

## 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）

馬場啓一（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持ちいて、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）
- 磁気圏対流の形成と電離圏への投影（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)
- 宇宙林業での材質予測（馬場）

#### 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(図 1、図 2)。

##### 磁気圏対流の形成と電離圏への投影

内部磁気圏には様々なエネルギーを持つ荷電粒子が捕捉されている。なかでも、リングカレントや放射線帯は送電網や人工衛星への影響が懸念されており、それらを構成する荷電粒子の動態を正しく知ることは重要である。数百 keV 以下の荷電粒子の主な輸送モードは磁気圏対流電場である。磁気圏対流の存在は人工衛星による観測によって確認され、磁気圏対流と電離圏対流は磁力線に沿って互いに写像の関係にあるとされている。これまで暗黙の了解とされていた「磁力線を介した写像の関係」の妥当性について、グローバル電磁流体 (MHD) シミュレーションを用いて検証した。電場はアルベン波で伝わると考えられることから、磁気赤道面から電離圏へ

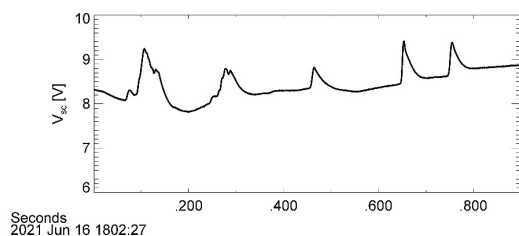


図 1: ARTEMIS 衛星で観測されたダスト衝突による衛星電位変動波形(電位増加)。

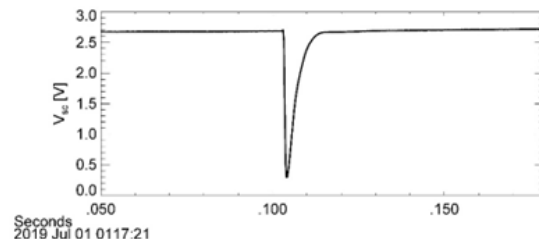


図 2: ARTEMIS 衛星で観測されたダスト衝突による衛星電位変動波形(電位減少)。

向かうアルベン波の波束を追跡し、電離圏と交差する点を求めた。この点を「アルベン・フットプリント」とした。また、磁気赤道面から伸びる磁力線が電離圏と交わる点を「磁氣的フットプリント」とした。両者を比較したところ、惑星間空間磁場が南向きの場合、夜側かつ 8 RE（地球半径）以上の領域において、地磁気地方時方向に数時間以上もずれることが分かった。有限なアルベン波速度のため、いつも「磁力線を介した写像の関係」が成り立つとは限らないことを意味する。

Ebihara, Y., and T. Tanaka, On the electric field "mapping" between the magnetosphere and the ionosphere, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2024 年秋季年会, 2024 年 11 月.

### **炭素化木質リグニンの耐原子酸素（AO）性評価-XPS による表面化学変化の解析**

低地球軌道環境における耐久性を評価するため、炭素化した木質リグニンに対する原子酸素（AO）照射の影響を X 線光電子分光（XPS）により解析した。針葉樹由来 S-MWL および広葉樹由来 H-MWL の炭素化材料を AO 照射し、O/C 比および C1s スペクトルの変化を分析した結果、S-MWL では O/C 比の増加と C-O、C=O 結合の増大が確認され、酸化が進行していることが示唆された。一方、H-MWL は酸素含有官能基が多く、AO 照射後の O/C 比の変化が小さく、XPS 分析により C1s ピークの構造変化が最小限に抑えられ、化学組成の安定性が確認された。これにより、炭素化 H-MWL は炭素化 S-MWL よりも相対的に高い耐酸化性を有することが明らかになり、リグニンの起源や炭素化プロセスが AO 耐性に与える影響が示された。今後は、XPS による詳細な結合状態の解析を進め、宇宙環境下での実用化に向けた最適化を図る。

### **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 keV から数十 MeV 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る放射線帯が存在している。地球の磁場に捕らえられた電子は、ホイッスラーモード・コーラス放射によって散乱され、地球の大気へ降下する。これらの高エネルギー電子の降下は、地球大気や低軌道衛星に重大な影響を及ぼす。地球の内部磁気圏を伝播するホイッスラーモード・コーラス放射には、背景磁場に対して準平行伝搬する波と、斜めに伝搬する波の二種類が観測される。準平行伝搬波と電子の相互作用ではサイクロトロン共鳴のみが発生するのに対し、斜め伝搬波と電子の相互作用では、準平行伝搬波よりも多くの共鳴（ランダウ共鳴や高次サイクロトロン共鳴）が発生することが分かっている。本研究では、計算機シミュレーションを用い、コーラス放射によって大気へ降下する電子の軌道を再現し、伝搬角の違いによる電子降下への影響を定量的に解析した。さらに、各共鳴による電子降下の効率を示す方程式を導出し、任意のコーラス放射イベントにおける電子降下量を予測できるようにし

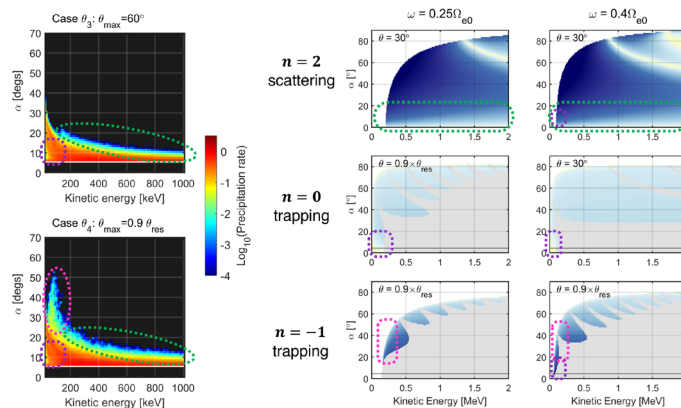


図 3: 一つの斜め伝搬コーラス放射による電子降下の効率と各共鳴の関係図

た。シミュレーション結果と導出した方程式に基づき（図 3 左：シミュレーションの一つ放射による電子降下効率；右：各共鳴による電子降下の効率）、以下の結論を得た。

1. サイクロトロン共鳴によるビッチ角散乱率は、低エネルギー電子の方が高エネルギー電子よりも高いため、低エネルギー電子は高エネルギー電子よりも降下率が高くなる。

2. 非常に斜めなコーラス波による電子降下率は、平行伝播波の約 1.5 倍、やや斜めな波の約 1.2 倍となる。これは、ランダウ共鳴および  $n=-1$  異常共鳴による強い非線形捕捉、さらに  $n=2$  サイクロトロン共鳴の非線形散乱が影響するためである。

3. 通常、降下する電子の初期赤道ビッチ角は 20 度以下である。しかし、約 100 keV の電子は、 $n=-1$  サイクロトロン共鳴による強い非線形捕捉の影響で、初期赤道ビッチ角が 45 度以上であっても降下する可能性がある。

本研究では、斜め伝播コーラス波と電子の非線形波動粒子相互作用における各共鳴の役割を明らかにした。これにより、地球磁気圏における高エネルギー電子の変動メカニズムが、より詳細に解明された。

## 宇宙林業での材質予測

人類が将来的に長期間宇宙に滞在にすることになれば、できる限り現地で資源調達できる方策が必要となる。木材は加工が容易で人類が有史以前から利用してきた扱いやすい材料であり、また木材生産の副産物として得られる果物や堅果などは食料となる。宇宙で木材を調達するための宇宙林業構築が検討されている。その場合に得られる木材の性質を今から予測することは、実際の現場で予期せぬ事態を回避するために重要である。宇宙では地球と異なる環境条件がいくつもあるが、本研究では重力環境の違いに着目した。火星の重力は地球の 1/3、月なら 1/6、宇宙ステーション型コロニーならもっと小さい。そこで、回転によって微小重力環境を擬似的に地上で再現させるクリノスタットにポプラを搭載して育成し、その成長と木部形成について調査した。当初は 1 軸の簡易なクリノスタットを用い、その後、2 軸を持つ 3D クリノスタットを用いた。3D クリノスタットを用いた場合も、1 軸クリノスタットで得られた結果同様、伸長成長は地上コントロールとあまり差がなく、肥大成長は幹の下部ほどコントロールの方が大きくなった。

馬場啓一、土井隆雄、井上純大、海野大和、苅谷健司：微小重力下における樹木の形態形成．日本宇宙生物科学会第38回大会（山形）2024.9.20-9.22.