

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340149

研究課題名(和文) 全大気統合モデルを用いた温室効果ガス増加による超高層大気長期変動の研究

研究課題名(英文) Study of impacts of the increase of the greenhouse gasses on the thermosphere-ionosphere system using an atmosphere-ionosphere coupled model

研究代表者

三好 勉信 (Miyoshi, Yasunobu)

九州大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20243884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：大気中の二酸化炭素などの温室効果ガスの濃度増加が、熱圏・電離圏に及ぼす影響について、全大気領域を含む大気圏-電離圏結合モデルによる数値シミュレーションにより調べた。熱圏における温度や中性大気密度は、二酸化炭素濃度変化以外にも、惑星波や太陽潮汐波の日々変動、年々変動によっても影響を受けることが分かった。そこで、気象の再解析データを用いて下層大気の状態を変化させる実験や大気中の二酸化炭素濃度を変化させた実験を行うことで、二酸化炭素増加により引き起こされる熱圏の寒冷化や中性大気密度減少に関する精度の高い見積もりを行った。

研究成果の概要(英文)：We have studied impacts of the increase of concentration rate of the greenhouse gasses (such as CO₂) on the thermosphere-ionosphere system by performing a series of numerical simulations. A numerical model used in this study was an atmosphere-ionosphere coupled model (GAIA), which contains the region from the ground surface to the upper thermosphere/ionosphere. Our simulation results indicated that not only the increases of CO₂ concentration rate but also day-to-day and inter-annual variations of the atmospheric waves from the lower atmosphere affect the thermosphere-ionosphere system. Therefore, some additional numerical experiments were conducted to estimate effects of the atmospheric waves on the thermospheric temperature. By comparing these simulation results, we estimated the global cooling in the thermosphere caused by the increase of CO₂ concentration rate.

研究分野：大気力学

キーワード：熱圏・電離圏 地球環境変動 寒冷化 数値シミュレーション 長期変動予測

1. 研究開始当初の背景

超高層大気分野における、二酸化炭素濃度の増加に起因した変動の見積りは、米国を中心に 1980 年代後半からはじまり、米国国立大気研究センター (NCAR) のグループによる熱圏・電離圏モデル [Rishbeth and Roble, 1992, *Planet. Space Sci.*, 40, 1011-1026] や米国コロラド大学グループによる熱圏モデル [Akmaev, 2003 *J. Geophys. Res.*, 108(A7), 1292] などによる研究が挙げられる。二酸化炭素濃度が現在の 2 倍に増加すると、熱圏の平均温度は 30-40K も低下し、電子密度が最大となる高度が約 15km 程度降下するという結果が得られ、"greenhouse cooling" と呼ばれ注目されるようになった。近年、計算機性能の向上と熱圏・電離圏の物理過程を記述する数値スキームの進展などから、主に米国を中心として、太陽圏、磁気圏、電離圏、大気圏の各領域を結合し、領域間の相互作用過程を含めたより精緻なモデルを構築する動きが始まった。

一方国内では、世界初となる地表面から熱圏上端までを記述する大気大循環モデルの開発 [Miyoshi and Fujiwara, 2003, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1789] や、宇宙天気予報のための電離圏-熱圏モデル (リアルタイムシミュレータ) の開発が行われてきた。さらに我々のグループでは、これらのモデル群を統合した中性大気と電離大気のすべてを扱うことが可能な全大気結合モデルの開発に成功した。この全大気結合モデルを用いることで、対流圏起源の大気波動が電離圏変動を励起する物理機構や対流圏大気循環の日々変動が電離圏の日々変動に及ぼす影響に関して、世界に先駆けて解明できた。現在では、上記の NCAR のモデル群に加えて、米国大気海洋庁 (NOAA) のグループでも各領域を結合した拡張モデルの構築を進めている。このような拡張モデルの開発は世界的な趨勢であり、モデルの開発競争は一段と激しい状況となっている。

最近の衛星観測によれば、電離圏変動と気象現象の関連性を示唆する観測事実がいくつも報告されている。また、我々の開発した大気大循環モデルを用いた研究では、対流圏で励起された大気潮汐波や大気重力波が熱圏領域まで鉛直伝播することにより、熱圏・電離圏変動に影響を及ぼすことが次々と明らかになりつつある [Miyoshi et al., 2009, *J. Geophys. Res.*, 114, A07303 など]。しかしながら、二酸化炭素濃度の増加に伴う超高層大気変動の見積りに使用した今までの米国のモデル群には、対流圏や成層圏下部は含まれていない上、モデルの水平分解能も約 500~1000km と非常に粗く、二酸化炭素濃度増加の影響を正確に評価しているとは言い難い。一方、我々のグループが開発した全大気結合モデルは、対流圏から熱圏・電離圏までの全大気領域を含み、約 100km の水平分解能での

シミュレーションが可能である。そこで、我々が開発した世界でも有数の全大気結合モデルを用いることで、二酸化炭素濃度の増加が超高層大気に及ぼす影響に関して、これまでに比べて格段に進歩した定量的見積りが出来ると考えた。

本研究課題による、人間活動に起因する二酸化炭素濃度増加による気候変動が超高層大気に及ぼす影響の解明は、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) によって進められている CAWSES-II (Climate and Weather of the Sun-Earth System) で取り上げられている最重要テーマの一つであり、本研究課題は超高層大気分野における国際共同プロジェクトの一翼を担うものとして期待できる。同時に、人間活動に起因する二酸化炭素濃度増加による地球環境問題に直結した問題を明らかにしようという課題でもあり、社会的関心も高い課題ともいえる。

2. 研究の目的

人間活動に起因すると思われる大気中の二酸化炭素 (二酸化炭素) 濃度の増大に伴い、地球温暖化などの地球環境問題が深刻となっている。二酸化炭素濃度の増大は、超高層大気平均温度の低下や、電離圏の電子密度が最大となる高度の低下など、超高層大気にも多大な影響を及ぼすと考えられている。そこで本研究では、我々の研究グループで開発された、中性大気と電離大気のすべてを扱うことが可能な全大気結合モデル (GAIA: Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy) を用いて、二酸化炭素増加に伴う超高層大気寒冷化や中性大気の密度減少などの超高層大気長期変動についての定量的な解明を目指す。特に、二酸化炭素濃度の増加に伴う超高層大気変動に関する定量的な見積りを行う。

数値モデルを用いて二酸化炭素濃度変動が超高層大気におよぼす影響を正確に見積もるためには、現在の熱圏-電離圏の状態をよく再現するモデルを用いる必要がある。そこで、本研究で使用する GAIA について、観測結果と比較することで、GAIA の再現性に関する検証を行う。

数値モデルを用いて、より精度の高い見積りを行うためには、より分解能の良いモデルを用いる必要がある。そこで、現在より水平分解能の良いモデルを作成し、モデルの水平分解能の違いによる影響を調べる。同時に、水平スケールの小さい大気波動が、熱圏-電離圏循環に及ぼす影響についてもあきらかにする。

3. 研究の方法

大気圏—電離圏結合モデル(GAIA)を用いた数値シミュレーションにより、二酸化炭素濃度増加に起因した、熱圏の温度や中性大気密度などの変動を見積もる。二酸化炭素濃度増加以外の影響を排除するために、太陽活動極小期・地磁気静穏時に限定して数値シミュレーションを行う。二酸化炭素濃度が時間と共に増加した場合と増加しなかった場合について数値シミュレーションを実行し、両者を比較することで二酸化炭素濃度の増加が熱圏—電離圏循環に及ぼす影響を見積もる。さらに、プラネタリー波や大気潮汐波などの下層大気起源の大気波動の日々変動・年々変動が熱圏—電離圏循環に大きな影響を及ぼすことが知られているので、数値シミュレーションは、数年を数年間実行する。数年間の結果を比較することにより、下層大気起源の大気波動の影響を排除する。

GAIA で得られた熱圏—電離圏循環について、観測結果と比較することにより、検証を行う。観測結果として、TIMED 衛星に搭載された SABER 測器で得られた温度分布および COSMIC 衛星で得られた電子密度分布を用いる。これらを、GAIA で得られた温度分布および電子密度分布と比較することで、GAIA の再現性に関する検証を行う。

九州大学および(独)情報通信研究機構所有のスーパーコンピュータシステムを用いて数値実験を実施する。さらに、データ解析には、新規に整備したワークステーション等を用いて行う。同時に、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、シミュレーションデータの解析・保持・管理を行う。

4. 研究成果

前述の研究目的及び研究方法のところで述べたように、本研究では、二酸化炭素濃度を変化させた数値シミュレーションを実行することで、二酸化炭素濃度の増加に起因する熱圏温度および中性大気密度変動の見積もりを行った。さらに、現在の GAIA の再現性の検討のために衛星観測結果との比較・検討をおこなった。また、より水平分解能の良いモデルを開発し、水平分解能による違いについても検証を行った。同時に、水平スケールの小さな波(大気重力波)が熱圏循環に及ぼす影響の見積もりも行った。以下にこれらの成果概要の主なものについて述べることにする。

4.1 二酸化炭素濃度増加による熱圏・電離圏変動

GAIA モデル中の二酸化炭素濃度を様々に変

化させた数値シミュレーションを実行し、結果を比較することで二酸化炭素濃度増加に起因する熱圏の温度や中性大気密度変動を明らかにした。多様放射量や磁気圏からのエネルギー降り込み量の時間変動の影響を排除するために、最近の太陽活動極小期(2008 - 2010年)の期間に注目した。さらに、実験では、太陽放射量は一定($f_{10.7}=70$ で固定)とし、磁気圏からのエネルギー降り込み量も一定(時間変化しない)を仮定している。さらに、高度 30 km 以下の領域には観測値(気象の再解析データ JRA25/JCDAS または JRA55)を入力することで、現実に近い下層大気の状態にしたうえで数値シミュレーションを行う。

まず、2008年12月から2009年3月までについて、二酸化炭素濃度を 400ppmv(現在の値)にした実験と 345ppmv(1980年代の値;約30年前の濃度)にした実験を行い、比較した。図1に、高度 300 km における北半球で平均した温度の時間変化の様子を示す。黒実線が 345ppmv の時の温度で、赤実線が 400ppmv の時の温度である。まず、数日—10日周期での温度変動がみられるが、これは下層大気起源の大気波動の影響によるものである。また、1月下旬には成層圏でプラネタリー波の振幅が増大し、成層圏突然昇温現象が発生している。この成層圏突然昇温に伴い、熱圏の温度も数 K 程度降温していることがわかる。このように、高度 300 km での北半球平均温度も、下層大気起源の大気波動の影響で数 K 程度の変動が引き起こされていることが分かった。一方、二酸化炭素濃度の異なる二つのシミュレーションでは、平均で 6—10 K 程度の温度差がみられる。この差が、二酸化炭素濃度の増加に起因する温度変化である。このように、熱圏温度は、大気波動の時間変動による影響を受けるため、二酸化炭素濃度増加の影響を見積もるには、数か月間の時間平均をとる必要があることが分かった。さらに解析を行ったところ、高度 150km 以上の領域では同様の結果が得られることが分かった。

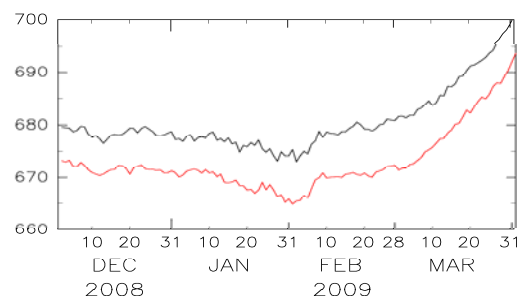


図1：二酸化炭素濃度が 345ppmv(黒実線)と 400ppmv(赤実線)における高度 300 km での北半球平均温度の時間変化。単位は K。

次に、2007年12月から2010年3月までの3年間について同様の計算を行い、二酸化

炭素濃度増加の影響を見積もってみた。黒実線が、二酸化炭素濃度 345ppmv での 3 年間の温度変化を、赤実線が 400ppmv での 3 年間の温度変化を示す。やはり、数-10 日周期での温度変動がみられ、年により同じ月日でも温度が異なることがわかる。この差は、大気波動の活動度の年々変動によるものである。一方、平均してみれば、二酸化炭素濃度の増加に伴う 8-10K の降温がみられる。さらに高度 200 km 付近では 4-6K の降温となることが分かった(図 3 参照)。

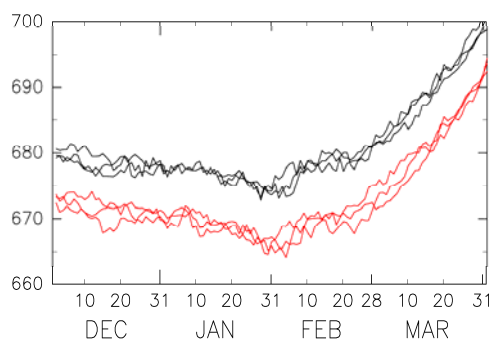


図 2：高度 300 km における北半球平均温度の変化の様子。二酸化炭素濃度が 345ppmv(黒実線)と 400ppmv(赤実線)における高度 300 km での北半球平均温度の時間変化。2007 年 12 月から 2008 年 3 月、2008 年 12 月から 2009 年 3 月、2009 年 12 月から 2010 年 3 月の 3 年間の温度変化の様子を示す。

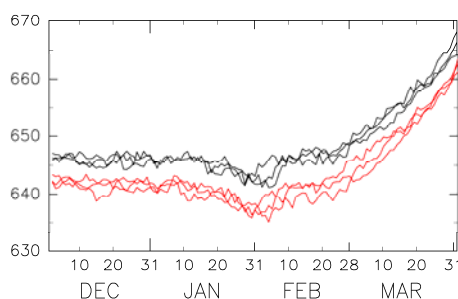


図 3：高度 200 km における北半球平均温度の変化の様子。

さらに、二酸化炭素濃度を 325ppmv(1960 年代)にしたシミュレーションを実施し、現在の二酸化炭素濃度(400ppmv)のシミュレーション結果との比較も行った。その結果、二酸化炭素濃度の差を大きくした場合には、熱圏の温度差はさらに大きくなることが分かった。高度 300km における平均温度は 8-13K 程度減少することが分かった。また、中性大気密度は高度 300 km で 12-13%、高度 400 km で 14-15% 減少することが分かった。このように過去 50 年間での二酸化炭素濃度の増加に起因する熱圏の温度や中性大気密度の変動は無視できない大きさであることが分かった。

また、電子密度変動についても解析を行ったところ、二酸化炭素濃度が 325ppmv から 400ppmv に増加すると、電離圏上部での電子密度は 5-8% 程度減少し、電離圏下部での電子密度は 4-12% 程度増加することが分かった。以上のことから、近年の二酸化炭素濃度増加は、対流圏の気候変動のみならず熱圏-電離圏の中性大気密度や電子密度にも大きな影響を与えていることが分かった。

4.2 観測との比較による GAIA モデルの検証

熱圏・電離圏循環を正確に表現するためには、24 時間、12 時間、8 時間周期の大気潮汐成分を再現する必要がある。そこで、GAIA で得られたこれらの大気潮汐成分のふるまいを衛星観測結果(SABER 測器で観測)と比し、再現性を確認してみた。さらに、COSMIC 衛星で得られた電子密度分布と GAIA の電子密度分布を比較し、再現性を確認したうえで、GAIA の結果を解析することで、中性大気(熱圏)と電離大気(電離圏)との相互作用過程を明らかにした。

大気潮汐波は、太陽の動きと同期して西に移動する 24 時間周期波(太陽同期一日潮汐波)や 12 時間潮汐波(太陽同期半日潮汐波)の他に、太陽の動きと同期しない潮汐波(太陽非同期一日潮汐波や太陽非同期半日潮汐波)も存在する。熱圏・電離圏循環を考える上では、太陽同期潮汐波のみならず、太陽非同期潮汐波も重要な役割を演じていることが知られているので、太陽同期および太陽非同期潮汐波について SABER との比較・検討を行った。図 4 に太陽同期潮汐波の代表として、太陽同期一日潮汐波の振幅の高度 95 km における時間-緯度分布を示す。振幅は、春季と秋季で大きくなる半年周期で変動しており、また準 2 年周期での変動も見られる。この変動の様子は、SABER による観測結果とよく一致していることが明らかとなった。次に、太陽非同期潮汐波の代表として、東に伝播する東西波数 3 の一日潮汐波(DE3)についても同様の解析を行った(図 5)。その結果、北半球の夏季から秋季にかけて振幅が増大することや準 2 年周期で変動することなど、観測結果と良い位置がみられた。他の太陽同期潮汐波や太陽非同期潮汐波についても SABER の観測結果と比較したところ、一部に不一致があるものの、おおむね良い一致が見られた。このことから GAIA での大気潮汐波の再現性はよく、熱圏・電離圏循環を良く表現していることが分かった。

電子密度分布についても、観測結果との比較を行った。その結果、GAIA において電子密度分布が経度方向に波数 3 や 4 を持つ構造の再現性が確認できた。さらに、GAIA の結果を詳しく解析することで、波数 4 構造の生成に

は、DE3 だけではなく、他の太陽非同期半日潮汐波や太陽非同期一日潮汐波も寄与していることが明らかとなった。波数 3 構造に関しても同様の結果が得られた。これらの詳細については、5 の主な発表論文等の章に記載されている、Pancheva et al., (2012) に詳しい説明がある。

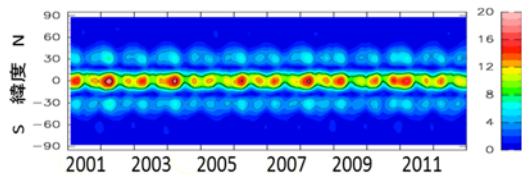


図 4 : 高度 95 km における太陽同期一日潮汐波の振幅(温度成分; 単位は K)の時間変動を示す。横軸の単位は年で、2001 年から 2012 年までの変動を示す。縦軸は緯度を示す。

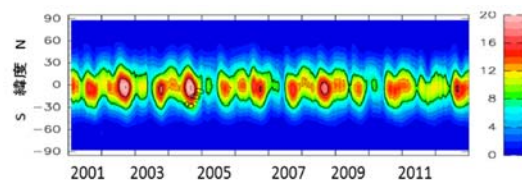


図 5 : 高度 110 km における太陽非同期一日潮汐波 DE3 の振幅(温度成分; 単位は K)の時間変動を示す。横軸の単位は年で、2001 年から 2012 年までの変動を示す。縦軸は緯度を示す。

4.3 高分解能 GAIA モデルの開発

前述の 4.1 及び 4.2 では、水平分解能が約 250 km の GAIA を用いた。より精度よく熱圏・電離圏循環を見積もるためには、より良い水平分解能を持つモデルが必要である。そこで、水平分解能が約 100 km の高分解能版 GAIA を開発し、従来の GAIA(水平分解能約 250km)との比較・検討を行った。これにより、水平スケールの小さい大気波動(水平波長 1000 km 以下)が熱圏・電離圏循環に及ぼす影響や、従来の分解能での結果の正当性について調べてみた。

図 6 に、水平スケールの小さな大気波動(大気重力波)の碎波により生じる東西方向の加速度量(重力波抗力)の緯度-高度分布を示す。重力波抗力が中間圏界面(高度 80 - 100 km 付近)において重要な役割を演じることは、以前から知られていたが、高度 100 km 以上の熱圏領域においても重要であることが分かった。特に、高緯度域の高度 150 - 300 km では 100-200 m/s/day を超える加速度が生じており大気重力波の重要性が示唆された。このことから、熱圏・電離圏循環のより精度のよい見積もりを行うためには、高分解能 GAIA が必要であることが明らかとなった。しかしながら、一部の緯度帯を除き、領域平均した温度分布

や子午面循環については従来の GAIA の結果と高分解能版 GAIA の結果に大きな違いはないこともわかった。つまり、従来の GAIA を用いても、領域平均をとることで十分精度の良い見積もりが可能であることが確認できた。これらの詳細については、5 の主な発表論文等の章に記載されている、Miyoshi et al., (2014) に詳しい説明がある。

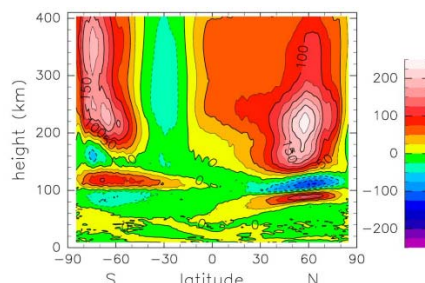


図 6 : 水平スケールの小さな大気波動(東西波数 6 以上)の碎波による抗力の緯度(横軸)-高度(縦軸)分布図。等値線は東西方向の加速度を示し、単位は、m/s/day である。

更なる解析の結果、図 6 で示された熱圏領域での重力波抗力を引き起こす大気波動の主な励起源は、対流圏での対流活動であることが明らかとなった。つまり、対流圏での対流活動により生成された大気重力波が熱圏まで鉛直上方に伝播することが分かった。このことは、二酸化炭素濃度が増加し、対流圏での温暖化が進行することによる対流活動変化が熱圏での大気波動の振る舞いに影響することを示唆している。したがって、二酸化炭素濃度増大に伴う熱圏・電離圏の影響をより正確に見積もるためには、より水平スケールの小さな波が表現可能な高分解能版 GAIA を用いた数値シミュレーションが必要になるであろう。前述の 4.1 では、高分解能版 GAIA を用いた見積もりはできなかった。分解能版 GAIA を用いたより高精度の見積もりは、今度の課題であると考えられる。

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 9 件)

- ① Miyoshi, Y., H. Fujiwara, H. Jin and H. Shinagawa, A global view of gravity waves in the thermosphere simulated by a general circulation model, *J. Geophys. Res., Space Physics*, 119, doi: 10.1002 /2014JA019848, 2014.
- ② 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, *J. Geophys. Res., Space Physics*, 117, A07319, doi:10.1029/2011JA017452, 2012.

- ③ Miyoshi, Y., H. Fujiwara, H. Jin, H. Shinagawa and H. Liu, Numerical simulation of the equatorial wind jet in the thermosphere, *J. Geophys. Res., Space Physics*, 117, A03309, doi:10.1029/2011JA017373, 2012

[学会発表] (計 93 件)

- ① 三好 勉信, 陣 英克, 藤原 均, 品川 裕之, GAIA を用いた温室効果ガス増加に伴う熱圏長期変動の見積もり, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 136 回総会・講演会, キッセイ文化ホール(長野県松本市), 2014 年 10 月 31-11 月 3 日.
- ② Miyoshi, Y., H. Jin, H. Fujiwara and H. Shinagawa, Vertical coupling of the atmosphere-ionosphere system obtained by the GAIA model simulation, IAGA 12th Scientific Assembly, Merida, Mexico, 26-31 August, 2013. (招待講演)
- ③ 三好 勉信, 陣 英克, 藤原 均, 品川 裕之, GAIA を用いた温室効果ガス増加に伴う超高層大気の長期変動の見積もり (その 2), 地球電磁気・地球惑星圏学会第 132 回総会・講演会, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市), 2012 年 10 月 20-23 日.
- ④ 三好 勉信, 藤原 均, 陣 英克, 品川 裕之, 大気圏-電離圏結合モデルを用いた温室効果ガス増加に伴う超高層大気の長期変動の見積もり, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 130 回総会・講演会, 神戸大学(兵庫県神戸市), 2011 年 11 月 4-6 日.
- ⑤ Miyoshi, Y., H. Jin, H. Fujiwara, H. Shinagawa, H. Liu, and K. Terada, Effects of atmospheric waves on latitudinal and temporal variations in the upper atmosphere using an atmosphere- ionosphere coupled model, IUGG General Assembly, Melbourne, Australia, 27 June – 8 July, 2011.(招待講演)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三好 勉信 (MIYOSHI YASUNOBU)
九州大学・理学研究院・准教授
研究者番号：2024884

(2) 研究分担者

陣 英克 (JIN HIDEKATSU)
情報通信研究機構・電磁波計測研究所・主任研究員
研究者番号：60466240

藤原 均 (FUJIWARA HITOSHI)

成蹊大学・理工学部・教授

研究者番号：50298741

品川 裕之 (SHINAGAWA HIROYUKI)

情報通信研究機構・電磁波計測研究所・主任研究員

研究者番号：00262915

(3) 連携研究者

丸山 隆 (MARUYAMA TAKASHI)

情報通信研究機構・上席研究員

研究者番号：80359017

久保田 実 (KUBOTA MINORU)

情報通信研究機構・上席研究員電磁波計測研究所・主任研究員

研究者番号：90250670

(4) 研究協力者

藤田 茂 (FUJITA SHIGERU)

気象大学校・教授