

# 磁気圏電離圏結合させたモデルに基づく環電流イオンによる ULF 波動の励起機構の研究

Study of excitation mechanism of ULF waves by ring current ions based on the magnetosphere-ionosphere coupled model

研究代表者：山川 智嗣（東京大学理学系研究科）  
yamakawa@eps.s.u-tokyo.ac.jp

研究分担者：関 華奈子（東京大学理学系研究科）  
k.seki@eps.s.u-tokyo.ac.jp  
担当：指導教員

## 研究目的 (Research Objective):

ジオスペース最大の変動現象である宇宙嵐時には夜側に粒子が注入され、環電流が発達し、地球の双極子磁場が大きく乱れ、地球の内部磁気圏全体で大規模な変動が見られる。このとき、環電流は地球の固有磁場を変化させるだけでなく、ULF波動と呼ばれるmHz帯の電磁波動を励起させる。ULF波動は環電流や内部磁気圏で最もエネルギーの高い領域である放射線帯電子(~MeV)の変動機構に寄与していると考えられている。したがって、ULF波動の励起機構・空間分布の理解は、地球近傍の宇宙空間の変動現象を把握する上で非常に重要である。しかし、環電流起源のULF波動の励起機構・空間分布には不明な点も多く、定量的な理解は得られていない。本研究では、シミュレーションを用いて環電流によるULF波動の励起機構・空間分布を解明することを目的にしている。

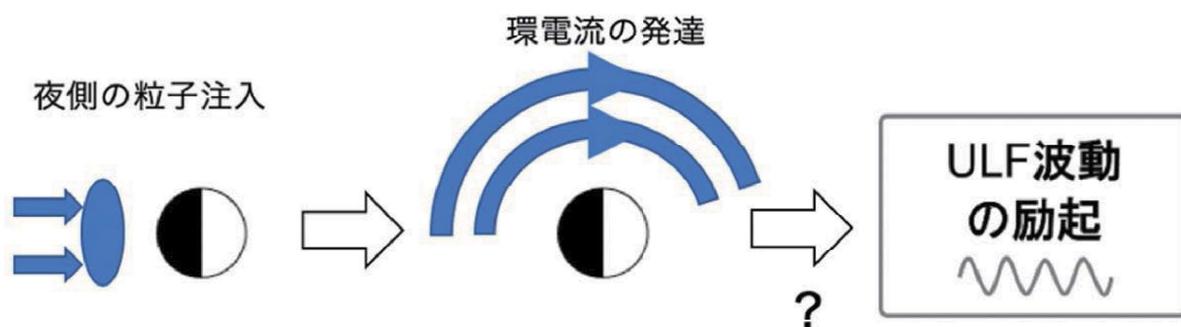


Figure 1 宇宙嵐時の ULF 波動の励起機構

## 計算手法 (Computational Aspects) :

環電流によるULF波動の励起機構を理解するために、本研究では内部磁気圏における電磁場と粒子の変動を自己無撞着に解くことが可能な環電流モデル (GEMSIS-RC)[Amano et al., 2011]を改良して用いた。GEMSIS-RCは5次元の位相空間密度(PSD)についてのドリフト運動方程式と電磁場に対するMaxwell方程式を自己無撞着に解

いている。本研究では、さらにULF波動の記述性能を高めるため、GEMSIS-RCモデルの電離圏側境界について、全球で電場ポテンシャルを解くことが可能なポテンシャルソルバー(GEMSIS-POT)[Nakamizo et al., 2012]と結合して用いた。GEMSIS-POTモデルでは、Field aligned current(FAC)がinputとして与えられ、Poisson方程式を解くことで電離圏での電場ポテンシャルがoutputとして得られる。Region 2 FACについては実際にGEMSIS-RCモデルで生成されるので、それをGEMSIS-POTのinputとして与えた。一方で、Region 1 FACについては経験モデルに基づいて、磁気緯度70度付近にlocalizedした分布を仮定し(Figure 2a)、これは時間とともに変化しないと設定した。初期条件の段階では、Region 2 FACはないので、電離圏/磁気圏での電場についてはdawn-to-duskのR1FAC起源の電場と共回転電場が入っている状態である。GEMSIS-RCの方の初期条件では、ダイポール磁場を仮定し、電場については磁力線上で等ポテンシャルになるように設定した。粒子については、磁気圏尾部からの粒子注入を見たいので、夜側の外側境界にのみイオンをおいた。このイオンは密度2/cc、温度10 keVのKappa分布( $\kappa = 8$ )と仮定した。Figure 2bでは初期の赤道面での圧力と電場ドリフト速度(白矢印)を示している。

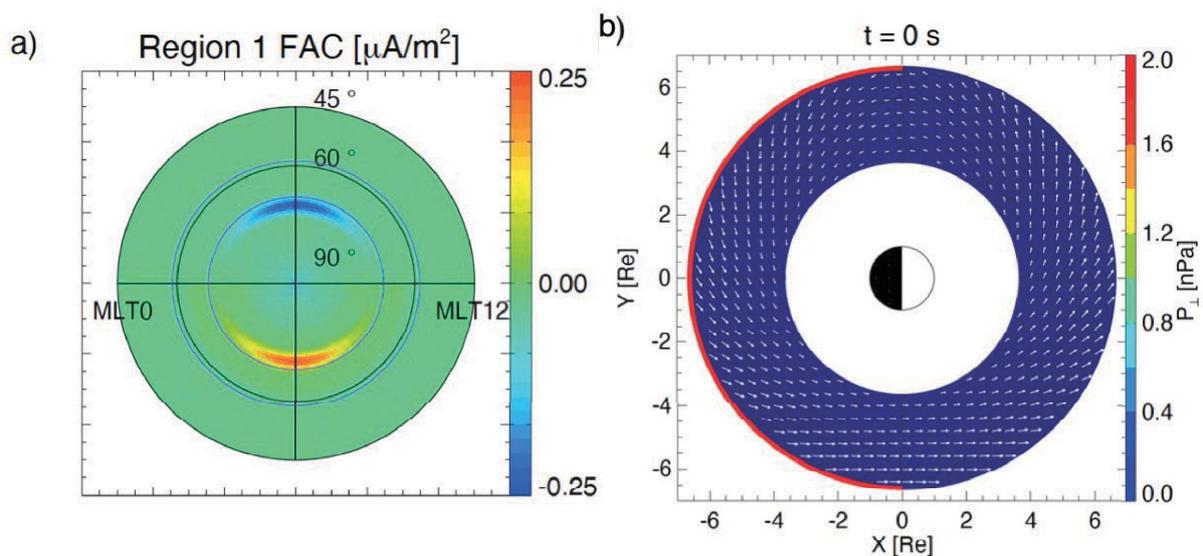


Figure 2 シミュレーションの初期設定

[(a)電離圏北半球での Region 1 FAC、電離圏に入る向きが正、(b)赤道面での  $P_{\perp}$  と電場ドリフト速度(白矢印)]

### 研究成果 (Accomplishments) :

上記の初期条件でシミュレーションを行うと2種類のULF波動が環電流によって励起された。ここではそれぞれのULF波動の励起についてシミュレーション結果を紹介する。

$L = 6.4$ ,  $MLT12$ ,  $MLAT = 1$  度での電磁場変動とパワースペクトルの時間発展を Figure 3 に示す。Figure 3 から、この地点では2 mHzのPc5帯(1.67-6.67 mHz)のULF波動が励起されていることがわかる。このPc5波動は  $t = 1200$  s から 3600 s まで見られる。また磁力線方向

の電磁場変動を解析すると、この Pc5 波動は南北対称の磁力線振動であり、環電流イオンとのドリフト共鳴によって励起されていることがわかった。Figure 3 からポロイダルモード( $dB_r$  と  $dE_\phi$ )が主な成分であることがわかるが、これはドリフト共鳴の理論[Southwood, 1976]とは整合的である。このドリフト共鳴によってたてられる Pc5 波動は dayside の  $L = 6$  以上の領域で見られた。

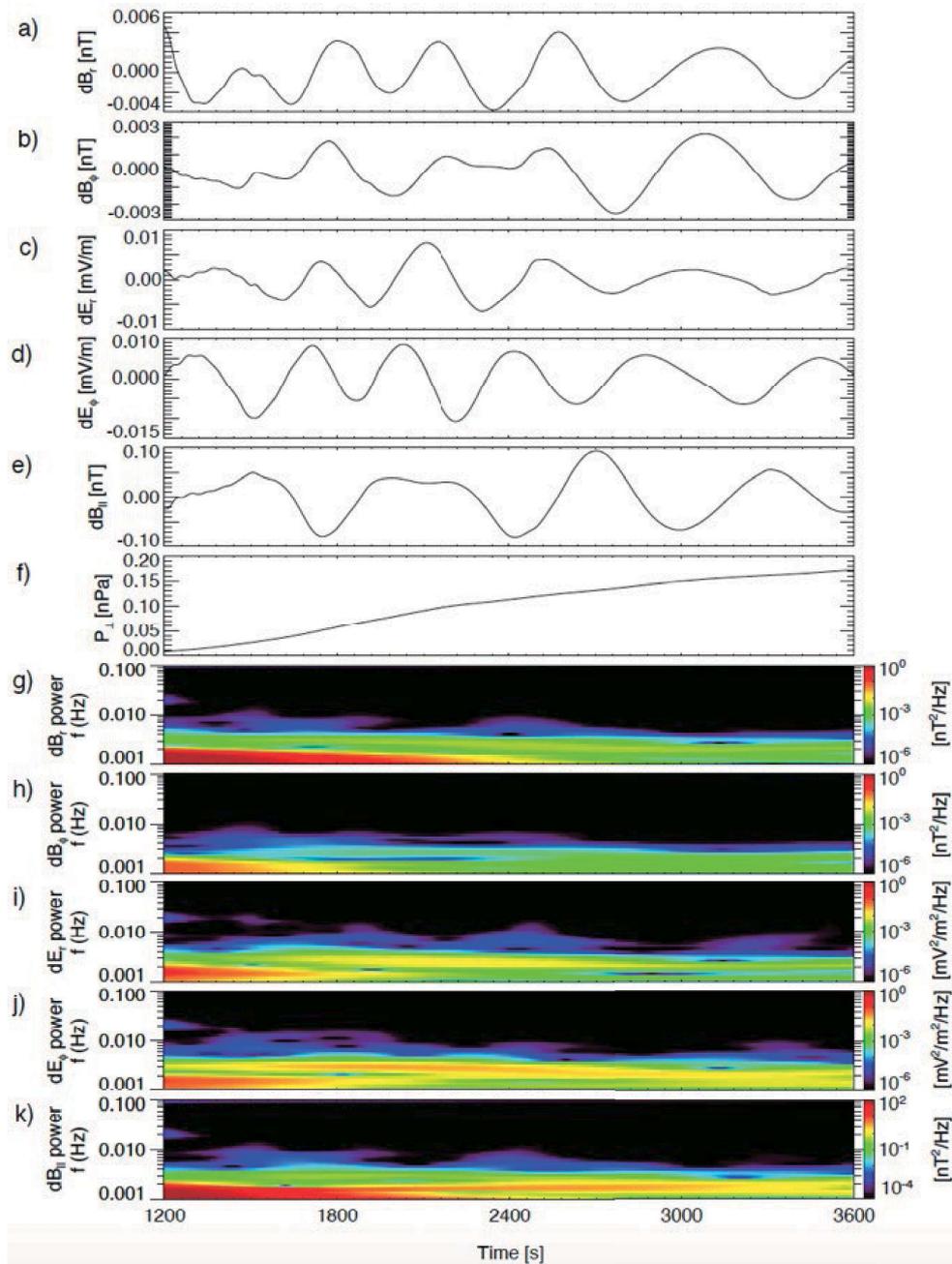


Figure 3 L = 6.4, MLT12, MLAT = 1 度での電磁場変動とパワースペクトルの時間発展 [(a)  $dB_r$ , (b)  $dB_\phi$ , (c)  $dE_r$ , (d)  $dE_\phi$ , (e)  $dB_{||}$ , (f)  $dP_\perp$ , (g)  $P_\perp$ の時間発展。(h)  $dB_r$ , (i)  $dB_\phi$ , (j)  $dE_r$ , (k)  $dE_\phi$ , (l)  $dB_{||}$ のパワースペクトルの時間発展。]

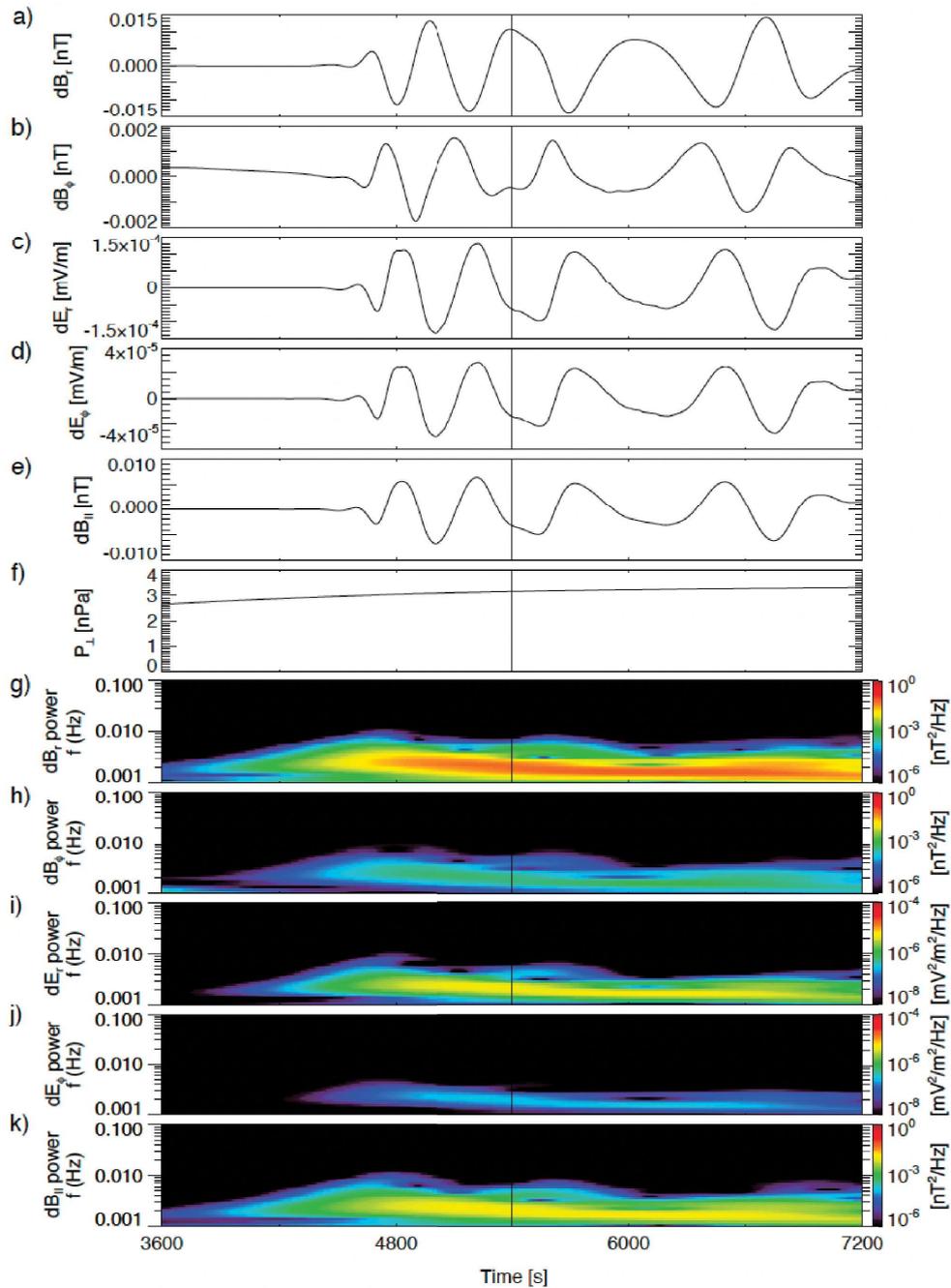


Figure 4 L = 6.1, MLT18, MLAT = 1 度での電磁場変動とパワースペクトルの時間発展  
フォーマットは Figure 3 と同じ

L = 6.1, MLT18, MLAT = 1 度での電磁場変動とパワースペクトルの時間発展を Figure 3 に示す。Figure 4 から、この地点でも 2 mHz の Pc5 帯波動が励起されていることがわかる。この Pc5 波動は  $t = 3600$  s から 7200 s まで見られる。先ほどの Pc5 波動と違うところは、この Pc5 波動は南北非対称の磁力線振動であり、環電流イオンとのドリフトバウンス共鳴によって励起されているという点である。このドリフトバウンス共鳴によってたてられる Pc5 波動は duskside の L=5.5-6.6 の領域で見られた。

これら 2 種類の ULF 波動を理解するために ULF 波動の成長率に関する考察を行った。Southwood et al. (1969)によると、位相空間密度(PSD)のエネルギー方向の正の勾配もしくは PSD の L 方向の負の勾配が波の成長に適している、イオンから ULF 波動の方にエネルギーがうつる。PSD のエネルギー勾配と空間勾配の結果を Figure 5 に示す。

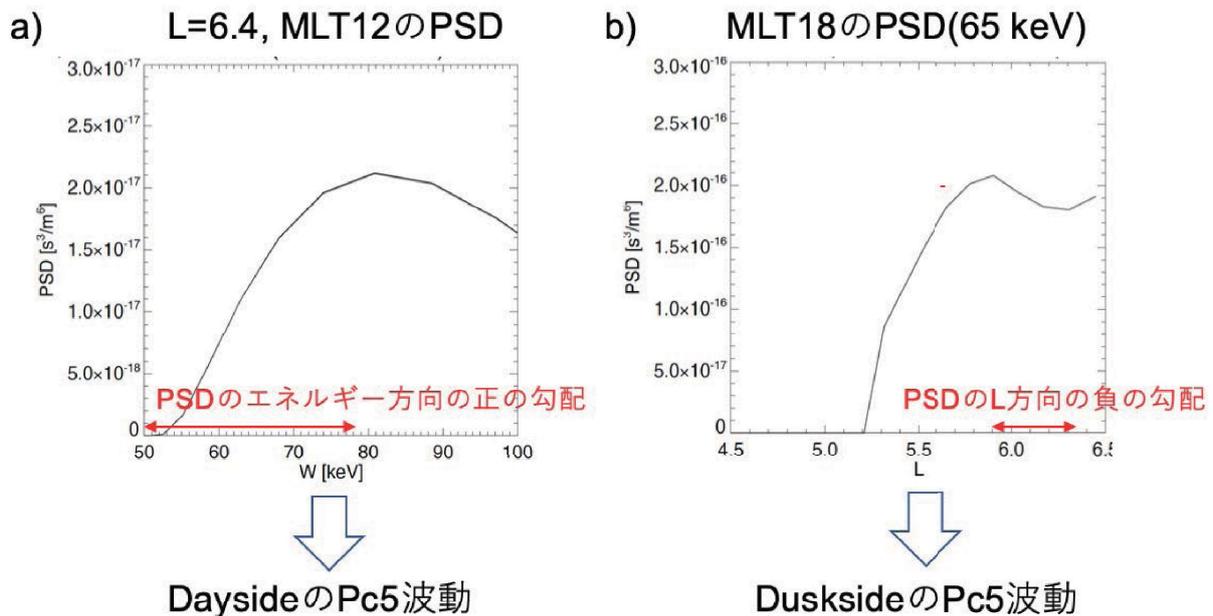


Figure 5 PSD のエネルギー方向の勾配と L 方向の勾配

[(a)L = 6.4, MLT12, MLAT = 1 度の PSD、(b)MLT18, MLAT = 1 度, 65keV の PSD]

Figure 5 から Dayside の Pc5 波動は、PSD のエネルギー方向の正の勾配、Duskside の Pc5 波動は L 方向の負の勾配によって ULF 波動が成長していることがわかった。また Southwood et al. (1969)で計算された成長率が正のところでは ULF 波動が励起されていることがわかった。Dayside で PSD のエネルギー方向の正の勾配が見られたのは、内部磁気圏におけるイオンの磁場ドリフト速度がエネルギーに比例するからであり、dayside ではエネルギーの高いイオンから先に見えていることが原因であると考えられる。また、duskside については、最初に夜側に注入されたイオンが一周して、再び duskside に来た際に  $L = 5.9$  あたりをドリフトしてくるので、Figure 5 にあるように  $L > 5.9$  では PSD の L 方向の負の勾配ができる。

これらの結果により、磁気圏電離圏結合させたモデルにおいて、2 種類の ULF 波動が環電流イオンによって励起されることが再現された。磁気圏電離圏結合させないケース [Yamakawa et al., 2019, 2020]と比較すると、特に duskside の Pc5 波動は振幅が 1-2 桁程度上昇した。今後衛星観測のデータとの比較をしていく中で、現時点では冷たい粒子の運動がモデルには含まれていないので、将来組み込む必要があると考える。また、磁気圏の MHD モデルと結合させることで、実際の磁気嵐についての内部磁気圏の環境・ULF 波動の励起について調べることも今後計画している。

## 公表状況 (Publications) :

### (ポスター)

1. T. Yamakawa, K. Seki, T. Amano, Y. Miyoshi, N. Takahashi and A. Nakamizo, Study of internally driven ULF waves by ring current ions based on Magnetosphere-ionosphere coupled model, JpGU, Online, June 2021

### (口頭)

2. T. Yamakawa, K. Seki, T. Amano, Y. Miyoshi, N. Takahashi and A. Nakamizo, Excitation mechanism of internally driven ULF waves by the drift-bounce resonance with ring current ions based on Magnetosphere-ionosphere coupled model, IAGA, Online, August 2021
3. T. Yamakawa, K. Seki, T. Amano, Y. Miyoshi, N. Takahashi and A. Nakamizo, Two types of storm-time Pc5 ULF waves excited in the Magnetosphere-Ionosphere coupled model, SGEPS Fall Meeting, Online, November 2021
4. T. Yamakawa, K. Seki, T. Amano, Y. Miyoshi, N. Takahashi and A. Nakamizo, Excitation of two types of storm-time Pc5 ULF waves by ring current ions based on the magnetosphere-ionosphere coupled model, AGU Fall Meeting, Online, December 2021

## 参考文献 (References) :

- Amano, T., K. Seki, Y. Miyoshi, T. Umeda, Y. Matsumoto, Y. Ebihara, & S. Saito (2011), Self-consistent kinetic numerical simulation model for ring current particles in the Earth's inner magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 116, A02216. doi:10.1029/2010JA015682.
- Nakamizo, A., Hiraki, Y., Ebihara, Y., Kikuchi, T., Seki, K., Hori, T., et al. (2012). Effect of R2-FAC development on the ionospheric electric field pattern deduced by a global ionospheric potential solver. *Journal of Geophysical Research*, 117(A9), A09231. <https://doi.org/10.1029/2012JA017669>
- Southwood, D. J., Dungey, J. W., Etherington, R. J. (1969). Bounce resonant interaction between pulsations and trapped particles, *Planet. Space Sci.*, 17, 349-361. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(69\)90068-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(69)90068-3)
- Southwood, D. J. (1976), A general approach to low-frequency instability in the ring current plasma, *J. Geophys. Res.*, 81(19), 3340–3348, doi: 10.1029/JA081i019p03340.
- Yamakawa, T., Seki, K., Amano, T., Takahashi, N., and Miyoshi, Y. (2019). Excitation of storm time Pc5 ULF waves by ring current ions based on the drift-kinetic simulation. *Geophysical Research Letters*, 46, 1911–1918. <https://doi.org/10.1029/2018GL081573>
- Yamakawa, T., Seki, K., Amano, T., Takahashi, N., and Miyoshi, Y. (2020). Excitation of internally driven ULF waves by the drift-bounce resonance with ring current ions

based on the drift-kinetic simulation. *Journal of Geophysical Research: Space physics*,  
125, e2020JA028231. <https://doi.org/10.1029/2020JA028231>