太陽風・宇宙ジェットと
プラズマ塊の相互作用

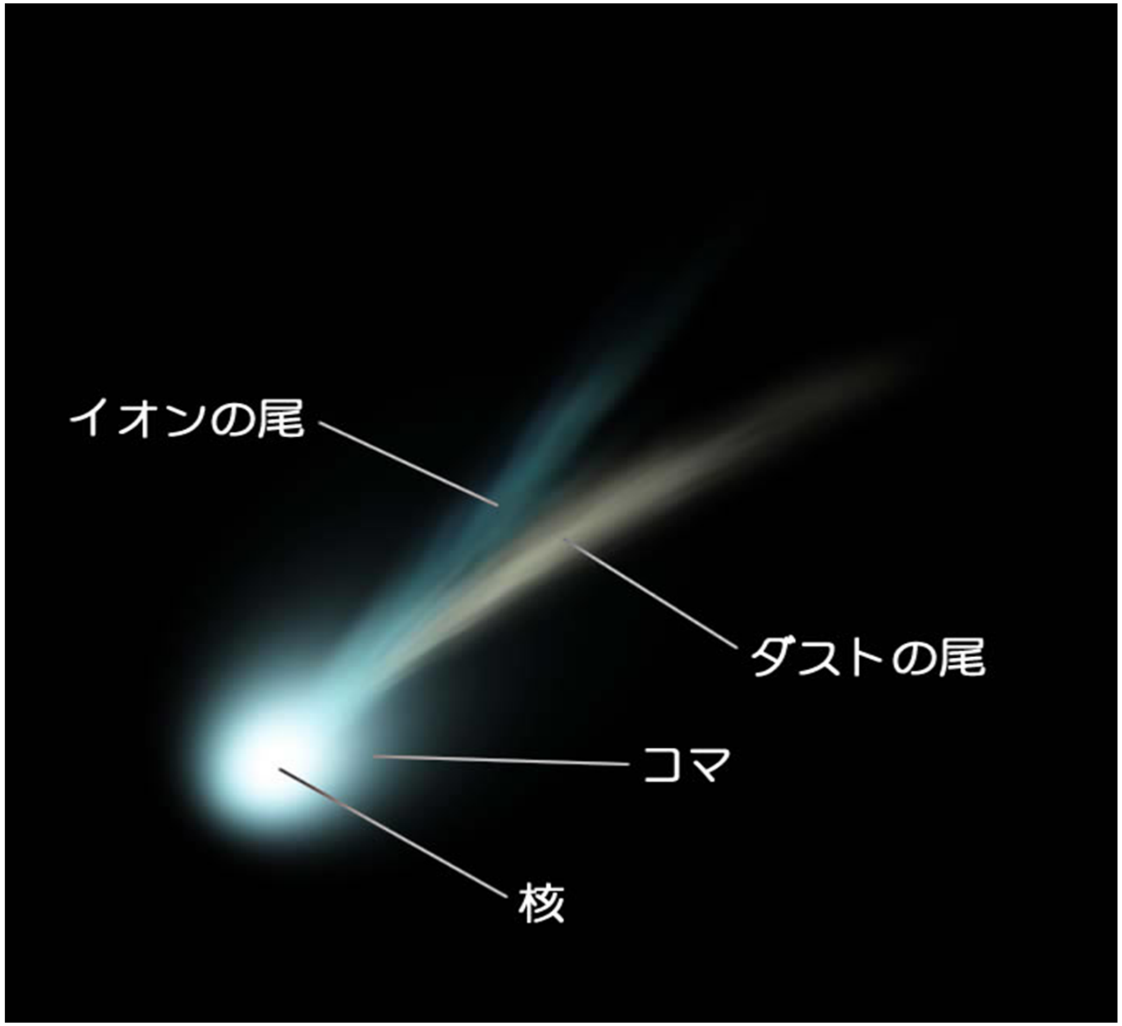
宇宙物理学研究室

大塚　淳輝

発表の流れ

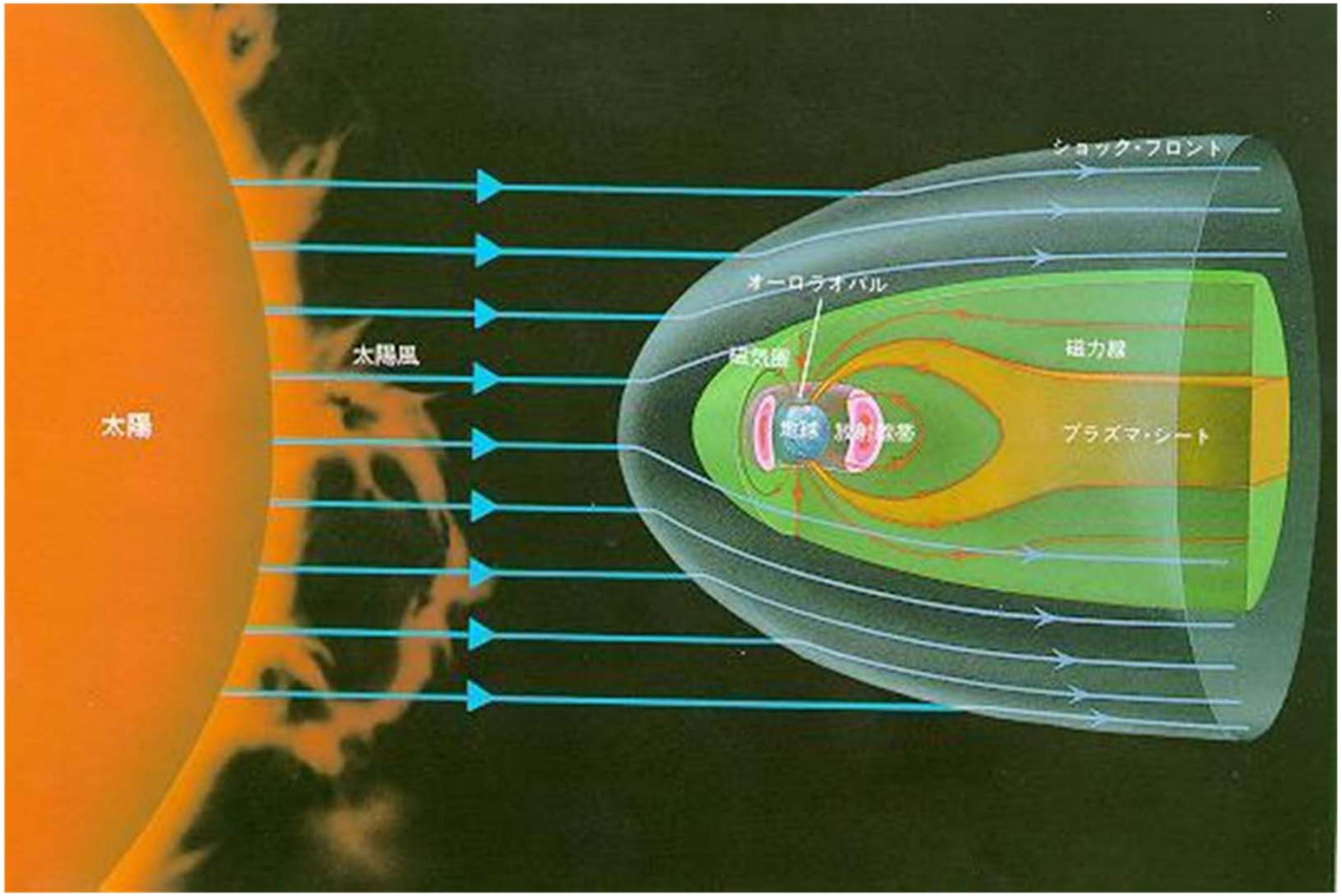
１．研究目的
２．基礎方程式
３．シミュレーションモデル
４．亜音速・超音速流
　４．１．初期条件
　４．２．境界条件
　４．３．密度分布のシミュレーション
　４．４．考察
５．磁場
　５．１．初期条件・境界条件
　５．２．シミュレーション結果
　５．３．考察
６．まとめ

太陽風と彗星の相互作用



http://www.nao.ac.jp/

太陽風と地球磁気圏



http://polaris.nipr.ac.jp/

目的

①

2次元円筒座標系の流体コードを用いて、

プラズマ塊と相互作用させる流れを亜音速と超音速の場合でシミュレートし、

衝撃波による効果などを調べる。

それにより、

太陽風・宇宙ジェットのプラズマ塊への作用を調べる。

②

2次元円筒座標系の磁気流体コードを用いて、

双極磁場をもつプラズマ塊に高速流を作用させる。

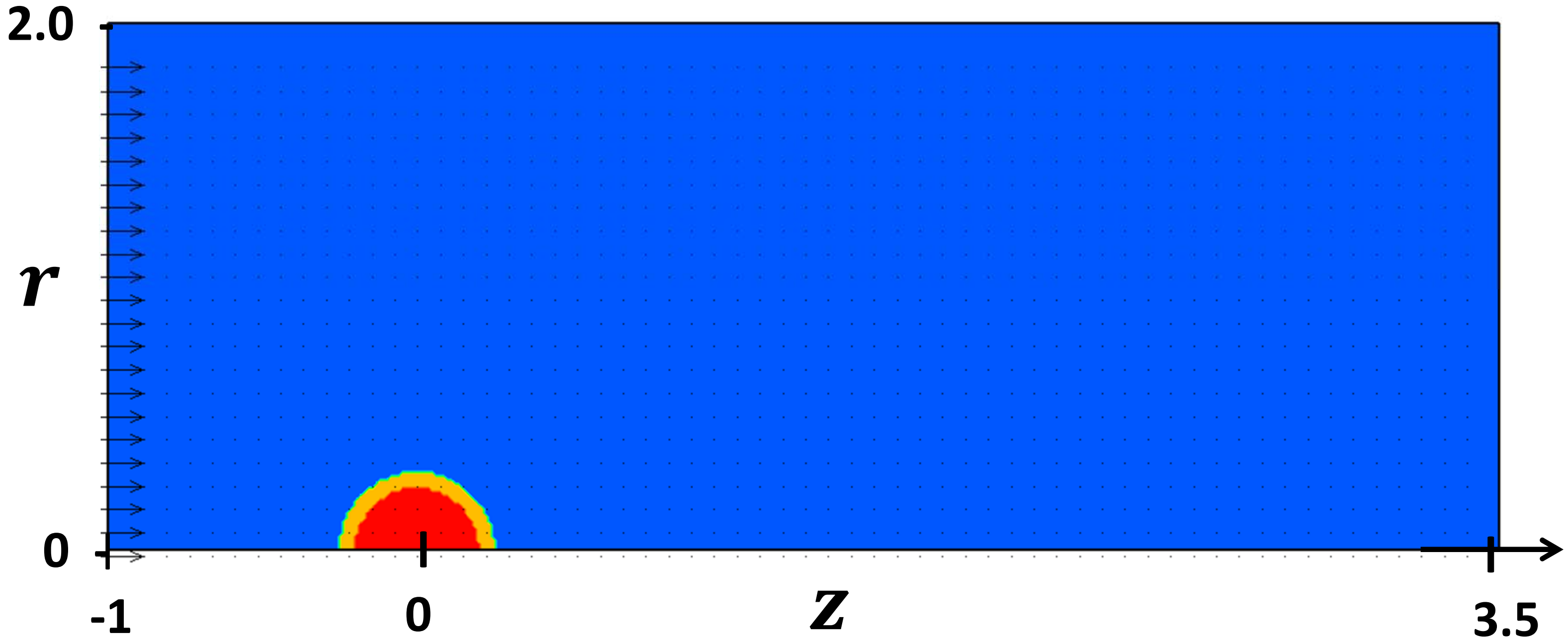
断面積が増加するなどの磁場による効果を調べる。

基礎方程式

$\rho\left(\frac{\partial}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\boldsymbol{u}=-\nabla p+\boldsymbol{j}\times\boldsymbol{B}$	運動方程式
$\frac{\partial}{\partial t}\rho+\nabla(\rho\boldsymbol{u})=0$	連続の式
$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0$	ガウスの法則
$\nabla\times\boldsymbol{B}=\boldsymbol{j}$	アンペールの法則
$\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{B}=\nabla\times(\boldsymbol{u}\times\boldsymbol{B})$	誘導方程式
$\left(\frac{\partial}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\frac{P}{\rho^{\gamma}}=0$	エネルギー方程式

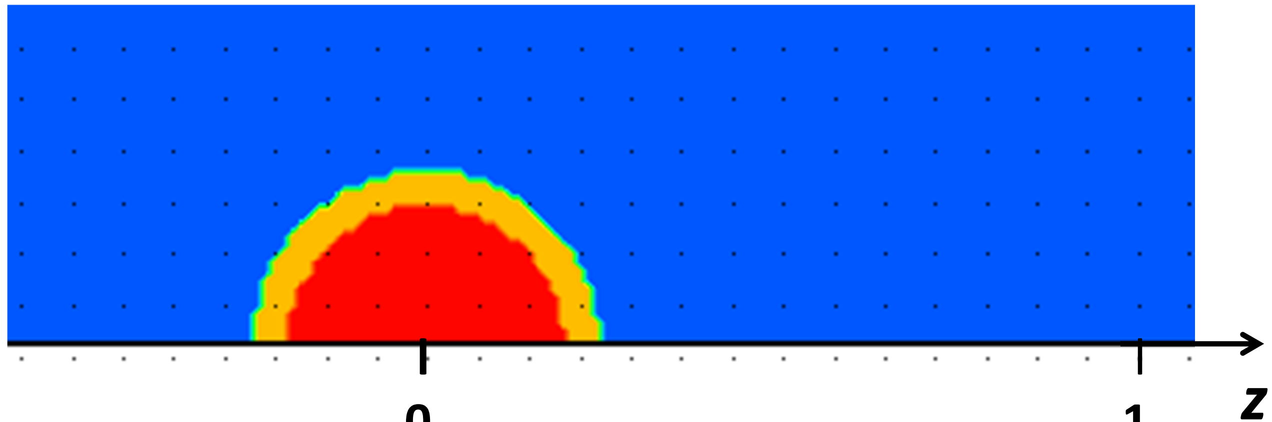
（$\boldsymbol{\mu}=\mathbf{1}$の単位系）

シミュレーションモデル



- 円筒座標系で計算
- 計算スキームはHLLD（Miyoshi & Kusano ,2005)
- メッシュ数 $N_r \times N_z = 160 \times 370$
- 無次元化し計算(**速度は音速を1.0としている**）

流体シミュレーションでの初期条件



密度　$\boldsymbol{\rho = 1.0}$ (領域0), $\boldsymbol{\rho = 1500}$ (領域1), $\boldsymbol{\rho = 11000}$(領域2)

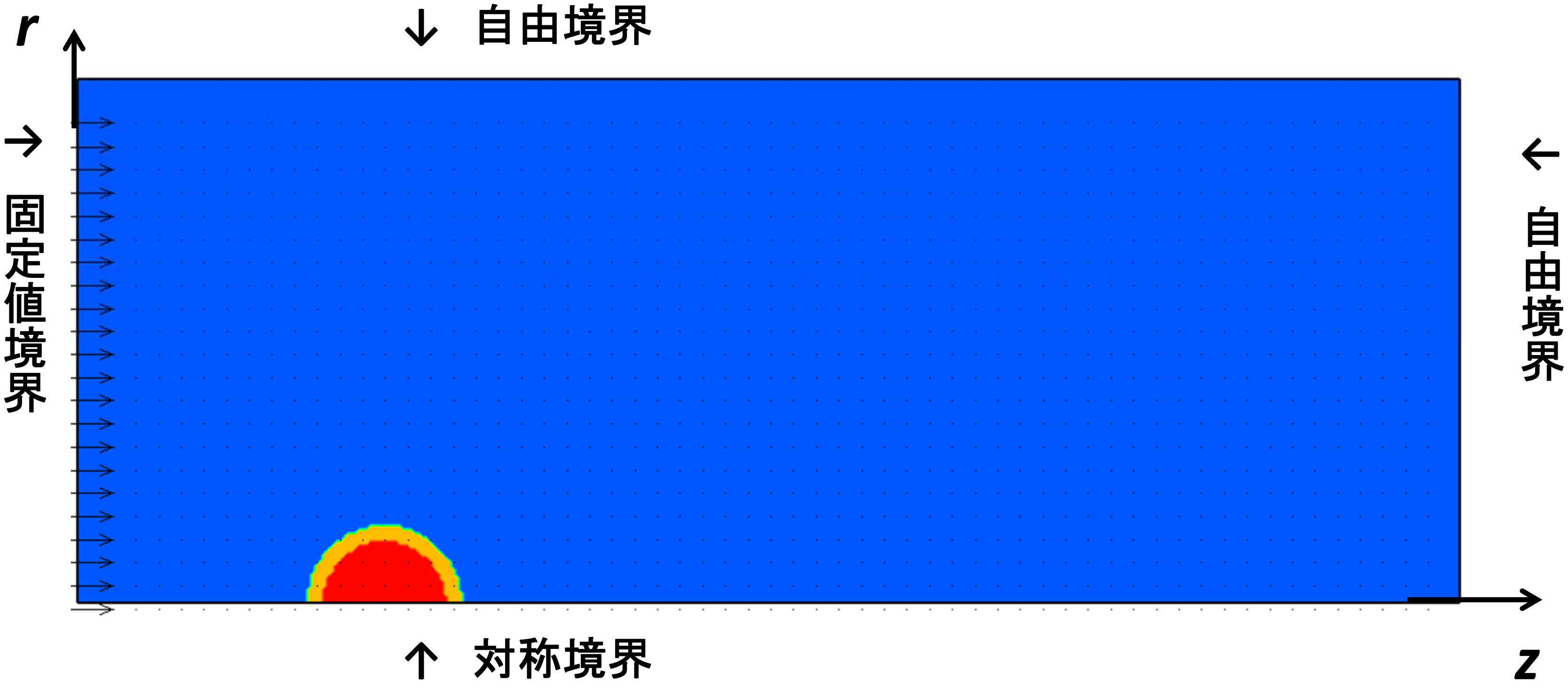
圧力　$\boldsymbol{P = \frac{1}{\gamma}}$ で一様　$\left(\text{比熱比}\ \gamma = \frac{5}{3}\right)$

速度　$\boldsymbol{u = 0}$

半径　0.20（領域2），0.25（領域1）

- （磁場なし）

境界条件



固定値　・・・　亜音速流 : u=0.8　ρ,Pは次で説明
超音速流 : u=3.7

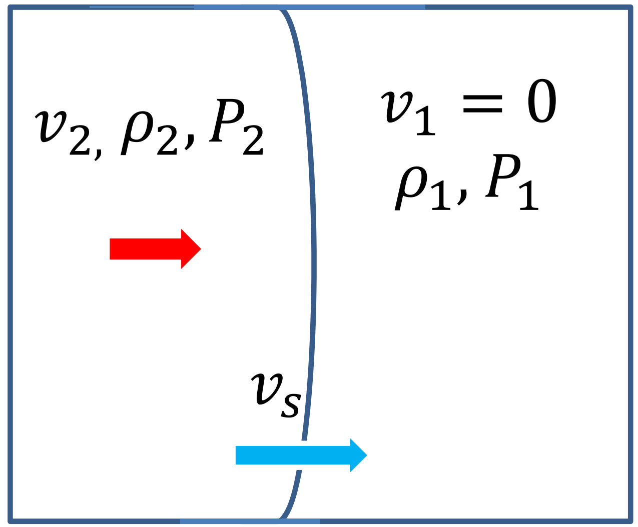
固定値境界の値の導出

ランキン・ユゴニオの関係式

（ｉ）$\rho_2(v_2 - v_s) = \rho_1(-v_s)$

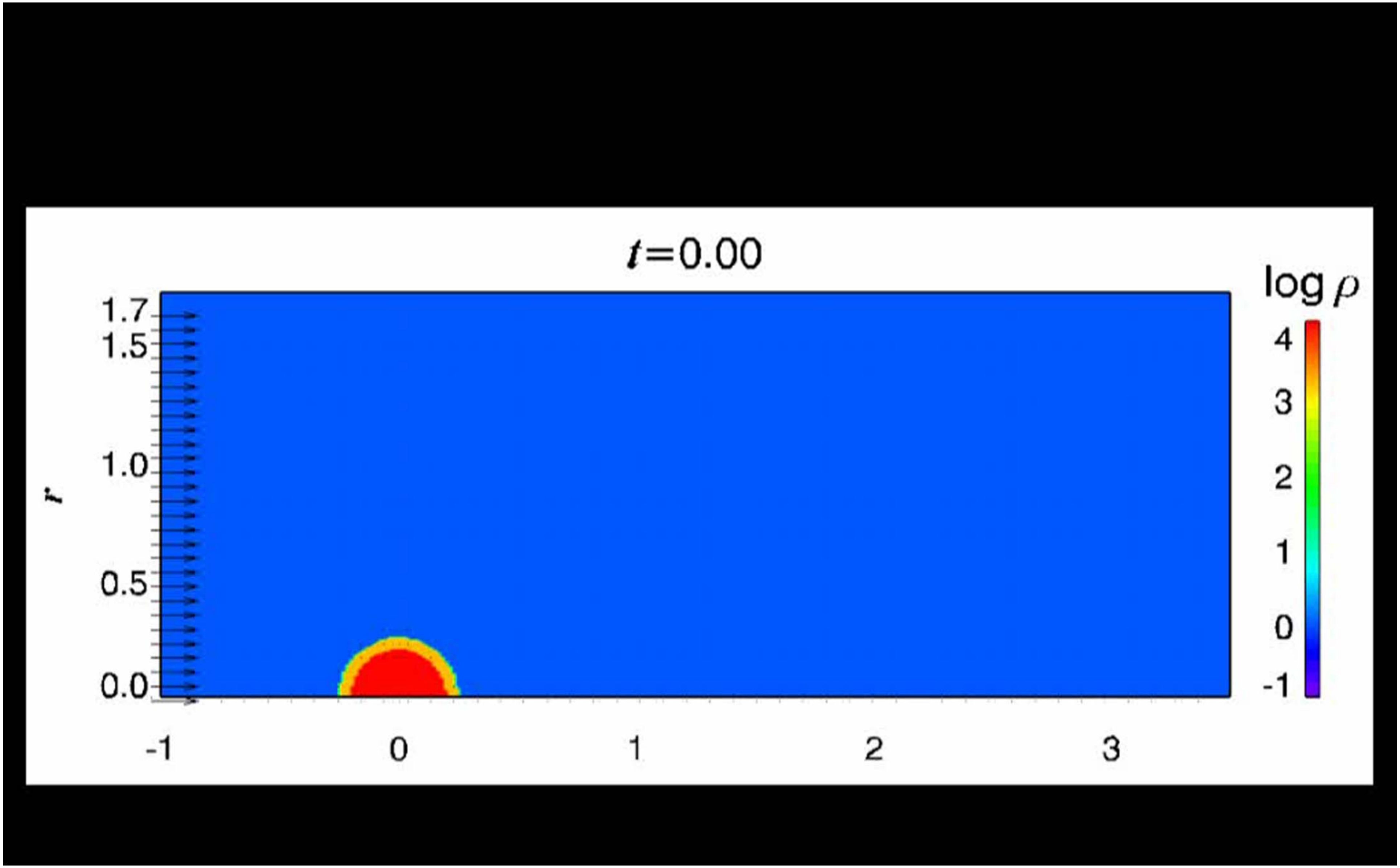
（ii）$\rho_2(v_2 - v_s)^2 + P_2$
$= \rho_1(-v_s)^2 + P_1$

（iii）$\frac{1}{2}(v_2 - v_s)^2 + \frac{\gamma}{\gamma - 1}\frac{P_2}{\rho_2}$
$= \frac{1}{2}(-v_s)^2 + \frac{\gamma}{\gamma - 1}\frac{P_1}{\rho_1}$



$\boldsymbol{v_1 = 0,\ \rho_1 = 1.0,\ P_1 = \frac{1}{\gamma}}$ よりある$\boldsymbol{v_2}$のときの$\boldsymbol{\rho_2,\ P_2}$が求まり、
それを境界での固定値として扱う。

亜音速流(v_2 =0.8)



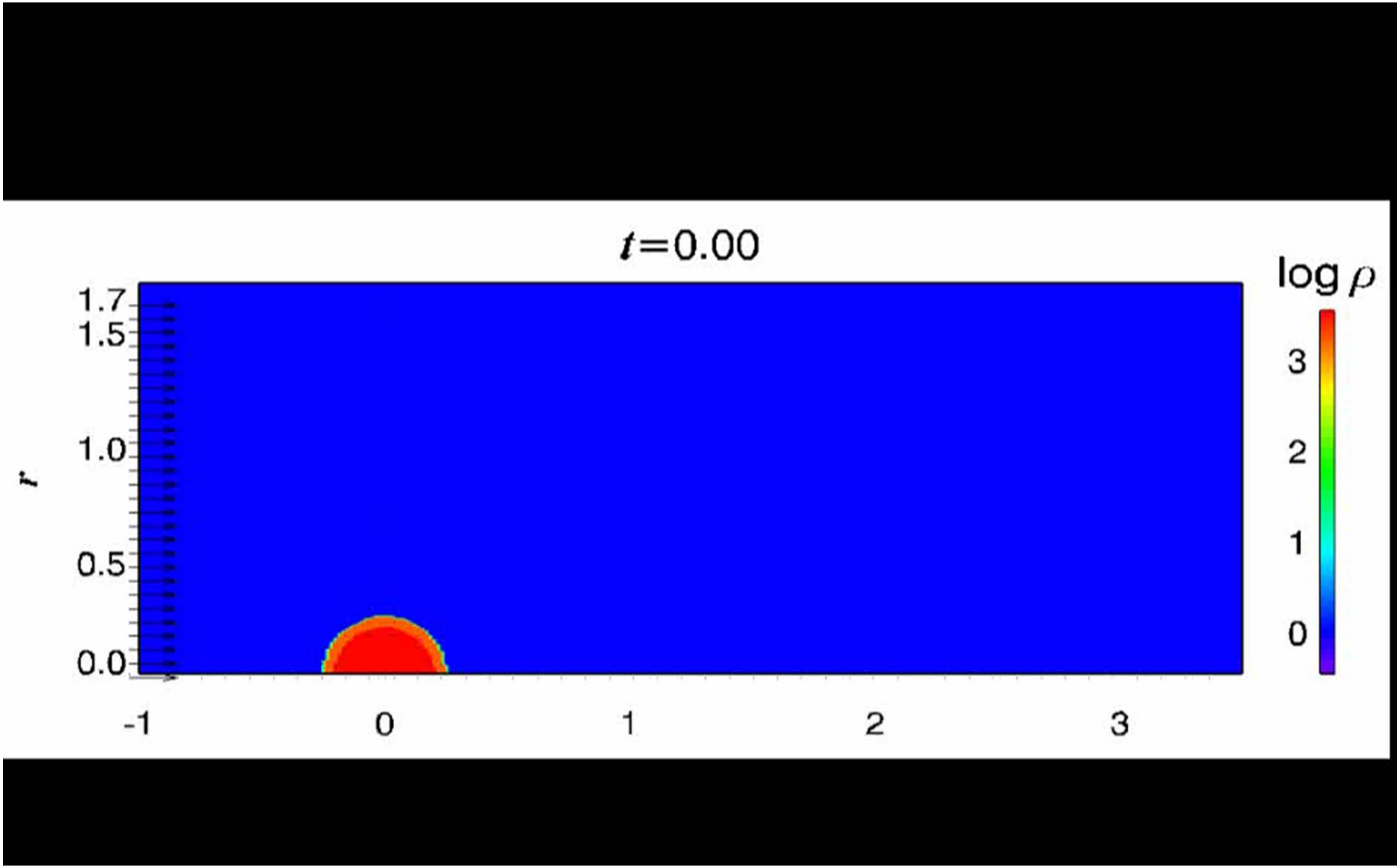
亜音速流での考察

- 亜音速流がプラズマ塊に正面から動圧を加えており、わずかに重心が動いている。
- $\boldsymbol{\rho}\left(\frac{\partial}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{\nabla}\right)\boldsymbol{u}=-\boldsymbol{\nabla}\boldsymbol{P}=\mathbf{0}$の関係から、t=15.0までに重心は約0.06動くと見積もったが、それに近い結果と見れる。

- 亜音速流によってはぎ取られた表層部はプラズマ塊の後ろでカルマン渦の形に似た渦を作っていることがわかる。

- プラズマ塊の後ろで出来た渦からバックフローが生じ、後ろからも圧力を受け、表層部がはぎ取られていることがわかる。

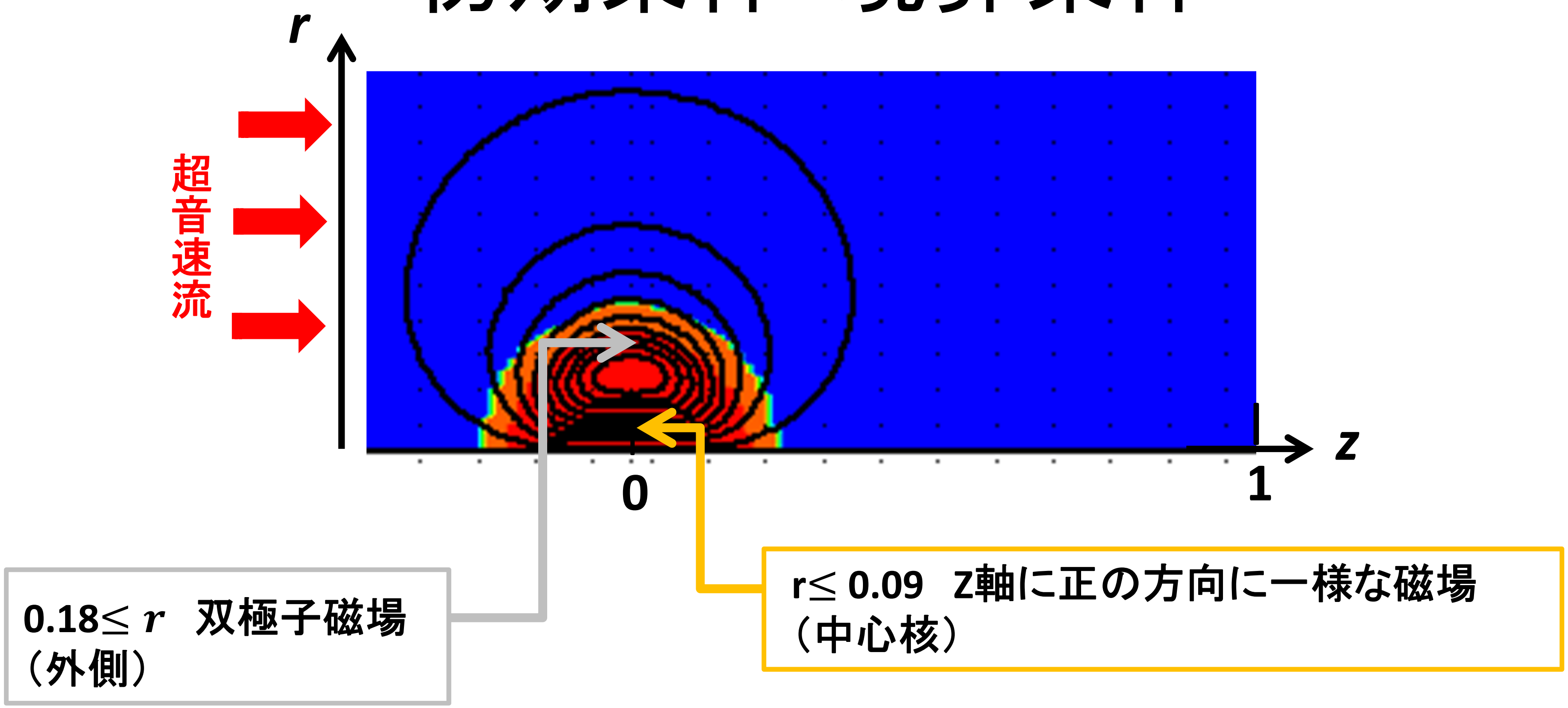
超音速流(v_2 =3.7)



超音速流での考察

- 亜音速流よりも表層部がはぎ取られていて、中心核も動いている。
- $\boldsymbol{\rho}\left(\frac{\partial}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{\nabla}\right)\boldsymbol{u}=-\boldsymbol{\nabla}\boldsymbol{P}$の関係式より、密度を衝撃波面の計算値の値を使って中心核の動きを見積もると、$\boldsymbol{t}=$10.0まで で0.36動くとなった。これはシミュレーションの結果をほぼ一致する。
- プラズマ塊の前方でbow shockに似た衝撃波が起こっている。しかし計算値によると、shock後は減速するが亜音速ではなかった。
- 流れがプラズマ塊という障害物により、始めのshock後にまた加速していることがわかる。
- 亜音速で見られたカルマン渦がない代わりに、プラズマ塊の後ろに尾ができており、太陽風と彗星との相互作用によく似たシミュレートになっている。

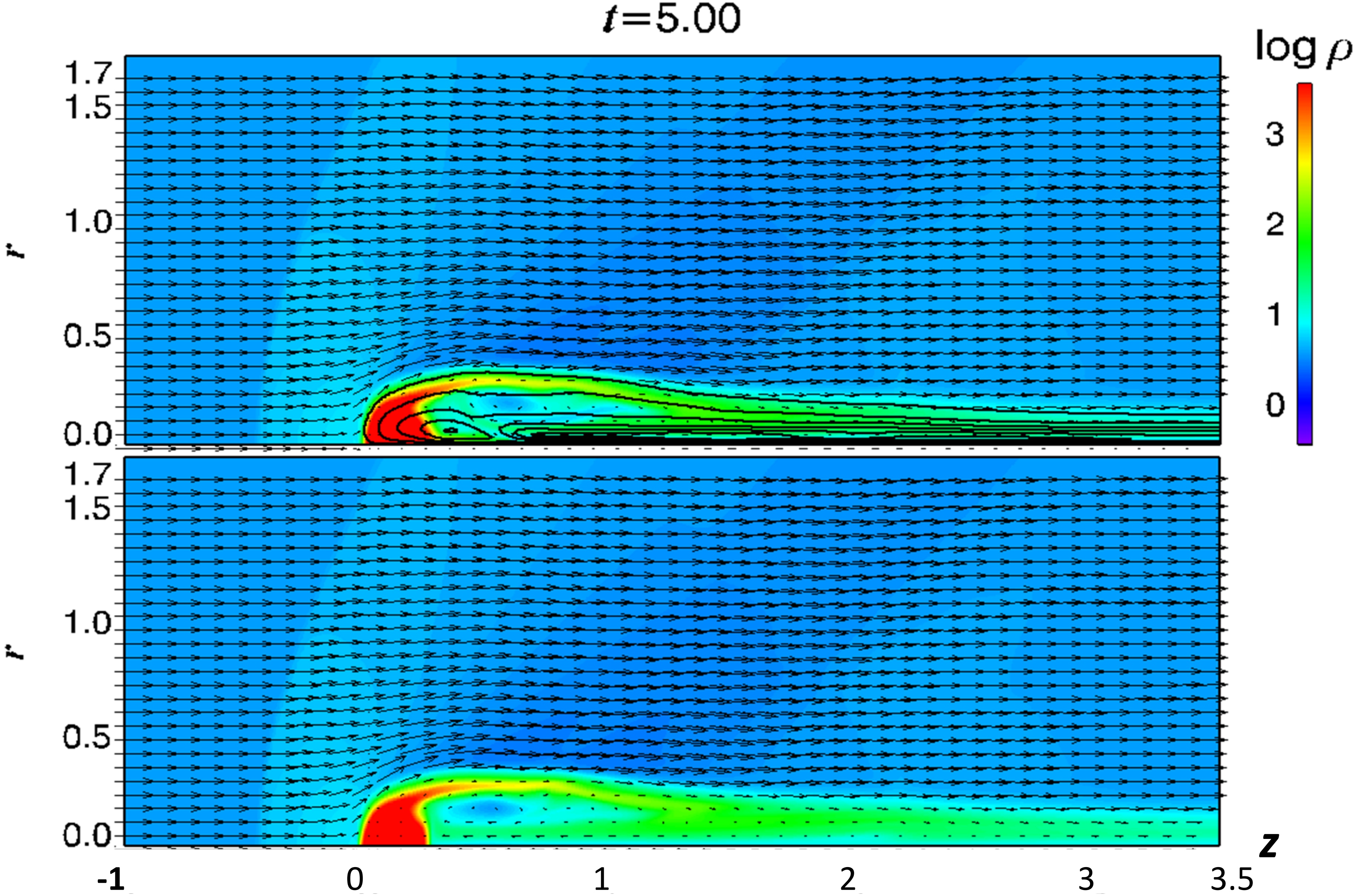
磁気流体シミュレーション
初期条件･境界条件



・中心核での磁場の大きさを2.0とする。

（磁場を加えた以外の条件は 超音速流のものと同じとしている）

磁場による密度分布の変化



磁気流体シミュレーションでの考察

- 磁力線は、プラズマ塊の外装に沿っている。
- プラズマ塊の後ろに引き伸ばされており、太陽風による地球の磁場の引き伸ばしが見られている。初期での中心核のみの強磁場領域が、後ろに広がっている。
- 磁場のない場合と違い、バックフローによって後ろから表層部を削られていない。それにより、プラズマが磁力線に沿って動くことが見られる。
- 磁力線はすぐに流され、磁場による断面積の増加は見られなかった。

まとめ

- プラズマ塊と流れを用いて、亜音速流と超音速流、磁場のあるものとないもののシミュレーションを行った。
- 亜音速流ではカルマン渦が見れ、超音速流ではbow shockのような衝撃波や動圧による強い加速が見られ、磁場との作用によりプラズマ塊の後ろに強磁場領域ができることが見られた。
- 今回用いた2次元円筒座標系では、双曲子磁場の向きが風に流される向きになるため、断面積の増加を見れなかった。今後は、双曲磁場の入れる向きを変える研究をする。
- 今回宇宙ジェットとプラズマ塊の相互作用について考えられなかったため、今後の課題である。
- 境界条件を考える中で、密度、圧力、速度の値のバランスが波面を作る上で複雑な関係があるように思えた。今後はその関係についても追及していく。

http://www.in-ava.com/

Vz=3.7, vs=5.128, ro=3.59, P=19.6
Vz=0.8, vs=1.68, ro=1.91, P=1.94

- ra=0.09
- rotA=B
- 電流密度　j＝rotＢ
- B＝Ｐ/(B^2/2)
- Ｊ×Ｂ→0にした
- Ｂ＝１．０、u=0で動かないのを確認した
- 太陽風：u=300~600km/s～0.15~0.5Cs　ρ＝1.5*10^-23g/cm^3 T=10^6K
- 地球：r=6300km m=6*10^27g ρ=5.5g/cm^3　V=1.1*
- T=290K 大気圏はr=6300~7100km ρ=5.6*10^-7g/cm^3
- 衛星：　m~510kg r=5.7m ρ=1.7*10^-3g/cm3
- 彗星：r=0.5~5km,m=10^12~10^15kg,u=250~300km/s,ρ=0.1~0.25g/cm^3
- ジェット：中性子星やブラックホールの降着円盤の中心からのジェットはSS433というstar systemでu=0.23*c=6*10^7m/s
- *Bow shock＝超から亜へ。風と磁気圏の間で起こる。*
- $c_s = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$
- Bou前でro=3.6 P=20,u=3.7 よりCs=3.04より速さは 11.26
- Bowの後でro=4.5 P=28,u=3.0 よりCs=3.22より速さは 9.66
- さらにそのあとでro=3.0,P=15,u=4.2,よりCs=2.887より速さは 12.13 。
- $\frac{B^2}{2} = P_B$
- エントロピー⊿S=⊿Q/T , S=P/ρ^γ

基礎方程式

マクスウェル方程式

(ⅰ) $\nabla \cdot \boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$

(ⅱ) $\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$

(ⅲ) $\nabla \times \boldsymbol{B} - \frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{E} = \frac{1\text{ff}}{c^2}\boldsymbol{j}$

(ⅳ) $\nabla \times \boldsymbol{E} + \frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{B} = 0$

MHDの基礎方程式

(ⅰ) $\rho\left(\frac{\partial}{\partial t} + \boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\boldsymbol{u} = -\nabla p + \frac{1}{c}\boldsymbol{j} \times \boldsymbol{B}$

(ⅱ) $\frac{\partial}{\partial t}\rho + \nabla(\rho\boldsymbol{u}) = 0$

(ⅲ) $\nabla \times \boldsymbol{B} = \frac{4\pi}{c}\boldsymbol{j}$

(ⅳ) $\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{B} = \nabla \times (\boldsymbol{u} \times \boldsymbol{B}) + \frac{c^2}{4\pi\sigma}\nabla^2\boldsymbol{B}$

(ⅴ) $\left(\frac{\partial}{\partial t} + \boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\frac{P}{\rho\gamma} = 0$

ランキン・ユゴニオの関係式

(ⅰ) $\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$

(ⅱ) $\rho_1 {v_1}^2 + P_1 = \rho_2 {v_2}^2 + P_2$

(ⅲ) $\frac{1}{2}{v_1}^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{1}{2}{v_2}^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{P_2}{\rho_2}$

(ⅳ) $\frac{P_1}{{\rho_1}^\gamma} = \frac{P_2}{{\rho_2}^\gamma}$

双極子磁場の式(極座標表示)

r≤ r_a(中心核)

$$\begin{pmatrix} B_r \\ B_\theta \\ B_\varphi \end{pmatrix} = B_0 \begin{pmatrix} \cos\theta \\ -\sin\theta \\ 0 \end{pmatrix}$$

$r_a \le r \le 2r_a$(中間)

$$\begin{pmatrix} B_r \\ B_\theta \\ B_\varphi \end{pmatrix} = \frac{B_0}{8} \begin{pmatrix} (16 - \frac{6r}{r_a} - \frac{2{r_a}^3}{r^3}) \\ -(16 - \frac{9r}{r_a} + \frac{{r_a}^3}{r^3})\sin\theta \\ 0 \end{pmatrix}$$

$2r_a \le r$(外側)

$$\begin{pmatrix} B_r \\ B_\theta \\ B_\varphi \end{pmatrix} = \frac{15 B_0 {r_a}^3}{8r^3} \begin{pmatrix} 2\cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \end{pmatrix}$$

Mikami et al.2008

↑極座標を円筒座標に変換

基礎方程式

マクスウェル方程式

(ｉ) $\nabla \cdot \boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$

(ⅱ) $\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$

(ⅲ) $\nabla \times \boldsymbol{B} - \frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{E} = \frac{1}{c^2}\boldsymbol{j}$

(ⅳ) $\nabla \times \boldsymbol{E} + \frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{B} = 0$

MHDの基礎方程式

(ｉ) $\rho\left(\frac{\partial}{\partial t} + \boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\boldsymbol{u} = -\nabla p + \frac{1}{c}\boldsymbol{j} \times \boldsymbol{B}$

(ⅱ) $\frac{\partial}{\partial t}\rho + \nabla(\rho\boldsymbol{u}) = 0$

(ⅲ) $\nabla \times \boldsymbol{B} = \frac{4\pi}{c}\boldsymbol{j}$

(ⅳ) $\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{B} = \nabla \times (\boldsymbol{u} \times \boldsymbol{B}) + \frac{c^2}{4\pi\sigma}\nabla^2\boldsymbol{B}$

(ｖ) $\left(\frac{\partial}{\partial t} + \boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\frac{P}{\rho\gamma} = 0$

ランキン・ユゴニオの関係式

(ｉ) $\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$

(ⅱ) $\rho_1 {v_1}^2 + P_1 = \rho_2 {v_2}^2 + P_2$

(ⅲ) $\frac{1}{2}{v_1}^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{1}{2}{v_2}^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{P_2}{\rho_2}$

(ⅳ) $\frac{P_1}{{\rho_1}^\gamma} = \frac{P_2}{{\rho_2}^\gamma}$

双極子磁場の式（円筒座標表示）

r≤ r_a（中心核）

$$\begin{pmatrix} B_\rho \\ B_\varphi \\ B_z \end{pmatrix} = B_0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$r_a \le r \le 2r_a$（中間）

$$\begin{pmatrix} B_\rho \\ B_\varphi \\ B_z \end{pmatrix} = \frac{B_0}{8} \begin{pmatrix} \frac{3z\rho}{r^2}\left(\frac{r}{r_a} - \frac{{r_a}^3}{r^3}\right) \\ 0 \\ 16 - \frac{6r}{r_a} - \frac{2{r_a}^3}{r^3} + \frac{3\rho^2}{r^2}\left(\frac{{r_a}^3}{r^3} - \frac{r}{r_a}\right) \end{pmatrix}$$

$2r_a \le r$（外側）

$$\begin{pmatrix} B_\rho \\ B_\varphi \\ B_z \end{pmatrix} = \frac{15B_0{r_a}^3}{8r^3} \begin{pmatrix} \frac{3z\rho}{r^2} \\ 0 \\ 2 - 3\frac{\rho^2}{r^2} \end{pmatrix}$$

基礎方程式

MHDの基礎方程式より

$$\rho\left(\frac{\partial}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\boldsymbol{u}=-\nabla p+\boldsymbol{j}\times\boldsymbol{B}$$

運動方程式
（電荷密度が小さく電場による力を考えない）

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho+\nabla(\rho\boldsymbol{u})=0$$

連続の式

$$\nabla\times\boldsymbol{B}=\boldsymbol{j}$$

変位電流を考えないアンペール･マクスウェルの式

$$\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{B}=\nabla\times(\boldsymbol{u}\times\boldsymbol{B})$$

誘導方程式
（電気伝導度が無限に高い、または磁気粘性率を考えない）

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\frac{P}{\rho^{\gamma}}=0$$

エネルギー方程式（断熱と近似し、流体粘性を考えない）

Maxwell方程式より

$$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0$$

ガウスの法則

（$\boldsymbol{\mu}=\mathbf{1}$の単位系）

基礎方程式

MHDの
基礎方程式より

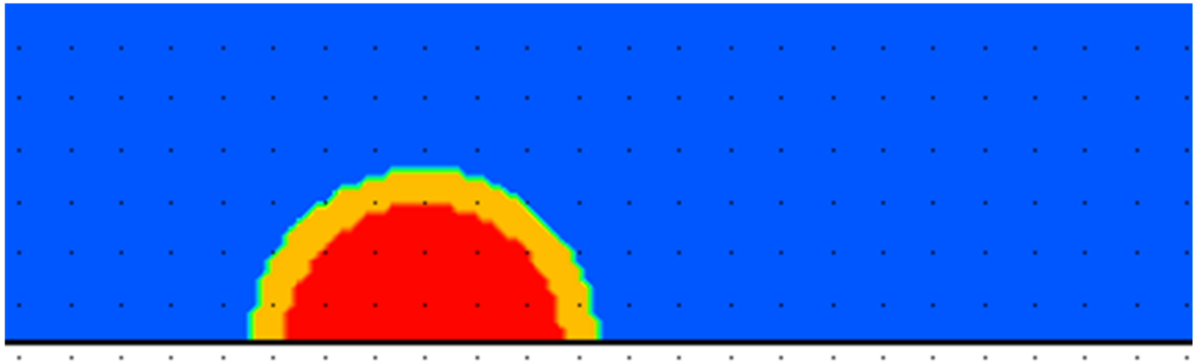
$\rho\left(\frac{\partial}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\boldsymbol{u}=-\nabla p+\boldsymbol{j}\times\boldsymbol{B}$ 運動方程式（電荷密度が小さく電場による力を考えない）

- $\frac{\partial}{\partial t}\rho+\nabla(\rho\boldsymbol{u})=0$連続の式
-
- $\nabla\times\boldsymbol{B}=\boldsymbol{j}$ 変位電流を考えないアンペール・マクスウェルの式
- $\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{B}=\nabla\times(\boldsymbol{u}\times\boldsymbol{B})$誘導方程式（電気伝導度が無限に高いとし、または磁気粘性率を考えない）

- $\left(\frac{\partial}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\frac{P}{\rho\gamma}=0$状態方程式（断熱と近似し、流体粘性を考えない）

Maxwell方程式より $\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0$

①の初期条件



領域1↑　↑領域2　↑領域0

$$
\begin{cases}
\text{領域0} \quad \rho = 1.0 \quad P = \dfrac{1}{\gamma} \quad u = 0 \\
\text{領域1} \quad \rho = 1500 \quad P = \dfrac{1}{\gamma} \quad u = 0 \\
\text{領域2} \quad \rho = 11000 \quad P = \dfrac{1}{\gamma} \quad u = 0
\end{cases}
$$

$(\gamma = 0.6)$

- （磁場なし）

磁気流体シミュレーション

半径
- $r \leq r_a$ にz方向正の向きに一様な磁場、
- $2r_a \leq r$ に双極子の磁場、
- $r_a \leq r \leq 2r_a$ にはそれを繋ぐ磁場を入れる。

（MIKAMI et al. 2008 ）

円筒座標表示

r$\leq r_a$（中心核）

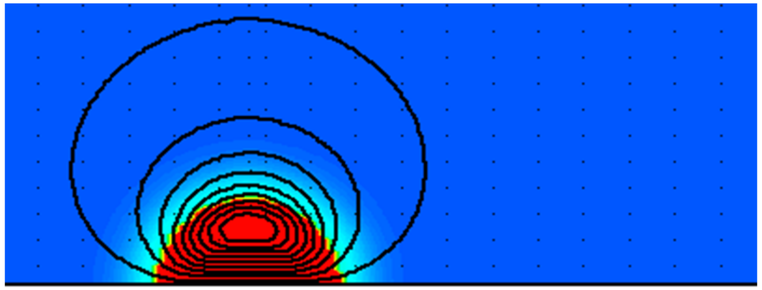
$$\begin{pmatrix} B_\rho \\ B_\varphi \\ B_z \end{pmatrix} = B_0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$r_a \leq r \leq 2r_a$（中間）

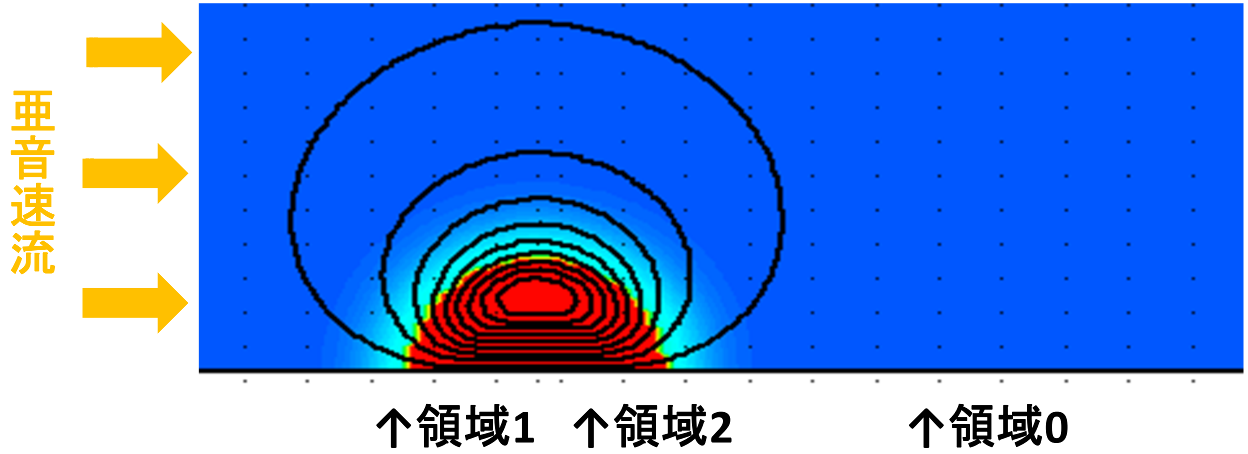
$$\begin{pmatrix} B_\rho \\ B_\varphi \\ B_z \end{pmatrix} = \frac{B_0}{8} \begin{pmatrix} \frac{3z\rho}{r^2}\left(\frac{r}{r_a} - \frac{{r_a}^3}{r^3}\right) \\ 0 \\ 16 - \frac{6r}{r_a} - \frac{2{r_a}^3}{r^3} + \frac{3\rho^2}{r^2}\left(\frac{{r_a}^3}{r^3} - \frac{r}{r_a}\right) \end{pmatrix}$$

$2r_a \leq r$（外側）

$$\begin{pmatrix} B_\rho \\ B_\varphi \\ B_z \end{pmatrix} = \frac{15 B_0 {r_a}^3}{8r^3} \begin{pmatrix} \frac{3z\rho}{r^2} \\ 0 \\ 2 - 3\frac{\rho^2}{r^2} \end{pmatrix}$$



②の初期条件・境界条件



密度	$\rho = 1.0$ (領域0), $\rho = 10$(領域1), $\rho = 11000$(領域2)
圧力	$P = \frac{1}{\gamma}$ で一様 $\left(\gamma = \frac{5}{3}\right)$
速度	$u = 0$
半径	0.20（領域2）, 0.50（領域1）

磁場　中心の一様磁場の大きさB_0を、1.0とする。

（境界条件は①の亜音速流のものと同じ）