

# 電子ハイブリッドコードによるホイッスラーモード・ コーラス放射励起過程での波動粒子相互作用の計算機実験

Electron hybrid simulation of wave-particle interactions in the generation process of  
whistler-mode chorus emissions

**研究代表者：加藤 雄人（東北大学大学院理学研究科）**

yuto.katoh@tohoku.ac.jp

**研究分担者：大村 善治（京都大学生存圏研究所）**

担当：計算結果の理論検討

北原 理弘（東北大学大学院理学研究科）

担当：計算機実験の実施，計算結果の理論検討

齋藤 幸碩（東北大学大学院理学研究科）

担当：計算機実験の実施，計算結果の理論検討

磯野 航（東北大学大学院理学研究科）

担当：計算機実験の実施，計算結果の理論検討

Cristian Radulescu（University College London）

担当：計算機実験の実施，計算結果の理論検討

城 剛希（東北大学大学院理学研究科）

担当：計算機実験の実施，計算結果の理論検討

宮下 隼輔（東北大学大学院理学研究科）

担当：計算機実験の実施，計算結果の理論検討

## **研究目的 (Research Objective):**

ホイッスラーモード・コーラス放射は，地球内部磁気圏の真夜中から朝側の領域で観測されるコヒーレントなプラズマ波動である。周波数が時間的に変化する特徴を持つコーラス放射の観測・理論研究は半世紀以上の歴史があり，高緯度領域の地上観測局での観測と，人工飛翔体による直接観測結果に基づく研究によって，その特徴が明らかにされてきた。地球放射線帯外帯における相対論的高エネルギー電子のフラックス変動に対して，コーラス放射による加速過程およびピッチ角散乱過程が重要な役割を果たすことが指摘され，宇宙天気研究において特に重要な研究課題として認識されている。コーラス放射によりピッチ角が散乱された電子は大気へと降下して，脈動オーロラを発生させることが明らかとなっている。2016 年 12 月に打ち上げられたジオスペース探査衛星 ERG(あらせ)では，コーラス放射と相対論的高エネルギー電子との相互作用が主要な観測対象の一つとして挙げられている。

コーラス放射の生成機構において，非一様磁場中でのサイクロトロン共鳴を基本とする非線形の波動粒子相互作用が本質的に重要である。本研究課題では，独自に開発を進めている電子ハイブリッドコードを用いた自己無撞着な計算機実験によりコーラス放射の生成過程を再現し，電子の速度分布に与えた温度異方性に起因した不安定による線形成長段階から，非線形波動粒子相互作用によるコーラス放射の生成に至るまでのプロセス全容の解明に取り組んでいる。本研究課題では，背景磁場強度の空間勾配や高エネルギー電子の

分布関数の変動がコーラス放射発生過程に大きな影響を及ぼすことを明らかとしており、磁気圏内のどの領域で、どのような条件下でコーラス放射が発生するかを考察している。本報告書では、磁気圏における磁場構造の曲率とねじれの空間分布を定量的に明らかとする新たな解析手法(磯野, 東北大学博士論文)について述べる。

### 計算手法 (Computational Aspects):

地球磁気圏の磁場構造は太陽風との相互作用の結果、さまざまな時間空間構造を示す。磁気圏内に存在するプラズマ粒子の空間分布やエネルギーは磁場構造の変動の影響を顕著に受け、プラズマ波動を含む電磁場の変動もまた磁場構造により制御されている。従来の研究では、単純な磁場モデルを用いた考察により基礎過程の理解が進められた一方で、現実の複雑な磁場構造の変動の中でそれらの基礎過程がどのように表れているかを見出すことには困難があった。この点について本研究では、Yoshikawa (2023) により提案された局所標構を用いた解析手法の考え方を踏まえ、磁場構造の 3 次元性、すなわち磁力線の接線方向・法線方向・従法線方向に着目した解析を行った。特に、磁力線の曲率とねじれにともなう空間変化を「接続」として整理する枠組みに基づき、磁場構造を記述するための解析手法を提案した。本手法に基づいて磁気圏構造を解析するライブラリを開発して、一般に公開した(<https://github.com/Butadiene/geopack-vectorize>)。

### 研究成果 (Accomplishments) :

磁気圏における磁場構造と接続  $\Gamma$  の各成分との対応を図 1 に示す。局所標構を用いることにより、磁気圏における磁場構造の曲率とねじれの空間分布を定量的に表すことが可能となる。一例として、Tsyganenko 96 モデルを用いて、現実的な磁気圏構造において接続  $\Gamma$  の各成分がどのような値を持つかを示した例を図 2 に示す。太陽風動圧は 6.02 nPa, 惑星間空間磁場は  $B_z$  成分のみとし、南向きに 5.0 nT として、Dst 指数は -30 nT の状況を想定している。図 2 では、太陽風により磁気圏が圧縮されることにより X 軸方向の非対称性が表れ、曲率の空間分布がダイポール磁場の分布から大きく変化している様相(図 2 上段左ならびに 3 段目左; 図 1 の A と E に対応)が示されている。

本手法により、磁気圏内における磁場構造の空間分布とその変化を定量的に明らかとすることが可能となる。本手法は Tsyganenko モデルのような経験モデルに加えて、グローバル MHD シミュレーションの結果に用いることも可能である。磁気圏内に生じる磁場構造の空間変化は、高エネルギー粒子の空間分布を変化させる他、波動粒子相互作用の生じる領域に大きな影響を及ぼす。また、磁場構造の曲率とねじれを定量的に求めることにより、磁気圏における沿磁力線電流の空間分布とその時間発展を明らかにすることも可能であることから、本手法を用いた解析は様々な応用が期待できる。

# EXAMPLE $\hat{\Gamma}_{\hat{\beta}\hat{\alpha}}^{\hat{\gamma}}$ USING THE MAGNETOSPHERE

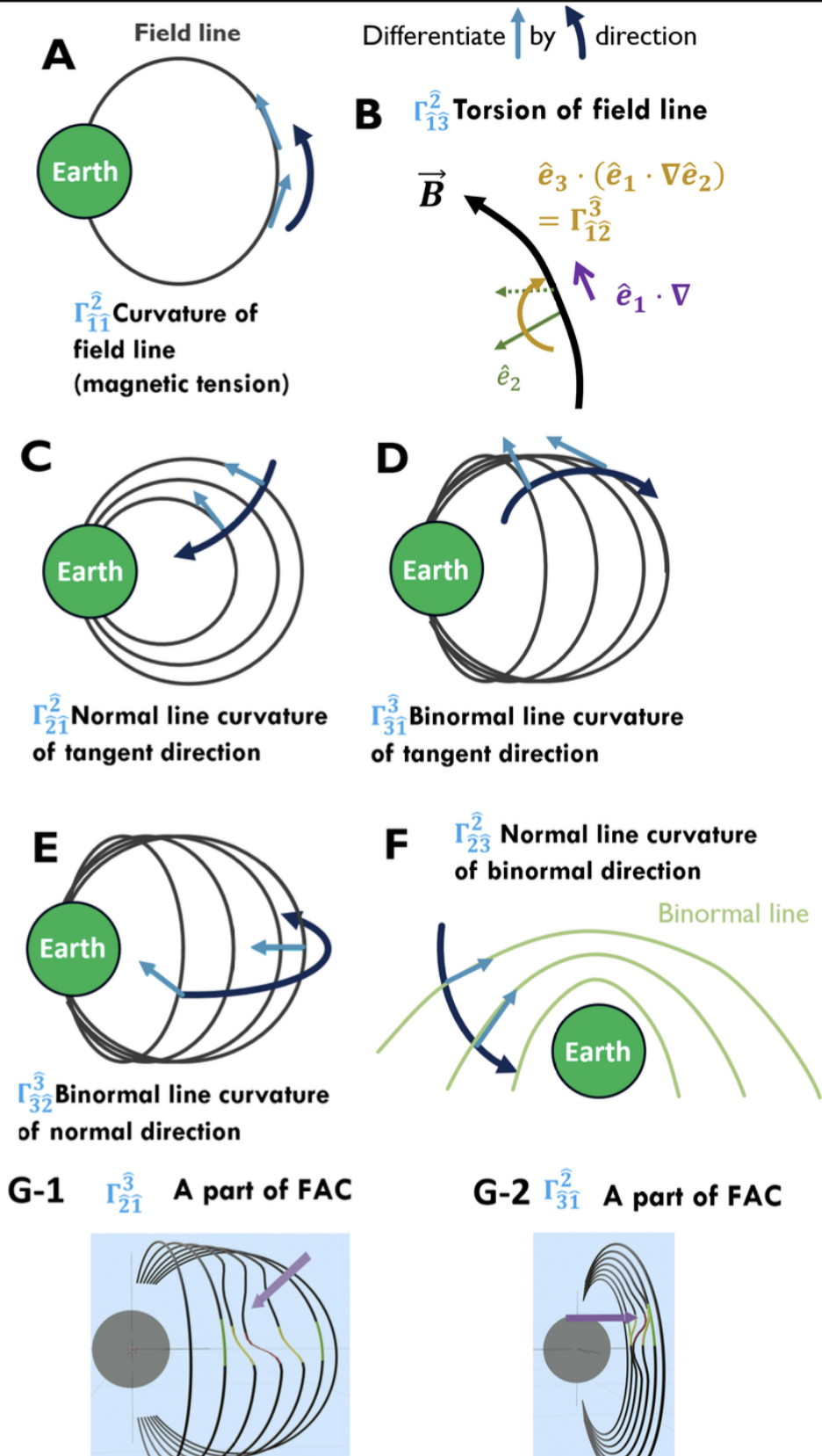


Fig.1 磁気圏における磁場構造と接続  $\Gamma$  の各成分との対応 (礒野, 東北大学博士論文)。

T96: The 8 Directional Derivative Formulas (Meridional Plane, GSM)  
 Pdyn=6.02 nPa, Dst=-30 nT, ByIMF=0.0 nT, BzIMF=-5.0 nT

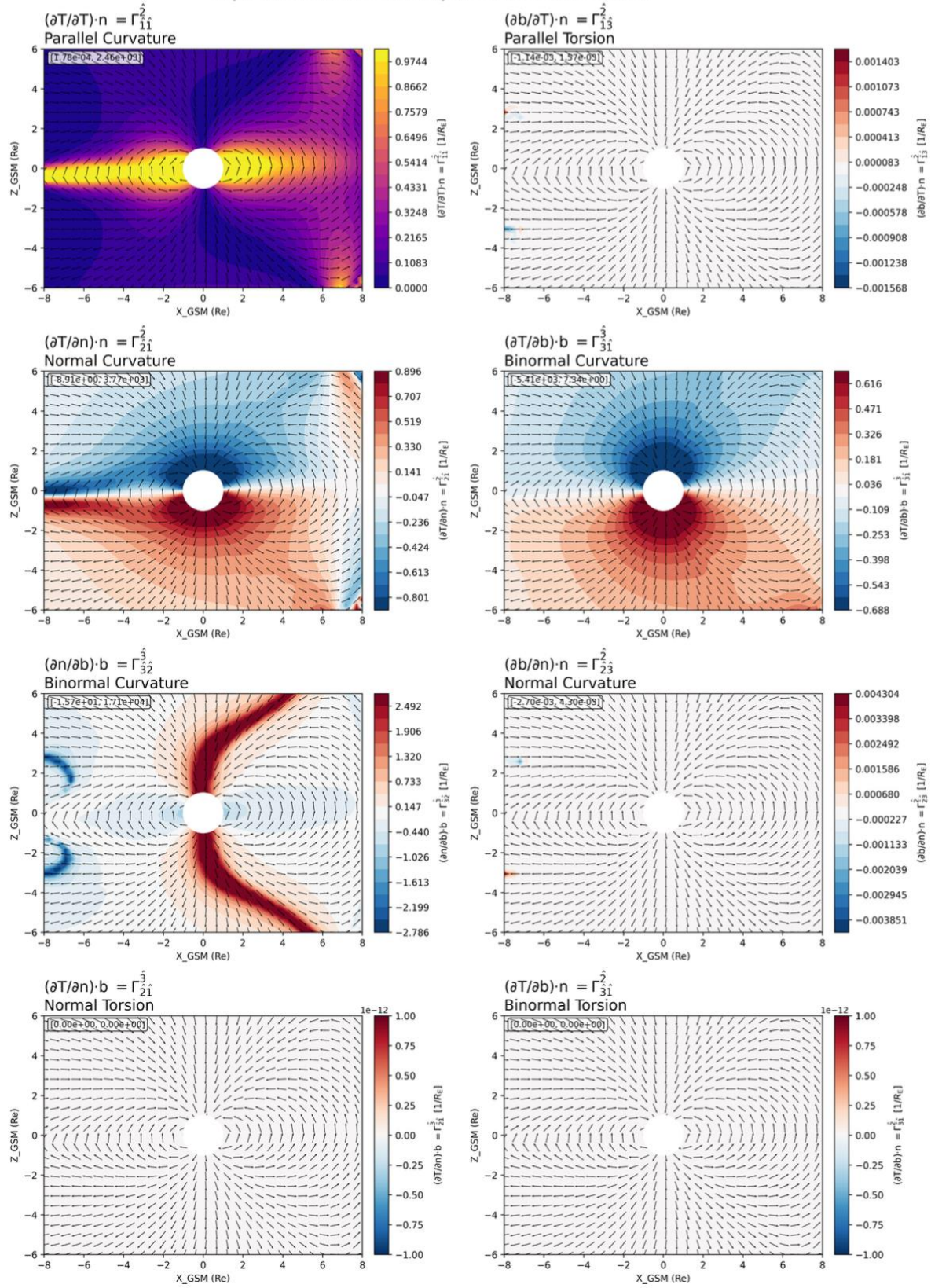


Fig.2 Tsyganenko 96 モデルを用いて求めた接続  $\Gamma$  の各成分の空間分布 (磯野, 東北大学 博士論文)。

## 公表状況 (Publications) :

### (論文)

1. 礪野 航, Development of a three-dimensional magnetic field analysis method using local frames and its application to magnetospheric plasma (局所標構を用いた 3 次元磁場解析手法の開発と磁気圏プラズマへの応用) , 東北大学博士論文, 2025.
2. Tachi, K., Y. Katoh, O. Santolík, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, and Y. Kasaba, Whistler-Mode Wave Duct Propagation Caused by Ultralow Frequency (ULF) Wave: Ray-Tracing Simulations and Cluster Observations, Radio Science Letter, vol. 7, RSL25-0019, doi:10.46620/25-0019, 2025.
3. Tachi, K., Katoh, Y., and Santolík, O., Whistler - mode chorus wave duct propagation caused by ultralow frequency wave: Event analysis and ray - tracing simulation. Geophysical Research Letters, 52, e2025GL116840, doi:10.1029/2025GL116840, 2025.

### (口頭)

1. Katoh, Y., Y. Ogawa, T. Tanaka, and H. Tadokoro, Effect of the mirror force on the motion of precipitating electrons in the relativistic energy range and resultant altitude profiles of the collision rate in the polar ionosphere, AOGS 2025, Singapore, 27 July - 1 August 2025. (Invited)
2. Katoh, Y., CubeSat project PCUBE for probing, controlling, and understanding of radiation belt environments, AAPPS-DPP 2025, Fukuoka, 21-26 September 2025.
3. Kohki Tachi, Yuto Katoh, Ondřej Santolík, Atsushi Kumamoto, Fuminori Tsuchiya and Yasumasa Kasaba, Whistler-Mode Wave Duct Propagation Caused by ULF Wave: Ray-Tracing Simulations and Cluster Observations, Asia-Pacific Radio Science Conference 2025, Sydney, Australia, 17-22 August 2025.
4. 城 剛希, 加藤 雄人, Ondrej Santolik, 熊本 篤志, 土屋 史紀, 笠羽 康正, 松田 昇也, 笠原 禎也, 松岡 彩子, 寺本 万里子, 栗田 怜, 三好 由純, 堀 智昭, 山本 和弘, 篠原 育, ULF 波動によるホイッスラーモード波動のダクト伝搬: 事例・統計解析, JpGU 2025, 千葉, 25-30 May 2025.
5. 齋藤 幸碩, 加藤 雄人, 川面 洋平, 熊本 篤志, 非線形波動粒子相互作用における背景プラズマ数密度勾配の寄与, JpGU 2025, 千葉, 25-30 May 2025.
6. 礪野 航, 吉川 顕正, 加藤 雄人, 熊本 篤志, 冷たいプラズマ中の波動の分散関係に対する背景磁場構造の影響についての局所標構を用いた考察, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季年会, 神戸, 23-27 November 2025.