

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740336

研究課題名(和文)地球磁場形状に適合した全球電離圏モデルによる数百kmスケール擾乱要因の研究

研究課題名(英文)Development of a high-resolution whole atmosphere-ionosphere model to reproduce ionospheric phenomena with spatial scale of several 100km

研究代表者

陣 英克 (Jin, Hidekatsu)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所宇宙環境インフォマティクス研究室・主任研究員

研究者番号：60466240

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、これまで地表から熱圏までの中性大気領域と電離圏を統合した地球全大気モデルGAIAを開発してきた。本研究では、将来的な数値予測に向けてGAIAの精緻化と現実の現象を再現するための開発を実施した。具体的には、空間分解能を1度(～100km)に向上させるとともに、地球磁場に沿った電離圏の振る舞いを表現できるように数値手法を改良した。また、気象再解析データを利用した現実ベースのシミュレーションを19年分実施し、観測や他のモデルとの比較を通じて検証を行った。精緻化されたGAIAでは、近年観測される数100kmスケールの現象が再現されており、今後同スケールの電離圏現象の解明に有用となりうる。

研究成果の概要(英文)：We have developed a whole atmosphere-ionosphere coupled model, GAIA. In this study, we improve the resolution and numerical treatment of the model in order to utilize it for numerical prediction of the upper atmosphere, especially improving the numerical scheme for the dynamics of and thermal diffusion of ionospheric plasma along geomagnetic field lines. We also carry out a long-term simulation of GAIA, and compare its output with observations and other model outputs. The improved model can reproduce finer ionospheric structures with spatial scale of several 100km, so it can be used for the analysis of such small scale ionospheric phenomena.

研究分野：超高層大気科学

キーワード：超高層大気 シミュレーション 中層大気 電離圏 宇宙天気 計算科学 成層圏突然昇温 熱圏

1. 研究開始当初の背景

応募者の研究グループは、個々の研究者によって別個に開発されてきた大気圏モデル、電離圏モデル、電気力学(ダイナモ)モデルをセルフコンシステントに結合し、世界に先駆けて対流圏から電離圏までを統合した地球全大気モデル GAIA を実現した(Jin et al., 2011)。本モデルの長期目標は超高層大気環境の数値予測を実現することであり、この目標に向けてモデルを精緻化すると同時に実際に起こる現象を再現する必要がある。一方、これまで数値シミュレーションと観測の両手法により水平スケール数 1000km の電離圏現象(赤道異常など)について比較的良く理解されているものの、数 100km スケールの電離圏現象については、観測範囲等の制限や、対応する分解能を持つ全球モデルが無いなどの理由により、発生機構や分布など根本的な部分が未解明であることが多い。これに対して、現在国内では、地球超高層大気撮像観測ワーキンググループによって、MSTID や SED などの数 100km の現象を主要なターゲットとする衛星観測計画(ISS-IMAP、2011-2013 年予定)が進行中である。したがって、超高層大気科学の進展や観測との協働を踏まえても、モデル開発のマイルストーンとして数 100km の電離圏現象は恰好のターゲットとなっている。

2. 研究の目的

本研究では、これまで構築した GAIA に対し、精緻化や現実現象を再現するための開発を行い、またモデルの検証と改良によって、数 100km の電離圏現象(MSTID、LSWS、SED など)の解明に資するモデルを実現する。

3. 研究の方法

2 で前述した目的を実現するため、(1) モデルの開発、(2) モデルの検証、(3) 数 100km スケールの現象の再現と解析、の項目を実施する。

(1) については、水平方向の空間分解能を現在の 5 度から 1 度(~100km)に向上するだけでなく、電離圏部分の数値スキームを改良する必要がある。後者に関して、現在の数値スキームは、電離圏 F 層以上について方程式を簡略化して解いており、数値的不安定を抑制する対処のために解が拡散的になっている。数 100km スケールの現象を再現するためには、高高度領域の電離圏を適切に解くことが必要であり、地球磁場形状に沿った電離圏の動きや熱拡散などを適切に扱える数値スキームに改良する。また、これらの改良を実施すると計算量が非常に多くなるので、並列化など計算の高速化も併せて行う。

(2) については、現実現象を再現するために日々の気象再解析データや太陽 EUV 指標を GAIA に取り入れたシミュレーションを行

い、その結果を同じ期間の観測や観測に基づく経験モデルと比較する。また、同じ条件下で実施した別のモデルによるシミュレーション結果と比較を行う。これらにより、モデルを検証し、必要に応じてモデルの改良を行う。

(3) については、精緻化した GAIA により、前述の数 100km スケールの現象を含む下層大気由来の電離圏現象を再現し、解析を行う。

4. 研究成果

(1) モデルの開発

GAIA-電離圏モデルの整備:

本研究で改良を予定している GAIA の電離圏部分は、長年に渡って複数の開発者が「上書き式」に更新を繰り返してきたため、内容把握が困難な上に計算環境や仕方の変更に応じて計算エラーが生じる状況であった。そこで、本研究の第 1 段階としてコードの中身を精査して構成や細部を整備し、各ルーチンのオブジェクト化を行った。これにより、コードの可読性と拡張性が改善されると同時に計算も安定化し、本研究の開発基盤を整えた。

GAIA-電離圏モデルの精緻化(地球磁場形状に沿ったダイナミクスと熱拡散の導入):

本研究以前では、GAIA のイオン運動量の方程式において、運動の慣性を表す項(時間微分項)を無視できるほど小さいと見做し省略してきた。この手法は手軽に解が求まるといった利点を持つが、F 層高度以上を数値的に安定して解くために人工的な粘性項を付加する必要があり、その結果として解が拡散的になる。本研究では、対策としてイオン運動量の方程式に磁力線に沿ったイオンの慣性項を導入した。さらに、本研究以前では鉛直 1 次元方向にしか考慮していなかった電子温度の方程式について、磁力線に沿った 3 次元の拡散を解けるようにモデルを改良した。数値解法上は、差分式を陰解法で解く必要があり、現実的な時間で計算できるよう並列分散化するなど工夫を施した。これらの改良により、F 層の電子温度と密度分布について、シミュレーション結果と(観測に基づく)国際標準電離圏モデルとのずれが小さくなった(図 1、陣ほか、2015 年 5 月)。

GAIA の高空間分解能化:

GAIA の電離圏部分については、前述の改良によって、コードを大きく変更することなく分解能の変更が可能となった。さらに、GAIA の電気力学モデルについても高分解能化を行い、研究協力者の担当によって大気圏部分の高分解能化を実施した(Miyoshi et al., 2015)。これらの要素モデルを結合し、当初の 5 倍となる経度 1 度×緯度 1 度(~100km)の分解能を持つ GAIA を実現した。この精緻化や の高分解能化に伴い計算量が

膨大になるため、並列計算技術（MPI および SMP）の導入による計算の高速化も併せて行った。これにより、高分解能の大気圏 - 電離圏の計算や、(2) で行う長期のシミュレーションが現実的な計算時間で実施可能となった。

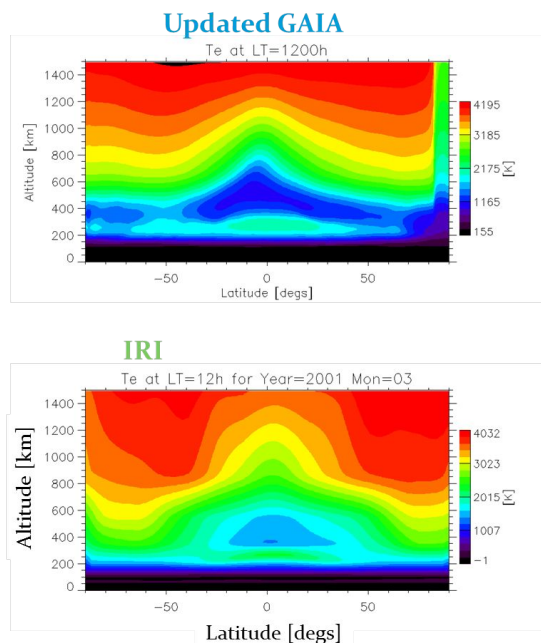


図 1：磁力線に沿った電子拡散を取り入れた GAIA と国際電離圏標準モデル IRI との比較

(2) モデルの検証

現実指向型の長期シミュレーションの実施：

GAIA の下層大気部分に気象庁から提供される客観解析データをナッジング手法により組み込み、また太陽紫外線強度の代理指標となる F10.7 を入力し、現実ベースの地球全大気のシミュレーションを実施した。や

で示すように、当初の本研究の目的を超えてシミュレーションデータが有用であることが分り、前太陽活動サイクル開始時の 1997 年から現在（2015 年末）まで 19 年間の長期のシミュレーションを実施し、出力される各変数の時系列データを NetCDF4 標準形式のデータベースとして構築し、公開している。

長期シミュレーションと観測との比較による検証：

まず、太陽サイクルや季節など気候的な変動の特性を検証するために、GAIA の長期シミュレーションデータと、電離圏観測（イオノゾンデ、TEC）や全球経験モデル（IRI、MSIS、HWM）との比較を行った。この結果、GAIA では熱圏上部の気候学的な振る舞いが良く再現されているが、電離圏の気候学的な変動については未だ観測とのずれが無視できないことが明らかになった（陣ほか、2015）。このうち、(2) で実施した電離圏の高高度領

域のダイナミクスや電子温度に関する数値手法の改良が、観測とのずれの縮小に大きく貢献することが分った。しかし、その導入方法や他の部分（太陽放射強度の代理指標の適切性、大気波動の気候学的な振る舞いの再現精度、磁気圏による影響の未導入など）には未だ改善余地があると考えられる。

イベントベースでの観測との比較も行った。2009 年の 1 月に大規模な成層圏突然昇温が発生し、電離圏にその影響と考えられる変動が観測された（e.g., Goncharenko et al., 2010）。我々は、GAIA の長期シミュレーションデータと衛星観測とを比較しつつ、モデルで成層圏突然昇温と電離圏変動の特徴が良く再現されていることを確認した上で、データベースから大気上下結合過程を解析し、成層圏で変調を受けた大気潮汐成分が熱圏まで伝搬し、電場の生成を介して電離圏に影響を与えるメカニズムを提唱し（Jin et al., 2012、図 2）、現在有力な説の 1 つとなっている。また、同成層圏突然昇温イベントが上部熱圏の大気潮汐や背景状態に与える影響についても、GAIA データと CHAMP や GRACE 衛星による観測との比較を通じて明らかにした（Liu et al., 2013; 2014）。

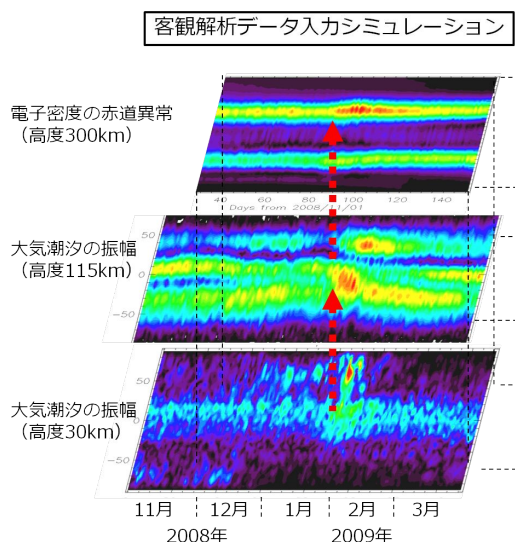


図 2：GAIA の解析から明らかとなった 2009 年 1 月 SSW 時の大気上下結合過程（Jin et al., 2012）

上記の他に、人工衛星に搭載された撮像観測 ISS-IMAP や地上電離圏観測などとの比較などの研究に GAIA の長期シミュレーションデータが利用されている（e.g., Chang et al., 15; Shinagawa et al., 2015）。

長期シミュレーションと他のモデルとの比較による検証：

2009 年 1 月に発生した成層圏突然昇温のイベントは NCAR の TIEGCM や NOAA の WAM など主要な大気圏モデル（と電離圏モデル）でも

シミュレーションが行われているため、このイベントを対象にモデル間の比較を実施した。この比較により、モデルに依らない変動の特徴が明らかにされたが、一方で気象データの違いや導入手法・高度範囲の違い、さらに中間圏以上における重力波パラメタリゼーションの違い、電離圏の数値スキームの違いなどにより、モデル間の結果の違いが大きくなることが明らかとなった(図 3、Pedatella et al., 2014; 2016)。本結果は、今後のモデル開発の課題として留意する必要がある。

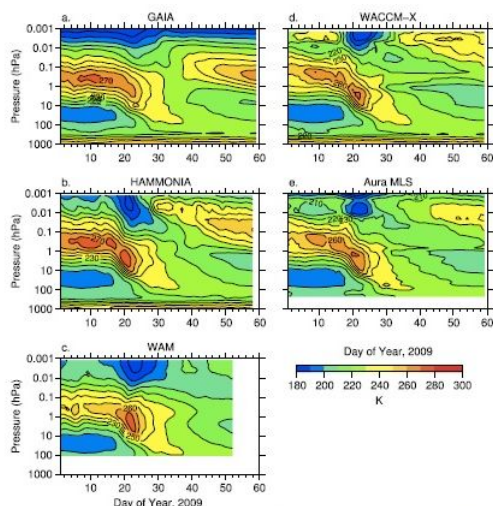


図 3 : SSW 時の中層大気変動についてモデル間の比較 (Pedatella et al., 2014)

(3) 数 100km スケールの現象の再現と解析:

ここ数年の電離圏観測では局所的な擾乱源から数 100km スケールで同心円状に広がる電離圏擾乱が観測されており、中規模電離圏擾乱 (MSTID) の研究が進展しつつある。本研究で開発した高分解能 (経度 1 度 × 緯度 1 度) の GAIA のシミュレーション結果を見たところ、熱圏において同じ規模の同心円状の擾乱の広がりが再現されていることが分かった。未だ解析は初期段階であり、詳細な解析や論文への投稿など今後行う予定である。また、高分解能の GAIA を用いた重力波の解析も行われている

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 11 件)

Yokoyama, T., H. Jin, and H. Shinagawa, West wall structuring of equatorial plasma bubbles simulated by three-dimensional HIRB model, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, Vol. 120, 2015, 8810-8816, DOI: 10.1002/2015JA021799-T

Miyoshi, Y., H. Fujiwara, H. Jin, and H. Shinagawa, Impacts of sudden stratospheric warming on general circulation of the thermosphere, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, Vol. 120, 2015, 10,897-10,912, DOI: 10.1002/2015JA021894

Yokoyama, T., H. Shinagawa, and H. Jin, Nonlinear growth, bifurcation, and pinching of equatorial plasma bubble simulated by three-dimensional high-resolution bubble model, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, Vol. 119, 2014, 10474-10482

Miyoshi, Y., H. Fujiwara, H. Jin and H. Shinagawa, A global view of gravity waves in the thermosphere simulated by a general circulation model, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, Vol. 119, 2014, 5807-5820, DOI:10.1002/2014JA019848

Liu, H., Y. Miyoshi, S. Miyahara, H. Jin, H. Fujiwara and H. Shinagawa, Thermal and dynamical changes of the zonal mean state of the thermosphere during the 2009 SSW:GAIA simulations, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, Vol. 119, 2014, 6784-6791, DOI: 10.1002/2014JA020222

Fujiwara, H., Nozawa, S., Ogawa, Y., Kataoka, R., Miyoshi, Y., Jin, H., and Shinagawa, H., Extreme ion heating in the dayside ionosphere in response to the arrival of a coronal mass ejection on 12 March 2012, *Annales Geophysicae*, 査読有, Vol. 32, 2014, 831-839, DOI: 10.5194/angeo-32-831-2014

N. M. Pedatella, T. Fuller-Rowell, H. Wang, H. Jin, Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, H.-L. Liu, F. Sassi, H. Schmidt, V. Matthias, and L. Goncharenko, The neutral dynamics during the 2009 sudden stratosphere warming simulated by different whole atmosphere models, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, Vol. 119, 2014, 1306-1324, DOI:10.1002/2013JA019421.

Shinagawa, H., T. Tsugawa, M. Matsumura, T. Iyemori, A. Saito, T. Maruyama, H. Jin, M. Nishioka, and Y. Otsuka, Two-dimensional simulation of ionospheric variations in the vicinity of the epicenter of the Tohoku-oki earthquake on 11 March 2011, *Geophysical Research*

Letters, 査読有, Vol. 40, 2013, 5009-5013, DOI:10.1002/2013GL057627

Huixin Liu, Hidekatsu Jin, Yasunobu Miyoshi, Hitoshi Fujiwara, and Hiroyuki Shinagawa, Upper atmosphere response to stratosphere sudden warming: Local time and height dependence simulated by GAIA model, Geophysical Research Letters, 査読有, Vol. 40, 2013, 1-6, DOI: 10.1002/grl.50146

Jin, H., Y. Miyoshi, D. Pancheva, P. Mukhtarov, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, Response of migrating tides to the stratospheric sudden warming in 2009 and their effects on the ionosphere studied by a whole atmosphere-ionosphere model GAIA with COSMIC and TIMED/SABER observations, Journal of Geophysical Research, 査読有, Vol. 117, 2012, 1-20, DOI: 10.1029/2012JA017650

Pancheva, D., Y. Miyoshi, P. Mukhtarov, H. Jin, H. Shinagawa, and H. Fujiwara, Global response of the ionosphere to atmospheric tides forced from below: Comparison between COSMIC measurements and simulations by Atmosphere-Ionosphere Coupled Model GAIA, Journal of Geophysical Research, 査読有, Vol. 117, 2012, 1-19, DOI:10.1029/2011JA017452

〔学会発表〕(計 21 件)

H. Jin, Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, Tidal variabilities and their effects on the upper atmosphere during stratospheric sudden warmings studied with a long-term whole atmosphere-ionosphere simulation, 日本地球惑星科学関連学会連合大会, 2016 年 5 月 22 日~2016 年 5 月 26 日, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

陣 英克, 三好 勉信, 藤原 均, 品川 裕之, 長期シミュレーションを用いた成層圏昇温時の熱圏・電離圏変動, 第 29 回大気圏シンポジウム, 2016 年 3 月 7 日~2016 年 3 月 8 日, 宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, Vertical atmospheric coupling studied with a whole atmosphere-ionosphere coupled model GAIA,

International Symposium PSTEP-1, 2016 年 1 月 13 日~2016 年 1 月 14 日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

陣 英克, 三好 勉信, 藤原 均, 品川 裕之, 大気圏電離圏結合シミュレーションデータベースの紹介および検証と改良, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 138 回総会・講演会, 2015 年 10 月 31 日~2015 年 11 月 03 日, 東京大学(東京都文京区)

陣英克, 三好 勉信, 藤原 均, 品川 裕之, 松尾 朋子, Introduction of long-term whole atmosphere-ionosphere simulation, 日本地球惑星科学関連学会連合大会, 2015 年 5 月 24 日~2015 年 5 月 28 日, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

Hidekatsu Jin, Yasunobu Miyoshi, Hitoshi Fujiwara, Hiroyuki Shinagawa, Day-to-day and seasonal variations of thermosphere and ionosphere reproduced in the long-term simulation database, The 3rd AOSWA workshop, 2015 年 3 月 2 日~2015 年 3 月 5 日, The LUIGANS Spa & Resort, Fukuoka, Japan

陣 英克, 三好 勉信, 藤原 均, 品川 裕之, 松尾 朋子, 大気圏電離圏結合モデル(GAIA)への NCAR-DART の導入について, 統計数理研究所共同研究集会「電離圏・磁気圏モデリングとデータ同化」, 2015 年 1 月 9 日, 統計数理研究所(東京都立川市)

陣 英克, 三好 勉信, 藤原 均, 品川 裕之, 大気圏電離圏モデルデータを用いた大気潮汐によるダイナモ電場の日々および季節変動の解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 136 回総会・講演会, 2014 年 10 月 31 日~2014 年 11 月 03 日, 信州大学(長野県松本市)

陣 英克, 三好 勉信, 藤原 均, 品川 裕之, 大気圏電離圏結合モデル(GAIA)の詳細と利用について, 中間圏・熱圏・電離圏(MTI)研究会, 2014 年 09 月 22 日~2014 年 09 月 23 日, 情報通信研究機構(東京都小金井市)

陣 英克, 三好 勉信, 藤原 均, 品川 裕之, 松尾 朋子, A Realistic Whole Atmosphere-Ionosphere Modeling and Collaboration with Observations, 日本地

球惑星科学関連学会連合大会, 2014 年 4 月 28 日~2014 年 5 月 02 日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, Effects of Realistic Lower Atmospheric Forcing on Ionospheric Variability Studied with a Long-term Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Simulation, Asia Oceania Geosciences Society 11th Annual Meeting, 2014 年 7 月 28 日~2014 年 8 月 01 日, Royton Sapporo, Hokkaido, Japan

陣英克, 三好勉信, 藤原均, 品川裕之, 気象データ入力による GAIA モデル長期シミュレーションと IMAP との連携, 平成 25 年度名大 STE 研究集会「宇宙空間からの超高層大気撮像観測と地上観測、モデリングとの結合に関する研究集会」, 2013 年 09 月 17 日~2013 年 09 月 18 日, 情報通信研究機構(東京都小金井市)

H. Jin, Y. Miyoshi, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, Ionosphere-Thermosphere System Response to Lower Atmospheric Variability Studied by a Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Model, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) Annual Meeting, 2013 年 06 月 24 日~2013 年 06 月 28 日, Brisbane Convention & Exhibition Centre, Brisbane, Australia

陣英克, 三好勉信, 藤原均, 品川裕之, ISS-IMAP 観測との連携研究への期待: 大気上下結合モデリングの観点より, 2013 年 5 月 19 日~2013 年 5 月 24 日, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

Hidekatsu Jin, Yasunobu Miyoshi, Huixin Liu, Hitoshi Fujiwara, Hiroyuki Shinagawa, Ionospheric Response to Stratospheric Sudden Warming Studied by Realistic Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Simulation, 日本地球惑星連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 19 日~2013 年 5 月 24 日, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

陣英克, 三好勉信, 藤原均, 品川裕之, 気象データを取り入れた大気圏-電離圏モデリングの試みと課題について, 名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「STE シミュレーション研究会」, 2013 年 3 月 20 日~2013 年 3 月 23 日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

陣英克, 三好勉信, 藤原均, 品川裕之, GAIA モデルの現状と今後: ISS-MAP 観測データ利用モデリングの視点より, 名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「宇宙空間からの超高層大気撮像観測と地上観測、モデリング

との結合に関する研究集会」, 2012 年 12 月 26 日~2012 年 12 月 27 日, 京都大学(京都府京都市)

陣英克, 三好勉信, 藤原均, 品川裕之, 村田健史, 長期シミュレーションによる成層圏昇温時の電離圏変動メカニズムの研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 132 回総会・講演会, 2012 年 10 月 20 日~2012 年 10 月 23 日, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)

Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, K. Terada, Possible Contribution of Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Model to Space Weather Applications, the AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly, 2012 年 8 月 13 日~2012 年 8 月 17 日, Resorts World Convention Centre, Singapore

Jin, H., Y. Miyoshi, D. Pancheva, P. Mukhtarov, H. Fujiwara, H. Shinagawa, Tidal variability during stratospheric sudden warming in 2009: Comparison between GAIA model and COSMIC and TIMED/SABER observations, the 39th COSPAR Scientific Assembly, 2012 年 7 月 14 日~2012 年 7 月 22 日, Infosys Training Centre, Mysore, India

陣英克, 三好勉信, Dora Pancheva, Plamen Mukhtarov, 藤原均, 品川裕之, Comparison between GAIA model and COSMIC-TIMED/SABER observations: stratospheric warming event in 2009, 地球惑星科学関連学会連合大会, 2012 年 5 月 20 日~2012 年 5 月 25 日, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

陣英克(JIN Hidekatsu)
国立研究開発法人 情報通信研究機構・電磁波計測研究所 宇宙環境インフォマティクス研究室・主任研究員
研究者番号: 60466240

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし