

第三回「高エネルギー電磁ビームに誘起される放電とその工学的応用」
研究会／第五回マイクロ波ロケット研究会

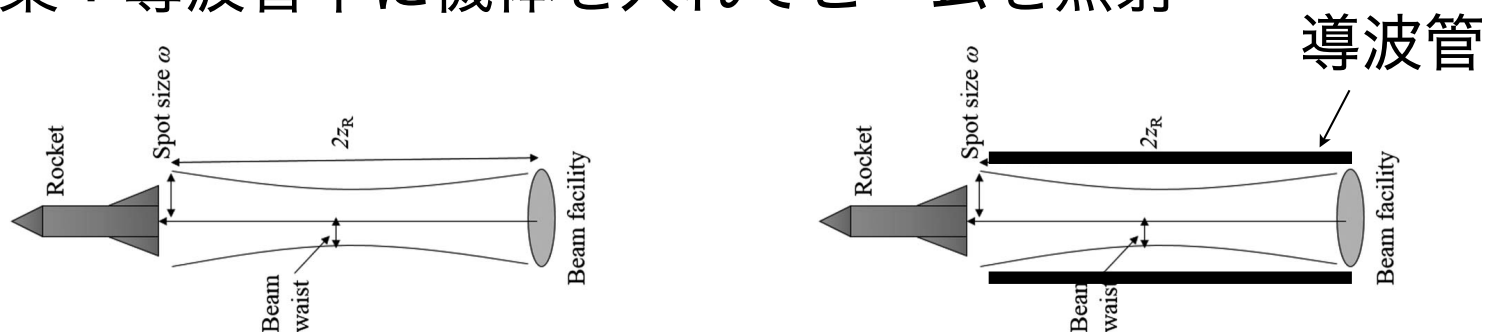
Microwave-driven In-Tube Accelerator (MITA) の検討

東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻
高橋聖幸

マイクロ波ロケットの問題点と対策案

- ビームが発散し，長距離伝送が困難

対策案：導波管中に機体を入れてビームを照射



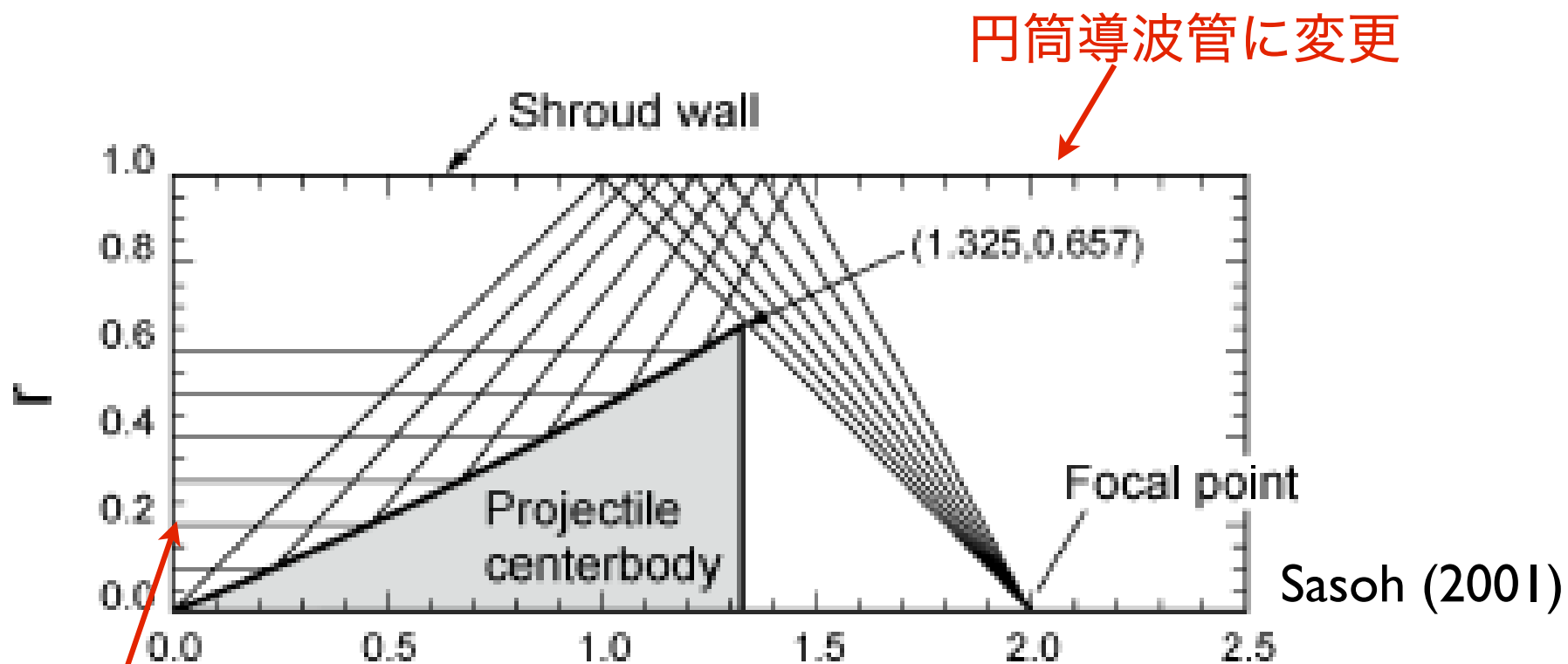
- 繰り返しパルス照射時はノズル内部に停留するプラズマが邪魔

対策案：ビームを機体前方から照射し，プラズマは後方へと排気



Laser-driven In-Tube Accelerator (LITA) を応用出来ないか？

Microwave-driven In-Tube Accelerator (MITA) の提案



円筒導波管に変更

マイクロ波を照射

プラズマは機体後方へ排気

研究目的と今回やった事

MITA によりどの程度の C_m が得られるかを見積もる

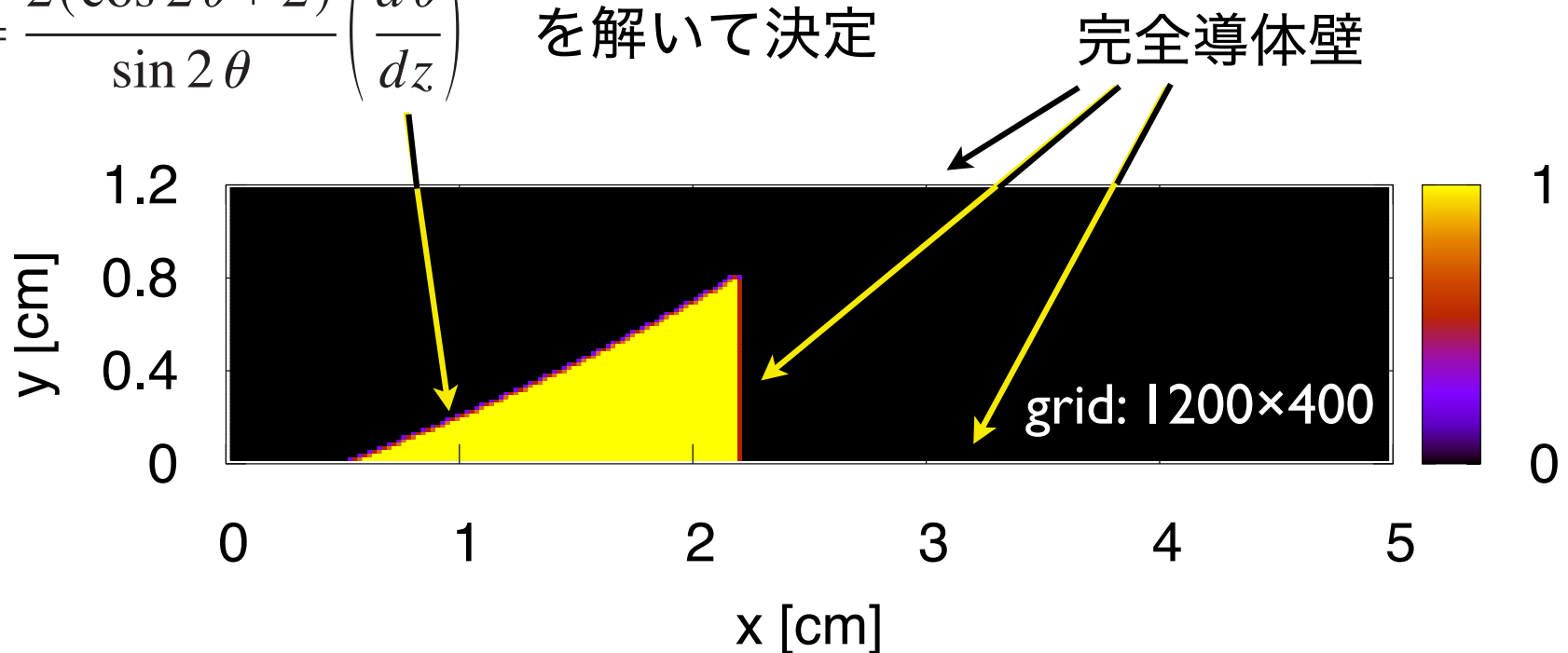
- レーザーは集光出来たがマイクロ波は集光可能か？
2次元 FDTD 計算を行い，機体前方からビームを照射して
集光可能かを調査（軸対称計算を行いたかったが，間に合わず）
- 推力の推算（LITA と比べて良いのか悪いのか？）
プラズマ反応移流拡散方程式を解き，エネルギー吸収率を算出
2次元軸対称 Navier-Stokes 計算を行い，推力を概算

光学系設計の為の計算手法, 計算条件

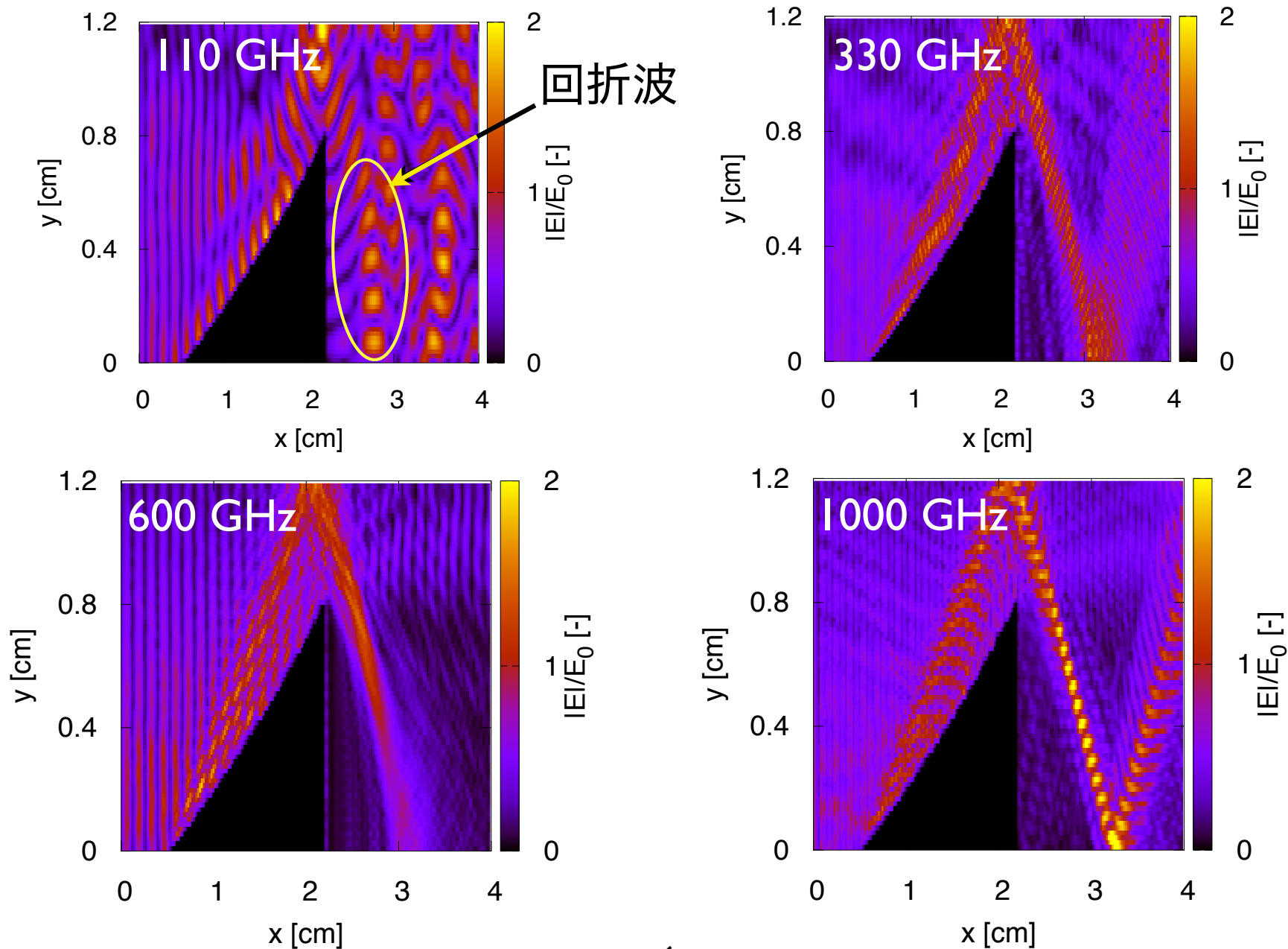
- 支配方程式と計算手法 : Maxwell 方程式を FDTD 法で解く
- 照射マイクロ波周波数 : 110 GHz, 330 GHz, 600 GHz, 1000 GHz
- 照射マイクロ波電界強度 : 1 MV/m ($\sigma=0.1$ cm のガウス分布)

$$\frac{d^2 \theta}{dz^2} = \frac{2(\cos 2\theta + 2)}{\sin 2\theta} \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2$$

を解いて決定



MITA におけるビーム集光の可否



エネルギー吸収率算出の為にプラズマ計算手法

- 2 流体移流拡散方程式

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (-\mu_e n_e \mathbf{E}_{sp} - D_e \nabla n_e) = n_e \nu_i$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\mu_i n_i \mathbf{E}_{sp} - D_i \nabla n_i) = n_e \nu_i$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E}_{sp} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

- 数値流束

Scharfetter-Gummel 法

- 時間積分

オイラー陰解法

- 輸送係数テーブル

PIC-MCC 計算から作成

- Maxwell 方程式 (FDTD 法)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

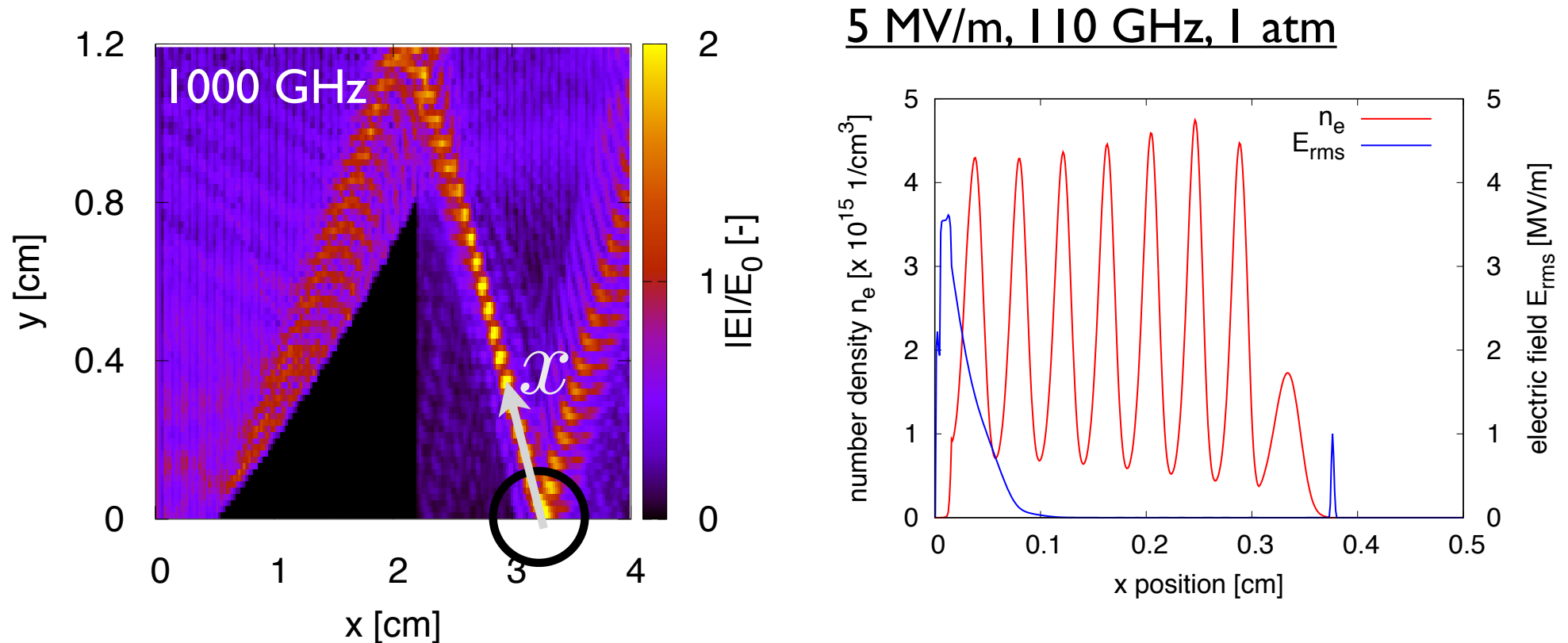
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

- 電子電流密度 (Leap-Frog 法で積分)

$$\mathbf{J} = -en_e \mathbf{v}_e$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_e}{\partial t} = -\frac{e\mathbf{E}}{m_e} - \nu_e \mathbf{v}_e - \frac{e(\mathbf{v}_e \times \mathbf{B})}{m_e}$$

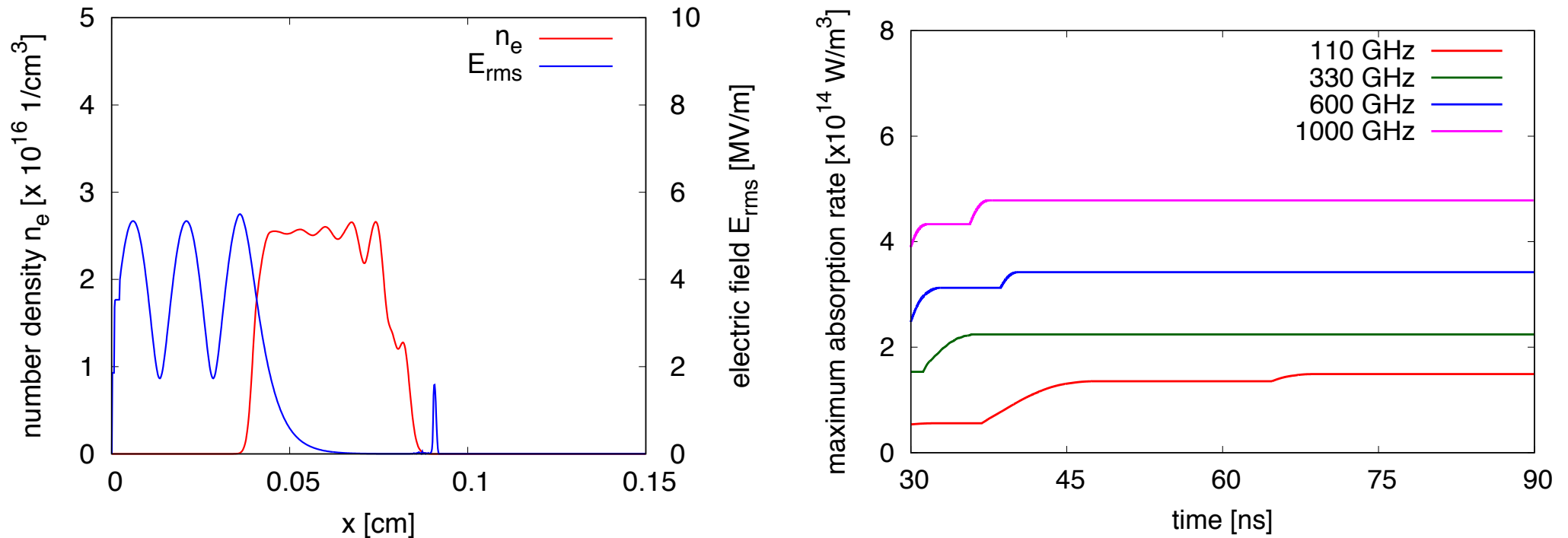
プラズマ伝搬を再現する為の計算条件



- 仮定1: 1次元的にエネルギー吸収が行われる
- 仮定2: 集光点では 5 MV/m の電場強度 (1.5 MW beam@Hidaka ら)
- 仮定3: 電離波面での局所電場が亜臨界となる前にビーム照射が終了

1000 GHz ビーム照射時の電離構造とエネルギー吸収率

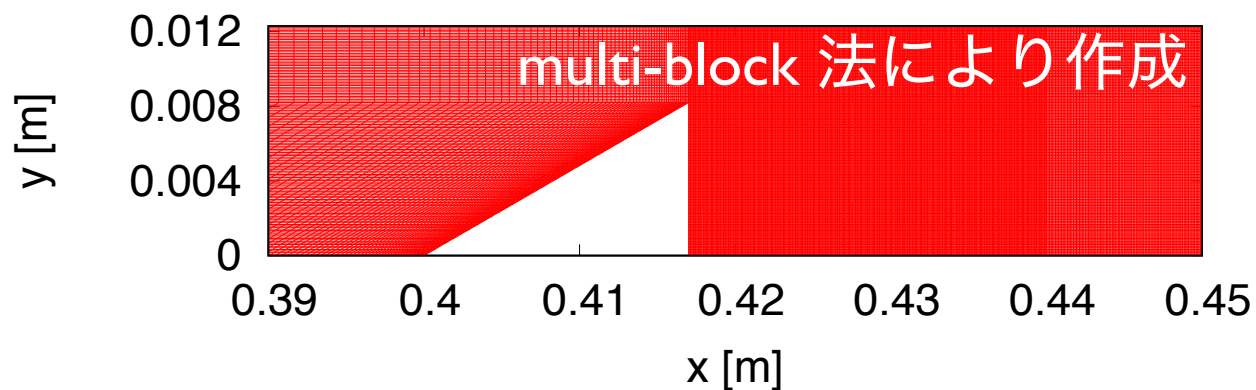
5 MV/m, 1000 GHz, 1 atm



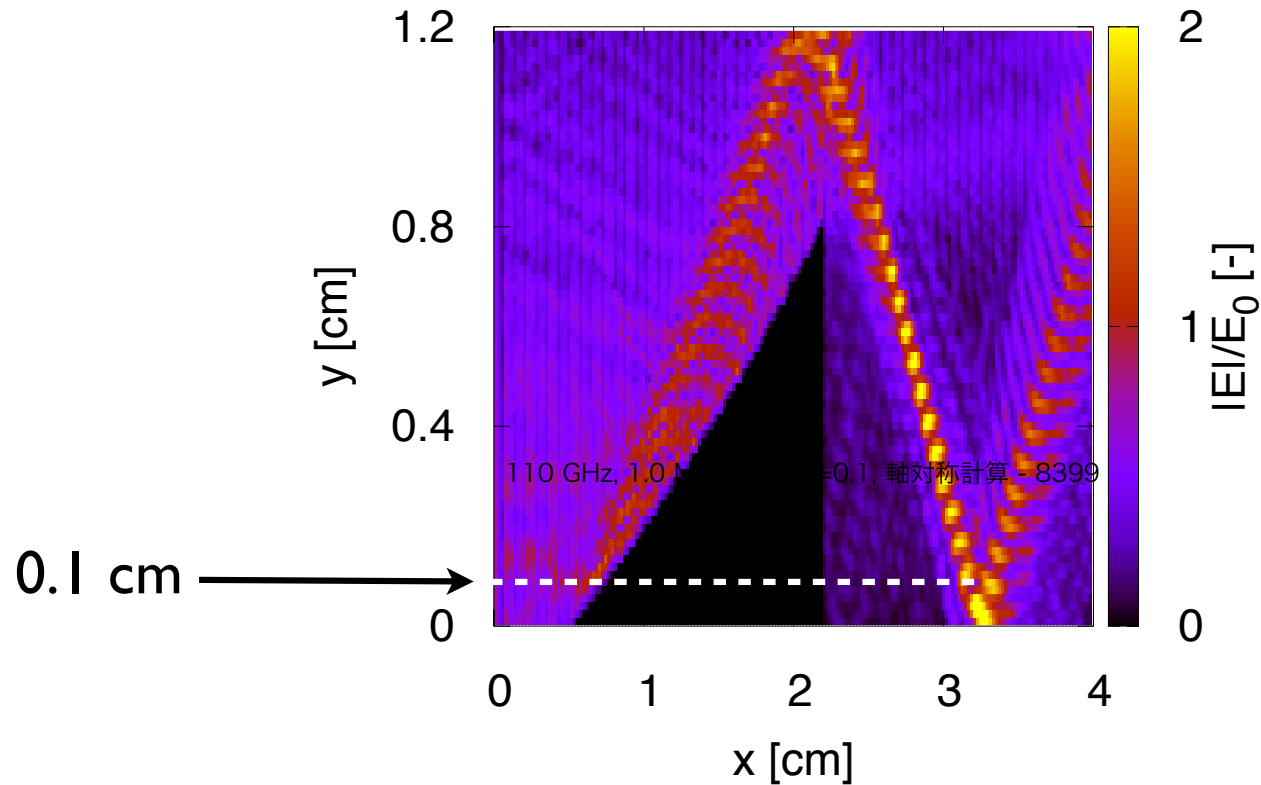
- カットオフ密度が上昇するため、最大電子数密度が増大する
- カットオフに達するまでに時間を要し、その間に電子が拡散
- 周波数が弾性衝突周波数に近づき、エネルギー吸収率が増大

推力算出の為の流体計算手法

- 支配方程式：2次元軸対称圧縮性 Navier-Stokes 方程式
- 空間離散化：セル中心有限体積法
- 非粘性数値流束：AUSM-DV 法 with 2nd-order MUSCL 法
- 粘性項：2次精度中心差分
- 乱流モデル：全面乱流を仮定した Spalart-Allmaras モデル
- 時間積分：オイラー陽解法



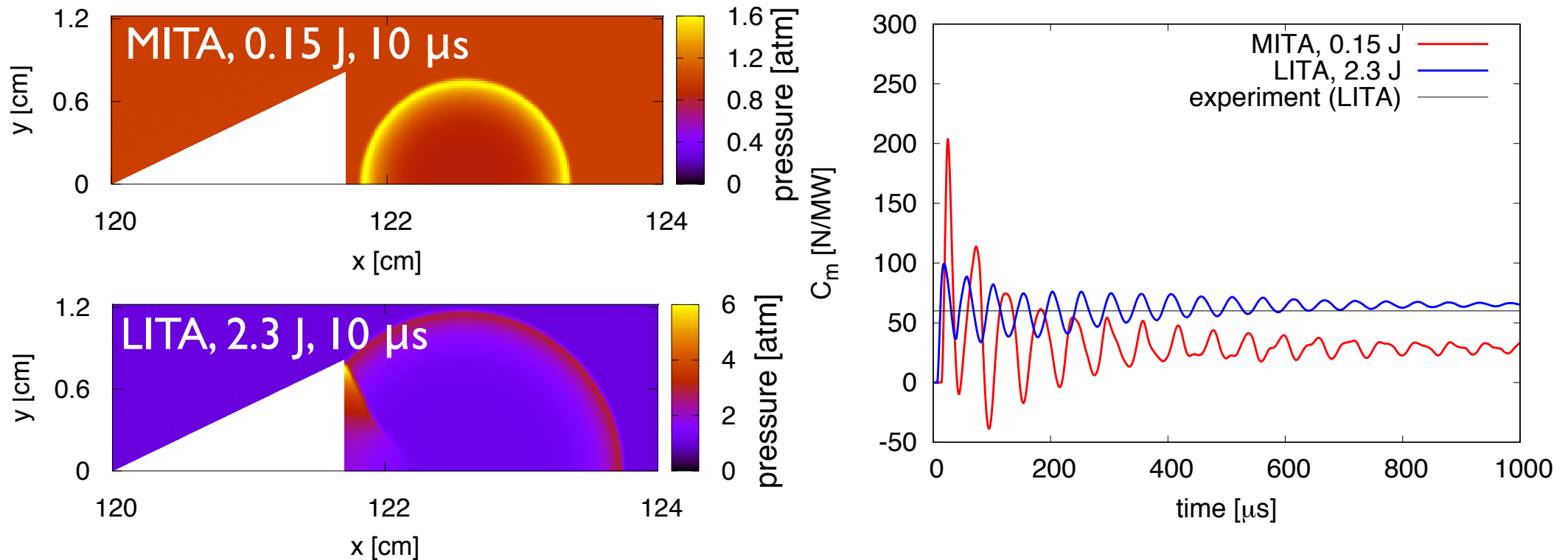
CFD 計算における加熱項のモデル化



- 加熱領域は半径 $R = 0.1$ cm 程度で球状に広がると仮定
- ビーム照射は $\tau = R/U_i$ で終了 ($U_i = 13.5$ km/s, $\tau = 74$ ns)
- 投入 Energy: $E_{abs} = P_{abs}\tau(4/3\pi R^3)$

$$P_{abs} = 4.79 \times 10^{14} \text{ W/m}^3 \text{ とすると } E_{abs} = 0.149 \text{ J}$$

MITA と LITA における推進性能の比較



- MITA と LITA における衝撃波伝搬を CFD により再現
- LITA: 60 N/MW, MITA: 30 N/MW であり同程度の C_m を獲得可能

まとめ

- 直径 1.6 cm の機体に対しては 1000 GHz ビームを照射すると回折の影響を受けることなくビーム集光が可能
- 330 GHz ビーム照射時は、回折等による集光斑を防ぐために機体直径を 4.8 cm 程度にすべきだと思われる
- 高周波数ビーム照射時は電離構造が拡散的になる
- ビーム周波数が弾性衝突周波数に近づくため、1 atm 下では 110 GHz よりも 1000 GHz ビームを照射した方がプラズマのエネルギー吸収率が高い
- MITA は LITA に匹敵する C_m を生成する事が可能