

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540446

研究課題名（和文） 寒冷渦による寒気内低気圧発達の力学に関する、理想化実験・渦位解析を用いた研究

研究課題名（英文） A study on mechanics of polar lows developed by cold vortex aloft using idealized numerical experiments and potential vorticity analysis

研究代表者

伊賀 啓太 (IGA KEITA)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：60292059

研究成果の概要（和文）：理想化した単純な設定のもとでメソ大気モデルを用いた数値実験を行うことにより、上層の寒冷渦によって寒気内低気圧が励起されて発達するメカニズムを調べた。上空の寒冷渦の存在する高度が低く大気の成層が弱い場合には、上空の渦が直接下層に渦擾乱を起こす力学的励起が支配的になるのに対して、高度が高く成層が弱い時は、寒冷渦によって下層の大気が不安定化することにより対流が起きる熱的励起が顕著になってくる。また、特に力学的励起に関しては、下層の移流が地表面での温位勾配と結びつく効果より、上空の渦位移流に伴って上昇流が生じることにより地表面の渦が引き伸ばされて強化される効果が大きいことがわかった。

研究成果の概要（英文）：We investigated the mechanism of the development of polar lows excited by cold vortex aloft, through numerical experiments using meso-scale atmosphere model under idealized simple conditions. When the level of the cold vortex is low and the atmosphere is weakly stratified, the dynamic effect that the vortex aloft directly excites the surface disturbance is dominant. On the other hand, when the cold vortex is situated high and the stratification is strong, the thermal effect that the stratification of the lower-level atmosphere weakened by the cold air aloft enhances the convective motions becomes evident. As for the dynamical effect, the mechanism that the surface vortex is stretched by the upward motion driven by the advection of potential vorticity aloft is more significant than the mechanism that the advection at the sea-surface level interacts with the potential vorticity gradient.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

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：寒冷渦、寒気内低気圧、渦位、波の相互作用、圏界面波動、シア一流中の中立波

1. 研究開始当初の背景

冬季に寒気内で発生する総観規模より小

さな低気圧は「寒気内低気圧」や「ポーラーロウ」と呼ばれる。このような低気圧は日本

の近海でも発生し、場合によっては強風や多量の雪をもたらす現象として関心がもたれてきた。

日本付近の寒気内低気圧については、静止衛星やレーダーの観測による報告が 1960 年代から行われてきており、それ以降解析的な立場からの研究が精力的になされ、このような低気圧の発達する原因についても議論が行われてきた。寒気内低気圧の発達メカニズムについてはさまざまな要因が考えられてきているが、代表的なものとしては、大気の水蒸気勾配に起因する傾圧不安定、地表面(海面)からの潜熱供給による CISK や WISHE、上空の寒冷渦による影響などが挙げられる。

このような寒気内低気圧の発達メカニズムに関する研究は、まずデータ解析から進められてきたが、近年の気象モデルの発達・精密化と計算機資源の増加とともに、モデルの予報再現実験による研究も進んできている。気象モデルで寒気内低気圧の再現できるようになってくると、その発達メカニズムを調べるために、単純化した設定のもとで現象のシミュレーションを行う理想化実験が可能となってくる。寒気内低気圧の発達メカニズムを理想化実験によって調べた代表的な研究として、Yanase and Niino (2007)がある。そこでは、初期の大気の基本場の傾圧性を変えた条件のもとで発達する寒気内低気圧のシミュレーションを行い、傾圧性の小さい条件では海面からの潜熱・顕熱供給によって台風に似た「眼」を持つ構造の低気圧が発達するのに対して、傾圧性の大きな条件ではコマ状の低気圧が発達することを示した。この理想化実験においては、海面からの熱の供給の効果と大気の水蒸気勾配の効果について詳細な調査がされているが、上空の寒冷渦の影響については調べられていない。

上空の寒冷渦の影響について、理想化実験による研究はほとんど行われてきていないが、データ解析による研究に関しても、寒冷渦の具体的な役割について詳細な検討がなされているとは言えなかった。寒冷渦の影響については二つの効果がある。一つは、寒冷渦が「寒冷」であることに起因し、上空に寒冷な空気が入ってくることにより、下層の大気の水蒸気勾配が小さくなることを通して地表面付近の擾乱が発生するというもので、もう一つは、寒冷渦の「渦」としての性質に起因し、上空の渦が地表面付近に励起する流れが下層の傾圧性と結びつき、地表面付近の擾乱を発生させるというものである。どちらの効果によって擾乱が発生したとしても、地表面からの潜熱・顕熱供給や下層大気の水蒸気勾配などほかの要因と結びついて低気圧として発達していくことになるが、発生要因としての上空渦の役割は、どちらについても十分に

なされているとは言えず、特に、渦としての力学的な効果はほとんどなされてきていなかった。

2. 研究の目的

このような背景を考慮して、本研究は、寒気内低気圧の発生・発達するメカニズムのうち、特に上空の寒冷渦の果たす役割に注目して、その効果を単純化した設定での気象モデルを用いた理想化実験によって明らかにしようというものである。

上空の渦の影響を調べる際には、次のような点について注目をしていく。

まず、上空の寒冷渦の渦としての役割からくる力学的な地表面擾乱の発生メカニズムと、寒気が上空に入ることから成層が弱くなることによる地表面擾乱の熱的な発生メカニズムがそれぞれどのようにどの程度働いているのかを明らかにする。

また、特に渦としての力学的メカニズムに関しては、二つのメカニズム、つまり、上空に渦位移流がある際にその前方に上昇流が生じて地表面付近の渦が引き伸ばされて強化されるという機構と、下層に励起された南北風が地表面付近の南北水蒸気勾配と結びつくことによって、地表面擾乱が発達するという仕組みがあるので、これらを切り分けて検討し、どちらのメカニズムがより実質的に機能しているのかを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 上層の擾乱の基礎的な性質を確認するために、まず基本場のシアや渦位分布との関連性について基礎的な理論を整備する。

(2) 大気の水蒸気予報モデルを用いて、上空の寒冷渦によって下層の低気圧が発達する様子をシミュレートする。その際、設定としては状況をできるだけ概念的に単純化した理想化実験の形でシミュレーションを行う。

(3) 理想化実験の初期設定の条件をさまざまに変化させて数値実験を繰り返して、下層の低気圧が発生・発達するための環境場の条件を明らかにしていく。

(4) 各設定のもとで発生した下層擾乱の性質を個々に点検し、その発達メカニズムの違いが生じる条件を整理する。その際、特に渦位の収支や対流条件などに注目して解析を行い、寒冷渦の影響の働き方を明らかにする。

(5) 再現された擾乱の解析によって、特に力学的メカニズムが優勢な事例については、潜熱の影響を排除した実験を行って解析することにより、その力学的メカニズムをより詳

細に調べる。

4. 研究成果

(1) 上層渦の擾乱の性質に関して、擾乱が発達する領域から南北にずれた領域での振舞いを調べ、擾乱の発達の影響範囲の見積もりを行った。

① 擾乱が発達する領域から南北に離れた領域での波の振舞いに注目しながら基本場のシアと渦位勾配が一定である簡単な基本場における波の性質を調べ、上空の渦から南北にずれた位置での擾乱の振舞いを明らかにした。

② 渦が存在する領域から離れた場所における擾乱の振舞いを調べることにより、渦による励起の影響範囲の見積もりの手がかりが与えられた。

(2) 上層の寒冷渦が下層擾乱を励起するメカニズムのうち、特に渦としての力学的な機構に注目し、二つの下層擾乱励起メカニズムそれぞれの効果を評価した。

① 線形な鉛直速度シアを持つ単純化した設定のもと、初期擾乱として上層の寒冷渦のみを配置してその影響によって下層に擾乱が発達するかどうかの室内実験を行ったところ、実際にコンマ状の寒気内低気圧と同じような低気圧がシミュレートされた。これにより、初期に下層の擾乱がなくとも、上層の寒冷渦だけによって寒気内低気圧が発達することがわかった。

② 同じ設定のもとで、水蒸気の凝結熱の効果をなくした「ドライ実験」を行ったところ、最終的な低気圧の発達深度は小さくなったものの、初期の擾乱発生期においては、寒気内低気圧が発達した理想化実験と同様の擾乱発達が見られた。これにより、渦としての力学的な効果により擾乱が発生していることが明らかになった。

③ 地表面付近に擾乱が発達した理想化実験によって得られた渦位や上昇流のデータを解析し、下層に発生する低気圧が顕著な北進をしていないことを見出した。上空の渦が下層に擾乱を励起するメカニズムのうち、上層の渦が下層に励起する流れが地表面付近の温位傾度と結びついて下層擾乱を励起するメカニズムは、擾乱が北に変位することによって起こるはずであるので、このメカニズムによる擾乱励起の可能性が低いことを示している。

④ さらに、南北温位傾度を対流圏の中層に限

定して地表面での温位分布を一様にした基本場でのシミュレーションも行ったが、地表面付近も含めて対流圏全層にわたって温位勾配を与えた実験と同様の擾乱が発達する結果が得られ、上空の渦位移流の前方に上昇流が生じて下層の渦が引き伸ばされて強化されるメカニズムが働いていることを支持する結果となった。

(3) 上空の寒冷渦の高度と、対流圏の成層の強さをさまざまに設定して理想化実験を実行することにより、それぞれのパラメータにおいて、上空の寒冷渦が渦として力学的に下層の擾乱を励起するメカニズムと、上空に寒気が入ることにより下層の成層を不安定化させて対流擾乱を発生させるという熱的な擾乱励起メカニズムとのどちらが効果的に働くかを調べ、環境場の状況に応じて両メカニズムがどのように支配的になるのかを明らかにした。

① 上空の寒冷渦の高度を比較的低いところに置いた場合と高いところにおいた場合について理想化実験を行った結果、どちらの場合においても寒気内低気圧のようなコンマ状の低気圧が発達する結果が得られた。しかし、初期の擾乱の発生期における擾乱の鉛直構造は、高度が低い場合には気圧の擾乱の軸が傾いた力学的励起と整合的なものであったのに対して、高度が高い場合には鉛直方向に垂直で擾乱の上部にふたをされた対流的な構造をしており、両者の構造は全く異なるものであった。これにより、環境場の違いで寒冷渦が渦として力学的な地表面擾乱の励起を行う場合と対流としての熱的励起を行う場合の両方が存在することがわかった。

② 上空の寒冷渦の高度とともに対流圏の成層の強さも変化させて、網羅的にどちらのメカニズムによって地表面擾乱が発生するかを調べた。その結果、上空の寒冷渦の高度が低く成層が弱いほど力学的な励起メカニズムが優勢となることが明らかになった。一方、対流による熱的な発生は、それに比べて寒冷渦の高度が高く、成層がある程度強い時に支配的に働くが、さらに高度を高く、成層を強くすると、下層の擾乱の発生自体が見られなくなった。

③ 擾乱の発生に関して、簡単な状況での考察を行い、力学的な不安定の発生条件と、空気塊持ち上げによる対流発生条件との比較を行った。その結果、力学的な擾乱発生が起こるパラメータ領域と熱的擾乱発生が起こる領域の境界は、力学的不安定の発生条件とよい対応が見られることが分かった。一方、熱的擾乱発生が見られた領域と擾乱が発達し

なかったパラメータ領域の境界は、空気塊による対流発生条件と比較的よい対応関係が見られた。両方の機構ともに、寒冷渦の高度が低く、対流圏の成層が弱いほど擾乱発生を効率的に起こすが、熱的励起のほうが、寒冷渦の高度が高く、成層が弱い条件でも地表面に擾乱を発生させることができる。ただし、両方のメカニズムがともに働くパラメータ領域では、渦による力学的な励起がより顕著に起こるということが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Iga K.: Shear instability as a resonance between neutral waves hidden in a shear flow, J. Fluid Mech., 査読有, Vol. 716, 2013, pp. 452-476. doi:10.1017/jfm.2012.529
- ② Maejima Y. and Iga K.: The time evolution of meso-scale disturbances in the atmosphere caused by frontal instability, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有, Vol. 60, 2011, pp. 183-191.

[学会発表] (計 14 件)

- ① 瀬戸息吹・伊賀啓太: 上層渦により発達する地表面低気圧の力学および熱的過程, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 22 日, 幕張メッセ(千葉市)
- ② Iga K., Yokota S., Watanabe S., Ikeda T., Niino H. and Misawa N.: Various phenomena on a water vortex in a cylindrical tank over a rotating bottom, IUTAM Symposium on Vortex Dynamics: Formation, Structure and Function, 2013 年 3 月 11 日, 九州大学(福岡市)
- ③ 伊賀啓太: 円筒水槽内の回転する底面の上にある水の軸対称流, 東京大学大気海洋研究所研究集会, 2012 年 12 月 21 日, 東京大学大気海洋研究所(柏市)
- ④ 伊賀啓太: 円筒容器内で回転する円盤の上の軸対称流, 日本気象学会 2012 年秋季大会, 2012 年 10 月 5 日, 北海道大学(札幌市)
- ⑤ 伊賀啓太: 底面が回転する円筒容器内の軸対称流, 日本流体力学会年会 2012, 2012 年 9 月 18 日, 高知大学(高知市)

- ⑥ 伊賀啓太: 折れ線速度近似した基本流のシア不安定につながる中立波, 九州大学応用力学研究所研究集会, 2011 年 12 月 15 日, 九州大学応用力学研究所(春日市)
- ⑦ 伊賀啓太: シア流中の不安定波動・中立波動, 核融合科学研究所共同研究研究会, 2011 年 9 月 20 日, 核融合科学研究所(土岐市)
- ⑧ Iga K.: Medium-scale travelling waves in a basic flow with non-uniform potential vorticity, International Union of Geodesy and Geophysics XXV General Assembly, 2011 年 6 月 29 日, Melbourne Convention and Exhibition Centre (メルボルン オーストラリア)
- ⑨ 伊藤淳二・伊賀啓太: 上空の渦によるポーラー・ローの発生・発達, 地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 22 日, 幕張メッセ(千葉市)
- ⑩ 伊藤淳二・伊賀啓太: Polar Low の発生と発達に対する上空渦の影響について, 2011 年 5 月 21 日, 日本気象学会 2011 年春季大会, 2011 年 5 月 21 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都)
- ⑪ 前島康光・伊賀啓太: 前線不安定による大気メソスケール擾乱の時間発展, 第 60 回理論応用力学講演会, 2011 年 3 月 10 日, 東京工業大学(東京都)
- ⑫ 伊賀啓太: 地衡流ジェットから生じる渦列における混合領域の見積もり, 日本気象学会 2010 年秋季大会, 2010 年 10 月 29 日, 京都テルサ(京都市)
- ⑬ 前島康光・伊賀啓太: 前線不安定によるメソスケール擾乱における準地衡流近似の適用について, 日本気象学会 2010 年秋季大会, 2010 年 10 月 29 日, 京都テルサ(京都市)
- ⑭ 伊賀啓太: 一様な速度勾配と渦位勾配をもつ基本流中の中立波動解, 日本流体力学会年会 2010, 2010 年 9 月 10 日, 北海道大学(札幌市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊賀 啓太 (IGA KEITA)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号： 60292059

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

新野 宏 (NIINO HIROSHI)
東京大学・大気海洋研究所・教授
研究者番号： 90272525

柳瀬 亘 (YANASE WATARU)
東京大学・大気海洋研究所・助教
研究者番号： 80376540