

研究・活動成果報告書

研究・活動テーマ

中間圏オゾン破壊を可視化する孤立陽子オーロラに対する
複数イオン種による荷電粒子散乱効率評価

金沢大学理工研究域電子情報通信学系
尾崎光紀

目的

磁気緯度 60 度程度で発生する孤立陽子オーロラ（高度約 100 km）の直下の中間圏（高度 50~80 km）でオゾンが 10~60% も減少することが報告された（Ozaki ら 2022）。孤立陽子オーロラと共に降下する相対論的電子が中間圏大気を電離し、窒素酸化物（NO_x）や水素酸化物（HO_x）の生成によりオゾンを直接破壊することを実証した成果である。本研究は、駆動源になっているプラズマ波動に対し、現実的な複数イオン種（水素イオン、ヘリウムイオン、酸素イオンなど）環境での荷電粒子の散乱効率を評価し、宇宙からの荷電粒子降下による大気電離インパクトの定量評価を研究目的とする。特に、散乱効率を評価するために、複数種イオン種やホットプラズマの効果を考慮したプラズマ分散関係を厳密に解く数値計算手法の開発に取り組む。

研究方法

プラズマ分散関係を数値的に解く手法は、複数の研究で報告されているが、本研究では、固有値問題として解く手法に着目した。Xie(2019)らはマクスウェル分布に関する分散関数を極に展開し、プラズマ分散関係に対して波動周波数を固有値とした固有値問題に変換するアルゴリズムを報告した。しかし、このアルゴリズムは複数のイオン種が存在すると仮定して数値計算を行う場合、計算時間の長さやマクスウェル分布の極拡張による不要な解の頻出が課題として残っていた。この問題に対し、本研究は固有ベクトルから不要な解を除外するために、部分的に対角化を行い、解の安定性と計測時間短縮の両方を達成する計算法を考案した。

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} c_1 & & & \alpha_{1,J+1} & \cdots & \alpha_{1,n-1} \\ & \ddots & & \alpha_{2,J+1} & \cdots & \alpha_{2,n-1} \\ & & & \vdots & \cdots & \vdots \\ & & 0 & \alpha_{n-1,J+1} & \cdots & \alpha_{n-1,n-1} \\ & & & \alpha_{n,J+1} & \cdots & \alpha_{n,n-1} \end{pmatrix} \quad P = \begin{pmatrix} p_{1,1} & \cdots & p_{J,1} & & & \\ p_{1,2} & \cdots & p_{J,2} & & & 0 \\ \vdots & \cdots & \vdots & & & \\ p_{1,n-1} & \cdots & p_{J,n-1} & & 1 & \ddots \\ p_{1,n} & \cdots & p_{J,n} & & & 1 \end{pmatrix}$$

ここで、 P は部分的な単位行列を含む固有ベクトル、 A はプラズマ分散関係を与える行列である。計算量の削減は、理論的には従来の 1/3 となるが、実際の計算機で評価したところ 1/2 に留まった。この理由は、固有値解析と固有ベクトルの演算に伴う処理が必要になったためである。

研究結果

新たに開発した重イオンを考慮したプラズマ分散関係の数値計算の解析結果について報告する。図1は、水素イオン：ヘリウムイオン：酸素イオン：水素イオン（ホット）=76.9%：9.6%：9.6%：4%を仮定した場合の分散関係を示したものである。比較のために、ホットプラズマ成分を考慮しない場合の分散関係を点線で示している。開発した数値計算手法により、酸素イオンのような比較的重いイオンを考慮しても安定した分散関係が得られていることがわかる。また、ホットプラズマ成分を考慮することで、コールド近似時と異なり、特に小さい波数 k の領域で分散関係が大きく異なり、図1で示すように周波数虚部の解として得られる波動の成長率を評価できるようになった。イオン種毎に左回り円偏波を有する電磁イオンサイクロトロン（EMIC）波動の励起を示しており、これらの波動は相対論的電子とサイクロトロン共鳴を通じて、宇宙から地球大気へ相対論的電子を降下させる役割がある。

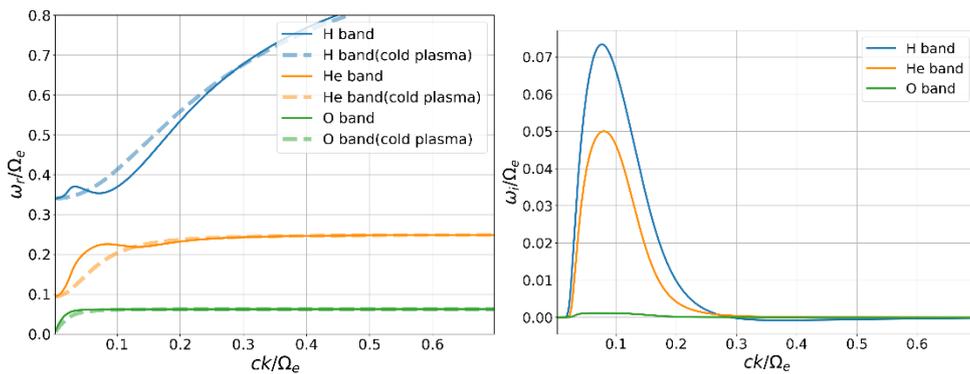


図1 プラズマ分散関係の数値解（左）とプラズマ波動の成長率（右）

次に、開発した数値計算より得られたプラズマ分散関係を用いて相対論電子の拡散係数

を評価した。図2は、ヘリウムイオン帯 EMIC 波動による電子拡散係数の計算結果である。ホットプラズマの考慮との違いを比較するために、コールドプラズマのみの計算結果も示している。開発した数値計算より重イオンやホットプラズマを考慮して拡散係数を評価できるようになり、ホットプラズマの影響によりプラズマ波動の群速度がゼロとなる周波数帯が存在し、どの電子ピッチ角に対しても拡散係数が著しく小さくなることが新たにわかった。また、共鳴する電子エネルギーの範囲にも影響することがわかった。これらの知見は、降下した電子が大気を電離する際に直接影響するため、本研究で開発した数値計算手法が単なるプラズマ分散関係を与えるだけでないことの有用性が確認できた。

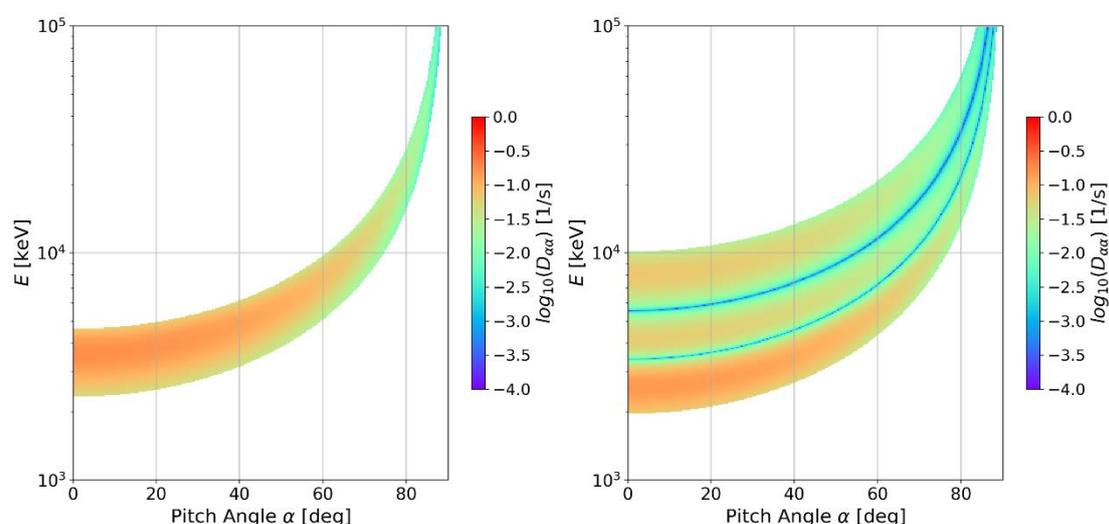


図2 プラズマ拡散係数の数値計算例

(左：コールドプラズマのみ、右：ホットプラズマ (+4%) を考慮)

まとめ

開発したプラズマ分散関係の数値計算は、固有値解析における不要な解を避け、計算コストを向上するために部分的な対角化という演算を新たに導入した。この結果、解の安定性と計測時間短縮を得た。そして、本研究の目的であった複数種イオンやホットプラズマを考慮したプラズマ拡散を評価できるようになった。今後の課題は、実際の観測データに基づいたプラズマ拡散を評価し、高エネルギーで密度が低い条件と、低エネルギーで密度が高い条件で、どちらが大気電離にインパクトを与えるかの境界条件を探索することが挙げられる。また、地球周辺環境への適用だけでなく、太陽に最も近い惑星である水星には重イオンで構成される外気圏が構成されており、水星環境への理解にも貢献が期待される。このため、水星探査の国際会議にも研究情報収集のため参加し、有意義な研究情報交換ができた。

参考文献

Ozaki, M., Shiokawa, K., Kataoka, R. *et al.* Localized mesospheric ozone destruction corresponding to isolated proton aurora coming from Earth's radiation belt. *Sci Rep* **12**, 16300 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20548-2>

H.S. Xie, BO: A unified tool for plasma waves and instabilities analysis, *Comput. Phys. Comm.* 244 (2019) 343-371.

成果発表

Mitsunori Ozaki, Cyclotron plasma wave-particle interaction in geospace and its induced ozone destruction, SICETO 2023, Indonesia, Oct. 2023 (基調講演).

近藤 岳琉、尾崎 光紀、八木谷 聡、複数種イオンと熱的粒子の影響を考慮したプラズマ波動分散関係の数値解析評価、「太陽地球系物理学分野のデータ解析手法、ツールの理解と応用」研究集会、2023/11/09、10、京都