

# 衛星データと数値シミュレーションに基づく超低周波波動と リングカレントイオンの波動粒子相互作用の解明

山本和弘

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

## 1. はじめに

地球上で生活・活動する人類にとって、様々な気象現象を理解・予測することは、人類の営みをより快適かつ豊かにするものであった。同様に、人類の宇宙進出・宇宙利用の促進にあたって、地球周辺の宇宙空間（ジオスペース）における様々な自然現象を解明しておくことが大切になっていくであろう。また、ジオスペースは衛星による観測が比較的容易であり、観測データから地球周辺のプラズマ物理の素課程を解明することで得られた知見を他の惑星で起こる現象の理解に応用し、普遍的な宇宙惑星科学の真理を探究することも重要なミッションである。

ジオスペースの自然現象において主な役割を果たしているのは、電磁場と電離した粒子の集合体（プラズマ）である。ジオスペースにおけるプラズマ粒子の持つ運動エネルギーは多様性に富んでおり、プラズマがどのように加速されるのかを解明することが一大研究テーマとなっている。一番高いエネルギー帯では、MeV（メガエレクトロンボルト）以上の相対論的なエネルギーを持つプラズマが科学衛星により観測されている。相対論的な電子・陽子が地球の磁場に捕捉された領域は放射線帯（Van Allen 帯）と呼ばれ、こうした高エネルギー粒子は人工衛星のケーブルやコンピュータチップに損傷を与え、宇宙飛行士の放射線被ばくの原因となる。また、ジオスペースには地球をリング状に取り囲むような電流（リングカレント）が存在しており、磁場強度を変動させる要因となっている。リングカレントを駆動しているのは主に 1-100 keV（キロエレクトロンボルト）のエネルギーを持つイオンである。太陽風磁場が長時間継続して強い南向きの磁場を示すとき、地球の磁場との相互作用が強まって、夜側にあるプラズマシートからプラズマを運んでくる対流電場が大きくなる。keV 帯のイオンの注入量が増大し、リングカレントが発達した結果、磁気嵐と呼ばれるジオスペースの擾乱現象が引き起こされる。

これらのエネルギー粒子の加速について、全球的／局所的な DC 電場による加速のほか、プラズマ波動や MHD 波動との波動粒子相互作用によって加速が引き起こされることが指摘されている。特に、MHD で記述されるような波動は、mHz 帯の振動数を持つ ULF 波動として観測されることが知られている。波動の周期とプラズマ粒子のドリフトやバウンスの運動周期が一致すると、ドリフト・バウンス共鳴が起これ、波動の電場による粒子のドリフトベータatron加速が生じる。この共鳴によって、ULF 波動が励起する、あるいはリングカレントイオンの加速に伴う動径輸送が生じると考えられている。しかし、イオンのドリフト運動を伴う輸送過程であるため、その全貌を明らかにするためには全球的なイオン分布の情報が必要である。したがって、衛星による 1 点観測では解明が難しいという問題点があった。

本研究では、ジオスペースにおけるリングカレントのドリフト運動論的グローバル数値シミュレーションを行い、リングカレントイオンによる ULF 波動の励起機構の解明を試みた。得られた成果として、シミュレーションの設定によって、圧縮波が夜側から夕側にかけて局所的に励起す

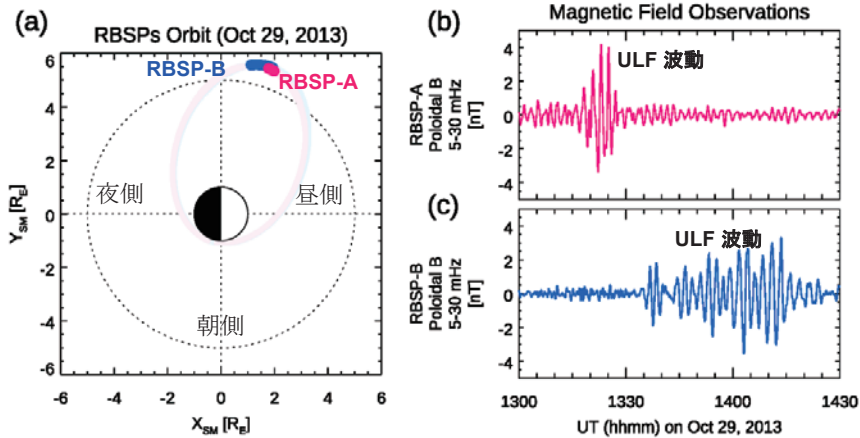


図1 (a) RBSPs 衛星で ULF 波動が観測されたときの衛星の位置、濃いマゼンタと青の線は、RBSP-A 衛星と RBSP-B 衛星が ULF 波動を観測した位置をそれぞれ示している。(b) RBSP-A 衛星が観測した poloidal 磁場。(c) RBSP-B 衛星が観測した poloidal 磁場。ただし、5-30 mHz のバンドパスフィルタを施している。

るほか、グローバルな shear Alfvén mode も励起するなど、特に沿磁力線電流の違いで励起する波動の性質が大きく異なることが分かった。以下には得られた成果の詳細な説明を記す。

## 2. 研究目的とシミュレーション手法の概要

地球の内部磁気圏においては、リングカレントイオンの空間勾配や速度勾配が引き起こすプラズマ不安定性をエネルギー源とした ULF 波動として観測されている。したがって、不安定なイオン分布を生み出す非定常・非一様な磁気圏・電離圏の境界条件をモデル化することが、現実で観測された ULF 波動の励起機構の解明に役立つと期待される。

そこで、2機の衛星で構成されている RBSPs 衛星で観測された ULF 波動に着目し(図1)、LANL 衛星・Iridium 衛星の観測データに基づいて、磁気圏・電離圏におけるシミュレーション境界条件の設定を行った。リングカレントのモデルとしては、Maxwell 方程式と5次元のイオン分布関数 ( $f[x, y, z, v_{\perp}, v_{\parallel}]$ ) の Vlasov 方程式を連立させて解くドリフト運動論のグローバルモデル (Amano et al., 2011) を使用した。シミュレーション境界の一つである電離圏境界での電位配位は、与えられた電離圏電気伝導度と沿磁力線電流に対する Poisson 方程式を解くことで与えられ、磁気圏-電離圏を結合させたモデル (Nakamizo et al., 2012; Yamakawa et al., 2022) となっている。このモデルでは粒子と沿磁力線電流の入力パターンを変更することができる。これらのパラメータについて、複数の異なるシミュレーション設定で計算を行うことで、どの領域のどの時空間変動が波動の励起に重要か比較検討することを目的とした。

本課題で行ったシミュレーションの設定は以下の表1の通りである。ここでは、主に沿磁力線電流の入力について検証を行った。沿磁力線電流の入力は、Iridium 衛星から得られる電流密度の空間分布をガウス関数でフィッティングして得られるフィッティング係数の時系列データ (10 分値) を使用する。この時系列データについて、①そのまま使用する、②さらに時系列をカウス

表 1 : シミュレーションの設定

	電流密度	電流シートの中心 MLT	電流シートの中心 MLAT	電流シートの MLT 広がり	電流シートの MLAT 広がり	背景プラズマ密度
Run 1	10 分値	10 分値	10 分値	10 分値	10 分値	Sheeley+(2001)
Run 2	10 分値	10 分値	10 分値	10 分値	10 分値	Carpenter+(1992) ×1.5
Run 3	10 分値	10 分値	10 分値	平均値	平均値	Sheeley+(2001)
Run 4	Gaussian fit 10 秒値	tanh fit 10 秒値	tanh fit 10 秒値	平均値	平均値	Sheeley+(2001)
Run 5	Gaussian fit 10 秒値	6/18 MLT	平均値	平均値	平均値	Sheeley+(2001)
Run 6	1 uA/m <sup>2</sup>	6/18 MLT	平均値	平均値	平均値	Sheeley+(2001)

関数・tanh 関数でフィッティングして得られる 10 秒値を使用する、③平均値を使用する、のいずれかの処理を行った。

### 3. Run1 の結果

はじめに、元のフィッティング係数である 10 分値をそのまま直線で内挿した時系列を使用した沿磁力線電流を入力としたケース (Run 1) の結果を示す。図 2 は  $L = 6 R_E$ 、20 MLT ( $L$  は dipole  $L$  で、地球中心から dipole 磁力線の最遠点までの距離に相当する。MLT は Magnetic Local Time, 磁気地方時) での電磁場について、Morlet Wavelet 解析で得られたパワースペクトルを示している。また、磁気赤道付近で得られたデータである。シミュレーション結果として、ほぼ全期間を通して 10 分間隔のバースト状の擾乱が発生していることが分かった。また 13 時 25 分 UT から 13 時 40 分 UT にかけて (シミュレーション時間にして 7,200 秒後)、背景磁場平行 (parallel) 方向に卓越した  $\sim 7$  mHz で一定の振動数を持つ狭帯域磁場変動が見られた。スペクトル形状が特異的であることから、この変動はリングカレントイオンによって励起された ULF 波動の可能性がある。この変動が発生していた時間帯は、衛星で ULF 波動が観測された時間帯とほぼ一致している (図 1)。一方で、衛星観測では動径 (poloidal) 方向の磁場変動が観測されているものの、平行方向の振動はほとんど観測されておらず、磁場変動が卓越する極性が異なる結果が得られた。

この変動に着目して、シミュレーション時間 7,400 秒後の赤道における磁場スペクトルのピークを抽出し、パワー、振動数、方位角方向の波数 (m number) をそれぞれ磁場成分ごとに表示した (図 3)。図 3 c から、0.5 MLT から 19 MLT にかけて、 $L \geq 6$  の領域にパワーの強い平行方向の磁場変動があったことが分かる。この MLT 方向の広がり、プラズマ圧の高い領域 ( $> 0.5$  nPa) の広がり方とおおよそ対応している。また、この変動の m number を見てみると、真夜中から夕側にかけて  $m = -60$  から  $m = -30$  へと空間変化する、比較的大きな波数を持つ変動であることが分かった。これらの高波数の波動はプラズマ不安定性によって励起していると考えられる。一方、RBSP s 衛星の観測においては、東向きに伝搬する高波数の ULF 波動であったことが分かっている ( $m > 0$ )。また、Yamakawa et al. (2018) では m number は一様で振動数が空間変化する平行方向の磁場変動が生じることが示されている。以上の相違点が生じた原因を解明するには、更なるシミュレーションデータの解析や解釈を行う必要がある。イオンデータの解析を行ったところ、

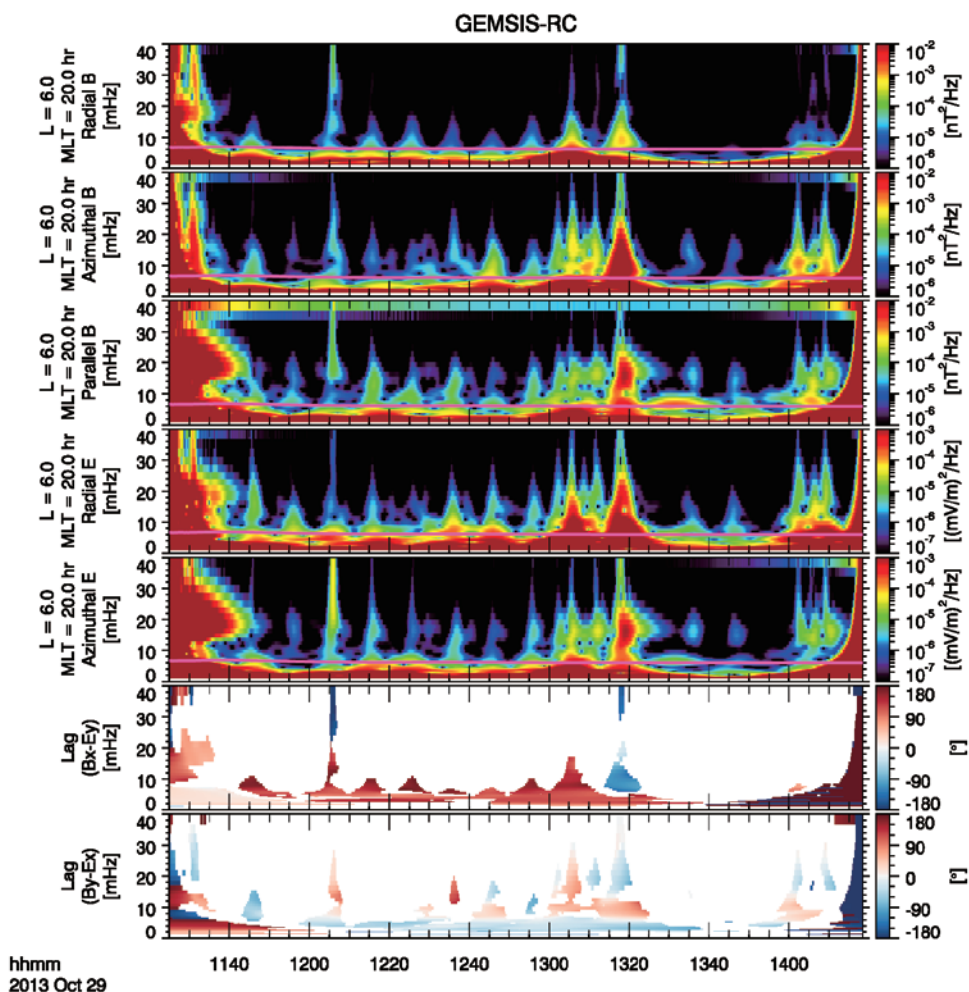


図2 Run 1 の結果。上から磁場の動径(poloidal)方向、方位角(azimuthal)方向、平行方向(parallel)成分のパワースペクトル、電場の動径方向、方位角方向成分のパワースペクトル、磁場動径方向と電場方位角方向の位相差、磁場方位角方向と電場動径方向の位相差 ( $L = 6.0 R_E$ , 20 MLT の磁気赤道)。マゼンタの線は定在 Alfvén 波の基本モードの振動数を示している。

ドリフトバウンス共鳴によるプラズマ不安定を引き起こすような空間・速度分布は認められなかった。したがって、drift-compressional instability のような流体的不安定性も検証していく必要がある。また、シミュレーションの外側境界に近い領域で変動が発生しているため、境界付近における数値的な擾乱でないか、慎重に検討する必要がある。

#### 4. Run3-6 の結果

Run 1 で見られた 10 分間隔のバースト状の変動の原因を探るため、Run 3-5 のシミュレーション設定を考えた。沿磁力線電流の分布は 10 分値のデータを 1 秒間隔で直線内挿しており、データの時間分解能による時間微分の不連続が擾乱を引き起こしていることが考えられた。試しにいくつかのパラメータを平均値で固定し、残りを 10 分値のデータでシミュレーシ

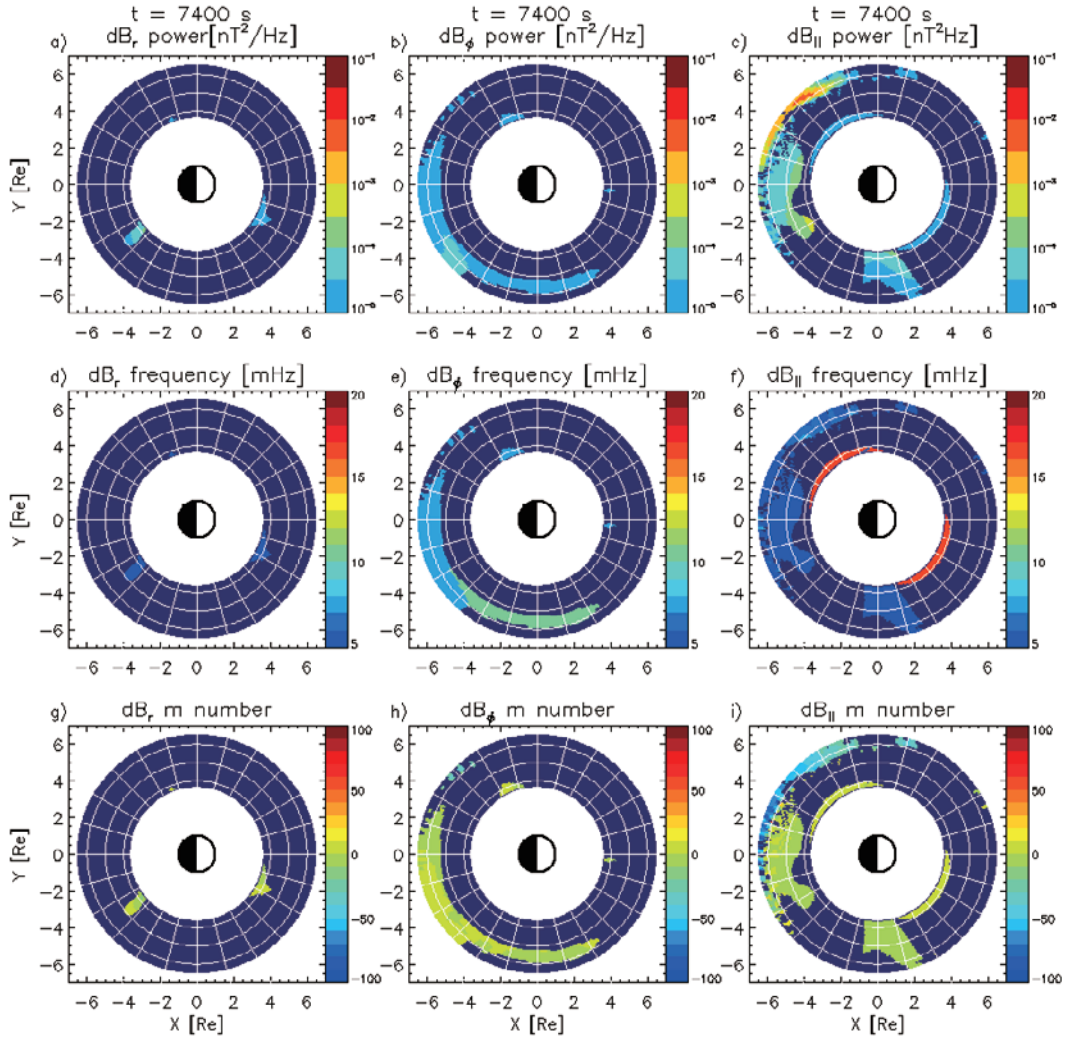


図3 Run 1の結果。磁場動径方向 ( $B_r$ )・方位角方向 ( $B_\phi$ )・平行方向 ( $B_{\parallel}$ ) の赤道上でのピークパワースペクトル密度 (a, b, c)、ピーク周波数 (d, e, f)、ピーク m number (g, h, i)。

ンを行ってみたが、バースト状の変動は消失しなかった (Run 3)。そこで、沿磁力線電流のフィッティング係数について、さらに時間方向にフィッティングして時間的に滑らかな 10 秒値のデータを入力とすることで、バースト状の変動を取り除くことができるか検証した。その結果を図4に示す。結果として、バースト状の変動を取り除くことには成功したが、電磁場変動の様相が大きく変化してしまうことが判明した。特に toroidal 磁場と poloidal 電場において、時間変化する 6-15 mHz の狭帯域変動が卓越することが分かった。この変動は 3 MLT を中心にほぼ全 MLT、全 L-shell で観測されるようなグローバルな変動である。現在この変動がどのようなモードに対応するか調査中であるが、cavity mode に類似した変動で

GEMSIS-RC

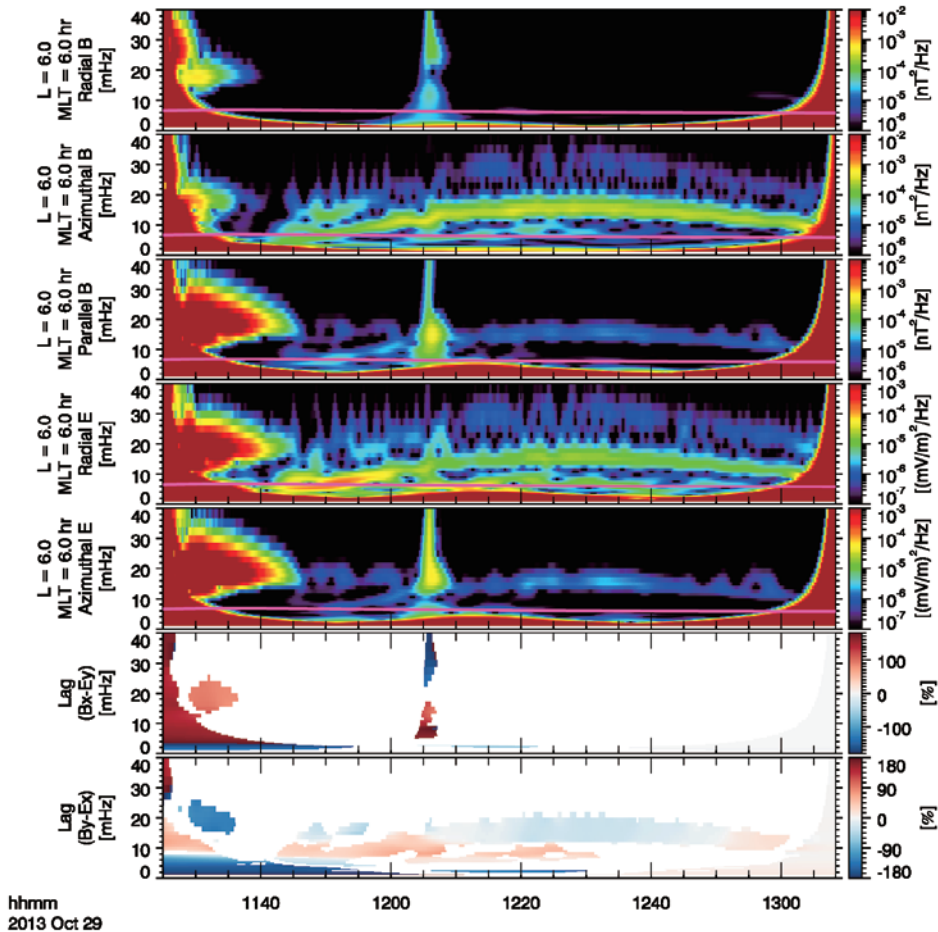


図4 Run 4の結果。上から磁場の動径(poloidal)方向、方位角(azimuthal)方向、平行方向(parallel)成分のパワースペクトル、電場の動径方向、方位角方向成分のパワースペクトル、磁場動径方向と電場方位角方向の位相差、磁場方位角方向と電場動径方向の位相差 ( $L = 6.0 R_E$ , 6 MLTの磁気赤道)。マゼンタの線は定在 Alfvén 波の基本モードの振動数を示している。

はないかと考えられる。また、マゼンタの線が示す定在 Alfvén 波の基本振動数に対応した振動数で poloidal 電場のパワーが増大することが分かる。これは cavity mode と定在 Alfvén 波のカップリングを示唆する結果である。実際、L-shell が小さくなるにつれ、振動数が増加するような L 方向の周波数スペクトルの変化を確認しており、Run 4 において定在 Alfvén 波が励起していることが確認できた。

この toroidal 磁場変動が沿磁力線電流のどのパラメータで駆動されているのか確認するため、Run 5, 6 のシミュレーションを行った。その結果、全ての沿磁力線電流パラメータを時間的に一定にすると toroidal 磁場変動は消失し(Run 6)、電流密度を時間変化させるだけで、この toroidal 磁場変動が生じることが分かった(Run 6)。従来は、toroidal ULF 波動の励起メカニズムとして外部磁気圏における太陽風からの周期的、またはパルス的なエネルギー注入が主要因として考えられてきた。しかし、本課題の結果は沿磁力線電流密度の時間変

化によって、グローバルな toroidal 磁場変動を生じさせることが示されており、toroidal ULF 波動の励起メカニズムの再考を迫るものである。

## 5. 考察とまとめ

本研究では、2013年10月29日に観測された RBSPs 衛星で観測された ULF 波動の励起メカニズムを解明するため、グローバルな5次元ドリフト運動論的リングカレントモデルを用いて ULF 波動の再現実験を行った。電離圏衛星のデータに基づき、時間変動する沿磁力線電流を複数パターン入力したところ、イオンの不安定性に起源をもつと思われる compressional 磁場変動と、電離圏に起源をもつと思われる toroidal 磁場変動がそれぞれ得られた。toroidal 磁場変動について Poynting flux を計算したところ、ほぼ全球的に南半球の電離圏からエネルギーが伝播していることが分かった。したがって、電離圏境界に南北非対称性があり、沿磁力線電流の時間変動が何らかの形で電離圏擾乱を駆動していると考えられる。電離圏の背景電気伝導度を南北対称なものに変更してみたが、結果は変わらず toroidal 磁場変動が確認された。今後さらなる toroidal 磁場変動の駆動源の解明が必要である。

## 参 考 文 献

Amano, T., Seki, K., Miyoshi, Y., Umeda, T., Matsumoto, Y., Ebihara, Y., and Saito, S. (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](https://doi.org/10.1029/2010JA015682).

Nakamizo, A., et al. (2012), Effect of R2-FAC development on the ionospheric electric field pattern deduced by a global ionospheric potential solver, *J. Geophys. Res.*, 117, A09231, doi:[10.1029/2012JA017669](https://doi.org/10.1029/2012JA017669).

Yamakawa, T., Seki, K., Amano, T., Miyoshi, Y., Takahashi, N., Nakamizo, A., & Yamamoto, K. (2022). Excitation of two types of storm-time Pc5 ULF waves by ring current ions based on the magnetosphere-ionosphere coupled model. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030486. <https://doi.org/10.1029/2022JA030486>