

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540523

研究課題名(和文) 電離圏・熱圏の春・秋非対称性

研究課題名(英文) Equinoctial Asymmetry of the Ionosphere and Thermosphere

研究代表者

大塚 雄一(Otsuka, Yuichi)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号：40314025

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：長期間わたって中間圏及び電離圏の観測を行っている、大型大気レーダーであるMUレーダーによって観測された中間圏エコーのデータを解析し、乱流拡散係数を求め、乱流拡散係数が春よりも秋に大きいことを明らかにした。全球モデルによる結果を考慮すると、この乱流拡散係数の春・秋非対称性は、電離圏電子密度の春・秋非対称性の原因となっていると言える。また、タイのチェンマイに設置されたファブリ・ペロー干渉計で観測された熱圏風のデータを解析し、南北方向の熱圏風の春・秋非対称性がプラズマバブル発生頻度の春・秋非対称性の主な原因と考えられることを示した。

研究成果の概要(英文)：Eddy diffusion coefficients have been estimated from long-term measurements of the mesospheric echo observed with the MU radar, which is a large atmospheric radar. We have found that the eddy diffusion coefficients are higher in Sep. equinox than Mar. equinox. According to the results obtained from the global simulation, this equinoctial asymmetry of the mesospheric eddy diffusion coefficients is responsible for that of the ionospheric plasma density. We have analyzed thermospheric neutral wind data obtained by Fabry Perot interferometer at Chiang Mai, Thailand, and show that equinoctial asymmetry of the meridional thermospheric winds is responsible for that of plasma bubble occurrence rate.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：電離圏 熱圏 中間圏 乱流 レーダー 春秋非対称

1. 研究開始当初の背景

従来からイオノゾンデや人工衛星により、電離圏電子密度の半年周期変動や、夏よりも冬に電子密度が高くなる冬期異常の現象が観測されていた。本研究代表者らは、90年代後半に京都大学が所有する大型大気レーダーである MU レーダーによって 1986 年から 1996 年までに得られた、電子密度、電子・イオン温度、イオンドリフト速度及び子午面中性大気風速データの統計解析を行い、中緯度電離圏 F 領域の年変化を明らかにし、電離圏物理量に春・秋非対称性があることを明らかにした。従来の研究によっても、電子密度に春・秋非対称性が存在することは指摘されていたが、本研究代表者は初めて大型レーダーのデータを使い、高度方向情報を用いることにより、春・秋非対称性の物理機構を解明した[Balan et al., 1997, 1998; Kawamura et al., 2003]。図 1 に示すように、電離圏の電子密度は、F 領域下部では春よりも秋に高いが、逆に F 領域上部では秋よりも春に高い。電子温度についても春・秋非対称性が見られ、その年変動は電子密度の年変動と逆相関を示す。MU レーダー観測で得られたプラズマ・ドリフト速度及び子午面中性大気風速を用

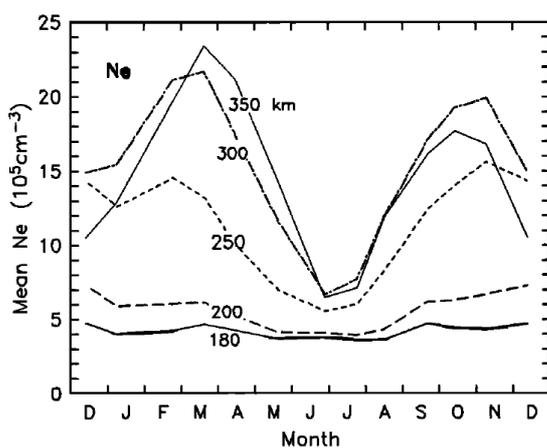


図 1 : 1986 年から 1994 年までに MU レーダーによって観測された電子密度の平均年変化。高度 180km から 300km のものを示す。高度 250km 以下では秋の方が春よりも電子密度が高い春・秋非対称性が見られる。高度 300km では、この非対称性は逆転する。

いてモデル計算を行い、電子密度、電子温度の春・秋非対称性を定量的に解析した。これにより、電離圏物理量の春・秋非対称性は、熱圏の春・秋非対称性が原因であることが明らかになった。F 領域下部においては、中性大気組成、特に酸素原子密度と窒素分子密度との比の春・秋非対称性が主な原因であり、F 領域上部においては、中性大気風速の春・秋非対称性が主な原因であることが明らかになった。このように、電離圏の春・秋非対称性は、熱圏中性大気の春・秋非対称性に起因することが明らかになったが、この研究を実施した当時は、中性大気の観測データは乏しく、中性大気の春・秋非対称性の原因は未解明のまま残された。

上記の研究を行った当時(1990 年代後半)は、熱圏の中性大気に関する観測データは殆ど無かった。しかし、その後、低軌道を飛翔する CHAMP 衛星搭載の加速度計を用いて中性大気密度及び風速が観測され、地上観測ではファブリ・ペロー干渉計によって中性大気風速が測定されるようになり、現在では、これらのデータを用いた統計解析が可能となった。

また、従来から熱圏における中性大気密度は、春・秋に極大となる半年周期変動を示すことは知られていたが、この原因は全く未解明であった。しかし、この中性大気密度の半年周期変動は、中間圏における乱流拡散係数の半年周期変動が主な原因であるということが、近年、米国の全球モデル(TIE-GCM)を用いたシミュレーションで示された[Qian et al., 2009]。未だこの仮説を裏づけるためには、中間圏・熱圏の他の物理量が観測と一致しているかなど多くの検証が必要ではあるが、この研究は、熱圏の中性大気は中間圏の大気に大きな影響を受けていることを示している。

2. 研究の目的

電離圏・熱圏の年変化、特に春と秋との違いの原因を解明することにより、電離圏・熱圏結合過程、つまり中性大気・電離大気結合過程の一端を明らかにすることを目的とする。このため、電離大気及び中性大気に関して、約十年以上のデータの蓄積があるレーダー及び衛星の観測データの統計解析を行う。さらに数値モデルを用いた計算を行うことにより、中性大気が電離大気に与える影響を評価する。また、下層に位置する中間圏の乱流が熱圏・電離圏に与える影響についても観測データの統計解析を行うことにより調べる。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、MU レーダーによって 1986 年以降に得られた電離圏定常観測データ(電子密度、電子・イオン温度、イオンドリフト速度及び子午面中性大気風速)を用い、複数の物理量について統計解析を行う。

(2) 名古屋大学太陽地球環境研究所が 1997 年以降に信楽で連続観測を行っているファブリ・ペロー干渉計による中性大気風速データを統計解析し、中性大気密度及び風速の年変化及び春・秋非対称性を明らかにする。さらに、上記(1)で得た電離圏データと比較し、電離圏の春・秋非対称性と中性大気の春・秋非対称性の関係を調べる。

(3) 中性大気密度の半年周期変動は、中間圏における乱流拡散係数の半年周期変動が主な原因であるということが、Qian et al. [2009]らの全球モデルを使った研究によって示されている。本研究では、長期にわたる MU レーダー中間圏観測データを解析し、中間圏乱流拡散係数の年変化及び春・秋非対称性を明らかにし、中間圏乱流拡散係数が熱圏・電離圏に与える影響を調べる。

4. 研究成果

(1) 1986 年以降、MU レーダーにより電離圏標準観測として電子密度、電子・イオン温

度、プラズマドリフト速度の観測が毎月 3 日間(1996 年以降は、4 日連続観測を年間 9 回)行われてきたが、これまで 2003 年以降のデータは殆ど解析されていなかった。本研究では、2003 年以降のデータを生データから解析し、電子密度、電子・イオン温度、プラズマドリフト速度を導出した。

また、国土地理院が所有する GPS 観測網データを利用して電離圏全電子数を算出し、1998 年から 2013 年までに得られた全電子数の季節・地方時変化を統計的に調べた。その結果、全電子数は、春・秋に極大をもつ半年周期変化を示すこと、春・秋に非対称性があり、春の方が秋よりも全電子数が大きいことが明らかになった。

(2) MU レーダーによって 1986 年から 2013 年までに得られた中間圏観測データを解析した。図 2 に示すように、中間圏エコーは、高度約 65-85km の範囲に現れる。本研究では、MU レーダーによって観測された中間圏エコーのスペクトル幅から、乱流拡散係数を求め、その季節変化を調べた。図 3 にその結果を示す。中間圏における乱流拡散係数は、夏季に大きいこと、春よりも秋に大きいことが明らかになった(図 4)。Qian らによる全球モデルによる結果を考慮すると、夏季には中間圏乱流拡散係数が大きいため、高高度まで乱流による大気組成の混合が起こり、熱圏における酸素原子の割合が小さくなると考えられる。

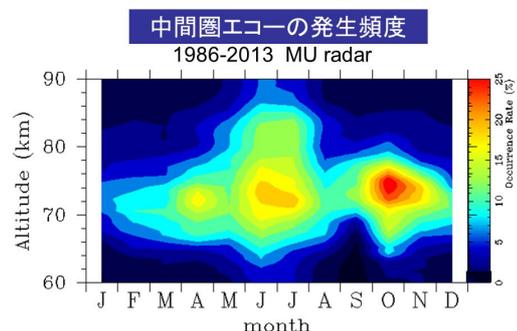


図 2: 1986 年から 2013 年までに MU レーダーの中間圏観測によって得られた中間圏エコー発生頻度の季節・高度変化。乱流拡散係数は、夏季の高度 70-78km に高いことが分かる。

このため、電離圏における電離生成率が減少し、電離圏電子密度が小さくなる。よって、中間圏乱流の季節変化は、夏季において電離圏電子密度が冬季よりも小さくなる冬季異常とよばれる現象の原因となっていることが分かった。

同様に、春・秋非対称性について Qian らの結果に基づいて考察すると、中間圏乱流拡散係数は春よりも秋に大きいため、熱圏における酸素原子は春よりも秋に小さいと考えられる。この熱圏の組成からは、春よりも秋に電子密度が小さいと予想され、電離圏観測結果と一致する。しかし、熱圏大気を経験モデルである MSIS モデルとは一致しないことが

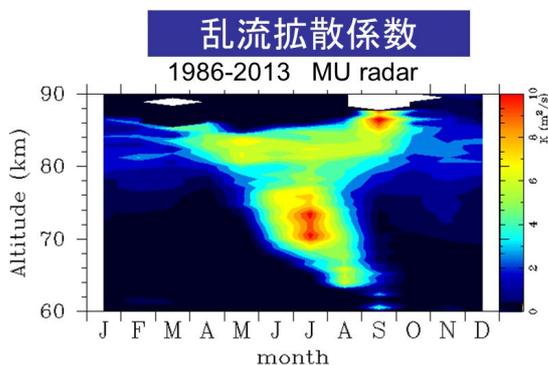


図3: 1986年から2013年までにMUレーダーで観測された中間圏エコーのデータから求めた平均乱流拡散係数の季節・高度変化。乱流拡散係数は、夏季の高度70-78kmに高いことが分かる。

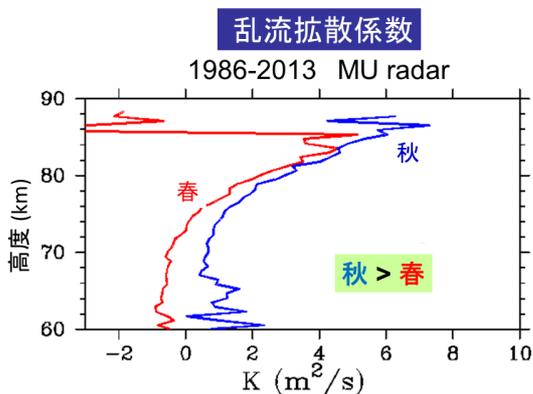


図4: 1986年から2013年までにMUレーダーの中間圏観測データから求めた平均乱流拡散係数の春と秋における高度分布。春よりも秋に大きいことが分かる。

ら、さらに数値モデルによる定量的な研究が必要である。

(3)名古屋大学太陽地球環境研究所は、滋賀県信楽のMUレーダー・サイトにおいて1997年にファブリ・ペロー干渉計(FPI)を設置し、連続観測を行っている。本研究では、掃天型の観測を行った2000年10月以降にFPIで得られた熱圏中性大気風速データを統計解析した。その結果、夜間において、南北風は真夜中付近に最も南向きが大きくなり、東西風は日没時において東向きで時間とともに西向きに転じる日変化を示すことが明らかになった。また、南北風は顕著な春・秋非対称性を示し、春の方が秋よりも夜間を通して南向きに大きいことが明らかになった。南向き中性風は、電離圏プラズマを消滅率が小さい高高度へ磁力線に沿って持ち上げるため、電子密度の増大をもたらす。従って、全電子数の春・秋非対称性の原因は、中性大気風速の春・秋非対称性であると考えられる。

本研究の成果は、熱圏の中性大気風速が電離大気に及ぼす影響が大きいことを示しており、中性大気・電離大気間の相互作用の研究に貢献する。

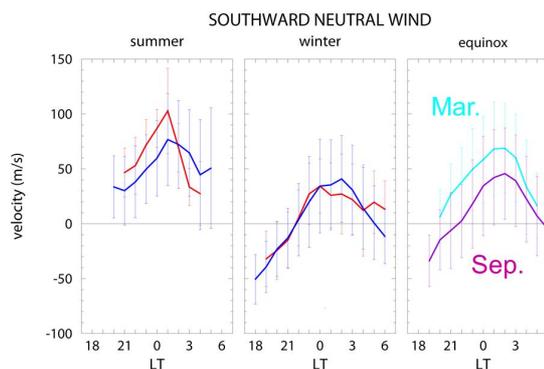


図5: 信楽に設置されたファブリ・ペロー干渉計で観測された南向き熱圏風速の平均時間変化。2000-2013年に得られた観測データを平均したもの。夏(左)と冬(中)における太陽活動度極大期(赤)と極小期(青)の比較。(右)春と秋の比較。春の方が秋よりも南向きの風速が大きいことが分かる。

(4)赤道域に位置するインドネシア・スマトラ島のコトタバンにおいて、GPS 受信機を用いたシンチレーションの観測が 2002 年から行われている。シンチレーションは、プラズマバブル内部に発生する電離圏擾乱によって電波が回折することが原因で発生する。このシンチレーション・データを解析することにより、アジア域においては、プラズマバブルは秋よりも春に発生しやすいことを明らかにした(図 6)。さらに、同 GPS 受信機によって 2012-2013 年に観測された電離圏擾乱の東向きドリフト速度も、春・秋非対称性を示し、春の方が秋よりも速度が大きいことが明らかになった(図 7)。この結果は、その前回の太陽活動周期の結果 [Otsuka et al., 2006] と一致している。プラズマバブル発生頻度の春・秋非対称性の原因として日没時における東西方向の熱圏風によるダイナモ電場や、南北方向の熱圏風による電場の抑制効果が考えられていたが、熱圏風の直接観測はこれまで行われていなかった。本研究では、タイのチェンマイに設置されたファブリ・ペロー干渉計で観測された熱圏風のデータを解析し、プラズマバブルが発生する日没時においては、春よりも秋に北向き(極向き)の熱圏風速が大きいことを明らかにした(図 8)。この

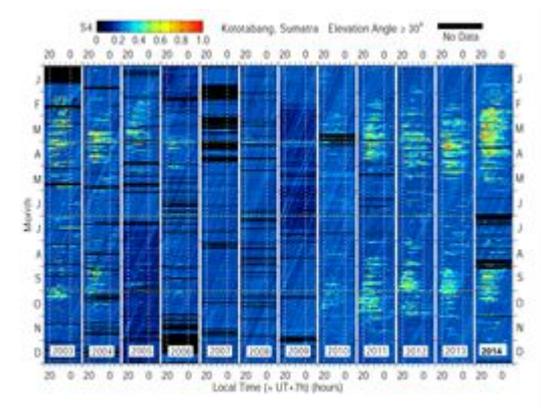


図 6: 2003 年から 2014 年までに、インドネシアのコトタバンに設置された GPS 受信機で観測されたシンチレーション指数 S4 の時間・季節変化。シンチレーション指数が秋よりも春に大きいことが分かる。

北向き熱圏風によって、北半球の電気伝導度が高くなるためプラズマバブルの生成に必要な電場が抑制されると考えられる。よって、南北方向の熱圏風の春・秋非対称性がプラズマバブル発生時の春・秋非対称性の主な原因と考えられる。

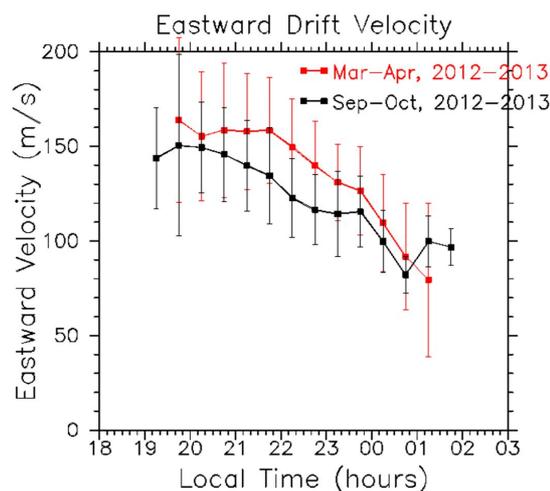


図 7: インドネシア・コトタバンに設置された 3 台の GPS 受信機データから求めた東向きドリフト速度の平均時間変化。2012-2013 年の春(赤)と秋(黒)との比較。春の方が秋よりも速度が大きいことが分かる。

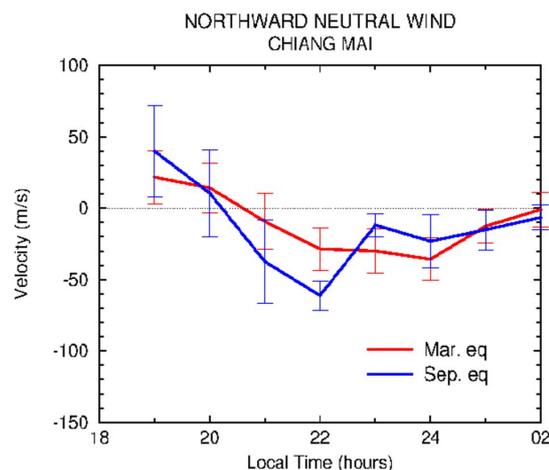


図 8: インドネシア・コトタバンの磁気共役点にあたるタイ・チェンマイに設置されたファブリ・ペロー干渉計によって観測された北向き熱圏風速の平均時間変化。プラズマバブルが発生する日没時には、春よりも秋の方が速度が大きいことが分かる。

参考文献：

- Balan, N., Y. Otsuka, and S. Fukao, New aspects in the annual variation of the ionosphere observed by the MU radar, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 2287-2290, 1997.
- Balan, N., Y. Otsuka, G. J. Bailey, and S. Fukao, Equinoctial asymmetries in the ionosphere and thermosphere observed by the MU radar, *J. Geophys. Res.*, 103, 9481-9495, 1998.
- Kawamura, S., N. Balan, Y. Otsuka, and S. Fukao, Annual and semiannual variations of the mid latitude ionosphere under low solar activity, *J. Geophys. Res.*, 107, SIA8-1-10, 0.1029/2001JA000267, 2003.
- Otsuka, Y., K. Shiokawa, and T. Ogawa, Equatorial ionospheric scintillations and zonal irregularity drifts observed with closely-spaced GPS receivers in Indonesia, *J. Meteor. Soc. Japan*, 84A, 343-351, 2006.
- Qian, L., S. C. Solomon, and T. J. Kane, Seasonal variation of thermospheric density and composition, *J. Geophys. Res.*, 114, A01312, doi:10.1029/2008JA013643, 2009.

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)

[学会発表](計 25 件)

大塚雄一、塩川和夫、小川忠彦、Effendy、インドネシアにおける GPS 電離圏シンチレーションの連続観測、第 263 回生存圏シンポジウム「太陽地球環境データ解析に基づく超高層大気の空間・時間変動の解明」、2015 年 02 月 19~20 日、京都大学(京都)

Otsuka, Y., and M. Yamamoto, Seasonal Variation of Vertical Eddy Diffusion Coefficient in the Mesosphere and Relation to the Thermosphere and Ionosphere: MU Radar Observations, AOGS 11th Annual Meeting, 2014 年 07 月 28 日~08 月 01 日, Royton Sapporo, (Sapporo, Japan)

Otsuka, Y., and M. Yamamoto, Seasonal variation of vertical eddy diffusion coefficient in the mesosphere and relation to the thermosphere and ionosphere: MU radar observations, 14th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, 2014 年 05 月 25~30 日, INPE, (dos Campos, Sao Paulo, Brazil)

大塚雄一、山本衛、MU レーダーで観測された中間圏エコーの統計解析、中間圏・熱圏・電離圏 (MTI) 研究会、2013 年

09 月 17~18 日、情報通信研究機構 (東京)

大塚雄一、山本衛、Seasonal variation of mesospheric echoes observed with the MU radar in Japan and its relation to the thermosphere and ionosphere、第 134 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会、2013 年 11 月 02~05 日、高知大学 (高知)

Otsuka, Y., K. Shiokawa, D. Fukushima, Effendy, Current status of optical and radio observations of the equatorial ionosphere and thermosphere in Indonesia, Research Enhancement and System Establishment for Space Weather in Indonesia, 2013 年 01 月 24 日, NICT (Tokyo)

A. Shinbori, Y. Koyama, A. I. Yatagai, M. Nose, T. Hori, and Y. Otsuka, Long-term variation in the upper atmosphere as seen in the geomagnetic solar quiet (Sq) daily variation, AGU Fall Meeting 2012, 2012 年 12 月 03~07 日, San Francisco (USA)

Shinbori, A., Y. Koyama, H. Hayashi, M. Nose, T. Hori, Y. Otsuka, T. Tsuda, IUGONET Project Team Long-term variation in the upper atmosphere as seen in the amplitude of the geomagnetic solar quiet daily variation, AGU Fall Meeting 2011, 2011 年 12 月 9 日, San Francisco (USA)

Otsuka, Y., M. Nishioka, T. Tsugawa, and A. Saito, Study of the Ionospheric Variations Using Two-dimensional Maps of Total Electron Content Obtained from GPS Receiver Networks, ISROSES-II (International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System II) (招待講演), 2011 年 9 月 11-16 日, Borovets, (Bulgaria).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 雄一 (OTSUKA, Yuichi)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授
研究者番号：40314025

(2) 研究分担者

山本 衛 (YAMAMOTO, Mamoru)
京都大学・生存圏研究所・教授
研究者番号：20210560