

## サブオーロラ帯における EMIC 波動と 高エネルギー電子降下観測

平井 あすか[1], 土屋 史紀[1], 小原 隆博[1], 笠羽 康正[1], 加藤 雄人[1], 三澤 浩昭[1],  
塩川 和夫[2], 三好 由純[2], 栗田 怜[2], Martin Connors[3]

[1]東北大学, [2]名古屋大学 宇宙地球環境研究所, [3]アサバスカ大学

放射線帯外帯の相対論的電子は、磁気圏内で発生するプラズマ波動との相互作用により散乱され地球大気に降下する。この過程は、磁気嵐の主相における外帯消失の要因の一つと考えられており、降下した相対論的電子は、国際宇宙ステーションや低軌道衛星への悪影響、下部電離圏での電子密度増加に伴う通信障害を引き起こし得る。本研究では、放射線帯の相対論的電子を降下消失させる電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波動に着目した。電子降下は、VLF/LF 帯の人工電波を用いて観測した。地上と電離圏下端の間を長距離伝搬する電波の信号は、電子降下に伴う電離圏 D 領域高度での局所的な擾乱により振幅・位相変調を受ける。本研究では、複合地上観測により、2017 年 3 月 27 日の磁気嵐主相時の EMIC 波動とそれに伴う相対論的電子降下の時空間対応を調べた。その結果、数 10 秒から数分の時間スケールで変化する EMIC 波動強度の増大時に、相対論的電子が散乱され大気に降下消失することが明らかとなった。

### 1. はじめに

#### 1.1 放射線帯

地球の静止軌道の内側には、数 100keV から MeV 帯の荷電粒子が磁場に捕捉された放射線帯が存在する。電子放射線帯はフラックスの少ないスロット領域を挟み、内帯と外帯の 2 重構造を形成している。地球中心から約 4-5 Re に存在する外帯は、磁気嵐主相時に電子フラックスが大きく減少し、その後徐々に再形成されることが知られている。放射線帯電子は人工衛星障害を引き起こしうするため、放射線帯変動の理解と予測は宇宙天気研究の重要課題となっている。

放射線帯は電子の加速と消失機構のバランスで決まるため、両方の機構を解明する必要がある。消失の原因として、断熱効果による見かけ上の消失、磁気圏外への流出、そして波動粒子相互作用による大気への降下消失が考えられる。大気への降下消失を引き起こすプラズマ波動の候補としては、ホイッスラーモードコーラス波動と電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波動が挙げられる。

#### 1.2 電磁イオンサイクロトロン波動

EMIC 波動は、磁気圏尾部から注入された温度異方性を持つリングカレントイオンによって磁気赤道面で励起するプラズマ波動

である(Cornwall, 1965; Cornwall et al., 1970; Erlandson and Ukhorskiy, 2001; Kennel and Petschek, 1966)。EMIC 波動は磁力線に対して平行か斜めに伝搬し、地上では Pc1 地磁気脈動として観測される。

EMIC 波動は放射線帯電子のピッチ角を散乱し、大気に降下させることができることから、放射線帯外帯電子の消失に寄与すると考えられている。これまでに、低軌道衛星、低周波電波観測や X 線観測から EMIC 波動によって引き起こされた高エネルギー電子降下が報告されている(e.g. Miyoshi et al., 2008; Millan et al., 2002)。

EMIC 波動によって数 10 keV のイオンもピッチ角散乱を受け大気に降下する。孤立プロトンオーロラは EMIC 波動で散乱された降下プロトンによって発生し、磁気圏の EMIC 波動と粒子の相互作用領域の投影である。Nomura et al. (2016) と Ozaki et al. (2016) では、Pc1 地磁気脈動と孤立プロトンオーロラの脈動の時間変化に一対一対応があることが報告されている。これらは EMIC トリガードエミッションによるプロトンの非線形ピッチ角散乱を示唆している。Ozaki et al. (2018) は孤立プロトンオーロラの中に 1 Hz の輝度変調を同定し、これは非線形相互作用の重要性を示している。

### 1.3 研究目的

EMIC 波動と相対論的電子降下の一対一の時間変化対応についてはまだ報告されていない。理論研究では、ライジングトーン構造をもつ EMIC 波動が電磁波動ポテンシャルによる非線形なトラッピングのために、相対論的電子が効率的に散乱されることが示されている (Omura and Zhao, 2013)。

本研究では、複数の地上観測装置を用いることによって、相対論的電子降下とライジングトーンをもつ EMIC 波動の対応関係について調べた。特に 2017 年 3 月 27 日の磁気嵐主相時の EMIC 波動による高エネルギー電子降下イベントについて詳しく解析した。

## 2. 観測機器

本研究では高エネルギー電子降下を捉えるために低周波電波観測を行った。地上と電離圏 D 領域下端を反射しながらダクト伝搬する人工電波は、50 keV-MeV の電子降下を捉えることができる(Rodger et al., 2012)。人工電波の伝搬経路上に高エネルギー電子が降下すると、下部電離圏での電離度増加のため、受信される電波信号の振幅と位相が変調を受ける。本研究では、3つの送信局、NDK (25.2 kHz, 46.37°N, 261.47°E, L = 3.0)、WWVB (60.0 kHz, 40.67°N, 254.95°E, L = 2.3)、NLK (24.8 kHz, 48.20°N, 238.08°E, L = 2.9)から送信される電波をアサバスカ (54.6°N, 246.7°E, L = 4.3)で受信したデータを用いた。

EMIC 波動観測は PWING プロジェクトのサンプリング周波数 64 Hz の誘導磁力計データを使用した(Shiokawa et al., 2017)。EMIC 波動により散乱された電子の降下領域を同定するためにプロトンオーロラを観測した。PWING の全天イメージャ(486.1 nm、露光時間 40 秒、時間分解能 2 分)(Shiokawa et al., 1999) と THEMIS ground-based observatory の全天イメージャ(400-700 nm、時間分解能 3 秒)を使用した(Donovan et al., 2006; Mende et al., 2008)。誘導磁力計と全天

イメージャはいずれもアサバスカに設置されている。

### 3. 観測結果

図1に2017年3月27日04:00-07:00 UTの3つの送信局からの人工電波の振幅と誘導磁力計のダイナミックスペクトルを示す。Dst指数は26日22:00 UTから減少を開始し、27日14:00に-74 nTで最小となり、04:00-07:00 UTは磁気嵐の主相中であったことが分かる。静穏日の人工電波の振幅変化を青い線で、今回のイベント時の変化を黒い線で示した。誘導磁力計のダイナミックスペクトルより、04:20-06:30 UTに周波数が0.2 Hzから1.8 Hzまで上昇するEMIC波動が観測されている。EMIC波動の強度が増大しているときに電波の振幅が減少し、電子降下が起こったことがわかる。この時間のアサバスカのMLTは19:54-22:54であった。

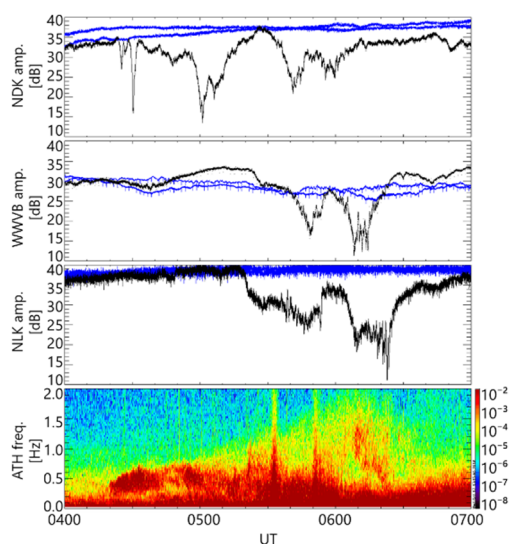


図1. アサバスカで受信された、NDK, WWVB, NLKからの人工電波の振幅変化、及び、アサバスカの誘導磁力計のダイナミックスペクトル。

図2に06:08-06:24 UTの2分毎のアサバスカの全天画像を示す。3本の白い線は3つの送信局からアサバスカへの電波の伝搬経路を示している。06:10 UTにWWVBからアサバスカへの電波の伝搬経路上に暗い孤立したプロトンオーロラが現れ、明るくなりながら西向きに移動し、06:12-06:24 UTにNLKからアサバスカへの伝搬経路上で明るく光っていることがわかる。孤立プロトンオーロラが電波の伝搬経路上付近に存在していた時間に、それぞれの電波の振幅が大きく減少し、電子降下が起こっていた。これらの観測結果より、EMIC波動によって高エネルギー電子が散乱され、大気に降下していることが示された。

私たちはさらにNLKからアサバスカへの電波の振幅変化と、その時間のEMIC波動強度の時間変化に注目した。図3(a)はNLKからアサバスカの電波の伝搬経路に沿ったオーロラ輝度のケオグラムである。図2に示されたように、06:12-06:28 UTに孤立プロトンオーロラが伝搬経路上に現れていたことがわかる。EMIC波動は

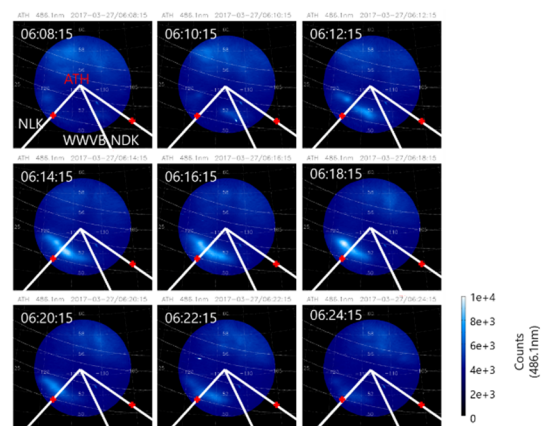


図2. アサバスカの2分毎の全天画像(06:08:15-06:24:15 UT)

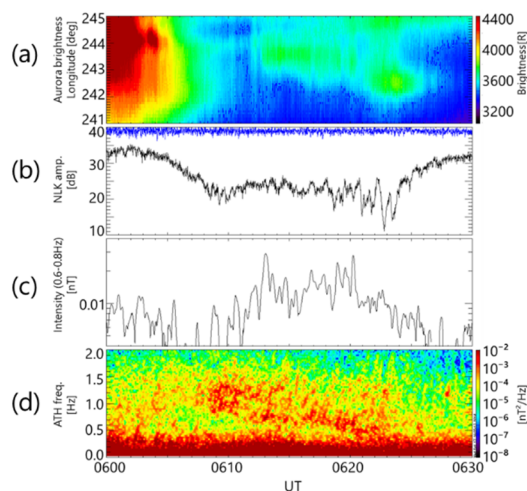


図 3. (a)THEMI 全天イメージのケオグラム、(b) NLK からの電波の振幅変化、(c)EMIC 波動強度 (0.6-0.8 Hz)、(d)アサバスカの誘導磁力計のダイナミックスペクトル

06:08-06:24 UT に 0.4-1.5 Hz の周波数帯に現れているが、06:12 UT 付近から、数 10 秒から数分の間に周波数が上昇するライジングトーンの構造を持っていることがわかる。図 3(c)は、EMIC 波動の 0.6-0.8 Hz の強度の時間変化を表している。この周波数帯はライジングトーン構造の下限周波数であり、孤立プロトンオーロラが観測されていた時間で特に EMIC 波動強度の強かった周波数帯である。06:12-06:20 UT の NLK からアサバスカへの電波の振幅変化（図 3(b)）と EMIC 波動強度（図 3(c)）を比べると、数 10 秒から数分の時間スケールで変化していることが分かる。図 4 に 06:10-06:25 UT の電波の振幅と EMIC 波動強度の時間変化を示す。これらを相互相関解析すると、電波の振幅変化、つまり電子降下の時間変化が EMIC 波動強度変化より 24 秒先行していることが分かった。これは、磁気圏で EMIC 波動によって散乱された電子が EMIC 波動より

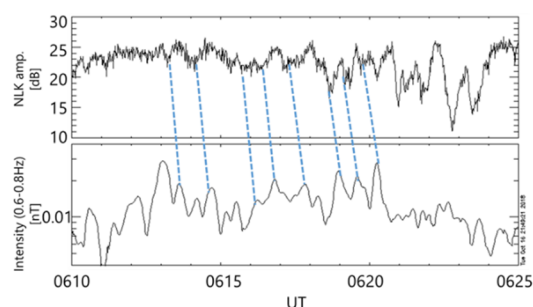


図 4. NLK からアサバスカに送信された人工電波の振幅（上）と EMIC 波動強度の時間変化（下）

24 秒速く電離圏に到達したことを示している。

#### 4. 伝搬時間計算

相互相関解析から明らかになった電子降下と EMIC 波動強度の時間差の物理的意味を調べるために、電子と EMIC 波動の磁力線に沿った伝搬速度を計算した。ここでは、電子は相対論的エネルギー(1-5 MeV)をもち、電子と EMIC 波動が磁気赤道から電離圏までを同一の磁力線に沿って伝搬すると仮定した。EMIC 波動の磁力線に沿った群速度は、プロトンとヘリウムイオン、酸素イオンを含むコールドプラズマにおける電磁波動の分散関係式から求めた(Summers and Thorne, 2003; Meredith et al., 2003, 他)。Tsyganenko 2001 の磁場モデルを用い(Tsyganenko, 2002)、孤立プロトンオーロラを footprint として電子と EMIC 波動が伝搬する磁力線をトレースした。磁力線に沿った電子密度は Ozhogin et al. (2012)のモデルを使用した。磁気赤道面の電子密度はあらせ衛星に搭載されているプラズマ波動・電場観測器(Kasahara et al., 2018; Kumamoto et al., 2018; Matsuda et al., 2018)と磁場観測器(Matsuoka et al., 2017)か



ら求められた電子密度を参考にした。イベント時にあらせ衛星はちょうどプラズマボーズを観測しており、孤立プロトンオーロラの footprint の L 値付近の電子密度は  $100\text{--}300\text{ cm}^{-3}$  であったため、計算では  $200\text{ cm}^{-3}$  とした。イオン組成比は、磁力線に沿って一定であると仮定し、プロトン 79%、ヘリウムイオン 20%、酸素イオン 1%とした。これらのパラメータを用いると、EMIC 波動は磁気赤道から約 24 秒で電離圏に到達する。一方 1-5 MeV の電子は約 0.1 秒で到達する。電子と EMIC 波動の到達時間差は、EMIC 波動の伝搬時間で決まり、24 秒であることを示している。これは観測結果から求められた電子降下と EMIC 波動強度の時間変化の時間差と一致する結果である。

観測された EMIC 波動のスペクトルから、電子とイオンのピッチ角散乱係数を計算した。波動と粒子が一部非線形相互作用を引き起こしている可能性もあるが、今回は準線形理論を用い見積もりを行った。EMIC 波動の伝搬速度計算と同じイオン組成、電子密度の値を用い、磁気赤道での波動強度を 1 nT と仮定した場合、3.5 MeV 以上の電子が散乱されることがわかった。

これらの結果は、数 10 秒から数分の時間スケールの EMIC 波動の強度増大に対応して、磁気赤道付近で相対論的電子が強く散乱され、大気に降下することを示している。

## 5. 結論

本研究では、放射線帯電子の消失に寄与するとされている EMIC 波動について、複合地上観測を行うことにより、EMIC 波動と電子降下の時空間対応について調べた。電

子降下検出に用いた人工電波の伝搬経路と孤立プロトンオーロラとの位置関係により、EMIC 波動による電子降下領域を同定した。更に、電子降下と EMIC 波動強度の時間変化が対応していることを同定した。これらの結果は、数 10 秒から数分の時間スケールで EMIC 波動強度が変化し、その強度増大時に磁気赤道付近で相対論的電子が散乱され大気に降下していることを示している。今後は、電波観測で得られた位相・振幅変化量から、電子の降下量とエネルギーの見積もりを行う。この見積もりと放射線帯電子フラックスの減少量を比べ、放射線帯外帯の消失に対する EMIC 波動の寄与の定量評価を行う。

## 参考文献

- Cornwall, J. M. (1965), Journal of Geophysical Research, 70, 61–69, <https://doi.org/10.1029/JZ070i001p00061>
- Cornwall, J. M. et al., (1970), Journal of Geophysical Research, 75, 4699, <https://doi.org/10.1029/JA075i025p04699>
- Donovan, E. et al., (2006), Journal of Atmospheric and Solar: Terrestrial Physics, 68(13), 1472–1487. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.03.027>
- Erlandson, R. et al., (2001), Journal of Geophysical Research: Space Physics, 106(A3), 3883–3895. <https://doi.org/10.1029/2000JA000083>
- Kasahara Y et al., (2018). Earth Planets Space. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0842-4>.
- Kennel, C. F. et al., (1966). Journal of Geophysical Research, 71, 1–28. <https://doi.org/10.1029/JZ071i001p00001>.
- Kumamoto, A. et al, (2018). Earth Planets Space.

- <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0854-0>.
- Matsuda, S. et al., (2018), Earth Planets Space.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0838-0>.
  - Matsuoka, A. et al., (2017), Earth Planets Space.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0800-1>.
  - Mende, S. B. et al., (2008), Space Sci. Rev., 141,  
357–387, <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9380-x>.
  - Meredith, N. P. et al., (2003), J. Geophys. Res.,  
108(A6), 1250,  
<https://doi.org/10.1029/2002JA009700>.
  - Millan, R. M. et al., (2002), Geophys. Res. Lett.,  
29(24), 2194,  
<https://doi.org/10.1029/2002GL015922>.
  - Miyoshi, Y. et al., (2008), Geophys. Res. Lett., 35,  
L23101, <https://doi.org/10.1029/2008GL035727>.
  - Nomura, R. et al., (2016), Journal of Geophysical  
Research: Space Physics, 121, 1608–1618.  
<https://doi.org/10.1002/2015JA021681>
  - Omura, Y. et al., (2013), Journal of Geophysical  
Research: Space Physics, 118, 5008–5020.  
<https://doi.org/10.1002/jgra.50477>
  - Ozaki, M. et al., (2016), Geophysical Research  
Letters, 43, 7859–7866.  
<https://doi.org/10.1002/2016GL070008>
  - Ozaki, M. et al., (2018), Geophysical Research  
Letters, 45, <https://doi.org/10.1002/2017GL076486>
  - Ozhogin, F. et al, (2012), J. Geophys. Res., 117,  
A06225, <https://doi.org/10.1029/2011JA017330>.
  - Rodger, C. J. et al., (2012), Radio Sci., 47, RS2021,  
<https://doi.org/10.1029/2011RS00497>
  - Shiokawa, K. et al., (1999), Earth Planets Space  
51:887–896, <https://doi.org/10.1186/BF03353247>.
  - Shiokawa, K. et al., (2017), Earth, Planets and Space,  
<https://doi.org/10.1186/s40623-017-0745-9>.
  - Summers, D. et al., (2003), J. Geophys. Res.,  
108(A4), 1143,  
<https://doi.org/10.1029/2002JA009489>.
  - Tsyganenko, N. A. (2002), J. Geophys. Res.,  
107(A8), 1176,  
<https://doi.org/10.1029/2001JA000220>.