

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19204047

研究課題名（和文） 高解像度気候モデルを用いた中層大気力学の研究

研究課題名（英文） A study of middle atmosphere dynamics using a high-resolution climate model

研究代表者

佐藤 薫 (SATO KAORU)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：90251496

研究成果の概要（和文）：大気重力波を解像可能な中層大気大循環モデルを用いて現実的な境界条件下で3年分積分を行い、得られたデータを解析してこれまでにない精度での中層大気力学の解明を行った。具体的には、ロスビー波や重力波を含む運動量収支、重力波の発生源の特定と3次元伝播、成層圏界面および対流圏界面の構造と維持機構、赤道成層圏準2年振動の駆動機構、上部中間圏の順圧・傾圧不安定擾乱の力学を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：A three-year simulation was performed using a gravity wave-resolving general circulation model with realistic boundary conditions. By analyzing the output data in detail, various features of the middle atmosphere dynamics have been clarified quantitatively in terms of the momentum balance including both Rossby-type and gravity-type of waves, the source identification and three-dimensional propagation of gravity waves, the structure and maintenance mechanisms of the tropopause and stratopause, the driving mechanisms of the quasi-biennial oscillation, and the dynamics of baroclinic/barotropic instabilities in the upper mesosphere.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	17,600,000	5,280,000	22,880,000
2008年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
2009年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
総計	34,300,000	10,290,000	44,590,000

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

1. 研究開始当初の背景

中層大気（高度約10～110kmの大気）の温度や風の大規模構造は、オゾンや酸素、二酸化炭素等が介する放射過程だけでなく、重力波や、プラネタリー波、潮汐波などの大気擾乱の力学過程により維持されている。ここ20～30年のレーダーやライダーなどの地上からのリモートセンシング技術、人工衛星や気球に搭載された大気センサーによる観測技術の

進歩により、中層大気物理の実態が明らかになってきた。

特に大気重力波、捕捉されたロスビー波、慣性不安定、対流圏界面付近の微細構造、トレーサーの層状・フィラメント状構造など、小さな空間スケール、および短い時間スケールを持った現象の詳細な事例解析が進み、気候学的な特性も明らかになってきたが、観測フィルターの問題や、限られた物理量しか測

定できないなどの問題から、これらの中小規模現象が中層大気の大規模構造、大循環や振動現象に対して果たす定量的役割の全体像については、まだ十分理解されているとはいえなかった。

2. 研究の目的

本研究は、先に述べた世界的研究動向を鑑みながら、これまで研究代表者及び分担者が個別に行ってきた高解像度気候モデルによる研究の発展および集大成を目指すものである。すなわち、世界最高クラスの性能を持つ地球シミュレータにより、高解像度気候モデルを用いて、現実的な境界条件を与えた数年積分を行い、得られた巨大データを系統的に解析し、中間圏を含む地球大気重力波の発生や伝播、作用の全体像を明らかにすることを目的とする。

高解像度気候モデルを用いて、以下に述べる様々なテーマに取り組む。これまでの中層大気擾乱の観測的描像の再解釈も試みる。

(1) 中層大気における中小規模擾乱の力学特性のグローバルな描像の解明

- 波数スペクトル・3次元分布・3次元伝播等、気候学的な力学特性の記述
- 対流圏諸現象からの重力波発生メカニズム

(2) 大規模循環・大規模振動現象における重力波の役割の解明

- 赤道成層圏準2年周期振動の駆動メカニズムの解明
- 成層圏・中間圏の残差循環の構造と駆動メカニズムの解明
- 中高緯度中間圏での不安定現象の解明

(3) 対流圏界面・成層圏界面の構造

- 対流圏界面における物質輸送・混合の微細構造と各波動の寄与の解明
- 成層圏界面の詳細構造と維持メカニズム

3. 研究の方法

重力波が解像可能なほど高解像で、重力波パラメタリゼーションを使用しない気候モデルを開発する。まず、現実的な境界条件のもと、中高緯度において対流圏から中間圏上部まで現実的な月平均東西風や気温の場を再現し、観測でとらえられているのと同程度の振幅を持つ重力波が再現されるように、積雲パラメタリゼーションや拡散係数等を調節した。そして、3年にわたる長期積分を行い1時間ごとに東西風、南北風、鉛直風、温度、ジオポテンシャル高度、加熱率、降水、水平発散、渦位、地上気圧、海面気圧、OLRなど力学解析に必要な物理量を取り出す。この物

理量はスペクトル解析等における2時間以下の周期成分のエリアシングを避けるため、瞬間値ではなく1時間平均値とする。得られるデータは30TBを超えるほど膨大になると考えられることから、シミュレーションで得られた場の特徴を速やかにとらえるためのクイックルックデータも並行して作成した。クイックルックデータは10レベルの1時間値5要素(東西風、南北風、鉛直風、水平発散、ジオポテンシャル高度)、160Wでの子午面断面における1時間値5要素(東西風、南北風、鉛直風、水平発散、温度)、3次元6日平均7要素(東西風、南北風、鉛直風、温度、ジオポテンシャル高度、渦位、加熱率、水蒸気)、1日平均東西平均8要素(東西風、南北風、鉛直風、温度、運動量フラックス、熱フラックス、渦位)等である。

シミュレーションは地球シミュレータで行ったが、得られたデータは大容量高速RAIDディスクを搭載した複数CPUを持つデータ解析サーバーを初年度に購入し、これに格納して解析した。解析が進むにつれ2次データが増加するので、2年度、3年度もCPUおよびRAIDディスクを増設し、効率化を進めた。

また、3年にわたり、2か月に1度程度のグループミーティングを開き、各自の成果を持ち寄って集中的に議論する場を設けた。1年に1度は、泊まり込みの合宿研究会を開き、夜遅くまで徹底的に議論した。

4. 研究成果

(1) 地表面から高度約80kmまでを含む、鉛直高解像度(300m)のT213L256中層大気大循環モデル(GCM)を開発した。これを用いて3年分のシミュレーションを行い1時間ごとの積分値データを作成した。重力波パラメタリゼーションを一切用いていないにも関わらず、極夜ジェットや夏半球の東風ジェットといった、中・高緯度の中層大気大循環が現実的に再現された。また、熱帯では、成層圏界面付近の東西風半年周期振動や、下部成層圏の準2年周期振動(QBO)に類似した東西風振動現象が自発的に生成された。波を切り分けながら運動量収支解析を行ったところによれば、中間圏および夏季成層圏においては重力波が、冬季成層圏においてはプラネタリー波が重要であることが定量的に明らかとなった(Watanabe et al., 2008)。

(2) 「成層圏界面の冬の亜熱帯領域に温度極大が存在する」という新たな知見が得られた。

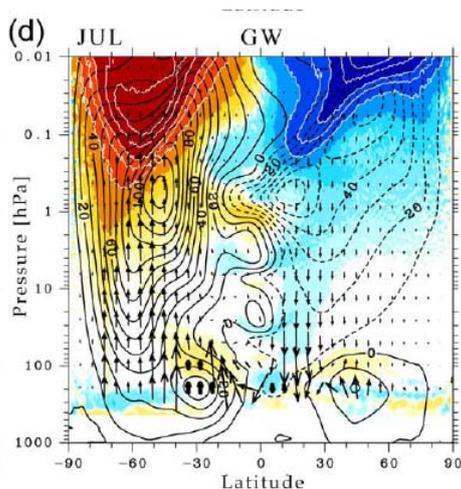


図 1: 7月での東西平均東西風 (等値線) と、重力波に伴う EP フラックス (矢印), 平均風加速 (カラー). Watanabe et al. (2008).

分解能の荒い観測データにも注意深く見ると現れていることがわかったが、その存在はこれまでほとんど認識されていないものであった。本研究での高解像度気候モデルの特長を生かして絶対角運動量保存則や残差循環方程式系を用いた力学解析を行い、その温度構造が保たれるための力学的なメカニズムを明らかにできた (Tomikawa et al., 2008).

(3) 赤道下部成層圏の重力波及び赤道波のエネルギーと鉛直伝播特性が、ウォーカー循環の存在による対流圏平均風の経度依存性により、大きく東西半球で異なることが明らかとなった。また、QBO に類似した下部成層圏赤道大規模振動を駆動するメカニズムについて考察した。高解像度気候モデルを用いて、成層圏 QBO における赤道波及び慣性内部重力波の相対的な役割について調べた。QBO 西風位相時には赤道波が 25~50%、重力波が 50~75% 寄与していたが、東風位相時には赤道波の寄与は多くても 10% 程度であり、東西波長 1000km 以下の重力波の寄与率が大きい事が分かった (Kawatani et al., 2010a, 2010b).

(4) 南極中間圏における 4 日波の力学特性と発生メカニズムについて考察した。詳細なポテンシャル渦度解析を行ったところ、順圧傾圧不安定波の可能性が高いこと、また、その不安定場は重力波加速により維持されていることが明らかとなった (Watanabe et al., 2009).

(5) 中高緯度対流圏界面直上では気温及び大気組成濃度は高度と共に急激に変動する。それら変動に対して大気放射及び大規模擾乱による断熱混合・極向き循環が重要であるこ

とが従来の研究から指摘されていたが、高解像 GCM を用いた本研究からは重力波活動に伴う小規模鉛直混合及び赤道向き循環が重要であることが明らかとなった (Miyazaki et al., 2010a, 2010b).

(6) 中間圏上部での運動量収支に本質的な重力波の起源や伝播の全球的な特徴を解析した。重力波は、夏季は亜熱帯から、冬季は中高緯度からそれぞれのジェットに向かって伝播しており効率的に減速していることがわかった。また運動量フラックスの分布から、冬季における重力波の手法な発生源は険しい山脈と対流圏西風ジェットであり、夏季においては活発なモンスーン域での対流活動であることが明らかとなった。モンスーン域は夏季に上部対流圏で東風となることから、中層大気への重要な窓領域とみなすことができる (Sato et al., 2009).

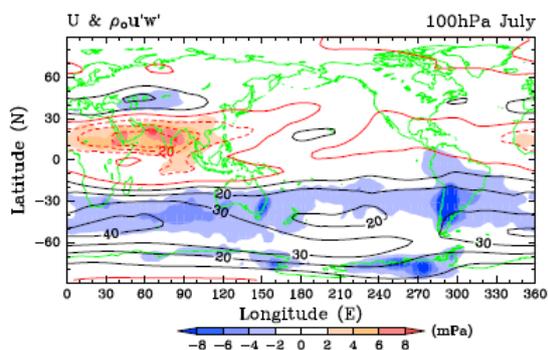


図 2: 7月の下部成層圏における重力波に伴う運動量フラックスの分布。等値線は東西風。Sato et al. (2009).

そのほかにも関連する研究として以下の研究を行った。

(7) 大気重力波等小規模擾乱にも適応可能な3次元波活動度フラックスと3次元残差循環の理論の構築を行った (Kinoshita et al., 2010).

(8) 京都大学信楽MU観測所にて気球観測を行い、これに基づく中部成層圏の慣性重力波の力学特性と発生メカニズムの解明を行った (Tateno et al., 2008).

主要な国際学会にて9件の招待講演を受けた。Watanabe et al. (2008) は J. Geophys. Res. の highlight 論文に選定され、Kinoshita et al. (2010) は JMSJ 論文賞を受賞した。本研究課題は、今後、国際宇宙科学研究所の重力波チームという国際共同研究の枠組みの中で研究活動を発展継続することとなった。

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 16 件)

- ① T. Kinoshita, Y. Tomikawa, and K. Sato, On the three-dimensional residual mean circulation and wave activity flux of the primitive equations. *J. Met. Soc. Japan*, **88**, 2010, 373–394, doi:10.2151/jmsj.2010-307, 査読有.
- ② Y. Tomikawa and K. Sato, Ozone enhanced layers in the 2003 Antarctic ozone hole. *J. Met. Soc. Japan*, **88**, 2010, 1–14, doi:10.2151/jmsj.2010-101, 査読有.
- ③ K. Miyazaki, S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, M. Takahashi, and K. Sato, Transport and mixing in the extratropical tropopause region in a high vertical resolution GCM. Part I: Potential vorticity and heat budget analysis. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 2010, 1293–1314, 査読有.
- ④ K. Miyazaki, K. Sato, S. Watanabe, Y. Tomikawa, Y. Kawatani, and M. Takahashi, Transport and mixing in the extratropical tropopause region in a high vertical resolution GCM. Part II: Relative importance of large-scale and small-scale dynamics. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 2010, 1315–1336, 査読有.
- ⑤ Y. Kawatani, K. Sato, D. J. Dunkerton, S. Watanabe, S. Miyahara, and M. Takahashi, The roles of equatorial trapped waves and internal inertia-gravity waves in driving the quasi-biennial oscillation. Part I: zonal mean wave forcing. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 2010, 963–980, 査読有.
- ⑥ Y. Kawatani, K. Sato, D. J. Dunkerton, S. Watanabe, S. Miyahara, and M. Takahashi, The roles of equatorial trapped waves and internal inertia-gravity waves in driving the quasi-biennial oscillation. Part II: Three-dimensional distribution of wave forcing. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 2010, 981–997, 査読有.
- ⑦ M. J. Alexander, M. Geller, C. McLandress, S. Polavarapu, P. Preusse, F. Sassi, K. Sato, S. Eckermann, M. Ern, A. Hertzog, Y. Kawatani, M. Pulido, T. Shaw, M. Sigmond, R. Vincent, and S. Watanabe, Recent developments in gravity wave effects in climate models, and the global distribution of gravity wave momentum flux from observations and models. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **136**, 2010, 1103–1124, 査読有.
- ⑧ K. Sato, S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, and M. Takahashi, On the origins of mesospheric gravity waves. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, 2009, L19801, doi:10.1029/2009GL039908, 査読有.
- ⑨ Y. Kawatani, M. Takahashi, K. Sato, S. P. Alexander, and T. Tsuda, Global distribution of atmospheric waves in the equatorial upper troposphere and lower stratosphere: AGCM simulation of sources and propagation, *J. Geophys. Res.*, **114**, 2009, D01102, doi:10.1029/2008JD010374, 査読有.
- ⑩ K. Sato, Y. Tomikawa, G. Hashida, T. Yamanouchi, H. Nakajima, and T. Sugita, Longitudinal dependence of ozone recovery in the Antarctic polar vortex revealed by balloon and satellite observations, *J. Atmos. Sci.*, **66**, 2009, 1807–1820, 査読有.
- ⑪ S. Watanabe, Y. Tomikawa, K. Sato, Y. Kawatani, K. Miyazaki, and M. Takahashi, Simulation of the eastward 4-day wave in the Antarctic winter mesosphere using a gravity wave resolving general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **114**, 2009, D16111, doi:10.1029/2008JD011636, 査読有.
- ⑫ S. Tatenno and K. Sato, A study of inertia-gravity waves in the middle stratosphere based on intensive radiosonde observations. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **86**, 2008, 719–732, 査読有.
- ⑬ K. Sato and M. Yoshiki, Gravity wave generation around the polar vortex in the stratosphere revealed by 3-hourly radiosonde observations at Syowa Station. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 2008, 3719–3735, doi:10.1175/2008JAS2539.1, 査読有.
- ⑭ S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, M. Takahashi, and K. Sato, General Aspects of a T213L256 Middle Atmosphere General Circulation Model. *J. Geophys. Res.*, **113**, 2008, D12110, doi:10.1029/2008JD010026, 査読有.
- ⑮ Y. Tomikawa, K. Sato, S. Watanabe, Y. Kawatani, K. Miyazaki, and M. Takahashi, Wintertime temperature maximum at the subtropical stratopause in a T213L256 GCM. *J. Geophys. Res.*, **113**, 2008, D17117, doi:10.1029/2008JD009786, 査読有.

[学会発表] (計 56 件)

- ① K. Sato, S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, and M. Takahashi (Invited), The use of high-resolution GCMs for the improvement of gravity wave parameterizations. *ISSI Gravity Wave Team Meeting*, 22–26 February 2010, Bern,

- Switzerland.
- ② K. Sato, S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, and M. Takahashi (Invited), Gravity wave generation and propagation in the middle atmosphere revealed by a high-resolution GCM. *IGAC-SPARC Joint Workshop in Kyoto "The One Atmosphere: Integration, Interface, and Impact"*, 25–26 October 2009, Kyoto, Japan.
 - ③ Y. Kawatani, K. Sato, T. J. Dunkerton, S. Watanabe, S. Miyahara, and M. Takahashi, The roles of 3-dimensional propagating gravity waves and equatorial trapped gravity waves on driving the quasi biennial oscillation: A study of high resolution atmospheric general circulation model. *MOCA-09, Joint Assembly of IAMAS, IAPSO and IACS*, 19–29 July 2009, Montreal, Canada.
 - ④ T. Kinoshita, Y. Tomikawa, and K. Sato, On the three-dimensional residual circulation and wave activity flux of the primitive equations. *MOCA-09, Joint Assembly of IAMAS, IAPSO and IACS*, 22 July 2009, Montreal, Canada.
 - ⑤ K. Sato, S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, S. Tatenno, and M. Takahashi (Invited), Gravity wave generation and propagation in the middle atmosphere revealed by a high-resolution GCM. *MOCA-09, Joint Assembly of IAMAS, IAPSO and IACS*, 19–29 July 2009, Montreal, Canada.
 - ⑥ K. Sato, S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, S. Tatenno, and M. Takahashi, Gravity wave generation and propagation in the middle atmosphere revealed by a high-resolution GCM. *The American Meteorological Society, 15th Conference on Middle Atmosphere*, 8–12 June 2009, Stowe, U.S.A.
 - ⑦ Y. Kawatani, K. Sato, T. J. Dunkerton, S. Watanabe, S. Miyahara, and M. Takahashi, The roles of 3-dimensional propagating gravity waves and equatorial trapped gravity waves on driving the quasi biennial oscillation: A study of high resolution atmospheric general circulation model. *The American Meteorological Society, 15th Conference on Middle Atmosphere*, 8–12 June 2009, Stowe, U.S.A.
 - ⑧ K. Sato, M. Tsutsumi, T. Sato, A. Saito, Y. Tomikawa, K. Nishimura, T. Yamanochi, H. Yamagishi, T. Aso, and M. Ejiri, Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar. *International Symposium: Fifty Years after IGY Modern Information Technologies and Earth and Solar Sciences*, 10–13 November 2008, Tsukuba, Japan.
 - ⑨ K. Sato, S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, S. Tatenno, and M. Takahashi (Invited), A study of the middle atmosphere dynamics using a gravity-wave resolving GCM. *SPARC 4th General Assembly*, 31 August–5 September 2008, Bologna, Italy.
 - ⑩ K. Miyazaki, S. Watanabe, Y. Tomikawa, Y. Kawatani, M. Takahashi, and K. Sato, Analysis of extratropical UTLS structure using a high vertical resolution GCM. *SPARC 4th General Assembly*, 31 August–5 September 2008, Bologna, Italy.
 - ⑪ Y. Kawatani, M. Takahashi, K. Sato, S. Alexander, and T. Tsuda, Global distribution of atmospheric waves in the equatorial upper troposphere and lower stratosphere: AGCM simulation of sources and propagation. *SPARC 4th General Assembly*, 31 August–5 September 2008, Bologna, Italy.
 - ⑫ Y. Kawatani, M. Takahashi, K. Sato, S. Watanabe, Y. Tomikawa, and K. Miyazaki, The roles of 3-dimensional propagating gravity waves and equatorial trapped waves on driving the quasi-biennial oscillation. *SPARC 4th General Assembly*, 31 August–5 September 2008, Bologna, Italy.
 - ⑬ Y. Tomikawa and K. Sato, Ozone enhanced layers in the Antarctic ozone hole. *SPARC 4th General Assembly*, 31 August–5 September, 2008, Bologna, Italy.
 - ⑭ S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, M. Takahashi, and K. Sato, General aspects of a T213L256 middle atmosphere general circulation model. *SPARC 4th General Assembly*, 31 August–5 September 2008, Bologna, Italy.
 - ⑮ K. Sato, S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, and M. Takahashi (Invited), A study of the middle atmosphere dynamics using a gravity-wave resolving GCM simulations. *5th AOGS Annual Meeting and Geosciences World Community Exhibition*, 16–20 June 2008, Busan,

- Korea.
- ⑩ S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, M. Takahashi, and K. Sato (Invited), Development of a T213L256 middle atmosphere general circulation model. *International CAWSES Symposium*, 23–27 October 2007, Kyoto, Japan.
- ⑪ Y. Tomikawa, S. Watanabe, Y. Kawatani, K. Miyazaki, M. Takahashi, and K. Sato (Invited), Wintertime Temperature Maximum at the subtropical stratopause in a T213L256 AGCM. *International CAWSES Symposium*, 23–27 October 2007, Kyoto, Japan.
- ⑫ Y. Kawatani, M. Takahashi, S. Watanabe, S. Miyahara, and K. Sato, 3-D activities of equatorial gravity waves in a high-resolution AGCM. *International CAWSES Symposium*, 23–27 October 2007, Kyoto, Japan.
- ⑬ Y. Kawatani, M. Takahashi, K. Sato, S. Miyahara, and S. Watanabe, 3-d Activities of equatorial gravity waves simulated in a high-resolution AGCM. *Chapman Conference on The Role of the Stratosphere in Climate and Climate Change*, 24–28 September 2007, Santorini, Greece.
- ⑭ K. Sato, Y. Tomikawa, H. Nakajima, T. Sugita, Longitudinally-dependent ozone recovery in the Antarctic polar vortex revealed by satellite-onboard ILAS-II observation in 2003. *Chapman Conference on The Role of the Stratosphere in Climate and Climate Change*, 24–28 September 2007, Santorini, Greece.
- ⑮ Y. Tomikawa, S. Watanabe, Y. Kawatani, K. Miyazaki, M. Takahashi, and K. Sato, A Mechanism for the Wintertime Temperature Maxima at the Subtropical Stratopause in a T213L256 AGCM. *Chapman Conference on The Role of the Stratosphere in Climate and Climate Change*, 24–28 September 2007, Santorini, Greece.
- ⑯ K. Sato, Y. Tomikawa, G. Hashida, H. Nakajima, T. Sugita, and T. Yamanouchi, Dynamics of the Antarctic ozone hole dissipation revealed by ground-based and satellite observations. *14th Conference on Middle Atmosphere*, 20–24 August 2007, Portland, U.S.A.
- ⑰ S. Watanabe, Y. Tomikawa, Y. Kawatani, M. Takahashi, and K. Sato, Influences of meridional circulation on

driving the SAO in a T213L256 AGCM. *14th Conference on Middle Atmosphere*, 20–24 August 2007, Portland, U.S.A.

- ⑱ K. Sato (Invited), Gravity waves generation around the polar vortex in the stratosphere. *24th IUGG General Assembly*, 2–13 July 2007, Perugia, Italy.

[その他]

ホームページ等

<http://www-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~kanto>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 薫 (SATO KAORU)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：90251496

(2) 研究分担者

富川 喜弘 (TOMIKAWA YOSHIHIRO)

情報・システム研究機構・国立極地研究所・助教

研究者番号：20435499

(3) 研究分担者

河谷 芳雄 (KAWATANI YOSHIO)

(独) 海洋研究開発機構・地球環境変動研究領域・研究員

研究者番号：00392960

(4) 研究分担者 (2007年度のみ)

高橋 正明 (TAKAHASHI MASAOKI)

東京大学・気候システム研究センター・教授

研究者番号：70188051

(5) 研究分担者 (2007年度のみ)

中村 卓司 (NAKAMURA TAKUJI)

京都大学・生存圏研究所・准教授(現:情報・システム研究機構・国立極地研究所 教授)

研究者番号：40217857

(6) 研究分担者 (2007年度のみ)

堤 雅基 (TSUTSUMI MASAKI)

情報・システム研究機構・国立極地研究所・准教授

研究者番号：80280535