

地球磁気圏におけるホイッスラーモード・ コーラス放射と波動粒子相互作用

Whistler-mode chorus emissions and wave-particle interactions in the Earth's magnetosphere

加藤 雄人
Yuto Katoh

東北大院理
Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.

1. はじめに

固有の磁場を持つ惑星である地球の周辺には磁気圏が形成され、地球の大気が太陽から吹き付ける太陽風に直接さらされることのない環境を形作っている。磁気圏の周辺を含む、固有磁場や大気が存在が大きく影響を及ぼしている地球近傍の宇宙空間は「ジオスペース」と呼ばれる。有人宇宙探査の計画が進むなど人類の活動範囲が宇宙空間へと拡大しつつある中で、ジオスペースの環境とその変動の物理を理解することは喫緊の課題とされている。ジオスペースと太陽活動とのつながりを理解することを主題とした「宇宙天気」研究は、科学衛星によるジオスペースの直接探査や地上観測網の充実、理論・シミュレーション研究の進展により2000年代以降大きな進展を見せている。特に、ジオスペース最大の変動現象である磁気嵐における放射線帯の消失・再形成過程に関しては、プラズマ波動と高エネルギー粒子との相互作用が重要な役割を担っていることが明らかとなっている。

放射線帯とは、百万電子ボルト (MeV) を超える相対論的なエネルギーを持つ粒子が地球を取り巻くようにして存在する領域である (図1)。特に電子放射線帯外帯については、磁気嵐の発生とともに消失したのち再形成する様相が明らかとなっている。この放射線帯の再形成過程では、磁気圏の赤道領域で発生するプラズマ波動、ホイッスラーモード・コーラス放射とのサイクロトロン共鳴による加速機構が主要な役割を果たすと考えられている。

2. ホイッスラーモード・コーラス放射

磁気嵐時の放射線帯領域には数千～数万電子ボルトの電子が継続的に注入される状況となっており、これらの高エネルギー電子が速度

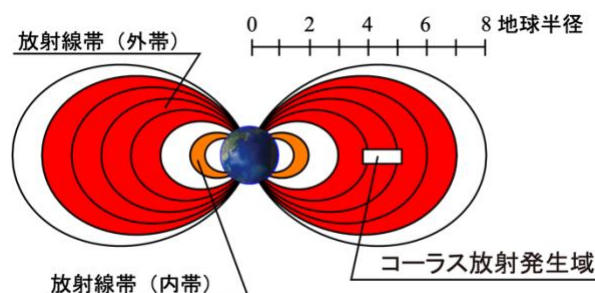


図1. 電子放射線帯とコーラス放射発生領域の模式図

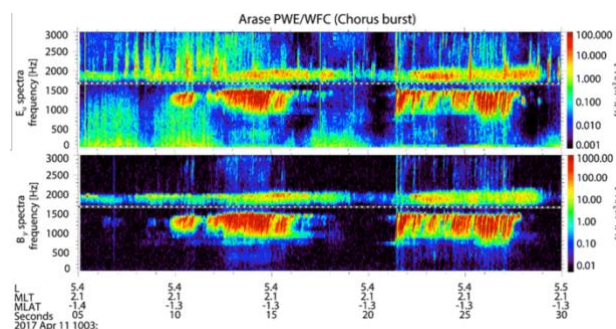


図2. あらせ衛星により観測されたコーラス放射の例 [1]

分布に持つ温度異方性に起因する不安定性によって、ホイッスラーモードの波動が発生する。波動の振幅が一定の値を超えると非線形効果が顕著になり、コヒーレントな波動エレメント「コーラス放射」が生成される。コーラス放射は周波数が時間的に変化する特徴的なスペクトルを示すことで知られ、主に周波数が上昇するライジングトーン ([1], 図2) からなるが、周波数が減少するフォーリングトーンとなる例も報告されている。磁力線沿いに伝搬して地上でもVLF帯の波動として計測されるコーラス放射は、周波数帯がkHz帯と可聴域にあることから夜明け頃に無線機に受信される「Dawn Chorus」としても知られ、半世紀以上におよぶ

研究の歴史がある[2]。コーラス放射の発生機構は未解明の問題として残されていたが、計算機実験による発生過程の再現([3,4]; 図3)と、その結果に基づく非線形波動成長理論の提案[5,6]により、ホイッスラーモード波動の励起からコーラス放射の発生に至るまでの一連の物理素過程の解明が進みつつある。計算機実験ではさらに、コーラス放射によって捕捉された電子がMeVを超えるエネルギーにまで加速される様相も再現されている[7]。

放射線帯の形成過程を明らかにすることを目的として、2016年12月20日にジオスペース探査衛星「あらせ」が打ち上げられた[8]。あらせ衛星によるプラズマ波動と高エネルギー粒子の総合観測により、コーラス放射によりピッチ角散乱を受けた高エネルギー電子が地球大気に降り込む様相の直接観測に成功する([9], 図4)など、ジオスペースで発生する波動粒子相互作用に関する成果が数多く得られつつある。

3. まとめ

コーラス放射は地球磁気圏だけでなく、木星や土星の磁気圏においても広く観測されており、惑星磁気圏に普遍的な存在であると考えられている[10,11]。また、本シンポジウムの一連の講演でも議論されるように、ホイッスラーモード波動との相互作用は実験室プラズマにおいても粒子加熱・プラズマ生成過程で重要な役割を果たしている。地球磁気圏での直接探査結果に基づいて得られる知見は、多様なプラズマ環境でみられる波動粒子相互作用の理解の深化にも貢献すると期待される。

参考文献

- [1] Y. Kasahara *et al.*, The Plasma Wave Experiment (PWE) on board the Arase (ERG) satellite, *Earth Planets Space*, **70**, 86 (2018)
- [2] L. R. O. Storey, An investigation of whistling atmospherics, *Phil. Trans. Roy. Soc. London, A*, **246**, 113-141 (1953)
- [3] Y. Katoh and Y. Omura, Computer simulation of chorus wave generation in the Earth's inner magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L03102 (2007)
- [4] Y. Katoh and Y. Omura, Electron hybrid code simulation of whistler-mode chorus generation with real parameters in the Earth's inner magnetosphere, *Earth Planets Space*, **68**, 192 (2016)
- [5] Y. Omura *et al.*, Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus, *J. Geophys. Res.*, **113**, A04223 (2008)
- [6] Y. Omura *et al.*, Nonlinear mechanisms of lower band and upper band VLF chorus emissions in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **114**, A07217 (2009)
- [7] Y. Katoh *et al.*, Rapid energization of radiation belt electrons by nonlinear wave trapping, *Ann. Geophys.*, **26**, 3451-3456 (2008)
- [8] Y. Miyoshi *et al.*, Geospace exploration project ERG, *Earth Planets Space*, **70**, 101 (2018)
- [9] S. Kasahara *et al.*, Pulsating aurora from electron scattering by chorus waves, *Nature*, **554**, 337-340 (2018)
- [10] Y. Katoh *et al.*, Whistler mode chorus enhancements in association with energetic electron signatures in the Jovian magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **116**, A02215 (2011)
- [11] J. D. Menietti *et al.*, Frequency drift of Saturn chorus emission compare to nonlinear theory, *J. Geophys. Res.*, **118**, 982-990 (2013)

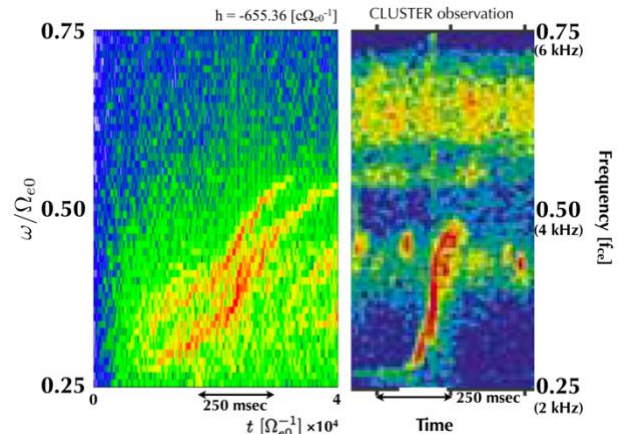


図3. 計算機実験により再現されたコーラス放射と衛星観測結果との比較 [4]

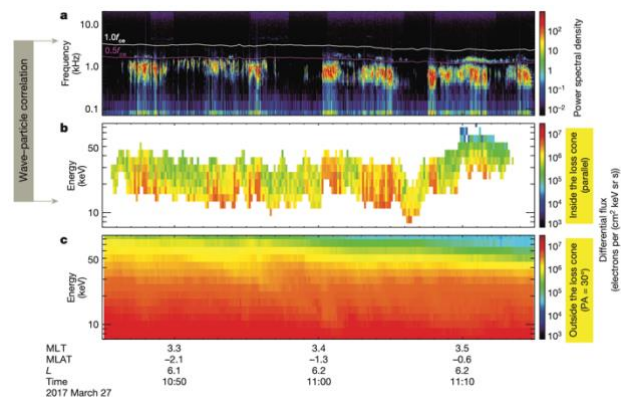


図4. コーラス放射と7-80 keV電子の観測結果。上段：コーラス放射の磁場スペクトル。カラースケールの単位は[pT²/Hz]。中段：ロスコーン内にあり地球方向に降り込む電子の量。下段：ロスコーンよりも大きなピッチ角を持つ電子の量 [9]