

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：32629

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340144

研究課題名(和文) 電離圏嵐の数値予報：北極・赤道域観測と連携したシミュレーション手法開発と実証

研究課題名(英文) Investigation of numerical methods for prediction of the ionospheric disturbances with observations and numerical simulations

研究代表者

藤原 均 (Fujiwara, Hitoshi)

成蹊大学・理工学部・教授

研究者番号：50298741

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,500,000円、(間接経費) 4,650,000円

研究成果の概要(和文)：極域超高層大気(高度約80～500kmの大気領域)へのオーロラ現象に伴うエネルギー流入や下層大気に起源を持つ大気波動の伝播・エネルギー輸送、そしてその結果として生じる大気変動について調べた。レーダー・ライダー観測により、太陽活動が極小から極大へと向かう期間の電離圏・熱圏変動に関する幾つの特徴を明らかにした。また、数値シミュレーションから極冠域での熱圏変動、特に、オーロラ活動変化に伴う熱圏加熱、熱圏風加速がオーロラオーバルの拡大・収縮によって効率的に起きることがわかった。更に、数値シミュレーションにより、下層大気起源の幾つの大気波動が熱圏・電離圏変動を引き起こすことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：We have studied auroral energy inputs and atmospheric waves, which are originated in the lower atmosphere, in the polar upper atmosphere. The resultant ionospheric and thermospheric variations have been also investigated both from radar and lidar observations and numerical simulations. From the radar and lidar observations, we have clarified some characteristics of the ionospheric and thermospheric variations in the periods from the solar minimum to maximum. The numerical simulations have shown enhancements of the thermospheric wind and temperature depending on the polar cap/auroral oval size. In addition, some numerical simulations were performed to reproduce the ionospheric and thermospheric variations due to propagation of the atmospheric waves from the lower atmosphere.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：極域電離圏 熱圏 EISCATレーダー 太陽風 オーロラ ナトリウムライダー 大気波動 シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

電離圏嵐には、地磁気擾乱(極域へのエネルギー流入)に伴って(主に F 領域: 高度約 300-400 km 付近)電子密度が通常よりも増大する正相嵐(positive storm)と、減少する負相嵐(negative storm)が存在する。正相・負相嵐を引き起こす上で、伝搬性大気擾乱、熱圏子午面循環、侵入電場、中性大気組成比(O/N<sub>2</sub>)変動が重要であることがこれまでの衛星・光学・電波観測、数値シミュレーションから明らかとなっている(Prölss, JGR, 98, 5981-5991, 1993; Fuller-Rowell et al., JGR, 101, 2343-2353, 1996; Mannucci et al., GRL, 32, doi:10.29/2004GL021467, 2005)。しかしながら、実際の現象ではこれらの正相・負相嵐を引き起こす要因が複雑に重なり合い、正相・負相嵐が同時にいくつかの場所で発生する場合がある(Lu et al., JGR, 106, 24,493-24,504, 2001)。また、一見単純に見える地磁気擾乱時の伝搬性大気擾乱の場合でも、数値シミュレーションによって観測結果を再現できる場合とそうでない場合とがある(Lei et al., JGR, 113, A06310, doi:10.1029/2008JA013090, 2008)。このように、電離圏嵐に関わる物理過程の概要は理解されているものの、物理過程相互の関係は理解されておらず、現段階では世界中のどのグループも電離圏嵐の予報にまでは至っていない。

当研究グループでは、世界に先駆けて地表から熱圏上端までを含む大気大循環モデル(General Circulation Model: GCM)の開発に成功し(Miyoshi and Fujiwara, GRL, 30, 1789, doi:10.1029/2003GL017695, 2003)、下層大気に起源を持つ潮汐変動等が上層大気に及ぼす影響について多くの知見を得てきた。この大気モデルは、さらに電離圏モデルと結合され、近年の衛星観測から明らかとなった電離圏経度構造をよく再現する(Jin et al., JGR, 2011)。現在、当研究グループに加えて米国の 2 グループ(NOAA グループ、NCAR グループ: Akmaev et al., GRL, 35, L03810, doi:10.1029/2007GL032584, 2008; Liu et al., 2011)が同様の大気圏・電離圏結合モデル開発を推進しており、激しい研究・開発競争の最中にある。

当研究グループではまた、北欧大型大気レーダー(EISCAT レーダー)観測から、極域へのエネルギー流入について調べてきた(Fujiwara et al., Ann Geophys, 2007 など)。EISCAT レーダーは我が国の研究者が主体的、継続的に利用できる唯一の極域大型大気レーダーであり、熱圏・電離圏研究のための極めて強力な研究ツールである。研究代表者らは、極域へのエネルギー流入と電離圏応答を調べるための EISCAT レーダー観測を提案し、2010・2011 年度 EISCAT 特別実験に採択された(2 年計画)。これらのモデリング研

究、レーダー観測の進展を踏まえ、極域から中低緯度にまで広がる電離圏・熱圏変動について定量的に詳細を調べる準備が整ったと考えられる。

本研究は、このような電離圏変動予測の基礎技術・研究成果の蓄積に寄与するものであり、超高層物理学の進展に加えて、通信、航空宇宙関連分野への波及効果も期待されるなど社会的にも大きな意義を持つ。

本研究はまた、国際学術組織 The Scientific Committee On Solar-Terrestrial Physics (SCOSTEP: 太陽地球系物理学・科学委員会)が推進する CAWSES-II (Climate and Weather of the Sun-Earth System) プログラム(2009 年-2013 年)において主要研究課題と密接に関係する。研究代表者は CAWSES-II Task Group 4 での Project 4 Co-Leader をつとめているほか、研究分担者らも各種ワーキンググループメンバーとなっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、世界的にも極めてユニークな大気圏・電離圏モデル、及び北極域を中心とした大型大気レーダー観測等により電離圏嵐の数値予報システムに寄与する基礎技術(物理素過程のモデル化、解析手法)を開発・検証することを目的とする。EISCAT レーダーによる北極域観測データに基づいて、極域へのエネルギー流入の詳細を推定し、大気圏・電離圏モデルを用いた数値シミュレーションを実施する。

これまでに蓄積されてきた EISCAT 観測データを用いるとともに、特別実験に申請し、特に詳細が明らかになっていない極冠域での電離圏・熱圏変動について調べる。また、EISCAT サイトにて実施されている光学観測(ナトリウムライダーなど)のデータを活用し、下層大気からの影響による電離圏・熱圏変動のモニタリングを試みる。

地磁気静穏時と擾乱時(磁気嵐時など)の熱圏・電離圏変動を定量的に調べるために、条件の異なるいくつかの数値シミュレーションを実施する。特に、オーロラエネルギーの流入領域、流入量の違いによる電離圏・熱圏変動について調べる。

当研究グループのモデルは、米国グループのモデルに比べて極域の物理・化学素過程が簡略化されたものである。上記シミュレーションを進めながら、極域の物理過程の精密化をはかる。また、モデルを高分解能化し従来よりも微小スケールの現象の再現を試みる。

### 3. 研究の方法

EISCAT レーダーによる北極域観測データに基づいて、極域へのエネルギー流入の詳細(エネルギー流入量、エネルギー流入量増加の継続時間など)を推定し、大気圏・電離圏モデルを用いた数値シミュレーションを実施する。地磁気静穏時と擾乱時(磁気嵐時など)の熱圏・電離圏変動を定量的に調べるとともに、変動を引き起こす物理素過程について調べる。

EISCAT レーダー観測、及び電離圏経験モデルを用いて、電場、電気伝導度の大きさを推定し、中性大気加熱率を推定する。特に、EISCAT スパールバルレーダー(ESR) 観測では、極冠域での電離圏パラメータの導出が可能であり、ESR はこの領域へのエネルギー流入を推定可能な唯一の大型レーダーである。局所的な中性大気加熱率に加えて、統計的なオーロラ・オーバル、極冠域全域での加熱率のモデル化を試みる。また、EISCAT 特別観測を立案・申請し、実施する。

各研究機関、共同利用研究所所有のスーパーコンピュータ、新規に整備したワークステーション等を用いて数値シミュレーションを実施する。同様にデータ解析のためのソフトウェアとハードディスクを購入し、シミュレーション・観測データの解析、データの保存・管理を行う。

### 4. 研究成果

本研究では、オーロラ活動変化に伴う北極域の電離圏・熱圏領域へのエネルギー流入と加熱過程をモニターするために EISCAT レーダーによる観測を実施した。また、下層大気から伝搬する大気波動による極域電離圏・熱圏変動を理解するためにナトリウムライダーによる下部熱圏変動の観測を実施した。これらの観測から、極冠域からオーロラ・オーバルに至る領域での特徴的な上部、及び下部熱圏・電離圏変動のいくつかが明らかになった。

太陽風変動に伴って、電離圏・熱圏での加熱領域の広がり、加熱の大きさ、加熱の継続時間が変化する。観測結果を踏まえ、このようなエネルギー流入の変化を想定した数値シミュレーションを実施した。極冠域、オーロラ・オーバル近傍において、効果的に熱圏風加速や大気加熱を引き起こす可能性のある物理機構を提示することができた。

下層大気に起源をもつ大気波動による電離圏・熱圏変動を調べるために、大気圏・電離圏モデルによるシミュレーションを実施した。これにより、中間圏、熱圏での大気重力波、潮汐波の特徴のいくつかを示された。

以下に、上述した成果概要の主なものについてまとめる。

#### 1. EISCAT レーダーによる極域電離圏観測

本研究期間中、3 回の EISCAT 特別実験に申請・採択され EISCAT スパールバルレーダー (Longyearbyen: ロングイヤビン)、EISCAT UHF レーダー (Tromsø: トロムソ) による特別実験を実施した。また、本研究期間以前に取得したデータも比較・活用し、太陽活動が極小から極大期へと移行する間の極冠域、オーロラ帯の電離圏・熱圏変動について調べた。

オーロラ現象とともに極域へのエネルギー流入と、その結果として生じる電離圏変動を調べるために、2011 年 1 月 10-11 日に取得した EISCAT レーダー特別観測データの解析を行った。地理緯度 69.6 度のトロムソ (EISCAT UHF) で観測された電離圏データには顕著な地方時変化が見られた一方で、地理緯度 78.2 度のロングイヤビン (EISCAT スパールバルレーダー: ESR) では、はっきりとした地方時変化は見られなかった。ESR データにはオーロラ降下粒子によると思われる電子密度変動や電場の増大に伴うイオン温度の増大が顕著に現れ、激しく変動する極域電離圏の様子がとらえられた。例えば、高度 300 km でのイオン温度に着目すると、EISCAT UHF データでは電場増大の影響は少なく、イオン温度は 800 K 程度でほぼ一定であったが、ESR データでは準周期的な電場変動に伴って千数百 K にまで増大した。この期間の人工衛星、SuperDARN レーダー観測によると太陽風(惑星間空間磁場)の変動により、オーロラ・オーバルまたは対流電場の広がり準周期的に変化したため、ESR 上空は準周期的にオーロラ・オーバルの内外に位置することになりエネルギー流入も準周期的になったと考えられる。

太陽活動が活発となり 2012 年 3 月には、太陽フレアやそれに伴う太陽コロナ質量放出現象(Coronal Mass Ejection: CME)が多発した。2012 年 3 月 12 日・13 日に実施した特別実験では、これらの CME 現象の 1 つが地球に到達し(図 1)、電離圏変動を引き起こした事例の ESR (ロングイヤビン)、EISCAT UHF (トロムソ) 同時観測に成功した(図 2)。ESR では、CME に伴う太陽風変動(ショック構造)が ACE 衛星の位置に到達して約 40 分後(~9:00 UT または ~12:00 MLT 前後)に強い電離圏加熱を観測した。一方で、EISCAT UHF (トロムソ) ではこのとき若干の温度増大が見られた程度であった。太陽風の特徴は、数 10 分~1 時間程度、高速・超高密度、Bz 南向きとなったことである。このとき、AE 指数は極めて増大し、粒子計測から推定される Hemisphere Energy input (NOAA) もまた極めて大きな値を示した。11:00-12:00 UT

にかけて、太陽風速度・密度は先の場合ほどに大きくは無いものの、南向きに転じた Bz が長時間継続し、AE 指数は再び極めて増大し、EISCAT UHF(トロムソ)では強い加熱が観測された。しかし、ESR(ロングイヤビン)では先の時間帯ほどには強い加熱は見られなかった。Hemisphere Energy input は大きな値を示したものの、先の時間帯の方が大きい値であった。ロングイヤビンとトロムソでの加熱(イオン温度上昇)は、IMAGE 磁力計ネットワーク観測から推定される電流の増減と整合的である。電流強度の時空間分布から、9:30-10:00 UT 付近では地理緯度 73 度より高緯度側で局所的に極めて強い電流が流れた一方で、11:00-12:00 UT では電流強度は先のものほどではなかったが、広範囲(64~78 度くらいまで)に電流の増大(加熱域の伸展)があったものと思われる。その結果、AE 指数は観測期間で最大になった。CME に伴う太陽風変動に対する磁気圏応答によって、電離圏でのポーラーキャップポテンシャル差、オーロラ・オーバルのサイズ、ポテンシャル分布が決定され、その結果、局所的な電場の増大によって強い電離圏加熱を生じるといった一連の過程を観測的に捉えることができた。

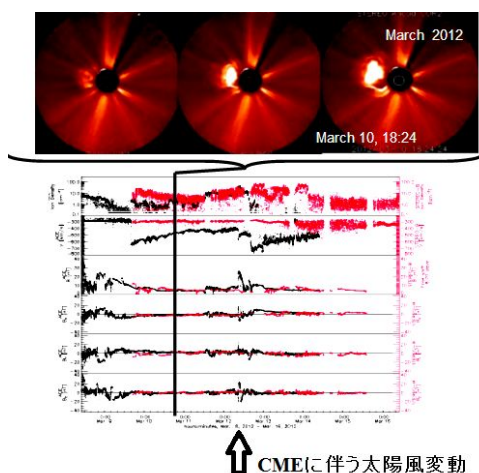


図 1. 2012 年 3 月 10 日の CME 現象(上図)とその後(3月 12 日)の太陽風変動(下図)。

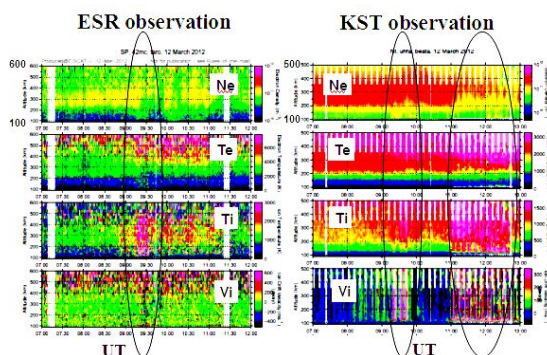


図 2. ロングイヤビン(左図)、トロムソ(右図)で観測された電離圏変動。

これらの観測に加えて、2013 年 3 月 14 日-15 日、2014 年 3 月 7 日-8 日にも特別実験を実施し、太陽放射強度に関連した指数である F10.7 が 83~148 までに変化した際の比較的静穏時の ESR、EISCAT UHF データを蓄積することができた。

## 2. 数値シミュレーションによる上部熱圏変動の研究

これまでの EISCAT レーダー観測では、オーロラ・オーバルの拡大縮小によってロングイヤビン、トロムソ上空での電離圏変動の様相が大きく異なることが示された。特に地磁気静穏時では、オーロラ・オーバルが収縮しているため、ロングイヤビン上空での電離圏変動が顕著であると考えられる。

極域熱圏変動の典型例として上記 CME 現象に着目し、その際の熱圏大気変動について数値モデル(General circulation model: GCM)を用いたシミュレーションを実施した。CME に伴い、太陽風は 2 段階の変動を示した。はじめに太陽風のショック構造によりオーロラ・オーバルの大きさをほとんど変化させずに(収縮した状態のまま)極域に強い加熱が生じた。約 2 時間後、太陽風南向き磁場の影響でオーロラ・オーバルの大きさを拡大させながら同様に強い加熱が引き起こされた。上記 2 段階のオーロラ加熱領域の変動に対応したシミュレーション(オーロラ・オーバルの大きさのみを変化させ、ポーラーキャップポテンシャル差は同じとした)により、熱圏温度・風速変動を調べたところ、収縮したオーロラ・オーバルでの加熱では局所的な高温領域が形成され、拡大したオーロラ・オーバルでの加熱では温度増大よりも熱圏風加速が顕著に生じることが明らかになった。

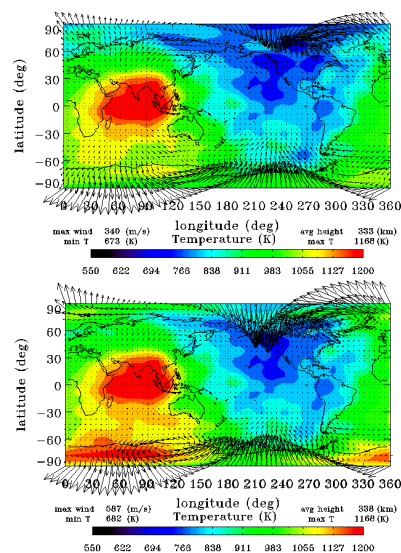


図 3. 地磁気静穏時(上図)、擾乱時(下図)の高度 300km での温度、風速分布の計算例。

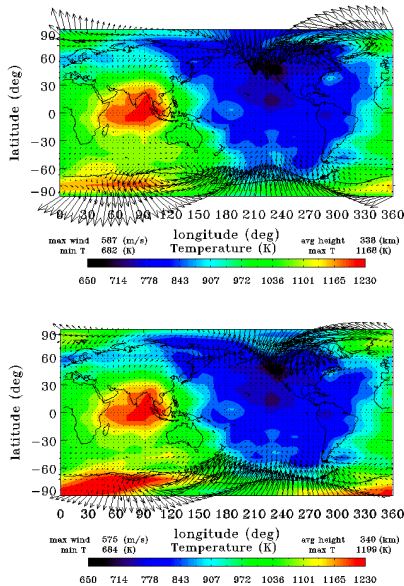


図 4. 通常のオーロラ・オーバルのサイズでの大気加熱による熱圏(高度 300 km)での温度、風速(上図)と収縮したオーロラ・オーバルでの温度、風速(下図)。通常のオーバルサイズでは熱圏風加速が顕著に生じる。一方、収縮したオーロラ・オーバルでは、特に極冠域で通常よりも高温の領域が出現する。

### 3. ナトリウムライダーによる下部熱圏観測

野澤(研究分担者)を中心に、EISCAT レーダーサイト(トロムソ)にナトリウムライダーを設置・運営し、上部中間圏から下部熱圏(80~110 km)にかけての大気温度、ナトリウム数密度の観測を実施してきた。ここで用いているナトリウムライダーは、高時間・高高度分解能を有しており、各種大気波動の伝搬、散逸等によって生じるナトリウム層の変動をモニター可能である。本研究では、以前に取得した観測データの詳細な解析を行うとともに、本研究期間中にもトロムソにて観測を実施した。

これまでにナトリウムライダーによってスプラディックナトリウム層の発達、下層大気起源の大気重力波が伝搬・散逸する様子を捉えることに成功している。特に、2010年10月29日の観測結果の詳細な解析から、鉛直波長 7 km、最大振幅 15 K、(見かけの)周期 4 時間の大気重力波による温度、ナトリウム密度変動を見出した。下層大気からの運動量やエネルギーを上層大気へ輸送する担い手としての大気重力波の役割を理解することは、中間圏・熱圏・電離圏変動の理解に不可欠である。この事例では、22:00 UT 以前の大気重力波は高度約 95 km より上方には伝搬せず、22:00 UT 以降の大気重力波は高度約 100 km 付近にまで伝搬していた。これ

らの伝搬特性は、背景大気による対流不安定性などに起因すると考えられる。

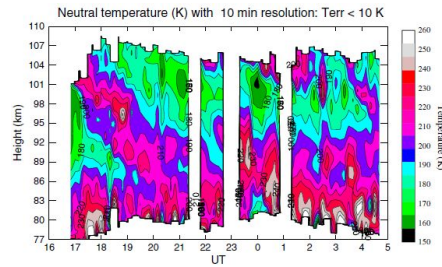


図 5. ナトリウムライダーによる温度計測の例 (Nozawa et al., 2014)。

### 4. 数値シミュレーションによる大気重力波、潮汐波が中間圏・熱圏・電離圏変動に及ぼす影響の研究

電離圏変動の予測を行う際、特に極域ではオーロラ(地磁気)活動の影響と、下層大気起源の変動によるものとを区別する必要がある。本研究では、主に大気重力波、大気潮汐波が中間圏・熱圏・電離圏変動に与える影響についてのシミュレーションが実施された。

経度方向の波数 4 構造が高度約 300-400 km での熱圏・電離圏パラメータに出現することが観測的に知られている。熱圏での質量密度に現れるこの空間構造は、対流圏で励起された東向伝搬・波数 3 の 1 日潮汐(DE3)、東向伝搬・波数 2 の半日潮汐(SE2)によって作り出されることが数値シミュレーションから示された。さらに、高度 400 km において波数 4 構造は、これらの潮汐の変動によって日々変動することが示唆された。

北極域に特徴的な現象の 1 つである成層圏突然昇温が起こるとき、中間圏・下部熱圏でも温度、風速変動が生じることが知られるようになってきた。当研究グループの数値モデルは、この現象(成層圏突然昇温が中間圏・熱圏・電離圏に与える影響)を調べる上で極めて有効なツールである。本研究では、COSMIC 衛星、TIMED 衛星観測の結果と数値シミュレーションとの比較を行った。シミュレーションの結果より、電離圏 F 領域で観測される電子密度変動は、太陽同期の半日潮汐(SW2)の振幅が増大し、 $E \times B$  ドリフトの増大をもたらした結果生じていることが示唆された。SW2 の増大は、伝搬領域の風速、温度分布の変化の結果であると考えられ、極域の成層圏突然昇温現象が全球的な電離圏変動に寄与していることが示された。

本研究により、上方・下方からの影響によって変動する中間圏・熱圏・電離圏の様子が明らかになるとともに、北極域の観測機器群、人工衛星データと数値モデルとの連携の方法が示された。電離圏変動予測にまでは至る

ことができなかつたが、今後、ここでの方法をもとに電離圏数値予報の実現に向けたシミュレーション研究を実施する。モデルの検証に関しては、例えば、米国グループとの共同により、それぞれのモデルによる成層圏突然昇温時のシミュレーション結果の相互比較が実施された(Pedatella et al., JGR, 2014)。気象・気候モデルでは同種の試みは気候変動等の将来予測のために不可欠であるが、熱圏・電離圏の数値モデルでははじめての試みである。熱圏・電離圏現象の再現性の確認、及び将来予測を実現するための重要な試みに着手することができたと考えられる。

#### 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)

Pedatella, N. M., 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 (2014), The neutral dynamics during the 2009 sudden stratosphere warming simulated by different whole atmosphere models, J. Geophys. Res. Space Physics, 119, 1306-1324, doi:10.1002/2013JA019421.

Miyoshi, Y., H. Jin, H. Fujiwara, H. Shinagawa, and H. Liu (2012), Wave-4 structure of the neutral density in the thermosphere and its relation to atmospheric tides, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, doi:10.1016/j.jastp.2011.12.002.

Fujiwara, H., S. Nozawa, S. Maeda, Y. Ogawa, Y. Miyoshi, H. Jin, H. Shinagawa, and K. Terada (2012), Polar cap thermosphere and ionosphere during the solar minimum period: EISCAT Svalbard radar observations and GCM simulations, Earth Planets Space, 64, 459-465.

[学会発表](計 72 件)

藤原 均, 野澤悟徳, 小川泰信, 三好勉信, 陣英克, 品川裕之, Polar aeronomy with EISCAT\_3D and GCM simulations, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 千葉県幕張メッセ, 2013 年 5 月 19 - 24 日.

藤原 均, 野澤悟徳, 小川泰信, 片岡龍峰, 三好勉信, 陣英克, 品川裕之, 太陽活動極大期における EISCAT レーダー観測と GCM シミュレーションによる極域熱圏電離圏研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 132 回総会・講演会, 2012 年 10 月 22 日, 札幌コンベンションセンター, 北海道.

Fujiwara, H., Y. Miyoshi, H. Jin, H. Shinagawa, K. Terada, S. Nozawa, Y. Ogawa, A. Saito, Y. Otsuka, and M. Ishii (2011), Investigation of the global thermosphere and ionosphere from GCM simulations with observational data, the Asia Oceania Geosciences Society 8th Annual Meeting (AOGS 2011), August 8-12, Taipei. (招待講演)

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/hfujiwara630/home>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

藤原 均 (FUJIWARA HITOSHI)

成蹊大学・理工学部・教授

研究者番号：50298741

(2)研究分担者

三好 勉信 (MIYOSHI YASUNOBU)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：20243884

陣 英克 (JIN HIDEKATSU)

情報通信研究機構・電磁波計測研究センター・主任研究員

研究者番号：60466240

品川 裕之 (SHINAGAWA HIROYUKI)

情報通信研究機構・電磁波計測研究センター・主任研究員

研究者番号：00262915

野澤 悟徳 (NOZAWA SATONORI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号：60212130

小川 泰信 (OGAWA YASUNOBU)

国立極地研究所・研究教育系・准教授

研究者番号：00362210

(3)連携研究者

山本 衛 (YAMAMOTO MAMORU)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：20210560

斉藤 昭則 (SAITO AKINORI)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10311739