

# ミッション3：「宇宙生存環境」

小嶋浩嗣

京都大学 生存圏研究所

## 1. 研究組織

代表者：小嶋浩嗣（京都大学 生存圏研究所）

参加研究者：海老原祐輔（京都大学 生存圏研究所）

畑 俊充（京都大学 生存圏研究所）

栗田 怜（京都大学 生存圏研究所）

HSIEH, Yikai（京都大学 生存圏研究所）

## 2. 研究概要

ミッション3「宇宙生存環境」は、人工衛星、宇宙ステーション、ロケット、地上レーダー、計算機シミュレーションなどをもちいて、宇宙圏・大気圏の理解のための研究を深化・融合させ、生活圏や森林圏との接続性の解明に取り組みます。さらに、太陽フレアを原因とする放射線帯や磁気嵐の変動などの理解を深めて、地球周辺の宇宙空間および月面上での人間活動に対する安全性を評価し対応策を提案できるようにします。気象・測位・通信衛星などの宇宙インフラの維持・発展にも貢献することで、宇宙環境の持続的な利用という社会的要請に応えます。本ミッションでは、宇宙圏環境の理解と利用だけでなく、生存環境としての維持・改善、ひいては大気圏、森林圏、生活圏との接続性も重点化します。

## 3. 研究の背景と目的

宇宙生存環境に関わる以下の項目の研究を遂行します。

- ▶ 宇宙環境下におけるダストの研究（栗田、小嶋）
- ▶ 深内部磁気圏粒子環境変動に関する実証的研究（海老原）
- ▶ 原子酸素照射下における炭素化木質リグニンの電子顕微鏡学的解析（畑・小嶋）
- ▶ 斜め伝搬ホイッスラーモード波動による高エネルギー電子降下の効率についての研究(HSIEH, Yikai)

## 4. 研究の結果および考察

### 宇宙環境下におけるダストの研究

宇宙空間には 1mm 以下の粒径をもつダストが広く分布しており、今後、人類の活動が広がっていく月周辺にも存在している。月のダストの存在はアポロ計画の頃から知

られており、ダストによると思われる散乱光の観測や、ダスト粒子の検出器による直接観測により、月面のみならず、月上空に浮遊するダストの存在が示唆されている。ダストの存在は人類活動に影響を与えるため、その分布などの特徴を明らかにすることは重要な課題である。人工衛星にダストが衝突すると、電波観測に特徴的なノイズが混入する。現在提案されているノイズ生成モデルによれば、ダスト衝突に由来するノイズ信号は、生成されるプラズマの量に比例すると想像され、ダストの大きさや質量の情報を持っている可能性がある。本研究では、月の高度 100km 以上を周回し、電波観測を実施している ARTEMIS 衛星のデータを用いて、高高度における月由来のダストを調査している。現在、ダスト衝突によると思われるノイズ信号を数十例発見しており、月に由来するダストかどうか、また、衝突したダストの質量の情報を得るためのさらなる解析を進めている。

### 深内部磁気圏粒子環境変動に関する実証的研究

内部磁気圏には様々なエネルギーを持つ電子が捕捉されている。深内部磁気圏では 100 keV から数 100 keV のエネルギーを持つ電子のフラックスに多数のピークが現れ、エネルギー対時間スペクトル上で縞模様に見えることからゼブラ構造と呼ばれている。ヴァン・アレン衛星が深内部磁気圏の  $L=1.5$  で観測した電子のゼブラ構造を解析し、静穏時にはゼブラ構造は安定して存在し、磁気嵐がおこると急に乱れ、再構成することが明らかになった。電子フラックスのピーク間比と極域で人工衛星が観測した全沿磁力線電流 (FAC) との間には高い相関 (0.70) が認められた。グローバル磁気流体力学 (MHD) シミュレーションを実行し、全 FAC と夜間の西向き電場との間にはよい相関にあることを確かめた。この結果は、極域を流れる FAC が対流電場を介して深内部磁気

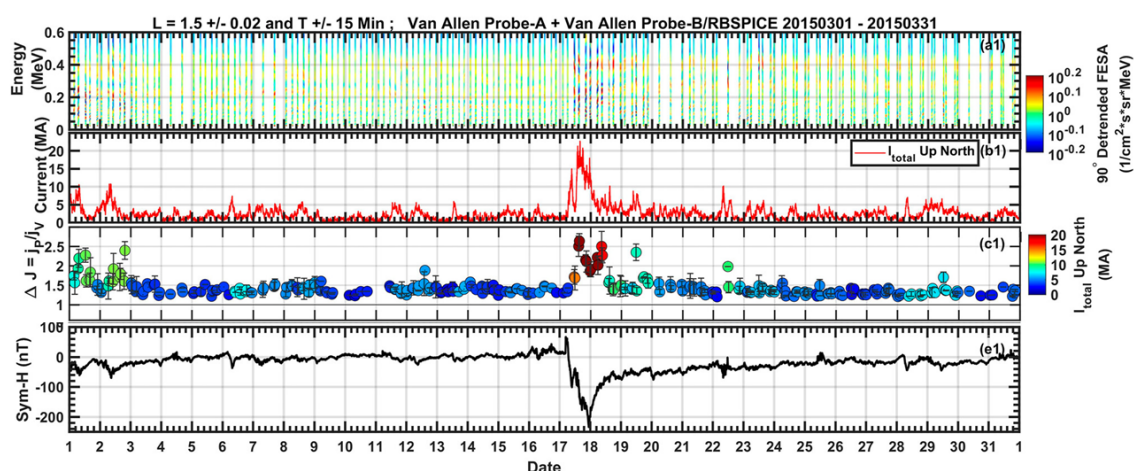


図 1：上から順に、観測された電子フラックスの変動量、極域を流れる沿磁力線電流の総量、電子フラックスのピーク間比 ( $\Delta j$ )、磁気嵐を表す Sym-H 指数 (Pandya et al., 2024 を改変)。

圏の粒子環境に影響を及ぼしていることを示唆しており、太陽風から深内部磁気圏へのエネルギーの流れの理解に寄与するものである。

Pandya, M., Y. Ebihara, T. Tanaka, J. Manweiler, and S. Vines, Intensification of the electron zebra stripes in the Earth's inner magnetosphere during geomagnetic storms, *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL107822, doi:10.1029/2023GL107822, 2023.

### 原子酸素照射下における炭素化木質リグニンの電子顕微鏡学的解析

宇宙空間での木材の使用における課題、特に原子酸素 (AO) による侵食の影響に焦点を当てた。炭素化された木材は電気伝導性があり、真空中でガスを発生しないため、宇宙船の材料としての可能性がある。本研究では、針葉樹と広葉樹から得られた炭素化微細木材リグニン (MWL) に対する AO 照射の効果を調査した。炭素化リグニンは AO に対する耐性に大きな影響を与えることが判明。特に、針葉樹由来の MWL は AO 照射により構造変化を受けやすいが、広葉樹由来の MWL は高い酸素含有機能基の濃度により耐性が高い。AO 照射は炭素骨格に変化を引き起こし、微細孔のサイズとピーク分布範囲に影響を与える。AO に晒される環境用のリグニン由来炭素材料を製造する際に、樹種と炭素化条件を選択することが重要であることがわかった。

### 引用文献

T. Hata, S. Honma, T. Kajimoto, K. Oshida, Y. Tobimatsu, M. Tagawa, H. Kojima, Subyakto, Microstructural changes in carbonized wood-lignin, a potential space material, in response to atomic oxygen irradiation, *Biomass Conversion & Biorefinery*, 2023

### 斜め伝搬ホイッスラーモード波動による高エネルギー電子降下の効率についての研究

地球の周りに数百数百 keV から数十 MeV までの高エネルギー電子と数 GeV までの高エネルギーイオンで構成された放射線帯が存在している。これらの高エネルギー粒子の変動は人間の宇宙活動に重大な影響を及ぼす。地球放射線帯の近くでホイッスラーモード・コーラス放射と呼ばれる波動は、電子との波動粒子相互作用によって、高エネルギー電子加速や地球大気への電子降り込みに貢献し、放射線帯のダイナミクスにおいて重要な役割を果たしている。本研究は、計算機シミュレーションを用い、コーラス放射によって超高層大気へ降下する電子の軌道を再現し、コーラス放射の振幅および伝搬角に対する降下電子フラックスの依存性を明らかにした。波の振幅に関しては、大きな振幅の波は、電子の加速と降下電子フラックスの増加を効率的に促進します。一方、コーラス放射の伝搬角については、斜め伝搬の場合の方が、平行伝搬の場合に比べて多くの MeV 電子を降下させることが判明し、斜め伝搬による多重共鳴に起因した二

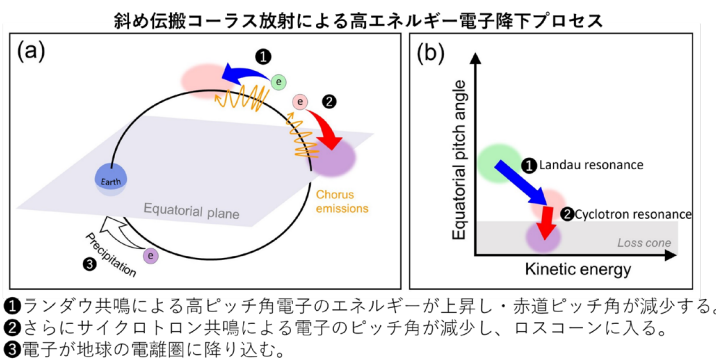


図 2 斜め伝搬による多重共鳴に起因した二段階（非線形ランダウ共鳴と非線形サイクロトロン共鳴）ピッチ角散乱が引き起こす電子降下プロセス

段階のピッチ角散乱が引き起こす電子降下プロセスを提案した。これにより、非線形過程による電子の加速・散乱は、準線形過程の時間スケールよりも遥かに速く進行することが検証され、放射線帯における非線形電磁サイクロトロン波動粒子相互作用の重要性が明らかとなった。