

IGBT インバータ電源を用いた トカマク放電の高性能化と 等価回路を用いた評価

名古屋大学工学研究科 エネルギー理工学専攻
プラズマ物性工学講座 谷山智則

内容

- ・背景と目標
- ・小型トカマク装置 HYBTOK-II における
トカマク放電回路
- ・インバータ電源を用いたトカマク回路
- ・トカマク放電のシミュレーションと実験との比較

背景(1)

○トカマクプラズマの良好な閉じ込め状態の実現

磁気面形状の制御が不可欠 → 負磁気シアー形成
非円形磁気断面の形成…など

○磁場配位を乱す不安定現象の存在

- ※ minor disruption ($\tau = 10 \sim 100 \mu s$: JET) large ELMs, large sawteeth
- ※ ELMs (Type I $\tau = 100 \mu s$: JET)
- ※ sawteeth …など

↓
プラズマを崩壊に至らしめる (JET)

プラズマの高温・高密度化、長時間化実現

→ プラズマ磁気面形状を決定する制御用磁場の高速高精度制御

電源仕様への要求

-
- ・長時間安定制御
 - ・高速応答性

背景(2):パワーエレクトロニクス分野における IGBT インバータ電源の応用

○近年の大電力・高速半導体電力素子の開発…GTO, パワーMOS FET, IGBT
一般的な応用分野

- 自己消弧素子を用いた
高速スイッチング制御の特徴
- ・高速の出力制御
 - ・負荷や入力電圧変化に対する高い安定性
 - ・低歪率、高精度
 - ・無効電力の低減…など

○トカマクプラズマ制御での使用
プラズマ生成・消滅
様々な不安定現象
→数ms～数百msで電源負荷が変動

電力系統制御

- ・直流送電
- ・無停電交流電源装置

回転機制御

- ・自動車・電車(輸送)
- ・産業用機器

スイッチ制御

- ・調光装置
- ・加熱用電源

IGBT インバータ電源は
どのような挙動を示すのか?

特徴と目的

本研究の特徴

- 高速 IGBT インバータ電源のプラズマ制御への適用
 - ◇ 40kHzスイッチング周波数を持つIGBTインバータ電源を用いて高速・高精度なプラズマ制御を実現(実験)

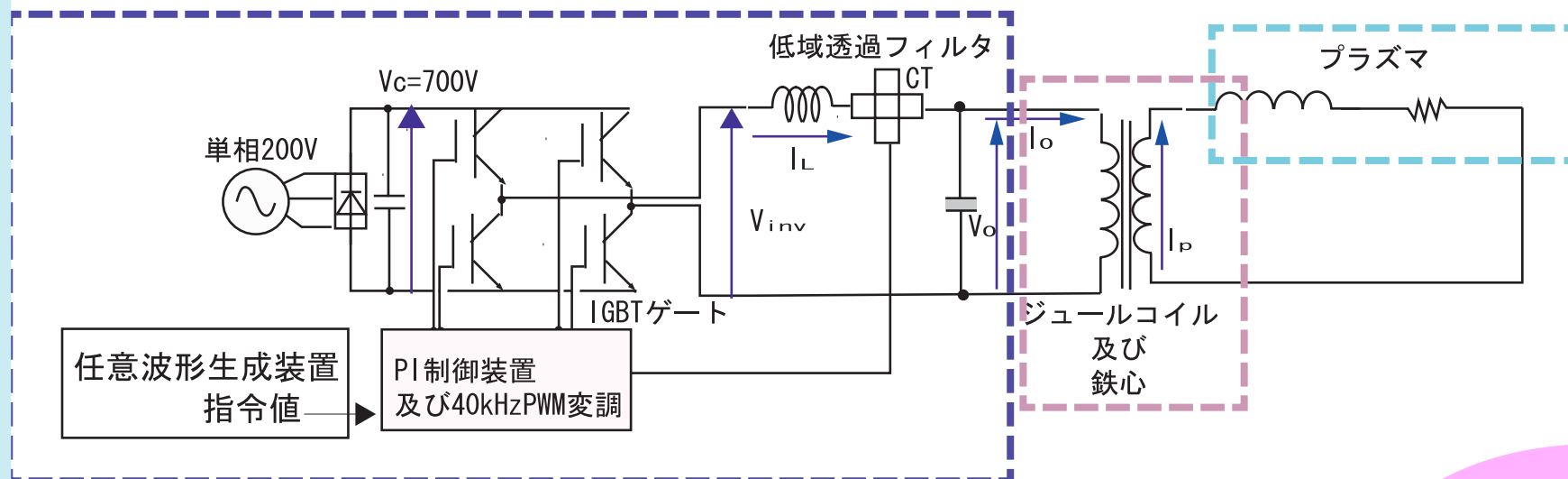


- IGBT インバータを用いたトカマク等価回路モデルによるシミュレーションを行い特性を評価する
 - ▽ 低速・高速電源によるプラズマ制御特性の比較
 - ▽ 非線形現象の取り入れたトカマク回路の評価

サイリスタと IGBT インバータ等価回路による 基礎的な電源応答評価(1)

○解析手法…汎用電磁過渡現象シミュレーター: EMTDC

○IGBTインバータ電源を用いたトカマク回路のモデル



サイリスタインバータ→スイッチング周波数 1kHz

IGBT インバータ→スイッチング周波数 40kHz

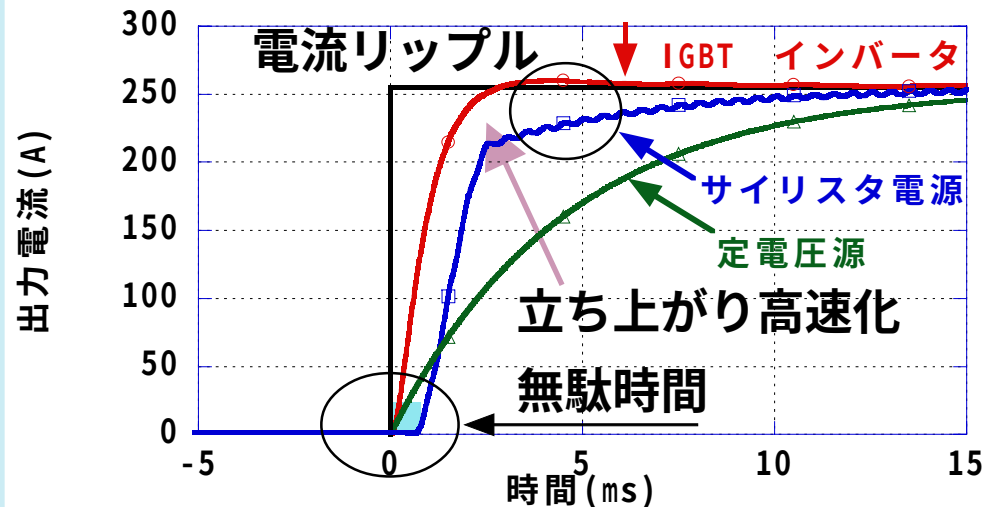
両者の過渡応答
を比較

▽電流指令値の変化

▽不安定現象による変化→インダクタンスの変化

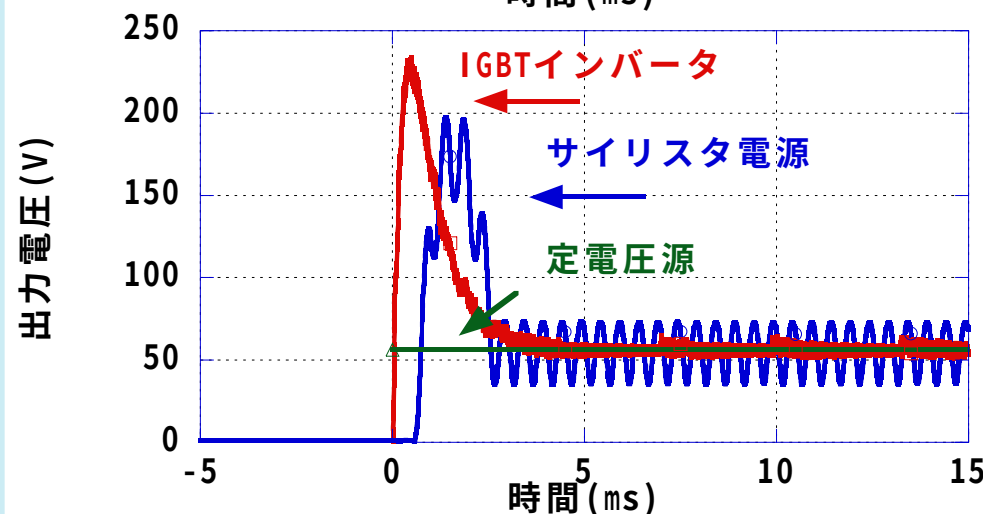
サイリスタと IGBT インバータ回路による 基礎的な電源過渡応答の評価(2)

○ステップ状電流指令値追従性評価



○模擬サイリスタ電源の問題

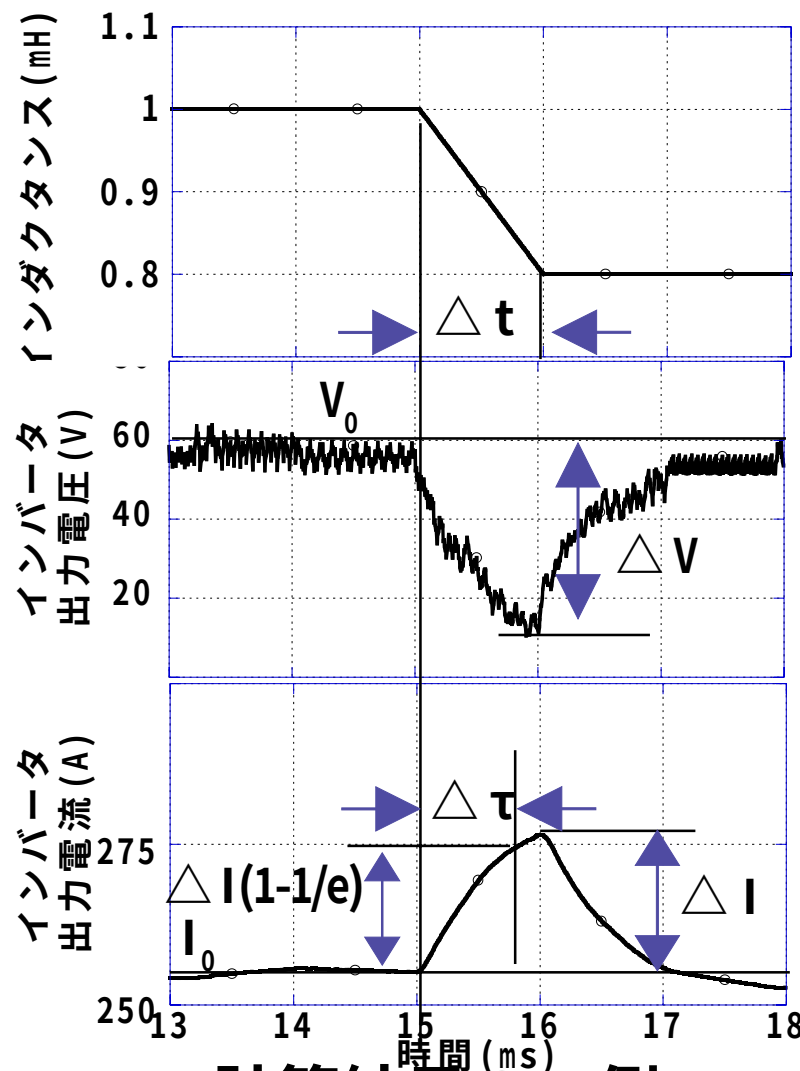
- ・応答速度が遅い
- ・1ms 程度の無駄時間を持つ
- ・電流・電圧リップルが大きい



○高速化による電流制御への寄与

- ・応答速度の高速化
- ・無視可能な無駄時間
- ・電流・電圧リップルの大幅な減少

サイリスタと IGBT インバータ等価回路による スイッチング周波数による電源応答評価(2)



計算結果の一例

○初期条件

- ・定電流制御 225A フラットトップ
- ・インバータ電源負荷 ($R+j\omega L$)
..... : $R=220\ \Omega$ 、 $L=1\text{mH}$

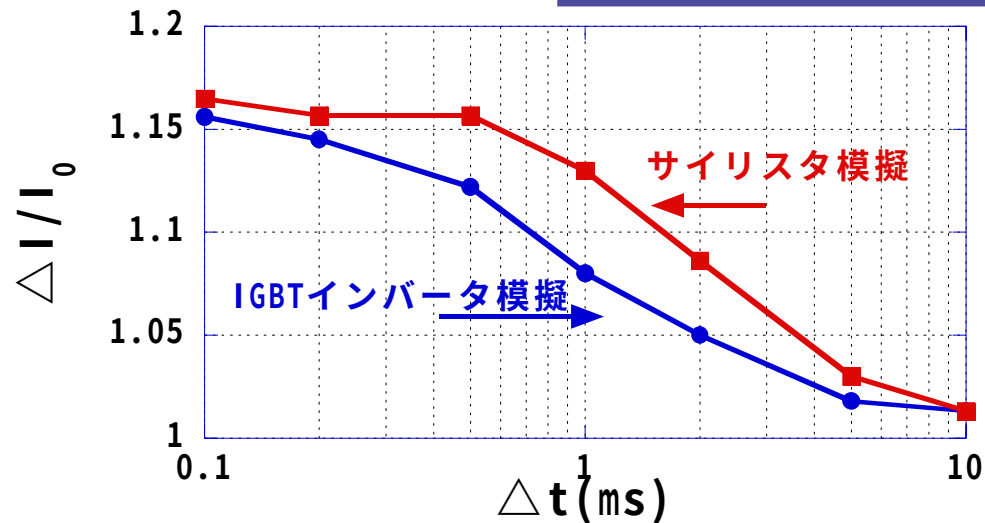
○負荷の擾乱(ELM などの影響を模擬)

- ・インダクタンス変化
..... $1\text{mH} \rightarrow 0.8\text{mH}$ に変化
→ Δt の変化による ΔI と $\Delta \tau$ の特性評価

= 図中の記号の意味 =

- Δt : インダクタンスの変化時間
- ΔV : 擾乱発生時の電圧の変化幅
- ΔI : 擾乱発生時の目標値からの電流偏差
- $\Delta \tau$: 電流偏差が最大偏差の $(1+1/e)$ 変化する時間

サイリスタと IGBT インバータ等価回路による スイッチング周波数による電源応答評価(3)



◇ $0.5 \leq \Delta t \leq 10\text{ms}$

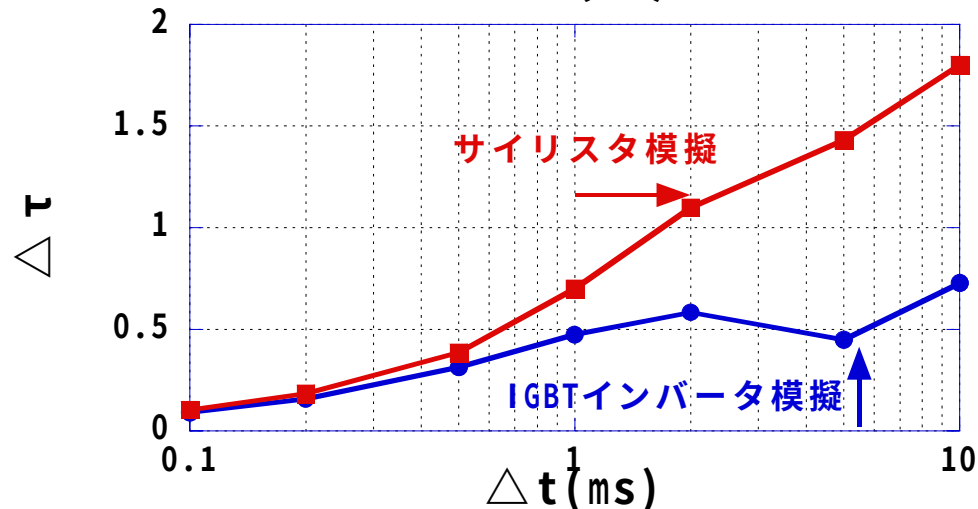
・高速化による効果

▽電流制御偏差抑制

…サイリスタの 2/3 倍程度

▽電流偏差の成長の抑制

…外乱発生後 0.5ms



◇ $\Delta t \leq 0.2\text{ms}$

0.2ms以下では低速と同等の特性

ジュール放電回路特性解析

○ IGBT インバータ電源を用いたトカマク回路の評価



等価回路による解析

○制御電源の特徴

- ・高速電流変化
- ・高精度制御



ジュール回路の持つ非線形性や渦電流効果が問題となる可能性
..... 鉄心、真空容器など

○ジュール電流の変化に対するプラズマの動的な振る舞いを取り入れる



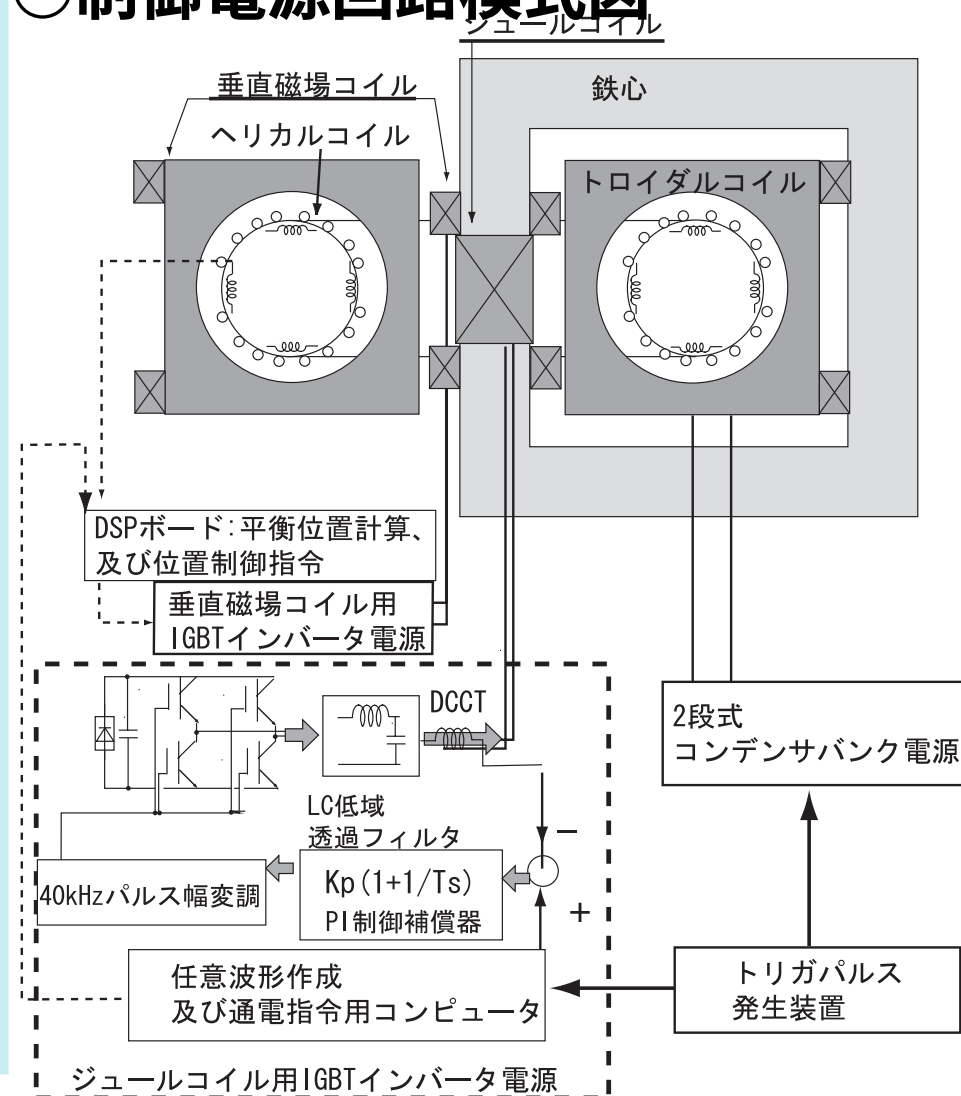
電流拡散などの時間変化を取り入れたモデルでプラズマを評価



ジュール放電回路のモデル化に取り入れ

小型トカマク装置における IGBT インバータ電源を用いたプラズマ制御回路

○制御電源回路模式図



----- は現在設計中

- ・ジュールコイル用電源
- ・垂直磁場コイル用電源



IGBT インバータ電源化

	ジュールコイル用電源	垂直磁場コイル用電源
制御方式	出力電流瞬時値制御	出力電流瞬時値制御
定格	26ms通電 (3分休止 繰り返し)	26ms通電 (3分休止 繰り返し)
定格出力電流	+/- 750A	1000A
定格出力電圧	550 V	350V
出力電流変化率	333A/ms以上	600A/ms
定格負荷	0.22 Ω 1mH (ジュールコイル)	0.19 Ω 240 μ H (垂直磁場コイル)

HYBT0K-II のジュール等価回路(2)

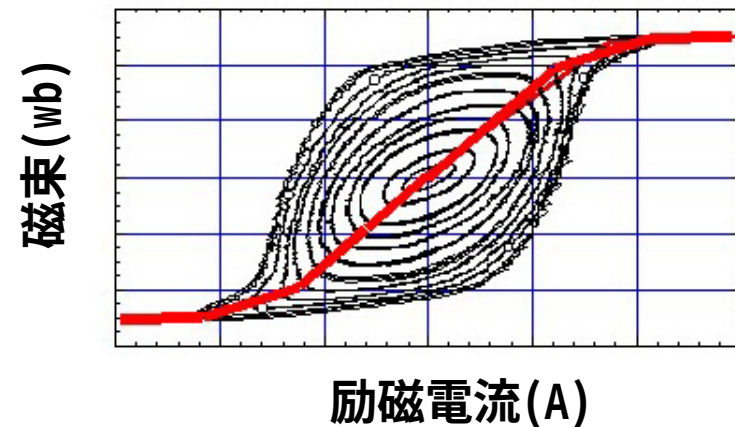
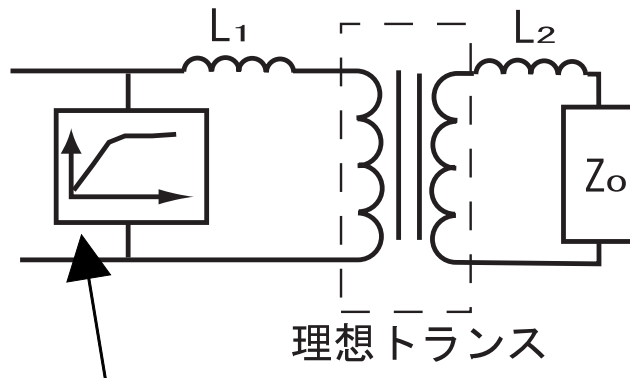
計算上の仮定

○回路モデル内部での仮定

▽過渡応答解析

- ・EMTP(汎用電磁過渡現象シミュレータ)の利用

▽鉄心飽和ヒステリシス模擬



ヒステリシス・飽和特性の近似→ポイント間補完による

▽導体真空容器の表皮効果

→一次フィルタとして近似

HYBTOK-II の高速トカマク等価回路(3)

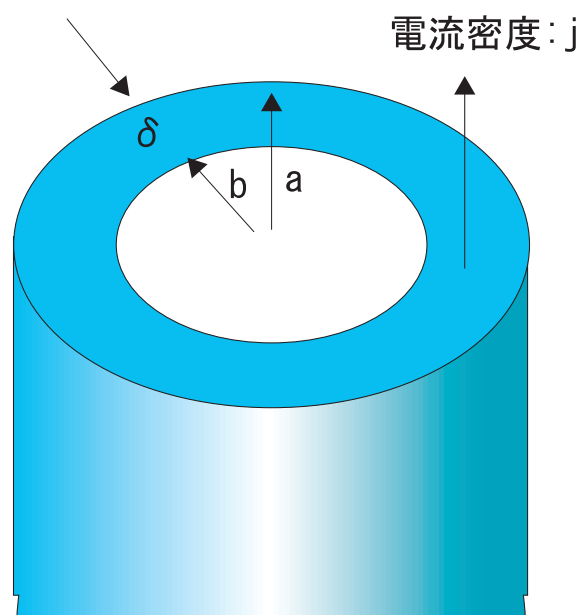
○プラズマの仮定

プラズマ電流、周回電圧の瞬時値からインダクタンス抵抗を仮定

基本式

$$\begin{aligned} V_p &= RI + \frac{d\Phi}{dt} \\ &= RI + \frac{dL}{dt} I + L \frac{dI}{dt} \end{aligned}$$

プラズマ→2層円筒でモデル化



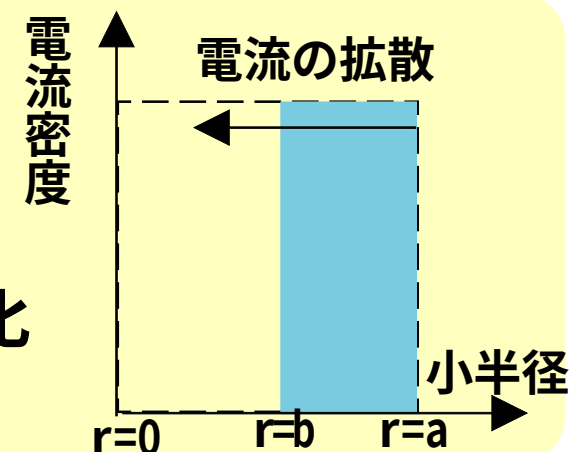
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}}$$

○電流分布

電流拡散



径プロファイル変化



○電子密度・温度変化

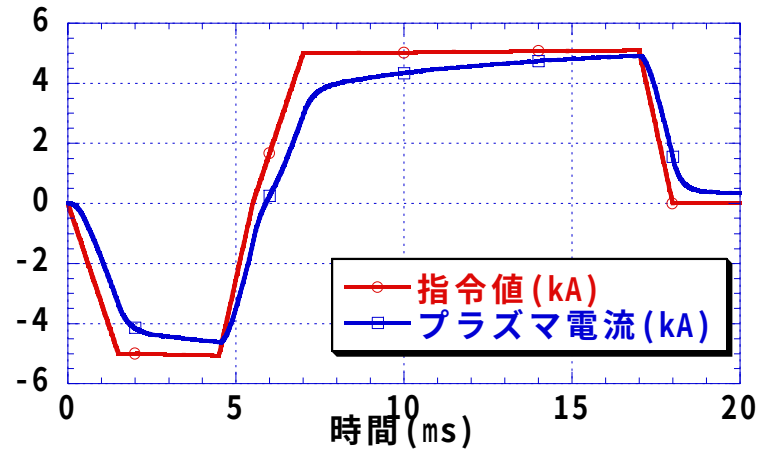
- ・空間分布:一定
- ・時間変化:プラズマ電流の関数



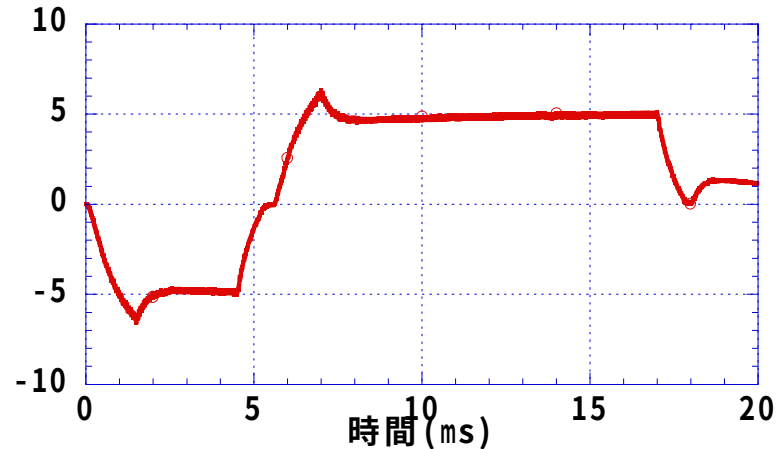
プラズマの抵抗率

シミュレーション結果

プラズマ電流 (kA)

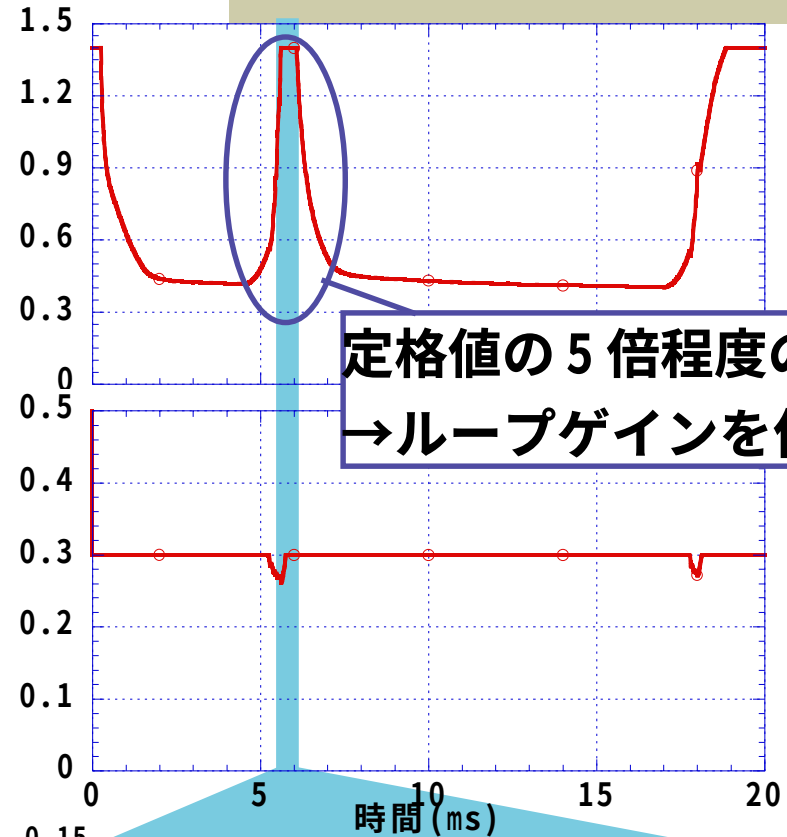


周回電圧 (V)



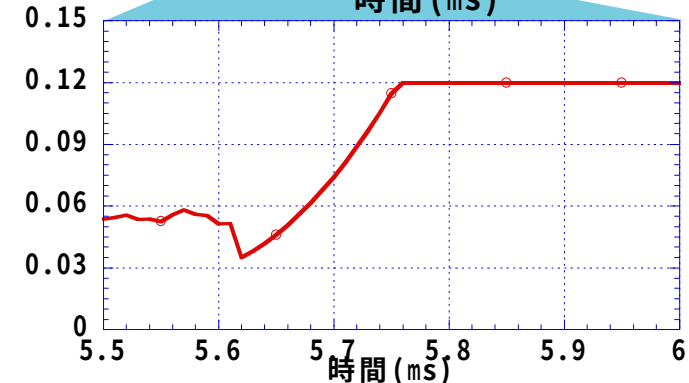
→立ち上がり時の追従遅れが発生

一次側インダクタンス (mH) 一次側抵抗 (Ω)

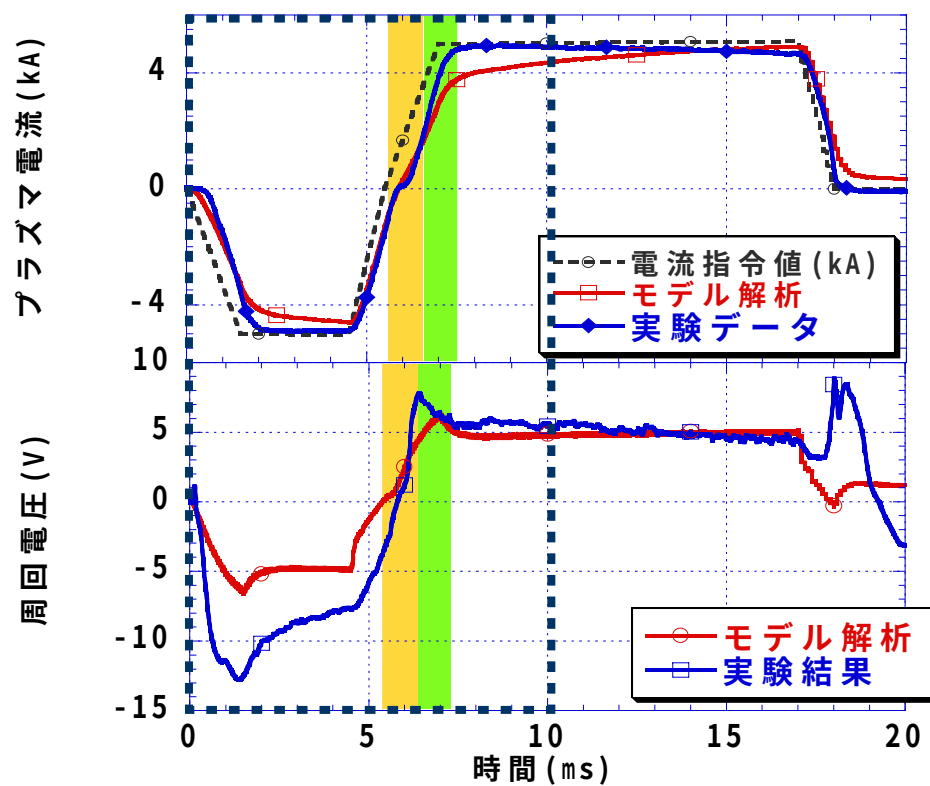


定格値の 5 倍程度の抵抗
→ループゲインを低下

表皮厚み (m)

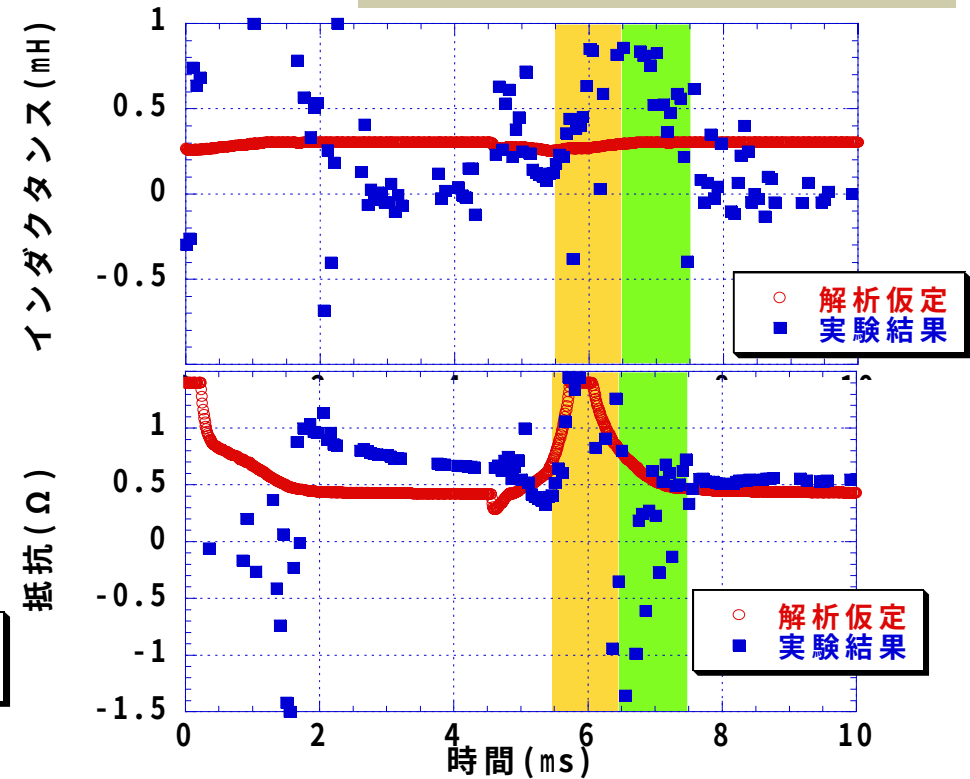


実験結果と解析結果の比較



○再現できている部分

・抵抗の時間変化



○再現できていない部分

・立ち上がり時の電流変化の特性

・インダクタンスの時間変化

まとめと今後の課題

まとめ

- ▽従来のサイリスタ電源に代わり IGBT によるプラズマ制御を評価
- サイリスタと IGBT インバータ電源の応答特性の比較を行った
- ※ IGBT インバータ電源を用いることで2倍程応答速度が改善される
- HYBT0K-II において高速トカマクモデルを構築した
- ※立ち上がり時のプラズマ電流の特性が再現不十分
- 実験結果から抵抗の増加によるループゲインの低下の寄与は、インダクタンスの減少の寄与により軽減されると予想される。

今後

▽プラズマ等価回路の改良

- ・プラズマ電流の径方向分布の時間変化、温度・密度の時間・空間的な変化を導入

▽ IGBT インバータを用いた高速フィードバック制御系の構築

- Digital Signal Processor(DSP)を用いたプラズマ位置のリアルタイムフィードバック制御

インバータ電源の周波数特性

入力指令: 振幅 500A の正弦波

負荷: 純抵抗負荷 220 Ω

