

# プラズマ合体と電流増倍を用いた 太陽フレアのトリガ機構の実験的研究

小野靖 研究室  
学部4年 03210503  
道家友香

2023年2月13日

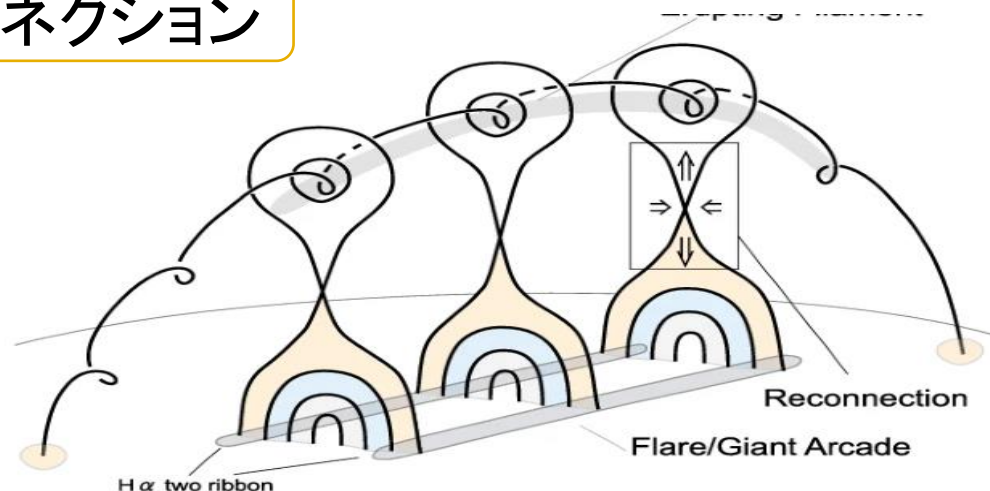
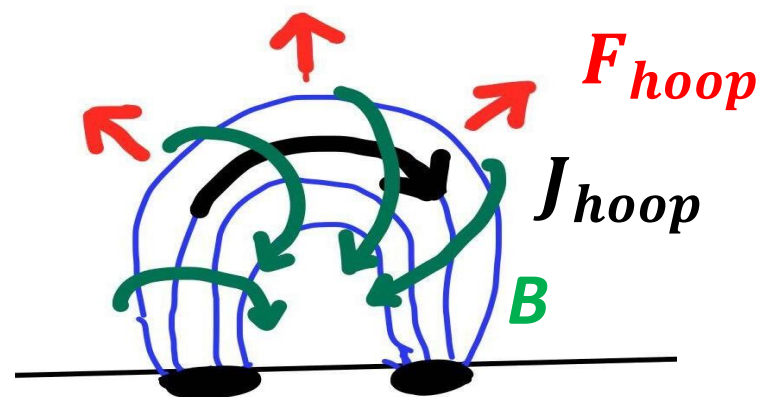
# 太陽系最大の爆発現象 太陽フレア

コロナループに蓄積した  
磁気エネルギー

磁気  
リコネクション

運動・熱・粒子加速  
エネルギー

多波長の電磁波  
高エネルギー粒子  
コロナ質量放出



通信障害・電力ネットワークへの悪影響・  
衛星への悪影響・宇宙飛行士の被爆etc...

→ 宇宙天気予報の予測精度向上急務！

# 太陽フレアのトリガをプラズマ合体によって考察

コロナループがフープ力で

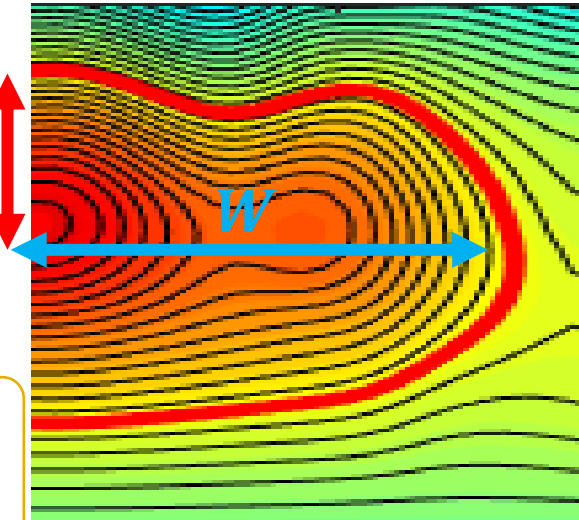
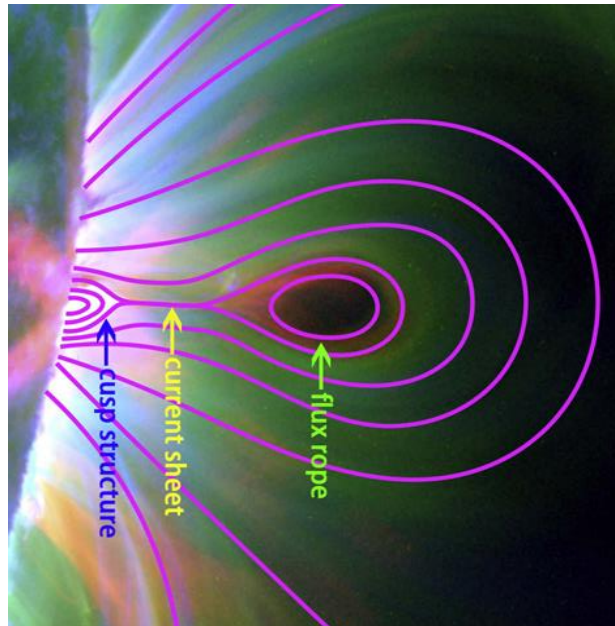
楕円度  $\frac{W}{H}$  上昇

トカマクプラズマを引っ張って

楕円度  $\frac{W}{H}$  上昇

楕円度の限界

分裂したプラズマの放出  
=フレア

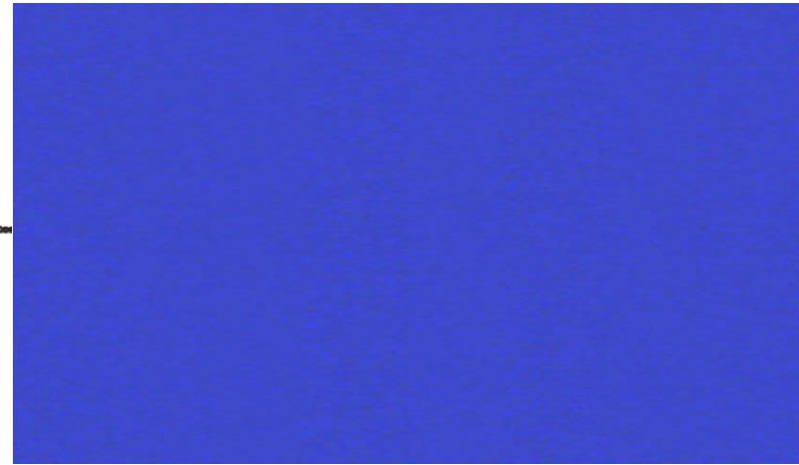
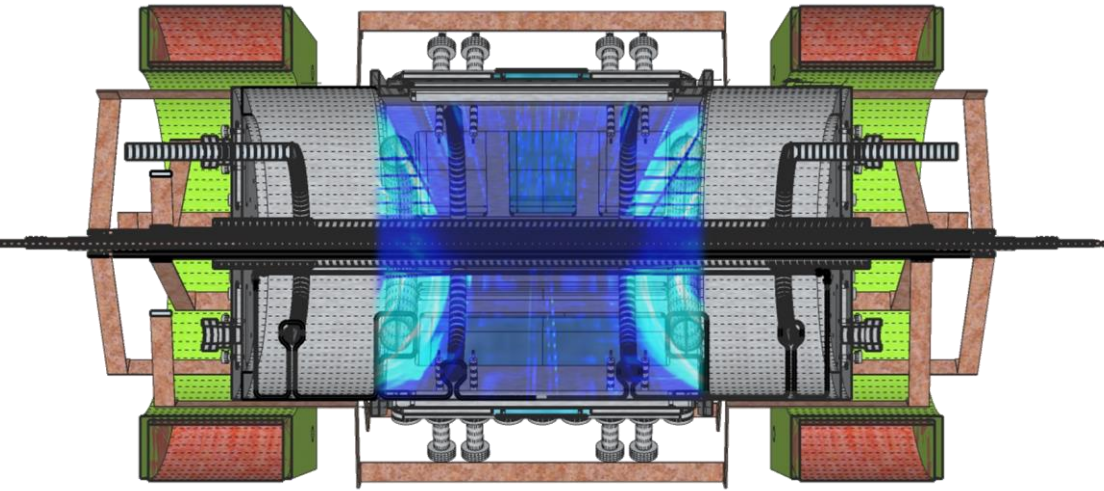


[2] X. L. Yan et al 2018 ApJL 853 L18

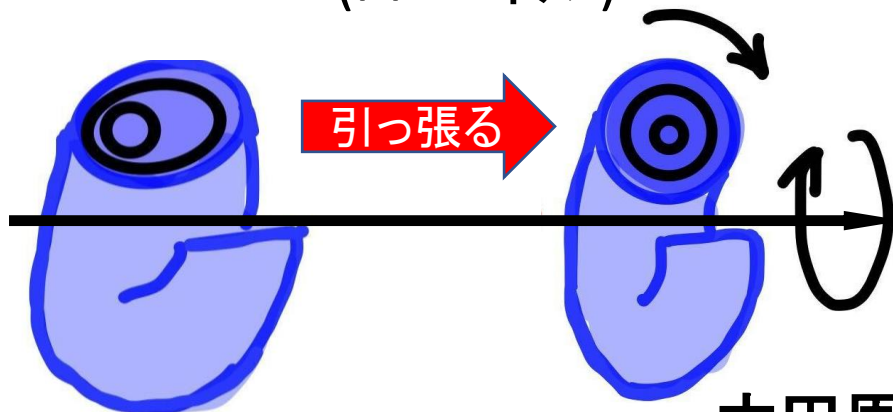
## 本研究の着目点

- 1 引っ張る力を変える(もう一方のプラズマとの距離を変える)  
楕円度の安定限界と分裂時の不安定
- 2 コロナループを貫く磁場を変える(トロイダル磁場)  
分裂したプラズマの不安定

# プラズマ合体実験装置 TS-6



小円周: **ポロイダル**  
(PF コイル)

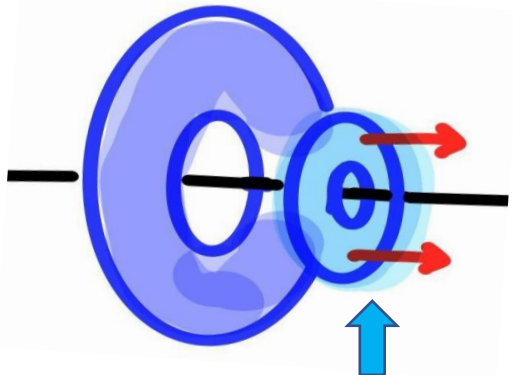
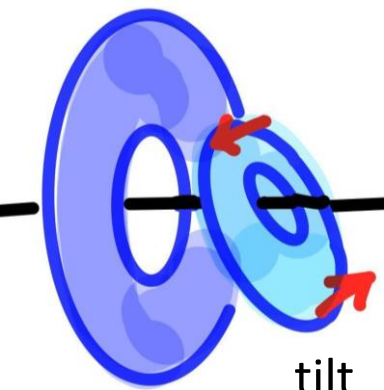
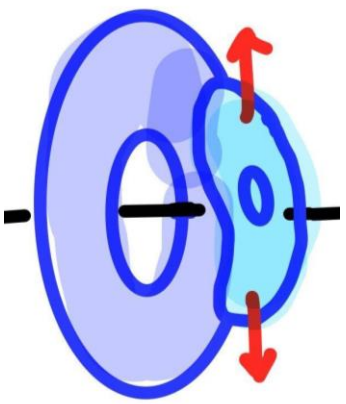
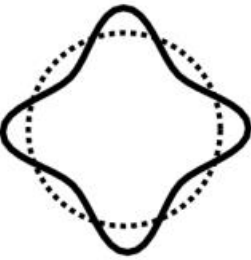


- 1 左右にトラスプラズマを生成
- 2 引き合う2つのプラズマの放電タイミングを変える  
= 引っ張る距離を変える  
= 色んな楕円度で安定限界を探る

大円周: **トロイダル**  
(TF コイル)

# 分裂を引き起こす不安定

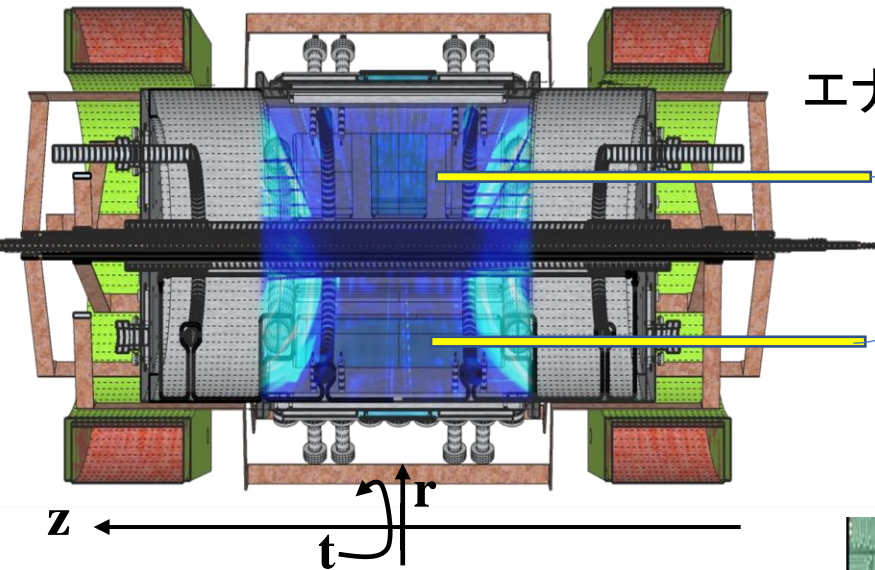
トロイダルモード：磁場信号をトロイダル方向に関してフーリエ変換して得られるモード次数 ( $n$  で表す)

軸方向不安定 (一様に分裂)	非軸方向不安定 (一部が分裂)
<p data-bbox="86 656 231 714"><math>n = 0</math></p>  <p data-bbox="367 1113 801 1313">引っ張られて 分裂したプラズマ = フレア</p>	<p data-bbox="917 542 1062 599"><math>n = 1</math></p>  <p data-bbox="1362 899 1429 942">tilt</p> <p data-bbox="1487 542 1632 599"><math>n = 2</math></p>  <p data-bbox="1487 971 1632 1028"><math>n = 4</math></p>  <p data-bbox="1738 885 1845 935">shift</p>



# トロイダルモード計測用プローブの作製

PCB(プリント基板)コイル in ガラス管



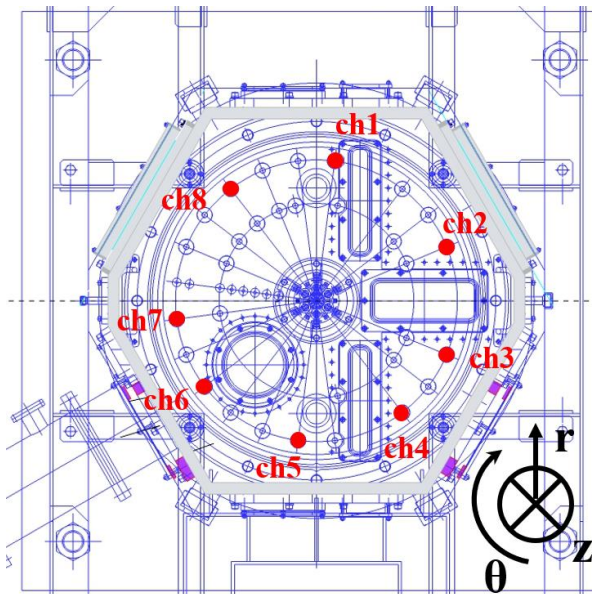
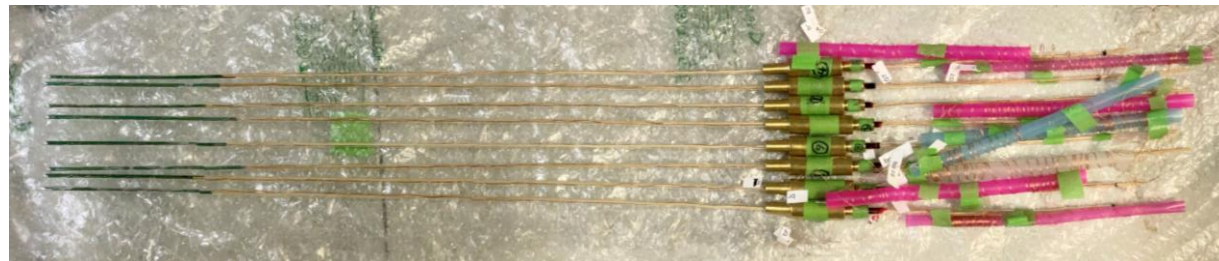
エナメル線

同軸  
ケーブル

端子台

オシロスコープ  
Yokogawa  
DL716 & DL708

Bt Bz Br

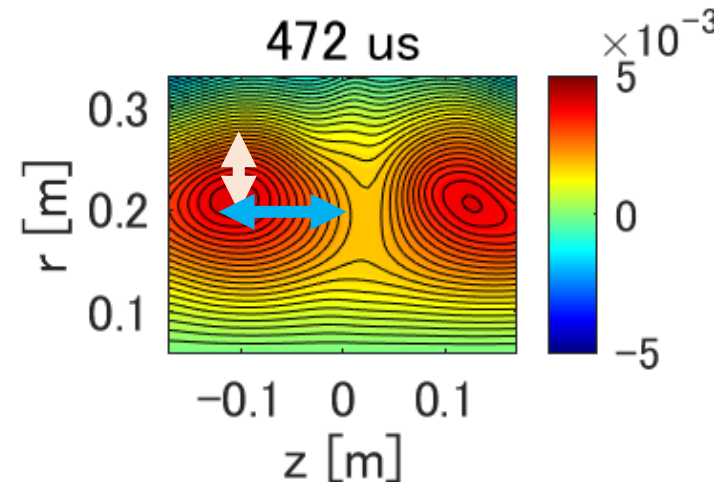
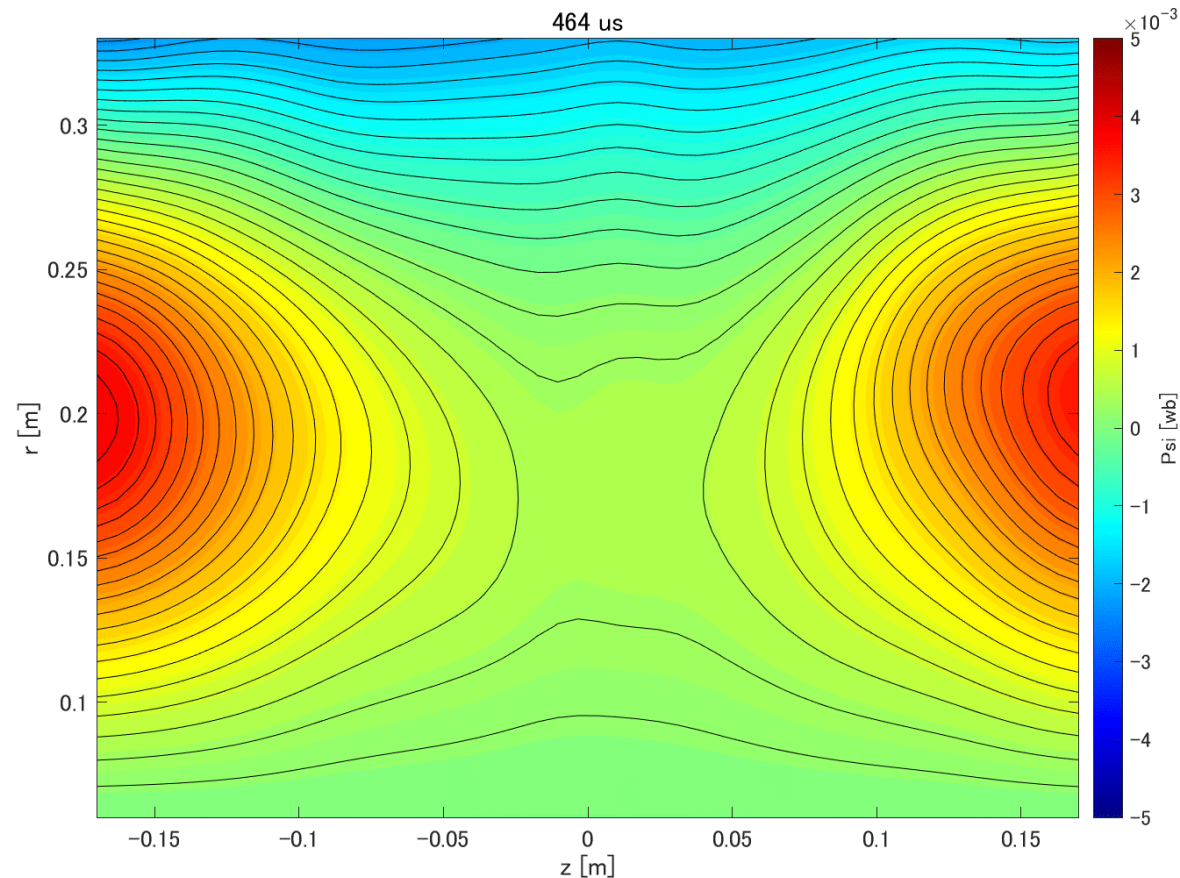


$z = -3.5 \text{ mm}$ ,  $r = 275 \text{ mm}$ の8点で  
(Bz, Bt, Br)の微分信号を計測

# 同時刻に生成すると楕円度小さい

条件:  $V_{tf}=2\text{kV}$ ,  $V_{pf}=39, 37\text{kV}$ ,  $H\ 5.5\text{mTorr}$

タイミング差  $0\mu\text{s}$  至近距離から引っ張る = 楕円度小さい



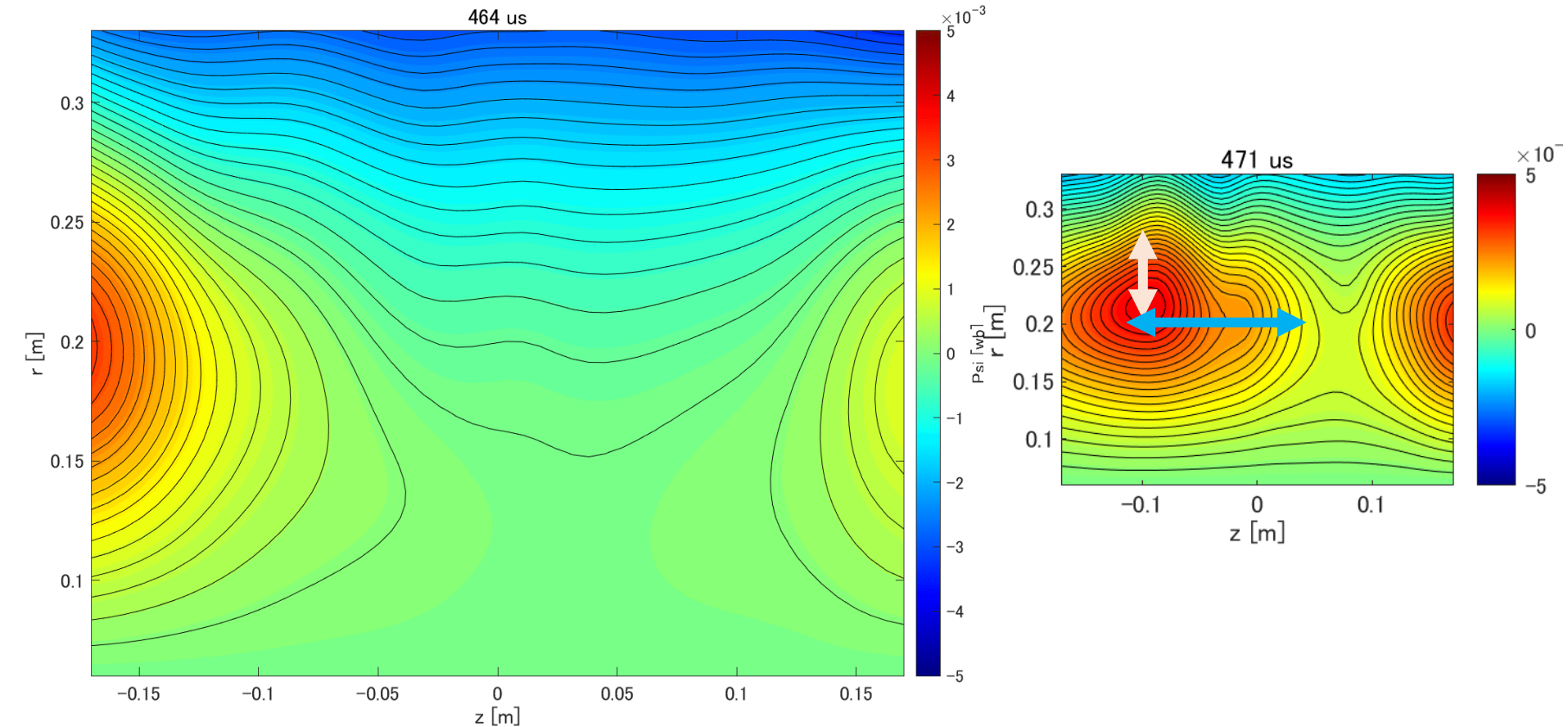
( $r$ - $z$ 断面)

(contour : ポロイダルフラックス  $\Psi$  [wb])

# 生成タイミングをずらすと楕円度がのびる

条件:  $V_{tf}=2\text{kV}$ ,  $V_{pf}=39, 37\text{kV}$ ,  $H\ 5.5\text{mTorr}$

片方のプラズマを遅らせて引っ張る = 楕円度大きい

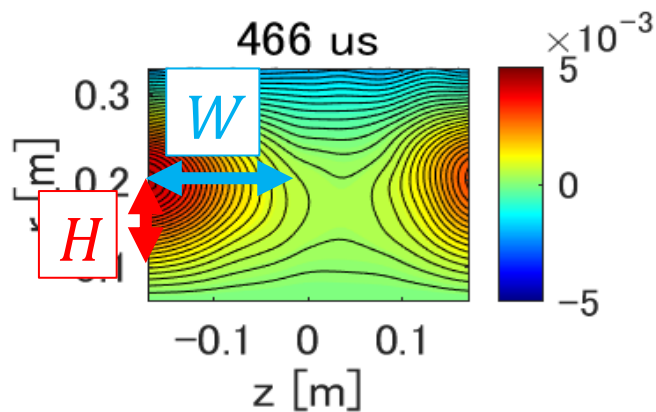


(contour : ポロイダルフラックス  $\Psi$  [wb])



# 楕円度の限界1.8前後でループが分裂

楕円度で軸方向の安定限界を定量化

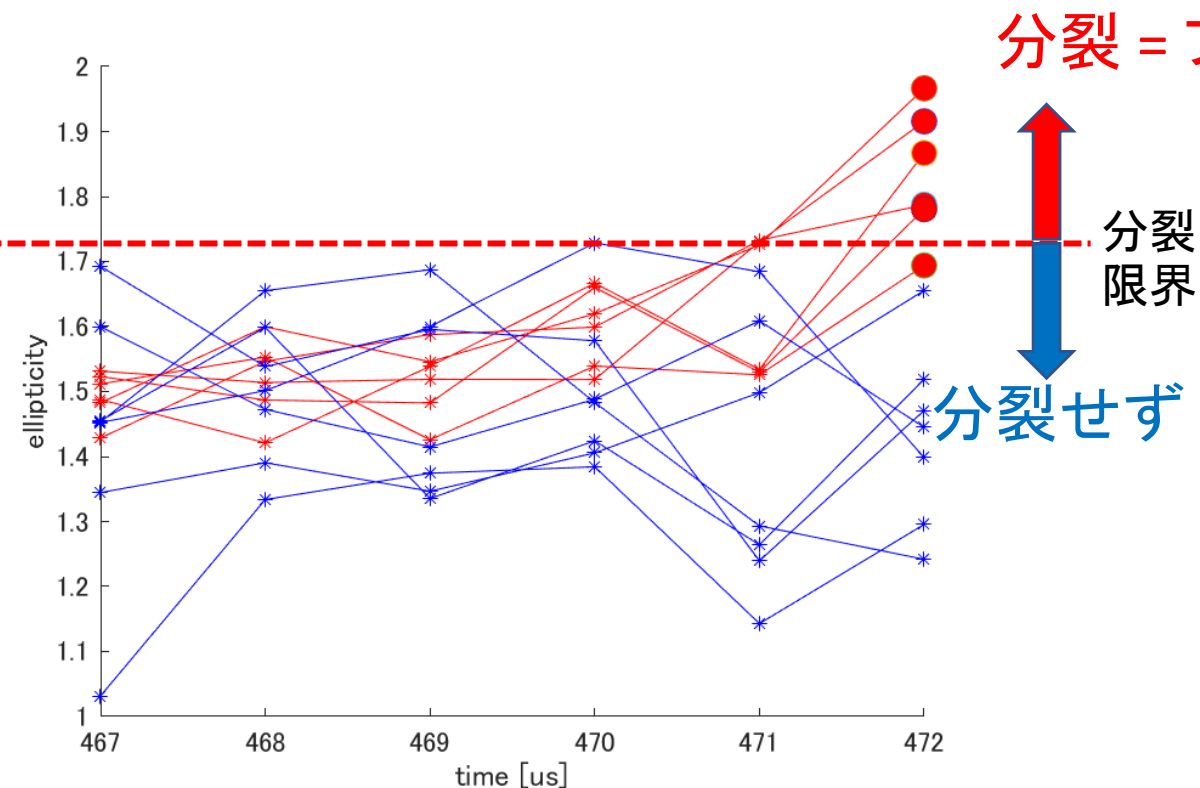


ポロイダルフラックス

$$\psi = 0.3 \psi_{peak}$$

の範囲で

楕円度  $\frac{W}{H}$  を計算



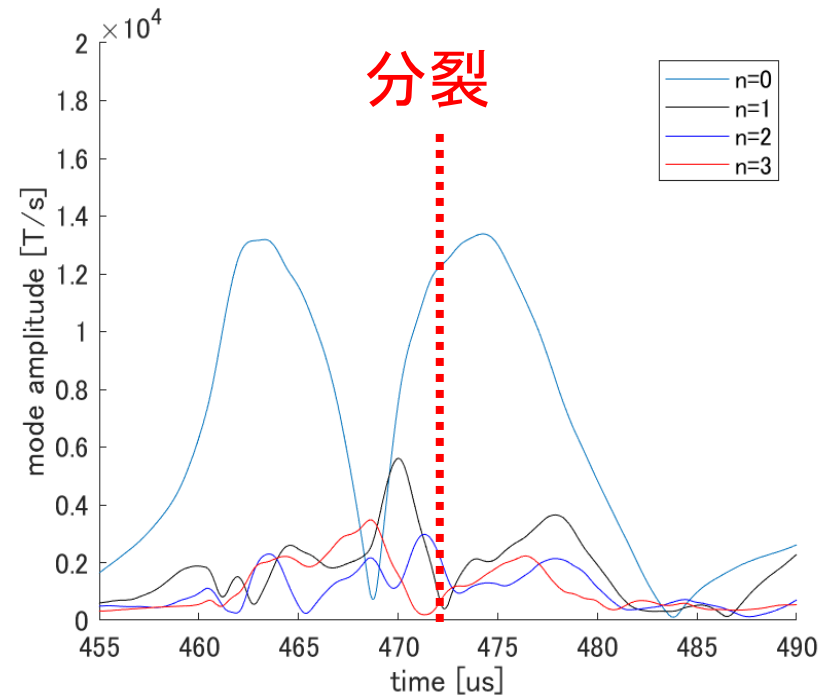
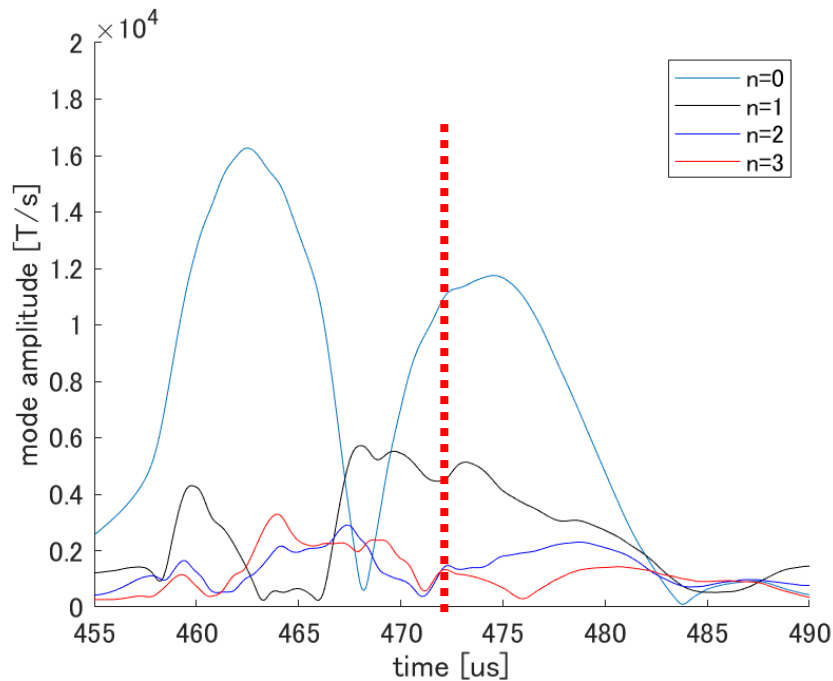
楕円度が約1.8を超えると軸方向に分裂しやすくなる



磁気リコネクションを起こしながらコロナループが上昇して引きちぎれるのと似た現象

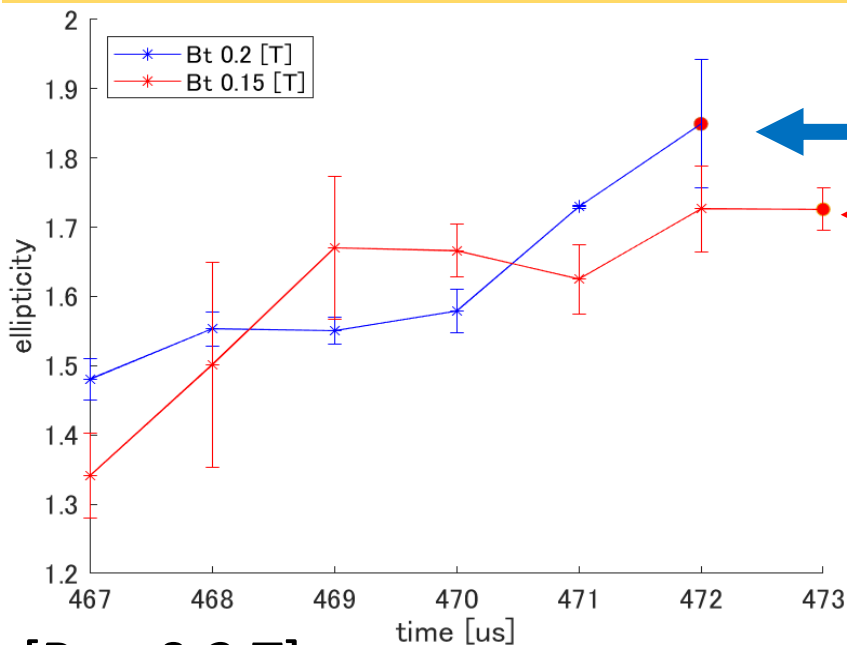
# 分離したプラズマは おおむね軸対称

分離しない場合(タイミング差0 $\mu$ s)      分離した場合(タイミング差20 $\mu$ s)



- 469  $\mu$ s :  $n = 1$  プラズマピンチオフの影響
  - 分離時点(472~473 $\mu$ s)でモードが少し出ている(10%程度)ものの  $n = 0$  が支配的
- 分離したプラズマはおおむね軸対称といえる

# トロイダル磁場 $B_t$ が小さいとより小さな楕円度で分裂

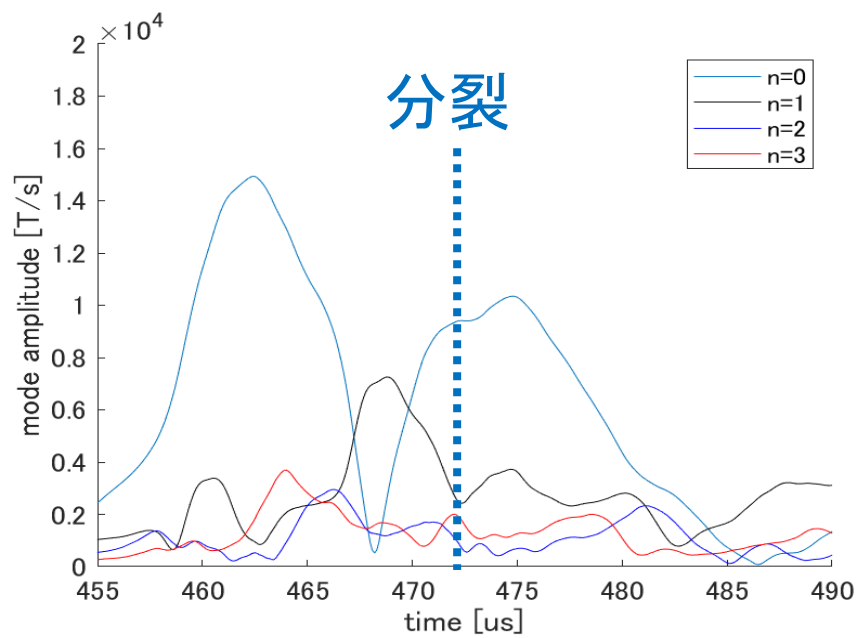


$B_t = 0.2$  [T]よりも

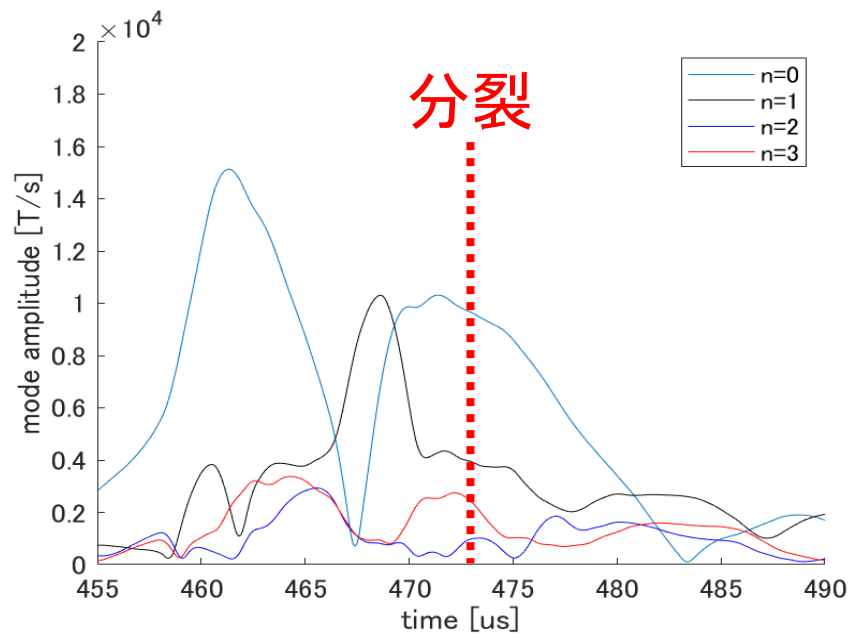
$B_t = 0.15$  [T]の方が低い楕円度で分裂

$B_t$	軸対称性	不安定モードと分裂
大	大	小 = 軸対称に分裂
小	小	大 = 色んなモードで分裂

[ $B_t = 0.2$  T]



[ $B_t = 0.15$  T]



# まとめ

## フレアのトリガモデルをトカマクプラズマの橢円度を指標に検証

- トカマクの橢円度とトロイダル磁場を変化させることによってコロナを模擬したトカマクが分裂(太陽フレア)するまでの機構を模擬
- 8本のトロイダルモード計測用プローブを挿入し $n = 1 \sim 4$ のモード計測と2次元磁気プローブで2次元磁場分布計測をした
- トカマクプラズマの橢円度に安定限界の存在すること(約1.8)が分かった
- トロイダル磁場が低下すると非軸対称モードが上昇して安定限界が下がる(1.8が1.7に下がる)
- 太陽コロナについても同様の現象が考えられる

## 今後の展望

- 太陽コロナの軟X線画像を解析し橢円度の安定限界を調べる
- 合体で急激に $q$ 値を変えてフレアに発展するかどうかを見る

## 発表実績

- 道家友香 「異極性合体を用いた太陽フレアの実験的研究」  
高 $\beta$ トラスプラズマ研究会 核融合科学研究所(22/12/28)