

Rayleigh-Taylor不安定性が相対論的 ジェットに与える影響

松本仁

国立天文台

天文シミュレーションプロジェクト

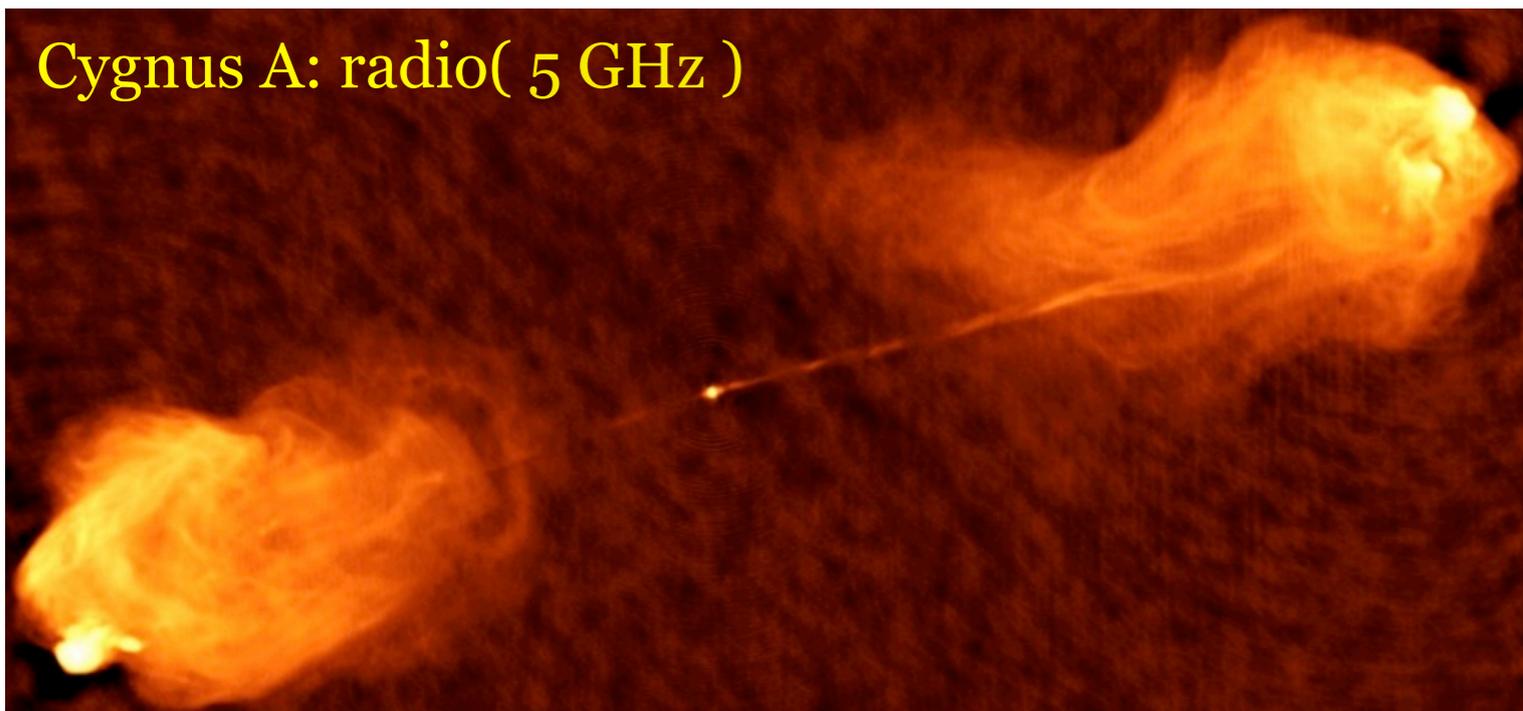
カテゴリ：XT4A

共同研究者：政田洋平（神戸大学）

柴田一成（京都大学）

イントロ

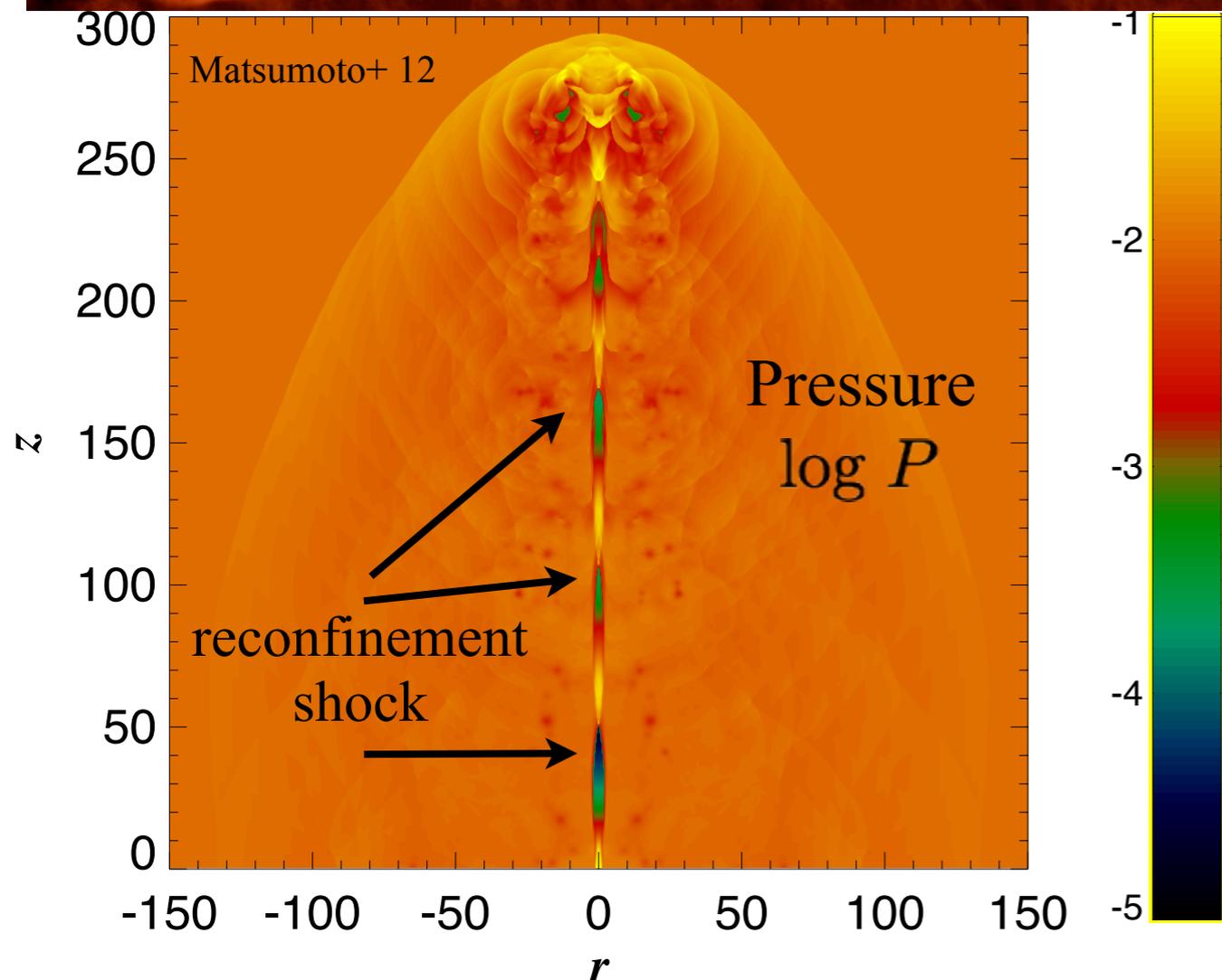
Cygnus A: radio(5 GHz)



相対論的ジェット：

- ガンマ線バースト $\gamma > 100$
- AGNジェット $\gamma \sim 10$
- マイクロクエーサー $v \sim 0.9c$

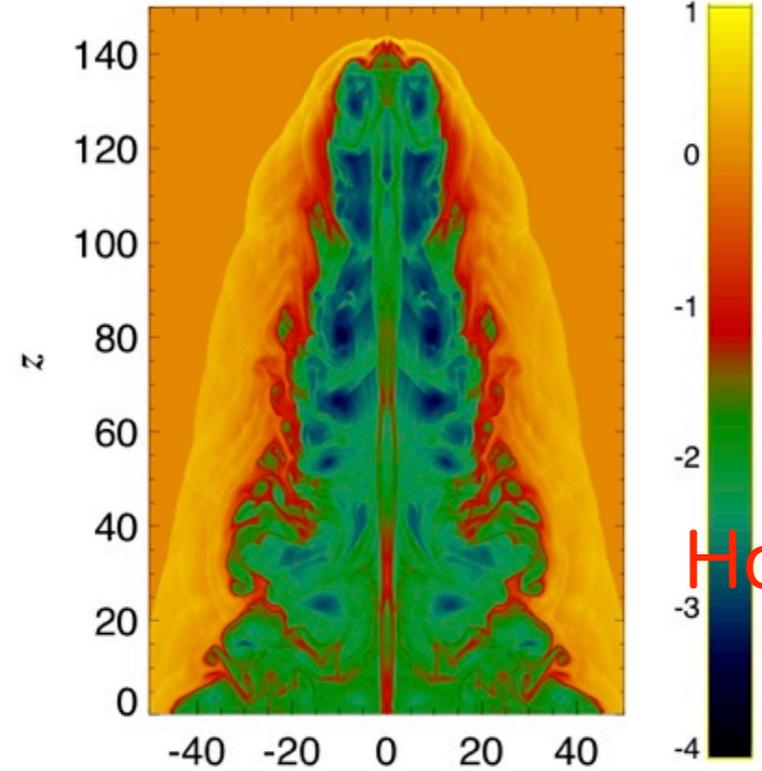
ローレンツ因子：
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$



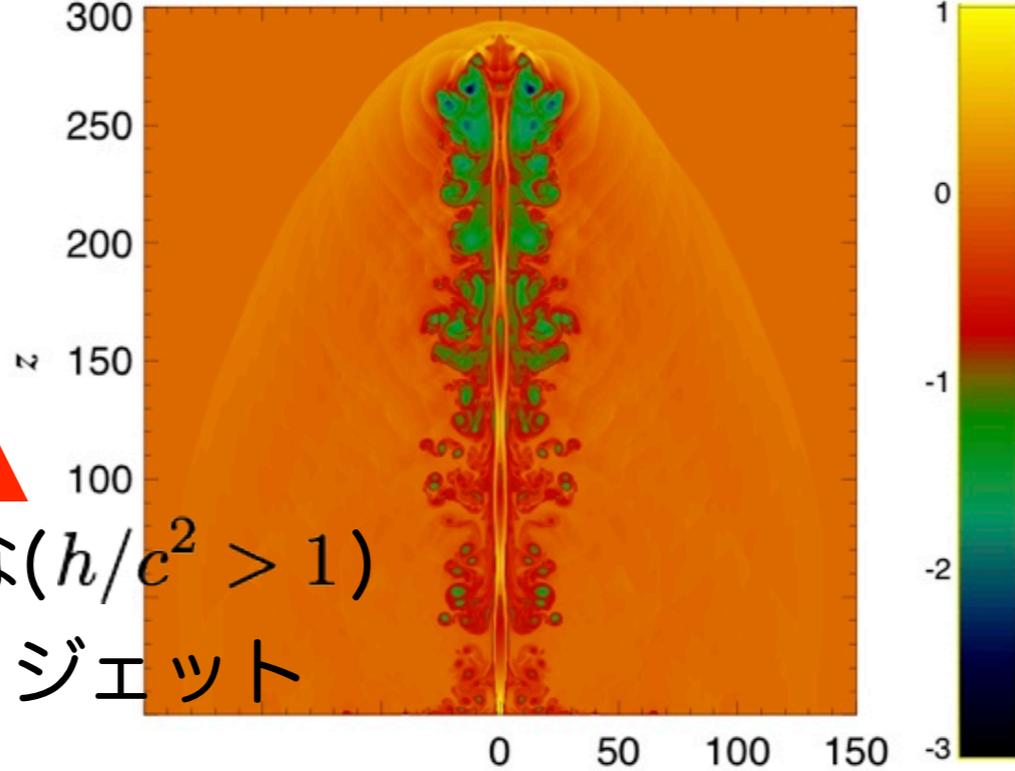
- ジェットのダイナミクスを理解する数値シミュレーション (Marti+97, Aloy+99, Mizuta+04)
- reconfinement shockの形成 (Norman+82, Sanders 83)
- 動径方向の周期的な振動 (Daly+ 88, Matsumoto+12)

イントロ

Effective inertia $\log \gamma^2 \rho h$: $t=01600$



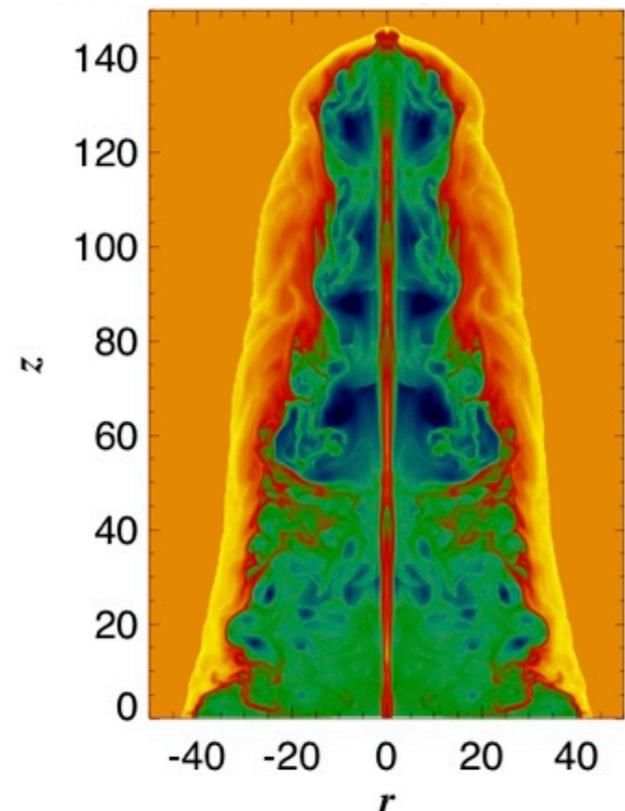
Effective inertia $\log \gamma^2 \rho h$: $t=01000$



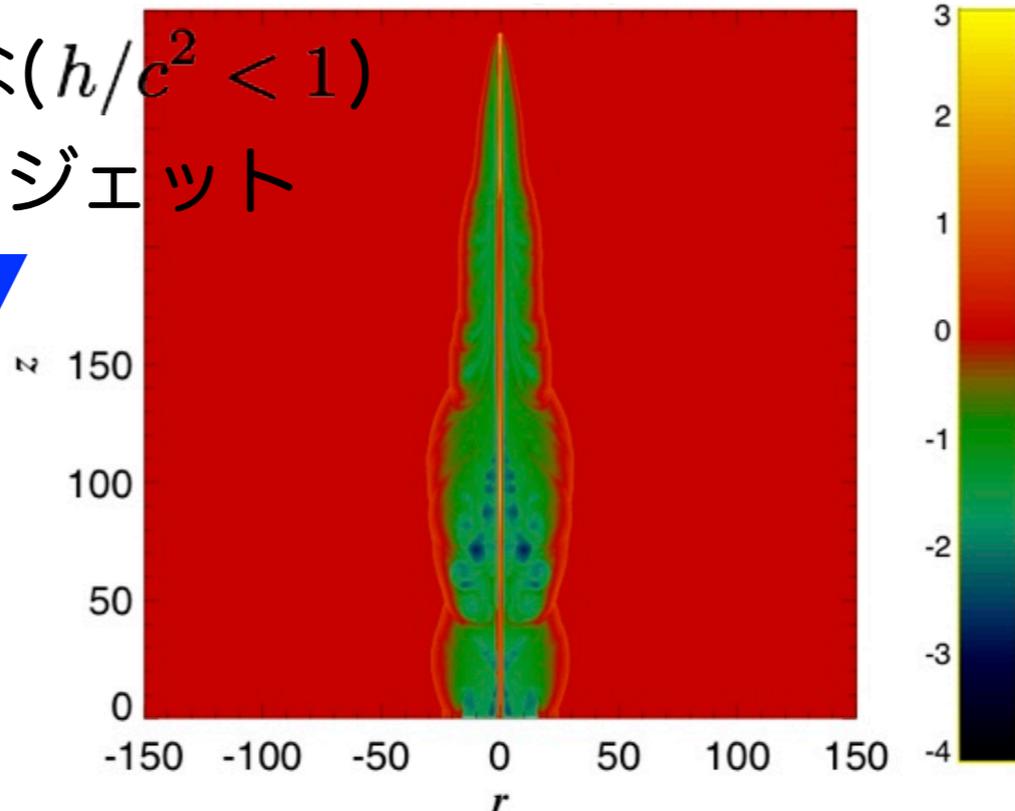
Hotな ($h/c^2 > 1$)
ジェット

$(\gamma^2 \rho h)_{\text{jet}} < \rho_{\text{amb}}$

$(\gamma^2 \rho h)_{\text{jet}} > \rho_{\text{amb}}$



Coldな ($h/c^2 < 1$)
ジェット



相対論的ガスの実効的な慣性：
 $\gamma^2 \rho h / c^2$

$$\frac{h}{c^2} = 1 + \frac{\Gamma}{\Gamma - 1} \frac{P}{\rho c^2}$$

- $(\gamma^2 \rho h)_{\text{jet}} < \rho_{\text{amb}}$

分厚いコクーンが形成

- $(\gamma^2 \rho h)_{\text{jet}} > \rho_{\text{amb}}$

薄いコクーンが形成

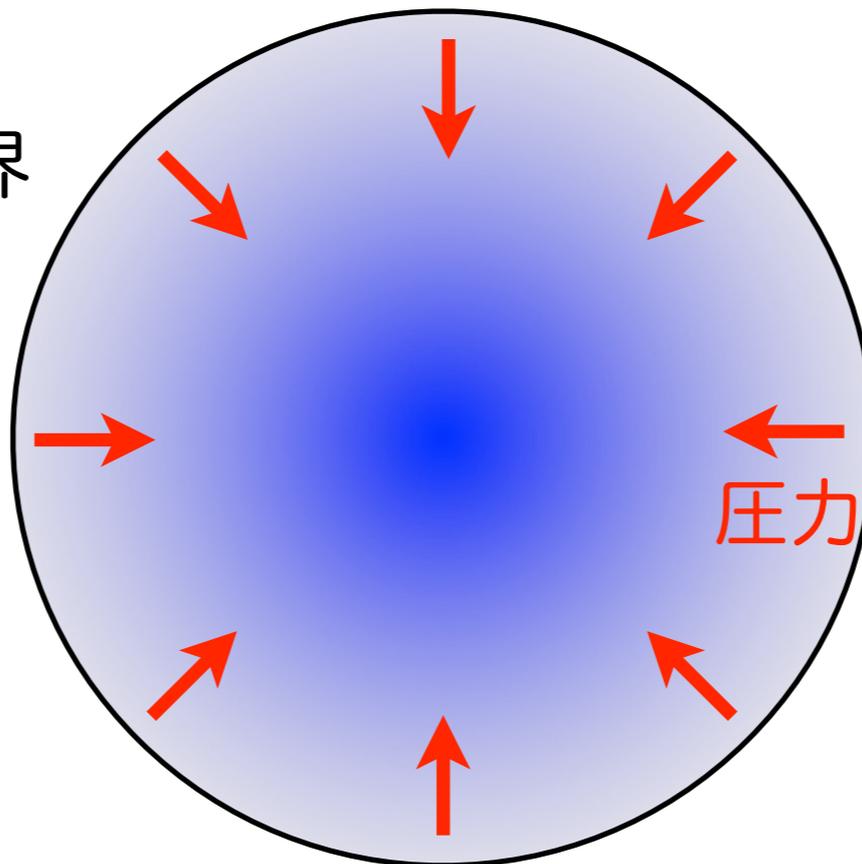
実効的な慣性の大きさ
ジェット > 外側の媒質

本研究の目的

ジェットの断面図

ジェットの境界

ジェットの境界で
Rayleigh-Taylor 不安定
が成長



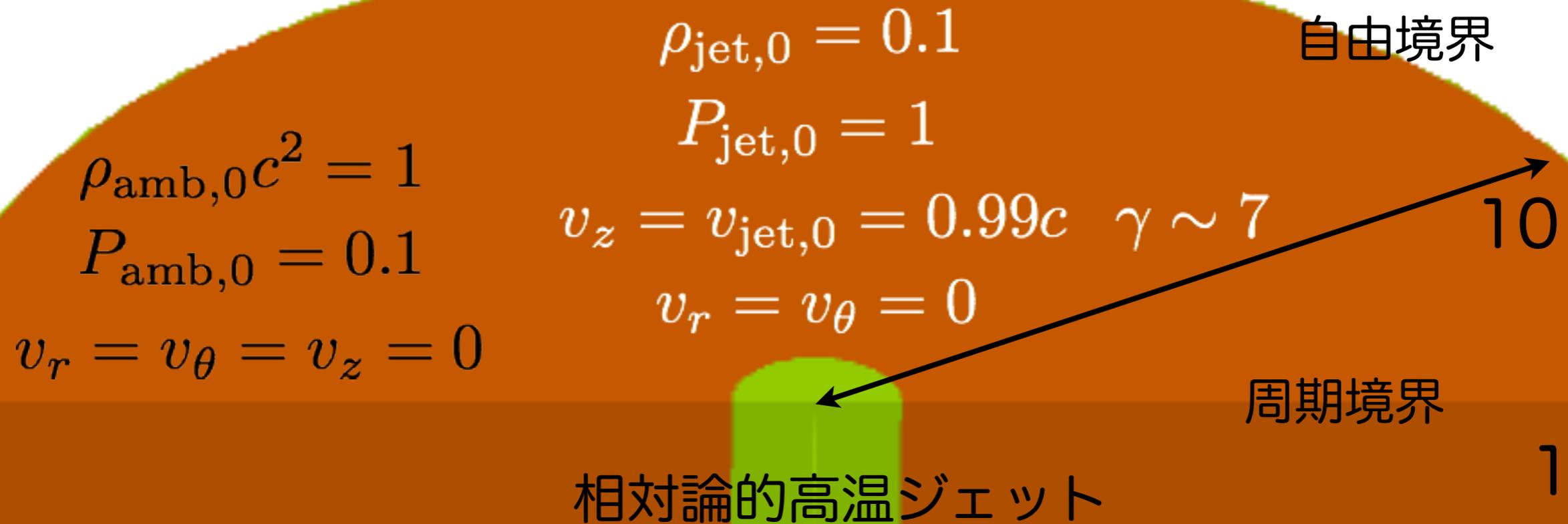
ジェット境界にジェット
内側に向かう圧力勾配力
が形成

圧力勾配力

3次元シミュレーションを用いてRayleigh-Taylor
不安定がジェットに与える影響を調べる

- ジェットの形状
- ジェットの速度

仮定・状況設定 (トイモデル)



- 円柱座標3次元: $r - \theta - z$
- 相対論的高温ジェット (z方向)
- 理想気体
- 一様グリッド: $\Delta r = \Delta z = 10/320, \Delta \theta = 2\pi/200$
- 計算スキーム: HLLC (Mignone & Bodo 05)

周期境界

基礎方程式

質量保存
$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma\rho) + \nabla \cdot (\gamma\rho\mathbf{v}) = 0$$

運動量保存
$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma^2\rho h\mathbf{v}) + \nabla \cdot (\gamma^2\rho h\mathbf{v}\mathbf{v} + Pc^2\mathbf{I}) = 0$$

エネルギー保存
$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma^2\rho h - P) + \nabla \cdot (\gamma^2\rho h\mathbf{v}) = 0$$

ローレンツ因子

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

単位質量あたりのエンタルピー

$$\frac{h}{c^2} = 1 + \frac{\Gamma}{\Gamma - 1} \frac{P}{\rho c^2}$$

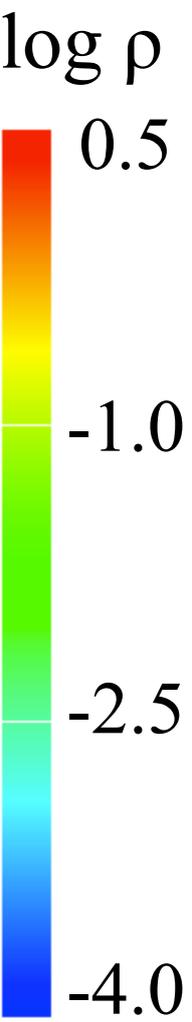
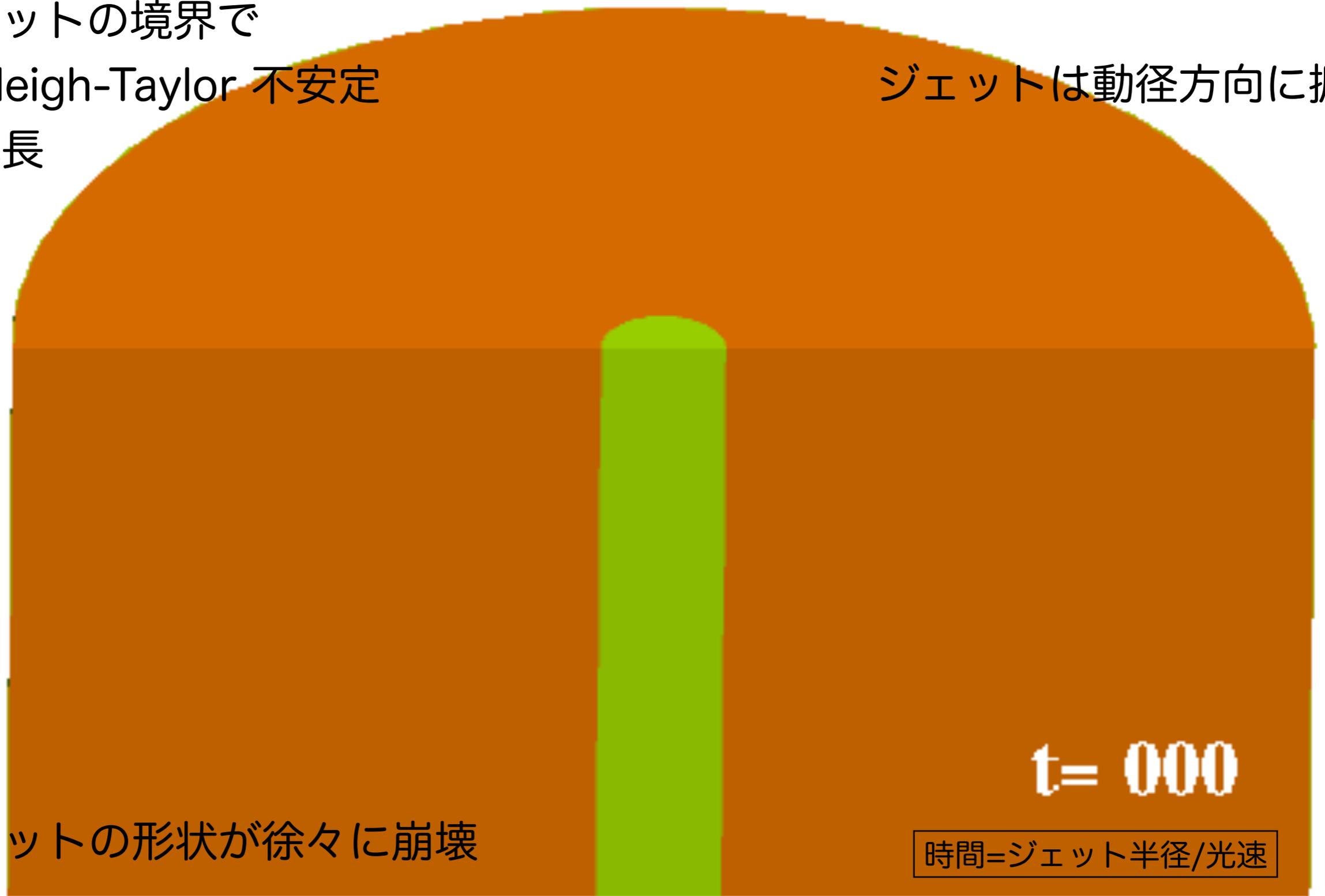
計算結果：密度

Density

ジェット境界で

Rayleigh-Taylor 不安定
が成長

ジェットは動径方向に振動



ジェットの形状が徐々に崩壊

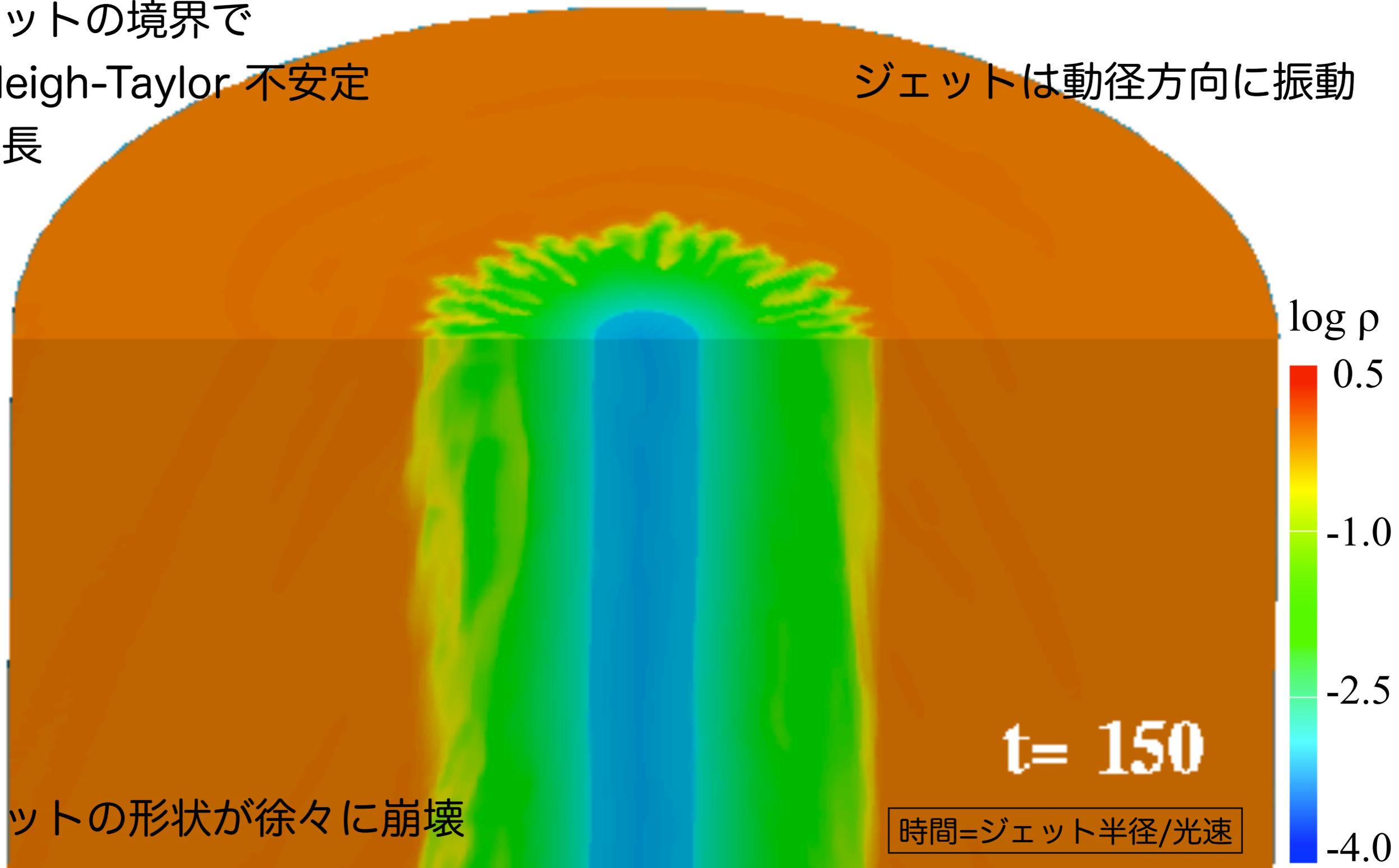
時間=ジェット半径/光速

計算結果：密度

Density

ジェットの境界で
Rayleigh-Taylor 不安定
が成長

ジェットは動径方向に振動



ジェットの形状が徐々に崩壊

時間=ジェット半径/光速

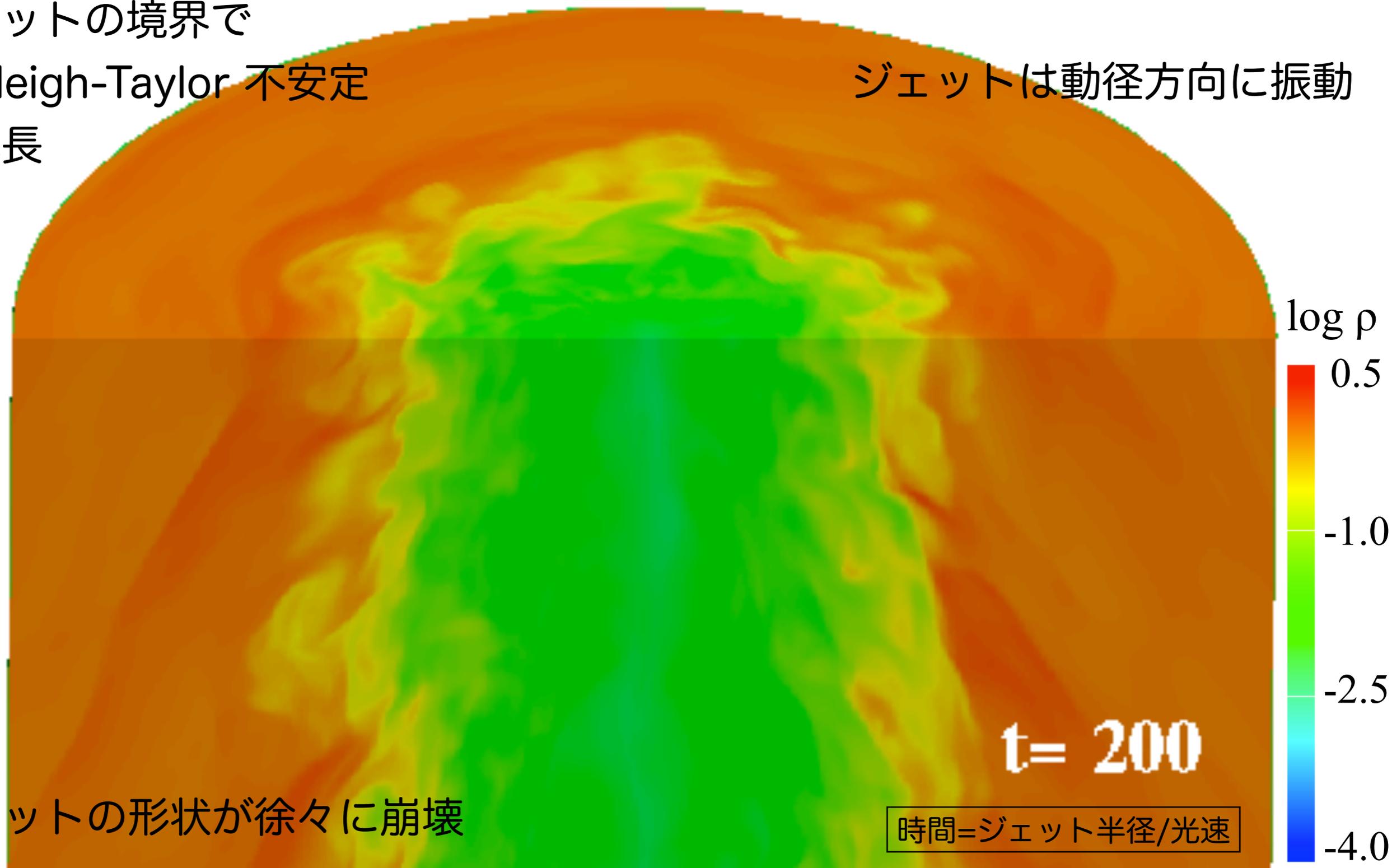
計算結果：密度

Density

ジェット境界で

Rayleigh-Taylor 不安定
が成長

ジェットは動径方向に振動



ジェットの形状が徐々に崩壊

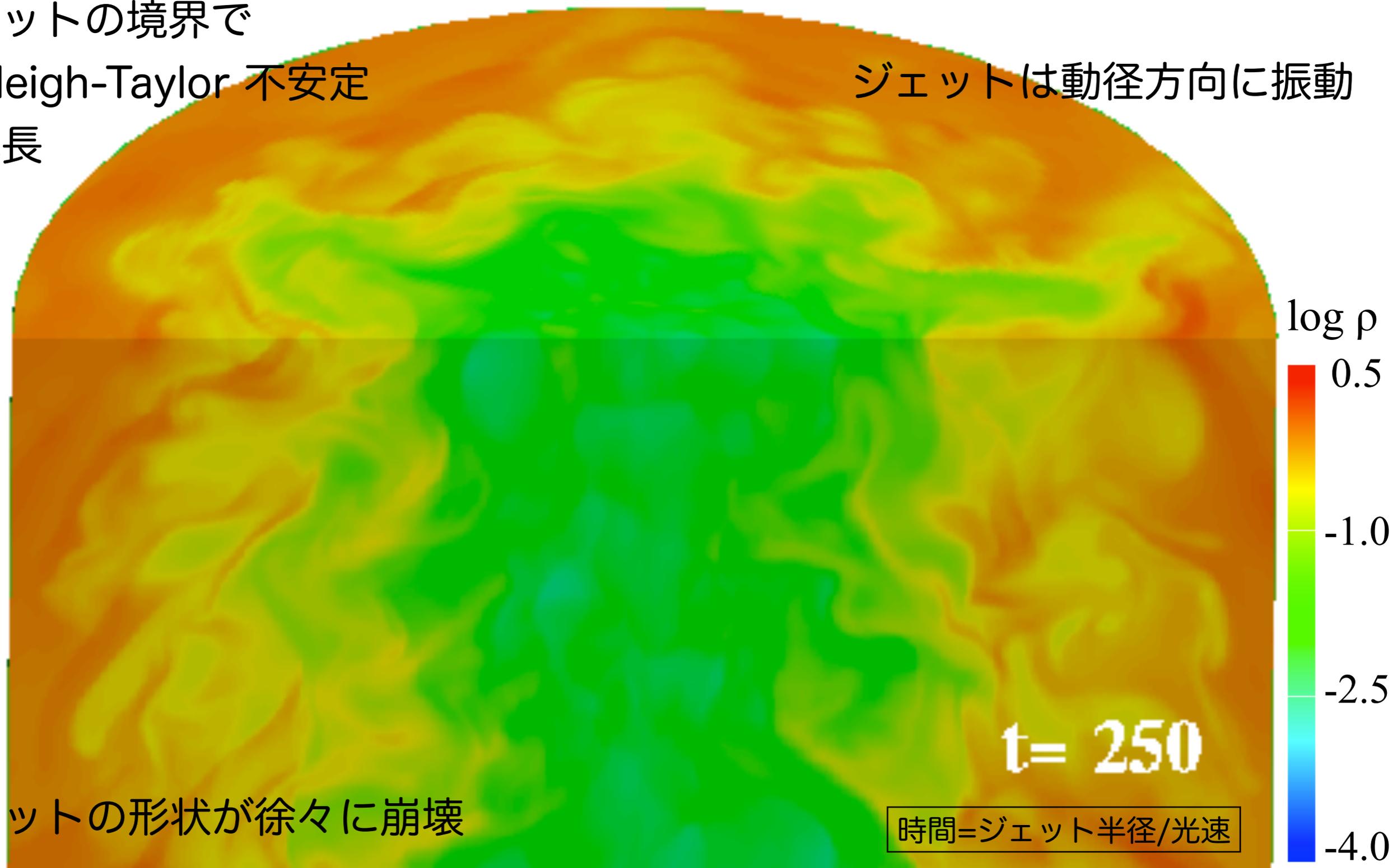
時間=ジェット半径/光速

計算結果：密度

Density

ジェットの境界で
Rayleigh-Taylor 不安定
が成長

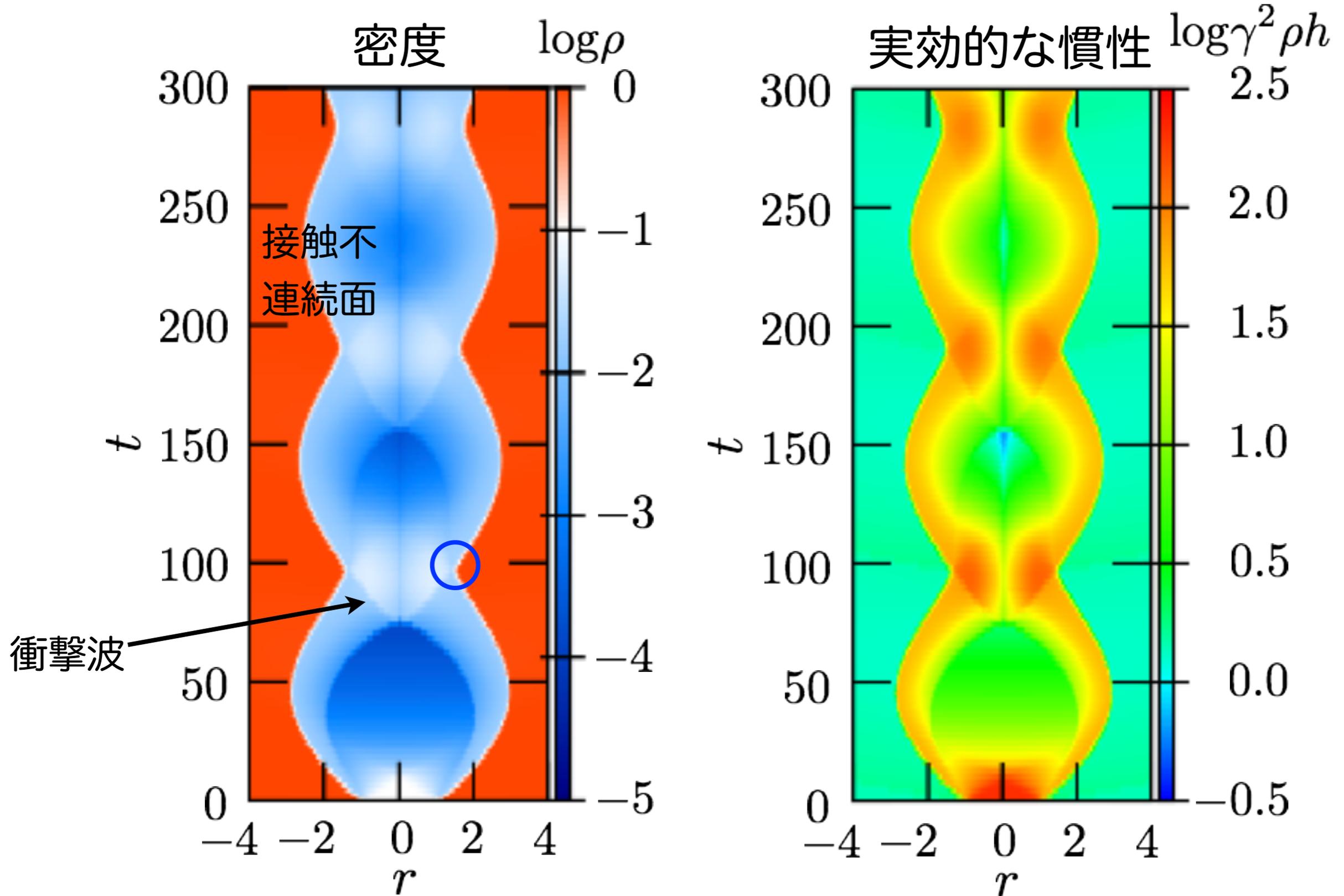
ジェットは動径方向に振動



ジェットの形状が徐々に崩壊

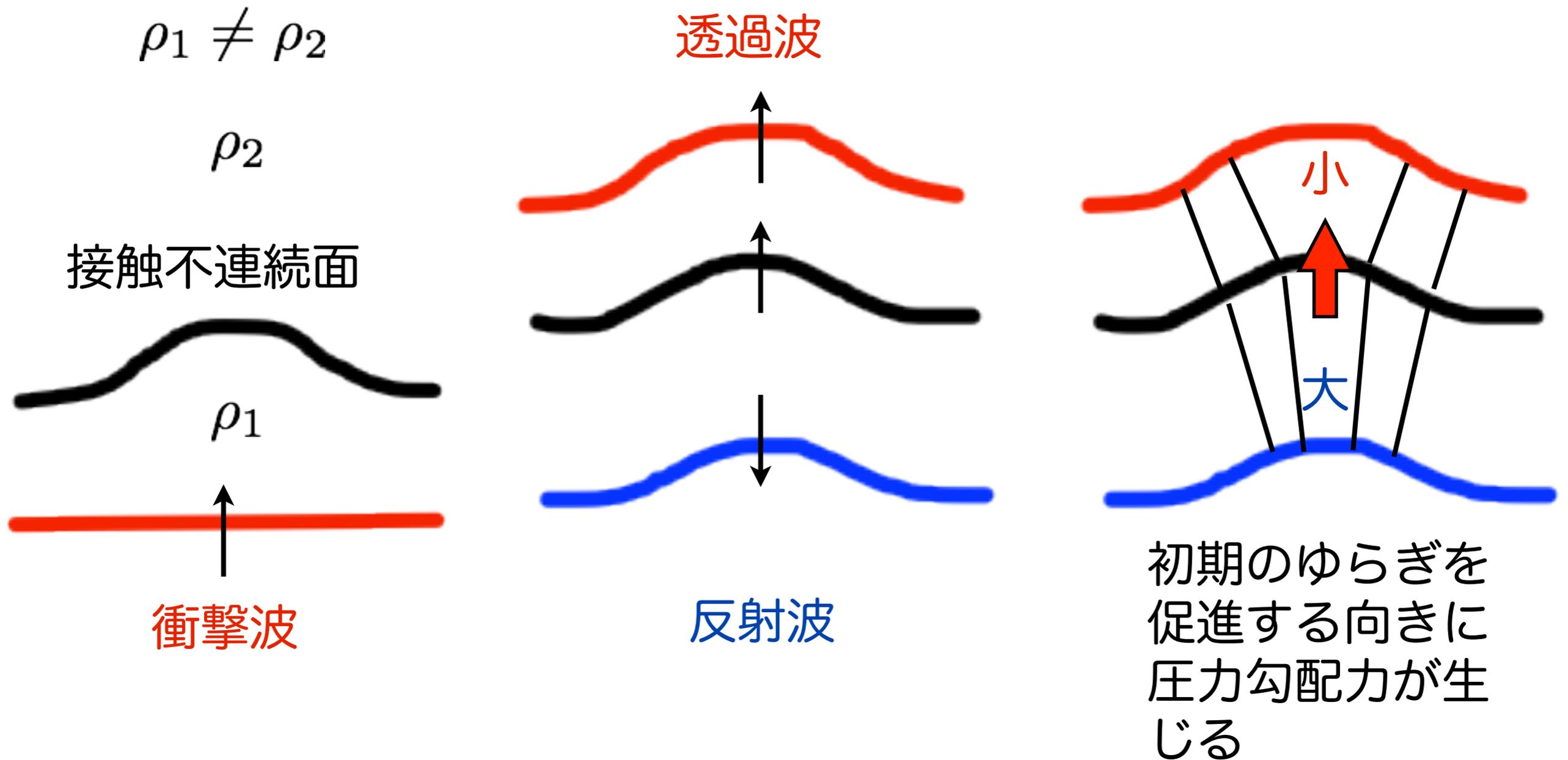
時間=ジェット半径/光速

一次元計算による時間発展(Matsumoto+12)



$t \sim 100$ あたりでRichtmyer-Meshkov不安定性が成長する可能性有り

Richtmyer-Meshkov 不安定

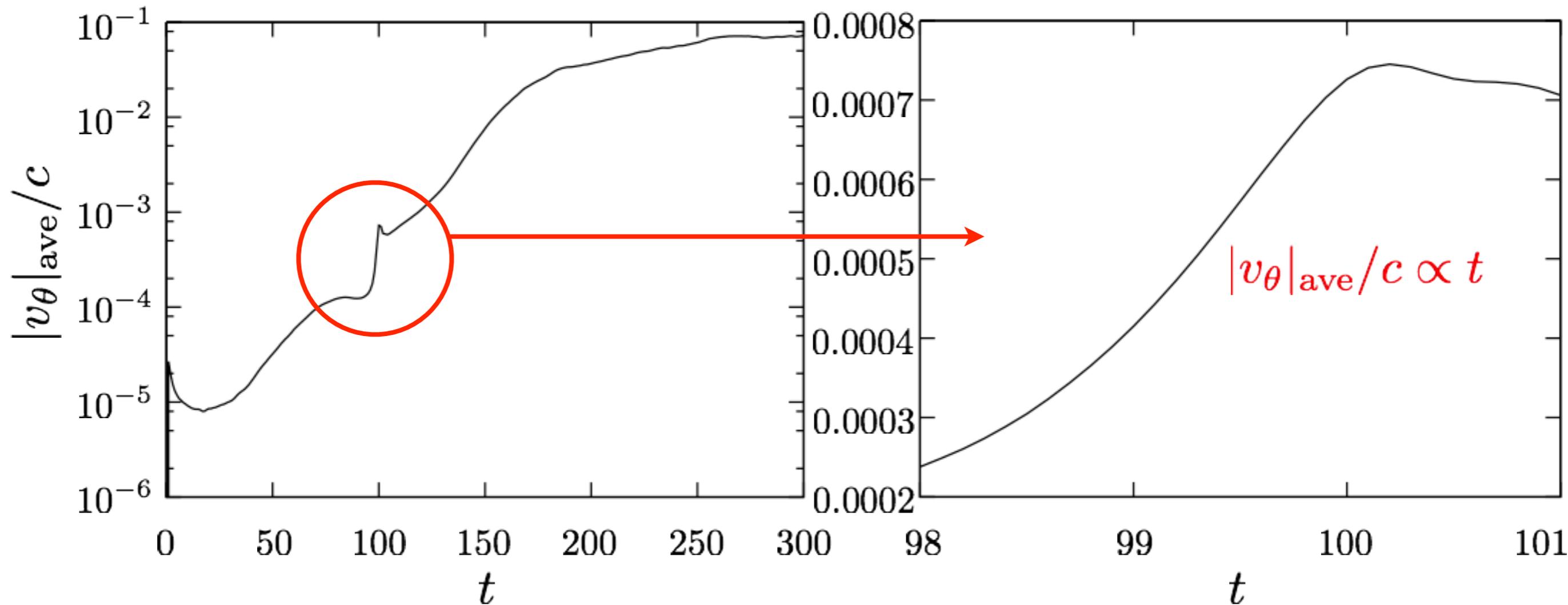


- 反射波、及び透過波との相互作用により接触不連続面のゆらぎが成長

$$\text{ゆらぎ} : \delta \propto t$$

(Richtmyer 1960)

Richtmyer-Meshkov不安定性の影響



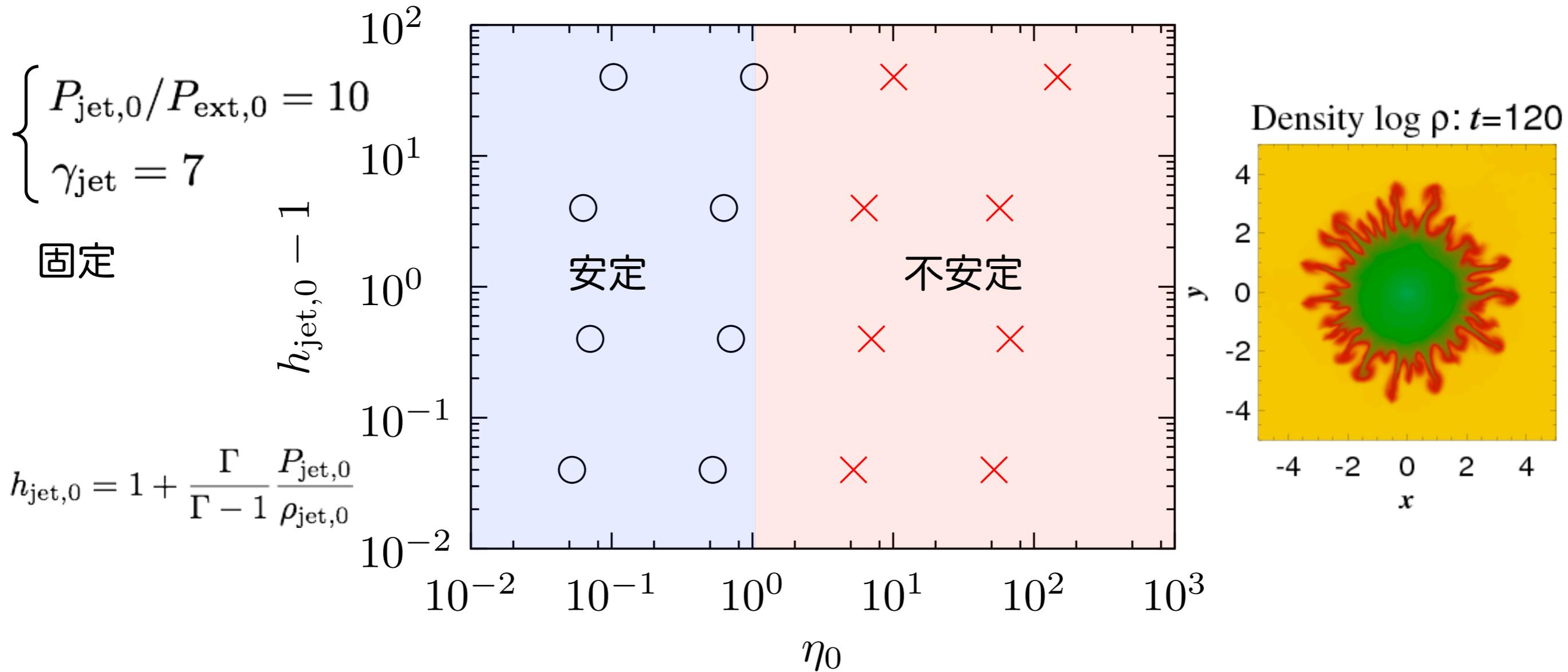
Rayleigh-Taylor不安定性
が成長

Richtmyer-Meshkov不安定性
が成長

Rayleigh-Taylor不安定性及びRichtmyer-Meshkov不安定性が成長することでジェット境界が崩壊

ジェットの境界が崩れる条件

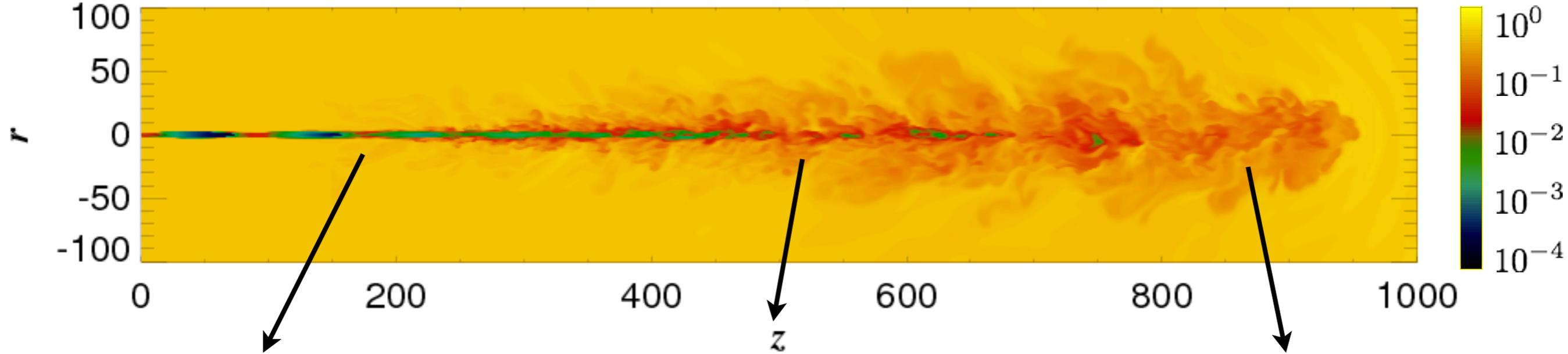
ジェットの断面の進化をおう二次元計算のパラメータサーベイ



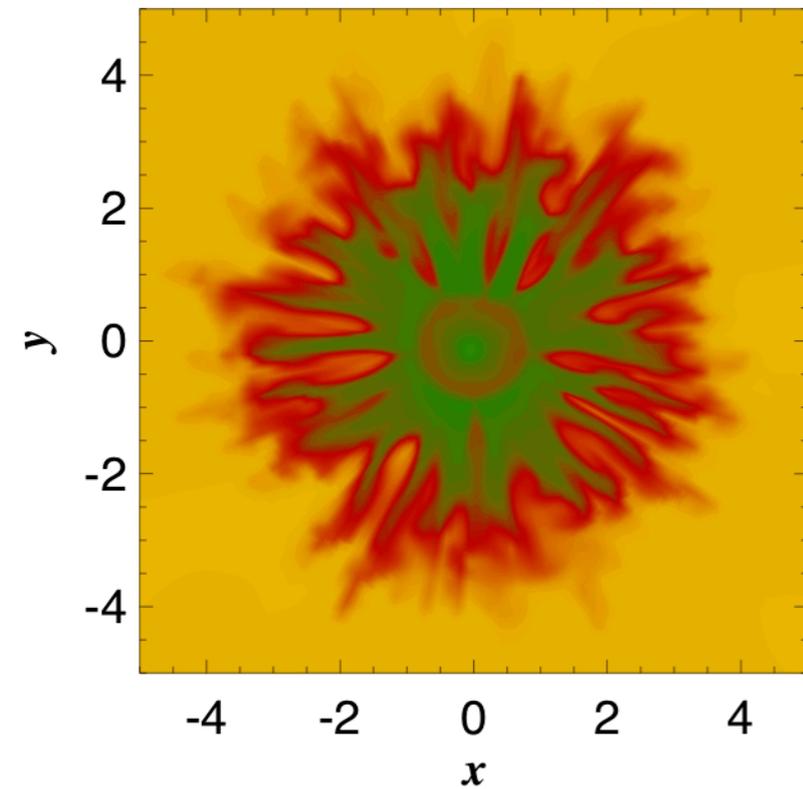
ジェットの境界が崩れる条件：実効的な慣性の比 $\eta_0 \equiv \frac{(\gamma^2 \rho h)_{\text{jet}}}{(\gamma^2 \rho h)_{\text{ext}}} \gtrsim 1$

3次元ジェット伝搬問題：密度

Density $\log \rho: t=2000$

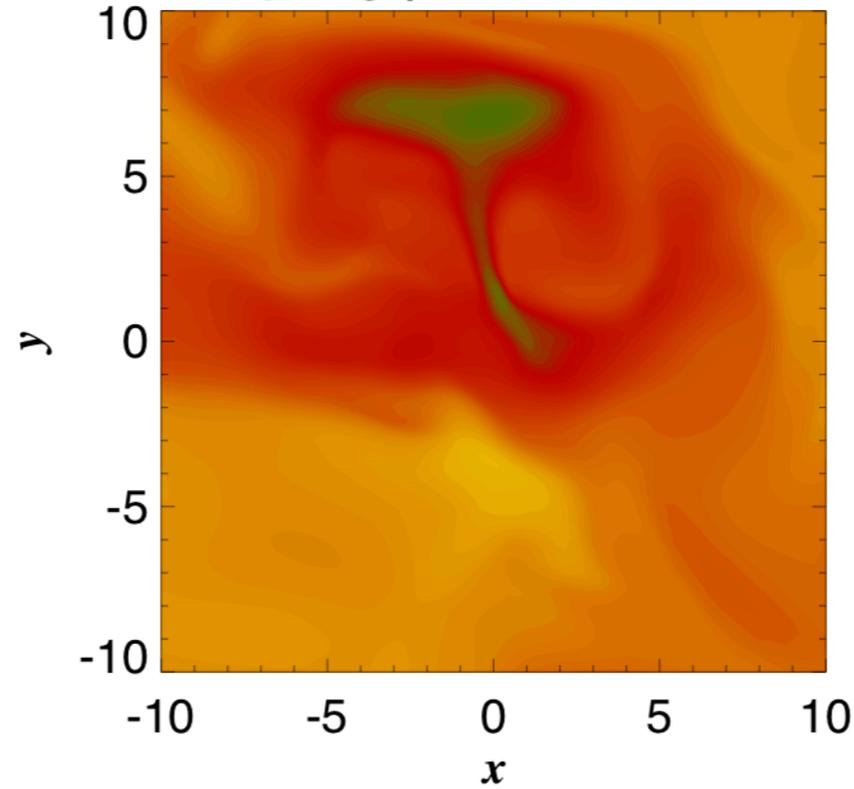


Density $\log \rho: t=2000 \ z= 165.5$



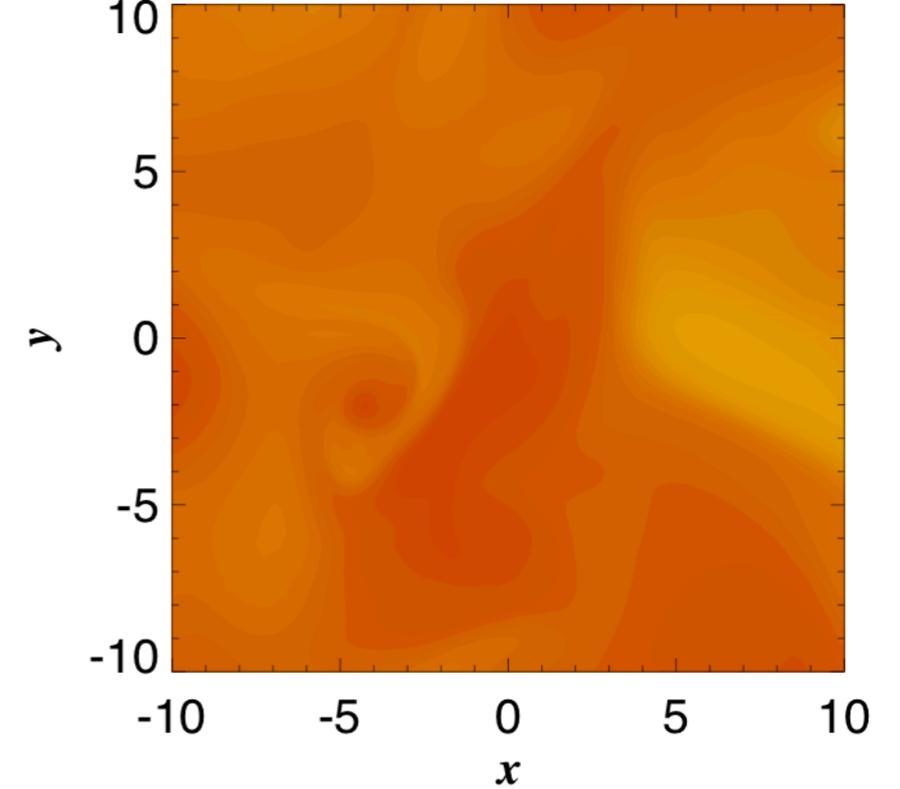
ジェットの境界でRayleigh-Taylor 不安定が成長

Density $\log \rho: t=2000 \ z= 530.5$



円筒上の形状ではなくなる

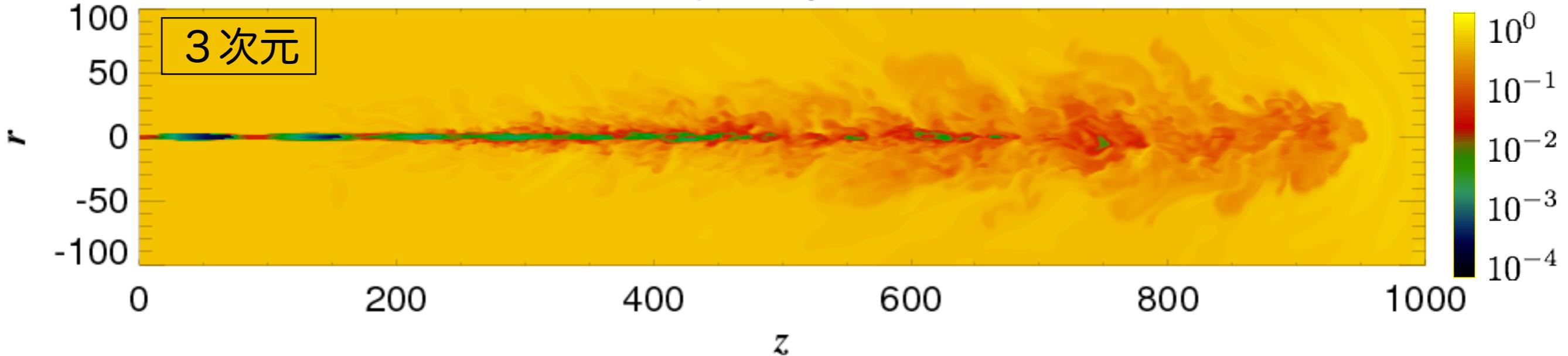
Density $\log \rho: t=2000 \ z= 880.5$



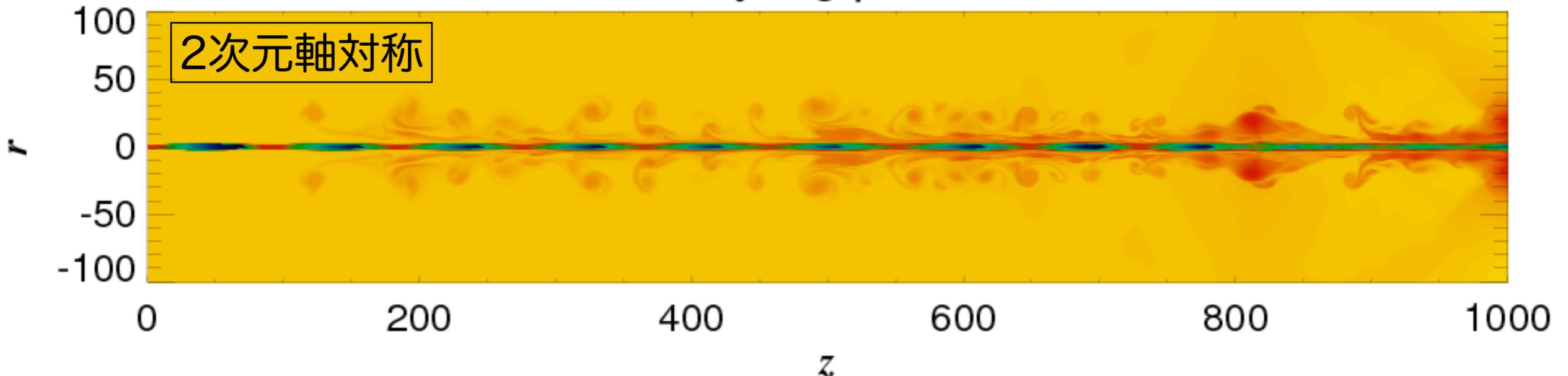
外部の物質との混合が生じる

2次元軸対称計算との比較：密度

Density $\log \rho$: $t=2000$



Density $\log \rho$: $t=2000$

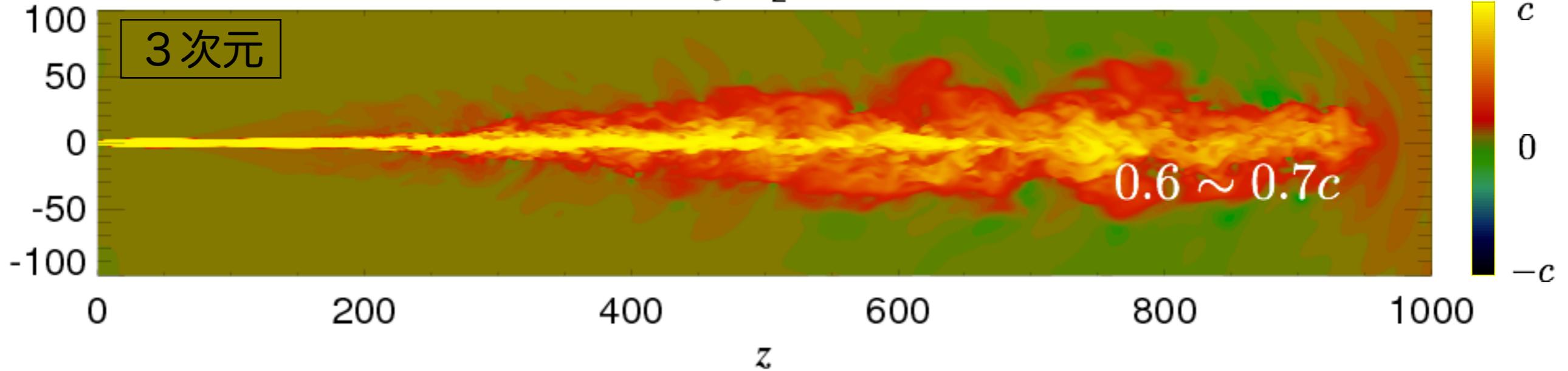


動径方向の振動： フロー速度 $\sim c$ であるため時間的振動は z 軸方向の空間的な
周期構造として現れる $ct \sim z$

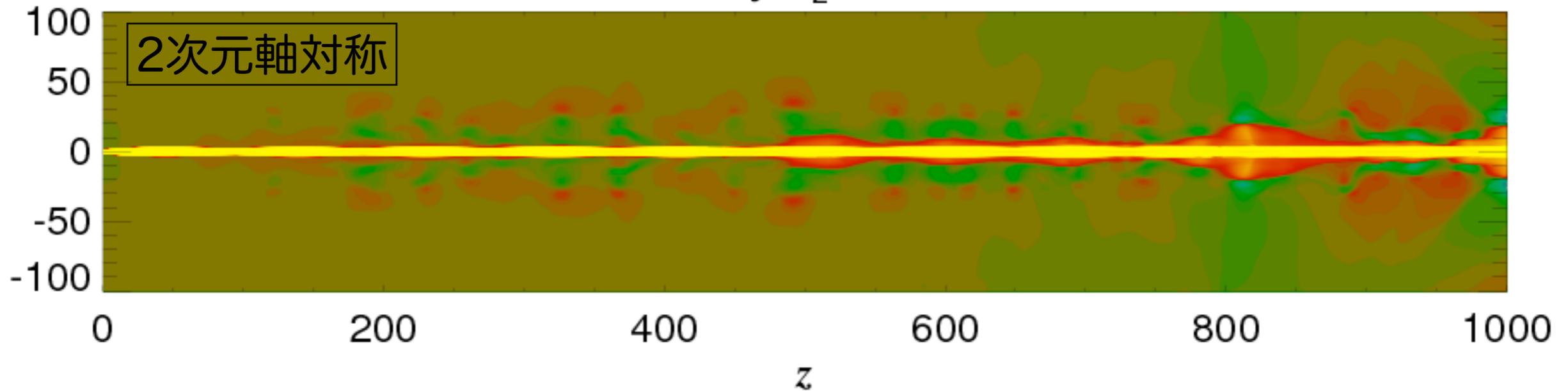
不安定が成長するにつれ、空間的な周期構造が維持できなくなる

2次元軸対称計算との比較：速度

Velocity v_z : $t=2000$



Velocity v_z : $t=2000$

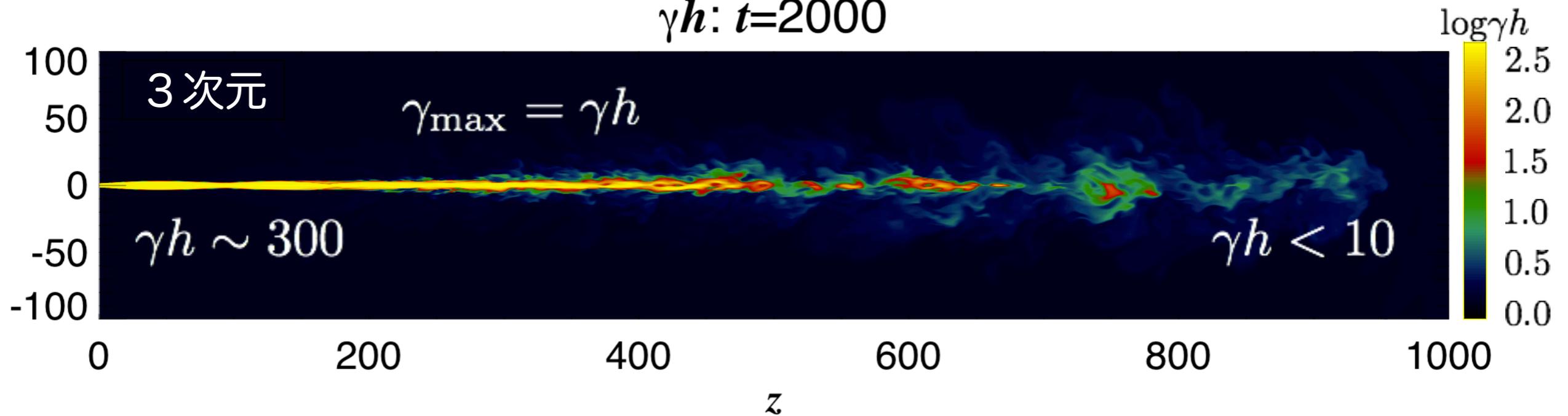


2次元： 相対論的速度を維持

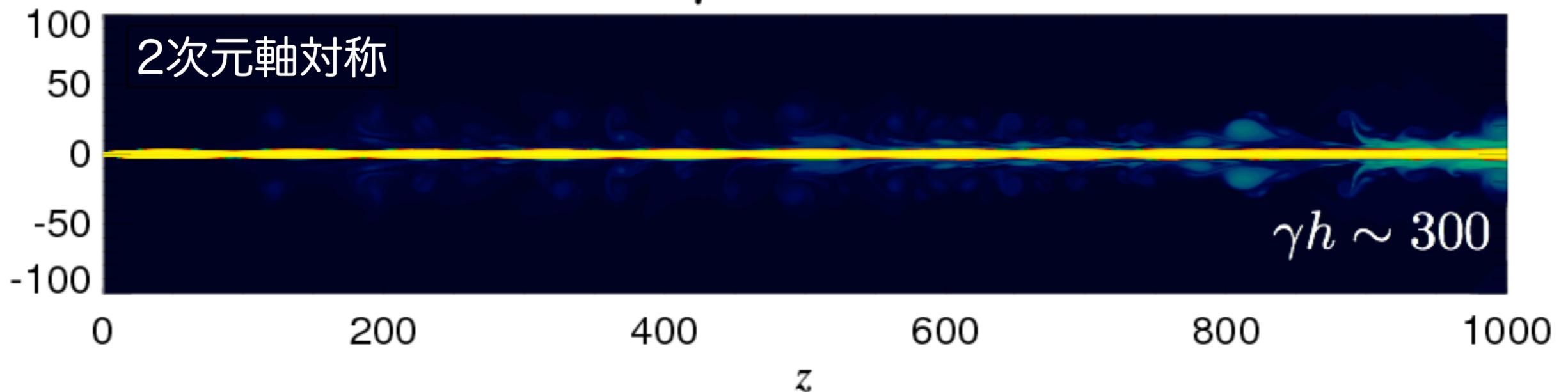
3次元： ジェット外の物質と混合するため減速

2次元軸対称計算との比較： γh

$\gamma h: t=2000$



$\gamma h: t=2000$

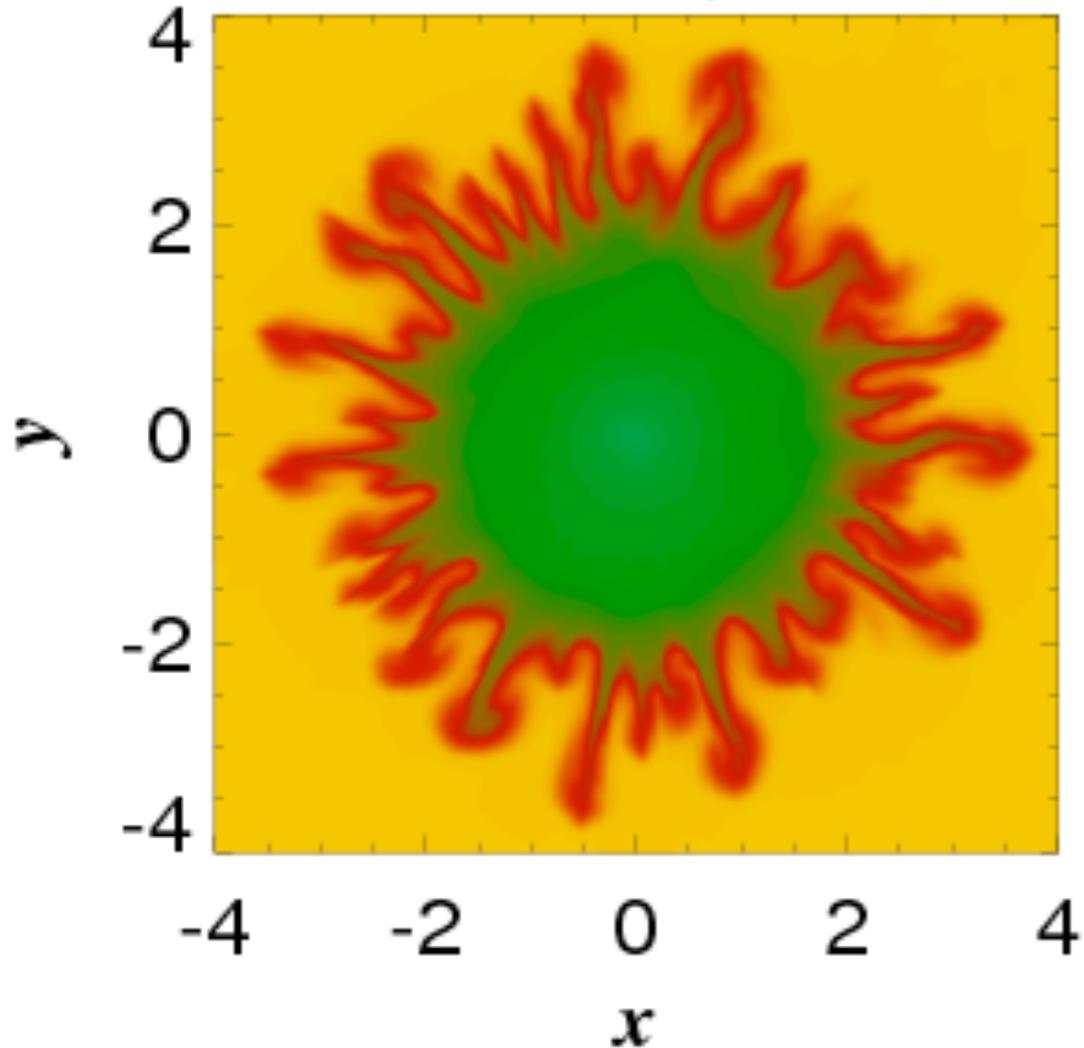


2次元： γh の値を維持

3次元：ジェット外の物質と混合するため γh の値が減少

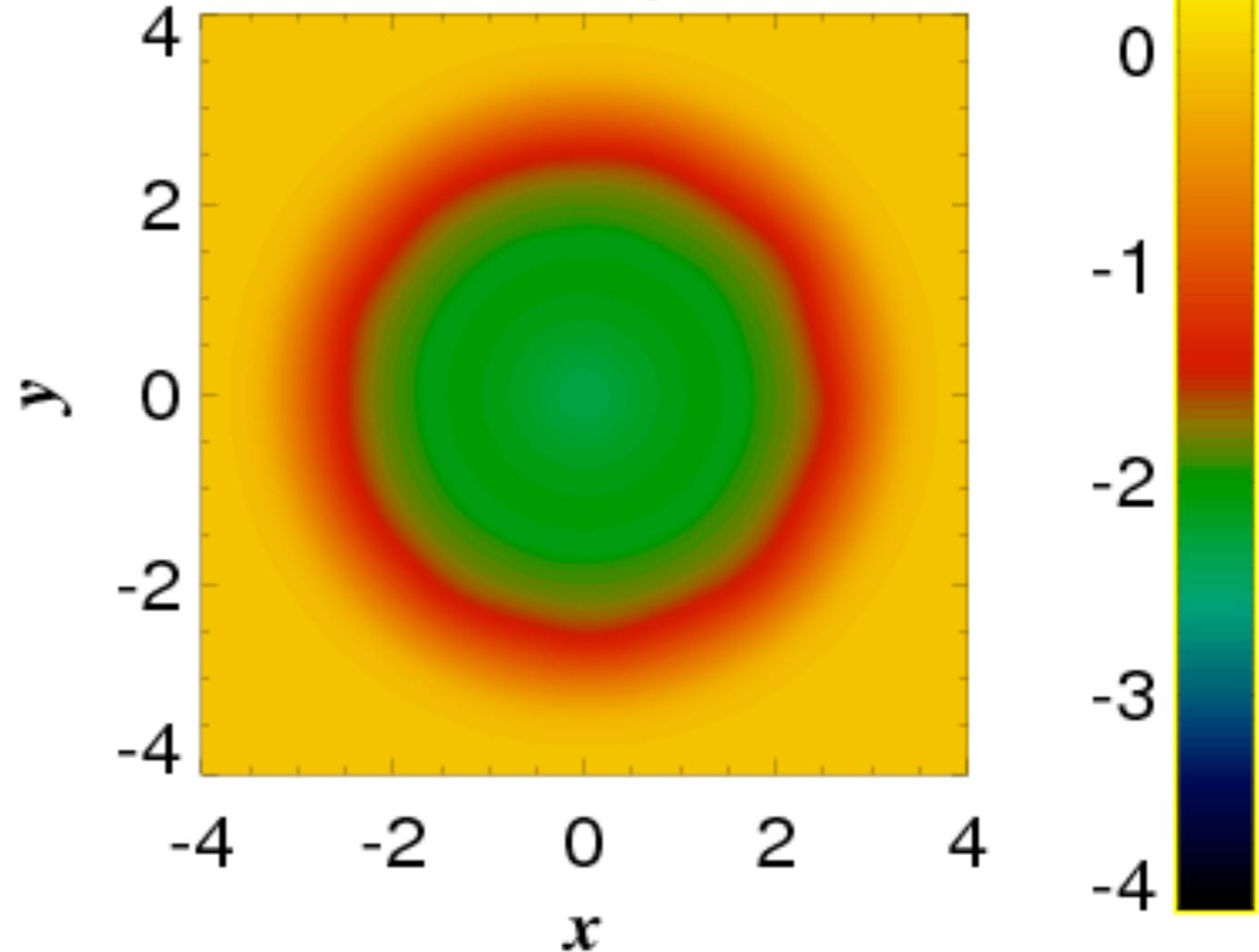
計算スキームの比較

Density $\log \rho: t=120$



HLLCスキーム

Density $\log \rho: t=120$



HLLスキーム

Rayleigh-Taylor及びRichtmyer-Meshkov
不安定性の成長を追うのは困難

接触不連続面をなまらさずに解けるコードが必要！！

まとめ

ジェットの境界で成長する Rayleigh-Taylor 不安定が
ジェットのダイナミクスに与える影響

相対論的ジェットの基本的な性質の理解

■ Rayleigh-Taylor 不安定が成長する条件

ジェットの実効的な慣性がジェット外部の媒質よりも大

■ Rayleigh-Taylor 不安定がジェットに与える影響

- ・ 一様媒質にジェットが注入された場合

ジェットの境界で Rayleigh-Taylor 不安定が成長することで
ジェット外部の物質との混合がおこり、ジェットが伝搬する
間に相対論的速度を維持できなくなる程、減速