

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 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340134

研究課題名（和文）大気境界層の激しい渦の発生機構・構造・力学及び乱流輸送に果たす役割の解明

研究課題名（英文）Generation Mechanism, Structure and Dynamics of Violent Vortices in the Atmospheric Boundary Layer and their Roles in Turbulent Transport

研究代表者

新野 宏 (NIINO HIROSHI)

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：90272525

研究成果の概要（和文）：塵旋風・蒸気旋風・竜巻の発生機構・構造・力学の理解を多様な手法で進め、以下のことがわかった。塵旋風は、対流混合層の中層で作られる循環が下降流で地表近くで運ばれ、これが上昇流域に角運動量保存的に収束することにより発生する。湿潤対流混合層で生ずる蒸気旋風は降水の無い場合には塵旋風と似た機構で発生するが、降水がある場合は、隣接する降水域からの冷氣プールの衝突が重要な役割を果たす。これら強い渦の接線速度分布には2つのレジームがあり、回転境界層が重要な役割を果たす。

研究成果の概要（英文）：Generation mechanisms, structures and dynamics of dust devils, steam devils and tornadoes are studied. Dust devils are formed when circulation about the vertical axis, which is generated at mid-levels in a convective mixed layer, is transported by downdrafts toward low-levels, and then to updraft regions while nearly conserving the angular momentum. Steam devils in a moist convective mixed layer without precipitation develop in a similar way to dust devils. Those with precipitation, however, are caused by collisions of boundaries of cold pools from precipitating area. Radial distribution of tangential velocity in these strong vortices is found to have two different regimes which are dominated by the dynamics of a rotating boundary layer.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 6,200,000 | 1,860,000 | 8,060,000 |
| 2010年度 | 3,900,000 | 1,170,000 | 5,070,000 |
| 2011年度 | 3,700,000 | 1,110,000 | 4,810,000 |
| 総計 | 13,800,000 | 4,140,000 | 17,940,000 |

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：気象学、対流混合層、大気境界層、ラージ・エディ・シミュレーション、渦、塵旋風、竜巻、回転境界層

1. 研究開始当初の背景

一般風が比較的弱い晴天日の午後、砂漠などの裸地では塵旋風(dust devil)という大気境界層中の激しい渦が発生する。近年、火星探査が行われるようになって、塵旋風は火星でも頻繁に発生していることが明らかになって

きた。これは、塵旋風が惑星を問わず、対流混合層に普遍的な現象であることを示している。塵旋風の発生には鉛直渦度の存在とこれを引き伸ばして強化する上昇流の存在が必要と考えられる。このうち、上昇流については、日射の地表面加熱に伴う熱対流によって生じ

ていることは明らかであるが、鉛直渦度の成因については様々な説はあるものの、十分に理解されていない。

一方、冬季に寒気が暖かい湖面や海面上に吹き出す際には、対流セルに伴って蒸気旋風(steam devil)が発生する様子が、北米の五大湖などでは、飛行機観測により捉えられている。我が国では寒気の吹き出し時に日本海側で統計的に竜巻が発生しやすいことが知られている。寒気の吹き出し時には、海面上に積雲を伴う湿潤対流混合層が発達しているため、一般風の風速が大きいことを除いては、蒸気旋風の発生環境は塵旋風のそれに似ているように思われる。蒸気旋風の発生機構や蒸気旋風が日本海側の竜巻とどのような関わり合いを持っているかも良くわかっていない。

更に、これらの渦がどれだけの頻度と空間密度で発生し、対流混合層における熱・水蒸気・運動量・ダストの鉛直輸送にどのように寄与するかを明らかにすることは、大気境界層のパラメタリゼーションの観点からも重要である。

以上のように、塵旋風・蒸気旋風などの大気境界層の激しい渦の発生機構・構造・力学及び乱流輸送に果たす役割、更には竜巻との関係の解明は気象学的にも防災上も重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、塵旋風(dust devil)や、寒気の吹き出し時に暖かい水面上に発生する蒸気旋風(steam devil)などの大気境界層に生ずる小スケールの激しい渦の発生機構や構造と力学及びその乱流輸送に果たす役割、およびその竜巻との類似点・相違点等を包括的に理解することである。

3. 研究の方法

本研究では、ラージ・エディ・シミュレーション(LES: Large Eddy Simulation)モデルを用いて対流混合層内に塵旋風・蒸気旋風を再現し、これら2種類の渦や竜巻との相違点・類似点を比較対照すると共に、室内実験・理論的考察と併せて、これらの渦の発生機構や構造・力学を解明する。また、これらの渦による運動量・熱・水蒸気・ダストのフラックスが対流混合層に果たす役割を評価する。

4. 研究成果

(1) 塵旋風

塵旋風の発生機構・構造と力学を明らかにするため、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)モデルにより、日変化する対流混合層の中に生ずる塵旋風を再現する数値実験を行い、多様な解析を行った。数値実験では、環境風と地表面加熱の条件を変えて、塵旋風が最も発生しやすい環境を調べた。その結果、

塵旋風は予め与えられた日変化する地表面熱フラックスのもとでは、一般風が弱いときに、また対流混合層が発達し、地表面熱フラックスが大きくなる午後早い時間帯に最も発生しやすいという観測事実と整合的な結果を得た。また塵旋風の渦度は、対流混合層の相似則を支配する「対流速度」の単調増加関数であることがわかった。

次に、塵旋風の回転源を明らかにするため、塵旋風に流入する流体粒子の後方トラジェクトリ解析を行い、塵旋風の回転源が、対流が作り出した鉛直軸回りの循環にあることを突き止めた。この循環は、乱流状態の対流に伴う対流混合層中層の水平渦度を鉛直流で立ち上げることによって作られ、下降域で地表付近に運ばれ、対流の上昇域へと角運動量保存的に流入する。対流混合層が作り出す鉛直軸回りの循環は、対流混合層に普遍的に存在し、対流速度と対流混合層の深さの積でスケールされることもわかった。この描像は、メソスケールの回転場がある場合の対流混合層に発生する塵旋風の回転方向の偏りを調べた数値実験においても、確認される。

対流混合層の鉛直乱流熱輸送に塵旋風が果たす役割を調べたところ、空間的な発生密度が高くないため、余り重要でないことがわかった。一方、一般風が弱い晴天日のダストの鉛直輸送の問題は未解明であったが、LESに地表面からのダストの巻き上げを組み込んだ数値実験を行った結果、一般風が弱くとも対流セルに伴う風により、ダストの巻き上げが活発に起き、上昇流の領域で持ち上げられることにより、同じ環境場が続けば対流混合層内で毎日ダスト濃度が濃くなることがわかった。

(2) 蒸気旋風

湿潤過程を含んだ LES モデルとして RAMS を用いて、冬季の寒気吹き出し時の対流混合層のシミュレーションを行い、蒸気旋風の再現に初めて成功した。湿潤対流混合層は雲底下の乾燥対流混合層と雲層から成るが、降水を伴わない湿潤対流混合層で見られる蒸気旋風に伴う渦度は、乾燥対流混合層の厚さと海面熱フラックスから評価される「対流速度」に支配されるように見える。一方、降水を伴う湿潤対流混合層の場合は、下降流域で生ずる冷気プールの先端が隣の冷気プールと衝突するところで大きな収束と鉛直渦度が形成され、その上に発達する上昇域で渦管が引き伸ばされて蒸気旋風が形成されることがわかった。

(3) 竜巻

塵旋風や蒸気旋風など似た縦長の形態を持つ竜巻の発生機構についても数値実験と再現実験により調べた。1つは1977年5月20日に米国オクラホマ州デルシティで発生した竜巻の事例で、古典的なスーパーセル

(特殊な積乱雲)に伴うもの、もう1つは2006年9月17日に宮崎県延岡市で発生した小型のスーパーセルに伴う事例である。

スーパーセルに伴う竜巻の発生機構は現在も十分に解明されておらず、上空のメソサイクロンがドップラーレーダーで観測されてもその20%程度しか竜巻が発生しないことが、その予測・予知を行う上での障害となっている。デルシティの竜巻の数値実験から、竜巻の発生に対するメソサイクロンの重要性は、鉛直方向の気圧傾度を作り出し、地表から1km程度の大気下層で秒速40m近い上昇気流を作り出すことにあること、竜巻の発生にはこの上昇気流とガストフロントの渦度とのカップリングが重要であることがわかった。また、延岡市の事例では、ガストフロントの冷氣側で、2次的なガストフロントが生じ、その先端が既存のガストフロントに追いつくタイミングで収束が強まって竜巻が発生していた。以上のことから、竜巻の発生には、メソサイクロンの存在だけでなく、下層のプロセスが重要な役割を演じており、これがメソサイクロンが存在しても20%程度しか竜巻が発生しないことの説明になりうる可能性がある。

(4) 渦の速度分布と力学

近年、車両搭載型ドップラーレーダーによる竜巻近傍からの観測で、竜巻内部の風速分布が測られるようになりつつある。その結果、竜巻の接線速度の半径分布は、従来考えられてきたように完全なRankine渦ではなく、渦核の外側では、半径の-1乗より緩やかに減少していることがわかってきた。竜巻の中では半径方向には収束があると思われるので、角運動量保存的に収束が起きていれば、接線速度は半径の-1乗で減少するはずであるが、半径の-1乗より緩やかな半径分布は角運動量が中心に近づくほど減少することを示している。そこで、なぜ半径の-1乗より緩やかな速度分布が起こるかを解明するために、bathtub型の実験装置による室内実験と力学理論、数値実験にもとづく解析を行った。

緩やかに回転する円筒水槽の底面中心から、一定流量 Q で水を流出させ、円筒容器の側面のスポンジを通して回転に馴染んだ等量の水を流入させる室内実験を行ったところ、意外なことに接線速度の半径分布は、すべての半径で角運動量保存的になるレジームと、そうでないレジームの2つがあることがわかった。数値実験と理論的考察を行った結果、2つのレジームは、水槽内に生じる仮想的な(半径方向に角運動量一定の)ポテンシャル渦に伴う底面境界層が半径方向に運べる流量と Q との大小により説明できることがわかった。この結果は、現実の大気中の強い渦の渦核の外の半径分布

が角運動量保存的でない原因を説明する可能性がある。

以上のように、本研究では塵旋風・蒸気旋風・竜巻などの激しい渦の発生機構・構造・力学およびその乱流輸送に果たす役割に関する多くの本質的理解を進めることができた。

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13件うち査読有11件)

- ① Ito, J., H. Niino, and M. Nakanishi, Effects of ambient rotation on dust devils, SOLA, 査読有, Vol.7, 2011, 165-168, doi: 10.2151/sola.2011-042.
- ② Suzuki, S., H. Niino, and R. Kimura, The mechanism of upper-oceanic vertical motions forced by a moving typhoon, Fluid Dynamics Research, 査読有, Vol. 43, 2011, 025504, doi:10.1088/0169-5983/43/2/025504.
- ③ Shibano, R., Y. Yamanaka, N. Okada, T. Chuda, S. Suzuki, H. Niino, M. Toratani, Response of marine ecosystem to typhoon passage in the western subtropical North Pacific, Geophysical Research Letters, 査読有, Vol. 38, 2011, L18608, doi:10.1029/2011GL048717
- ④ 渡邊俊一、伊賀啓太、横田 祥、新野 宏、三澤信彦、円筒容器で回転する水の振動現象と履歴現象、ながれ、査読無、30巻、2011、455-458、
- ⑤ Noda, A.T. and H. Niino, A Numerical investigation of a supercell tornado: Genesis and vorticity budget, Journal of the Meteorological Society of Japan, 査読有, Vol. 88, 2010, 135-159.
- ⑥ Kitagawa, T., T. Nakagawa, R. Kimura, H. Niino, and S. Kimura, Vortex flow produced by schooling behavior of arabesque greenling *Pleurogrammus azonus*, Fisheries Science, 査読有, Vol. 77, 2011, 217-222.
- ⑦ Ito, J., H. Niino and M. Nakanishi, Large eddy simulation on dust suspension in a convective mixed layer, SOLA, 査読有, Vol. 6, 2010, 133-136.
- ⑧ Ito, J., R. Tanaka, H. Niino, and M. Nakanishi, Large eddy simulation of dust devils in a diurnally-evolving convective mixed layer, Journal of the Meteorological Society of Japan, 査読有, Vol. 88, 2010, 63-77.
- ⑨ Yukimoto, S., H. Niino, T. Noguchi, R. Kimura, and F. Moulin, Structure of a bathtub vortex : Importance of the bottom

boundary layer, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 査読有, Vol. 24, 2010, 323-327.

- ⑩ Mashiko, W., H. Niino, and T. Kato, Numerical simulation of a tornadogenesis in a mini-supercell in an outer rainband of Typhoon Shanshan on 17 September 2006, Monthly Weather Review, 査読有, Vol. 137, 2009, 4238-4260.
- ⑪ Nakanishi, M. and H. Niino, Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer, Journal of the Meteorological Society of Japan, 査読有, Vol. 87, 2009, 895-912
- ⑫ 中西幹郎、新野 宏、ラージ・エディ・シミュレーションに基づく改良 Mellor-Yamada Level 3 乱流クロージャーモデル(MYNN モデル) の開発と大気境界層の研究—2009 年度日本気象学会賞受賞記念講演—、天気、査読無、57 巻、2010、877-888.
- ⑬ 新野 宏、台風と竜巻—その理解の現状と対策—、ウェッジ、査読無、11 月号、2009、62-65.

〔学会発表〕(計 39 件)

- ① 伊藤純至、新野 宏、中西幹郎、塵旋風のスケーリング、第 13 回地球流体力学研究集会、2011 年 12 月 14-15 日、九州大学雨要力学研究所(福岡県)
- ② 横田 祥、新野 宏、柳瀬 亘、ITCZ breakdown に伴って生じる台風の発生・発達過程、第 13 回地球流体力学研究集会、2011 年 12 月 14-15 日、九州大学雨要力学研究所(福岡県)
- ③ 渡邊俊一、新野 宏(他 3 名)、円筒容器内で回転する水の表面変形とその履歴現象、第 13 回地球流体力学研究集会、2011 年 12 月 14-15 日、九州大学雨要力学研究所(福岡県)
- ④ 伊藤純至、新野 宏、中西幹郎、LES で再現した Dust Devil のトラッキング、日本気象学会秋季大会、2011/11/17、名古屋
- ⑤ 荒木健太郎、新野 宏、加藤輝之、2011 年 4 月 25 日に千葉県北西部で発生した竜巻の数値シミュレーション、日本気象学会秋季大会、2011/11/17、名古屋
- ⑥ 横田祥、新野宏、柳瀬亘、CZ-Breakdown に伴うハリケーン発生の理想化実験、日本気象学会秋季大会、2011/11/17、名古屋
- ⑦ 吉村 淳、新野 宏、柳瀬 亘、西大西洋に発生した twin cyclones の再現実験、日本気象学会秋季大会 2011 年 11 月 17 日、名古屋
- ⑧ Takeda, K., H. Niino and W. Yanase、

Numerical study on factors that affect the horizontal scale of tropical cyclones、Fifth Korea- China-Japan Joint Conference on Meteorology、2011 年 10 月 24-26 日、Busan, Korea

- ⑨ Yokota, S., H. Niino and W. Yanase、A numerical experiment on the genesis of tropical cyclones due to ITCZ breakdown mechanism、Fifth Korea- China-Japan Joint Conference on Meteorology、2011 年 10 月 24-26 日、Busan, Korea
- ⑩ Ito, J., H. Niino and M. Nakanishi、Formation mechanism of dust devils in idealized convective mixed layers、Fifth Korea-China-Japan Joint Conference on Meteorology 2011 年 10 月 24-26 日、Busan, Korea
- ⑪ 伊藤純至、新野 宏、中西幹郎、Terra Incognita における大気境界層モデルのアプリオリ・テスト、第 13 回 非静力学モデルに関するワークショップ、2011 年 10 月 13-14 日、防災科学技術研究所雪氷防災研究センター(新潟県)
- ⑫ 荒木健太郎、新野 宏、加藤輝之、2011 年 4 月 25 日に千葉県北西部で発生した竜巻の数値シミュレーション、第 13 回 非静力学モデルに関するワークショップ、2011 年 10 月 13-14 日、防災科学技術研究所雪氷防災研究センター(新潟県)
- ⑬ 渡邊俊一、新野 宏、(他 2 名)円筒容器内で回転する水の表面変形とその履歴現象、第 13 回地球流体力学研究集会、2011 年 9 月 9 日、首都大学東京(東京都)
- ⑭ 伊藤純至、新野 宏、中西幹郎、Dust Devil のスケーリング、第 13 回地球流体力学研究集会、2011 年 9 月 9 日、首都大学東京(東京都)
- ⑮ 荒木健太郎、新野 宏、加藤輝之、2011 年 4 月 25 日に千葉で発生した竜巻の数値シミュレーション、第 13 回地球流体力学研究集会、2011 年 9 月 9 日、首都大学東京(東京都)
- ⑯ Ito, J., H. Niino and M. Nakanishi、Large eddy simulation of sea breeze and scaling of its horizontal extent、14th AMS Conference on Mesoscale Processes、2011 年 8 月 1 日、Los Angeles, USA
- ⑰ 渡邊俊一、新野 宏(他 3 名)円筒容器内で回転する水の表面変形、日本地球惑星科学連合大会、2011 年 5 月 21 日、幕張メッセ(千葉県)
- ⑱ 渡邊俊一、新野 宏(他 3 名)回転する流体中に見られた振動現象と履歴現象、日本気象学会春季大会、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)

- ①⑨ 武田一孝、新野 宏、柳瀬 亘、沢田雅洋、台風の水平スケールに影響する要因に関する数値的研究、日本気象学会春季大会、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)
- ②⑩ 横田 祥、新野 宏、柳瀬 亘、ITCZ Breakdown によって発生した台風の再現実験、日本気象学会春季大会、2011年5月20日、国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都)
- ③⑪ 宮城和明、新野 宏、2009年8月9日に中国山地東部の豪雨をもたらした降水系について、日本気象学会春季大会、2011年5月18日、国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都)
- ④⑫ 伊藤純至、新野 宏、中西幹郎、Dust Devil の形成プロセス、東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会、2010年12月10日、東京大学大気海洋研究所講堂(千葉)
- ⑤⑬ 新野 宏、境界層と自由大気の相互作用、日本気象学会秋季大会大会シンポジウム、2010年10月28日、京都テルサ(京都)(招待講演)
- ⑥⑭ Yamaguchi, H., H. Niino, and M. Nakanishi, A numerical study on steam devils in a moist convective mixed layer、1st International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Model, Japan Meteorological Society, 2010年10月29日、京都大学理学部セミナーハウス
- ⑦⑮ J. Ito, H. Niino, and M. Nakanishi, Large Eddy Simulation on Dust Devils、1st International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Model, Japan Meteorological Society, 2010年10月29日、京都大学理学部セミナーハウス
- ⑧⑯ 伊藤純至、新野 宏、中西幹郎、環境場の回転の Dust Devil への影響、日本気象学会秋季大会、2010年10月27~29日、京都テルサ(京都)
- ⑩⑰ 伊藤純至、新野 宏、中西幹郎、Dust Devil の鉛直渦度と対流混合層の循環、日本流体力学会年会、2010年9月9~11日、北海道大学札幌キャンパス(北海道)
- ⑪⑱ J. Ito, H. Niino, and M. Nakanishi, Large Eddy Simulation of Dust Devils in a Convective Mixed Layer、3rd International Workshop on Next -Generation NWP Model s、2010年8月30日、The Seogwipo KAL Hotel (韓国、チェジュ島)
- ⑫⑲ 伊藤純至、新野 宏、中西幹郎、ダストデビルの鉛直渦度の生成機構とその性質、第59回理論応用力学講演会、2010年6月10日、日本学術会議(東京)
- ⑬⑳ 新野 宏、シビア現象の理解・予測にむけた課題と期待、日本気象学会春季大会大会シンポジウム、2010年5月25日、国立オリンピック記念青少年総合センター(東京)(招待講演)
- ⑭㉑ 伊藤純至、新野 宏、中西幹郎、Dust Devil の鉛直渦度の生成機構、日本地球惑星科学連合大会、2010年5月23~28日、幕張メッセ国際会議場(千葉)
- ⑮㉒ 伊藤純至、新野 宏、中西幹郎、対流混合層で生成される鉛直渦度のスケーリング2、日本気象学会春季大会、2010年5月23~26日、国立オリンピック記念青少年総合センター(東京)
- ⑯㉓ 伊藤純至、新野 宏、中西幹郎、Dust Devil の鉛直渦度の起源、日本流体力学会、2009年9月2日、東京
- ⑰㉔ 伊藤純至、新野 宏、中西幹郎、小林宏充、強い Dust Devil を再現するためのLESモデル、第11回非静力学モデルに関するワークショップ、2009年9月25日、弘前。
- ⑱㉕ J., Ito, H. Niino, and M. Nakanishi and R. Tanaka, A numerical experiment on dust devils in a diurnally-evolving convective mixed layer, Fourth Korea- China Japan Joint Conference on Meteorology, 2009年11月19日、Tsukuba.
- ㉖㉑ 伊藤純至、新野 宏、中西幹郎、Dust Devil の鉛直渦度の成因、日本気象学会秋季大会、2009年11月25日、福岡
- ㉗㉒ 新野 宏、竜巻と塵旋風-大気の激しい渦の理解の現状と課題-、第58回理論応用力学講演会、2009年6月10日、日本学術会議(東京)(招待講演)
- ㉘㉓ 山口春季、新野 宏、湿潤対流混合層内に発生する鉛直渦、日本気象学会秋季大会、2009年11月27日、福岡
- ㉙㉔ 伊藤純至、新野 宏、ラージ・エディ・シミュレーションで再現された対流混合層のLES、日本地球惑星科学連合大会、2009年5月17日、幕張メッセ(千葉)
- [図書](計2件)
- ① 真木太一、新野 宏、野村 卓史、林陽生、山川修治(編著)、丸善、風の事典、2011年、276pp.
- ② 新野 宏(分担執筆)、株式会社エヌ・ティー・エフ、自己組織化ハンドブック、第1章、カラム(p229-230)、2009年、937pp.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

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