

# 磁場反転配位プラズマにおける トロイダルフロー再構成法の開発 と その内部構造解析

日本大学理工学部

○小野直人, 関口純一, 浅井朋彦, 高橋努

# 目次

---

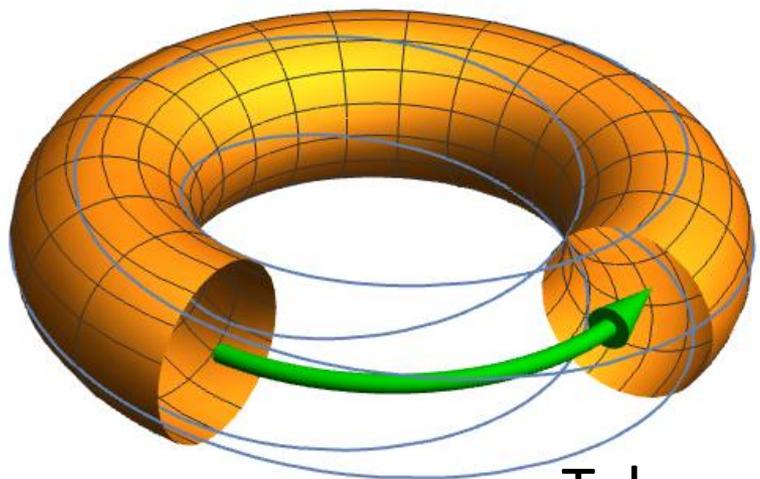
- 磁場反転配位プラズマと回転不安定性
- 研究背景・目的
- トロイダルフローの再構成方法
- 実験結果
- まとめ

# 目次

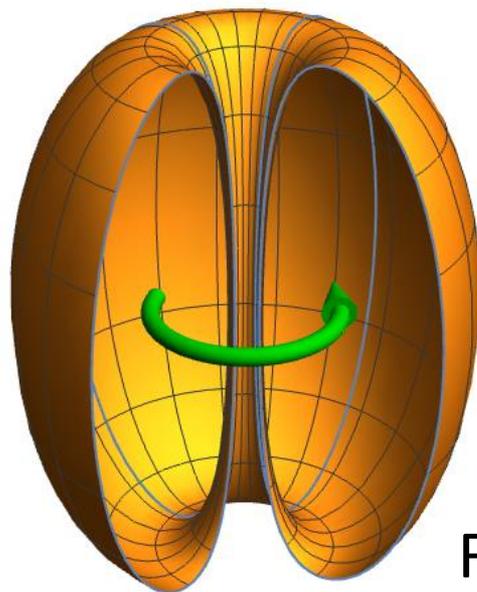
---

- 磁場反転配位プラズマと回転不安定性
- 研究背景・目的
- トロイダルフローの再構成方法
- 実験結果
- まとめ

# 磁場反転配位とは



Tokamak



FRC

## 磁場反転配位 (FRC) の特徴

- 内部電流のみで閉じ込め
- 高い磁場利用効率 ( $\beta = 1$ )

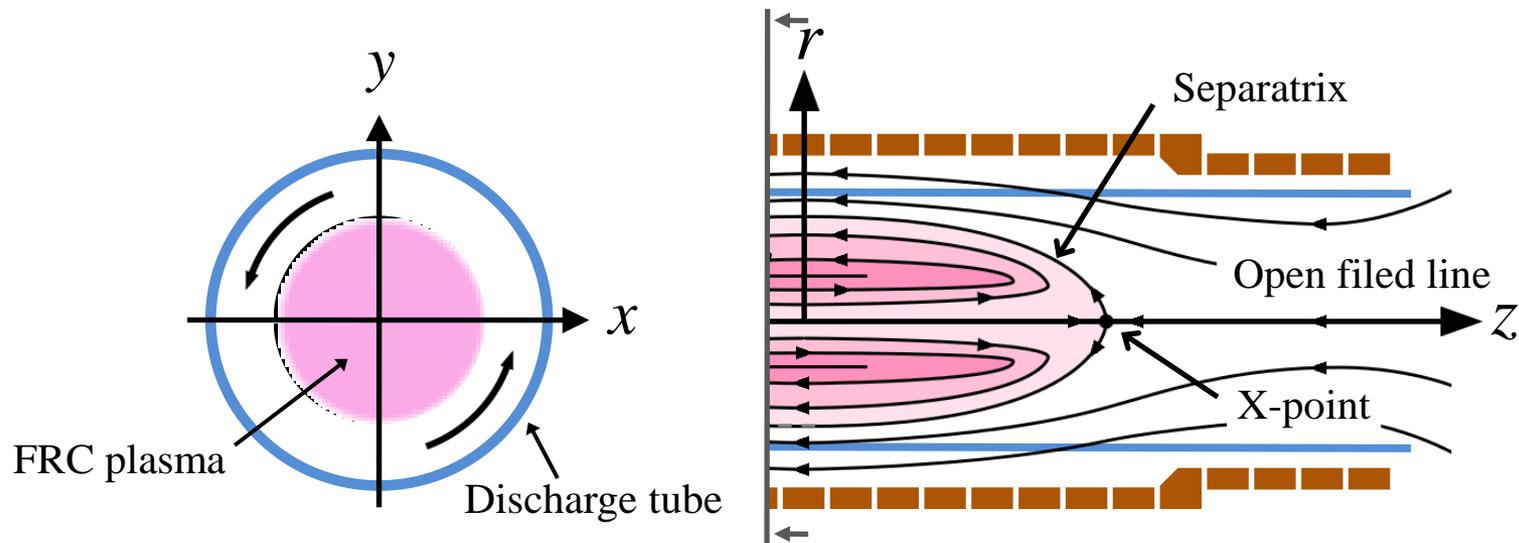
※FRC : Field Reversed Configuration

|                   | JT-60                | NUCTE-III            |
|-------------------|----------------------|----------------------|
| 外部磁場 [T]          | 4.5                  | 0.6                  |
| 閉じ込め時間 [s]        | 1.08                 | $1.2 \times 10^{-4}$ |
| イオン温度 [keV]       | 45                   | 0.12                 |
| 粒子密度 [ $m^{-3}$ ] | $2.8 \times 10^{20}$ | $3.3 \times 10^{21}$ |

参考：科学技術・学術審議会 学術分科会 基本問題特別委員会 核融合研究ワーキング・グループ 第4回会合(平成13年11月20日) 提出資料

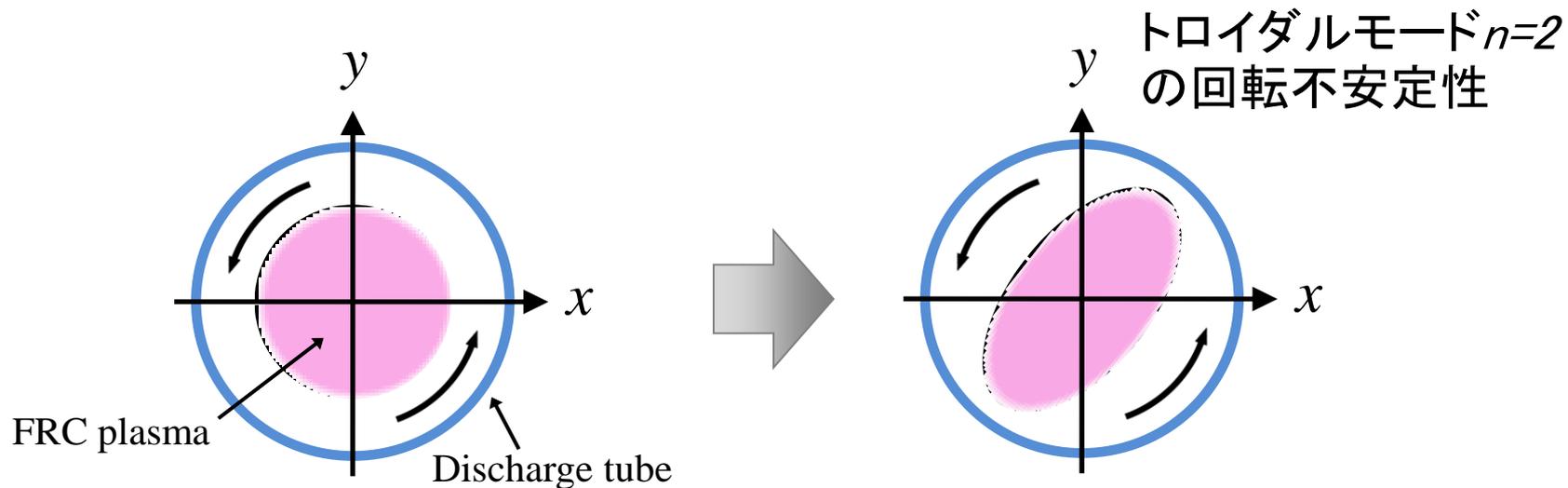
# FRCプラズマの回転不安定性

- 生成されたFRCプラズマは生成直後からイオンがトロイダル方向への回転運動を始める
- 回転の遠心力により楕円変形が生じ、変形部が放電管に接触しプラズマが崩壊する



# FRCプラズマの回転不安定性

- 生成されたFRCプラズマは生成直後からイオンがトロイダル方向への回転運動を始める
- 回転の遠心力により楕円変形が生じ、変形部が放電管に接触しプラズマが崩壊する



# 目次

---

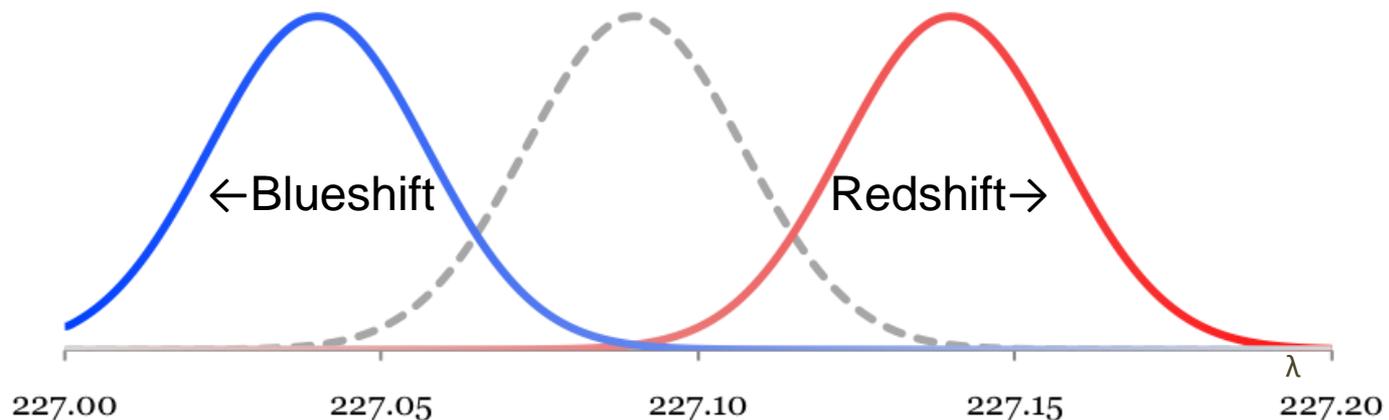
- 磁場反転配位プラズマと回転不安定性
- **研究背景・目的**
- トロイダルフローの再構成方法
- 実験結果
- まとめ

# 研究背景

- 回転機構の解明のため、回転の重要な情報であるフロー速度の径方向分布を再構成する必要がある
- 一般的にトロイダルフローはプラズマから放出されるスペクトル線のドップラーシフトを計測することで求めることができる
  - ➡ 本研究では4価の炭素イオンが出すスペクトル線 (CV:  $\lambda = 227.09\text{nm}$ ) を用いて計測している

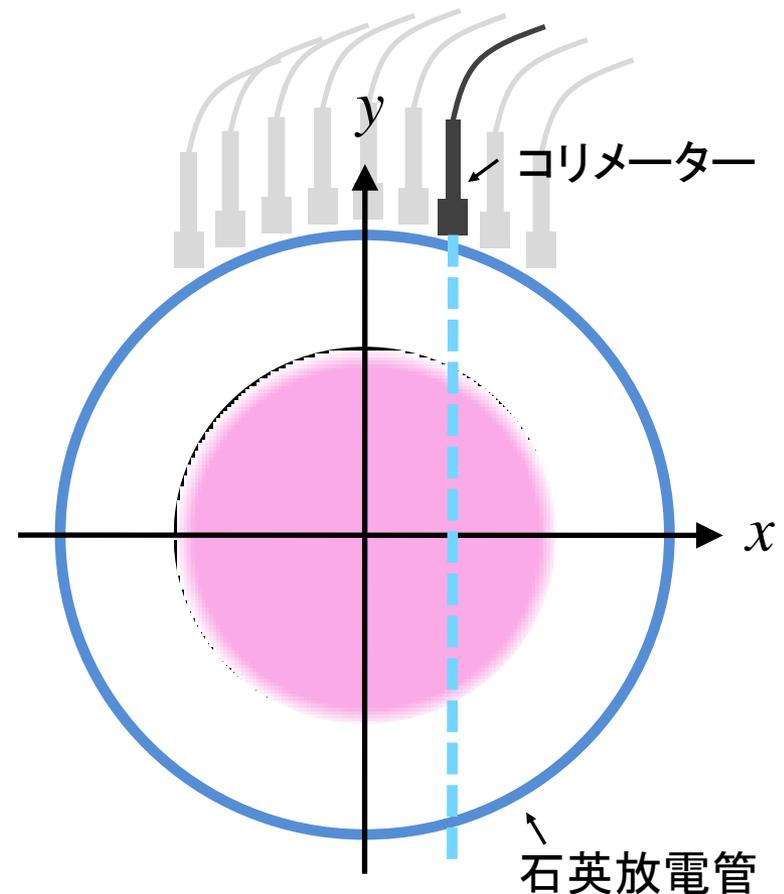
# 波長広がりとドップラーシフト

- 放出されるスペクトル線はプラズマ粒子の熱運動によるドップラー効果によって広がりを持つ
- プラズマ内の粒子が大域的にある方向に運動しているときは、波長分布がシフトする



# 研究背景

- 実際に計測される波長分布は計測器の視線方向の線積分量になる
- これまでの方法では、線積分されたの波長分布のピークのシフト量を元に再構成していた<sup>[1]</sup>



[1]加藤匡:「FRCプラズマのトロイダルフロー構造とその時間発展」, 日本大学大学院理工学研究科 修士論文, 2015

# 研究目的

- これまでの方法では、波長の広がり方や分布の非対称性などの情報がフローの再構成に生かされていなかった



- 本研究では剛体回転モデルを元に仮定した波長分布と、測定した波長分布を直接比較することによって精度よく再構成を行う方法を開発する
- 再構成結果から回転機構について考察をおこなう

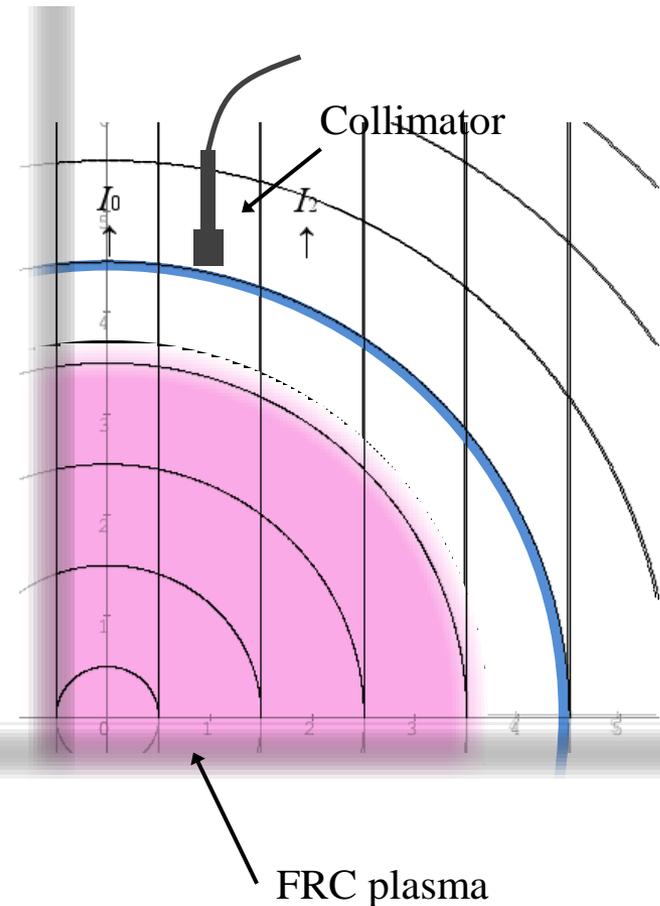
# 目次

---

- 磁場反転配位プラズマと回転不安定性
- 研究背景・目的
- **トロイダルフローの再構成方法**
- 実験結果
- まとめ

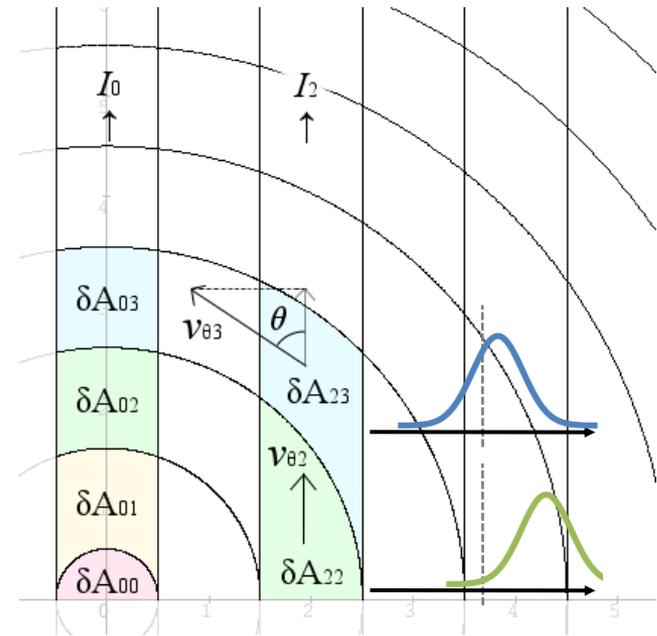
# CV波長分布の再現(1)

1. FRCプラズマが円筒対称であると仮定し図のような微小区間 $\delta A_{mn}$ に分割する
2. 十分小さく分割すると $\delta A_{mn}$ 内では粒子のフロー速度 $v_{\theta n}$ は一様だと仮定できる



# CV波長分布の再現(2)

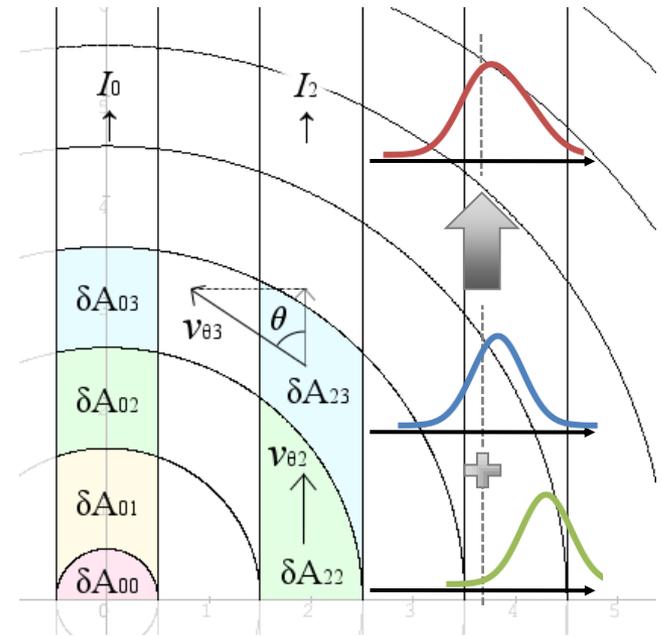
3. 各  $\delta A_{mn}$  から放出されるCVの波長分布は  $G_{mn}(\lambda, \nu_{\theta n})$  はガウス分布になる
4. 各  $\delta A_{mn}$  の  $G_{mn}(\lambda, \nu_{\theta n})$  は視線方向となす角の違いからそれぞれ違うシフト量を持つ



# CV波長分布の再現(3)

5.分光器で計測される波長分布  $P_m(\lambda)$  は各  $G_{mn}(\lambda, \nu_{\theta n})$  を視線方向に足し合わせたものであり、次式で表される

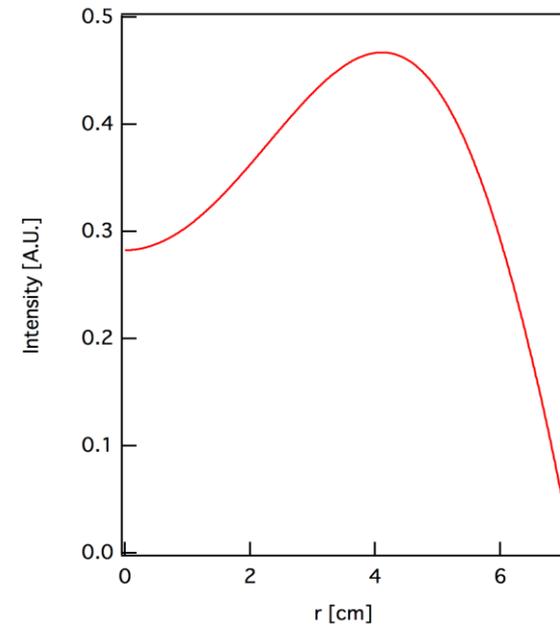
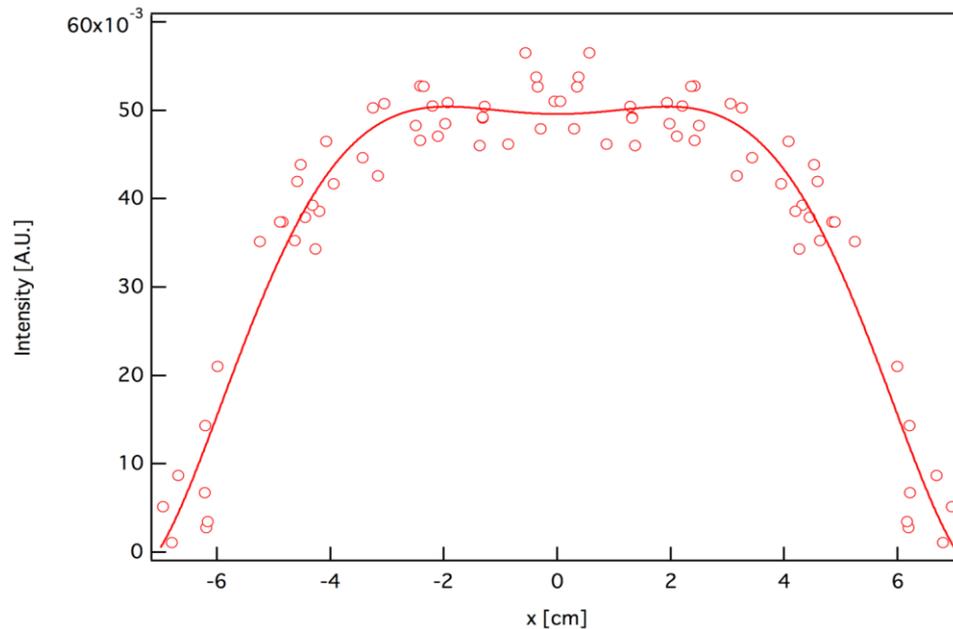
$$P_m(\lambda) = \sum_{n=m}^N \delta A_{mn} i_n G_{mn}(\lambda, \nu_{\theta n}) \quad (1)$$



# 放射強度の $r$ 方向分布の計算

$i_n$  は放射強度の径方向分布であり、測定された線積分量  $I_m$  から Abel 変換を用いて求めることができる

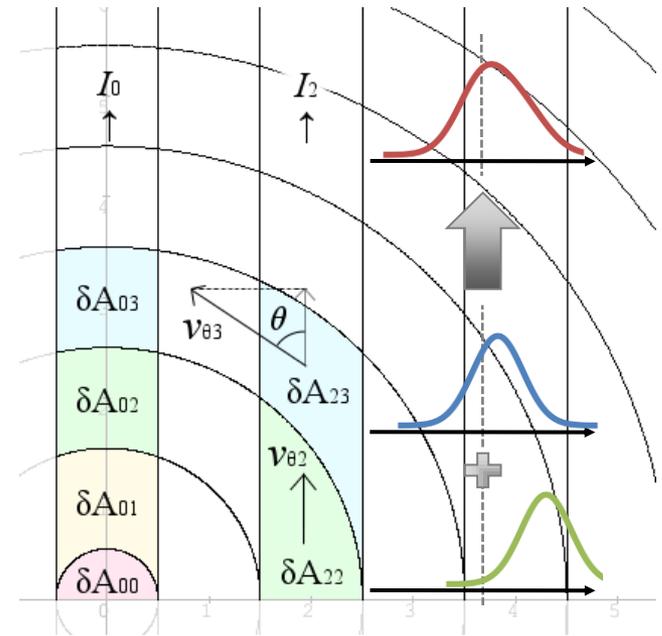
$$I_m = \sum_N \delta A_{mn} i_n \quad (2)$$



# CV波長分布の再現(4)

6.(1)式は $\lambda$ と $\nu_{\theta n}$ の関数であり  
波長 $\lambda$ は既知であるので、  
測定された波長分布と比較  
することにより $\nu_{\theta n}$ を決める  
ことができる

$$P_m(\lambda) = \sum_{n=m}^N \delta A_{mn} i_n G_{mn}(\lambda, \nu_{\theta n}) \quad (1)$$



# フロー速度 $v_{\theta n}$ の仮定

- FRCのモデルの1つである剛体回転モデルを基に  $v_{\theta n}$  の一般項を決める

$$v_{\theta n} = a r_n$$

- $v_{\theta n}$  が  $r$  に比例する場合  $P_m(\lambda)$  はガウス分布になるため、 $v_{\theta n}$  に摂動を加えた式を仮定する

$$v_{\theta n} = a_1 r_n + a_2 r_n^2 + a_3 r_n^3$$

# 目次

---

- 磁場反転配位プラズマと回転不安定性
- 研究背景・目的
- トロイダルフローの再構成方法
- **実験結果**
- まとめ

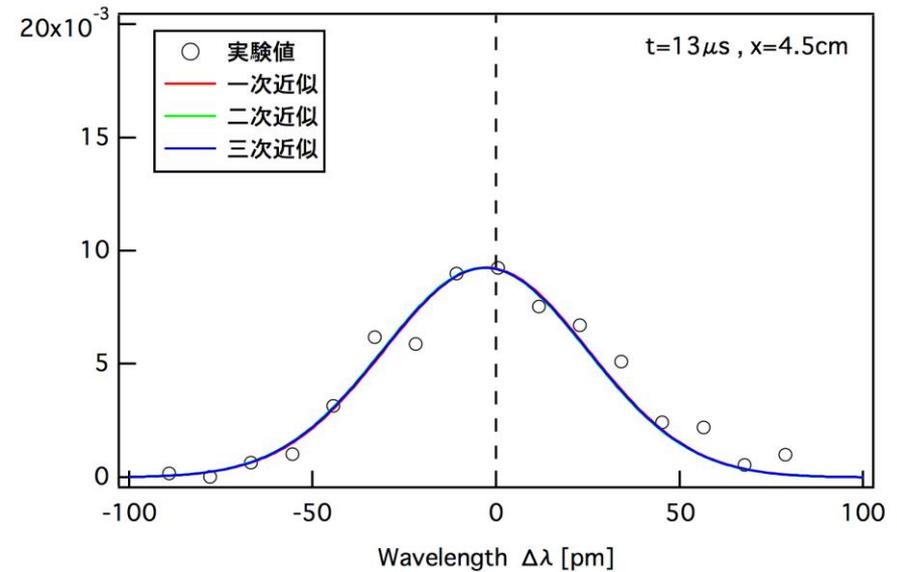
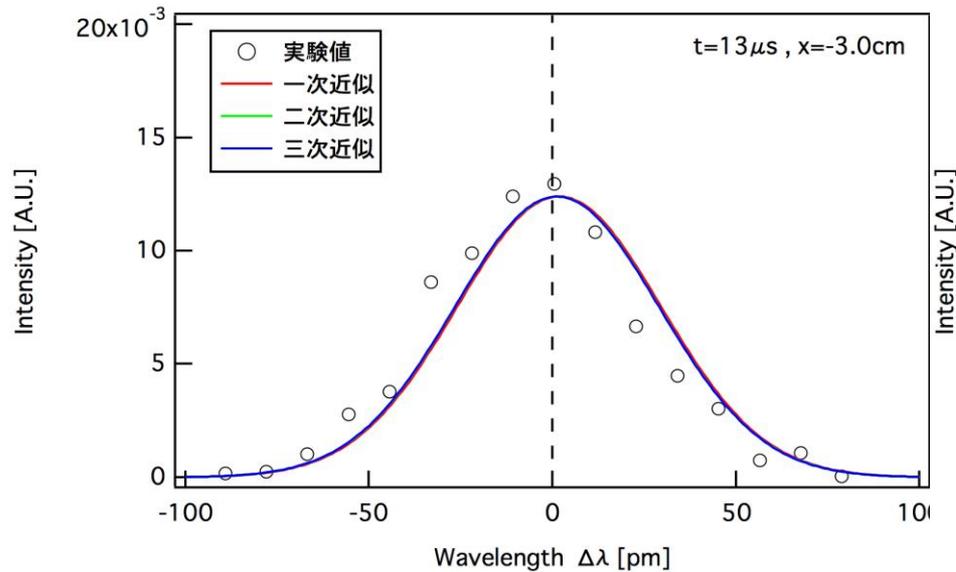
# 実験装置



NUCTE-III (Nihon University Compact Torus Experiment-III)

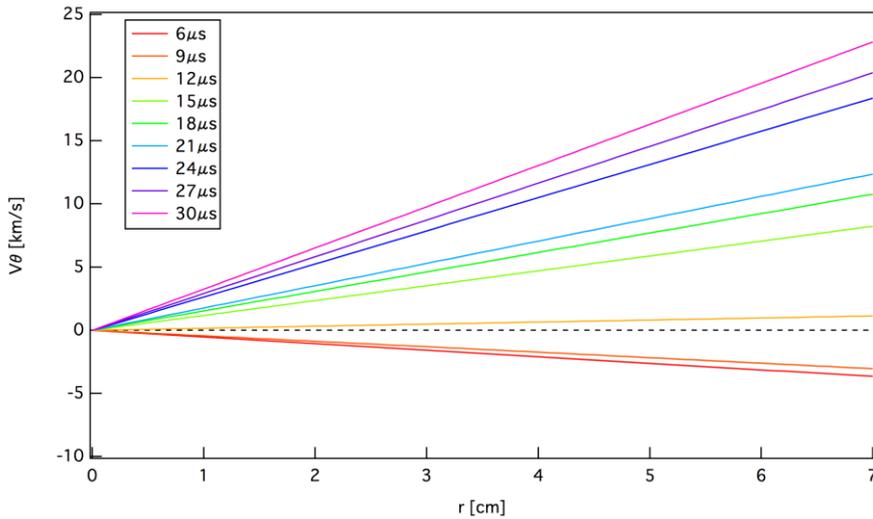
| 主なプラズマパラメーター                   |                    |
|--------------------------------|--------------------|
| 外部磁場 $B_{\text{out}}$ [T]      | 0.6                |
| イオン温度 $T_i$ [eV]               | 120                |
| 電子密度 $n_e$ [ $\text{m}^{-3}$ ] | $3 \times 10^{21}$ |
| セパトリクス半径 $r_s$ [mm]            | 60                 |

# 再構成結果の波長分布



再構成したフロー速度から求まる波長分布は、実験値をよく再現していることがわかる

# フローの径方向分布



再構成結果

上) 剛体回転モデル

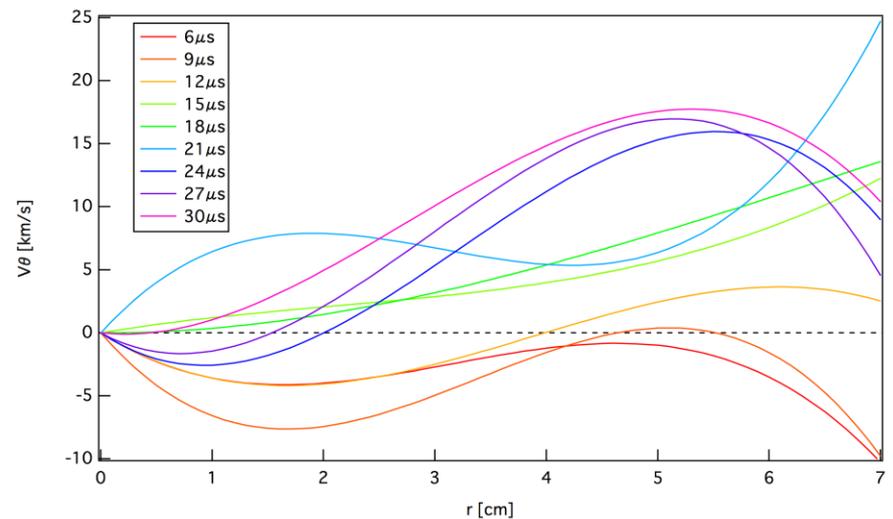
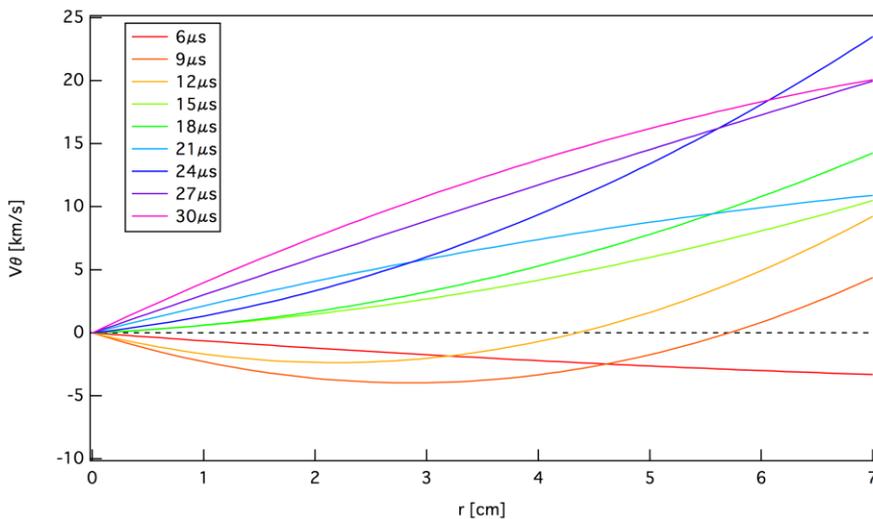
$$v_\theta = a_1 r$$

左下) 二次多項式

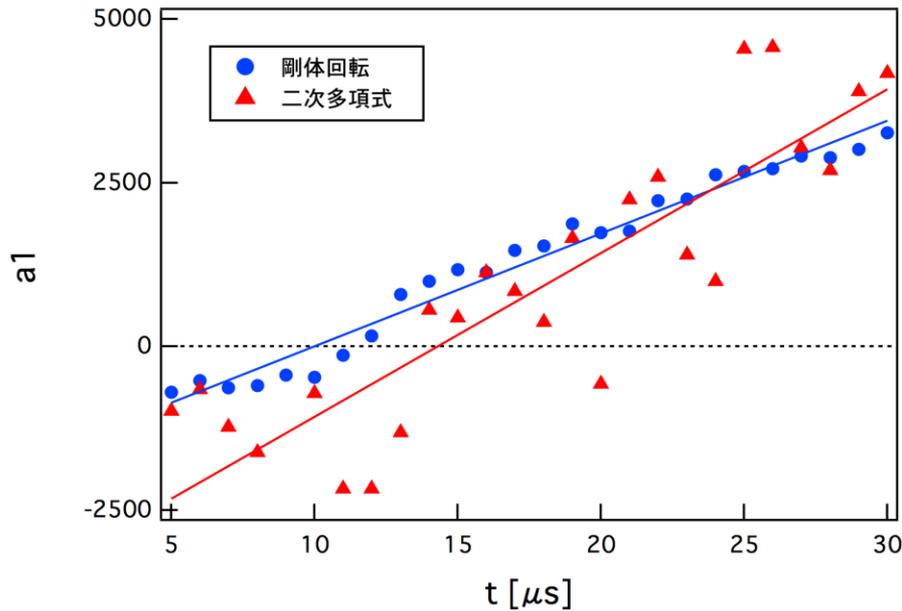
$$v_\theta = a_1 r + a_2 r^2$$

右下) 三次多項式

$$v_\theta = a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3$$

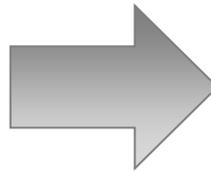


# 一次の係数 $a_1$ の比較



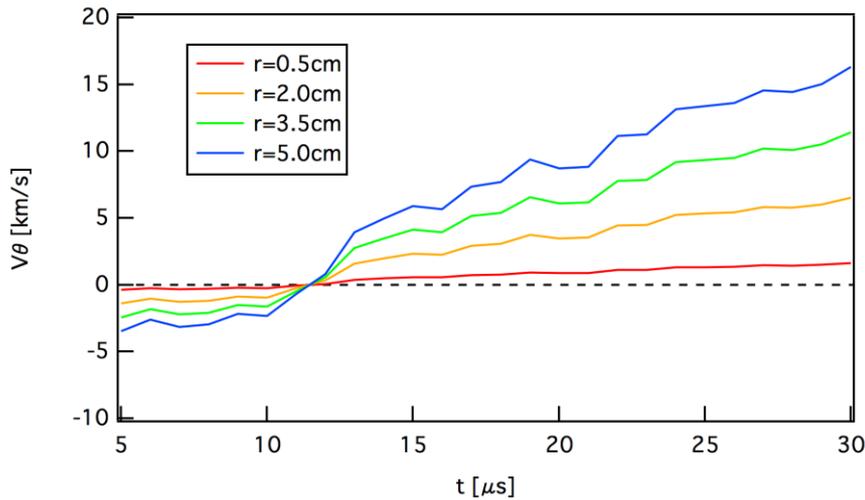
- 剛体回転、二次多項式どちらの近似でも $a_1$ の値はほぼ等しい

$$a_{1\text{剛体回転}} \approx a_{1\text{二次多項式}}$$



剛体回転に近い分布

# フローの時間発展



再構成結果

上) 剛体回転モデル

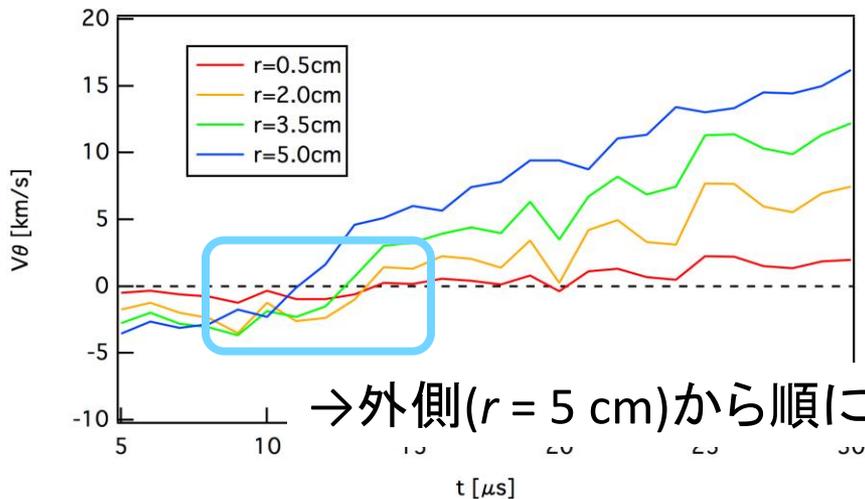
$$v_{\theta} = a_1 r$$

左下) 二次多項式

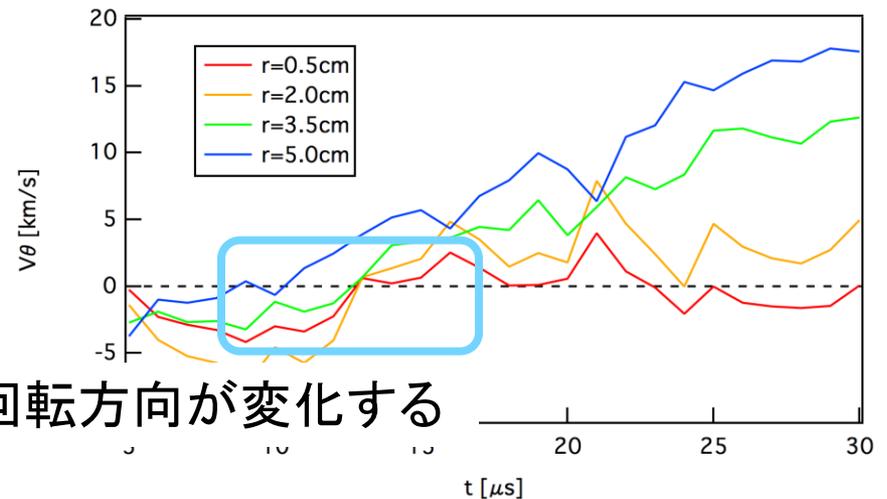
$$v_{\theta} = a_1 r + a_2 r^2$$

右下) 三次多項式

$$v_{\theta} = a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3$$



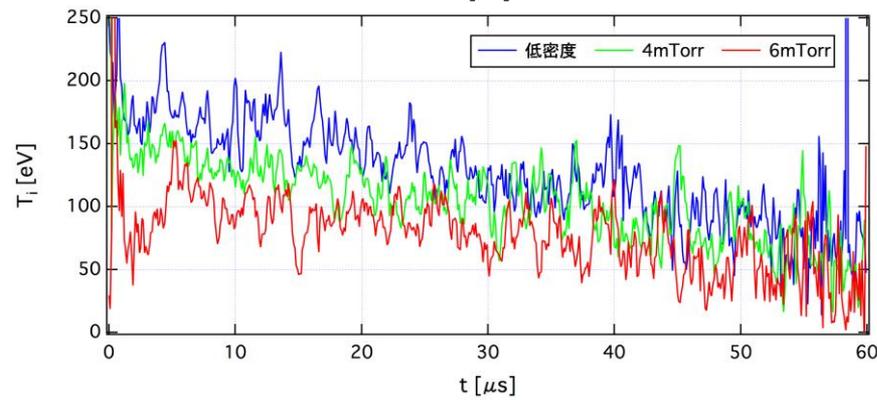
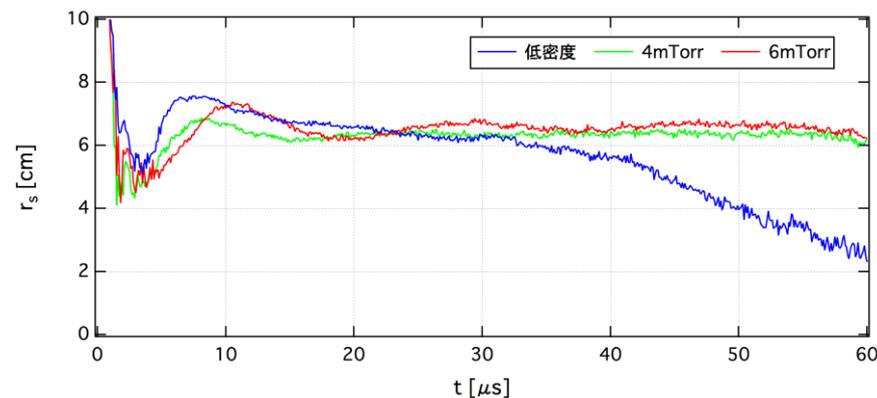
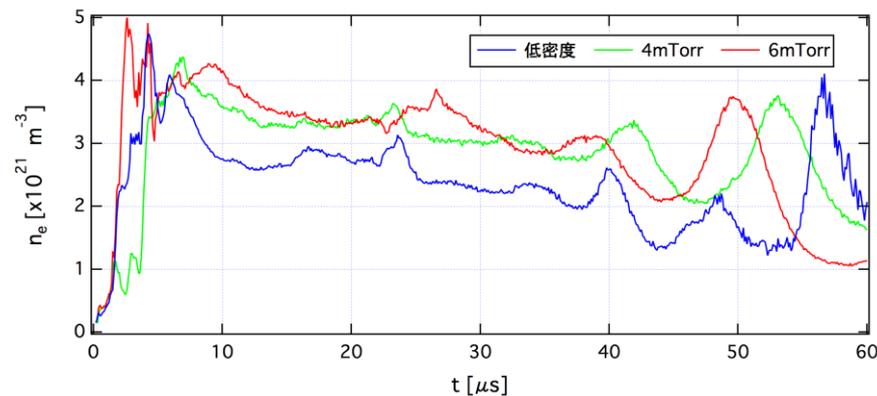
→ 外側 ( $r = 5 \text{ cm}$ ) から順に回転方向が変化する



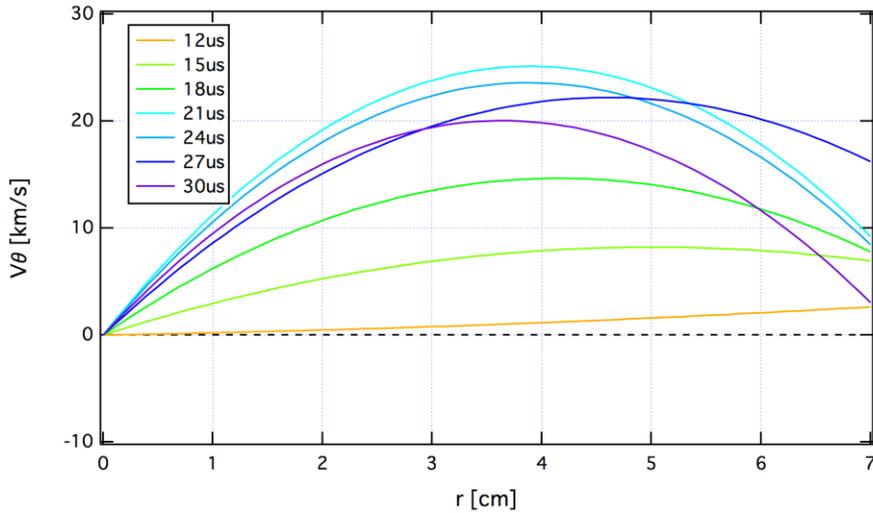
# 密度のフローへの影響

NUCTE-IIIにおいて  
3パターンの密度で  
実験をおこなった

| ガス圧<br>[mTorr] | 電子密度 $n_e$<br>[ $\times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ] |
|----------------|---|
| 低密度OP          | 2.65  |
| 4              | 3.28  |
| 6              | 3.50  |



# フローの径方向分布

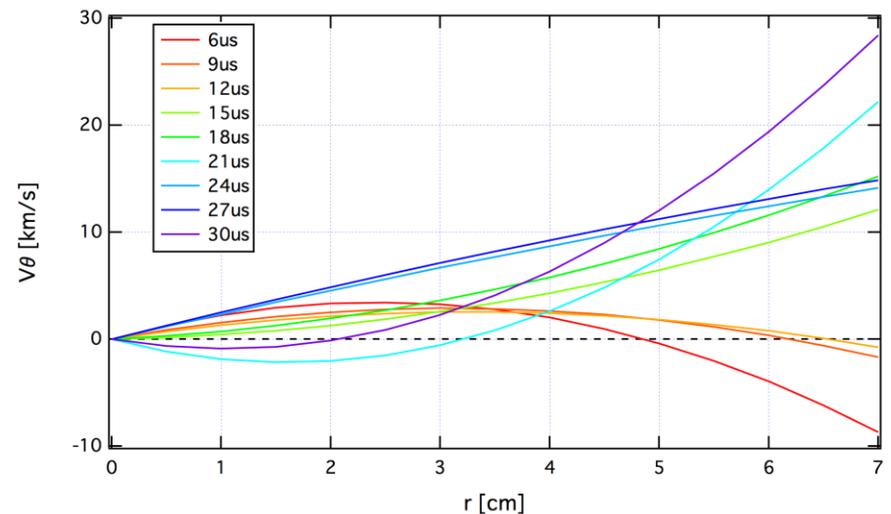
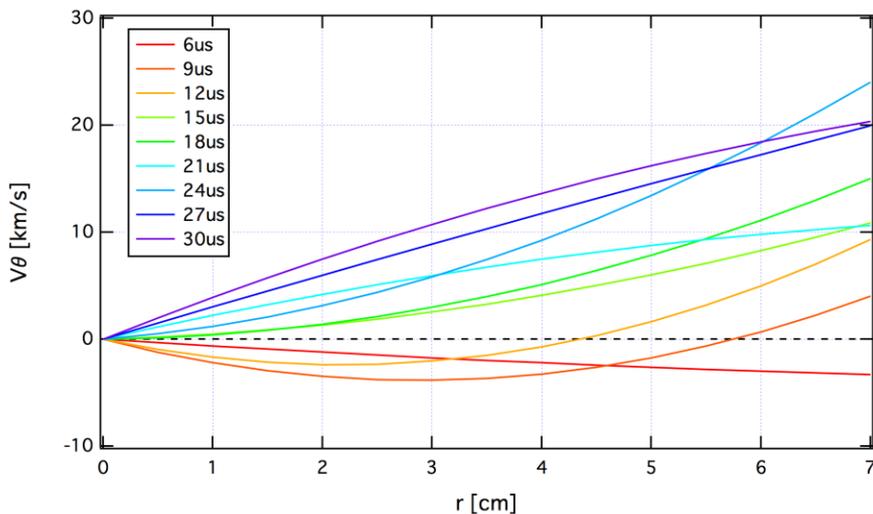


## 再構成結果

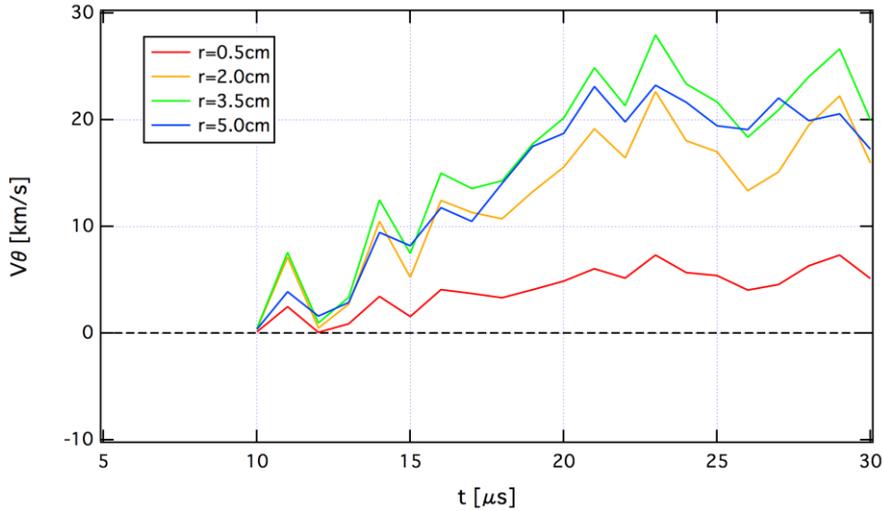
上) 低密度OP ( $n_e = 2.65 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ )

左下) 4mTorr ( $n_e = 3.28 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ )

右下) 6mTorr ( $n_e = 3.50 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ )



# フローの時間発展

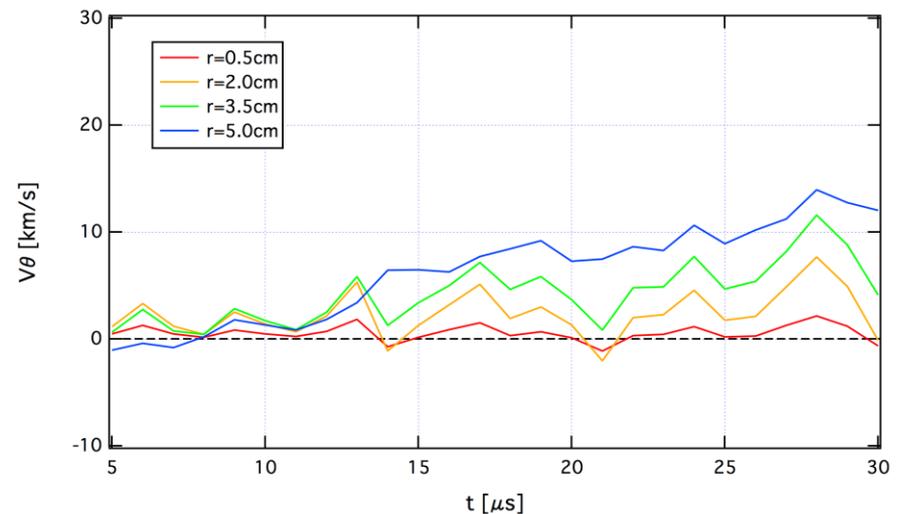
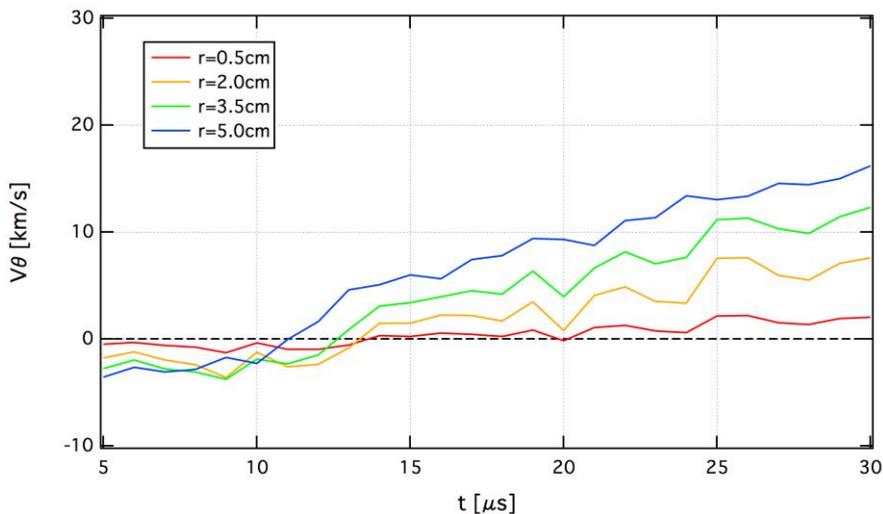


## 再構成結果

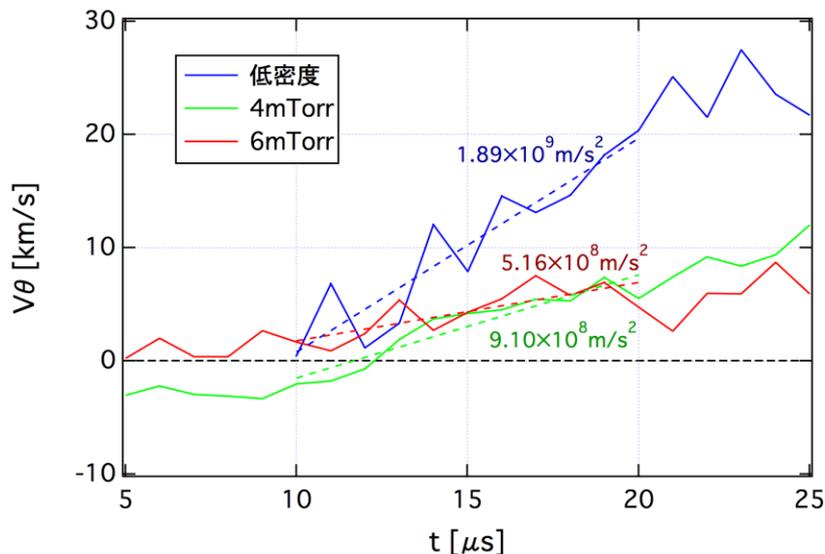
上) 低密度OP ( $n_e = 2.65 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ )

左下) 4mTorr ( $n_e = 3.28 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ )

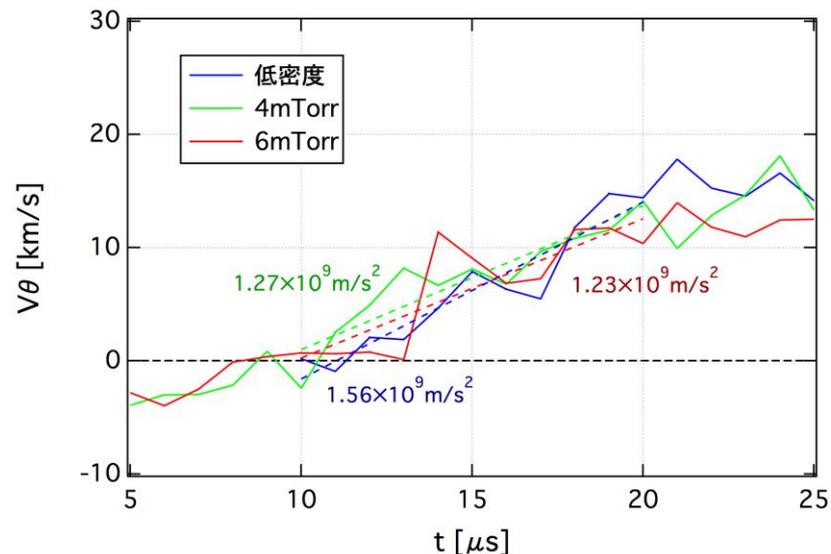
右下) 6mTorr ( $n_e = 3.50 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ )



# 加速度・トルクの算出



(a) 磁気軸( $r = 4$  cm)での加速度

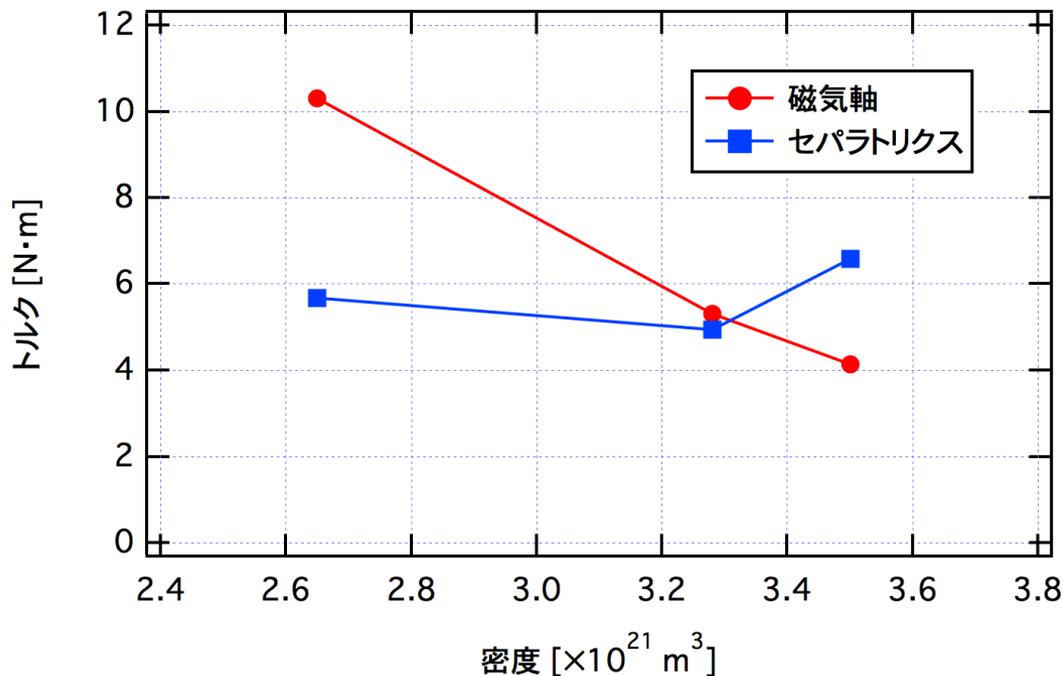


(b) セパトリクス( $r = 6$  cm)での加速度

| ガス圧<br>[mTorr] | 電子密度 $n_e$<br>[ $\times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ] | 半径 $r_s$<br>[cm] | プラズマ長 $l_s$<br>[cm] | 慣性モーメント<br>[ $\times 10^{-10} \text{ kg m}^2$ ] |
|----------------|---|------------------|---------------------|---|
| 低密度OP          | 2.65  | 6.59             | 83.2                | 2.19  |
| 4              | 3.28  | 6.34             | 83.8                | 2.33  |
| 6              | 3.50  | 6.61             | 91.5                | 3.21  |

# トルクの比較

| ガス圧<br>[mTorr] | 磁気軸での<br>加速度 [m/s <sup>2</sup> ] | セパトリス<br>での加速度 [m/s <sup>2</sup> ] | 磁気軸での<br>トルク [N m] | セパトリス<br>でのトルク [N m] |
|----------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------|----------------------|
| 低密度OP          | $1.89 \times 10^9$               | $1.56 \times 10^9$                 | 10.3               | 5.68                 |
| 4              | $9.10 \times 10^8$               | $1.27 \times 10^9$                 | 5.31               | 4.94                 |
| 6              | $5.16 \times 10^8$               | $1.23 \times 10^9$                 | 4.14               | 6.59                 |



回転の駆動力に密度の依存性があることが示唆された

# 目次

---

- 磁場反転配位プラズマと回転不安定性
- 研究背景・目的
- トロイダルフローの再構成方法
- 実験結果
- **まとめ**

# まとめ

---

- 剛体回転を元に $v_\theta$ を三次多項式で再構成したが、そのいずれでも剛体回転に近い速度分布であることが示された
- セパラトリクス付近を駆動させる力は密度の変化に依存しないが、磁気軸付近を駆動させる力は、密度によって変化する可能性が示唆された。