

この資料ではモード計測の簡単なノウハウや自分の計測システムの概要、改善点などを記録します。詳細は自分の修論を読んでいただければわかりますし、モード計測や磁気計測に関してはもっと丁寧に詳しく書いている人がたくさんいますのであくまで参考程度に適当に読んでください。

まず私の2年間の研究成果(修論)を簡単にまとめると、

- ・磁場の条件が同じでもリコネクションの軸対称性に大きな差が出ることもある(基本的には軸対称に進行する。)
 - ・非軸対称なりコネクションでは当然ながらトロイダルモードが大きい
 - ・また非軸対称で3次元的な効果が強いリコネクションではリコネクション速度(電場)が早い→3次元性がリコネクションの高速化に寄与している
 - ・非軸対称な放電では磁気面で磁力線の3次元構造が確認される(プラズモイドに似たようなもの)
 - ・どういう条件で非軸対称なりコネクションになるかは不明(密度には関係ないっぽい、日によって出やすさが異なる印象)
 - ・TFを大きくしていくとトロイダル方向への伝播は早くなる(2次元的で軸対称性が増す。けど電場はあまり変化しなかった)
 - ・TFが小さい時はキンクとかバルーニングのような不安定性が発生してるっぽい
- こんな感じのことを修論では話しています。

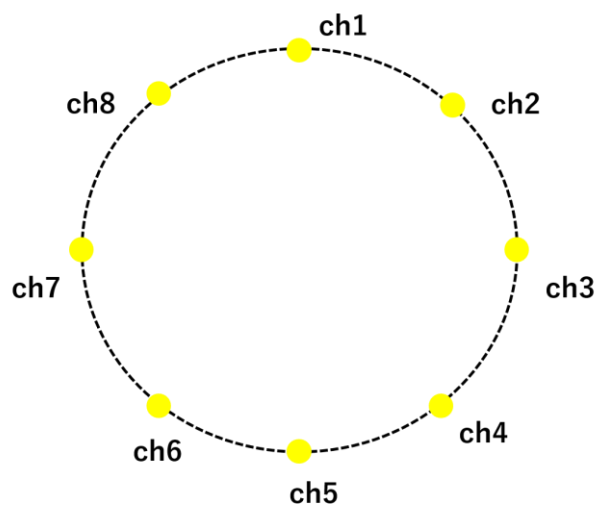
ただ、かなり欠陥があるので本当かどうかは正直怪しいです。モードが上昇するタイミングと電場が上昇するタイミングのずれとかが、欠陥の主な内容です。似たような研究をする場合は先生にどこが問題なのかとかを聞いた方がいいと思います。

トロイダルモードとは

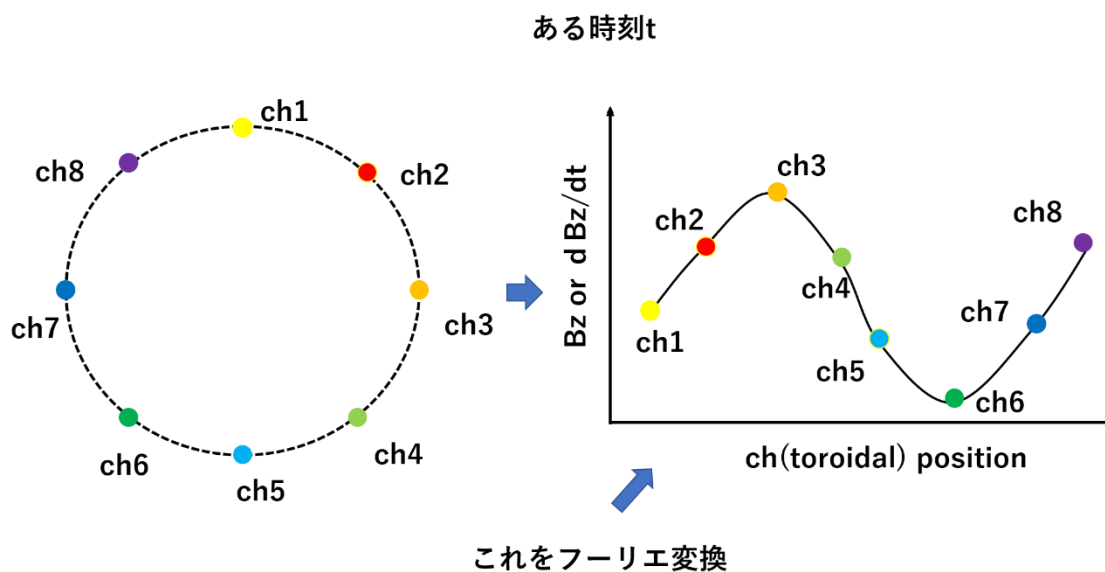
トロイダルモードは磁場とかの信号をトロイダル方向に空間的にフーリエ変化して得られるモード次数です。このモードがプラズマの変形の指標となります。例えばある時刻 t で二おける信号はフーリエ変換すると磁場 B は超シンプルに表すと

$$B = \sum_{n=0}^K A_n \sin(nt) = A_0 \sin(0 \cdot t) + A_1 \sin(1 \cdot t) + \dots$$

みたいに表せます。 K はトロイダル上に配置しているコイルの個数です。この n がモード数で、私の研究では各時刻で上記の計算を行って振幅 A_n の時間発展を算出しています。

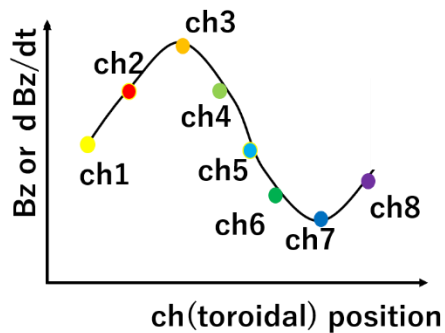


上図のようにトロイダル上に等間隔にピックアップコイルが 8 個配置されている状況を考えます。各コイルで得られた信号を空間的にフーリエ変換するのですがイメージとしては以下のような感じ。

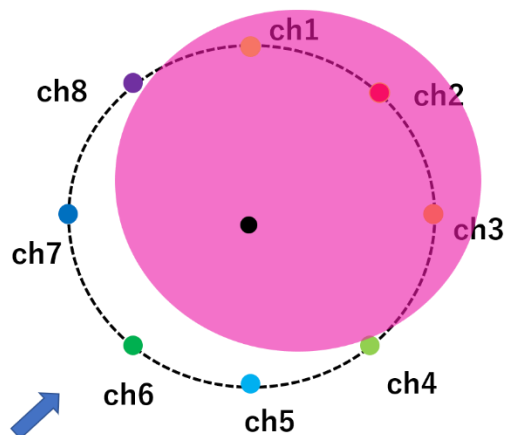


したがって $n=1$ のモードではプラズマが垂直に移動したり、傾いたりする変形が起きていることを示しています。 $n=0$ はプラズマが軸対称で変形はしていない成分です。下図は $n=1$ のイメージ。

$n=1$ のモードではトロイダル方向で磁場の強弱の波が1つあるということ



$n=1$

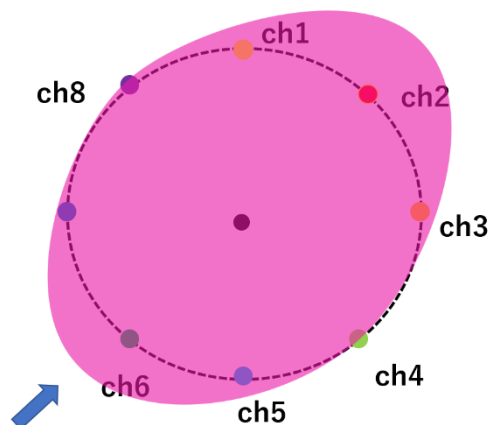
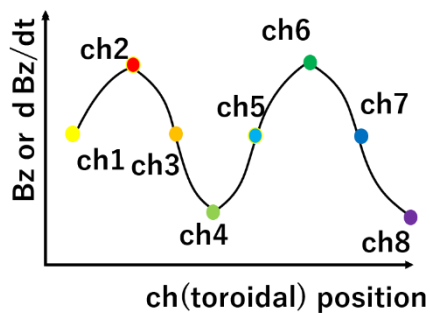


こんな感じでプラズマが中心軸から垂直に移動すると各点での磁場の強さは左のグラフのように波が一つできるようになる。この時刻では磁場をフーリエ変換すると $n=1$ の振幅が支配的になる。

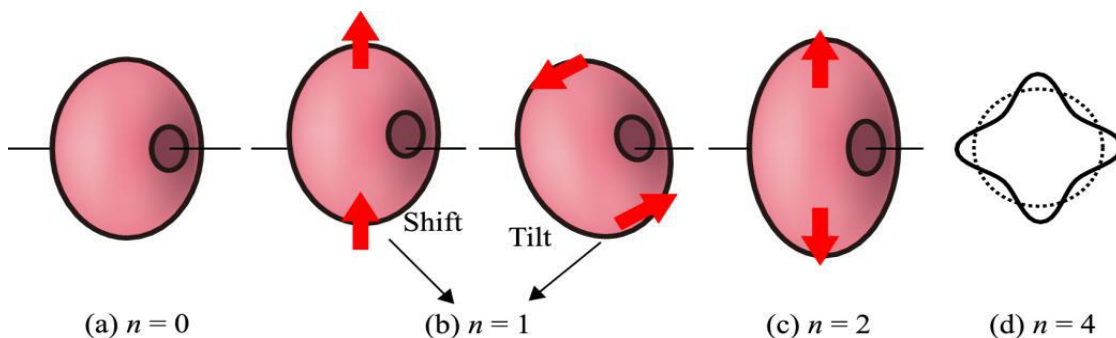
$n=2$ の変形は楕円状に引き伸ばされる感じです。

$n=2$

$n=2$ のモードでは強弱の波が2つ



$n=2$ ではプラズマが引き伸ばされるような変形が起きる。
 $n=3$ 以上では n の個数分だけプラズマが波打つような変形となります。



トロイダルモードはその原理上、得られる n の最大値は配置しているコイルの個数の半分までです。フーリエ変換の計算は `fft` で簡単に行えます。Matlab なら `fft` の関数で 1 行で計算自体は実行できます(多分 IDL でもできる)。参考のため私の `coala` のファイルにモード算出のコードはおいてあります。ただ変数名とかかなり適当で他人に見せることを想定していないのでかなり汚いコードになっています。なので自分で 1 から書いた方が早いと思います。

以下では自分の計測システムや改善点、計測で気を付けるべきこととかを書き連ねていきます。

・low-n プローブ (積分器あり)

現在はコイル入れ替えのためプローブは抜いていますが $z=0\text{mm}$ のトロイダル円周上の 8 点で B_z を計測する設計(修論に位置は記載)→トロイダルモードは $n=0\sim 3$ の 4 つが得られます。

磁気プローブを作製する際は測定したい現象とか信号の周波数を概算して時定数とかを考えて積分器を作るべきです(時定数とか周波数については修論読んでください)

共振に関しては LC 共振が問題になり、同軸ケーブルが C を持つことがあるのでケーブルの長さに関しては慎重になった方がいいです。

立ち上げの際に直面した問題として `ch5` の信号のみ合体後も 0 に戻らないという問題がありました。アースの問題かと思い色々試行錯誤しましたが解決せず、結局原因はセパレーションコイルの引き出し線がプローブのエナメル線と近いと謎に信号が 0 に戻らないということが判明しました。 z 軸からプローブを挿入する際はセパレーションや PF の引き出し部分にエナメル線が近づかないように配慮したほうがいいと思います。積分器の供給電圧が十分ではない時は全信号がばらばらになります

気を付けること(ケーブルの共振、積分器、0 に戻らない現象)

モード解析の図

・high-n

こちらは秋光さん(2022.博士)が開発した PCB コイルを用いて作製しました。ガラス管は T 字型をしており、 $r=275\text{mm}$ のトロイダル円周の約 4 分の 1 の長さとなっています。チャンネル数は 24 チャンネル(15mm 間隔)なのでトロイダルモードは $n=0\sim 11$ までが計算によって得られますが、長さが円周の 4 分の 1 なので実際は $n=0\sim 44$ です。自分の修論と秋光さんの修論を読んでいただければ詳細は理解できると思います。

この high プローブの問題点としては PCB コイルへのはんだ付けが難しく、ガラス管に挿入する際に ch9 と 17 が断線しています。なのでこの二つのチャンネルに関しては線形に補完しています。

またインダクタンスが小さく、磁場揺動を測定するために積分増幅器を入れなかったため信号が弱く、SN 比が悪いです。

更にショットによって PF 放電時にかなり大きなノイズが複数のチャンネルに乗ってしまうことがあります。このノイズに関しては半年間試行錯誤しましたが結局解決できませんでした。ショットによって出たりでなかったりして原因不明です。私の実験では一定の半径でしか計測できなかったのも r 掃引とかができれば面白いと思います。私が使用したプローブは準備室にしまってありますが、2ch 断線している上に謎のノイズが乗るので新しく作った方がいいと思います。ガラス管は東京大学生産技術研究所の三澤様に作製してもらいました。作製の際に気を付けるべき点として、T 字型の枝分かれ部分はエナメル線が集中して割れやすくなるのでその部分は $\Phi 10$ で設計するのと、引き出し部分は r 掃引のことも考えて長めに設計するのがおすすめです。また私は予備のために 2 本作製してもらいましたが、片方は途中の部分が細くなりすぎて PCB コイルが入らなかったのも内径の確保はしっかりと伝えておいた方がいいと思います。

Matlab のプログラムの簡単な説明

自分が主に使っていたコードのめっちゃくちゃ簡単な説明を書いていきます。ほとんどは関数の名前を見ればわかるものなので読み飛ばしてもらっても問題ないと思います。また名前の付け方がへたくそなので各自で最適化していただいた方がいいかも。

・磁気面用、Low_n 用

main…メインプログラム。ここに関数とか書いていくので動かすのはこのコードのみ。

get_Bz…名前の通り camac のデータから Bz を算出するコード。この中にもいろんな関数のコードがありますが、動けばいいと思います。中身を詳しく知りたい人や最新版は磁気プローブの人に聞くか、git などを使って更新してください。

plot_psi_multi…磁気面を指定した時間の分だけ描く関数

plot_B_z_in_time…get_Bz で取得した全チャンネルの磁場波形をプロットする関数。磁気面がおかしい時はこれを動かすと解決できることが多い。

plot_psi_at_t…名前の通り、ある時刻の磁気面を 1 つだけ描くコード

plot_Et_and_psi_at_t…指定した自国の磁気面と電場の二次元プロットを示すコード。あまり使えないし、信ぴょう性も低い。

plot_Et_in_time_at_x_point…X 点の電場の時間発展を描くコード

plot_fitrate…合体率を計算するコード。合体率は合体の速さの指標となるので昔は合体率で議論することもあったらしいですが、天文分野の人にもわかりやすいのが電場なのであま

り使われなくなったっぽい。

x_point.m...Bz のデータから X 点の位置を logical で出力するコード。自分が書いたためかなり汚いので見直す必要があるかもしれないです。

low_n_mode...オシロでとった coala のデータを読み込むコード

toridal_mode_offset_new...上記のコードでとったデータからトロイダルモードを計算してプロットする関数

・ High 用

fluctuation...磁気面用コードの main みたいなもの

get_data...coala に保存されたデータを読み込むコード

contour_fluctuation...24ch のデータを二次元等高線でしめすコード

plot_signal...24 チャンネル全部の信号を描くコード。

high_n_toroidal_mode...トロイダルモードを計算するコード。

new_delta_B... ΔB を算出するコード。使えないし、そもそも計算が合ってるか不明。

・ labview の説明と使い方

私が使っていた high_n プローブの信号を取得するためにオシロを制御する目的で使ったコードです。基本的にはブロックダイアグラムを開いて ctrl+H で説明見ればわかると思います。ざっくり説明すると前半でオシロを認識してトリガー待ち状態にする、後半部分でオシロで取得したデータを coala に保存する感じになっています。

matlab で言う main みたいなのが 0722.vi のコード。これに自分で作ったコードをサブ vi として配置しています。サブ vi は関数みたいなものです。setup_sub.vi と acuire_first_half と acuire_second_half_with_message の 3 つがあります。setup_sub でオシロのレンジとかを設定してトリガー待ち状態にしています。その後 acuire_first と acuire_second でオシロに表示された波形を csv で保存しています。first と second は保存後にメッセージを表示するかもしれないかなのでほとんど違いはないです。

使い方

まず old_coala の results¥fluctuation¥data に日付のファイルを作る

labview の 0722 を開く

自分はオシロを 6 個使っていたので上部に GPIB の名前を入力するフォームが 6 個あります。ni を使って各オシロの名前を確認して入力してください。

date に日付を入力

オシロをつけて、misc をおして adress 番号をダイヤルで設定してください(dl1500 シリーズ)

左上の→のマークを押すと、コードに従って一つ一つのオシロのセッティングが始まって

トリガー待ち状態になります。すべてのオシロがトリガー待ちになると画面の `waiting for trigger` が点灯します。

トリガーを入れるとオシロがデータを取得します。

データを保存したければ `save shot` を押します。押しても反応はないですが、5 秒後ぐらいに保存完了のポップアップが出ます。

データいない場合は `discard shot` 押せばいいです。

これで最初に設定した `coala` のファイルにデータが保存されます。

次のショットでは `current shot` を一つ上げて、そのあとは全部同じです。

カップリングとかプローブ、保存開始のタイミングは適宜最適化してください。ただ保存開始と終了を変更すると、`matlab` のコードもそれに伴って変更する必要があるので注意してください。

※注意点

自分のコードが甘くて、データ保存しても `waiting for trigger` のランプは消えないのでコードを動かす前に手動でランプ消す必要があります。（目視でオシロの状態わかるのでそもそもこの機能いらんかも）

保存する時にファイルが重複するとうまく保存されずに消えてしまいます。なのでコードを改善するか、保存するときに `current shot` のショット番号を確認したほうがいいです。