

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 23 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23403009

研究課題名(和文)人工衛星-地上ネットワークによるオーロラと電磁波動の高時間分解能観測

研究課題名(英文)High-time resolution measurements of aurora and electromagnetic waves using ground-based observation network and satellites

研究代表者

塩川 和夫 (Shiokawa, Kazuo)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授

研究者番号：80226092

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、カナダ北極域のサブオーロラ帯(オーロラ帯よりも少し低い緯度帯)にループアンテナ及び高速のオーロラ観測カメラを設置し、これまでにない最高時間分解能のオーロラ画像(100Hz)とVLF/ELF波動(100kHz)の同時観測を2012年に新たに開始し、2015年現在まで自動定常観測を継続している。これにより、サブオーロラ帯でのVLF/ELF波動のさまざまな変動特性やその波動粒子相互作用を表すオーロラとの関係が世界で初めて明らかにされた。

研究成果の概要(英文)：In this study we have installed new loop antennas (100-kHz sampling) to measure VLF/ELF chorus waves and auroral cameras (30-100 Hz sampling) at subauroral latitudes in Canada since 17 February, 2012. These observations reveal several previously unknown features of VLF/ELF emissions and their relation to pulsating auroras at subauroral latitudes. Routine measurements of VLF/ELF and auroras have been carried out since then, and statistical features of VLF/ELF waves have been obtained at subauroral latitudes including their relation to local time, magnetic activity, and solar wind conditions. Comparisons with conjugate satellites in the magnetospheric equatorial plane are also on going.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：磁気圏・電離圏 宇宙科学 超高層物理学 超高層大気環境 宇宙空間 オーロラ プラズマ波動

1. 研究開始当初の背景

最先端の冷却 CCD カメラ技術の一つである電子増倍型 CCD (EM-CCD) により、従来の光電子増倍管 (MCP) 方式の高感度カメラに比べてはるかに画質の良い高時間分解能のオーロラ画像の撮像が可能になってきた。また、デジタル記録技術の汎用化に伴って、安価なパソコンと大容量ハードディスクの組み合わせで、100kHz の高時間分解能サンプルで VLF/ELF 帯波動の波形の観測が可能になっていた。

VLF/ELF 帯のホイッスラー波動は、特にディフューズオーロラを光らせる 10keV 以上の高エネルギー電子や、MeV エネルギーに至る放射線帯電子と、磁気圏の赤道面付近で相互作用して、粒子のピッチ角散乱や加速を引き起こすことが理論的に予想されている。このような波動粒子相互作用は、ULF 帯の波動とあわせて、パルセーティングオーロラやフリッカリングオーロラなど、0.1-10Hz のオーロラ変動の原因に関係していると考えられているが、高時間分解能のデータを用いたオーロラ画像、VLF/ELF/ULF 波動の波形、ソースとなる磁気圏・電離圏での衛星観測の比較はこれまでほとんど行われていなかった。さらに、VLF/ELF 波動の多点観測ネットワークが十分に整備されていないために、VLF/ELF 波動による放射線帯粒子の加速がどの緯度 (L 値) で発生しているか、よくわかっていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、カナダ北極域にループアンテナ及び高速のオーロラ観測カメラを設置し、既存の誘導磁力計とも組み合わせ、これまでにない最高時間分解能のオーロラ画像と VLF/ELF/ULF 波動の同時観測を行う。さらに観測点付近の磁力線につながる磁気圏赤道面に位置する THEMIS 衛星や電離圏の NOAA 衛星とこれらの地上観測のデータを組み合わせ解析を行う。これらにより、(1) 0.1-90Hz で高速に変動するオーロラ粒子降り込みを引き起こす磁気圏・電離圏の波動粒子相互作用の動態とその成因を明らかにする、また、(2) 粒子降り込みや放射線帯粒子の加速を引き起こす波動粒子相互作用が発生する緯度を、さまざまな磁気圏擾乱の状況に対して特定する。

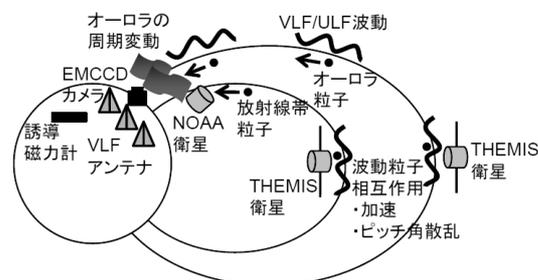


図1. 本研究の概念図

3. 研究の方法

カナダのアサバスカ (54.7°N、246.7°E) 及びフォートバーミリオン (58.4°N、244.0°E) 及びループアンテナ (2カ所) を設置し、100kHz サンプルの記録計による VLF 波形の観測を平成 23 年度から開始する。また、THEMIS 衛星がカナダ上空を飛翔する冬期に、アサバスカで EMCCD を用いた高感度・高速のオーロラ観測カメラを用いたキャンペーン観測を行う。これらのデータを、アサバスカに既存の誘導磁力計や、THEMIS プロジェクトで多点に設置されたオーロラ全天カメラ、誘導磁力計群のデータと組み合わせ、また、THEMIS 衛星や NOAA 衛星とこれらの地上観測の同時観測に基づいた解析を行う。

4. 研究成果

本研究により、THEMIS 衛星がカナダ上空に来る 2012 年 2 月 17-25 日に、カナダのフォートバーミリオンとアサバスカで、VLF-CHAIN キャンペーンとして、VLF 波動の (100kHz) とオーロラ (30Hz 以上) の高時間分解能同時観測を行った。この観測から、従来あまり観測が行われていなかったオーロラ帯のすぐ低緯度側のサブオーロラ帯における VLF/ELF 帯のコラス波動のさまざまな新しい特性が明らかになった。図 2 はその 1 例として、1 時間の間にさまざまに周期を変える準周期的 (Quasi-Periodic) 波動の例である (研究成果論文)。この繰り返し周期の短期間での変動は、この波動が従来考えられているような地磁気脈動により起こされているのではなく、他のメカニズムを考えなければならないことを示唆している。

また、アサバスカとフォートバーミリオンの 2 地点観測から得られた VLF/ELF 波動データの偏波解析を行うことにより、波動の電離圏でのソースの位置が時々刻々と変化している様子も明らかになってきた (研究成果論文)。

さらにこのキャンペーン観測のあと、2012 年 9 月からはアサバスカで 100kHz サンプルの VLF/ELF 波動の自動定常観測を開始した。この定常観測は 2015 年 5 月現在まで継続され、サブオーロラ帯でも VLF/ELF 波動の季節変化や地磁気活動度変化、太陽風変動への依存性などが統計的に明らかになりつつある。また、数多くのデータを取得することで、人工衛星との比較も行いやすくなり、Van Allen Probes 衛星とアサバスカで同じ波形を持つ準周期的 VLF/ELF 波動を世界で初めて見出し、これも論文としてまとめているところである。

一方、オーロラ観測の方は、上記のキャンペーン観測ののち、2013 年冬期からは EMCCD カメラによる 100Hz サンプルの高時間分解能のオーロラの定常観測を開始した。この観測から、脈動オーロラと対応する VLF/ELF 帯のコラス波動が見出され、両者の変動

の時間差から、波動と粒子の相互作用が時間的に数十秒スケールで切り替わっていることが示唆されている。

その他、南極昭和基地での同様の波動とオーロラの同時観測のデータを解析して波動粒子相互作用の過程を検証したり(論文)、下層大気から伝搬する大気重力波や電離圏不安定による電離圏の変動をアサバスカで明らかにしたり(論文)、磁気圏の圧力勾配で駆動されると思われるオーロラの指状構造をアサバスカの観測から見出す(論文)など、研究成果論文にリストしたように、多くの成果が本研究から得られた。

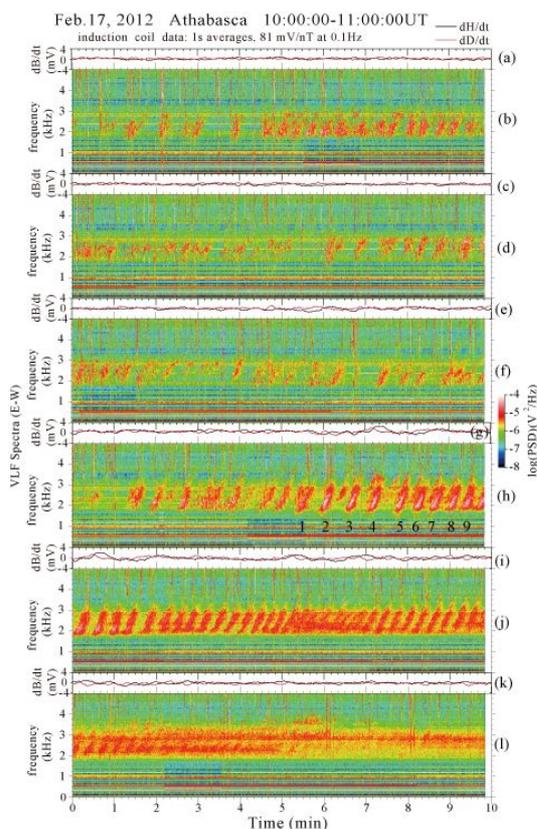


図 2. カナダ・アサバスカで 2012 年 2 月 17 日の 10:00-11:00UT に観測された準周期的 (Quasi-Periodic(QP)) VLF/ELF 波動。横軸は 10 分間ごとの時間、縦軸は 0-10kHz の周波数で波動の強度を示す。それぞれの図の上には、同時に誘導磁力計で観測された ULF 帯の地磁気脈動の変動 (H (南北), D (東西) 成分) が示してある。2-3kHz の QP 波動の繰り返し周期が時間的に変わっていき、最後は連続的に波動が出ていることがわかる(研究成果論文)。

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)

Lee, S., K. Shiokawa, J. P. McFadden,

and T. Nishimura, A statistical study of plasma sheet electrons carrying auroral upward field-aligned currents measured by THEMIS, *J. Geophys. Res.*, 116, A12202, doi:10.1029/2011JA016954, 2011.

Nomura, R., K. Shiokawa, K. Sakaguchi, Y. Otsuka, and M. Connors, Polarization of Pc1/EMIC waves and related proton auroras observed at subauroral latitudes, *J. Geophys. Res.*, 117, A02318, doi:10.1029/2011JA017241, 2012.

Nakajima, A., K. Shiokawa, K. Sakaguchi, Y. Miyoshi, S. Lee, V. Angelopoulos, O. Le Contel, J. P. McFadden, J. W. Bonnell, K.-H. Fornacon, and E. Donovan, Electron and wave characteristics observed by the THEMIS satellites near the magnetic equator during a pulsating aurora, *J. Geophys. Res.*, 117, A03219, doi:10.1029/2011ja017066, 2012.

Ozaki, M., S. Yagitani, K. Ishizaka, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, A. Kadokura, H. Yamagishi, R. Kataoka, A. Ieda, Y. Ebihara, N. Sato, and I. Nagano, Observed correlation between pulsating aurora and chorus waves at Syowa Station in Antarctica: a case study, *J. Geophys. Res.*, 117, A08211, doi:10.1029/2011JA017478, 2012.

Lee, S., K. Shiokawa, J. P. McFadden, and K. Seki, Geomagnetic conjugate observations of plasmasheet electrons by the FAST and THEMIS satellites, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 118, 132-145, doi:10.1029/2012JA017805, 2013.

Shiokawa, K., M. Mori, Y. Otsuka, S. Oyama, S. Nozawa, S. Suzuki, and M. Connors, Observation of nighttime medium-scale travelling ionospheric disturbances by two 630-nm airglow imagers near the auroral zone, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 103, 184-194, 2013.

Shiokawa, K., Y. Yokoyama, A. Ieda, Y. Miyoshi, R. Nomura, S. Lee, N. Sunagawa, Y. Miyashita, M. Ozaki, K. Ishizaka, S. Yagitani, R. Kataoka, F. Tsuchiya, I. Schofield, and M. Connors, Ground-based ELF/VLF chorus observations at subauroral latitudes - VLF-CHAIN Campaign, *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1029/2014JA020161, 2014.
Shiokawa, K., A. Hashimoto, T. Hori, K. Sakaguchi, Y. Ogawa, E. Donovan, E. Spanswick, M. Connors, Y. Otsuka, S.-I. Oyama, S. Nozawa, K. McWilliams,

Auroral fragmentation into patches, *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1029/2014JA020050, 2014.

Jun, C.-W., K. Shiokawa, M. Connors, I. Schofield, I. Poddelsky, and B. Shevtsov, Study of Pc1 pearl structures observed at multi-point ground stations in Russia Japan and Canada, *Earth Planets Space*, 66, 140, doi:10.1186/s40623-014-0140-8, 2014.

Martinez C. C., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, M. Ozaki, I. Schofield and M. Connors, Polarization analysis of VLF/ELF waves observed at subauroral latitudes during the VLF-CHAIN campaign, *Earth Planets Space*, 67(1), 1-13, doi:10.1186/s40623-014-0178-7, 2015.

Sakaguchi, K., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, and M. Connors, Isolated proton auroras and Pc1/EMIC waves at subauroral latitudes, AGU books, in press, 2015.

[学会発表](計 28 件)(代表的なもののみ)

Shiokawa, K., Ground-based imaging observations of magnetosphere-ionosphere coupling processes in the inner magnetosphere, *International Symposium on Solar-Terrestrial Physics*, Pune, India, November 6-9, 2012. (invited)

Shiokawa K., Fujii, R., Hashimoto, K., Hosokawa, K., Kadokura A., Kawano H., Kikuchi T., Kitamura K., Miyoshi Y., Nagatsuma T., Nishitani N., Obana Y., Ogawa Y., Ohya H., Okada M., Otsuka Y., Ozaki M., Sato N., Shinohara M., Tadokoro H., Taguchi M., Tanaka Y., Tanimori T., Tsuchiya F., Yamagishi H., Yoshikawa A., Yukimatsu A., and Yumoto K., Ground Network Observations for the ERG Project, THEMIS workshop, Fairbanks, Alaska, March 25-28, 2013. (invited)

Shiokawa, K., Y. Otsuka, Y. Miyoshi, M. Ozaki, and M. Connors, Ground-based network observations of aurora, airglow, magnetic pulsations, and VLF waves at subauroral latitudes, 10th Annual Meeting of AOGS, Brisbane, June 24-28, 2013. (invited)

Shiokawa, K., Y. Otsuka, and S. Suzuki, Recent results on gravity wave penetration to the thermosphere and ionosphere, *Workshop on Whole Atmosphere Coupling during Solar Cycle 24*, Taipei, July 14-17, 2013. (invited review)

Martinez, C., K. Shiokawa, Y. Miyoshi,

M. Ozaki, I. Schofield, and M. Connors, Polarization and occurrence statistics of VLF/ELF chorus waves at sub-auroral latitudes at Athabasca, Canada, 日本地球惑星科学連合大会、パシフィコ横浜、2014年4月28日-5月2日.

Jun, C.-W., K. Shiokawa, I. Schofield, M. Connors, I. Poddelsky, and B. Shevtsov, Study of Pc1 pearl structures observed at multi-point ground stations at Russia, Japan and Canada, 日本地球惑星科学連合大会、パシフィコ横浜、2014年4月28日-5月2日.

Shiokawa, K., and Y. Otsuka, Future direction of the ground-based network observations of the magnetosphere and the upper atmosphere, 日本地球惑星科学連合大会、パシフィコ横浜、2014年4月28日-5月2日.

Shiokawa, K., Y. Miyoshi, M. Ozaki, T. Nagatsuma, M. Ishii, M. Connors, I. Poddelsky, and B. Shevtsov, A longitudinal network of VLF/ELF antennas and induction magnetometers at subauroral latitudes - Contribution to VarSITI, 日本地球惑星科学連合大会、パシフィコ横浜、2014年4月28日-5月2日.

橋本あゆみ、塩川和夫、大塚雄一、大山伸一郎、野澤悟徳、トロムソでの地上光学観測に基づく圧力駆動型プラズマ不安定を示唆するオーロラ構造の統計解析、日本地球惑星科学連合大会、パシフィコ横浜、2014年4月28日-5月2日.

砂川尚貴、塩川和夫、三好由純、片岡龍峰、尾崎光紀、澤井薫、Ian Schofield, and Martin Connors, カナダ・アサバスカで同時に観測された VLF 波動とパルセーティングオーロラの高時間分解能相関解析、日本地球惑星科学連合大会、パシフィコ横浜、2014年4月28日-5月2日.

砂川尚貴、塩川和夫、三好由純、片岡龍峰、尾崎光紀、澤井薫、I.Schofield、M.Connors、カナダ・アサバスカで同時に観測された VLF/ELF 波動とパルセーティングオーロラの数十秒スケールでスイッチングする相関関係、第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会、長野県松本文化会館、2014年10月31日-11月3日.

塩川和夫、藤井良一、橋本久美子、細川敬祐、石井守、門倉昭、河野英昭、菊池崇、北村健太郎、三好由純、長妻努、西谷望、尾花由紀、小川泰信、大矢浩代、岡田雅樹、大塚雄一、尾崎光紀、佐藤夏雄、篠原学、田所裕康、田口真、田中良昌、谷森達、土屋史紀、山岸久雄、吉川

顕正、行松彰、湯元清文、ERG プロジェクトにおける連携地上観測ネットワーク、宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究所、2015年1月6-7日。

Hosokawa, K., S. Taguchi, K. Shiokawa, Y. Otsuka and Y. Ogawa, Global imaging of polar cap patches, AOGS 11th Annual Meeting, Sapporo, Japan, July 28-Aug.1, 2014.

Miyoshi, Y., T. Takashima, K. Asamura, K. Shiokawa, K. Seki, T. Hori, Y. Miyashita, K. Keika, M. Shoji, I. Shinohara, M. Hirahara, N. Higashio, H. Matsumoto, S. Kasahara, T. Mitani, Y. Kasaba, A. Matsuoka, H. Kojima, M. Fujimoto, T. Ono and ERG project group, ERG project: Importance of coordinated observations from satellite and ground, AOGS 11th Annual Meeting (session ST02), Sapporo, Japan, July 28-Aug.1, 2014. (invited)
Ozaki, M., K. Sawai, S. Yagitani, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, R. Kataoka, A. Ieda, Y. Ebihara, and Y. Katoh, Ground-Based Observations of Hiss-Like Emissions Changed from Chorus Emissions and Related Pulsating Aurora, XXXIst URSI General Assembly, Beijing, China, 16-23 August 2014.

Jun, C.-W., K. Shiokawa, I. Schofield, M. Connors, I. Poddelsky, and B. Shevtsov, Statistical study of Pc1 pearl structures observed at multi-point ground-based stations in Canada, Russia and Japan, AGU Chapman Conference on Low-Frequency Waves in Space Plasmas, Jeju island, Korea, August 31 - September 5, 2014.

Shiokawa, K., C.-W. Jun, C. Martinez, N. Sunagawa, Y. Miyoshi, T. Nagatsuma, M. Ishii, M. Ozaki, M. Connors, I. Schofield, P. T. Jayachandran, I. Poddelsky, B. Shevtsov, and D. Baishev, Ground-based optical and ULF/ELF/VLF wave measurements at subauroral latitudes prepared for the ERG project, Geospace revisited: a Cluster/MAARBLE/Van Allen Probes Conference, Rhodes (Greece), 15-20 September 2014. (invited)

Martinez C. C., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, M. Ozaki, I. Schofield and M. Connors, Statistical analysis of VLF/ELF emissions at subauroral latitudes in Athabasca, Canada, Geospace revisited: a Cluster/MAARBLE/Van Allen Probes Conference, Rhodes (Greece), 15-20 September 2014.

Shiokawa, K., Fujii, R., Hashimoto, K., Hosokawa, K., Ishii, M., Kadokura A., Kawano H., Kikuchi T., Kitamura K., Miyoshi Y., Nagatsuma T., Nishitani N., Obana Y., Ogawa Y., Ohya H., Okada M., Otsuka Y., Ozaki M., Sato N., Shinohara M., Tadokoro H., Taguchi M., Tanaka Y., Tanimori T., Tsuchiya F., Yamagishi H., Yoshikawa A., Yukimatu A. S., Yumoto K., Ground Network Observations for the ERG Project, Geospace revisited: a Cluster/MAARBLE/Van Allen Probes Conference, Rhodes (Greece), 15-20 September 2014.

Shiokawa, K., C.-W. Jun, C. Martinez, N. Sunagawa, Y. Miyoshi, T. Nagatsuma, M. Ishii, M. Ozaki, M. Connors, I. Schofield, P. T. Jayachandran, I. Poddelsky, B. Shevtsov, and D. Baishev, Optical and ULF/ELF/VLF wave measurements at longitudinally-distributed stations at subauroral latitudes, SCOSTEP STP13 Symposium, Xi'an, China, October 12-18, 2014. (poster)

21 Martinez C. C., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, M. Ozaki, I. Schofield and M. Connors, Statistical study of VLF/ELF emissions at subauroral latitudes in Athabasca, Canada, International Conference on Substorms -12, Ise-Shima, Japan, 10-14 November 2014.

22 Sunagawa, N., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, R. Kataoka, M. Ozaki, K. Sawai, I. Schofield, and M. Connors, High-time resolution correlation analysis between VLF/ELF chorus waves and pulsating aurora observed at Athabasca, Canada, International Conference on Substorms -12, Ise-Shima, Japan, 10-14 November 2014.

23 Shiokawa, K., Ayumi Hashimoto, Tomoaki Hori, Kaori Sakaguchi, Yasunobu Ogawa, Eric Donovan, Emma Spanswick, Martin Connors, Yuichi Otsuka, Shin-Ichiro Oyama, Satonori Nozawa, and Kathryn McWilliams, Auroral fragmentation into patches during the substorm recovery phase, International Conference on Substorms -12, Ise-Shima, Japan, 10-14 November 2014.

24 Jun, C.-W., K. Shiokawa, I. Schofield, M. Connors, I. Poddelsky, and B. Shevtsov, Importance of ionospheric beating for the formation of Pc1 pearl structures based on ground

- observations in Canada, Russia and Japan, International Conference on Substorms -12, Ise-Shima, Japan, 10-14 November 2014.
- 25 Martinez C. C., K. Shiokawa, Y. Miyoshi, K. Keika, M. Ozaki, I. Schofield, M. Connors, and K. Kletzing, Statistics of VLF/ELF emissions at subauroral latitudes in Athabasca, Canada and their correspondence to the Van Allen Probes observations, AGU Fall Meeting, San Fransisco, December 15-19, 2014.
- 26 C.-W Jun, K. Shiokawa, I. Schofield, M. Connors, I. Poddelsky, and B. Shevtsov, Possible effects of ionospheric beating for the formation of Pc1 pearl structures based on 6-year ground observations in Canada, Russia and Japan, AGU Fall Meeting, San Fransisco, December 15-19, 2014.
- 27 Hashimoto, A., K. Shiokawa, Y. Otsuka, S. Oyama, S. Nozawa, T. Horii and M. Lester, Statistical study of auroral fragmentation into patches, AGU Fall Meeting, San Fransisco, December 15-19, 2014.
- 28 Miyoshi, Y., I. Shinohara, T. Takashima, K. Asamura, K. Shiokawa, K. Seki, T. Horii, Y. Miyashita, K. Keika, M. Shoji, M. Hirahara, N. Higashio, H. Matsumoto, S. Kasahara, T. Mitani, Y. Kasaba, A. Matsuoka, H. Kojima, M. Fujimoto, T. Ono and ERG project group, ERG project: Importance of coordinated observations from satellite and ground, The third Inner Magnetosphere Coupling (IMC-III) workshop, UCLA, Los Angeles, USA, March 23-27, 2015.

〔図書〕(計2件)

T. Bosinger, J. LaBelle, H. J. Opgenoorth, J.-P. Pommereau, K. Shiokawa, S. C. Solomon, and R. A. Treumann (editors), Dynamic coupling between Earth's atmospheric and plasma environments, Space Sciences Series of ISSI, Vol. 42, Springer, 2013.

D. Pancheva, P. Koucka Knizova, K. Shiokawa and W. Wan (editors), Recent Progress in the Vertical Coupling in the Atmosphere-Ionosphere System, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., Volumes 90-91, Pages 1-222, Elsevier, December 2012.

〔その他〕

ホームページ等

Optical Mesosphere Thermosphere Imagers:
<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/omti/>

STEL Magnetometers:
<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/magne/>

STEL VLF/ELF Data:
<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/vlf/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩川 和夫 (SHIOKAWA, Kazuo)
 名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授
 研究者番号: 80226092

(2) 研究分担者

三好 由純 (MIYOSHI, Yoshizumi)
 名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授
 研究者番号: 10377781

尾崎 光紀 (OZAKI, Mitunori)
 金沢大学・電子情報学系・准教授
 研究者番号: 70422649

片岡 龍峰 (KATAOKA, Ryuho)
 国立極地研究所・宙空圏研究グループ・准教授
 研究者番号: 90462671

家田 章正 (IEDA, Akimasa)
 名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教
 研究者番号: 70362209

(3) 連携研究者

海老原 祐輔 (EBIHARA, Yusuke)
 京都大学・生存圏研究所・准教授
 研究者番号: 80342616

八木谷 聡 (YAGITANI, Satoshi)
 金沢大学・電子情報学系・教授
 研究者番号: 30251937