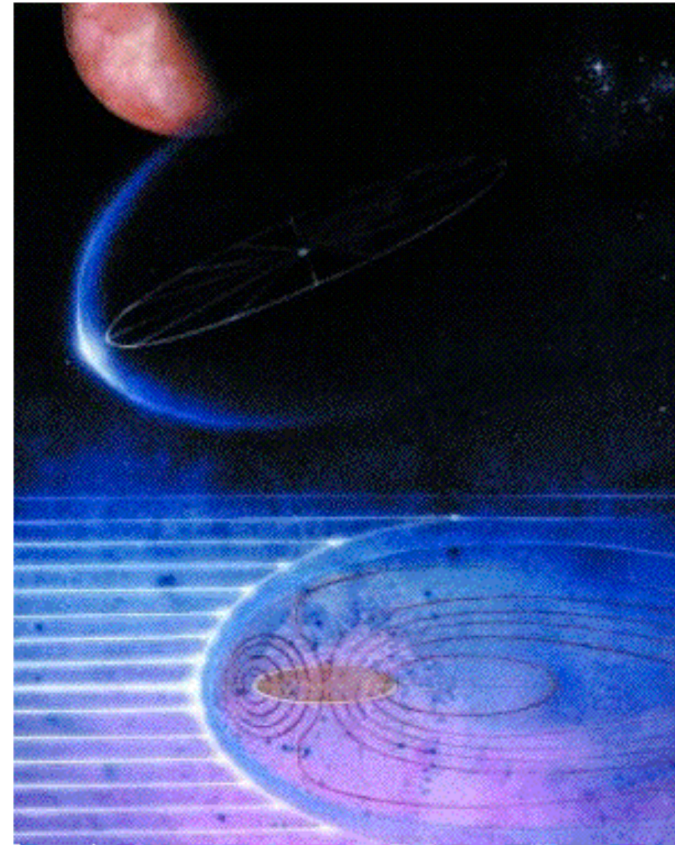


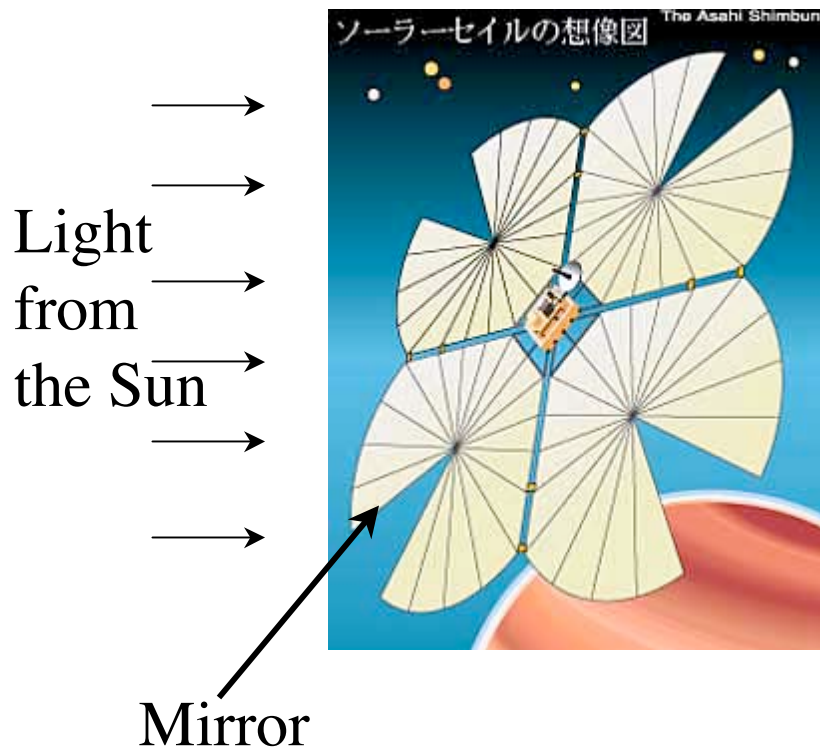
2004.3.28 物理学会シンポジウム

磁気プラズマセイル の可能性と 深宇宙探査への挑戦

宇宙航空研究開発機構
船木一幸

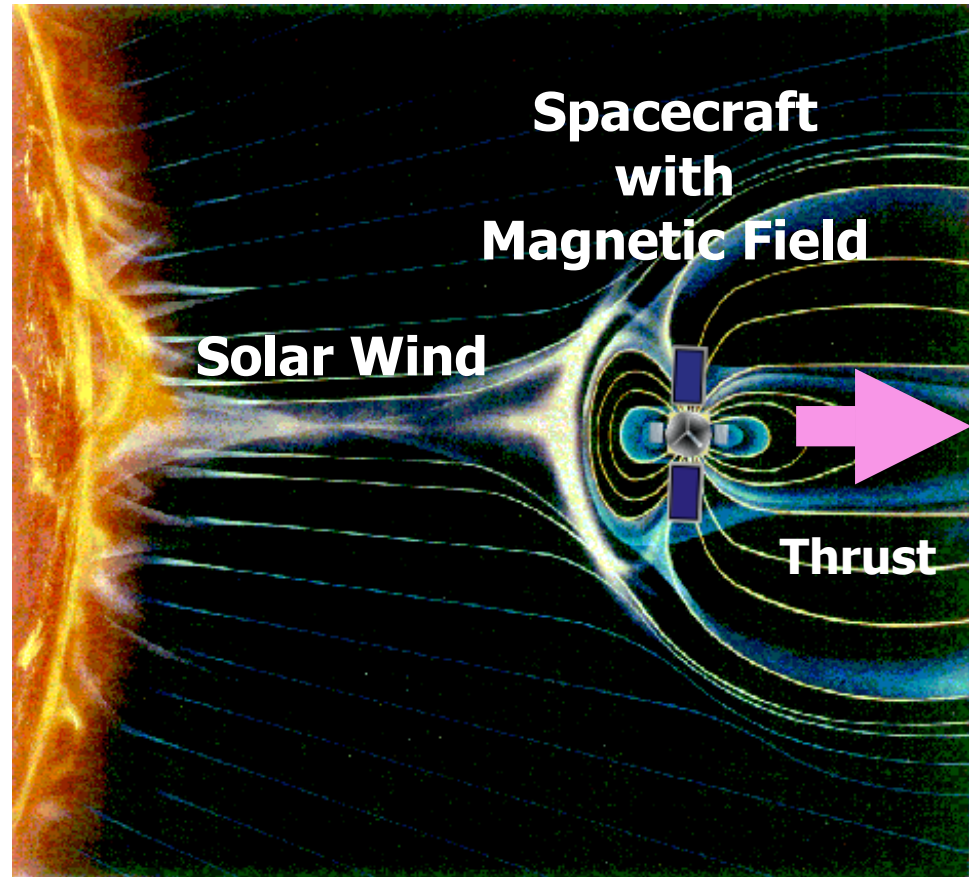


Spacecraft Propulsion Using Solar Energy



Solar Sail

Thrust production by light pressure



Magnetic Sail

Thrust production by the solar wind dynamic pressure

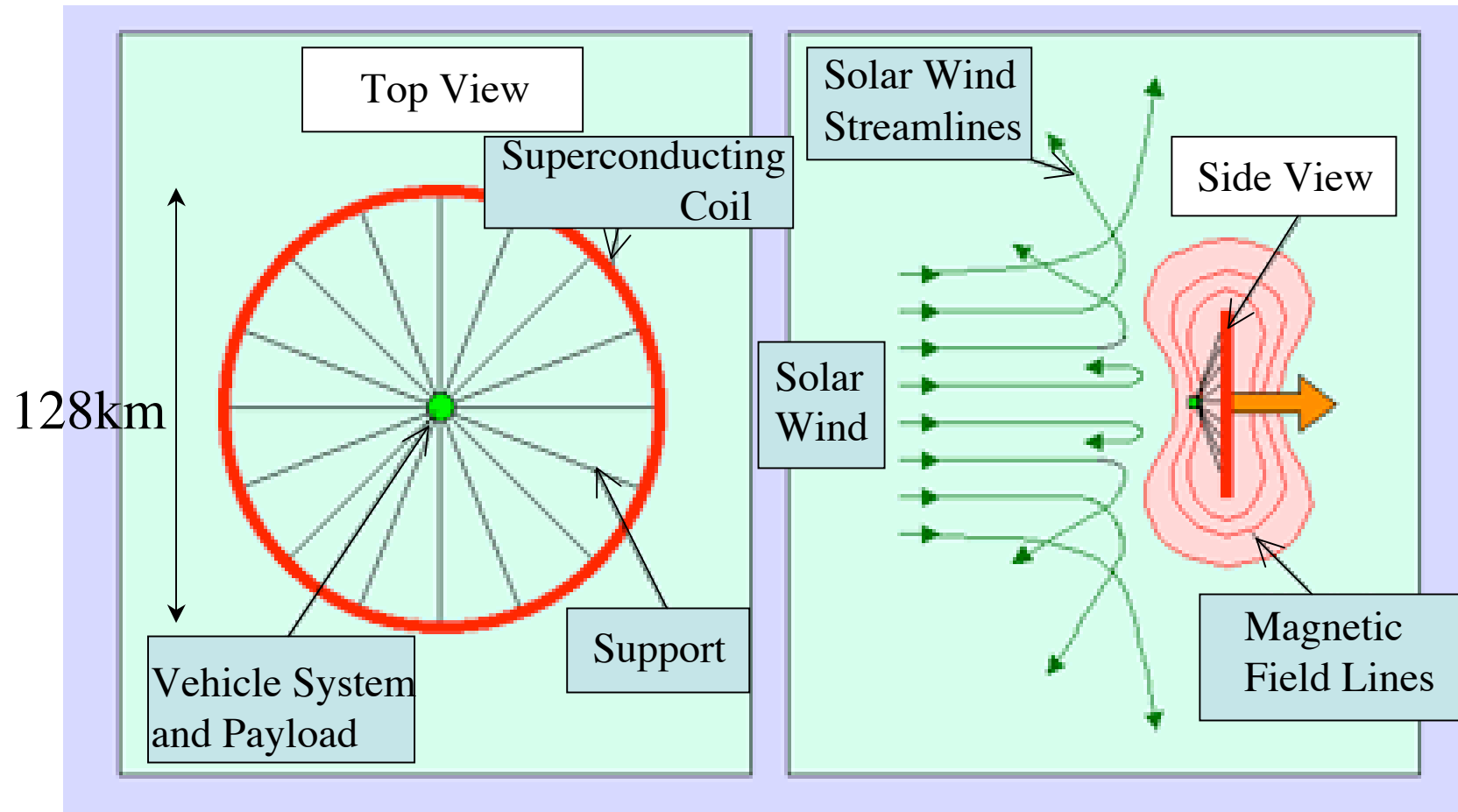
**1.磁気セイルとは？
プラズマセイルとは？**

発表の構成

1. 磁気セイルとは？プラズマセイル(MPS)とは？？
2. MPSの推力発生メカニズムの解析
 - ・ 太陽風から磁場への運動量移動
 - ・ 磁場Inflation
3. 今後の課題とまとめ

なお、本発表はJAXA/MPS研究会での検討に基づくものである。
研究会のメンバー（山川 宏、小川博之、藤田和央、野中 聡、
國中 均、大津広敬、中山宜典、中島秀紀 の各先生および学
生さん達）に感謝します。

Original Idea of Magsail



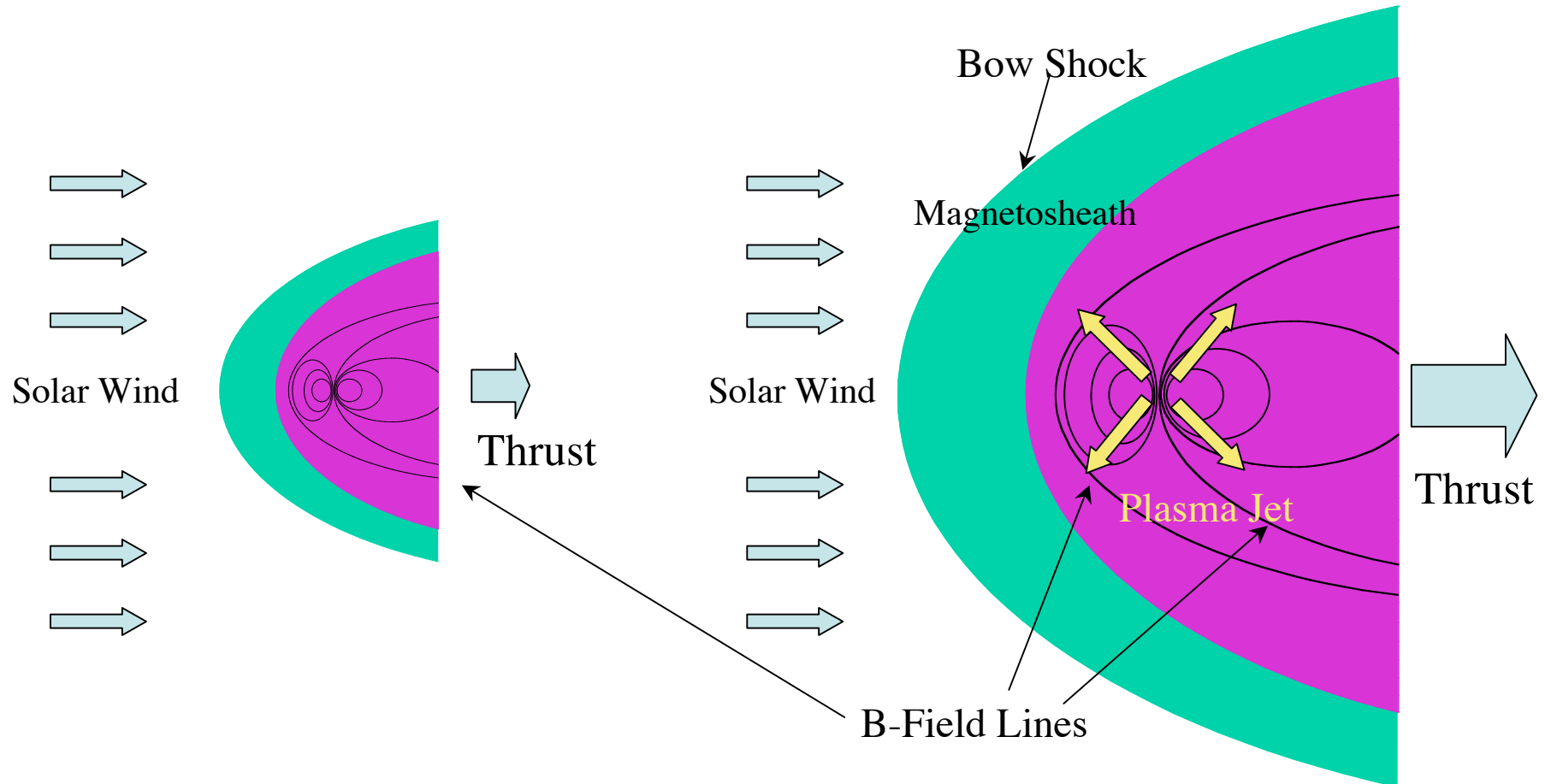
Proposal by Zubrin (JBIS, 1993)

- Solar Wind Dynamic Pressure ~ Magnetic Field of nT
- B-field by superconducting coil of 5mm diameter
- Current Density 10^{10} A/m² (difficult to construct/deploy)

太陽風を構成するイオンが、磁場で反射され、その反力が宇宙機の推力に。

Magsail with Plasma Jet (Magneto Plasma Sail, MPS)

Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion (M2P2) Proposed by R.M. Winglee, JGR, 2000



Original Small B-field

Inflated B-field by Plasma Jet
Large interaction area
-> Large thrust

気球（風船）の原理と磁気プラズマ セイル(MPS)のアナロジー



MPS
の太陽風
に相当



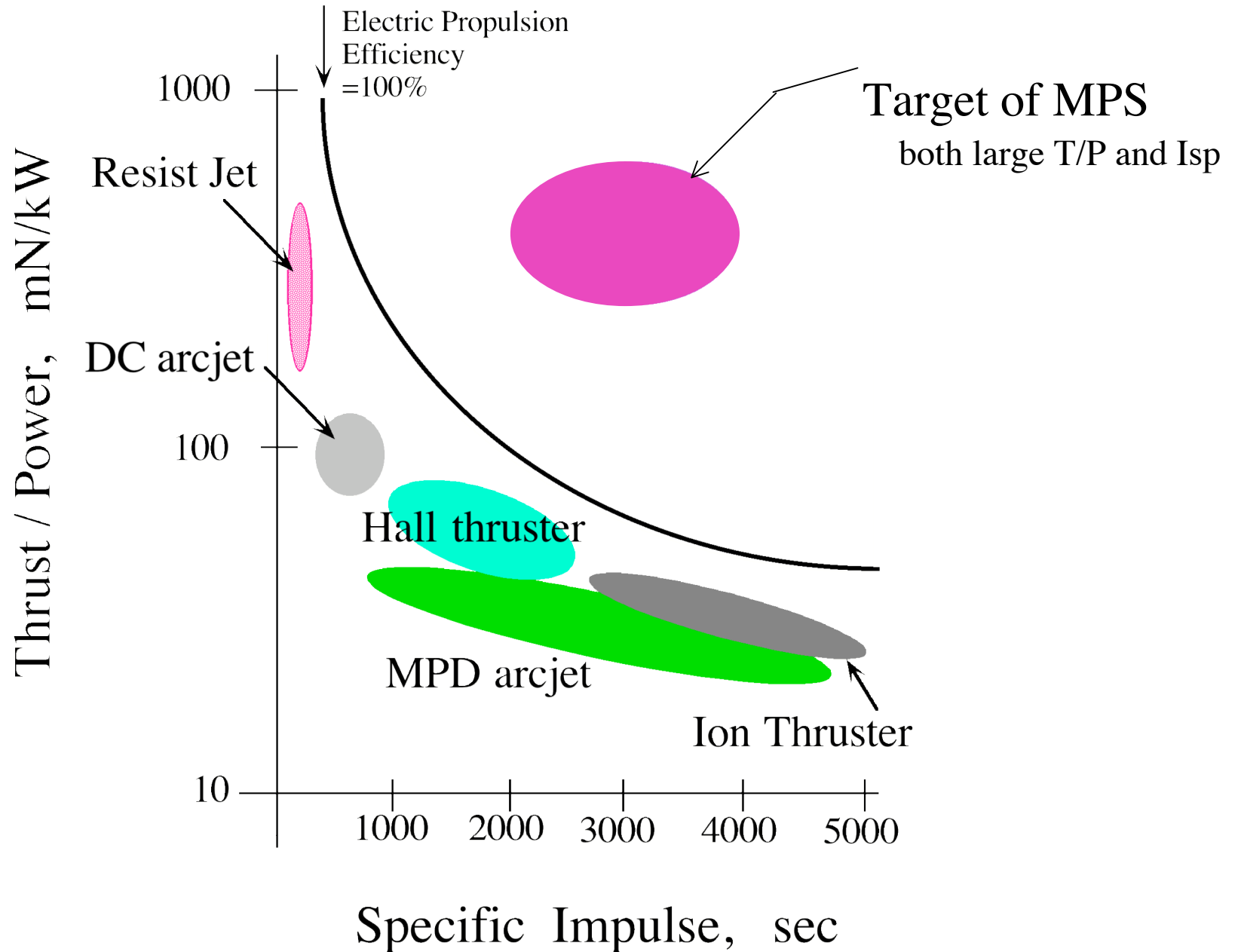
MPSの磁場
に相当

気球を膨らませる
→プラズマ噴射で磁場
を拡げる

横風で移動
→太陽風を受けてMPS
が移動

外部のエネルギー（太
陽エネルギー）の利用

Comparison of MPS with EP



MPS(磁気プラズマセイル)の研究状況

アメリカワシントン大学のWingleeらが研究を進めているが、MPSの基本原理および性能（推力電力比）の評価は不十分

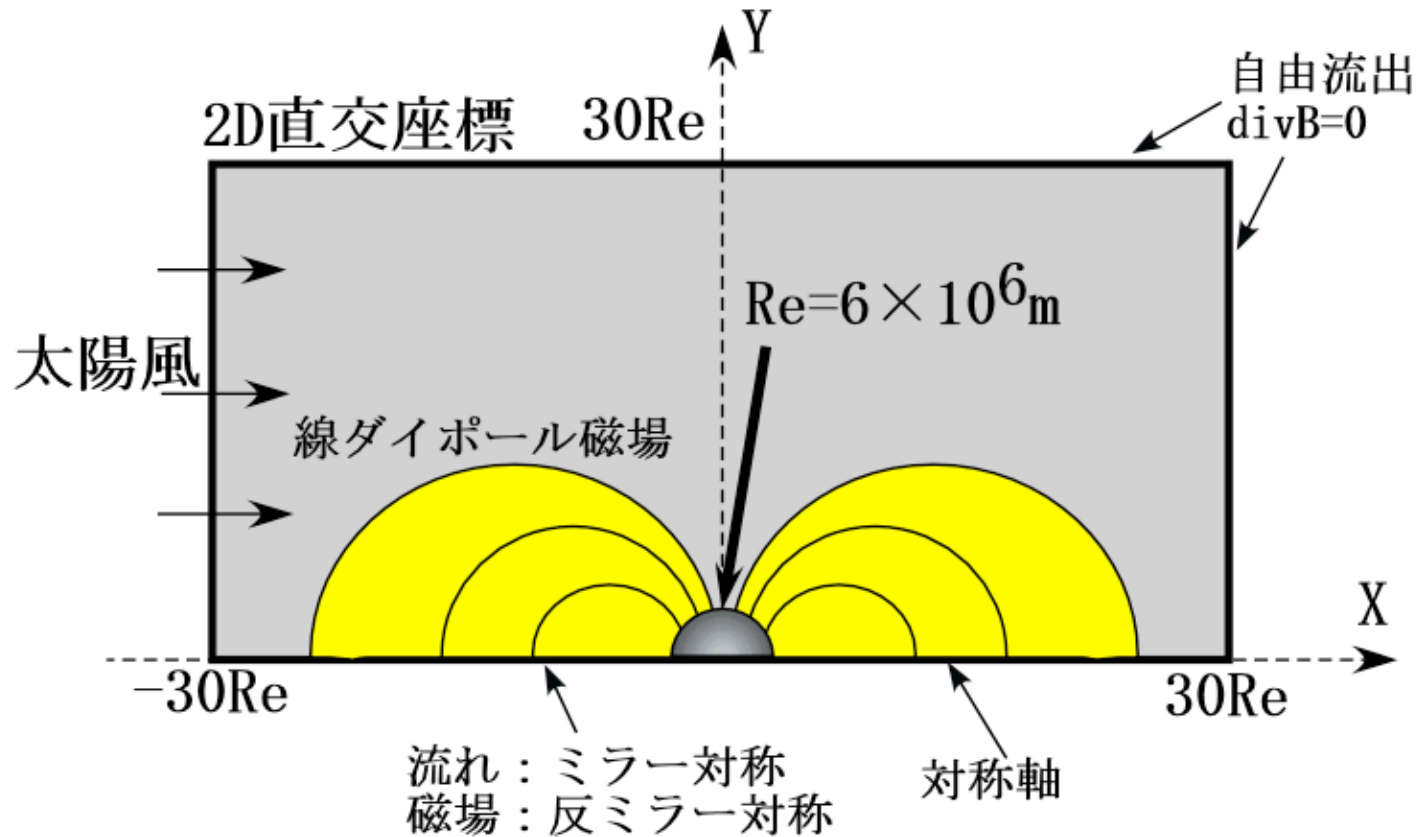
当面の研究目的

- 1 . 数値解析による性能評価
 - 1 . 太陽風と磁場との相互干渉を数値解析し、推力発生スケールリングを確認する。
 - 2 . 磁場Inflation現象を数値解析し、その可能性について評価する。
 - 3 . 1、2の結果および簡易モデルを用いてMPSの推力電力比を計算する。
- 2 . 地上実験（シミュレーターを構築中）

2. MPS(磁気プラズマセイル)の推力発生メカニズムの解析

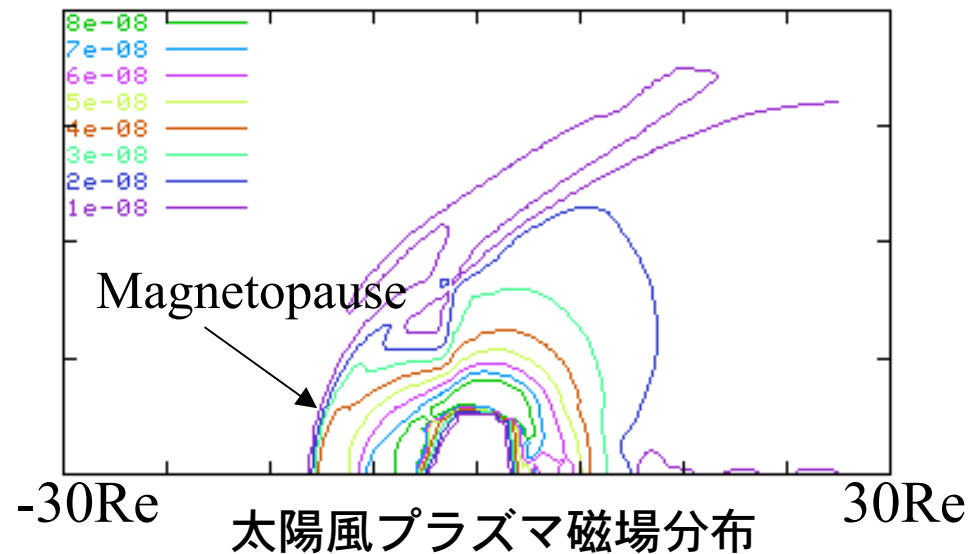
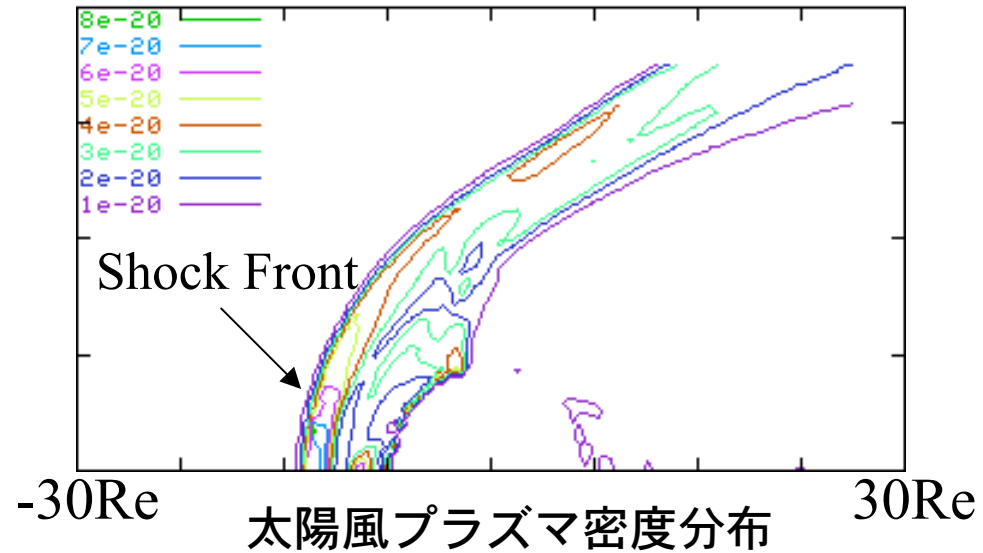
2.1 磁場が受ける力の解析

~数値解析モデル~ (太陽風と磁場との相互干渉)



~計算結果（密度・磁場分布）~

太陽風プラズマ流の密度分布と磁場分布



~抗力係数の導出~

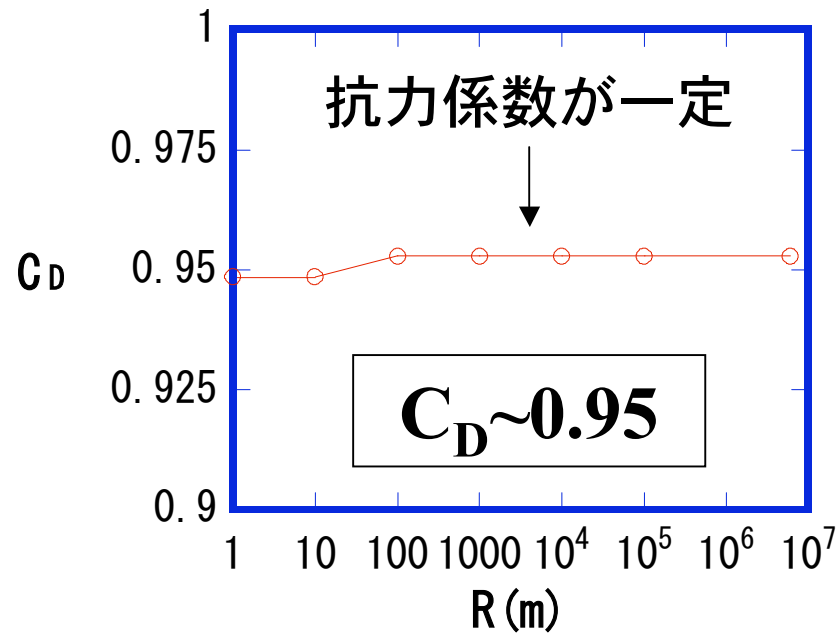
太陽風＝超音速プラズマ流

磁場が抵抗（造波抵抗＋圧力抵抗）を受ける

抗力係数の計算手法

コントロールボリュームの運動量収支＝磁場が受ける力（抗力D）

$$\text{抗力係数 } C_D = \frac{D}{(\rho U^2 / 2) S}$$

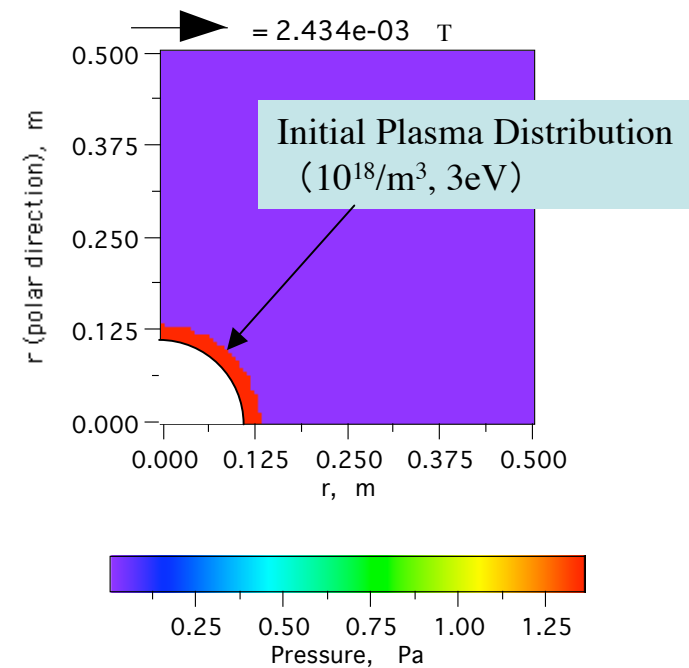
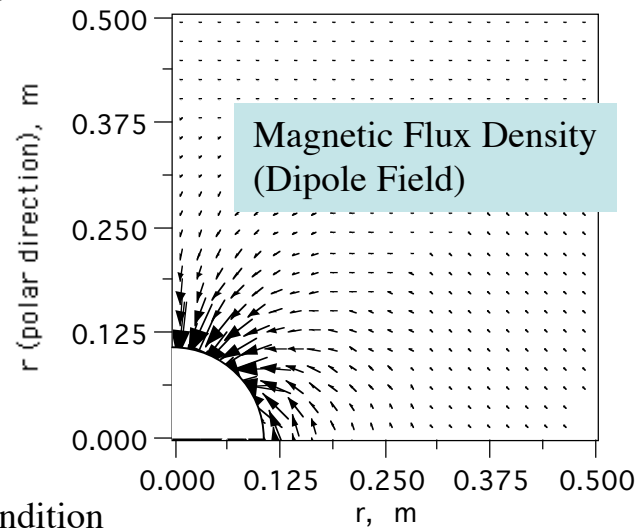
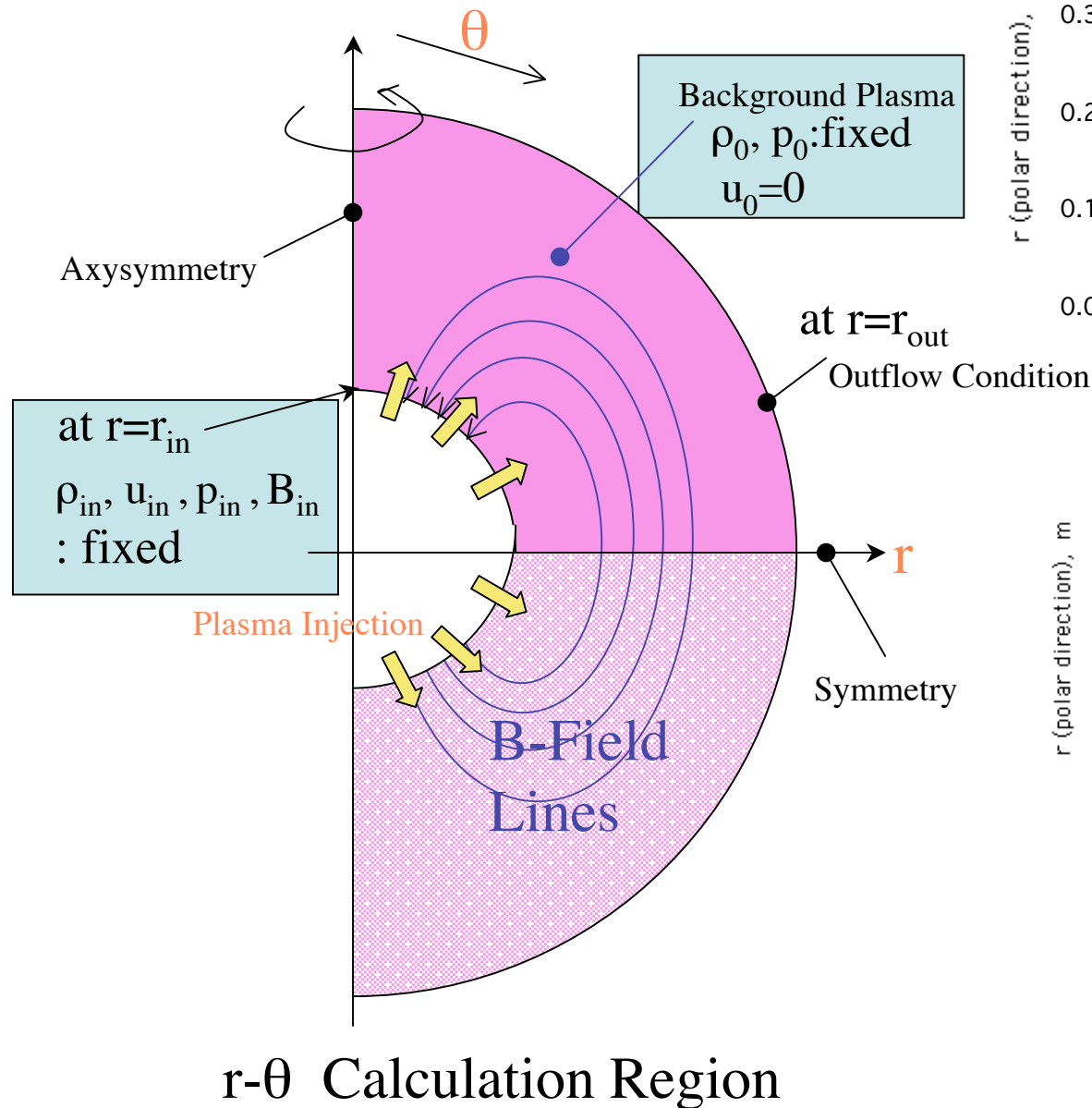


物体半径と抗力係数の関係

2. MPSの推力発生メカニズムの解析

2.2 磁場インフレーションの限界予測

2D-MHD Simulation of Magnetic Field Inflation using resistive MHD model



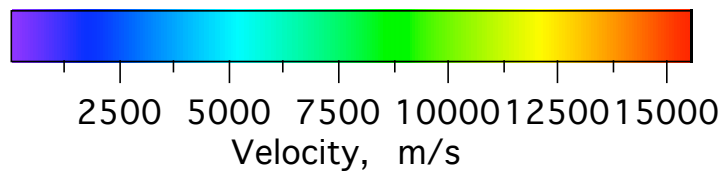
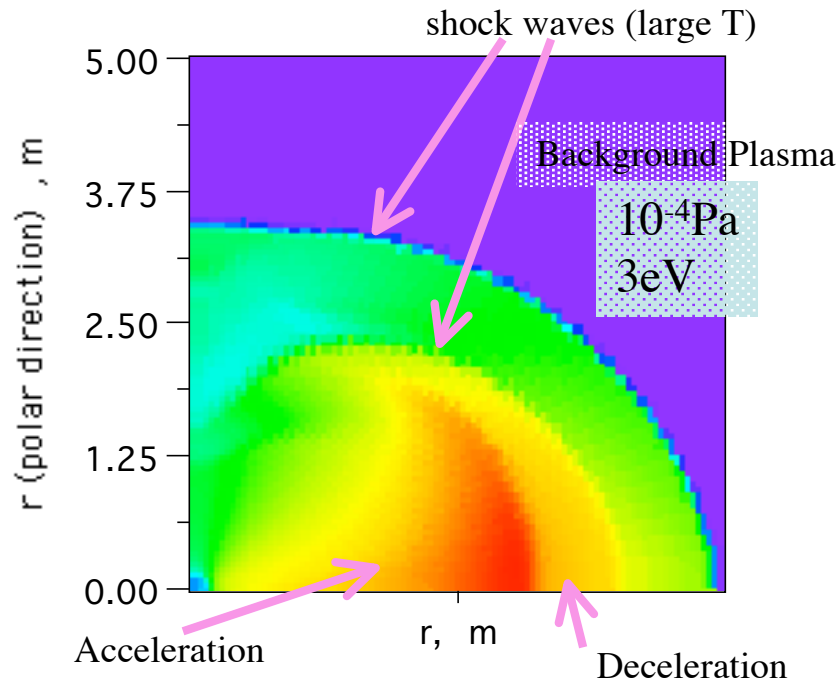
Initial Conditions

Numerical Result: Plasma Flowfield obtained by resistive MHD code (NIRVANA)

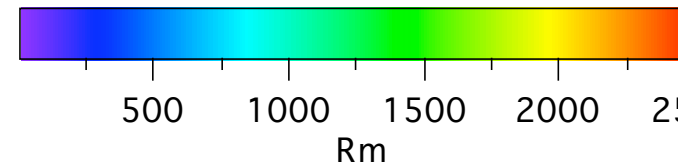
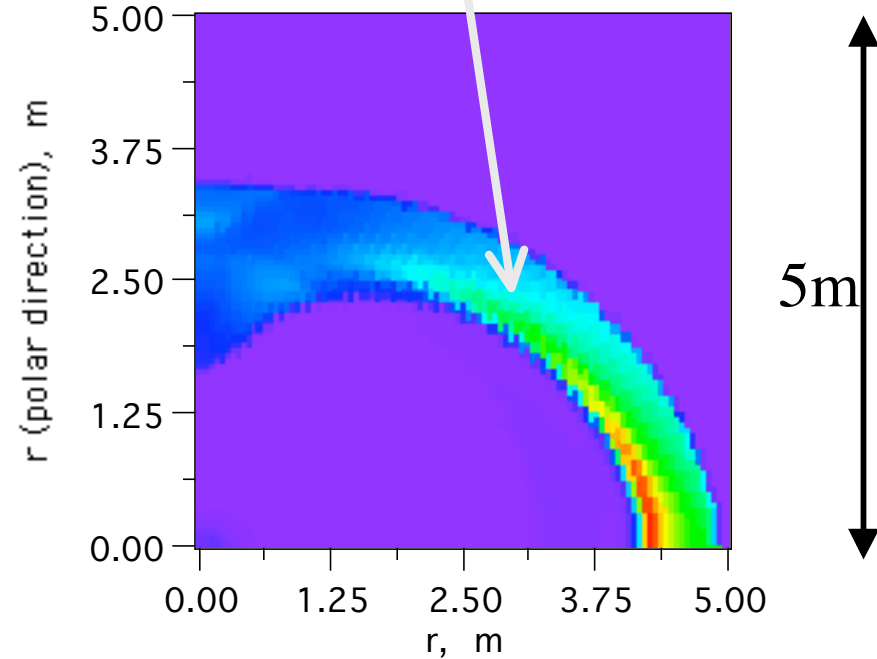
$t=0.22\text{ms}$, $B_{in}=0.02\text{T}$ (200Gauss)

$p_{in}=1.3\text{Pa}$, $T_{in}=3\text{eV}$, sonic inlet

$Rm=\sigma\mu_0ur \rightarrow \infty$
(B-field frozen-in)



Velocity Distribution

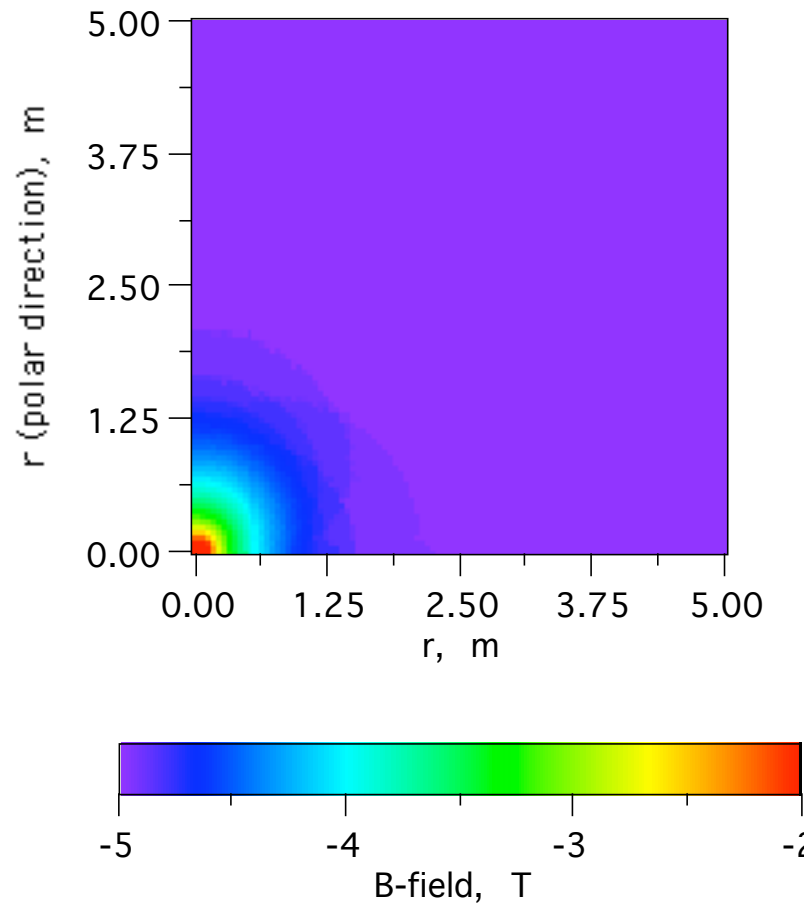


Magnetic Reynold's Number
Distribution

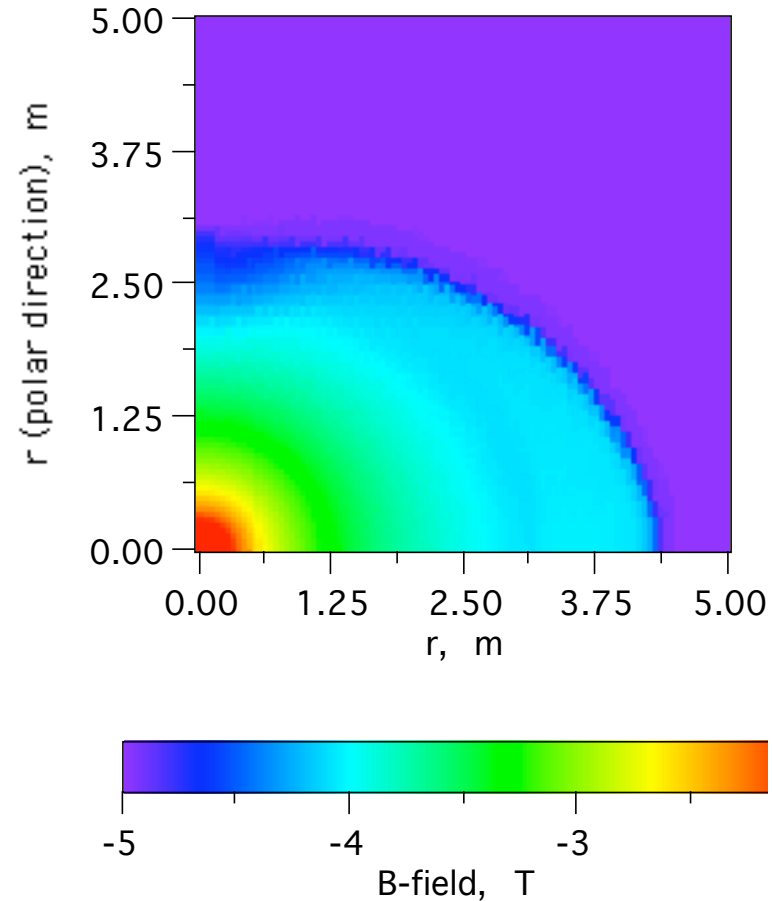
Numerical Result:

Magnetic Field Inflation by Plasma Injection

$B_{in}=0.02\text{T}$ (200Gauss), $p_{in}=1.3\text{Pa}$, $T_{in}=3\text{eV}$, sonic inlet

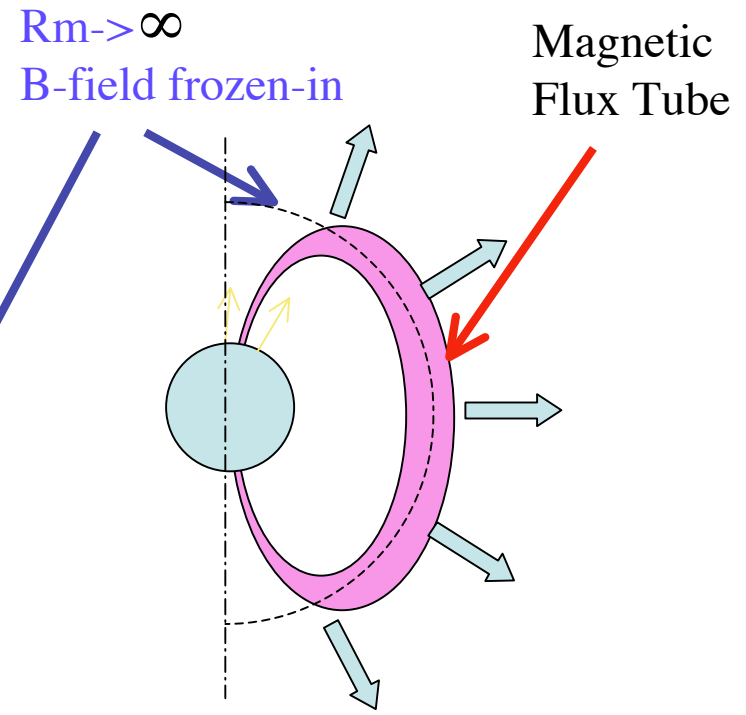
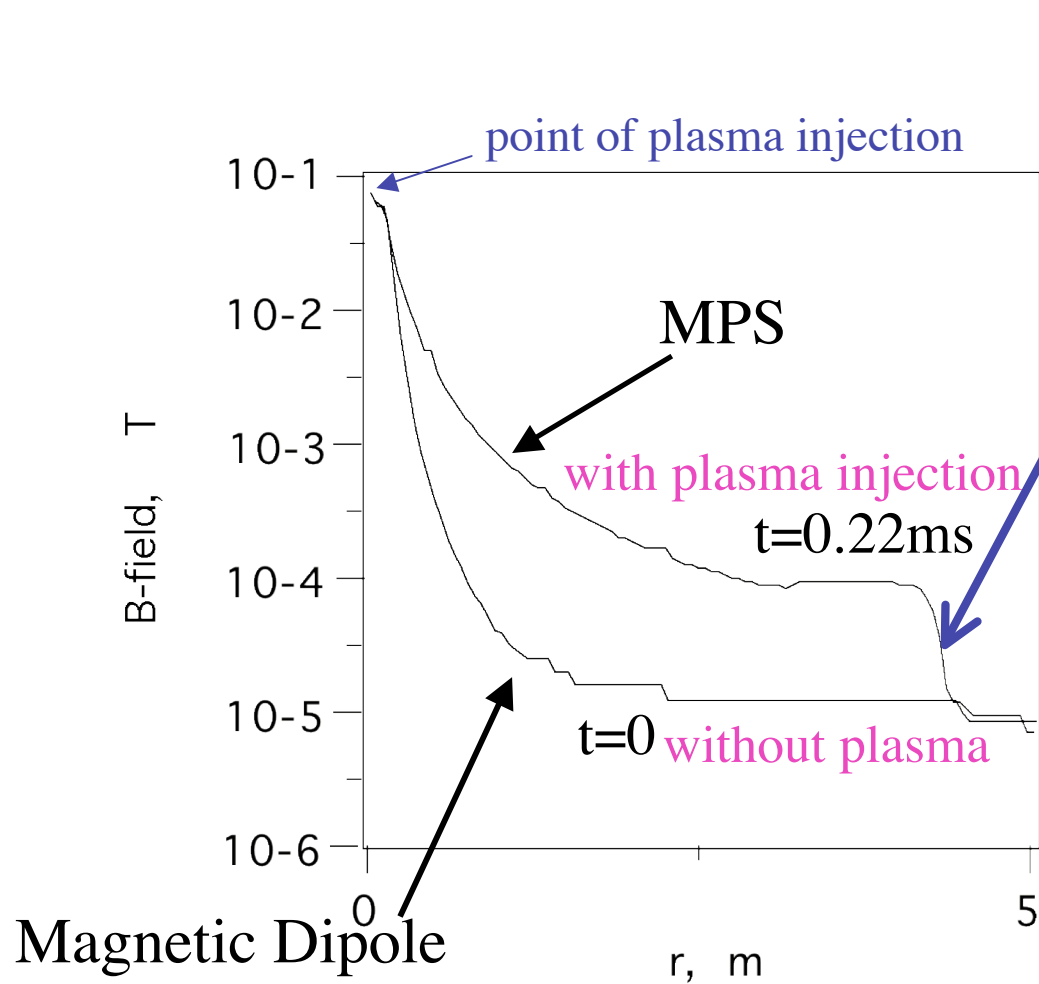


Magnetic Flux Density
(**without** Plasma Injection, $t=0$)



Magnetic Flux Density
(**with** Plasma Injection, $t=2.2\text{e-}04$ s)

Summary of Numerical Result : Inflated Magnetic Field



Model of Magnetic Field Inflation

- B-field inflation is also confirmed in the case of resistive MHD model.
- However, currently, only transient results are obtained.

Magnetic Flux Density

3.まとめと今後の課題

Research Topics remains

1. 推力発生機構の詳細な理論解析
(投入パワ、推進剤流量、磁気回路への依存性)
 - ・ 推力電力比の最適化
 - ・ 推力方向制御の方法
2. 地上デモンストレーション
推力測定までの地上実験実施 (シミュレータの構築) が不可欠。
 - ・ チャンバー壁の影響のため、定常地上実験は不可能か。非定常 (パルス) 実験により原理検証ができるのか。
 - ・ 実用には高密度プラズマ源が必要。
 - ・ プラズマの不安定性 (プラズマ加熱) などのプロセスを把握。
(詳細な数値解析の必要性)
3. 航法側から
 - ・ 太陽風の乱れの補正方法
 - ・ 推力方向の制御
 - ・ 目的天体到達後の減速

今後の課題・研究計画

