

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20740281

研究課題名（和文） VLF・LF帯電波観測による磁気嵐時の放射線外帯消失過程の実証

研究課題名（英文） VLF/LF radio wave observation of radiation belt electrons into the atmosphere during geomagnetic storms

研究代表者

土屋 史紀（TSUCHIYA FUMINORI）

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：10302077

研究成果の概要（和文）：

電離圏D領域と地表面間を伝搬する人工VLF/LF帯電波の受信信号が、高エネルギー電子の大気への降下によって変調を受ける事を利用して、放射線帯電子の大気降下現象を観測し、そのメカニズムを調査した。ノルウェー・ニーオルセンとカナダ・アサバスカに受信機を設置し、磁気嵐並びにサブストーム時に、高エネルギー電子降下現象の検出に成功した。降下現象の発生領域とタイミングには強い磁気地方時依存性が存在し、磁気圏で励起されるプラズマ波動によって高エネルギー電子に強いピッチ角散乱が生じた事を示す結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：

Man-made VLF/LF radio wave observations have been started at Ny-Ålesund in Norway and Athabasca in Canada. These observations have been used to study precipitations of high-energy (>100keV) electrons into the atmosphere during the geomagnetic storm and substorm. Local time distribution of the electron precipitation events was examined and was compared with the substorm onset timing. The data indicates that plasma wave are responsible for the energetic electron precipitation into the atmosphere through the pitch angle scattering.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：放射線帯、磁気嵐、長波標準電波、サブストーム、電離圏、D領域

### 1. 研究開始当初の背景

地球放射線帯の外帯領域は、磁気嵐の主相に消失し回復相で再形成される事が知られているが、主相での消失は大きな未解決問題として残されている。近年の人工飛翔体観測より、磁気嵐時の磁気圏電場やプラズマ波動の空間分布に強い地方時依存性が確認された。これらは放射線帯粒子の損失過程に強く影響する事から、放射線帯粒子の損失領域にも強い局所性が予想される。しかし、飛翔体によるその場観測は、飛翔体の軌道や検出器の制約から、放射線帯電子の損失の現場をグローバルに捉える事が難しい。本計画では、磁気嵐主相での消失問題を観測的に解決するため、放射線帯電子の大気への損失過程に注目する。高エネルギー電子の大気への降下は、電離圏 D 領域と地表面間を伝搬する人工 VLF/LF 帯電波の信号に強い変調をもたらすため、この信号の計測から、放射線帯電子が大気へ降下する現場を捉える事が出来る。

### 2. 研究の目的

極冠域に電波の受信点を設置し、世界各地から様々な地方時で放射線帯外帯をまたいでくる電波を連続観測する事により、磁気嵐主相での放射線帯電子の消失が、地方時方向にどの様に局在し、どのように時間発展するのかを観測的に把握することを目指す。本計画では、(1)極冠域における人工 VLF/LF 帯電波観測網の設置と観測、(2)観測データの解析から放射線帯の高エネルギー電子が大気に降下する現場を検出し、その地方時依存性から、放射線帯電子の大気損失現象のメカニズムを調査する事、を目的とする。

### 3. 研究の方法

本計画では、(1)極冠域設置用受信機の開発・製作、(2)極冠域への受信点の設置(2カ所)と観測、並びに(3)データ解析及びその結果の考察、を行う事とした。放射線帯電子の降下は、1秒未満の時間スケールで突発的に生じる事、受信する VLF/LF 帯電波は 16k-60kHz の範囲にある事から 1-5dB 程度である事を考慮し、開発・製作する受信機の諸元は、時間分解能 0.1 秒、観測帯域幅 10k-100kHz とした。人工 VLF/LF 帯電波の受信装置として垂直モノポール(RF systems 製)による電場 1 成分の受信装置を用いる。受信機は 100kHz までの VLF/LF 帯に感度があり、受信波形を AD コンバータでサンプリングした後(サンプリング周波数 200kHz)、逐次周波数解析を行い、複数の標準電波の周波数を選択してデータを保存することによりデータ量を圧縮する。また、標準電波信号の位相変動を観測するために、GPS 基準信号発生器をサンプリングクロックとして使用している。

H20 年度に受信装置の開発・製作、H21 年度に北極の極冠域(ノルウェー・ニーオルセン)への設置、H22 にデータアーカイブ、解析の実施及びカナダ・アサバスカ(サブオーロラ帯)への受信機設置を行った。北極で観測されたデータの解析から、オーロラ帯の電子降下現象の寄与を除き、放射線帯外帯のみからの電子降下を調査する事が必要と判断されたため、2 点目の観測点は極冠域ではなく、オーロラ帯の低緯度側に変更された。図 1 に、ニーオルセンに設置された垂直モノポールアンテナを示す。

大気への電子降下現象を引き起こす要因として、磁気圏赤道面で励起されるプラズマ波動との相互作用が考えられていることから、電子降下現象発生域の地方時依存性を解析し、プラズマ波動の分布との比較によって、電子降下現象のメカニズムの考察を行う。

### 4. 研究成果

北極の極冠域に位置するニーオルセンではイギリス(60.0kHz)とドイツ(77.5kHz)からの送信信号が受信されており、この電波の伝搬経路は放射線帯の外帯を横切る(図 2)。受



Figure 1: A low frequency radio antenna (vertical mono-pole) installed at Ny-Ålesund on Mar. 2010.

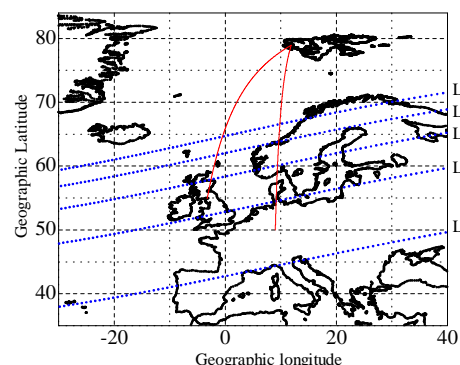


Figure 2: Radio propagation paths from transmitters (Anthorn, Cumbria, England, 60.0kHz and Mainflingen, Germany, 77.5kHz) to receiver (Ny-Ålesund).

信機設置後の2010年の4/5, 5/2, 5/29に発生した磁嵐時において、受信信号の位相変動が検出され(図3)。電波の伝搬経路上を通過したNOAA/POSE衛星のデータ(NOAA/NGDCより公開されているNOAA15-19データ, 10日間で19path分)から、降下電子フラックスと受信信号の位相変動量間に、良い対応関係が確認され(図4)、受信した電波の位相変動量が降下電子フラックスの良い指標となることを確認した。内部磁気圏からの高エネルギー電子の降下は波動粒子相互作用によるピッチ角散乱により生じると考えられており、プラズマ波動の空間分布によって、電子降下領域にLT依存性が生じる事が期待される。そこで、高エネルギー電子降下現象の時間変動の特徴とsubstorm onsetからの時間差に注目したLT依存性を調査した。図5に朝~昼側(上)と夕方側(下)で観測される電子降下現象の典型例を示す。朝~昼側で生じる現象は立ち上がりが遅く、継続時間が長いのに対し、夕方側の現象は立ち上がりが速く、継続時間が短い傾向がある。柿岡地磁気観測所のPi2と真夜中付近でのpositive bay(INTERMAGNETより)を参照して決めたsubstorm onset時間と電子降下の開始時間を

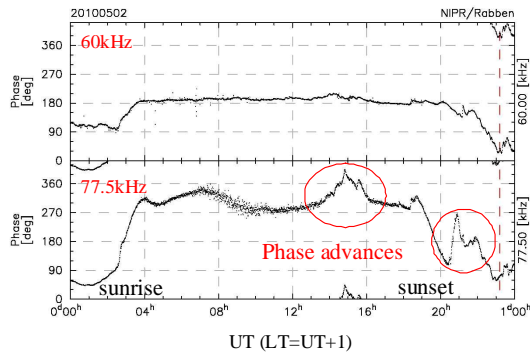


Figure 3: Comparison between precipitation electron fluxes measured by POSE/MEPED and phase variations of the 60 kHz radio signal received at Ny-Ålesund.

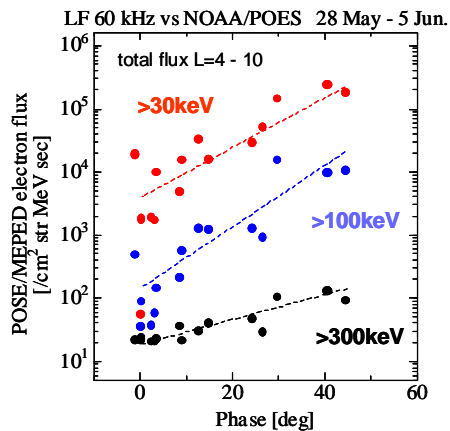


Figure 4: Phase variations during a main phase of a geomagnetic storm (May 2, 2010). An abnormal phase variation is seen from 14 to 16 UT.

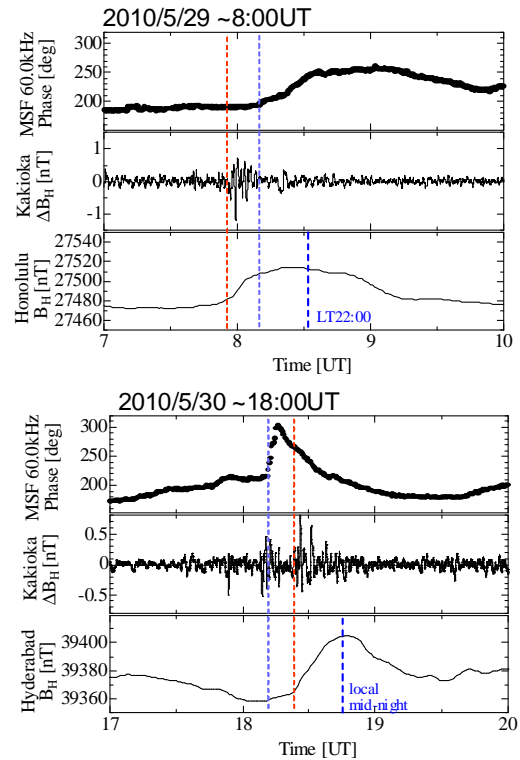


Figure 5: Comparison between electron precipitation events occurred on dawn side (top) and dusk side (bottom) and the substorm onset timing. From top to bottom panels, phase variations of the received radio signal at 60 kHz, variations in horizontal magnetic field component measured at Kakioka, and horizontal magnetic field component at low magnetic latitude (Honolulu and Hyderabad). Thin and thick vertical lines show onset times of local electron precipitations and substorms determined by positive bays, respectively.

比べると(図6)、朝~昼側ではsubstorm onsetから局所的な電子降下の発生までに時間差がある事が明らかとなった。この時間差は真夜中からの経度差が大きいほど長くなり、100keV~数100keV電子のドリフト時間(図6破線)で説明できる。夕方側ではsubstorm onsetと同時に、先行して電子降下が生じている事が明らかとなった(図6丸印)。substorm onsetに伴って広い周波数帯域で発生する波動に伴い、強いピッチ角散乱が生じた結果と推測される。

ニーオルセンでの観測結果を受け、オーロラ帯での高エネルギー電子降下と放射線帯外帯でのそれを分離して議論する必要性が課題となった。このため、放射線帯外帯領域のみ通る様な電波の伝搬経路を確保できるサブオーロラ帯への受信機の設置を検討し、2010年10月にカナダ、アルバータ州のアサバスカ大学地球物理観測所にニーオルセンと同型の受信機を設置した。この周辺はVLF/LF帯のノイズレベルが低く、北米、アイスランド、並びにオーストラリアから送信されているVLF/LF帯の標準電波信号が良好な感度で受信されていることを確認した。この

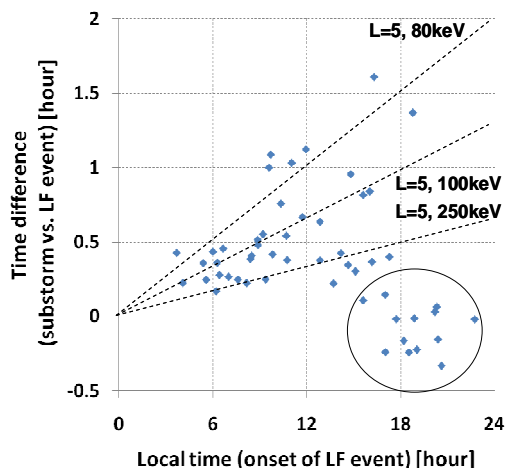


Figure 6: Local time distribution of time differences of onsets between substorm and the electron precipitation determined by the VLF/LF observation.

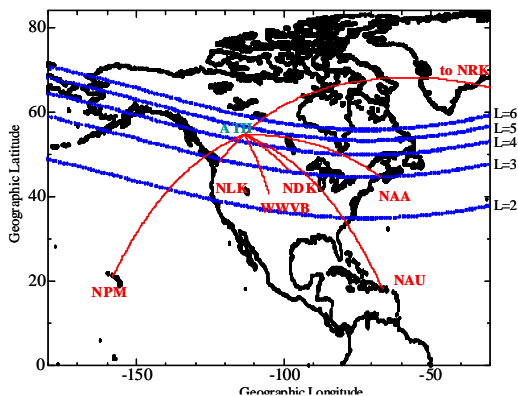


Figure 7: (left) Radio propagation paths from transmitters to Athabasca. (right) Example of a radio spectrum measured at Athabasca.

事から、1秒未満の時間スケールの電子降り込み現象が検出される事を期待している。図7にアサバスカで受信されている代表的な標準電波信号の伝搬経路を示す。

ニューオルセン並びにアサバスカでの観測は自動定常観測として行われており、データは1日に1回、自動的に東北大学に設置されたデータサーバに転送されている。今後は他の観測データとの共通解析環境下での利用を可能とするためのデータベース化作業も開始する予定である。

#### 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2件)

1. Tadokoro, H., F. Tsuchiya, Y. Miyoshi, Y. Katoh, A. Morioka, and H. Misawa, Storm-time electron flux precipitation in the inner radiation

belt caused by wave-particle interactions, *Ann Geophysica*, 27, 6, 1669-1677, 2009 (査読有り)

2. Adachi, T., Y. Takashashi, H. Ohya, F. Tsuchiya, K. Yamashita, M. Yamamoto, H. Hashiguchi, Monitoring of Lightning Activity in Southeast Asia: Scientific Objectives and Strategies, *Kyoto Working Papers on Area Studies* No. 13, 1-20, 2008(査読無し).

[学会発表] (計14件)

1. 大矢浩代, 土屋史紀, 山下幸三, 高橋幸弘, 塩川和夫, 三好由純, 東南アジアにおける VLF/LF 帯電磁波観測ネットワークシステム (AVON) について Asian VLF Observation Network: AVON, 宇宙天気に関する地上観測ネットワークの構築へ向けた研究集会, 福岡, 2011年3月1日
2. 土屋史紀, 三澤浩昭, 森岡昭, 三好由純, 塩川和夫, 菊池崇, 小川泰信, ニーオルセンにおける LF 帯電波観測から得られた高エネルギー電子の大気降下現象, NIPR 研究集会「昭和基地における ULF/ELF/VLF 電磁波観測の展望」, 立川, 2011年2月22日
3. Tsuchiya, F., A. Morioka, H. Misawa, S. Sato, Y. Miyoshi, K. Shiokawa, T. Kikuchi, Y. Ogawa, and M. Connors, 高緯度地域での VLF/LF 帯波動観測による放射線帯電子損失過程の実証的研究, GEMSIS-太陽、磁気圏、電離圏ワークショップ 2010, 犬山, 2010年12月27日
4. 土屋史紀, 三澤浩昭, 森岡昭, 三好由純, 塩川和夫, 菊池崇, 小川泰信, The radiation belt electron loss into the atmosphere: initial results from LF radio observation at Ny-Alesund, 第34回極域宙空圏シンポジウム, 立川, 2010年12月2日
5. Tsuchiya, F., H. Misawa, A. Morioka, Y. Mioyshi, K. Shiokawa, T. Kikuchi, Y. Ogawa, Storm time loss of radiation belt electrons into the atmosphere: initial results from VLF/LF observation at Ny-Alesund, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 那覇, 2010年10月31日
6. Tsuchiya, F., T. Adachi, Y. Takahashi, K. Yamashita, H. Ohya, M. Sato, M.-Y. Yamamoto, H. Misawa, A. Morioka, Y. Mioyshi, K. Shiokawa, T. Kikuchi, Electron density changes in the night time lower ionosphere associated with lightning-EMP, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 那覇, 2010年10月31日

7. 大矢浩代, 土屋史紀, 山下幸三, 高橋幸弘、塩川和夫, 三好由純, Mapping of the tweek reflection height observed by low-mid latitude VLF network system, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 那覇, 2010年10月31日
8. Tsuchiya, F., Y. Takahashi, K. Yamashita, T. Adachi, H. Ohya, H. Misawa, A. Morioka, Y. Miyoshi, K. Shiokawa, T. Kikuchi, Statistical Analysis on Occurrence of Lightning Associated VLF/LF Events Observed in the East Asia, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'10), Toyama, Japan, 24 Sep., 2010.
9. Ohya, H., F. Tsuchiya, K. Yamashita, Y. Takahashi, T. Adachi, Tweek Reflection Height Observed By Vlf Observation Network System In Southeast Asia, 010 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'10), Toyama, Japan, 24 Sep., 2010.
10. Yamashita, K., Y. Takahashi, F. Tsuchiya, H. Ohya, T. Adachi, Construction Of Asia Vlf Observation Network And Its Initial Results, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'10), Toyama, Japan, 24 Sep., 2010.
11. Yamashita, K., Y. Takahashi, F. Tsuchiya, H. Ohya, Monitoring of lightning activity in Southeast Asia using VLF observation network, AOGS 2010, Hyderabad, India, 5 Jul., 2010.
12. 土屋史紀、三澤浩昭、森岡 昭、高橋幸弘、三好由純、菊池崇、塩川和夫、足立透、山下幸三、大矢浩代, 2009年7月22日の皆既日食に伴う電離圏D領域観測, JPGU meeting, 幕張, 2010年5月23日
13. 大矢 浩代, 塩川和夫, 三好由純, 土屋史紀, 山下幸三, 高橋幸弘, 2009年7月22日皆既日食時に観測された tweek 空電について, JPGU meeting, 幕張, 2010年5月23日
14. 土屋史紀, 三澤浩昭, 森岡 昭, 三好由純, 高橋幸弘, 菊池 崇, 塩川和夫, 山下幸三, 大矢浩代, 足立透, LF帯標準電波を用いた7/22日食中のD領域変動観測, 平成21年度第1回STE現象報告会, 情報通信研究機構, 2009年9月4日

〔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

<http://pparc.gp.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土屋 史紀 (TSUCHIYA FUMINORI)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 10302077