

大学の研究・動向

シミュレーションで探るジオスペース： 宇宙環境利用に向けて

工学研究科 電気工学専攻 電波工学協力講座
生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野

教授 大村 善治
准教授 海老原 祐輔

1. はじめに

通信・放送・気象・測位・安全等の分野において、人工衛星は現代社会を支える重要な社会基盤としての地位を確立しました。また、クリーンで持続可能なエネルギーを生成する宇宙太陽発電衛星が検討されており、地球周囲の宇宙空間は人類の生存圏として益々利用されてゆくことでしょう。当研究室は、人類の生存圏としての宇宙空間を安心・安全に利用するための基盤技術として、宇宙環境変動のしくみを適切に記述し、予測を可能とするシミュレーションの実現に向けて研究を進めています。特に、非線形性が著しく、予測することが難しい宇宙プラズマの振る舞いに着目しています。

地球周囲の宇宙空間では、様々なエネルギーを持つ電子やイオンが地球の双極子磁場によって捕捉されています。比較的低温のプラズマで満たされているプラズマ圏、中エネルギー粒子によってプラズマ圧力の高まっているリングカレント域、光速に近い速さを持つ高エネルギー粒子の集合である放射線帯があり、それぞれ地球を取り囲むように分布しています(図1)。これらの粒子は人工衛星にとって危険な存在です。中エネルギー帯の粒子は人工衛星の表面を帯電させますし、高エネルギー帯の粒子は人工衛星の表面を貫通して内部帯電やシングルイベントアップセットと呼ばれる電子回路の誤動作をもたらします。事実、これらの

粒子群が原因と考えられる人工衛星の誤作動や障害が多く報告されています[1]。私たちは、宇宙環境利用におけるリスク分析への応用を見据え、宇宙空間のダイナミックな姿を解き明かす研究を進めています。

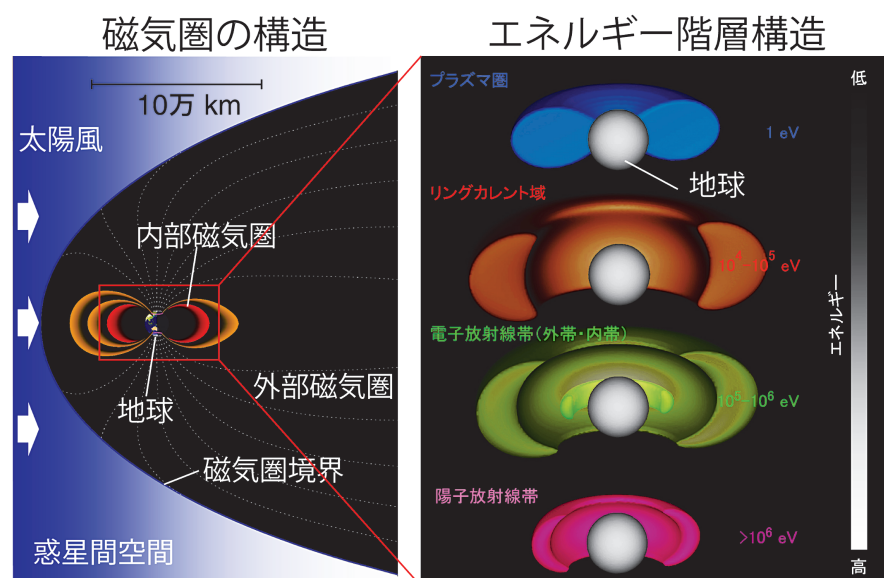


図1 磁気圏構造と内部磁気圏に捕捉された荷電粒子分布の模式図。

2. 非線形成長によるコーラス放射と放射線帯の形成

コーラスと呼ばれる電磁波があります。地球の磁場が乱れている状態の時に、1秒以下の短時間に周波数が上昇するパターンが頻繁に繰り返されるもので、オーディオアンプを通して音に変換すると、まさに朝の鳥のさえずりのように聞こえます [2]。コーラスの発生機構は長年の謎でした。地球磁気圏に磁気嵐等で注入される高エネルギー電子ビームによって励起されるホイッスラーモードと呼ばれる電磁波が磁力線に沿って伝搬する過程で周波数変化してゆくものであると一般的には考えられていました。ホイッスラーモード波というのは、磁力線に沿って伝搬する電磁波です (図 2b)。その電界と磁界のベクトルが磁力線方向に対してお互いに直交しており (図 2c)、その電磁界のベクトルが波の周波数で磁力線の周りを回転しながら伝わってゆきます。このホイッスラーモード波と磁力線に巻きつくように運動する高エネルギー電子とは共鳴してエネルギーのやり取りをすることが可能です。電子が磁力線の周りを旋回する運動のことをサイクロトロン運動と呼び、1秒間に磁力線を旋回する回数をサイクロトロン周波数と呼びます。ホイッスラーモード波の電磁界のベクトルはサイクロトロン周波数よりも低い周波数で磁力線の周りを回転します。高エネルギー電子は磁力線の周りを旋回すると同時に、磁力線に沿って自由に動くことが可能です。電子が波の進行方向とは逆の方向に進んでいると電子から見た波の周波数はドップラー効果によって高くなります。これがサイクロトロン周波数に一致すると、電子のサイクロトロン運動と波の電磁界が同じ周波数で回転することになり、波の電界により電子が加減速されて、波の間でエネルギーのやり取りが起こります。これがサイクロトロン共鳴です。

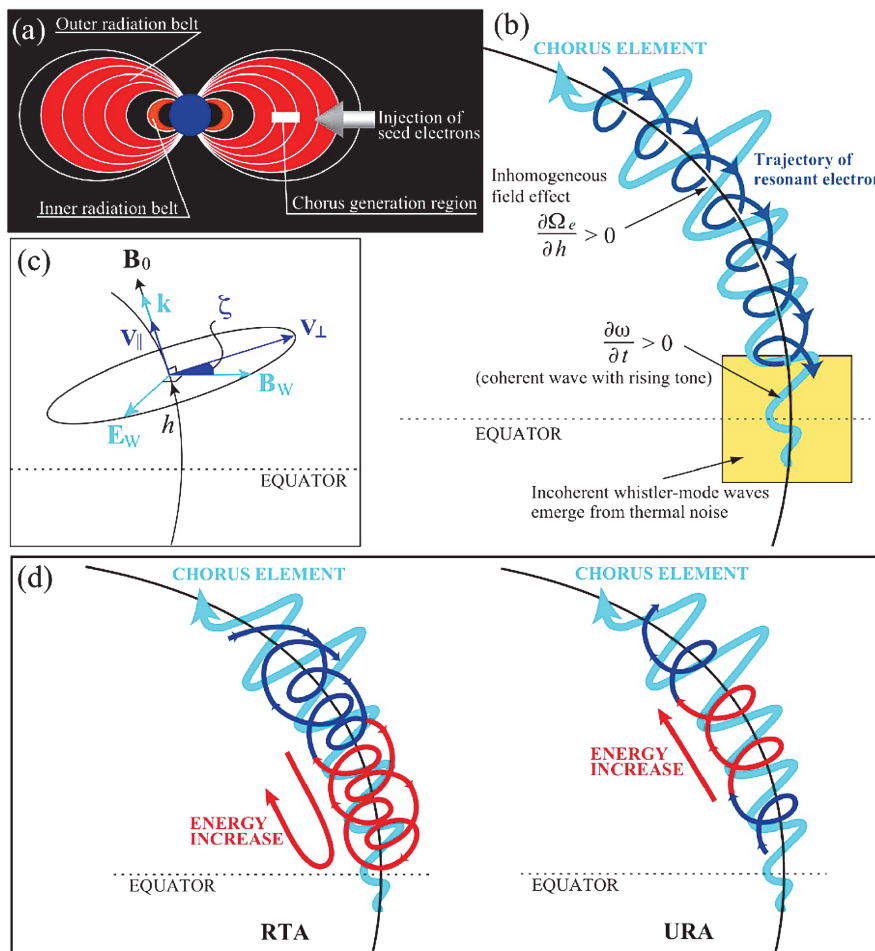


図 2 ホイッスラーモード波動粒子相互作用の原理

我々は非常に大規模な計算機シミュレーションを行い、周波数が大幅に上昇するコーラス放射 (図 3a) を再現することに成功しました [3][4]。これは、高エネルギー粒子を粒子モデルとして扱い、波の伝搬を支えるコールド電子を流体として扱う電子ハイブリッドコードによる計算機シミュレーションです。2008 年には、高エネルギー電子とコールド電子の両方共、粒子モデルとして扱う電磁粒子コードによっても再現することに成功しました (図 3b) [5]。このシミュレーションから明らかになったことは、コーラスを構成する波は、周波数の異なるランダムな位相の波の重ね合わせではなく、一つの明確な位相をもったコヒーレントな波です。通常の電磁波のように位相が一定の周波数で回転するのではなく、回転速度が徐々に変化してゆくために周波数が変化するのです。

磁気嵐およびサブストームと呼ばれる地球磁場の乱れがあるときには、地球磁気圏の尾部から内部磁気圏へと中エネルギー帯の電子が輸送されます (図 2a) [6]。この時、磁場に垂直な方向の電子の温度の方が、平行な方向の温度よりも大きくなっていると (温度異方性)、磁気赤道面付近でコーラスの種となるホイッスラーモード波が線形成長率にしたがって形成されます。最初、波は熱雑音から徐々に成長してきますので、異なる周波数の波が重ねあわされたインコヒーレントな波ですが、線形成長率が最大となる周波数において波の振幅が最も大きくなり、波は次第にコヒーレントな波へと変化してゆきます。コヒーレントな波の電磁界は共鳴粒子を共鳴速度の周りに捕捉することができるポテンシャル構造を形成することができます。このポテンシャル構造は均質な媒質中で波の周波数が一定の場合には、波の磁界ベクトルについて対称形をしており、このポテンシャルの周りを移動する電子の運動により形成される共鳴電流は波の磁界ベクトルと平行に流れます。一般に電磁波の電界ベクトルは磁界ベクトルに対して垂直方向にあるため、共鳴電流と電界ベクトルが垂直になり、電子は波とエネルギーをやり取りすることができません。これは、電子が加速減速を受けるには、電界ベクトルの方向に運動する時だけであるからです。周波数が上昇するように波の位相が加速度的に変化すると、このポテンシャル構造の対称性が破れて、かつ共鳴電子が波の電界によって減速されてエネルギーを失うように作用します。これが非線形成長の原理です。この非線形成長率が最大となるように位相が自然に選ばれて、その波が成長してゆきます。

コーラス放射は非常に幅広いレンジのエネルギーをもつ電子と共鳴することができますが、特に速度が光速に近づいて、相対論効果が顕著になってくると、RTA[8] および URA[9] と呼ばれる非常に効率の良い加速過程 (図 2d) が起こることを、我々の最近の研究で明らかにしました。コーラスの発生と同時に、一部の粒子は加速され、磁場に対する速度ベクトルの角度 (ピッチ角) が大きくなって、磁場に巻きつくような運動が主流となって磁気赤道付近に安定して捕捉されるように変化します。コーラスは繰り返し発生しますので、この加速過程が繰り返されて、次第に放射線帯の相対論的電子フラックスが形成されます。[10]

一方、コーラス放射が発生するときには、大部分の高エネルギー電子は減速されて、ピッチ角が小さくなり、磁場に沿って運動するように変化してゆきます。これらの減速される高エネルギー粒子の運動

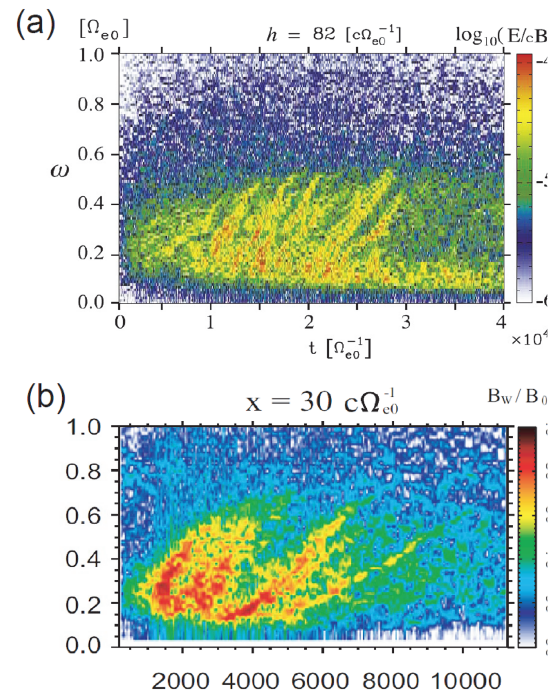


図 3 計算機シミュレーションで再現されたコーラス放射

エネルギーの一部がコーラス放射の電磁界のエネルギーに変換されるわけです。ピッチ角が小さくなり、磁力線方向に速度成分が向けられると、高緯度において磁力線からの捕捉から解放されて、極域の電離層に降下してゆきます。この電子が地球の大気を構成する窒素や酸素の分子・原子と衝突すると発光し、これが高緯度地方でオーロラとして見えるのです。

3. 磁気嵐とリングカレント

中エネルギー帯域の粒子は三つの意味において重要です。一つ目はプラズマ圧力を上げてリングカレントを強めるという点、二つ目はホイッスラーモード波などの電磁波動の自由エネルギー源という点、三つ目は人工衛星の帯電を引き起こすという工学的な点です。我々は、中エネルギー帯粒子の起源・輸送・加速・消失過程に着目した研究も進めています。

太陽フレアとともに放出された磁気雲が地球に到来すると、対流電場と呼ばれる大規模な電場が磁気圏全体に印加されます。対流電場は太陽風と地球磁場の相互作用の結果生じるもので、その電位差は数百 kV にも及びます。対流電場は朝側から夕側を向いているので、粒子は夜側磁気圏から地球方向へ断熱加速を受けながらドリフトします。やがて粒子は地球近傍に集まり、

リングカレントを強めます (図4)。地磁気が数日間にわたって減少するのは、リングカレントの西向き成分が持続的に発達していることとして理解されます。この期間を磁気嵐と呼びます。

リングカレントを担う中エネルギーの粒子の起源は太陽と長らく考えられてきましたが、1980年代、地球電離圏起源の一価の酸素イオンがリングカレント中に大量に存在することがわかりました。酸素イオンのエネルギーは電離圏高度で数 eV (電子ボルト) であるのに対し、内部磁気圏では 100 keV にも達します。5桁ものエネルギー差を生み出す原因を明らかにするために、粒子軌道を追跡するグローバルな粒子シミュレーションを開発しました。流出イオンの分布関数をデルタ関数として扱ってきたこれまでのシミュレーションとは異なり、衛星が観測した実データを境界条件とするという特長があります。位相空間写像法と組み合わせることによって衛星観測結果と直接比較することができます。シミュレーションの結果、内部磁気圏における酸素イオンのスペクトルを説明するためには、大きな対流電場と十分に引き延ばされた地球の磁力線の二つが必要であることがわかりました [11]。

リングカレントが発達すると磁気赤道面付近の磁場が減少します。磁場が減少すると磁力線に垂直方向の粒子エネルギーが断熱的に失われます。一般に低いエネルギーほど粒子数が多いので、あるエネルギーに着目すると、粒子数が減少するようになります。これをリングカレント効果と呼びます。リングカレント効果は高エネルギー粒子を変動させる原因の一つと言われてきたにもかかわらず、シミュレーションによって検証されていませんでした。我々は、粒子の移流とリングカレントに対して矛盾の無い

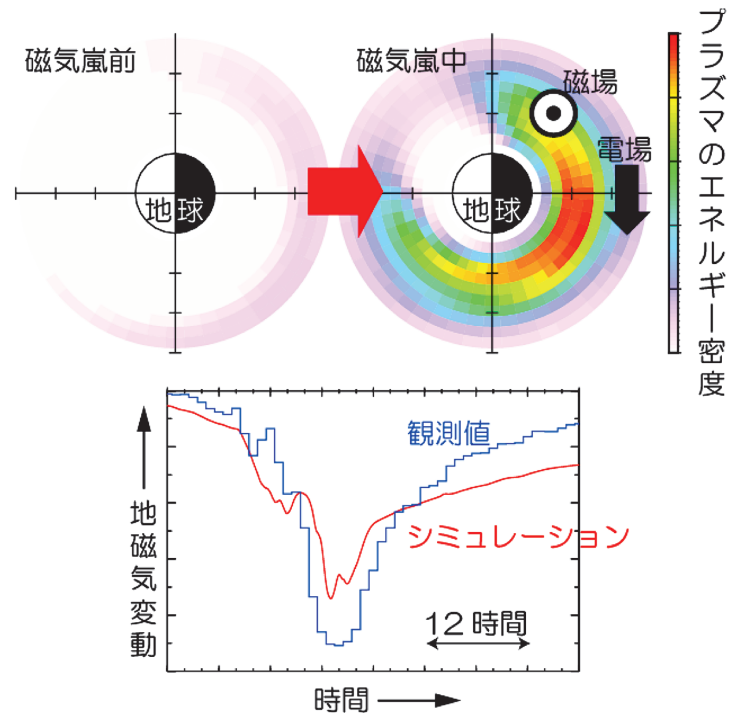


図4 地球周囲の宇宙空間に蓄積したプラズマのエネルギー密度と地磁気変動のシミュレーション結果の例。

3次元の磁場を自己無撞着に解くシミュレーションを開発しました。シミュレーションの結果、赤道面付近の磁場が減少することに伴い磁力線に垂直方向の高エネルギー粒子は減速する一方、粒子のミラー点間距離が縮むので磁力線に平行方向の粒子は加速することがわかりました [12]。二つの断熱過程が同時におこることによって、磁力線に垂直方向の粒子は減少し、平行方向の粒子は増加したのです。この計算結果は、Polar衛星による粒子観測と良く一致し、リングカレント効果を定量的に実証することに成功しました。

太陽から到来した磁気雲が地球を通過すると対流電場が弱まり、リングカレントは減衰を始めます。リングカレントは平均的には7時間程度の時定数で減衰することが観測的に知られています。しかし、イオンの消失原因として考えられてきた電荷交換反応ではこの短い時定数を説明することができませんでした。地球の磁力線が引き延ばされている夜側では、磁力線の曲率半径がイオンの旋回半径に匹敵するほど小さくなることがあります。するとイオンは散乱を受けるようになり、その一部は磁力線に沿って電離圏へ降下することが予想されます。この散乱過程を採り入れたシミュレーションを実行したところ、6時間という短い減衰時定数を初めて得ることができました [13]。

4. むすび

我々はコーラスの発生メカニズムの解明に成功し、放射線帯研究が大きく前進しました。コーラスの種となるホイッスラーモード波は、中エネルギー帯粒子の温度異方性を自由エネルギーとして成長します。中エネルギー帯粒子の起源・輸送・消失過程についても我々のシミュレーションによって理解されつつあります。今後は二つのアプローチによって放射線帯研究を推進する予定です。一つは、ミクロスケールとマクロスケールのシミュレーションを動的に組み合わせたマルチスケールな放射線帯シミュレーションを開発することです。もう一つは、人工衛星観測との定量的な比較研究です。放射線帯の探査を目的とする衛星計画がアメリカ、カナダ、日本で個別に進められており、最先端のシミュレーションで得られた結果を衛星多点観測と比較できるという機会がまもなく訪れようとしています。

参考文献

- [1] Tafazoli, M., A study on-orbit spacecraft failures, *Acta Astronautica*, 64, pp.195-205, 2009.
- [2] Storey, L. R. O., An investigation of whistling Atmospherics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 246, 908, pp. 113-141, 1953.
- [3] Katoh, Y. and Y. Omura, Computer simulation of chorus wave generation in the Earth's inner magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.* 34, L03102, doi:10.1029/2006GL028594, 2007.
- [4] Omura, Y., Y. Katoh, and D. Summers, Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus, *J. Geophys. Res.*, 113, A04223, doi:10.1029/2007JA012622, 2008.
- [5] Hikishima, M., et al., Full particle simulation of whistler-mode rising 1 chorus emissions in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 114, A01203, doi:10.1029/2008JA013625, 2009
- [6] Katoh, Y., Y. Omura, D. Summers, Rapid energization of radiation belt electrons by nonlinear wave trapping, *Ann. Geophys.*, 26, 3451-3456, 2008.
- [7] Omura, Y., et al., Nonlinear mechanisms of lower-band and upper-band VLF chorus emissions in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 114, A07217, doi:10.1029/2009JA014206, 2009.
- [8] Omura, Y., N. Furuya, D. Summers, Relativistic turning acceleration of resonant electrons by coherent whistler-mode waves in a dipole magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 112, A06236, doi:10.1029/2006JA012243, 2007.
- [9] Summers, D., and Y. Omura, Ultra-relativistic acceleration of electrons in planetary

- magnetospheres, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L24205, doi:10.1029/2007GL032226, 2007.
- [10] Furuya, N., Y. Omura, and D. Summers, Relativistic turning acceleration of radiation belt electrons by whistler mode chorus, *J. Geophys. Res.*, 113, A04224, doi:10.1029/2007JA012478, 2008.
- [11] Ebihara, Y., et al., Fate of outflowing suprathermal oxygen ions that originate in the polar ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 111, A04219, doi:10.1029/2005JA011403, 2006.
- [12] Ebihara, Y., et al., Magnetic coupling of the ring current and the radiation belt, *J. Geophys. Res.*, 113, A07221, doi:10.1029/2008JA013267, 2008.
- [13] Ebihara, Y., et al., Rapid decay of storm time ring current due to pitch angle scattering in curved field line, *J. Geophys. Res.*, 116, A03218, doi:10.1029/2010JA016000, 2011.