

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 15 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540515

研究課題名(和文) 大気ブロッキングの形成・持続機構に関する観測的・数値実験的研究

研究課題名(英文) Observational and numerical study on the generation and maintenance mechanism of atmospheric blocking

研究代表者

伊藤 久徳 (Itoh, Hisanori)

九州大学・理学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：80112100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：ブロッキングとは時に中高緯度に形成される大規模な高気圧のことで、長く持続するという特徴を持っている。多くの異常気象にもブロッキングが関係する。しかしこれまでの長い研究にもかかわらず、その持続メカニズムは分かっていなかった。

この難問に対し、我々はブロッキングは高気圧なので、移動性高気圧を吸収することができるという新しいアイデアを提出した。移動性高気圧は普遍的に存在し、ブロッキングの近辺へはジェット気流が運んでくる。この吸収によってブロッキングは常にリフレッシュされ、持続することができると考えたわけである。この考えを実際のブロッキングのデータ解析と数値シミュレーションから実証することができた。

研究成果の概要(英文)：Blocking is a large-scale anticyclone sometimes formed in mid- and high-latitudes, persisting for a long time. It is closely related to many anomalous phenomena such as hot summer in 2010 and cold winter and heavy snow in 2011-2012. It is therefore important to clarify how it persists so long. However, its maintenance mechanism has not been clarified in spite of many studies.

To this tough problem, we proposed a new idea that blocking anticyclones can selectively absorb synoptic anticyclones. Synoptic anticyclones are ubiquitous and are transported near blocking anticyclones by the jet stream. Thus, blocking anticyclones are always refreshed by this absorption, and can persist for a long time. This idea was proved by data analyses of real blocking and numerical simulations for various possible settings.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：ブロッキング テレコネクション 渦位 移動性高気圧 低周波変動 準定常

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) ブロッキング研究の重要性

ブロッキングとは、対流圏中高緯度偏西風帯において半径 5000km にも及ぶ巨大な高気圧が発生し、その状態が 1 週間以上にわたって持続する現象である。この巨大な高気圧は、偏西風を減速・分流させ、前面で移動性高低気圧をブロックするため、ブロッキング高気圧とよばれる。

いったんブロッキングが発生すると、通常と異なる偏西風の流れが持続するため、熱波や豪雪などの異常気象が起こることが多い。実際、2010 年夏の猛暑や 2011-12 年冬の寒冬・豪雪もブロッキングと関係していた。また、ブロッキングは予報モデルで再現されにくく、中期予報が外れる大きな要因となる。このようにブロッキングの与える影響は甚大であるが、その形成・持続のメカニズムは未解明である。「20 世紀最後の難問」(木本 1993) と称されたブロッキングは、21 世紀に持ち越された第一級の研究課題である。

### (2) 研究の動向

ブロッキングの特筆すべき特徴は散逸の時間スケールを上回る持続性である。したがってその持続のためには、散逸に対しそれを補う強制が必要となる。その強制源が、ブロッキングによってブロックされる移動性高低気圧自体であるとの可能性が示唆されてきた。つまり、高周波擾乱(移動性高低気圧もしくは渦)の非線形相互作用による低周波変調強制が、ブロッキング(低周波変動の一種)の持続性を保証しているという理論である。

Shutts (1983, 以下 S83) は上記のメカニズムについて、渦がブロッキングによって南北に引き伸ばされる作用により、ブロッキングを強化する過度強制を与えるという Eddy Straining Mechanism (以下, ESM) 理論を提唱し、数値モデルでその理論を検証した。この理論はその後、大きな影響を与え続けてきた。また逆に言うと、それに替わる有力な理論は提案されてこなかった。

しかしながら、ESM 理論では渦の経路(ストームトラック)がブロッキングに対してわずかに南北変位すると強化作用が失われてしまうことが報告されている (Arai and Mukougawa 2002)。渦の東西変位も同様の作用がある (Maeda et al. 2000)。また渦だけでなく、低周波である Rossby 波が持続に大きく寄与している領域もあることが指摘されている (Nakamura et al. 1997)。これらの点から ESM の現実場への適用について、多くの研究者は懐疑的になりつつあった。そのため、ESM に替わる新しいブロッキング持続メカニズムの提案が要請されていた。

このような背景のなかで、本研究が登場した。

## 2. 研究の目的

本研究ではまず、これまであいまいに扱われてきたブロッキングの形成と持続を明確

に分け、両者はまったく異なるメカニズムによることを提案した。なぜなら両者は、時間スケールのオーダーが異なるからである(前者は 1~2 日、後者は 1 週間以上)。これによってそれぞれに即したメカニズムが提案できることになる。

このうちの持続メカニズムとして、ブロッキングによる低渦位(主として移動性高気圧)の選択的吸収メカニズム (Selective Absorption Mechanism, 以下, SAM) を提案した。まずそれを説明する。これは 2 つの柱からなる。ひとつは、持続メカニズムを保存量の供給メカニズムとして捉え直すということである。保存量が散逸によって失われるのに抗して、外部から保存量が供給されて現象は持続することができる。ブロッキングは低渦位を持つ循環として特徴づけられるので、この場合の保存量としては渦位(PV)が適切である。このように捉え直すと、次の筋書きが描ける。ブロッキングは高気圧性渦なので、移動性高気圧と同じ極性(低 PV)を持っている。このような同じ極性の渦同士は基本的に引き合い、併合するという性質を持っている。これは本質的に 2 つの台風が引き合うという Fujiwhara 効果と同じである (Fujiwhara 1921)。従って移動性高気圧がブロッキング周辺にあると、ブロッキングはそれを選択的に吸収することになる。またそれによってブロッキングは低渦位を供給されることになり、持続できることになる。

なおこれまでは高気圧のみ存在する型ブロッキングを対象に述べてきたが、南に低気圧を付随するダイポール型にも SAM は適用可能である。なぜなら南の低気圧は同様に移動性低気圧を併合できるからである。

この新しい持続メカニズムの提案自体が本研究の大きな柱であるが、本研究ではさらにそれを多面的に立証し、確立することを目的とした。

一方、形成メカニズムに関しては、新しいアイデアはあったものの主として時間的な制約から、十分に研究を進めることができなかった。それゆえ以下では、もっぱら持続メカニズムについて記すことにする。

## 3. 研究の方法

SAM の実証を主にデータ解析と数値実験から行う。データ解析は流跡線解析で、移動性高低気圧からの粒子の追跡(前方流跡線)とブロッキング内粒子の起源の追跡(後方流跡線)の両面から行う。前者では高気圧性粒子が選択的にブロッキング内部に取り込まれること、後者では多くの粒子が移動性高気圧起源であることを明らかにする。これによって SAM が現実の大気で働いていることが実証される。数値実験は順圧のベータ面と球面の両方で行う。パラエティーを持ったモデルを用いて、どのような階層、どのような設定であれ、SAM が効率的に働いていることを示すとともに、それぞれの性質とそれらの間

の違いも明らかにする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 主な成果

まず前方流跡線解析によって、ブロッキング持続期の大気の Lagrange 的な運動を解析する。移動性高・低気圧(渦)それぞれの流跡線を解析することで、渦とブロッキングの相互作用について調べる。今回の解析に選択した事例は 1990 年 11 月から 2005 年 4 月までの冬期(11 月から 4 月)で、太平洋域と大西洋域で発生したブロッキングをそれぞれ 5 事例ずつ選択し、解析を行った。

全部で 10 事例中の 2 事例について、ブロッキング持続期間中における高・低気圧性渦起源粒子のブロッキング周辺での振る舞いを図 1 に示す。1996 年の太平洋事例(P-1996)において、2 月 28 日 18UTC に朝鮮半島付近を通過する渦成分 PV で示される移動性高気圧の負 PV(青)、27 日 06UTC に通過する移動性低気圧の正 PV(赤)の 5 日後までの流跡線が図 1a に示されている。3 月 1 日 00UTC の PV の低周波成分で示されるブロッキング(コンター、アラスカ付近)に向かって、移動性高気圧のみが高気圧性に回転しながら吸収されている様子が見られる。同様に、1996 年の大西洋事例(A-1996)に関して、3 月 5 日 00UTC に五大湖付近を通過する移動性高気圧(青)9 日 00UTC に通過する移動性低気圧(赤)の流跡線が図 1b に示されている、大西洋東部付近の北東方向に亜熱帯気団を張り出した型のブロッキング(3 月 9 日 00UTC の低周波成分 PV)に向かって移動性高気圧のみが近づき、巻き込まれている様子が見られ、逆に低気圧に関してはブロッキングによって経路を妨げられつつも、ブロッキング高気圧から遠ざかりながら下流に流されていく様子が見られる。同様に他の 8 事例についても高・低気圧性渦の非対称な動きと渦の選択的吸収と整合的な結果が得られた。

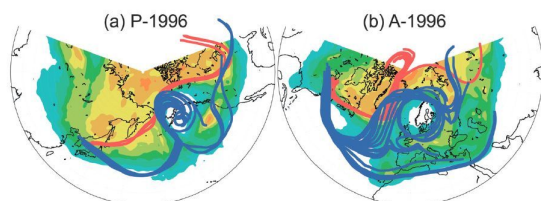


図 1 1996 年の太平洋(P-1996)と大西洋(A-1996)のブロッキングに対する前方流跡線解析の結果。青が移動性高気圧起源の粒子、赤が移動性低気圧起源の粒子を表す。全体として西から東へ動いている。背景の色は低周波の PV で、暖色系が低 PV を示す。

さらに、いくつかの事例においては、南側のブロッキング低気圧に向かって、移動性低気圧起源の粒子が吸収されている様子も見られた。ブロッキング低気圧については、型のブロッキングの場合にも時に(半日から

2 日程度)に南に低気圧が停滞することがあるので、低周波 PV においてブロッキング南部の高 PV 成分が表現されない場合でもその領域に向かって低気圧性渦起源の粒子が吸収されることは十分にあり得る。いずれの事例においても、移動性高気圧起源の粒子は、ブロッキング高気圧に吸収されるという SAM の特徴を示す結果が得られた。

以上から移動性高気圧がブロッキングに吸収されることはわかったが、だからと言ってこれでブロッキングは移動性高気圧によって維持されているとは結論できない。なぜならブロッキングに元から存在する粒子や亜熱帯からの粒子(亜熱帯の粒子は一般に低 PV で特徴付けられる)の貢献がそれ以上に大きいかもしれないからである。そこでブロッキング内部の粒子の多くが移動性高気圧起源であることを示す必要があり、そのために後方流跡線解析を行った。その結果が図 2 に示されている。ほとんどの粒子はジェットの上流からやってきており、起源をさかのぼると、移動性高気圧起源であることがわかる。以上からブロッキングは移動性高気圧によってのみ維持されることが実証された。

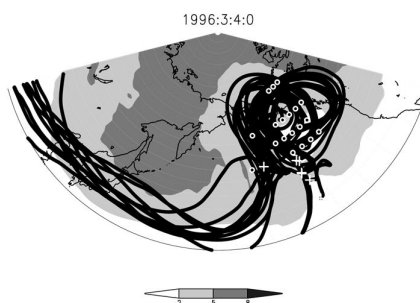


図 2 P-1996 のブロッキング内部からの後方流跡線解析の結果。6 日間追跡している。

印は後方流跡線の初期、×印は 6 日後を示す。多くの粒子は、描画範囲を越えて、より上流側までさかのぼっている。背景の陰影は低周波 PV でし、薄いほうが低 PV を表す。

次は数値実験である。そのうちまず最初に、等価順圧ベータ平面チャンネルでの準地衡 PV モデルを用いて、渦によるブロッキング持続性の強化を検証する。SAM に重要である渦の非対称性の効果を含めるために、オリジナルな非線形方程式で実験を行った。初期値はモドン解でダイポール型ブロッキング、ライダー解で型ブロッキングを模したものとする。順圧モデルのため渦は自立的には生成されないため、ブロッキングの上流に設定された wavemaker で人工的に渦を生成し、それが移流されてくるという設定にしている。この wavemaker のあるなしと、その位置を南北に変位させることによって、ストームトラックの変位に対するブロッキングの持続性の鋭敏さを調査する。wavemaker を置かない実験

を no-eddy 実験, wavemaker の中心をブロッキング中心と同じ緯度に置く実験を no-shift 実験,そして no-shift 実験から南に 1000 km 変位させた実験を shift 実験と名付けることにする。

ダイポール型ブロッキング(モドン解)での no-eddy 実験では,下流への Rossby 波の射出によってエネルギーが持ち出され,ブロッキングは十分な振幅を維持できなくなり背景風で下流へと流されていく。それに対して No-shift 実験の渦の時間発展を解析したところ,ブロッグ北/南側のブロッキング高/低気圧に向かって高/低気圧性渦が吸収されていく様子が見られた。この様子は shift 実験でも同様に見られ,ブロッキングによる同極性の渦の選択的吸収が起こっていることを示した。このためこれら 2 つの実験では,積分開始後 15 日目でも振幅が強いままでブロッキングが維持されていることがわかる。定量的な指標を用いても,ブロッキングの維持が明瞭に示される。

型ブロッキング(ライダー解)の場合にも,渦の選択的吸収の様子が見られた。また,型ブロッキングの場合には,ダイポール型ブロッキングよりも停滞性や振幅が強くなっている。一般に渦と渦の相互作用は,渦の大きさが強ければ強いほど強く働くと考えられるので,ブロッキング高気圧がダイポール型るときよりもより強いライダー解のときに SAM が効果的に働いたためと考えることができる。

ジェット役割を見るため,ジェットを導入した数値実験も行った。ジェットを導入すると,ブロッキングの持続がより良くなった。その理由は 2 つある。ひとつは,ジェットが渦を速やかにブロッキング周辺域に運んでくるためである。もうひとつは,一般に移動性高/低気圧はブロッキングに近づくまでに南/北へ向かう性質がありブロッキング域に供給されにくい傾向があるが,ジェットがあると,それによく捕捉され,ブロッキング域まで効率的に運ばれるためである。

最後に球面モデルの結果を示す。wavemaker の中心緯度は  $45^\circ$  として球面上の領域に限られているという制約から,南に  $10^\circ$  シフトさせた実験に加えて,北に  $10^\circ$  シフトさせた実験も行った。no-eddy 実験の時間発展では積分開始後 10 日目ですでにブロッキングの原型が失われて,北側のブロッキング高気圧が渦らしい構造をもたなくなる。これは,球面では Rossby 波射出が強く起こったためと考えられる,それに対して, no-shift 実験では 15 日目までもブロッキングの原型が残っていることがわかる。また,ブロッキング低気圧に対してブロッキング高気圧が大きい様子も示していて,このことは現実でのブロッキング事例でよく見られる構造である。wavemaker を南北にシフトさせた実験を見ても,15 日目でも初期ブロッキング経度・緯度付近に振幅を維持してロック

されている様子が見られる。またこれらすべてで移動性高気圧がブロッキング高気圧に吸収されていく様子が見られる。このように,球面実験ではより顕著に SAM が有効に働くことと,球面の効果が現実のブロッキングに見られるブロッキングの構造をよく示していることがわかる。

SAM の本質である,高気圧性渦が高気圧性渦を吸収するというメカニズムは自明な理論であるように見えるにも関わらず,現在まで ESM の概念が広く受け入れられている理由は,S83 の論理のエレガンスさだけでなく,渦の引き伸ばしが実際のデータで解析されてきたためである(Hoskins et al. 1983; Nakamura and Wallace 1993; Higgins and Schubert 1994)。だがこの渦の引き伸ばしはブロッキングと渦の相互作用の解析に時間フィルターの手法を用いてきたことによる見かけの結果であることも示された。このことも重要な結果である。

ブロッキングに関して,テレコネクションの研究も主にデータ解析の立場から進めた。テレコネクションパターンが双極子構造を持つことから,これらとジェットの変動を関連づける研究が行われてきた。しかしその関係は 1 対 1 対応しておらず,解釈が複雑である(Woolings et al. 2010)。これは解析に高度場を使用しているためであると考えられる。大規模循環場において回転風が卓越することを考えると,流線関数を使用すればジェットの変動と整合的なパターンが得られるかもしれない。したがって,北半球の循環場の変動に注目する際,流線関数を用いるのが合理的であり,高度場と異なるパターンを抽出できる可能性がある。このような考えから,流線関数場を用いてテレコネクションパターンの抽出を行った。

その結果,2 つの新しいパターンを抽出できた。作用中心が赤道を挟んで太平洋の中緯度に対称なパターン(南北太平洋振動パターン)と東大西洋パターンに似ているが南側の作用中心が西に移動しているパターン(中央大西洋パターン)である。後者は北大西洋振動パターンと位相空間において直交しているので,両者をともに用いることによって,大西洋での変動の全体を合理的に解釈できる可能性がある。

## (2) 成果の位置づけとインパクト

ブロッキングの新しい持続メカニズムは,その論理的明確さと首尾一貫性・様々なパラメータに対するロバストネスから大きなインパクトを与えたと言える。また上記の研究を通じてそのメカニズムは十分に確立されたと考えている。

気象コミュニティ全体に認知されたことも,下記の論文(2)・(3)の第一著者(山崎哲)が 2013 年度日本気象学会山本・正野論文賞(新進の研究者による優秀な論文に対して与えられる賞)を受賞したことから認めら

れる。また科研費 NEWS にも研究内容が紹介され、気象学会以外にもその内容と重要性が広まったものと思われる。

### (3) 今後の展望

ブロッキングがなぜ持続するかは理解できたが、なぜ引き起こされるかは未だわかっていない。それがわかると、ブロッキングの予測にもつながり、ひいては異常気象による被害を軽減できると考えている。引き続きこれらのことを明らかにしていきたい。

それから、テレコネクションのメカニズム理解への展望が開けたということも本研究期間での大きな発展であった。比較的早期にこのメカニズムを明らかにできるはずである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- (1) Sherriff-Tadano, S., and H. Itoh, 2013: Teleconnection patterns appearing in the streamfunction field. *Sci. Online J. Atmos.*, 査読有, 9, 115-119. 10.2151/sola2013-026.
- (2) Yamazaki, A., and Itoh, H., 2013: Vortex-vortex interactions for the maintenance of blocking. Part I: The selective absorption mechanism and a case study. *J. Atmos. Sci.*, 査読有, 70, 725-742, 10.1175/JAS-D-11-0295.1
- (3) Yamazaki, A., and Itoh, H., 2013: Vortex-vortex interactions for the maintenance of blocking. Part II: Numerical experiments. *J. Atmos. Sci.*, 査読有, 70, 743-766, 10.1175/JAS-D-12-0132.1
- (4) Hayashi, M., and H. Itoh, 2012: The importance of the nontraditional Coriolis terms in large-scale motions in the tropics forced by prescribed cumulus heating. *J. Atmos. Sci.*, 査読有, 69, 2669-2716, 10.1175/JAS-D-11-0334.1

〔学会発表〕(計 15 件)

- (1) Hayashi, M., and H. Itoh, On the importance of the nontraditional Coriolis terms in large-scale motions associated with cumulus convective forcing in the tropics: Forced response problem. 30th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 2012年4月, Ponte Vedra Beach, USA.
- (2) Yamazaki A. and H. Itoh, A vortex-vortex interaction mechanism for the maintenance of the blocking during the record warm summer of 2010. AOGS 2011, 2011年8月, Taipei, Taiwan.
- (3) Yamazaki A. and H. Itoh, On the

vortex-vortex interaction for the maintenance mechanism of blocking. IUGG 2011, 2011年6月, Melbourne, Australia.

〔その他〕

伊藤久徳, 2013: 「大気中のブロッキングはなぜ長く持続する？」 科研費 NEWS 2013年度 Vol.1. 8.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 久徳 (ITOH, Hisanori)  
九州大学・大学院理学研究院・名誉教授  
研究者番号: 8 0 1 1 2 1 0 0