



HOKKAIDO
UNIVERSITY

地球大気再突入時における小型衛星の空力加熱・電磁波挙動解析に対するCFD-FDTDソルバーの特性評価

高橋裕介, 北海道大学 大学院工学研究院

榎尚也, 北海道大学 大学院工学院

松永学, 北海道大学 大学院工学院

大島伸行, 北海道大学 大学院工学研究院

先駆的科学計算に関するフォーラム2017
九州大学伊都キャンパス, 福岡

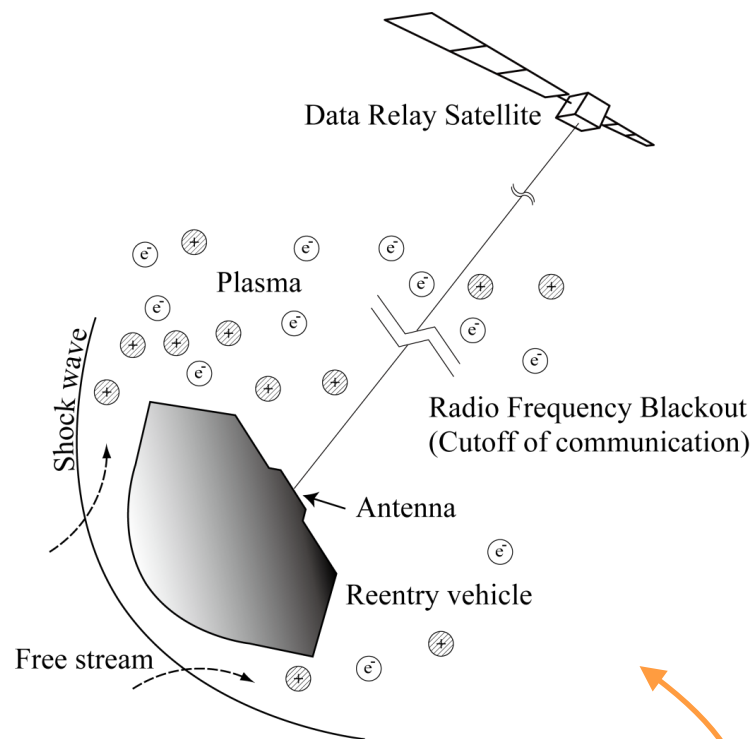
2017/04/28

再突入時における人工衛星の通信途絶現象

- 再突入機近傍プラズマの存在によって、電磁波の反射や回折、減衰が生じ、その進行が阻害される。
- 再突入機と地上局・データ中継衛星とのコミュニケーションが断絶（通信ブラックアウト）

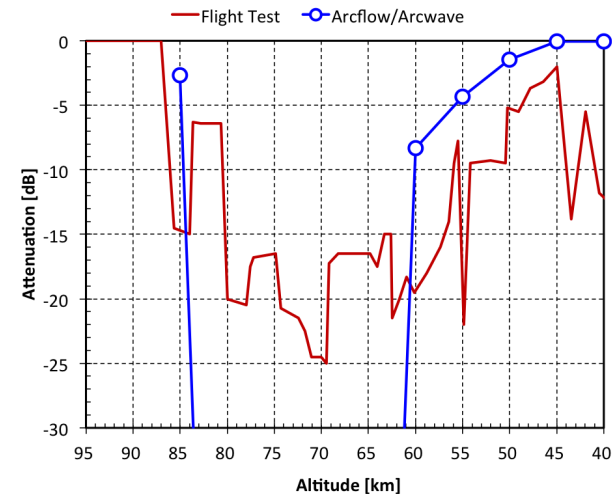
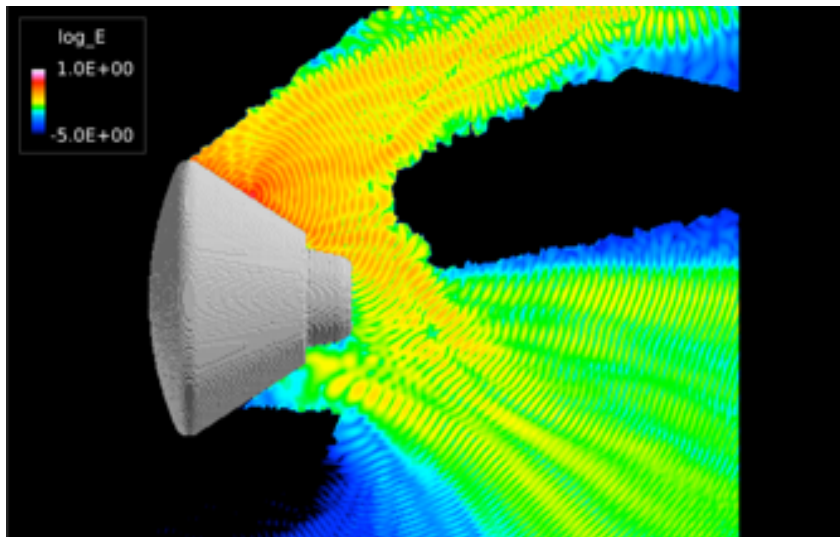


- 再突入機の位置同定が困難になるといった問題が現れる
- 通信ブラックアウトの低減化が重要



ブラックアウト予測ツール

- これまでの研究では、CFDによる臨界電子数密度を調査するところにとどまっていた。
- 再突入機近傍の**プラズマ流と電磁波挙動**を明らかにし、通信ブラックアウト評価を行うツールの開発。



再突入カプセルARDを対象に電磁波挙動の解析と検証

“EGG” ミッション

- ISS 「きぼう」 からの超小型衛星放出ミッション

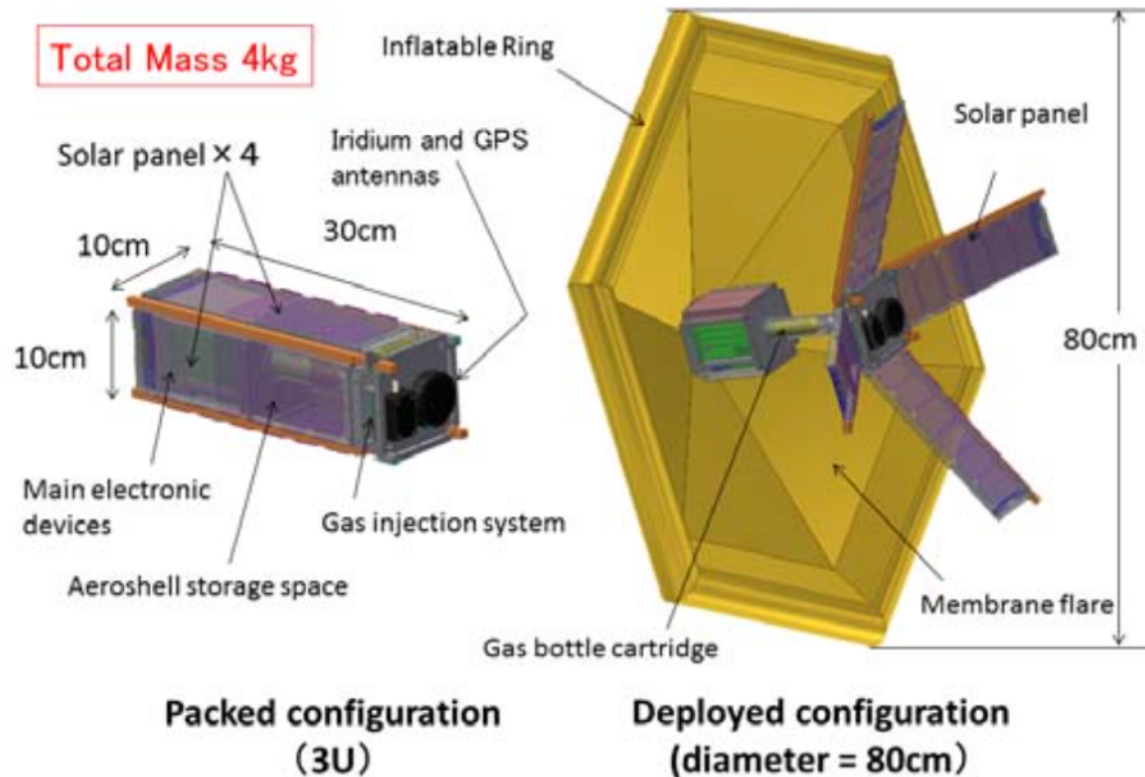


Fig. 3. Schematic view of EGG in packed and deployed configuration

ISSからのEGG放出



超小型衛星EGG衛星のISS放出

<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/20170116-cubesat6.html>

- 2017/1/16(JST)にISS放出
- 現在、地球低軌道を周回しつつ空力減速により高度低下中 (~350 km)

研究の目的

再突入時における通信ブラックアウト・プラズマ減衰挙動を調べる実験的機會

- 数値解析を用いてEGG衛星の電磁波挙動を調べる



- 解析モデルの検証機會
- 通信ブラックアウト低減化の知見

プラズマ流の物理・解析モデル (CFD)

- 流れ場の仮定：
層流・定常・連続・熱化学的非平衡流
- 支配方程式：
Navier-Stokes方程式・状態方程式
- **RG-FaSTAR**：非構造格子対応の高エンタルピー流ソルバー
(JAXA・北大間での研究の枠組みで開発・運用)

電磁波の物理・解析モデル (FD2TD)

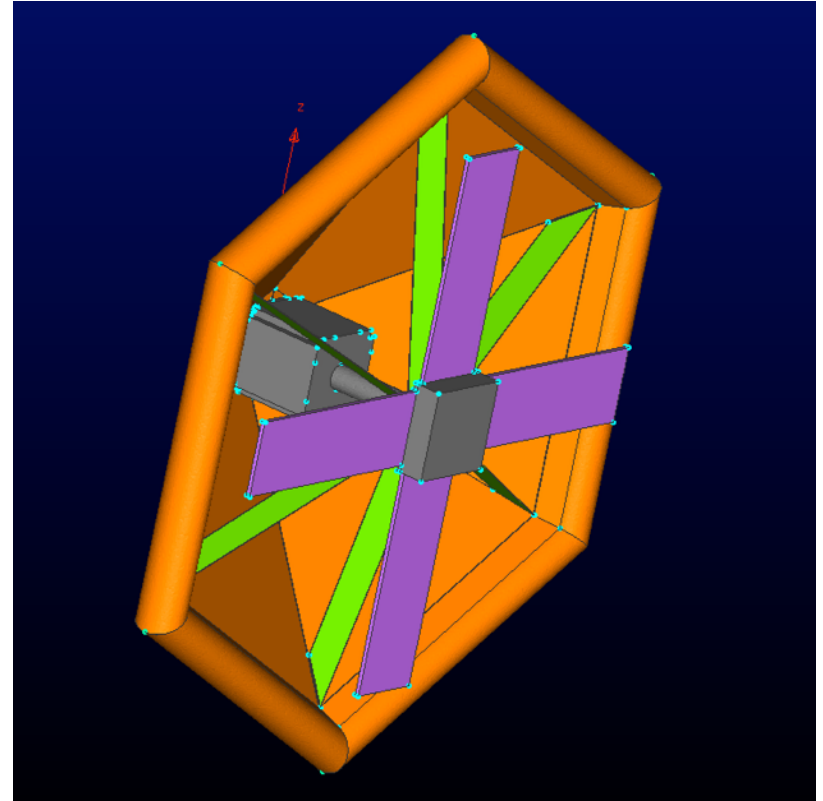
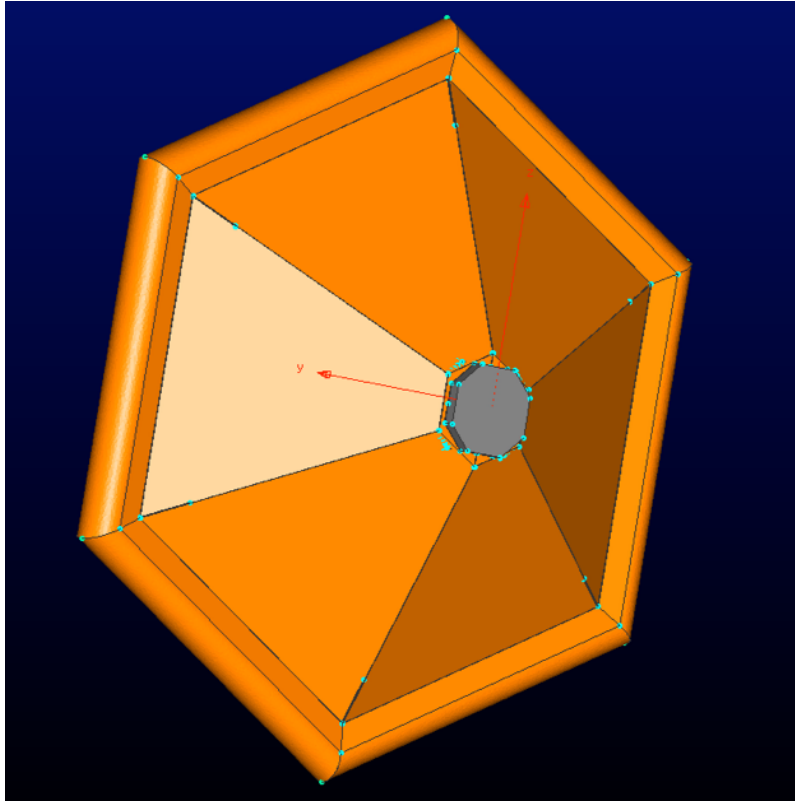
Maxwell's equations:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_{\text{em}}, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0.$$

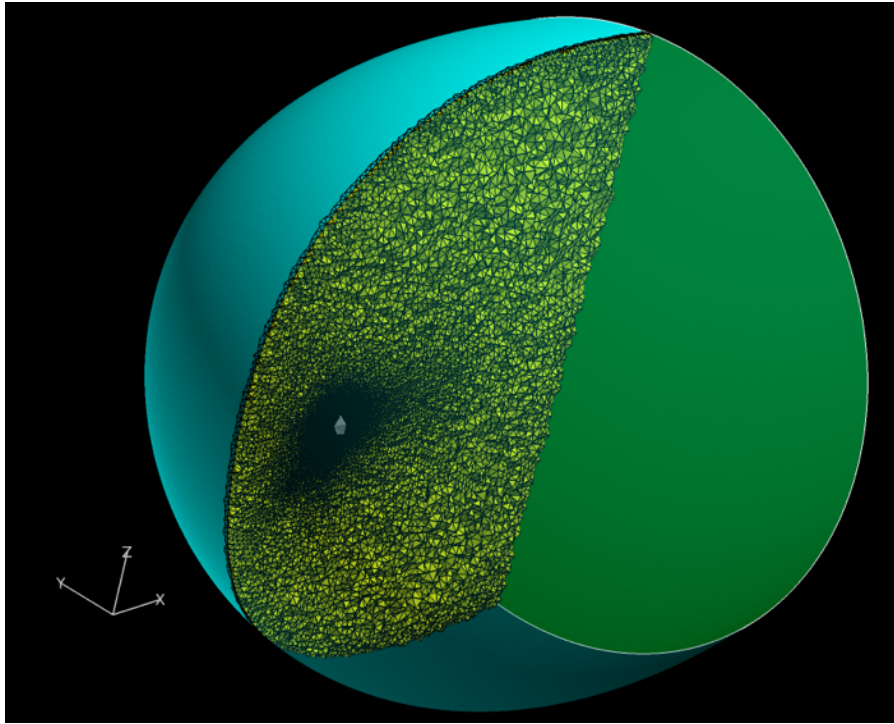
- FD2TD (Frequency-Dependency FDTD)法による電磁波解析
- プラズマのような分散性（周波数依存）媒質において有効
- プラズマパラメータ：誘電率や電気伝導率（CFD結果をマッピング）
- シミュレーションコード：[Arcflow/Arcwave](#)

EGG解析モデル

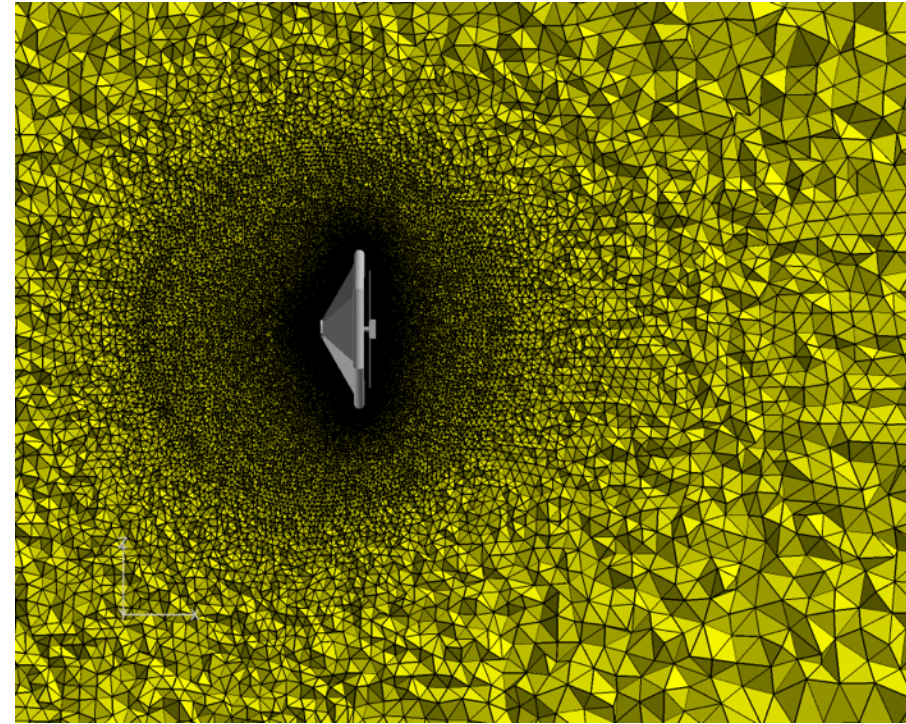


- カプセル、エアロシェル、太陽電池、仕切り膜

計算領域・格子 (CFD)



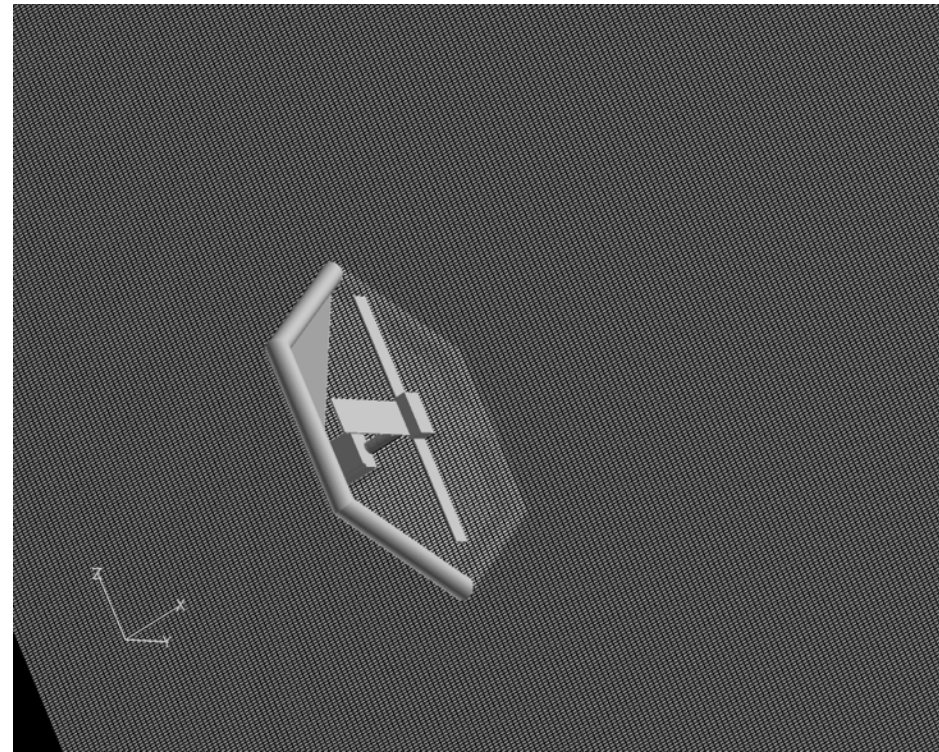
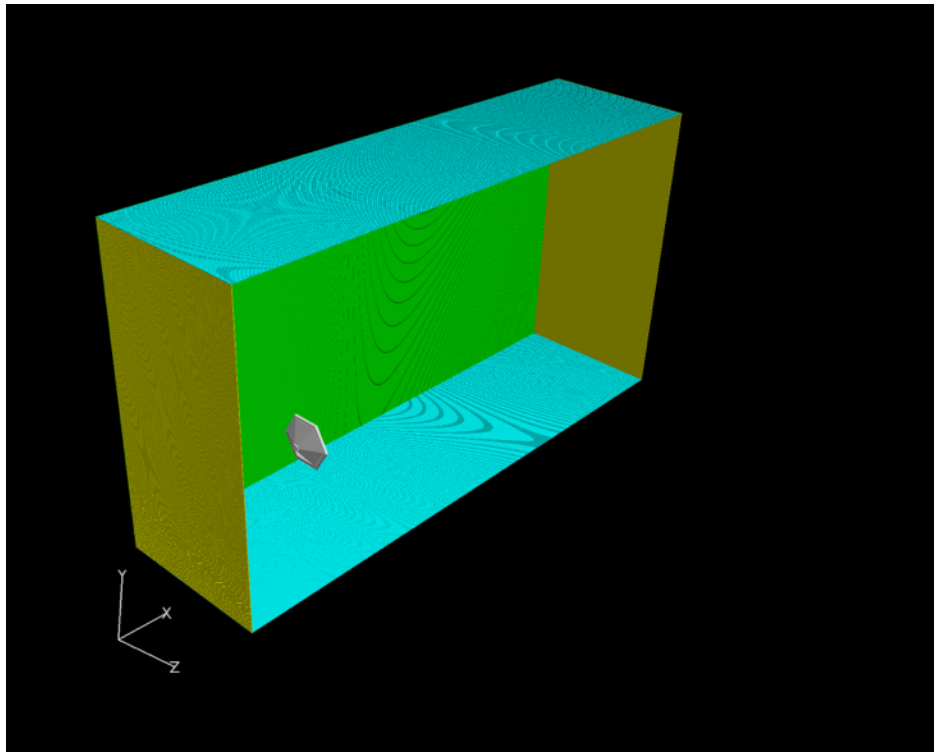
Boundaries



Computational grids

- 計算格子：17,650,727セル数・2,983,592ノード数
- Tetrahedral meshにて作成

計算領域・格子 (FD2TD)

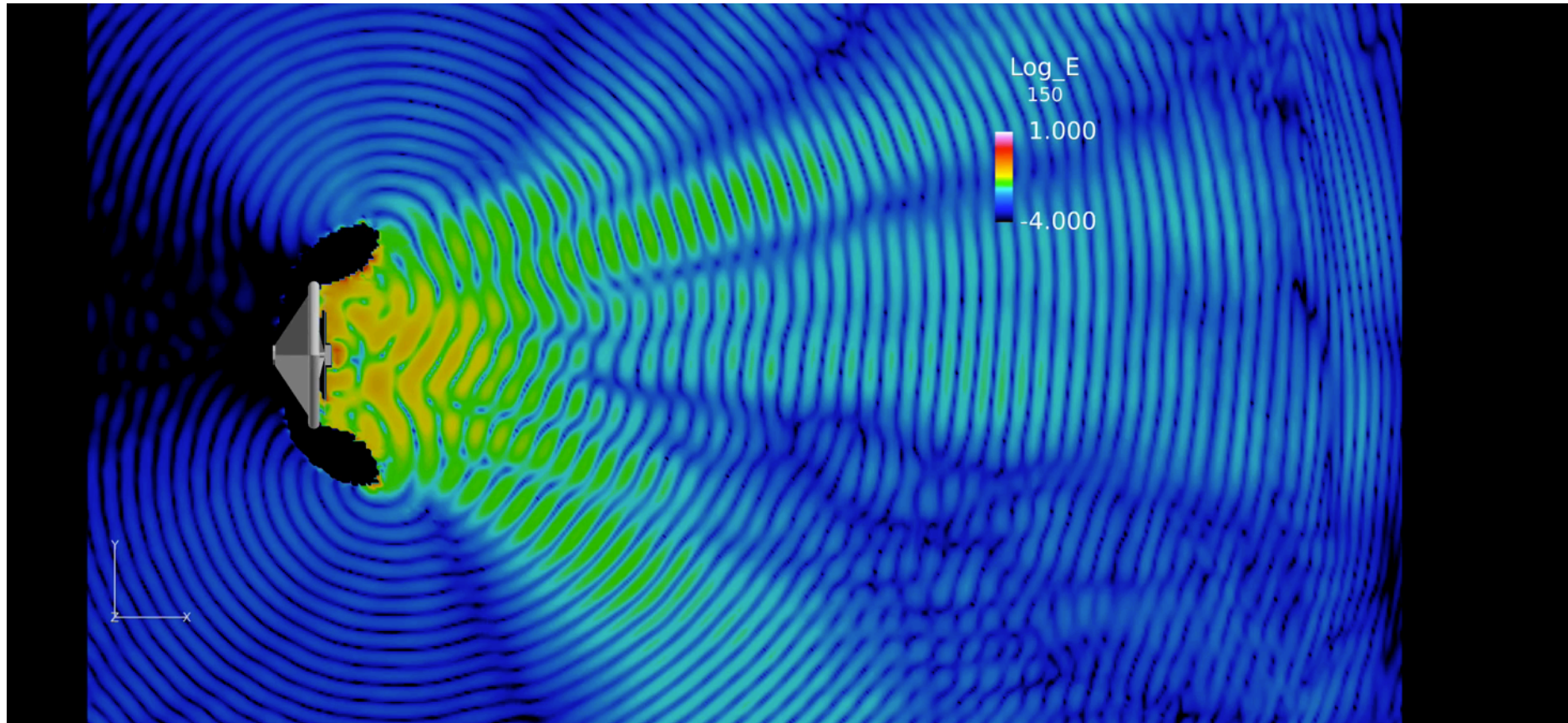


- 計算格子点数：750x750x750 (42,1875,000 ノード)
- Hexahedral mesh (直方体格子)で作成
- 通信電磁波の周波数：1.6GHz (GPS, Iridium network)

計算リソース

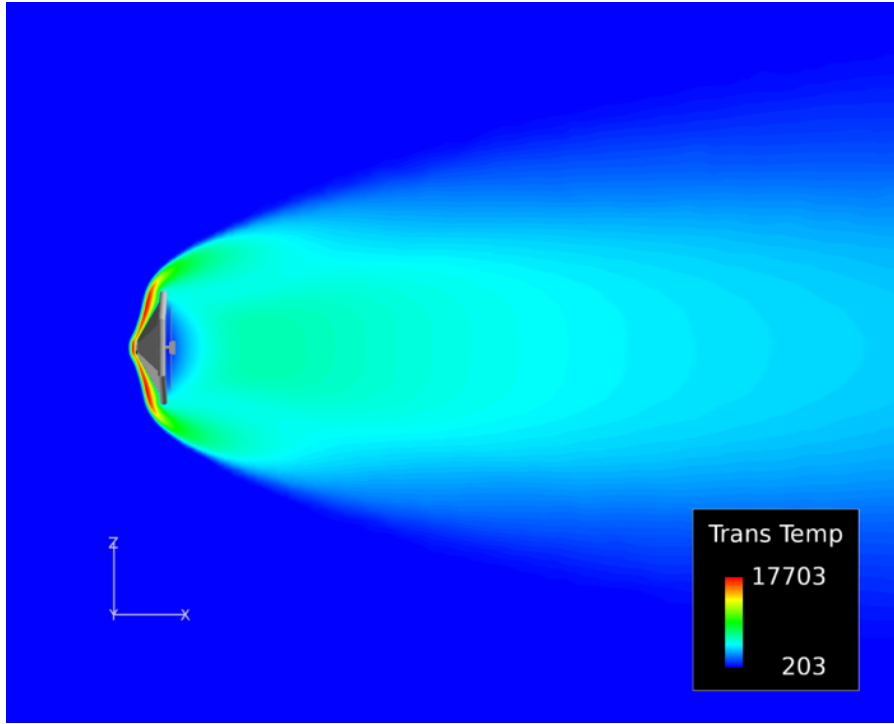
	Fujitsu PRIMERGY CX400 S1 (tatara)
ノード数	128
メモリ容量	113 GBx128
ディスク領域	145,920 GB
期間	H29.1~H29.3

電磁波の挙動 (animation)

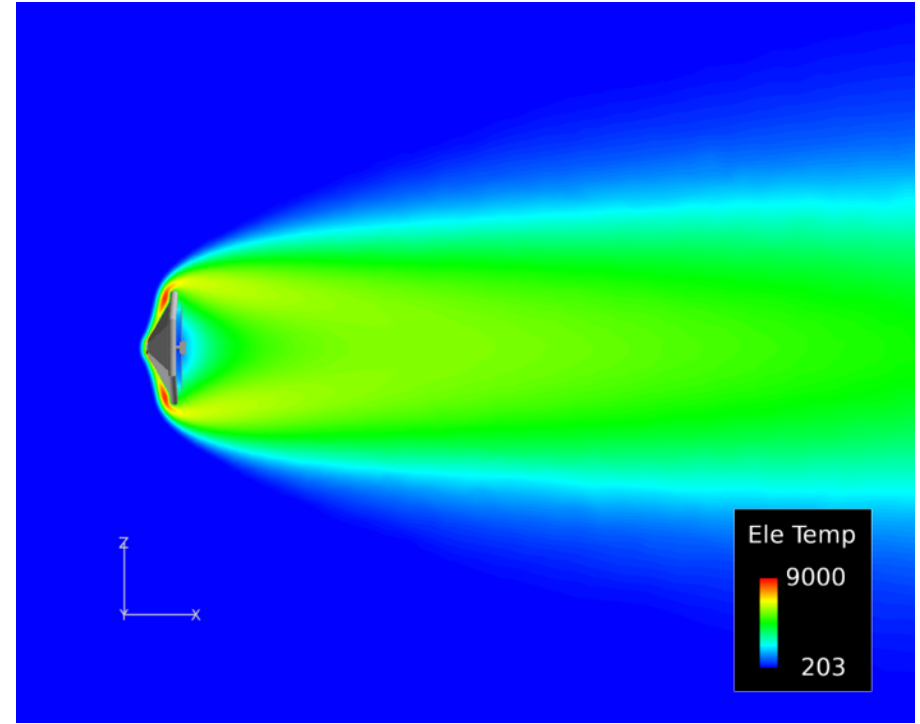


- Computational nodes: 500x300x300 case

プラズマ流：温度分布（高度85km）

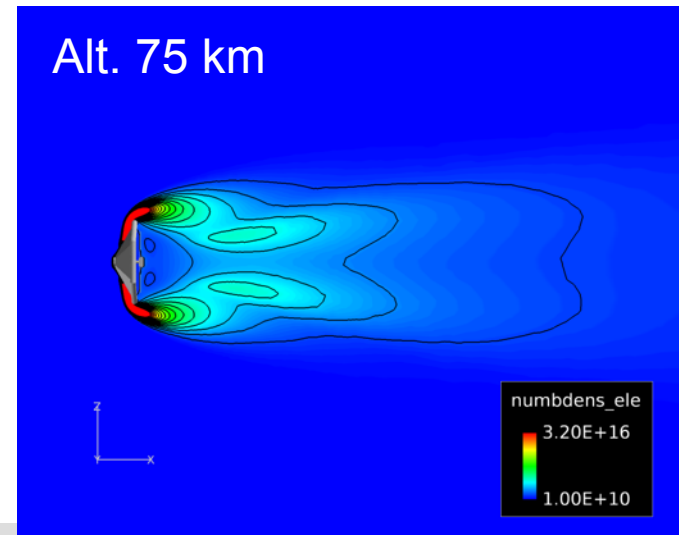
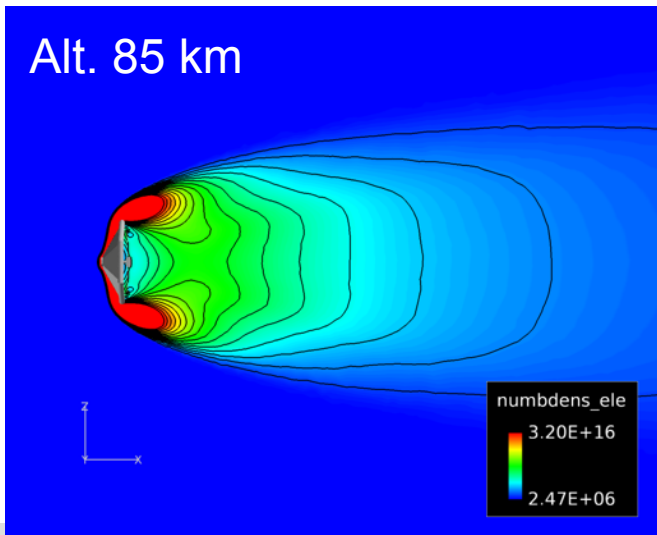
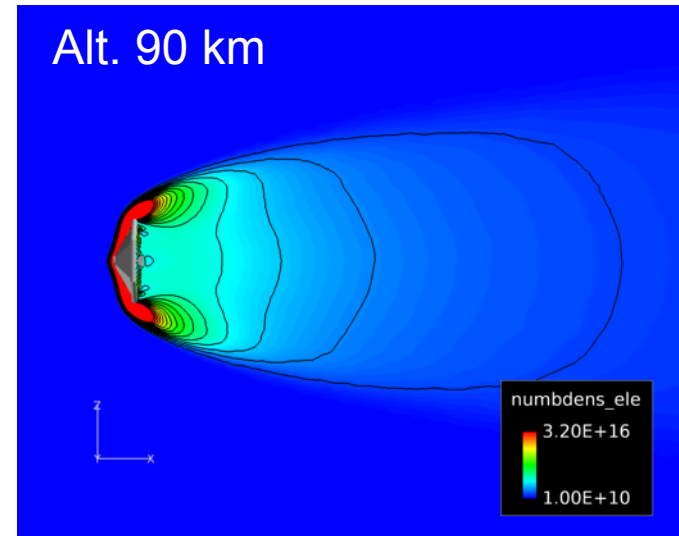
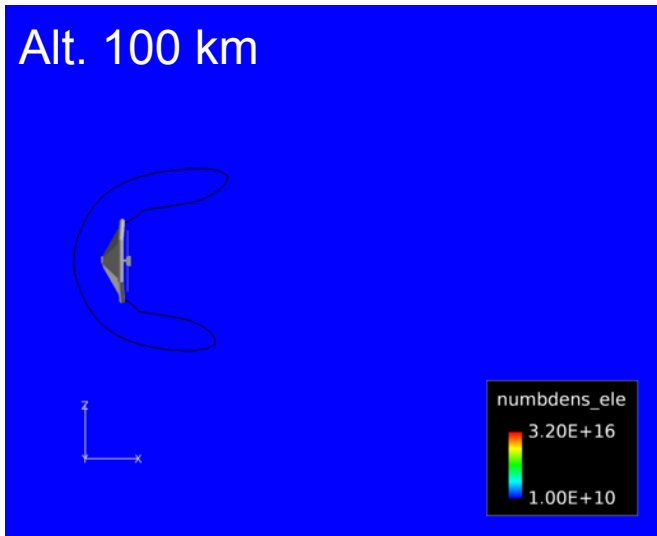


Translational temperature



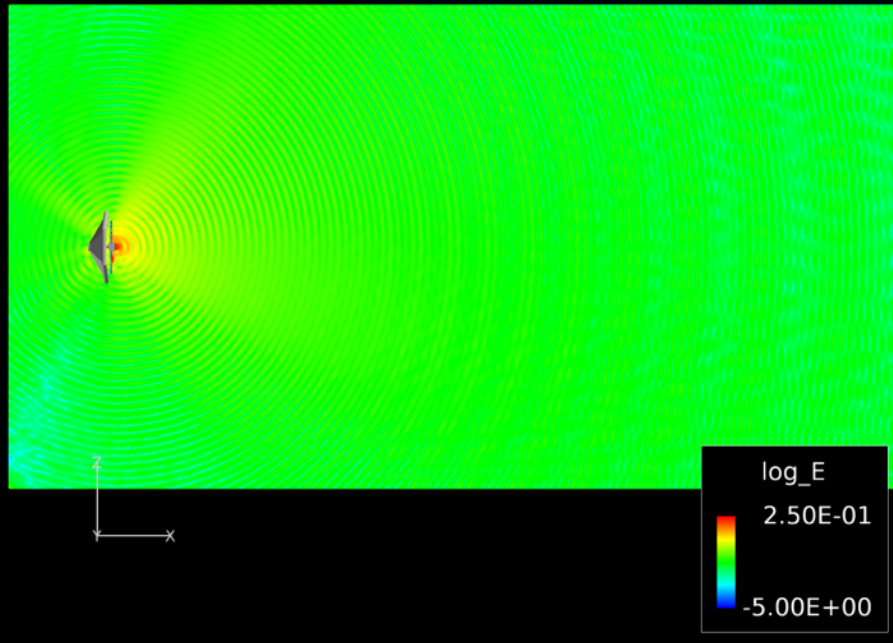
Electron temperature

プラズマ流：電子数密度の分布

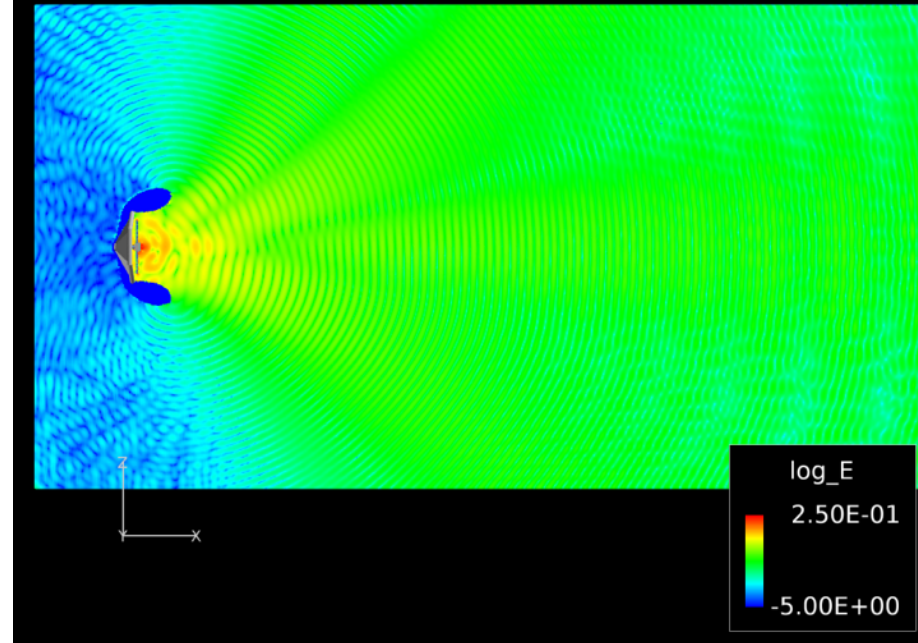


電磁波挙動：電磁場の絶対値分布

Freespace (no plasma)

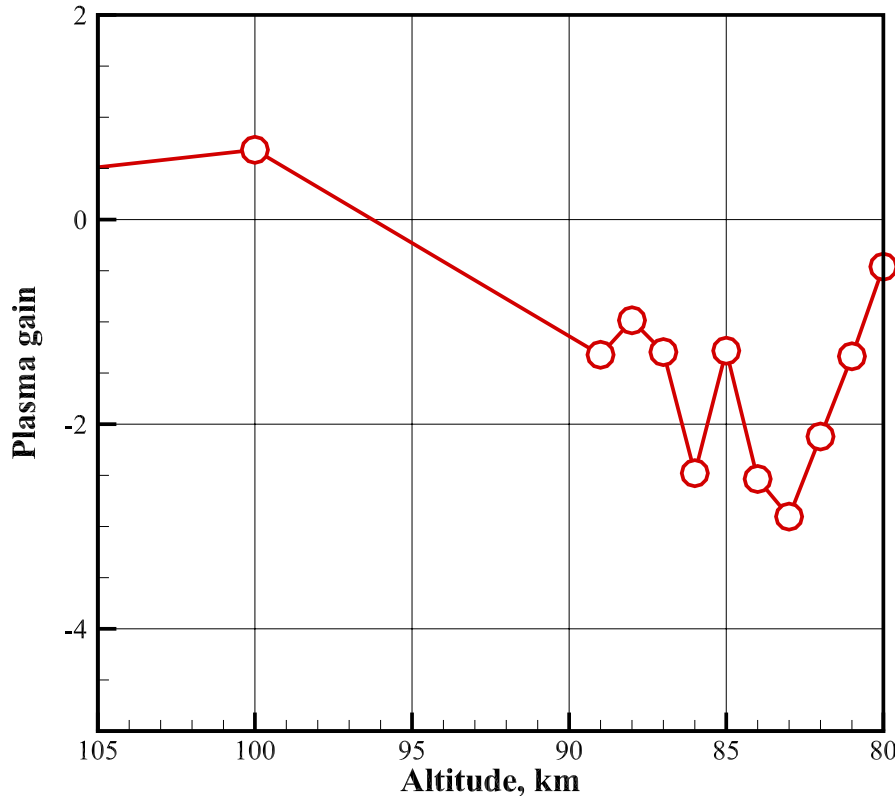


Alt. 85 km



- 高度85kmケースでは、前方衝撃波によるプラズマに起因して、電磁波の反射・回折・減衰が生じる。

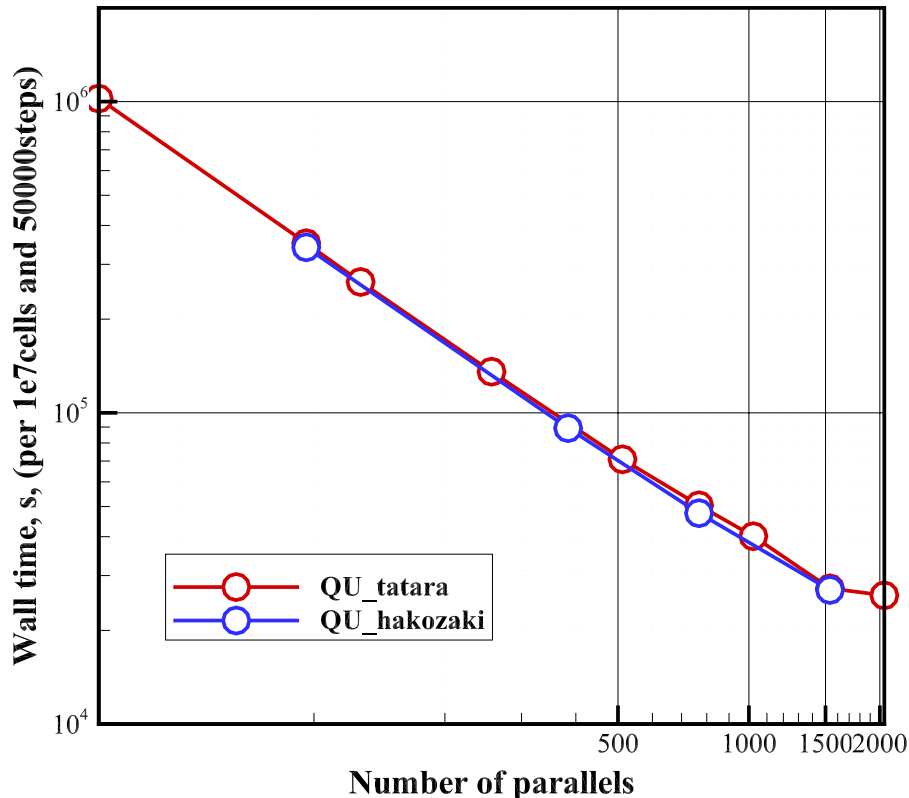
電磁波のプラズマ減衰値



$$G_{pa} = 10 \log \left(\frac{I_{bd}^2}{I_{bd,free}^2} \right).$$

- EGG衛星背面方向の電磁波のプラズマ減衰ゲインプロファイル
- 高度 90—80kmで減衰が確認されるが、再突入期間においてブラックアウトは生じないと予想

並列計算の効果 (CFD)



- 基準ステップ(50000 step)・基準格子セル数(1000万セル数)で規格化
- -->1000万セルの計算格子に対して50000ステップ計算するのに要する実時間

まとめ

- 超小型衛星EGG近傍に現れるプラズマ流・電磁波挙動を数値的に再現するための手法を構築した。
- 再突入時におけるプラズマによる電磁波減衰メカニズムを調べた、EGG衛星では再突入時における通信ブラックアウトは生じないと予想される。

謝辞

- 本研究はJSPS科研費15H04205の助成を受けて行われた。
- 本解析は九州大学情報基盤センターの平成28年度先端的計算科学研究プロジェクトの支援を受けて行われた、また下記の計算機を利用した：
 - 九州大学情報基盤研究開発センター・高性能演算サーバーシステム(Fujitsu PRIMERGY CX400)
- 本解析結果は宇宙航空研究開発機構が所要する高速流体解析ソフトウェア「FaSTAR」を利用することにより得られた。