



# 拡張されたVMECによる 非等方圧力MHD平衡解析

朝日良光

総合研究大学院大学

Mar. 8<sup>th</sup>, 2011 若手研究会



# Objective and Overview

- 目的  
非等方圧力を持つMHD平衡の性質を調べる
- 概説  
圧力の平行・垂直方向がそれぞれ磁気面量となる解析モデルと、bi-Maxwellianモデルを用いた、平衡解析コードから得られる平衡の性質を比較した。  
  
また、平衡解析コードのパラメータスキャンにより、bi-Maxwellianモデルでの圧力分布や非等方度の関係を調べた。



# Table of contents

---

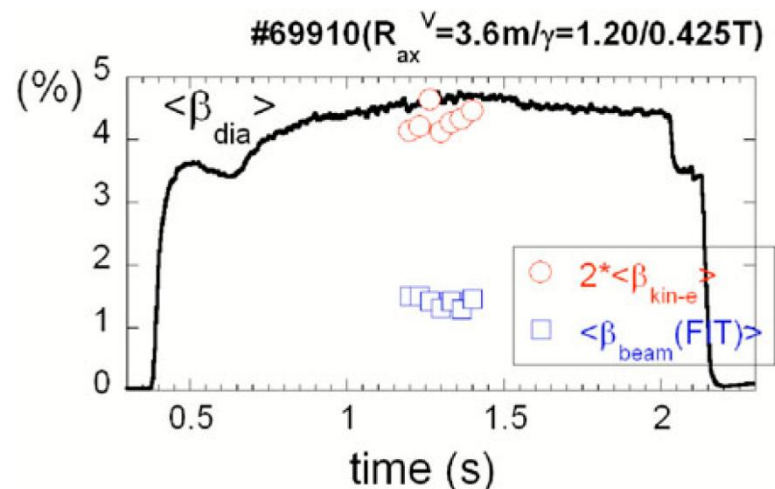
- 目的, 概説
- 背景  
動機  
非等方圧力MHDの過去の研究
- 計算モデル
- 数値計算結果
- まとめ

## 実験での非等方圧力

- LHDの高ベータプラズマは、低密度・低磁場において接線入射NBIの加熱によって生成・維持されている。  
NBの減速時間↑, 熱圧力↓, 高エネ粒子閉じ込め↑,

- ➡ ビーム圧力の熱圧力に対する比率↑,
- ➡ 非等方圧力  $p_{||} > p_{\perp}$

- ビーム圧力がβ値の30%を占めている



等方圧力を仮定したβ値

$\beta_{dia}$ : 反磁性計測から得られるβ値

$\beta_{kin-e}$ :  $T_e, n_e$  プロファイル計測から得られるβ値

$\beta_{beam}$ : モンテカルロ解析により見積もられる接線入射ビームが占めるβ値

## 解析モデルから予測される磁気軸シフト

- 非等方圧力を導入した場合のMHD平衡に対する影響を、磁気軸のシフト量で比較する。
- 等方圧力の場合、MHD方程式、低 $\beta$ オーダリングより、

$$\Delta' = \frac{1}{\rho b^*} \int_0^{\rho_0} [2\rho_0 p' + F(b, m, n)] \rho_0 d\rho_0$$

- 非等方圧力の場合、 $\mathbf{P}_{\perp, \parallel} = \epsilon^2 \mathbf{P}_{\perp, \parallel}^{(6)} + \dots$ ,  $\mathbf{b} = \zeta + \epsilon^{2/3} \mathbf{b}^{(2)} + \dots$ ,  $\mathbf{j} = \epsilon \mathbf{j}^{(3)}$

$$\mathbf{p} = p_{\perp} \mathbf{I} + (p_{\parallel} - p_{\perp}) \mathbf{n} \mathbf{n}$$

$$\Delta' = \frac{1}{\rho b^*} \int_0^{\rho_0} \left[ \rho_0 (P'_{\perp} + P'_{\parallel}) + F(b, m, n) \right] \rho_0 d\rho_0$$

**Pfirsch-Schluter電流は**

$$j_{PS} = \frac{\rho}{b^*} (P'_{\parallel} + P'_{\perp}) \cos \theta$$



# 数値解析モデル (1)

## ANIMECでのエネルギー汎関数

- VMECやANIMECでは, エネルギー原理を用いてエネルギー最小となる磁気面形状を求めている.
- 等方圧力でのプラズマエネルギー

$$W = \int dV \left( \frac{B^2}{2\mu_0} + \frac{p}{\Gamma - 1} \right)$$

- 非等方圧力でのプラズマエネルギー

$$W = \int dV \left( \frac{B^2}{2\mu_0} + \frac{p_{\parallel}(s, B)}{\Gamma - 1} \right)$$

$$p_{\perp}(s, B) = p_{\parallel}(s, B) - B \left. \frac{\partial p_{\parallel}}{\partial B} \right|_s$$

$p_{\perp}$  は力の釣り合いから決められている.

- ANIMEC code

3次元平行解析コードVMECに対してbi-Maxwellianモデルを導入, 非等方圧力下でのMHD平衡を矛盾無く求めることができるように拡張された.

- 高速粒子の分布関数にbi-Maxwellian

$$F_h(s, \varepsilon, \mu) = N(s) \left( \frac{m_h}{2\pi T_{\perp}(s)} \right)^{\frac{3}{2}} \times \exp \left[ -m_h \left( \frac{\mu B_C}{T_{\perp}(s)} + \frac{|\varepsilon - \mu B_C|}{T_{\parallel}(s)} \right) \right]$$

- 非等方な圧力の成分

$$p_{\parallel}(s, B) = M(s) (1 + p_h(s) H(s, B))$$

# 数値解析モデル(3)

- 捕捉粒子によって圧力分布が磁気面からずれる効果  
 $B > B_c$ の領域で

$$H(s, B) = \frac{B/B_c}{1 - \frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}} \left(1 - \frac{B}{B_c}\right)}$$

$B < B_c$ の領域で

$$H(s, B) = \frac{B}{B_c} \frac{1 + \frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}} \left(1 - \frac{B}{B_c}\right) - 2 \left(\frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}}\right)^{\frac{5}{2}} \left(1 - \frac{B}{B_c}\right)^{\frac{5}{2}}}{\left[1 - \frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}} \left(1 - \frac{B}{B_c}\right)\right] \left[1 + \frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}} \left(1 - \frac{B}{B_c}\right)\right]}$$

入力パラメータ $B_c$ を, プラズマ閉じ込め領域内の磁場強度よりも小さく与えることで, 捕捉粒子を含まない計算ができる.

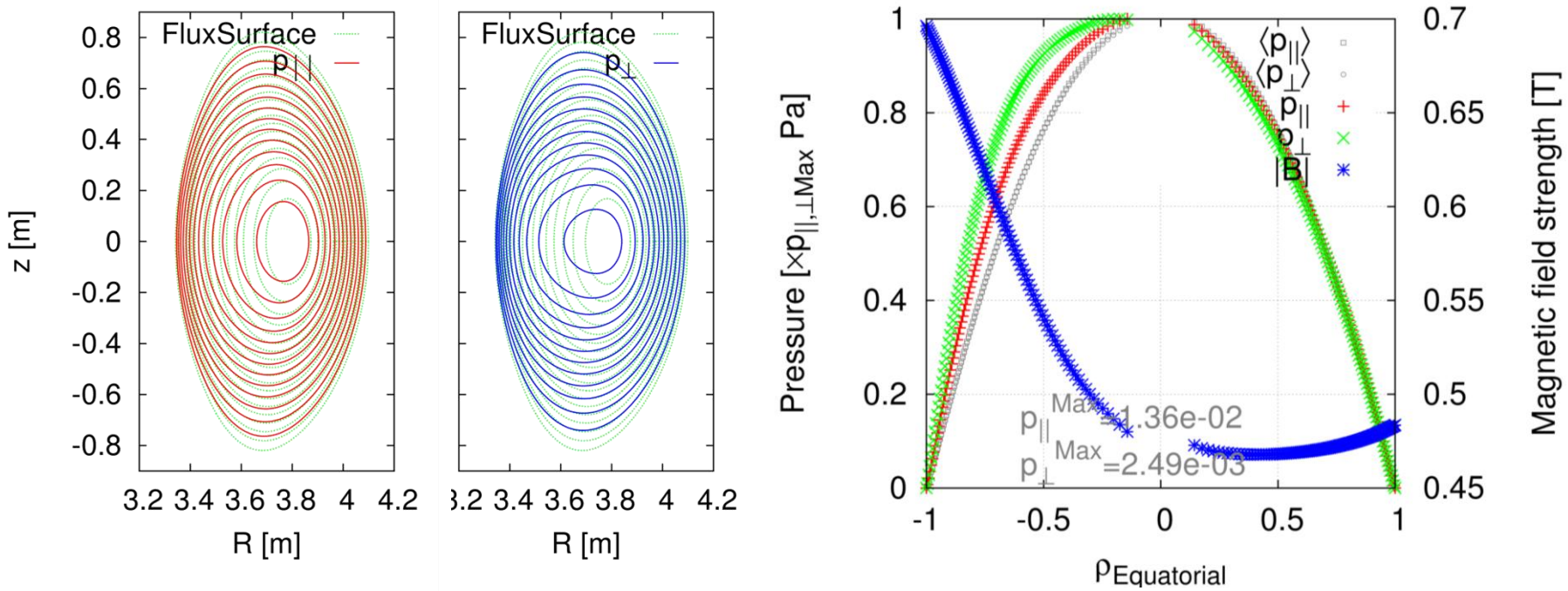




# 計算結果

## $p_{\parallel}$ , $p_{\perp}$ の圧力分布

- 捕捉粒子を含まない場合



圧力分布は磁気面に一致しない



# 非等方圧力下でのβ値の定義

- 非等方圧力下でβを定義。  
内部エネルギーから

$$\beta_{tot} = \frac{\frac{1}{3} \int dV (p_{\parallel} + 2p_{\perp})}{\int dV \left( \frac{B^2}{2\mu_0} \right)}$$

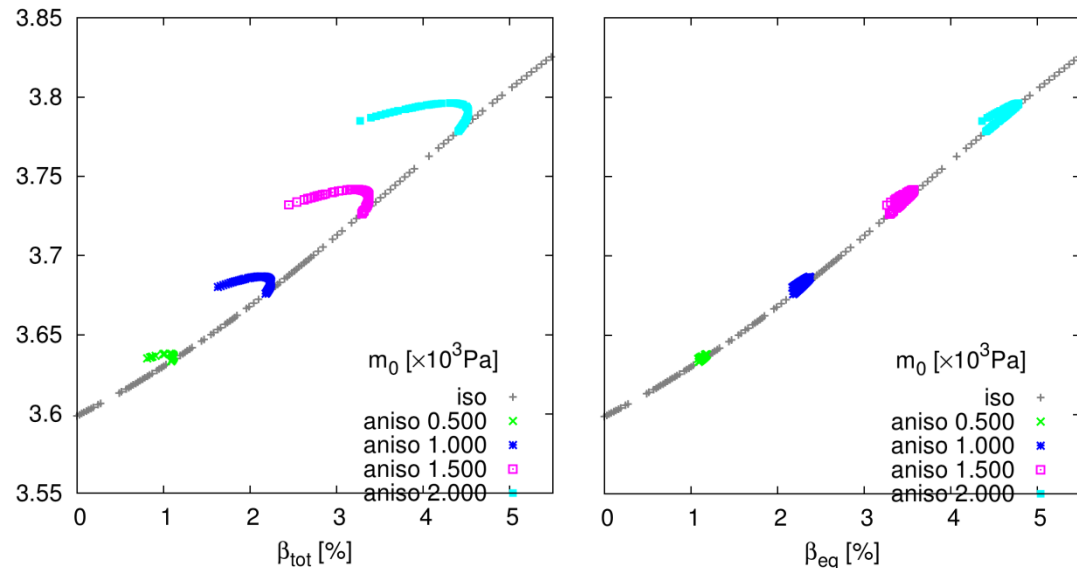
- 二つのβの定義は  
 $p_{\parallel} = p_{\perp}$ では等しい

- $\beta_{tot}$ ,  $\beta_{eq}$ それぞれについて磁気軸位置を比較する。

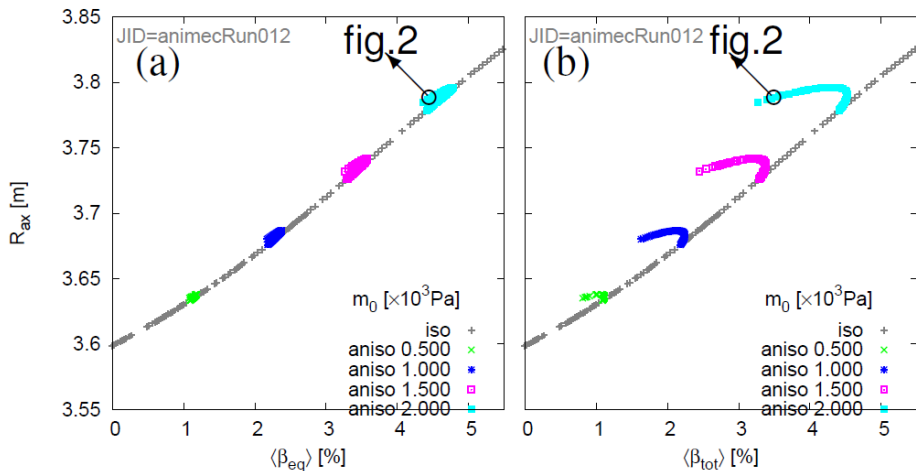
解析モデルからの見積もりから

$$\beta_{eq} = \frac{\frac{1}{2} \int dV (p_{\parallel} + p_{\perp})}{\int dV \left( \frac{B^2}{2\mu_0} \right)}$$

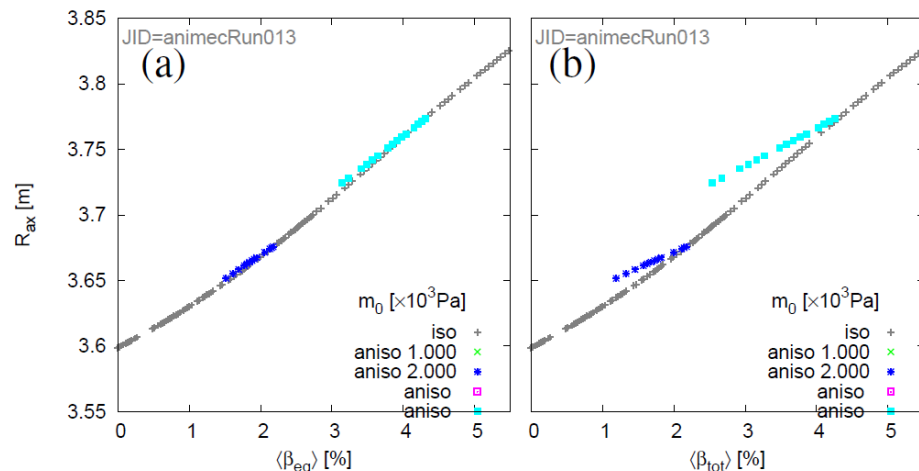
$$\Delta' = \frac{1}{\rho b^*} \int_0^{\rho_0} \left[ \rho_0 (P'_{\perp} + P'_{\parallel}) + F(b, m, n) \right] \rho_0 d\rho_0$$



# β値に対する磁気軸位置



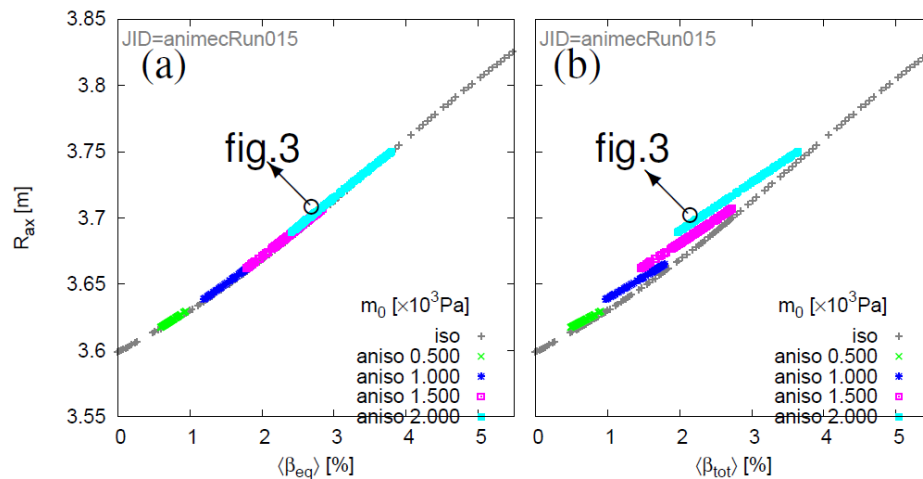
捕捉粒子無し



捕捉粒子が存在する領域小

- 磁気軸シフトは $\beta_{tot}$ よりも $\beta_{eq}$ に概ね比例する

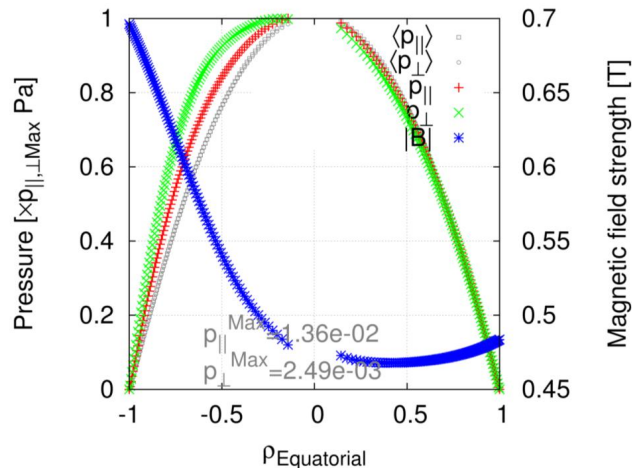
→近似解による解析とよく一致する。



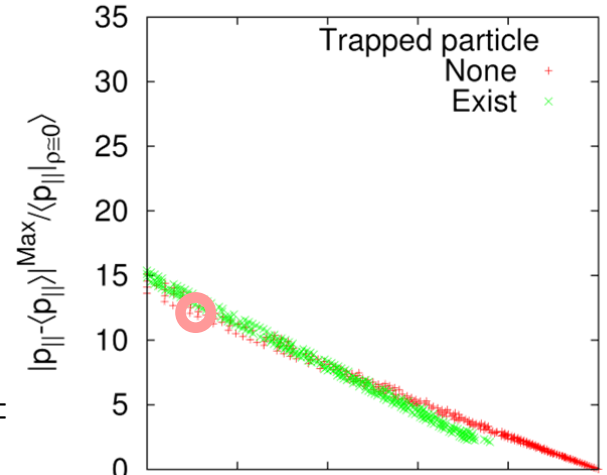
捕捉粒子が存在する領域大 11

# 磁気面量からのずれ

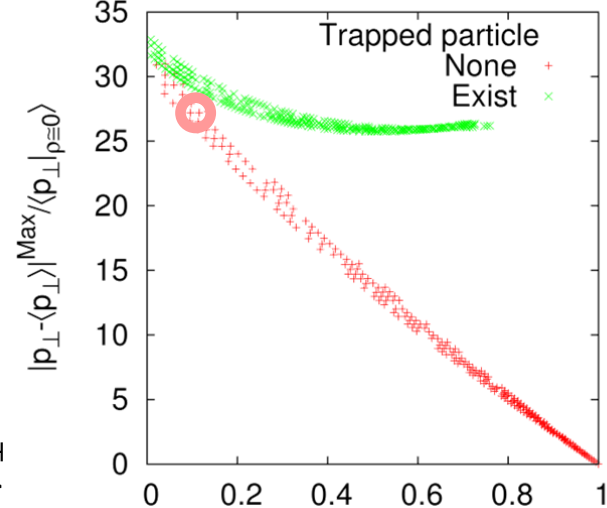
- $p_{\parallel}$ ,  $p_{\perp}$  の磁気面量からのずれを非等方でまとめた.
- 捕捉粒子が存在する領域が大きい場合,  $p_{\perp}$  の磁気面量からのずれが大きい



$p_{\parallel}$  成分のズレの最大値



$p_{\perp}$  成分のズレの最大値



$p_{\parallel}$  が支配的  $[\langle p_{\perp} \rangle / \langle p_{||} \rangle]_{\rho=0}$  等方

## まとめ

- 非等方圧力がMHD平衡へ与える影響を、磁気軸シフトに注目して評価した.
- 非等方圧力を矛盾無く取り扱うことができるANIMECコードを用い、磁気軸位置を $\beta_{\text{tot}}$ と $\beta_{\text{eq}}$ との依存性に注目して調査した結果、シフト量 $\Delta$ は $\beta_{\text{eq}}$ の増加に伴って増加することが分かった.
- 圧力の非等方度に対する圧力成分の磁気面量からのズレの大きさを確認した.  
→これは圧力成分が磁気面量となる解析モデルと近似解による解析とよく一致する結果である.
- よく一致する理由の解釈は、今後の解析で調査する.