

# Energetic Particle Chain —高エネルギー荷電粒子降り込みが中層・下層大気に及ぼす影響

本融合研究が明らかにするのは、“Energetic Particle Chain (EPC)”である。これは、太陽-太陽風-磁気圏-電離圏-大気圏を「高エネルギー荷電粒子」をキーワードに一つの連鎖システムと捉え(図1)、その関係性をシームレスに説明することに挑戦するプロジェクトである。

太陽を起源とする高エネルギー荷電粒子は、磁力線に沿って地球の高緯度地域に降り込むが、このようなエネルギーの高い粒子は中層・下層の大気まで到達し、その組成を変化させる(直接効果)。或いは、磁気圏放射線帯の高エネルギー電子は中間圏上部から熱圏という高い高度で大気を電離し、イオン化学反応によって窒素酸化物を生成、それが極渦内で下方輸送されて成層圏オゾンを破壊するというシナリオも知られている(間接効果)。しかし、これらのプロセスは未だ十分に観測実証されておらず、宇宙からのエネルギー注入が地球の中層・下層大気に及ぼす定量的な影響や、気象・気候への寄与も明らかではない。

衛星・地上観測装置によって得られる観測データは、基本的に磁気圏、電離圏、大気圏のような個々の領域内毎の現象のトレースに特化してしまうため、それらを統一的に理解するにはモデル計算による包括的なシミュレーションを行うことが不可欠である(図2)。しかし、そのような膨大な観測データと種々のモデル計算手法を適切に融合させる取り組みは、世界的に見ても不十分な状況にある。本研究では、あらせ衛星(磁気圏)、EISCAT\_3Dレーダー(電離圏)、ミリ波大気ラジオメータ(大気圏)により観測データを取得するとともに、これらをインプットとして磁気圏から電離圏への荷電粒子降下や大気圏のイオン化学反応および全球的力学・温度場のモデル計算を行うことで、粒子降下の大気への影響の定量的な解明を目指す。本研究所の研究者を中心として各項目のスペシャリストがチームを結成し、それらを融合した国際的なコンソーシアムでプロジェクトを推進する。

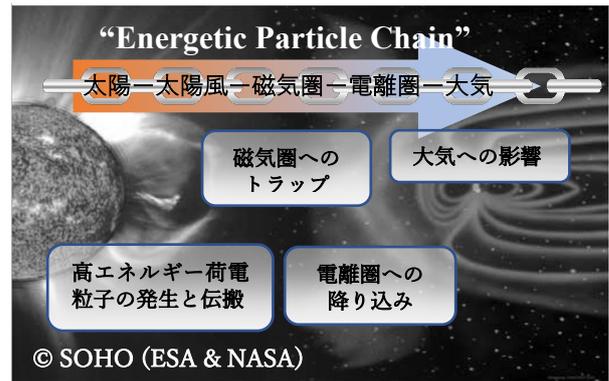


図1: 太陽を起源とする連鎖システムのイメージ。

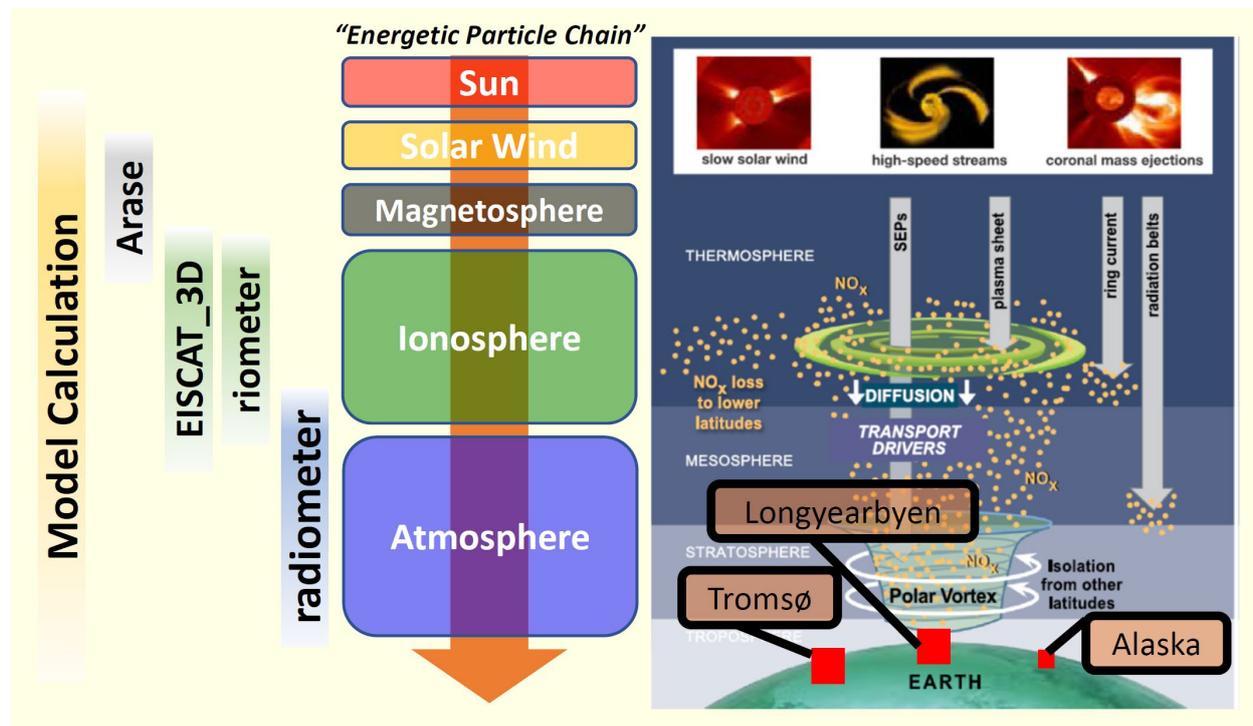


図2(左): 各装置が観測する領域とシミュレーションによるデータ融合のイメージ、(右): 極冠域内外に新たに設置する観測拠点の位置と降り込み粒子の関係(Marshall et al., 2020の図を改変)。

## 2022 年度の主な活動

### 国際研究体制（コンソーシアム）の構築

主にモデル計算と電離圏観測での協力を見据え、フィンランドの Sodankylä Geophysical Observatory, University of Oulu および Space and Earth Observation Centre, Finnish Meteorological Institute (FMI) の研究者との協力を開始した。さらに高エネルギー電子降り込みによる中層大気変動のモデリングを進めるために、FMI の Pekka Verronen 博士を客員教授として招聘し、共同研究を開始した。所内においては、“EPC”のチェーンをさらに下層に繋げられないかという新たなチャレンジ（すなわち、EPP の下層大気（対流圏およびグラウンドレベル）環境への影響の解明）を模索しており、新たに陸域海洋生態圏研究部と宇宙線研究部からコンソーシアムメンバーとして加わって頂いた。

### 降下電子エネルギーフラックスを算出するシミュレーションの開発

現在開発を進めている磁気圏波動粒子相互作用-オーロラ発光- Cosmic Noise Absorption (CNA) 計算のモデルを拡張し、1) 背景のホイッスラー波動による線形波動粒子相互作用による散乱を確率微分方程式を用いて計算、2) 磁気圏コーラス波動の振幅が大きくなった際の実線形散乱および降り込み電子に及ぼす寄与を計算する手法を実装した。これらの結果、波動強度が大きい場合に phase trapping や dislocation と呼ばれる非線形波動粒子相互作用によって、準線形から予想される降り込み電子スペクトルやオーロラ発光とは異なる変化を示すことを明らかにした。

### ミリ波大気ラジオメータでの微量分子マルチライン同時観測

第 63 次南極地域観測隊に水野研究室の研究者が参加し、2023 年 2 月まで南極・昭和基地に滞在した。本研究のために開発した新たな超伝導素子を使ったミリ波検出器を大気ラジオメータに搭載することで、オゾン ( $O_3$ )、窒素酸化物 ( $NO$ ,  $NO_2$ )、水素酸化物 ( $HO_2$ )、一酸化炭素 ( $CO$ ) の 5 分子同時のモニタリング観測を開始した。特にイオン化学反応プロセスを理解する上で鍵となる  $NO$  に関しては、6 本の超微細構造のスペクトル線の同時観測が可能となり、これらの平均を取ることで従来機と比べ S/N の向上に成功した。世界的にも、これら 6 本の  $NO$  超微細構造線の同時観測が行われた例はなく、本研究独自の成果である。

### その他の成果

- 2022 年 3 月の「あらせ」-EISCAT 同時観測時における高エネルギー電子降り込みについて、「あらせ」の観測した波動スペクトルからピッチ角散乱係数を導出し、観測された波動によって広いエネルギー帯の電子降り込みが可能であることを示した。
- 2022 年 3 月にアラスカで LAMP 観測ロケット実験を実施し、Miyoshi et al., (2022) のモデルで予言していた脈動オーロラに伴う相対論的電子マイクロバーストの降り込みを実証した。
- トロムソナトリウムライダーで取得された大気温度データを用いて、高度 80–100 km の静的な大気安定度を調べた。その結果、地磁気指数 (k-index) と静的な大気不安定確率に高度 94 km 以上で相関が認められた。これは、高エネルギー粒子の降り込みによる影響であることを示唆する。
- Spectral Riometer をフィンランドの Kilpisjärvi に設置し、2022 年 10 月から観測を開始した。設置場所に近い EISCAT レーダーとの同時観測を実施し、高エネルギー電子降り込みに伴う下部電離圏高度での電離と CNA の増加イベントを捉えた。2023 年 2 月 26 日に発生した磁気嵐に伴う CNA 増加の観測にも成功した。
- 予備的な解析ではあるが、降下電子による  $NO$  時間変化において、 $NO$  の増加率の勾配が急であるのに対し、減衰率、特に日照の短い冬から初春にかけての減衰率が緩やかな傾向を示すことが明らかになり、高エネルギー粒子によるイオン化学反応と紫外線による光化学反応の影響の違いを反映していることが示唆された。全球気候モデル WACCM、イオン化学モデル SIC などのモデル計算と、ミリ波の詳細な時系列観測データとの比較を進めている。