

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18340137

研究課題名（和文） ハイブリッド低気圧の実態と構造及び力学

研究課題名（英文） Characteristics, Structure and Dynamics of Hybrid-cyclones

研究代表者

新野 宏（NIINO HIROSHI）

東京大学・海洋研究所・教授

研究者番号：90272525

研究成果の概要：傾圧性と積雲対流に伴う凝結加熱の両方がその発達に重要な役割を演ずるハイブリッド低気圧の実態と構造及び力学を事例解析、線形安定性解析、数値実験により調べた。その結果、梅雨前線上に生ずるメソ スケールの低気圧や冬季日本海を含む高緯度の海洋上に発生するポーラーロウ、日本付近に豪雨をもたらす温帯低気圧などの低気圧の特性や力学が環境場の構造や凝結加熱によりどのように変化するかが明らかになった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2007年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2008年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：気象学、地球流体力学

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：温帯低気圧、熱帯低気圧、亜熱帯低気圧、メソ低気圧、ポーラーロウ、傾圧不安定、梅雨前線、大雨、突風

1. 研究開始当初の背景

従来、気象学においては、大雨・強風などにより人間生活に大きな影響を与える代表的な低気圧を、熱帯低気圧と温帯低気圧の2つに大別して扱ってきた。台風やハリケーンに代表される熱帯低気圧は文字通り熱帯で発生し、ほぼ軸対称な構造を持ち、水蒸気の凝結熱が本質的な役割を演ずる CISK (Conditional Instability of the Second Kind: 第2種条件付不安定) ないしは WISHE (Wind-Induced Surface Heat Exchange) という機構で駆動される低気圧である。一方、温帯低気圧は中緯度を中心に

る。一方、温帯低気圧は中緯度を中心に発生し、南北の温度傾度に伴う有効位置エネルギーを源として傾圧不安定と呼ばれる機構で発達する低気圧である。しかしながら、熱帯低気圧が北上して中緯度の傾圧帯に入ってくると次第に変形を受け、温帯低気圧としての性質を持つようになることは「温低化」(ET: Extratropical Transition) として一般にも概念的には広く知られている。一方、最近、大西洋では亜熱帯で傾圧的な過程で発生したと思われる(温帯)低気圧が後に熱帯低気圧として発達する事例があることに気付か

れるようになった(TT(Tropical Transition)と呼ばれることがある)。研究担当者達も、本研究を開始する直前に日本周辺で、最初は温帯低気圧として出現した擾乱が、後に熱帯低気圧に似たほぼ軸対称構造を備えた低気圧として発達し、北上すると共に、再び軸対称性を失って温帯化を始め、前線を伴うようになった事例を見いだした。

こうしてみると、熱帯低気圧と温帯低気圧は必ずしも明瞭に区別される現象ではなく、両者の間にはむしろその中間的な性格を兼ね備えた多様な低気圧が存在するの自然である。冬季に高緯度海洋上に現れ突風や高波を生ずるポーラーロウ、局地的な豪雨を生ずる梅雨前線上のメソ スケール低気圧などはいずれも、傾圧不安定が重要な役割を演ずる温帯低気圧及び水蒸気の凝結熱が本質的な役割を演ずる熱帯低気圧の中間的性格を帯びた低気圧(ハイブリッド低気圧)として位置づけるべきであると思われる。しかしながら、ハイブリッド低気圧の実態と異なり、傾圧性と凝結熱の効果の寄与の割合が異なる場合の低気圧の構造及び力学の違いに関する系統的な研究や、観測される多様な低気圧をこのような普遍的低気圧論の観点から位置づける研究はほとんどなされておらず、その遂行が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、日本付近で見られる、傾圧性と凝結熱が重要な役割を演じ、しばしば突風や豪雨などの災害をも引き起こすハイブリッド低気圧の実態を観測データ及び数値シミュレーションによる再現実験に基づき解析して明らかにすると共に、傾圧性と凝結熱の寄与の割合が異なる低気圧の構造・力学・エネルギー収支を、理想化した環境場における積雲対流を解像する数値モデルを用いた数値実験及び線形不安定理論に基づいて普遍的・系統的に理解することを目的とした。

このような系統的理解は、個々の事例研究で対象とした低気圧の系統的位置づけを可能とし、低気圧の特性をより深く、その力学機構に根ざして理解することを可能とすると期待される。

3. 研究の方法

本研究は事例研究、理論解析、数値実験の3つの手法により、互いに連携を取りながら遂行した。それぞれの内容は以下の通りである。

1) 事例研究

日本海のポーラーロウ、梅雨前線上のメソ低気圧、亜熱帯低気圧、豪雨をもたらした温帯低気圧など、凝結熱と傾圧性の両方が重要な役割を演ずる顕著な低気圧の事例に

ついて、観測データと客観解析データを用いて解析した。また、数値シミュレーションにより、低気圧の再現を試み、低気圧の構造や発達機構を明らかにした。

2) 理論解析

梅雨期のメソ スケール低気圧が卓越する時期の環境の気候場のように、鉛直方向のシアだけでなく南北方向にもジェット状の構造を持つ基本流のもとで、凝結加熱も考慮した場合の非地衡風の線形傾圧不安定の特性を調べ、発達する擾乱の構造・力学・エネルギー収支などを明らかにした。

3) 数値実験

積雲対流をパラメタリゼーションなしに解像し、傾圧性と凝結加熱の両方が重要なハイブリッド低気圧の非線形発展をも適切に記述する非静力学数値モデルによる数値実験を行い、傾圧場や温度・水蒸気量の異なる環境におけるハイブリッド低気圧の発達やその構造・力学・エネルギー収支などを明らかにした。

4. 研究成果

ハイブリッド低気圧の力学・構造・エネルギー収支を理解するために行った、理想化数値実験や「凝結の効果を検討した鉛直方向・南北方向両方のシアを持つ帯状流ジェットの非地衡風力学的不安定性解析」は世界的に見てもこれまで行われていないユニークな研究成果である。今後、この成果をもとに、更にパラメータ範囲を広げた理論解析や数値実験への発展、また客観解析データ等を利用し、全球を対象とした多様な低気圧の特性の位置づけを行い、ハイブリッド低気圧の理解を深めていくことが期待される。更に、低気圧の中で生起するより小スケールの現象との関係に踏み込んだ理解への発展も期待される。以下、それぞれの研究成果について詳述する。

1) 事例研究

2001年に梅雨前線上で発達したメソ α 低気圧、2005年10月の日本海のポーラーロウ、2003年10月の亜熱帯低気圧、1999年10月の千葉県に豪雨をもたらした温帯低気圧などの解析を行った。以下では、2001年の梅雨前線上で発達したメソ α 低気圧に関して行ったデータ解析及び数値シミュレーションの結果を中心に報告する。データ解析には気象庁全球客観解析データ(GANAL、水平解像度 1.25°)と領域客観解析データ(RANAL、水平解像度 20km)を用いた。

解析されたメソ α 低気圧はデータ解析の結果から次の2つのタイプに分類された。第1のタイプはその発達に上層擾乱の関与があり、鉛直トラフが高度とともに西に傾く背の高い構造を持っていた。第2のタイプは発達期に上層擾乱が解析されず、鉛直トラフが高

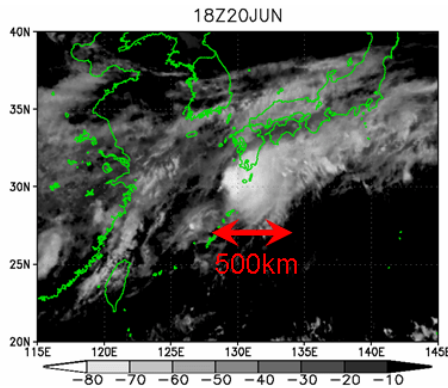


図1：2001年6月20日の梅雨前線上のメソ 低気圧に伴うクラウドクラスタの赤外画像。

度とともに東に傾く背の低い構造を持っていた。後者のタイプの構造と力学を調べるために、2001年6月20日に現れたメソ α 低気圧(図1)の解析を詳細に行った。このメソ α 低気圧は下層ジェット北側において、南西から北東に軸を持つ水平トラフが解析された。さらに低気圧中心東側下層では負の温度偏差が解析され、これは高度とともに東に傾く鉛直トラフと静水圧バランスの観点から整合的である。この負の温度偏差の形成原因を調べるために、積雲対流のパラメタリゼーションを用いずに水平解像度5kmの気象庁非静力学モデルにて再現実験を行った。再現実験によりこのメソ 低気圧のいくつかの観測的特徴をよく再現できた(図2)。再現された結果について熱収支解析を行ったところ、低気圧中心東側下層の負の温度偏差は中・上層で解放された潜熱加熱により駆動された強い上昇流による断熱冷却によって生じていることが分かった。また、水蒸気の凝結を考慮しない感度実験との比較から、この

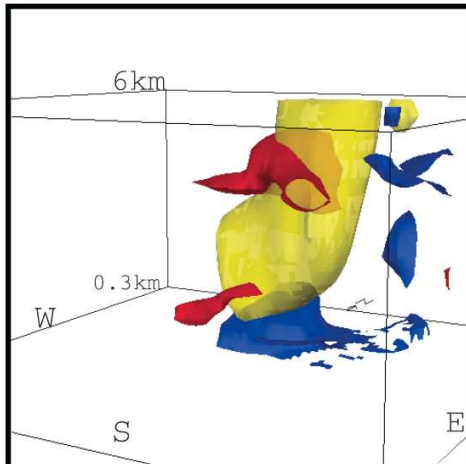


図2：数値シミュレーションで再現されたメソ 低気圧の構造。黄色は上昇流が0.3m/s以上の領域、赤(青)は凝結加熱と断熱冷却の合計が1.0K/h以上(-0.7K/h以下)の領域を表す。

タイプのメソ 低気圧の発達には潜熱加熱が重要な役割を持つことが示された。

2005年10月の日本海のポーラーロウに関しては、PV inversionを用いた解析により、上層の寒冷渦がポーラーロウ発生・発達に支配的な役割を負っていることが示された。寒冷渦が誘起する流れには下層の傾圧帯を2つの前線へと断裂し、後にポーラーロウへと発達する初期擾乱を形成し、この初期擾乱と寒冷渦自身がカップリングすることによってポーラーロウが発達していた。また、ポーラーロウの発生初期にしばしば見られる帯状の雲クラスタは寒冷渦がもたらす上昇流によって形成されていたことも明らかになった。更に、数値シミュレーションによる感度実験から、海面摩擦はポーラーロウの発達を抑制していたことがわかり、このポーラーロウの発達には湿潤傾圧不安定が重要な役割をしていることが示唆された。

1999年10月千葉県に豪雨をもたらした低気圧は上層のトラフが西から接近したときに発生したPettersenのB型のcyclogenesisを示した。この低気圧はコンマ型の雲域を伴っていた。流跡線解析により、この低気圧は暖かいコンベヤーベルト、冷たいコンベヤーベルト及び乾燥貫入を伴っていたことがわかった。乾燥貫入はスプリットフロントを生じ、低気圧中心付近に対流不安定領域を生じて、豪雨の起きやすい環境場を提供していた。数値実験による感度実験とPVインバージョンにより低気圧の発達機構を調べたところ、凝結加熱をなくすと低気圧は発達しないことがわかった。PVインバージョンの結果は、凝結加熱による渦位アノーマリは下層の低気圧中心の渦位アノーマリの70%を説明し、上層と下層の渦位アノーマリの相互作用が低気圧の発達に重要な働きをしたことが確認された。

2003年10月の亜熱帯低気圧については、関東地方通過時に見られた低気圧内の階層構造を羽田と成田のドップラーレーダーデータをもとに解析した。特に、突風を千葉県成田市と茨城県神栖町に突風もたらした小スケールの回転性擾乱の特性を明らかにした。

2) 理論解析

凝結の効果を検討した鉛直方向・南北方向両方のシアを持つ帯状流ジェットの非地衡風力学的不安定を調べた。対象としたジェットは3種類で、第1はジェットの軸が南北方向に傾かないもの、第2はジェット軸が高度と共に北に傾くもの、第3は観測された梅雨前線付近の帯状流のコンポジットから作成した現実的なジェットである。

増幅率最大の擾乱の下層の南北方向の中心を通る鉛直東西断面内のトラフは高度と共に東に傾くが、中心の北側では高度と共に西に傾いていた(図3)。このような擾乱の鉛

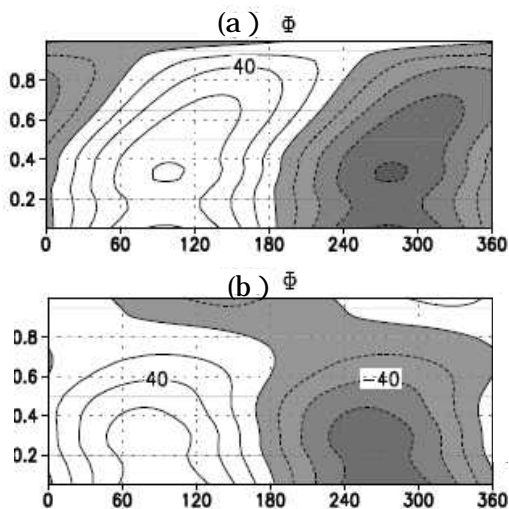


図3：梅雨時の現実的な帯状流ジェットに対して得られた擾乱の(a)ジェット中央、(b) ジェット中央より北側での東西-鉛直断面のジオポテンシャルの構造。

直構造の南北方向の違いは、凝結加熱と南北移流の相対的な重要性の違いによって生じていることがわかった。

一方、擾乱の水平構造は基本場の帯状流の水平シアと鉛直シアの相対的な強さに依存しているように見える。下層ジェットを伴う現実的な帯状流に対しては、増幅率最大の擾乱は、水平面内では南西から北東に向かうトラフの軸を持っていた。一方、直立したジェットと高度と共に北に傾いたジェットでは、トラフの軸は南東から北西になっていた。凝結熱の量は擾乱の鉛直構造には影響しないが、擾乱の発達過程には強く影響することがわかった。

3) 数値実験

傾圧性と成層及び平均気温を観測される代表的な値の範囲内で変化させた理想化した大気中に発生する低気圧の構造と力学を水平解像度5kmの非静力学数値モデルにより調べた。変化させたこれらのパラメータのうちで低気圧の力学を最も強く支配するのは傾圧性であることがわかった。

傾圧性が弱いときには、ほぼ軸対称な構造を持った低気圧が、低気圧スケールの渦と積雲対流の協力的相互作用で発達する(図4左上)。この場合には、地表面摩擦の存在は海面からの熱と水蒸気を渦の中心に輸送することで、低気圧の発達に寄与する。また、渦の発達は初期擾乱の水平スケールや強さに強く依存する。

傾圧性が増加するとき、低気圧の特性と力学は急激なレジームの変化はなく、スムーズに変化する。しかしながら、中程度の傾圧性の場合には、帯状流が西風にもかかわらず、渦は北向きに移動する成分を持つというユニ

ークな振る舞いを示した。これは、暖湿な空気が移流されてくる渦の北側で活発な対流が起き、強い上昇流による渦の引き伸ばしが起

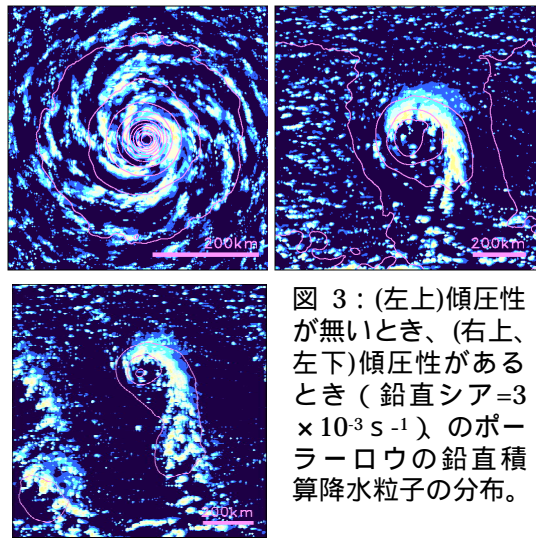


図3：(左上)傾圧性が無いとき、(右上、左下)傾圧性があるとき(鉛直シア= $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)のポーラーロウの鉛直積分降水粒子の分布。

きるためであることがわかった。

傾圧性が強いときには、傾圧性が弱いときに比べてサイズが大きく、コンマ型の雲を伴った低気圧が発達する(図4右上)。この渦の発達には凝結加熱、基本場の有効位置エネルギーからの傾圧エネルギー変換、基本場の鉛直シアを持つ帯状流の運動エネルギーからエネルギー変換のすべてが効いており、初期擾乱への依存性は比較的小さい。ランダムなホワイトノイズの初期擾乱から成長する擾乱は最初、トラフの軸が水平面内で北西から南東方向に傾く波状の形態をとり、やがてコンマ型の雲を伴う低気圧へと発達した(図4左下)。このようなトラフ軸の傾きは、Yanase and Niino (2004)の線形理論と整合的で、鉛直シアを持つ基本場の運動エネルギーから擾乱の運動エネルギーへのエネルギー変換の存在を示している。

以上見てきたような低気圧の構造と力学の傾圧性への依存性は、観測される成層や平均温度の範囲内では極めて普遍的に見られることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6件)

Iga, K., 2009: Statistical theory applied to a vortex street generated from meander of a jet, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, DOI: 10.1007/s00162-009-0120-y, 査読有.

Yanase, W. and H. Niino, 2007: Dependence of the polar low development on baroclinicity and physical processes: An idealized high-resolution numerical experiment, *Journal of the Atmospheric Science*, 64,

3044-3067, 査読有
 Tagami, H. and H. Niino, 2007: A study of meso-alpha-scale disturbances on the Baiu Front and their environmental field, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85, 767-784, 査読有
 Chuda, T., R. Kimura and H. Niino, 2007: Vertical fine structures of temperature and water vapor in the free atmosphere, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85, 583-597, 査読有
 梶原佑介, 新野 宏, 加藤輝之, 2007: 日本海のポーラーロウの発生・発達メカニズム, *月刊海洋*, 39, No.3, 192-197, 査読無
 Maejima, Y., K. Iga and H. Niino, 2006: Upper-tropospheric vortex street and its formation mechanism, *SOLA*, 2, 80-83, 査読有

[学会発表](計 23 件)

Yanase, W. and M. Satoh, 2008: Case studies of tropical cyclone genesis using a global high-resolution model, NICAM. Third International Workshop on High-Resolution and Cloud Modeling, 2-4 December 2008, Hawaii, USA.
 Yukimoto, S., Niino, H., T. Noguchi, R. Kimura and F. Moulin, 2008: Regimes of bathtub vortices: Importance of the bottom boundary layer. IUTAM Symposium on 150 years of Vortex Motions, 12-16 October 2008, Copenhagen, Denmark.
 Mashiko, W., H. Niino and T. Kato, 2008: Numerical simulation of a tornadogenesis in a mini-supercell associated with Typhoon Shanshan on 17 September 2006, 24th Conf. on Local Severe Storms, 27-31 October 2008, Amer. Meteor. Soc.
Yanase, W., 2008: Dynamics of tropical cyclone genesis simulated by a global cloud-system resolving model, NICAM. JSPS 5th University of Allied Workshop on Climate and Environmental Studies for Global Sustainability, 30 June – 3 July 2008, Makuhari, Japan.
Yanase, W., M. Satoh, S. Iga and H. Tomita, 2008: Tropical cyclone formations in 30-day simulation using

cloud- system-resolving global non-hydrostatic model (NICAM). 28th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 28 April - 2 May 2008, Orlando, USA.
 Fukutani, Y., H. Niino and T. Kato, 2007: An analysis of meso- α scale low moving eastward in a Baiu/Meiyu frontal zone. The Sixth Conference on Mesoscale Meteorology and Typhoon (ICMCS-IV), 6-9 November 2007, Taipei, Taiwan.
 福谷陽、新野 宏、加藤輝之、2007: 2005年6月中旬に梅雨前線を東進したメソ α 擾乱の解析、日本気象学会 2007 年度秋季大会、2007 年 10 月 14-16 日、札幌
 前島康光、伊賀啓太、2007: 帯状収束雲に伴う渦状擾乱に寄与する力学的不安定、日本流体力学会年会 2007、2007 年 8 月 6-8 日、東京
 雪本真治、野口尚史、ムーラン・フレデリック、木村龍治、新野 宏、2007: 吸い込み渦の構造と角運動量輸送に関する数値実験、日本流体力学会年会 2007、2007 年 8 月 6-8 日、東京
 加藤輝之、新野 宏、2007: 2006 年 11 月 7 日北海道佐呂間町で観測された竜巻の発生環境～雲解像モデルによるスーパーセルの再現結果から～、日本気象学会 2007 年春季大会、2007 年 5 月 13-16 日、東京、B203
 中西幹郎、新野 宏、2007: 突風被害を生ずる可能性のある台風境界層内のロール状構造、日本気象学会 2007 年春季大会、2007 年 5 月 13-16 日、東京、C303
 和田章義、新野 宏、2007: f 面上の台風渦の発達過程と海面水温の関係、日本気象学会 2007 年春季大会、2007 年 5 月 13-16 日、東京、P331
 前島康光、伊賀啓太、2007: 帯状収束雲上に見られる渦状擾乱の非線形発展、線形安定論における不安定モードとの対応、2007 年度日本気象学会春季大会、2007 年 5 月 13-16 日、東京
 前島康光、伊賀啓太、2007: 帯状収束雲に伴う渦状擾乱の非線形発展過程について、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、2007 年 5 月 19-24 日、千葉
 前島康光、伊賀啓太、2007: 帯状収束雲に伴う渦状擾乱に寄与する力学的不安定、第 56 回理論応用力学講演会、2007 年 3 月 7-9 日、東京
Yanase, W. and H. Niino, 2006: High-resolution numerical experiments on the dynamics and

structure of polar lows in an idealized moist environment with different baroclinicity. 5th International Conference on Mesoscale Meteorology and Typhoon, 31 October- 3 November 2006. Boulder, Colorado.

Tagami, H. and H. Niino, 2006: Linear theory on ageostrophic moist baroclinic- barotropic instability. 5th International Conference on Mesoscale Meteorology and Typhoon, 31 October- 3 November 2006, Boulder, Colorado.

Tagami, H. and H. Niino, 2006: An idealized numerical simulation of meso alpha-scale low on the Baiu front. 5th International Conference on Mesoscale Meteorology and Typhoon, 31 October- 3 November 2006, Boulder, Colorado.

Yanase, W and H. Niino, 2006: Polar lows: Their dynamics and morphology, 2nd KIOS-ORI Joint Symposium on Marine Science 22-23 September 2006, Busan, Korea.

Yanase, W. and H. Niino, 2006: Idealized experiments on cyclone development with cumulus convection and baroclinic instability by using a high-resolution non-hydrostatic model. The University of Allied Workshop, 18-20 July 2006, Taipei, Taiwan.

21 前島康光、伊賀啓太、新野 宏、2006: 水蒸気画像で確認された上層の渦列の発生メカニズム - The generation mechanism of upper vortex street seen in water vapor image、地球惑星科学関連学会合同学会、2006年5月14日、千葉、J156 地球流体力学：地球惑星現象への分野横断的アプローチ

22 梶原佑介、金井秀元、新野 宏、加藤輝之、2006: 冬季日本海で発生したポーラーロウのライフサイクルと内部構造、日本気象学会 2006年度春季大会、2006年5月21日-24日、つくば、P253

23 前島康光、伊賀啓太、新野 宏、2006: 対流圏上層の渦列に関する線形安定解析、日本気象学会 2006年度春季大会、2006年5月21日-24日、つくば、D310

〔図書〕(計 1 件)

新野 宏、2007: 1.3.4 節 中高緯度の天気擾乱、「全球降水観測(GPM)計画 - 科学的・社会的期待 - 」(独)宇宙航空研究開発機構地球観測センター、

30-34

〔その他〕

アウトリーチ活動(啓発のための講演)

新野 宏、2007: 渦に惹かれて 30 年、日本気象予報士会総会、2007年5月26日、東京。

新野 宏、2007: 数値シミュレーションが解き明かすメソスケール気象擾乱のメカニズム、計算科学夏の学校 2007、2007年9月12-14日、浜松。

6 . 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者

(2006-2007 年度)
伊賀 啓太(IGA KEITA)
東京大学・海洋研究所・准教授
研究者番号：60292059

柳瀬 亘(YANASE WATARU)
東京大学・気候システム研究センター・特任助教
研究者番号：80376540

(3)連携研究者

(2008 年度)
伊賀啓太(IGA KEITA)
東京大学・海洋研究所・准教授
研究者番号：60292059

柳瀬 亘(YANASE WATARU)
東京大学・気候システム研究センター・特任助教
研究者番号：80376540