成、維持に果たす eddy straining 効果を明らかにするため、上記のモデルに孤立山岳を加えて同様の数値実験を行った。まず、このモデルで、一様東西風の様々な強さに対して定常解や周期解を求め、その分岐構造を調べた。次に、これらの解を基本場とし、総観規模擾乱に相当する移動性擾乱を生成する渦度強制を孤立山岳の風下側に与えて時間積分を行った。その結果、基本場に低周波変動が存在する場合には、移動性擾乱によってブロッキング現象と酷似する分流を伴う流れ場が生じることが示された。このブロッキングの発生頻度は基本場に強く依存する。また、この分流現象は移動性擾乱の移流時間スケールで短時間に発生し、その発生前には分流域の上流で西風が強くなることを見いだした。さらに、分流域での渦度収支を解析することにより、その発生には、移動性擾乱に伴う eddy straining 効果は重要ではなく、低周波変動と移動性擾乱との相互作用が本質的であることを示した。一方、分流が十分発達した後には、eddy straining 効果によってその分流が維持されていることが、同様の解析により、明らかになった。

上述のように、本研究は、これまで明らかではなかった、基本場や移動性擾乱の特徴に対する eddy straining 効果の依存性を正しく評価し、さらに、低周波変動が存在する基本場における eddy straining 効果とブロッキングの関係について、分岐理論や各種数値解析手法を駆使して詳しく論じたものであり、その結果は、今後のブロッキングの理論的・数値的研究や観測データの解析法等に対して多くの示唆を与えるものである。審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また、研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ、申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した。