

ジャイロ運動論的シミュレーションコードGKVを用いた微視的不安定性・乱流輸送解析

前山伸也

名大理

GKV講習会
2019年1月17日

Contents

- GKVのコード構造
- 数値パラメータ、物理パラメータ、計算機環境の設定
- コンパイルおよび実行
- 出力データ構造
- ポスト処理
- まとめ

以下、**ユーザに編集してもらう点は青字**、**注意点は赤字**で示します。

実習のための下準備

始めに /tmp/GKV_Training_190117/ をホームディレクトリにコピー。

```
cp -r /tmp/GKV_Training_190117/ ~/
```

ソースコード・平衡データを展開して、サンプル平衡データを所定の場所にコピー

```
cd GKV_Training_190117/
```

```
tar xzvf gkvp_f0.53.tar.gz
```

```
tar xzvf vmec_data.tgz
```

```
cp vmec_data/lhd_inward_Ntht3/metric_boozer.bin.dat gkvp_f0.53/run/input_vmec/
```

プラズマシミュレータでFFTWを有効化する。

```
module load fftw-fx
```

プラズマシミュレータでgnuplot5.0を有効化するために、**エイリアスを追加**。

cshの場合、~/.cshrcに `alias gnuplot /usr/local/gnuplot/5.0.1/bin/gnuplot`

bashの場合、~/.bashrcに `alias gnuplot="/usr/local/gnuplot/5.0.1/bin/gnuplot"`

※エイリアスの追加の仕方がわからない場合、資料18ページのfig_stdoutで利用するだけなので、fig_stdout/make_pdf.cshの冒頭に直接

`alias gnuplot /usr/local/gnuplot/5.0.1/bin/gnuplot` と書き込んでもよい。³

GKVのコード構造(バージョンgkvp_f0.53)

gkvp_f0.53/

README_for_namelist.txt 簡単な説明書き

Version_memo.txt 最近の更新履歴

src/ ソースファイル群

gkvp_f0.53_header.f90 解像度、MPIの設定モジュール

gkvp_f0.53_out.f90 標準データ出力モジュール

lib/ 乱数・ベッセル関数ライブラリ呼び出しモジュール

extra_tools/ ポスト処理ツール等

fig_stdout.tar.gz アスキーデータのPDF化

v30diag.tar.gz バイナリデータの解析

run/ コンパイルおよび計算実行

gkvp_f0.53_namelist 物理パラメータの設定

sub.q バッチジョブ用スクリプト(計算機依存)

shoot ジョブ投入スクリプト(計算機依存)

Makefile コンパイル情報(計算機依存)

backup/ 各計算機向けsub.q,shoot,Makefileのバックアップ

input_vmec/ VMEC平衡データ

input_eqdsk/ EQDSK平衡データ

GKVで扱える問題

ある平衡の下で、微視的不安定性や乱流揺動、粒子・熱輸送の局所解析。

1. 線形解析

- 線形モードの成長率、実周波数、揺動間のクロスフェーズなどを調べる。
- 線形モードの独立性から、特定の波数のみ解析するため計算は早い。
- 非線形飽和機構が入っていないので、振幅の絶対値は求まらない。

2. 非線形解析

- 揺動スペクトル、粒子・熱輸送、その他諸々の乱流揺動解析を行う。
- 乱流混合を扱うために多数のモード間の非線形結合を解く必要があり、計算に時間がかかる。要求解像度も問題に依るので、数値的健全性確保のためにエントロピーバランスやスペクトルの収束性確認が必要。

今日の実習の問題設定

LHD実験の密度・温度・磁場計測などから、解析したいプラズマの平衡配位が求まっている(VMEC形式)。この平衡下で、微視的不安定性が存在するか線形解析したい。

1. 解析する半径位置を決めて、実験的な物理パラメータをGKVの入力パラメータに換算し、run/gkvp_f0.53_namelistに入力する。また、GKVで読み込めるように加工した磁場配位データ(VMEC形式→BZX)を用意する。
2. src/gkvp_f0.53_header.f90に計算格子数およびMPI並列数を入力する。
3. バッチジョブスクリプトsub.qを設定する。
4. ジョブ投入スクリプトshootにディレクトリの設定をする。
5. コンパイルし、計算を実行。
6. 出力データを解析する。(ポスト処理ツールの利用)

※非線形解析も計算タイプ”nonlinear”とし高解像度化する位で同様の手順。

1. 実験→GKV換算、namelistへの入力、平衡の加工

実験計測より、

- 局所パラメータを算出
- MHD平衡を構築

GKVで解析するため、

- 実験→GKVパラメータ換算(規格化)
- 対応する物理パラメータのnamelistへの入力
- MHD平衡からGKVで必要となるメトリックデータへの加工

先の仲田さんの説明でできるようになったはずなので、今日の実習では既に用意済み。

run/gkvp_f0.53_namelist

物理パラメータのnamelist

run/input_vmec/metric_boozzer.bin.dat

VMEC磁場配位から構築したメトリックデータ

1. 実験→GKV換算、namelistへの入力、平衡の加工

run/gkvp_f0.53_namelist

念のため計算実行にかかわる部分だけおさらいすると、
&calct **calc_type="linear"**, 計算タイプ linear / nonlinear

z_bound="outflow",

z_filt="off",

z_calc="cf4",

art_diff=0.d0,

num_triad_diag=0, &end

&triad mxt = 0, myt = 0/

&equib **equib_type = "vmec"**, &end

平衡磁場モデル analytic / s-alpha / vmec / eqdsk

...

&runlm **e_limit = 60.d0**, &end

計算実行の実時間[秒]

× **tend = 200.d0**,

シミュレーション上の上限時間

dtout_fxv = 10.d0,

データ出力の時間間隔1

dtout_ptn = 0.1d0,

データ出力の時間間隔2

dtout_eng = 0.1d0,

データ出力の時間間隔3

dtout_dtc = 0.1d0, &end

自動時間刻み幅の調整間隔

...

2.src/gkvp_f0.53_header.f90に計算格子数およびMPI並列数を入力する。

```
!-----  
! Dimension size (grid numbers)  
!-----  
! Global simulation domain  
! in x, y,z,v,m (0:2*nxw-1, 0:2*nyw-1,-global_nz:global_nz-1,1:2*global_nv,0:global_nm)  
! in kx,ky,z,v,m ( -nx:nx,0:global_ny,-global_nz:global_nz-1,1:2*global_nv,0:global_nm)
```

src/gkvp_f0.53_header.f90

```
integer, parameter :: nxw = 2, nyw = 16
```

```
integer, parameter :: nx = 0, global_ny = 10    ! 2/3 de-aliasing rule
```

```
integer, parameter :: global_nz = 192, global_nv = 16, global_nm = 7
```

```
integer, parameter :: nzb = 3, & ! the number of ghost grids in z
```

```
                nvb = 3    ! the number of ghost grids in v and m
```

```
!-----  
! Data distribution for MPI  
!-----
```

```
integer, parameter :: nprocw = 1, nprocz = 16, nprocv = 2, nprocm = 2, nprocs = 1
```

2.src/gkvp_f0.53_header.f90に計算格子数およびMPI並列数を入力する。

ここで、

nx		kxモード数	- nx:nx
global_ny		kyモード数	0:global_ny
(さらにnxw>nx*3/2, nyw>global_ny*3/2となるように設定。)			
global_nz		磁力線方向座標	-n_tht*pi < zz < n_tht*pi を -global_nz:global_nz-1で離散化
global_nv		磁力線方向速度	-vmax<vl<vmaxを1:2*global_nvで離散化
global_nm		磁気モーメント	0<mu<vmax^2/2を0:global_nmで離散化

nprocw, nprocz, nprocv, nprocm, nprocs はky,zz,vl,mu方向および粒子種のMPI領域分割数。

ただし、

※(global_ny+1)/nprocw, global_nz/nprocz,
global_nv/nprocv, (global_nm+1)/nprocmは整数。

※nprocsは扱う粒子種数と一致。

3. バッチジョブスクリプトsub.qを設定する。

run/sub.qでMPI/OpenMP並列数を指定する。

run/sub.q

```
#PJM -L "rscunit=fx"
```

```
#PJM -L "rscgrp=X24"
```

```
#PJM -L "node=8"
```

```
#PJM -L "elapse=00:10:00"
```

```
#PJM -j
```

```
#PJM --mpi "proc=64"    ※総MPIプロセス数はnprocw*nprocz*nprocv*nprocm*nprocs
```

```
#### --mpi "rank-map-hostfile=myrankmap"
```

```
#PJM -g 18291
```

```
## Note that Max. core num. per 1 node on PS is 32.
```

```
setenv PARALLEL 4          # Thread number for automatic parallelization
```

```
setenv OMP_NUM_THREADS 4  # Thread number for Open MP
```

※プラズマシミュレータでは $\text{proc} * \text{OMP_NUM_THREADS} = \text{node} * 32$ とする。

以下は不変。

4. ジョブ投入スクリプトshootにディレクトリを設定をする。

run/shoot

```
##### Environment setting
set DIR=/data/lng/maeyama/gkv_training/linear_test_LHD 実行後のデータ出力ディレクトリ
set LDM=gkvp_mpifft.exe ※maeyama→個別のユーザ名に書き換えてください。
set NL=gkvp_f0.53_namelist
set SC=pjsub
set JS=sub.q
## For VMEC, set VMCDIR including metric_boozer.bin.dat
set VMCDIR=./input_vmec BZXで生成したVMEC平衡データのあるディレクトリ
## For IGS, set IGSDIR including METRIC_{axi,boz,ham}.OUT
#set IGSDIR=./input_eqdsk
```

以下は不変。

5. コンパイルし、計算を実行

コンパイルする。

```
cd gkvp_f0.53/run/
```

```
(module purge)
```

```
(module load tcsuite-fx fftw-fx)
```

```
(make clean)
```

```
make
```

} 省略可能

計算を実行する。以下の形式でステップジョブ実行される。

```
./shoot START_NUM END_NUM (JOB_ID)
```

例) シングルジョブ投入 (*.001) ./shoot 1 1

 シングルジョブ投入 (*.002) ./shoot 2 2

 ステップジョブ投入 (*.003-*.005) ./shoot 3 5

 継続ステップジョブ投入 ./shoot 6 7 11223

(*.005まで計算するジョブJOB_ID=11223がキュー中にあり、
それに続けて*.006-*.007のジョブを実行させようとした。)

5. コンパイルし、計算を実行

正常に計算が実行されれば、run/shootで設定した出力ディレクトリ
(今回の例では `/data/lng/maeyama/gkv_training/linear_test_LHD/`)
に以下のデータが書き出される。

log/ 計算ログ

cnt/ 継続計算用バイナリデータ

fxv/ 分布関数バイナリデータ(いくつかの磁力線方向座標位置で)

phi/ ポテンシャル、流体モーメント、エントロピーバランスに関するバイナリデータ

hst/ アスキー形式の標準出力

その他: 実行環境バックアップのためのコピー

Appendix A. GKVの出力データ一覧 にまとめた。

さらに詳細は、ソースコード `src/gkvp_f0.53_out.f90` を参照。

6. 出力データを解析する。

出力データを解析するには、

6-a) 自力で何とかする。

- GKVの出力データは一覧にまとめてあるので、後は適当にポスト処理する。
- アスキー形式の標準出力くらいなら簡単。
- MPI領域分割されたバイナリデータを読み込むのは結構手間。

※アスキー形式の標準出力についていろいろとプロットしてみましよう。

コードのオープン化にあたり、ポスト処理ツールとして以下の2つを提供。

6-b) hst/のアスキー標準出力を一括でPDF化するためのスクリプト `fig_stdout`

6-c) phi/などのバイナリデータを解析するためのポスト処理プログラム `diag` (割愛)

※ `fig_stdout` を実行してみましよう。

6-a). hst/のアスキー標準出力をプロットする。

例として、`cd /data/Inp/maeyama/gkv_training/linear_test_LHD/`

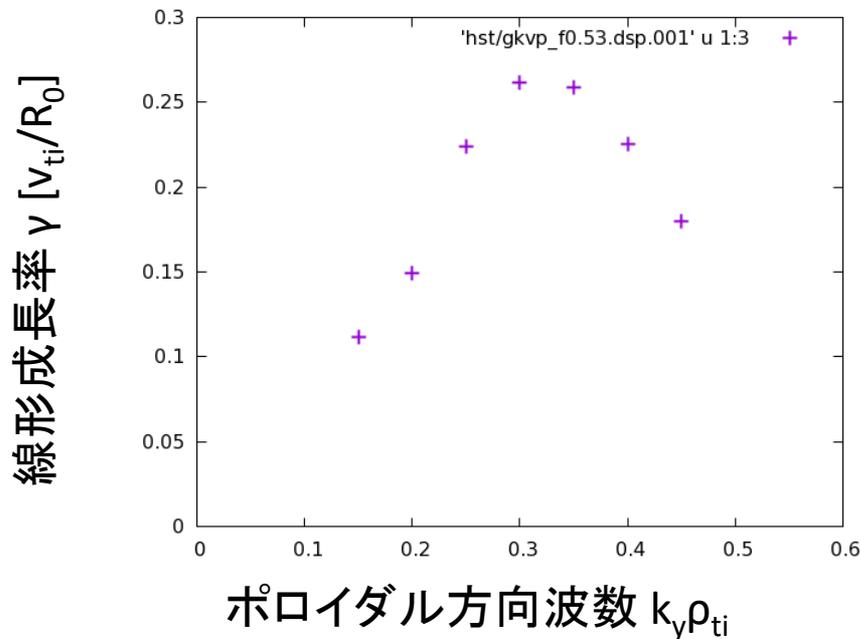
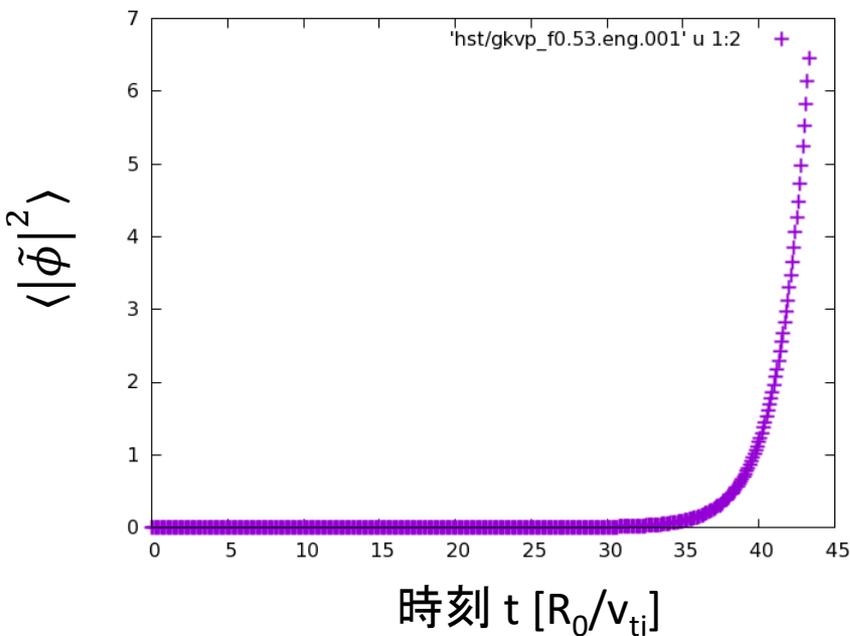
`gnuplot`

`plot 'hst/gkvp_f0.53.eng.001' u 1:2`

`plot 'hst/gkvp_f0.53.dsp.001' u 1:3`

揺動振幅 $\langle |\tilde{\phi}|^2 \rangle$ の線形成長

線形分散関係



6-b) hst/のアスキー標準出力を一括でPDF化するためのスクリプト fig_stdout

extra_tools/fig_stdout.tar.gz をGKV出力データのあるディレクトリ(今回は /data/lng/maeyama/gkv_training/linear_test_LHD/)に展開すると、

fig_stdout/

make_pdf.csh	PDF作成シェルスクリプト
pdf/	PDFが格納されるディレクトリ
eps/	PDF作成に用いられたepsが格納されるディレクトリ
data/	eps作成に用いられた元データが格納されるディレクトリ
src/	gnuplot用スクリプト等

ができるので、以下のコマンド

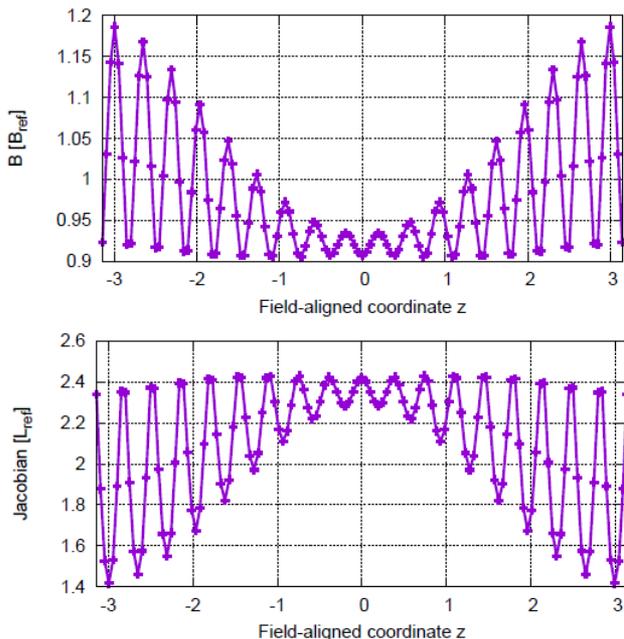
```
cd fig_stdout/
```

```
(./make_pdf.csh clean) - 省略可能
```

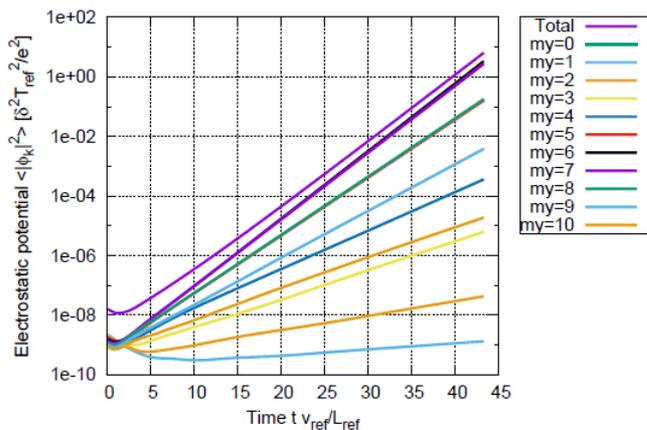
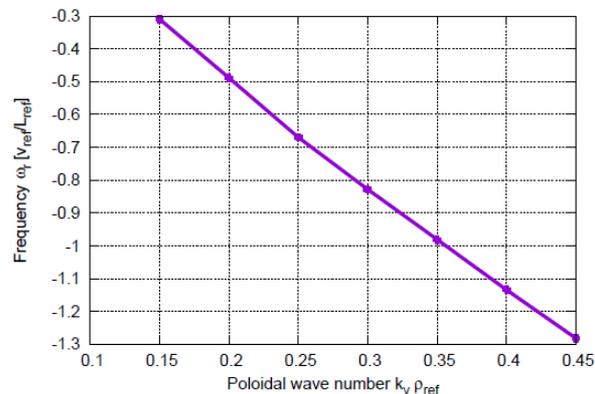
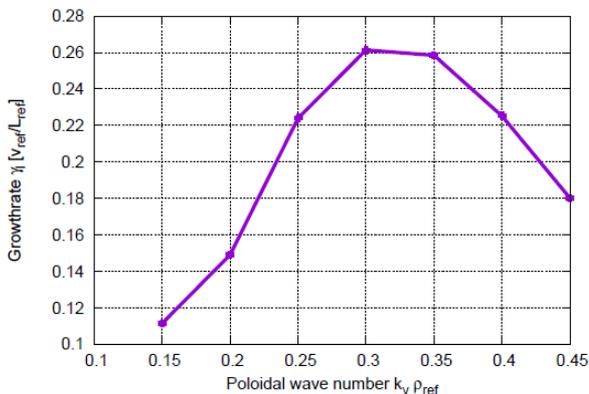
```
./make_pdf.csh
```

を実行すると、一覧のPDF(fig_stdout/pdf/fig.pdf)やeps、元データが格納される。
(※必ずしも図のスケール等が見やすいとは限らない。)

磁場強度やJacobianの 磁力線方向z分布



線形成長率・実周波数のポロイダル方向波数依存性



**ポロイダルモード数
毎の揺動振幅
 $\langle |\tilde{\phi}|^2 \rangle$ の時間発展**

ヘリカルリップルに対して格子点数が少なめ。→もう少し磁力線方向解像度 $global_nz$ を高くする必要がある。

応用：非線形乱流シミュレーションの実行とデータ解析

非線形乱流シミュレーションを行い、fig_stdoutやdiagを利用してデータを解析する。

nonlinear_test_LHD.tar.gz を解凍し、**パラメータ・ディレクトリ**を指定し、**コンパイル&実行**。

線形計算からの変更点：

- 計算タイプを非線形に、`calc_type="nonlinear",n_tht=1`
- 複数モード扱えるように解像度変更 `nxw = 64, nyw = 32, nx = 42, global_ny=21,global_nz=64`

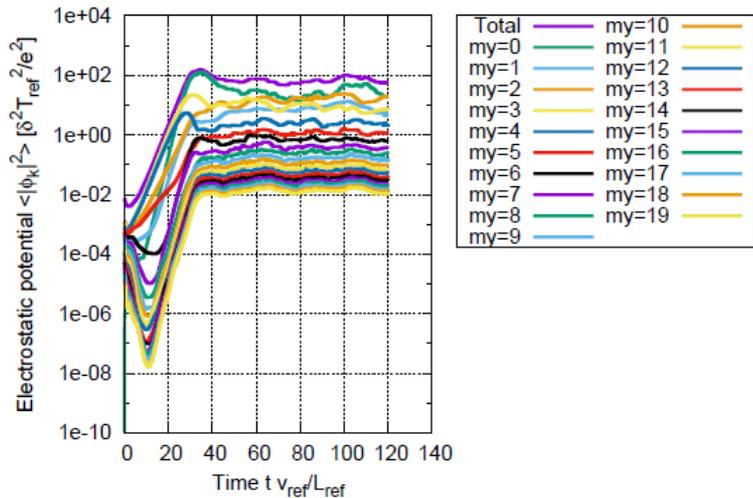
※実習時間では終わらないと思うので、今回は、計算結果サンプルをダウンロード。

```
cp -r /tmp/GKV_Sample_Data/nonlinear_test_LHD/ /data/InG/maeyama/gkv_training/  
cd /data/InG/maeyama/gkv_training/nonlinear_test_LHD/
```

fig_stdoutで結果を見てみましょう。

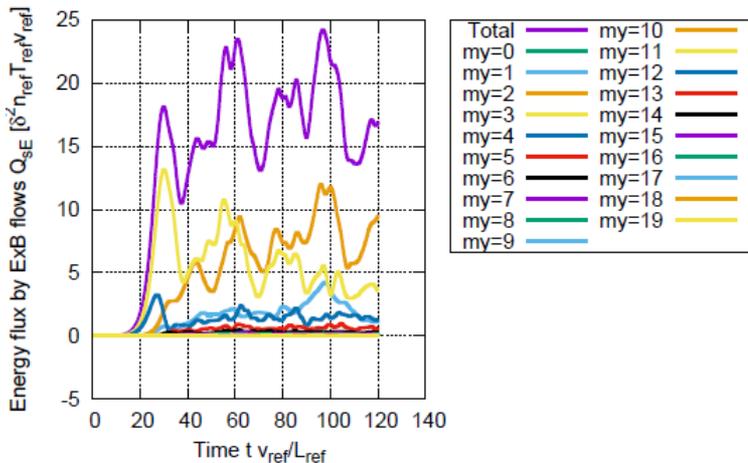
ポロイダルモード数 毎の揺動振幅 $\langle |\tilde{\phi}|^2 \rangle$ の時間発展

$ky=0(my=0)$ の帯
状流が卓越。

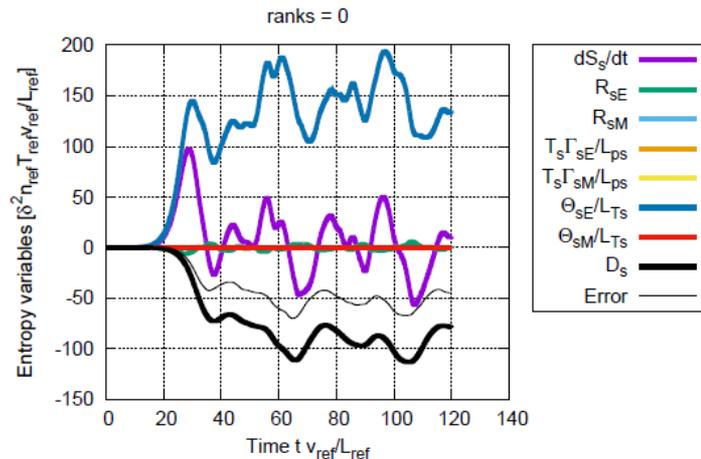


ポロイダルモード 数毎のイオン熱輸 送フラックス Q_E の 時間発展

$ky=0.2(my=2)$ の
モードが主に輸
送を作る。



エントロピーバランスの評価



駆動 (Θ/L_T) と散逸 (D) がつり合
い定常状態 $(dS/dt \sim 0)$ に至る。
低解像度のため若干の誤差
(Error)あり。

まとめ

GKVの利用方法をハンズオン形式で説明した。

要約

GKVの物理モデル・数値モデル
を踏まえた上で、

実験→GKVパラメータ換算

MHD平衡データの加工

の準備をしてから、

src/gkvp_f0.53_header.f90

run/gkvp_f0.53_namelist

run/sub.q

run/shoot

解像度、MPIの設定

物理・数値パラメータの設定

MPI・OpenMPの設定

平衡データ・出力ディレクトリの設定

の後にコンパイル、実行。

hst/のアスキー標準出力を一括でPDF化するためのスクリプト fig_stdout

phiなどのバイナリデータを解析するためのポスト処理プログラム diag

などを利用して、結果を解析する。

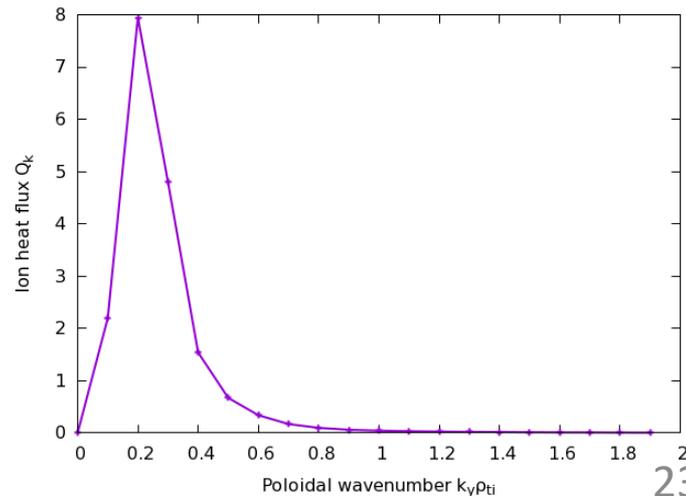
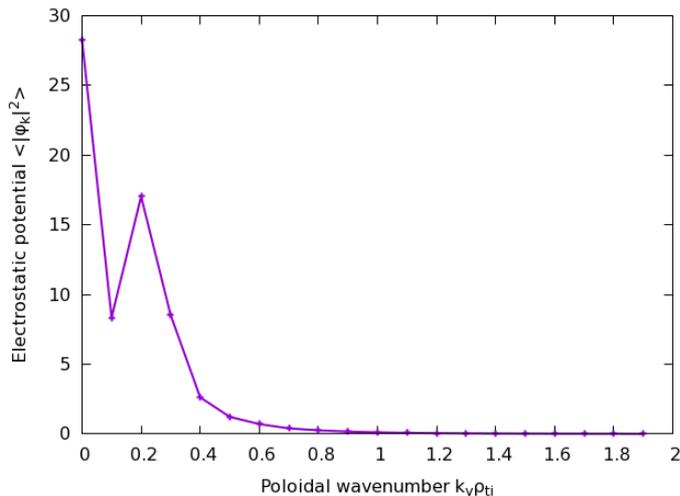
発展課題

余力がある人は、

- どんな出力データがあるか、Appendix Aを確認しておきましょう。
- イオンの熱輸送フラックスの時間発展もプロットしてみましょう。
- イオン温度勾配を変えて、線形成長率の変化を調べてみましょう。
- 磁力線方向ボックスサイズを変えてみましょう。解像度も変わることにご注意。
- MPIやOpenMPの並列数を変えて、処理時間のスケーラビリティを確認してみましょう。
- 非線形シミュレーションにおいて、準定常状態で時間平均した静電ポテンシャル揺動の k_y 波数スペクトルを作ってみましょう。

(左) 静電ポテンシャル揺動と(右) イオン熱輸送フラックスのポロイダル方向波数スペクトル

($t=60-120$ で平均)

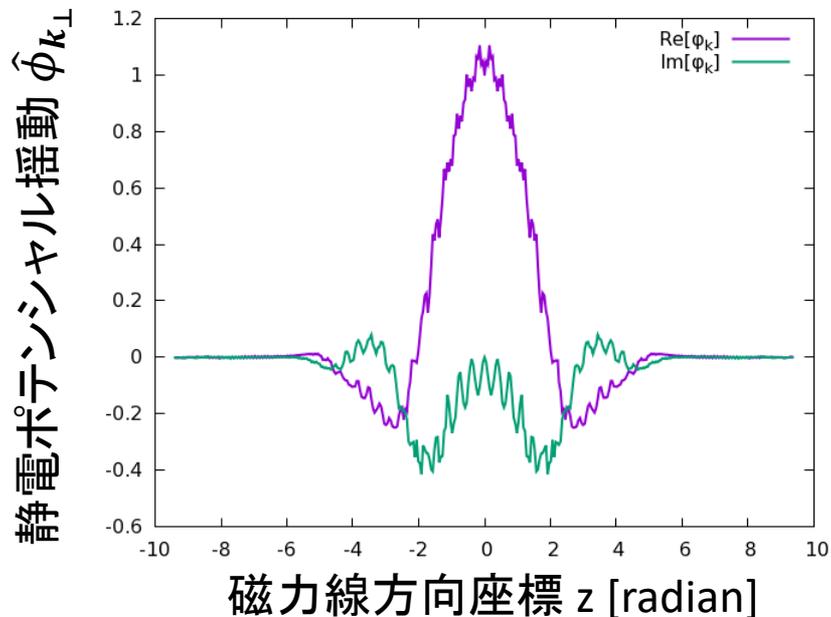


発展課題

- phi/などのバイナリデータを解析するためのポスト処理プログラム diag を利用して、線形モードの磁力線方向z分布や、静電ポテンシャルの磁力線垂直xy平面分布を書き出してみましょう。(参照: 第2回講習会資料 <http://www.p.phys.nagoya-u.ac.jp/gkv/document.html> > gkv_training_diag_171215.pdf)

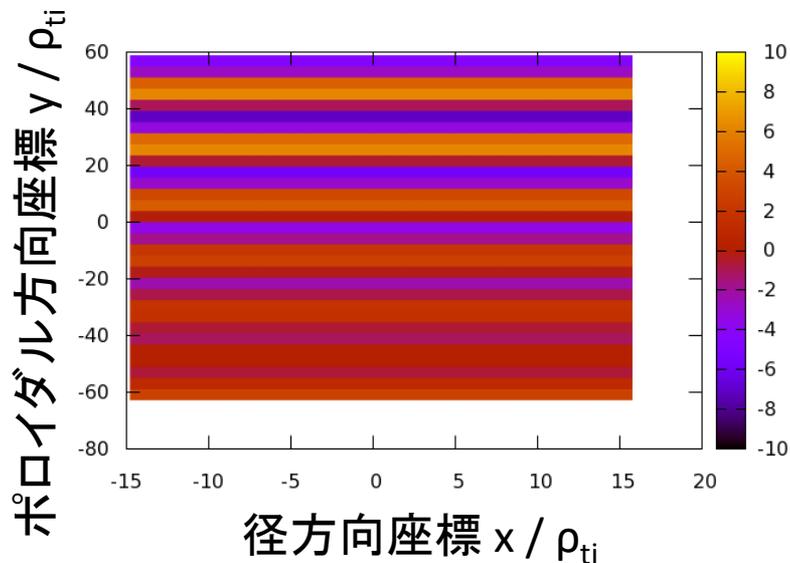
静電ポテンシャル揺動のz方向分布 $\tilde{\phi}_k(z)$

($k_x=0, k_y=0.3$ の最大成長モード)



静電ポテンシャル揺動のx,y断面分布 $\tilde{\phi}(x, y)$

($z=0 \Leftrightarrow \theta = 0$ の悪い曲率領域での断面)



Appendix A. GKVの出力データ一覧

cnt/*cnt*

fxv/*fxv*

phi/*phi*, *Al*, *mom*, *trn*, (非線形の場合のみ *tri*)

hst/*bln*, *ges*, *gem*, *qes*, *qem*, *wes*, *wem*,

eng, *men*, *dte*, *mtr*, (線形の場合のみ *frq*, *dsp*)

log/*log*

cnt/gkvp_f0.53.(MPIランク6桁).cnt.(ラン数3桁)

- ファイル形式: バイナリ
- 出力間隔: ランの終了時
- 出力を行うMPIランク: すべて
- 総ファイル数: $nprocw * nprocz * nprocv * nprocm * nprocs$ * (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: ocnt
- 格納データ:
time, ff(-nx:nx,0:ny,-nz:nz-1,1:2*nv,0:nm)

ここで、

time: 時刻(倍精度実数)

ff: 揺動ジャイロ中心分布関数(倍精度複素数)

【説明】

揺動量は、磁気面座標 x , 磁力線ラベル座標 y , 磁力線方向座標 z において、 (x,y) 方向にフーリエ級数展開され、

$$\tilde{f}_s(x, y, z, v_{\parallel}, \mu) = \sum_{k_x} \sum_{k_y} \tilde{f}_{sk}(z, v_{\parallel}, \mu) e^{i(k_x x + k_y y)}$$

*.cnt.*には、

$$\tilde{f}_{sk} = \frac{\rho_{ref} n_s}{L_{ref} v_{ts}^3} \bar{f}_{sk}$$

として規格化された分布関数 $\bar{f}_{sk}(z, v_{\parallel}, \mu)$ が格納されている。

fxv/gkvp_f0.53.(MPIランク6桁).(粒子種1桁).fxv.(ラン数3桁)

- ファイル形式: バイナリ
- 出力間隔: dtout_fxv
- 出力を行うMPIランク: すべて
- 総ファイル数: nprocw*nprocz*nprocv*nprocm*nprocs * (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: ofxv
- 格納データ:
time, ff(-nx:nx,0:ny,1:2*nv,0:nm)

ここで、

time: 時刻(倍精度実数)

ff: 揺動ジャイロ中心分布関数(倍精度複素数) at $iz = -nz$ (z方向MPIランクrankzに依存して、書き出す磁力線方向位置は異なる。)

【説明】

*.cnt.*の項を参照。

phi/gkvp_f0.53.(MPIランク6桁).0.phi.(ラン数3桁)

- ファイル形式: バイナリ
- 出力間隔: dtout_ptn
- 出力を行うMPIランク: ranks == 0 .and. vel_rank == 0
- 総ファイル数: nprocw*nprocz * (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: ophi
- 格納データ:
time, phi(-nx:nx,0:ny,-nz:nz-1)

ここで、

time: 時刻(倍精度実数)

phi: 揺動静電ポテンシャル(倍精度複素数)

【説明】

揺動量は、磁気面座標 x , 磁力線ラベル座標 y , 磁力線方向座標 z において、 (x,y) 方向にフーリエ級数展開され、

$$\tilde{\phi}(x, y, z) = \sum_{k_x} \sum_{k_y} \tilde{\phi}_k(z) e^{i(k_x x + k_y y)}$$

*.phi.*には、

$$\tilde{\phi}_k = \frac{\rho_{ref} T_{ref}}{L_{ref} e_{ref}} \bar{\phi}_k$$

として規格化された静電ポテンシャル $\bar{\phi}_k(z)$ が格納されている。

phi/gkvp_f0.53.(MPIランク6桁).0.AI.(ラン数3桁)

- ファイル形式: バイナリ
- 出力間隔: dtout_ptn
- 出力を行うMPIランク: ranks == 0 .and. vel_rank == 0
- 総ファイル数: nprocw*nprocz * (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: oAI
- 格納データ:
time, AI(-nx:nx,0:ny,-nz:nz-1)

ここで、

time: 時刻(倍精度実数)

AI: 揺動ベクトルポテンシャル(倍精度複素数)

【説明】

揺動量は、磁気面座標 x , 磁力線ラベル座標 y , 磁力線方向座標 z において、 (x,y) 方向にフーリエ級数展開され、

$$\tilde{A}_{\parallel}(x, y, z) = \sum_{k_x} \sum_{k_y} \tilde{A}_{\parallel k}(z) e^{i(k_x x + k_y y)}$$

*.AI.*には、

$$\tilde{A}_{\parallel k} = \frac{\rho_{ref}}{L_{ref}} \rho_{ref} B_{ref} \bar{A}_{\parallel k}$$

として規格化された静電ポテンシャル $\bar{A}_{\parallel k}(z)$ が格納されている。

phi/gkvp_f0.53.(MPIランク6桁).(粒子種1桁).mom.(ラン数3桁)

- ファイル形式: バイナリ
- 出力間隔: dtout_ptn
- 出力を行うMPIランク: vel_rank == 0
- 総ファイル数: nprocw*nprocz*nprocs * (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: omom
- 格納データ:
time, mom(-nx:nx,0:ny,-nz:nz-1,0:nmom-1)

ここで、

time: 時刻(倍精度実数)

mom: 揺動流体モーメント(倍精度複素数)。現状、nmom=6として以下の6つの流体量を順に出力。

$$\tilde{n}_{sk} = \int dv^3 J_{0sk} \tilde{f}_{sk}, \quad \tilde{u}_{\parallel sk} = \int dv^3 v_{\parallel} J_{0sk} \tilde{f}_{sk}, \quad \tilde{p}_{\parallel sk} = \int dv^3 \frac{v_{\parallel}^2}{2} J_{0sk} \tilde{f}_{sk},$$

$$\tilde{p}_{\perp sk} = \int dv^3 \mu B J_{0sk} \tilde{f}_{sk}, \quad \tilde{q}_{\parallel\parallel sk} = \int dv^3 v_{\parallel} \frac{v_{\parallel}^2}{2} J_{0sk} \tilde{f}_{sk}, \quad \tilde{q}_{\perp\perp sk} = \int dv^3 v_{\parallel} \mu B J_{0sk} \tilde{f}_{sk}$$

【説明】

規格化は

$$\tilde{n}_{sk} = \frac{\rho_{ref}}{L_{ref}} n_{ref} \bar{n}_{sk}, \quad \tilde{u}_{\parallel sk} = \frac{\rho_{ref}}{L_{ref}} n_{ref} v_{ref} \bar{u}_{\parallel sk}, \quad \tilde{p}_{\parallel sk} = \frac{\rho_{ref}}{L_{ref}} n_{ref} T_{ref} \bar{p}_{\parallel sk},$$

$$\tilde{p}_{\perp sk} = \frac{\rho_{ref}}{L_{ref}} n_{ref} T_{ref} \bar{p}_{\perp sk}, \quad \tilde{q}_{\parallel\parallel sk} = \frac{\rho_{ref}}{L_{ref}} n_{ref} T_{ref} v_{ref} \bar{q}_{\parallel\parallel sk}, \quad \tilde{q}_{\perp\perp sk} = \frac{\rho_{ref}}{L_{ref}} n_{ref} T_{ref} v_{ref} \bar{q}_{\perp\perp sk}$$

phi/gkvp_f0.53.(MPIランク6桁).(粒子種1桁).trn.(ラン数3桁)

- ファイル形式: バイナリ
- 出力間隔: dtout_eng
- 出力を行うMPIランク: zsp_rank == 0 .and. vel_rank == 0
- 総ファイル数: nprocw*nprocs * (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: otrn
- 格納データ:

time, $S_{sk}, W_{Ek}, W_{Mk}, R_{SEk}, R_{SMk}, I_{SEk}, I_{SMk}, D_{sk}, \Gamma_{SEk}, \Gamma_{SMk}, Q_{SEk}, Q_{SMk}$

ここで、

time: 時刻(倍精度実数)

他はすべてサイズ(-nx:nx, 0:ny)の倍精度実数配列で、左から順に、ジャイロ中心揺動エントロピー、静電揺動エネルギー(イオン分極項含む)、磁場揺動エネルギー、波粒子相互作用($W_E \rightarrow S_s$)、波粒子相互作用($W_M \rightarrow S_s$)、ExB流による非線形エントロピー伝達、磁場揺動による非線形エントロピー伝達、衝突散逸、ExB流による粒子輸送フラックス、磁場揺動による粒子輸送フラックス、ExB流によるエネルギー輸送フラックス、磁場揺動によるエネルギー輸送フラックス

【説明】

補足1. エントロピーバランス方程式を参照。また、規格化は以下とする。

$$\begin{aligned} S_{sk} &= \delta_{ref}^2 n_{ref} T_{ref} \bar{S}_{sk}, & W_{Ek} &= \delta_{ref}^2 n_{ref} T_{ref} \bar{W}_{Ek}, & W_{Mk} &= \delta_{ref}^2 n_{ref} T_{ref} \bar{W}_{Mk}, \\ R_{sk} &= \delta_{ref}^2 \frac{v_{ref}}{L_{ref}} n_{ref} T_{ref} \bar{R}_{sk}, & I_{sk} &= \delta_{ref}^2 \frac{v_{ref}}{L_{ref}} n_{ref} T_{ref} \bar{I}_{sk}, & D_{sk} &= \delta_{ref}^2 \frac{v_{ref}}{L_{ref}} n_{ref} T_{ref} \bar{D}_{sk}, \\ \Gamma_{sk} &= \delta_{ref}^2 n_{ref} v_{ref} \bar{\Gamma}_{sk}, & Q_{sk} &= \delta_{ref}^2 n_{ref} T_{ref} v_{ref} \bar{Q}_{sk} \end{aligned}$$

(シア磁場中の磁力線平行方向移流項 E_{sk} については現状評価していない。Note: $\sum_{k_x} \sum_{k_y} I_{sk} = 0, \sum_{k_x} E_{sk} = 0$) 32

phi/gkvp_f0.53.s(粒子種1桁)mx(mxt4桁)my(myt4桁).tri.(ラン数3桁)

- ファイル形式: バイナリ ※mxt,mytはnamelistで指定したもの。
- 出力間隔: dtout_ptn (calc_type=="nonlinear" .and. num_triad_diag>0)
- 出力を行うMPIランク: rank == 0
- 総ファイル数: nprocs * num_triad_diag * (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: otri
- 格納データ:

time, $J_{SEk}^{p,q}$, $J_{SEp}^{q,k}$, $J_{SEq}^{k,p}$, $J_{SMk}^{p,q}$, $J_{SMp}^{q,k}$, $J_{SMq}^{k,p}$

ここで、

time: 時刻(倍精度実数)

他はすべてサイズ(-nx:nx,-global_ny:global_ny)の倍精度実数配列で、モードk=(mxt,myt)に固定して、p=(px,py)の関数として表したもの(qは-k-pで求まる)。

先の3つは、ExB流の非線形性によるp,qからkへのエントロピー伝達とそのcyclicな入れ替え、後の3つは、磁場揺動の非線形性によるp,qからkへのエントロピー伝達とそのcyclicな入れ替え。

【説明】

補足2. 三波結合伝達関数を参照。

規格化は、*.trn.*の非線形エントロピー伝達と同様に、 $J_{sk}^{p,q} = \delta_{ref}^2 \frac{v_{ref}}{L_{ref}} n_{ref} T_{ref} J_{sk}^{p,q}$,

hst/gkvp_f0.53.bltn.(粒子種1桁).(ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: dtout_eng
- 出力を行うMPIランク: rank == 0
- 総ファイル数: nprocs * (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: obltn
- 格納データ:

$$\text{time}, S_s, W_E, W_M, R_{SE}, R_{SM}, I_{SE}, I_{SM}, D_s, \frac{T_s \Gamma_{SE}}{L_{ps}}, \frac{T_s \Gamma_{SM}}{L_{ps}}, \frac{\Theta_{SE}}{L_{Ts}}, \frac{\Theta_{SM}}{L_{Ts}}$$

ここで、

time: 時刻(実数)

S_s から D_s まではサイズ(2)の実数配列(配列要素1,2はそれぞれ $ky \neq 0$ 成分と $ky = 0$ 成分)で、左から順に、ジャイロ中心揺動エントロピー、静電揺動エネルギー(イオン分極項含む)、磁場揺動エネルギー、波粒子相互作用($W_E \rightarrow S_s$)、波粒子相互作用($W_M \rightarrow S_s$)、ExB流による非線形エントロピー伝達、磁場揺動による非線形エントロピー伝達、衝突散逸。残り4つは実数で、エントロピーバランス方程式における、粒子輸送項(ExB流、磁場揺動)、熱輸送項(ExB流、磁場揺動)

【説明】

*.trn.*の項を参照。

hst/gkvp_f0.53.ges.(粒子種1桁).(ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: dtout_eng
- 出力を行うMPIランク: rank == 0
- 総ファイル数: nprocs * (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: oges
- 格納データ:
time, Γ_{SE} , Γ_{SEk_y} (0: global_ny)

ここで、

time: 時刻(実数)

Γ_{SE} : ExB流による粒子輸送フラックス(実数)

Γ_{SEk_y} : ExB流による粒子輸送フラックスのy方向波数スペクトル(実数配列)

【説明】

ExB流による粒子輸送フラックスは以下で与えられる。

$$\Gamma_{SEk_y} = \sum_{k_x} \Gamma_{SEk}, \quad \Gamma_{SEk} = \text{Re} \left[\left\langle -\frac{ik_y \phi_k}{c_b} n_{sk}^* \right\rangle \right]$$

規格化は

$$\Gamma_{SEk_y} = \delta_{ref}^2 n_{ref} v_{ref} \bar{\Gamma}_{SEk_y}$$

hst/gkvp_f0.53.gem.(粒子種1桁).(ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: dtout_eng
- 出力を行うMPIランク: rank == 0
- 総ファイル数: nprocs * (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: ogem
- 格納データ:
time, Γ_{SM} , Γ_{SMk_y} (0:global_ny)

ここで、

time: 時刻(実数)

Γ_{SM} : 磁場揺動による粒子輸送フラックス(実数)

Γ_{SMk_y} : 磁場揺動による粒子輸送フラックスのy方向波数スペクトル(実数配列)

【説明】

磁場揺動による粒子輸送フラックスは以下で与えられる。

$$\Gamma_{SMk_y} = \sum_{k_x} \Gamma_{SMk}, \quad \Gamma_{SMk} = \text{Re} \left[\left\langle \frac{ik_y A_{\parallel k}}{c_b} u_{\parallel sk}^* \right\rangle \right]$$

規格化は

$$\Gamma_{SMk_y} = \delta_{ref}^2 n_{ref} v_{ref} \bar{\Gamma}_{SMk_y}$$

hst/gkvp_f0.53.qes.(粒子種1桁).(ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: dtout_eng
- 出力を行うMPIランク: rank == 0
- 総ファイル数: nprocs * (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: oqes
- 格納データ:
time, Q_{SE} , Q_{SEk_y} (0: global_ny)

ここで、

time: 時刻(実数)

Q_{SE} : ExB流によるエネルギー輸送フラックス(実数)

Q_{SEk_y} : ExB流によるエネルギー輸送フラックスのy方向波数スペクトル(実数配列)

【説明】

ExB流によるエネルギー輸送フラックスは以下で与えられる。

$$Q_{SEk_y} = \sum_{k_x} Q_{SEk}, \quad Q_{SEk} = \text{Re} \left[\left\langle -\frac{ik_y \phi_k}{c_b} p_{sk}^* \right\rangle \right]$$

規格化は

$$Q_{SEk_y} = \delta_{ref}^2 n_{ref} v_{ref} \bar{Q}_{SEk_y}$$

hst/gkvp_f0.53.qem.(粒子種1桁).(ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: dtout_eng
- 出力を行うMPIランク: rank == 0
- 総ファイル数: nprocs * (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: oqem
- 格納データ:
time, Q_{sM} , Q_{sMk_y} (0: global_ny)

ここで、

time: 時刻(実数)

Q_{sM} : 磁場揺動によるエネルギー輸送フラックス(実数)

Q_{sMk_y} : 磁場揺動によるエネルギー輸送フラックスのy方向波数スペクトル(実数配列)

【説明】

磁場揺動によるエネルギー輸送フラックスは以下で与えられる。

$$Q_{sMk_y} = \sum_{k_x} Q_{sMk}, \quad Q_{sMk} = \text{Re} \left[\left\langle \frac{ik_y A_{\parallel k}}{c_b} q_{\parallel sk}^* \right\rangle \right]$$

規格化は

$$Q_{sMk_y} = \delta_{ref}^2 n_{ref} v_{ref} \bar{Q}_{sMk_y}$$

hst/gkvp_f0.53.wes.(ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: dtout_eng
- 出力を行うMPIランク: rankg == 0
- 総ファイル数: (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: owes
- 格納データ:
time, W_E , W_{Ek_y} (0:global_ny)

ここで、

time: 時刻(実数)

W_E : 静電揺動エネルギー(実数)

W_{Ek_y} : 静電揺動エネルギーのy方向波数スペクトル(実数配列)

【説明】

静電揺動エネルギー(分極項含む)は以下で与えられる

$$W_{Ek_y} = \sum_{k_x} W_{Ek}, \quad W_{Ek} = \left\langle \left[\varepsilon_0 k_{\perp}^2 + \sum_s \frac{e_s^2 n_s}{T_s} (1 - \Gamma_{0sk}) \right] \frac{|\phi_{\mathbf{k}}|^2}{2} \right\rangle$$

規格化は

$$W_{Ek_y} = \delta_{ref}^2 n_{ref} T_{ref} \bar{W}_{Ek_y}$$

hst/gkvp_f0.53.wem. (ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: dtout_eng
- 出力を行うMPIランク: rankg == 0
- 総ファイル数: (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: owem
- 格納データ:
time, W_M , W_{Mk_y} (0: global_ny)

ここで、

time: 時刻(実数)

W_M : 磁場揺動エネルギー(実数)

W_{Mk_y} : 磁場揺動エネルギーのy方向波数スペクトル(実数配列)

【説明】

磁場揺動エネルギーは以下で与えられる。

$$W_{Mk_y} = \sum_{k_x} W_{Mk}, \quad W_{Mk} = \left\langle \frac{k_{\perp}^2 |A_{\parallel k}|^2}{\mu_0 2} \right\rangle$$

規格化は

$$W_{Mk_y} = \delta_{ref}^2 n_{ref} T_{ref} \bar{W}_{Mk_y}$$

hst/gkvp_f0.53.eng.(ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: dtout_eng
- 出力を行うMPIランク: rankg == 0
- 総ファイル数: (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: oeng
- 格納データ:

$$\text{time}, \sum_{k_x, k_y} \langle |\tilde{\phi}_k|^2 \rangle, \sum_{k_x} \langle |\tilde{\phi}_k|^2 \rangle (0: \text{global_ny})$$

ここで、

time: 時刻(実数)

$\sum_{k_x, k_y} \langle |\tilde{\phi}_k|^2 \rangle$: 揺動静電ポテンシャル二乗振幅(実数)

$\sum_{k_x} \langle |\tilde{\phi}_k|^2 \rangle$: 揺動静電ポテンシャル二乗振幅のy方向波数スペクトル(実数配列)

【説明】

規格化は、 $\tilde{\phi}_k = \frac{\rho_{ref} T_{ref}}{L_{ref} e_{ref}} \bar{\phi}_k$

hst/gkvp_f0.53.men.(ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: dtout_eng
- 出力を行うMPIランク: rankg == 0
- 総ファイル数: (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: omen
- 格納データ:

time, $\sum_{k_x, k_y} \langle |\tilde{A}_{\parallel k}|^2 \rangle$, $\sum_{k_x} \langle |\tilde{A}_{\parallel k}|^2 \rangle$ (0: global_ny)

ここで、

time: 時刻(実数)

$\sum_{k_x, k_y} \langle |\tilde{A}_{\parallel k}|^2 \rangle$: 揺動ベクトルポテンシャル二乗振幅(実数)

$\sum_{k_x} \langle |\tilde{A}_{\parallel k}|^2 \rangle$: 揺動ベクトルポテンシャル二乗振幅のy方向波数スペクトル(実数配列)

【説明】

規格化は、 $\tilde{A}_{\parallel k} = \frac{\rho_{ref}}{L_{ref}} \rho_{ref} B_{ref} \bar{A}_{\parallel k}$

hst/gkvp_f0.53.dtc.(ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: dtout_eng
- 出力を行うMPIランク: rankg == 0
- 総ファイル数: (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: odtc
- 格納データ:
time, dt, dt_limit, dt_nl

ここで、

time: 時刻(実数)

dt: 時間刻み幅(実数)

dt_limit: 時間刻み幅の見積もり(実数)

dt_nl: 非線形移流速度から算出した数値安定な時間刻み幅の見積もり(実数)

【説明】

省略。

hst/gkvp_f0.53.mtr. (ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: ランの開始時
- 出力を行うMPIランク: rankg == 0
- 総ファイル数: (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: omtr
- 格納データ:

$$z, \theta(\text{または } \varphi), B, \frac{\partial B}{\partial x}, \frac{\partial B}{\partial y}, \frac{\partial B}{\partial z}, g^{xx}, g^{xy}, g^{xz}, g^{yy}, g^{yz}, g^{zz}, \sqrt{g}$$

ここで、データはすべて実数で、左から順に

磁力線方向座標、ポロイダル角(ただしequib_type==vmecの時はトロイダル角)、磁場強度、磁場強度の微分3つ、メトリックテンソルの要素6つ、Jacobian。

【説明】

省略。

hst/gkvp_f0.53.frq.(ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: dtout_eng (calc_type == linear .or. calc_type == lin_freq)
- 出力を行うMPIランク: rankg == 0
- 総ファイル数: (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: ofrq
- 格納データ:
time, omega(1:global_ny)

ここで、

time: 時刻(実数)

omega: 線形複素周波数(複素数)[=(実周波数, 成長率)]のy方向波数スペクトル

【説明】

$\tilde{\phi}_k(t) = \phi_0 e^{-i\omega t} = \phi_0 e^{-i\omega_r t} e^{\gamma t}$ の依存性を仮定して、

$$\omega = \omega_r + i\gamma = \frac{\ln \left[\frac{\tilde{\phi}_k(t + \Delta t)}{\tilde{\phi}_k(t)} \right]}{-i\Delta t}$$

により、線形複素周波数の時々刻々の見積もりを得る。

hst/gkvp_f0.53.dsp. (ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: ランの終了時 (calc_type == linear .or. calc_type == lin_freq)
- 出力を行うMPIランク: rankg == 0
- 総ファイル数: (総ラン数)
- GKVコード中の出力ユニット: odsp
- 格納データ:
ky, omega, diff, 1-ineq

ここで、

ky: y方向波数(実数)

omega: 線形複素周波数(複素数)[=(実周波数, 成長率)]

diff: 収束の相対誤差[omega(t)-omega(t-dt)]/omega(t) (複素数)

1-ineq: Schwartzの不等式で評価した収束誤差(実数)

【説明】

$\tilde{\phi}_k(t) = \phi_0 e^{-i\omega t} = \phi_0 e^{-i\omega_r t} e^{\gamma t}$ の依存性を仮定して、

$$\omega = \omega_r + i\gamma = \frac{\ln \left[\frac{\tilde{\phi}_k(t + \Delta t)}{\tilde{\phi}_k(t)} \right]}{-i\Delta t}$$

により、線形複素周波数の時々刻々の見積もりを得る。

ランの終了時にkx=0について、周波数・成長率のky依存性を出力する。まだ周波数・成長率が十分収束していなそうな場合はコメントとして書き出す。

log/gkvp_f0.53.(MPIランク6桁).(粒子種1桁).log.(ラン数3桁)

- ファイル形式: アスキー
- 出力間隔: 随時
- 出力を行うMPIランク: すべて
- 総ファイル数: $nprocw * nprocz * nprocv * nprocm * nprocs * (\text{総ラン数})$
- GKVコード中の出力ユニット: olog
- 格納データ:
 - シミュレーションに関するログ

【説明】

省略。

補足1. エントロピーバランス方程式

各粒子種、各モードについてのエントロピーバランスは以下で与えられる[Maeyama'14PoP]。

$$\frac{dS_{sk}}{dt} = \frac{T_s \Gamma_{sk}}{L_{ps}} + \frac{\Theta_{sk}}{L_{Ts}} + I_{sk} + R_{sk} + E_{sk} + D_{sk}, \quad \frac{dW_{Ek}}{dt} = -R_{sEk}, \quad \frac{dW_{Mk}}{dt} = -R_{sMk}$$

ここで、

$$S_{sk} = \left\langle \int dv^3 \frac{T_s |f_{sk}|^2}{2F_{sM}} \right\rangle, \quad W_{Ek} = \left\langle \left[\varepsilon_0 k_{\perp}^2 + \sum_s \frac{e_s^2 n_s}{T_s} (1 - \Gamma_{0sk}) \right] \frac{|\phi_k|^2}{2} \right\rangle, \quad W_{Mk} = \left\langle \frac{k_{\perp}^2 |A_{||k}|^2}{\mu_0 2} \right\rangle,$$

$$\Gamma_{sk} = \Gamma_{sEk} + \Gamma_{sMk} = \text{Re} \left[\left\langle -\frac{ik_y \phi_k}{c_b} n_{sk}^* + \frac{ik_y A_{||k}}{c_b} u_{||sk}^* \right\rangle \right], \quad \Theta_{sk} = Q_{sk} - \frac{5}{2} T_s \Gamma_{sk}$$

$$Q_{sk} = Q_{sEk} + Q_{sMk} = \text{Re} \left[\left\langle -\frac{ik_y \phi_k}{c_b} p_{sk}^* + \frac{ik_y A_{||k}}{c_b} q_{||sk}^* \right\rangle \right],$$

$$I_{sk} = I_{sEk} + I_{sMk} = \text{Re} \left[-\sum_{k'} \sum_{k''} \delta_{k'+k'',k} \left\langle \int dv^3 \frac{T_s g_{sk}^*}{F_{sM}} \left\{ \frac{J_{0sk'} (\phi_{k'} - v_{||} A_{||k'})}{c_b}, g_{sk''} \right\}_{\perp} \right\rangle \right],$$

$$R_{sk} = R_{sEk} + R_{sMk} = \text{Re} \left[\left\langle -\phi_k^* \frac{\partial e_s n_{sk}}{\partial t} - e_s u_{||sk}^* \frac{\partial A_{||k}}{\partial t} \right\rangle \right], \quad E_{sk} = \text{Re} \left[-\left\langle \int dv^3 v_{||} \nabla_{||} \frac{T_s |g_{sk}|^2}{2F_{sM}} \right\rangle \right],$$

$$D_{sk} = \text{Re} \left[\left\langle \int dv^3 \frac{T_s g_{sk}^*}{F_{sM}} C_{sk} \right\rangle \right], \quad g_{sk} = f_{sk} + \frac{e_s J_{0sk} \phi_k}{T_s} F_{sM}, \quad p_{sk} = p_{||sk} + p_{\perp sk}, \quad q_{||sk} = q_{|||sk} + q_{||\perp sk}$$

補足2. 三波結合伝達関数

補足1. エントロピーバランス方程式で説明した非線形エントロピー伝達 I_{sk} は三波結合伝達関数 $J_{sk}^{p,q}$ を用いて、

$$I_{sk} = \sum_p \sum_q J_{sk}^{p,q}$$

ここで、 $\chi_{sk} = J_{0sk}(\tilde{\phi}_k - v_{\parallel} \tilde{A}_{\parallel k})$, $g_{sk} = f_{sk} + \frac{e_s F_{sM}}{T_s} J_{0sk} \tilde{\phi}_k$ を用いて、

$$J_{sk}^{p,q} = J_{sEk}^{p,q} + J_{sMk}^{p,q} = \delta_{\mathbf{k}+\mathbf{p}+\mathbf{q},\mathbf{0}} \frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{p} \times \mathbf{q}}{2B} \operatorname{Re} \left[\left\langle \int dv^3 (\chi_{sp} g_{sq} - \chi_{sq} g_{sp}) \frac{T_s g_{sk}}{F_{sM}} \right\rangle \right]$$

補足3. GKVの積分

磁気面平均

$$\langle \tilde{\phi}(x, y, z) \rangle = \sum_{k_x} \langle \tilde{\phi}_{k_x, k_y=0}(z) \rangle e^{ik_x x}, \quad \langle \tilde{\phi}_{k_x, k_y=0}(z) \rangle = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} dz \sqrt{g} \tilde{\phi}_{k_x, k_y=0}(z)}{\int_{-\pi}^{\pi} dz \sqrt{g}}$$

体積平均

$$\int dx^3 |\tilde{\phi}(x, y, z)|^2 = \sum_{k_x} \sum_{k_y} \langle |\tilde{\phi}_{\mathbf{k}}(z)|^2 \rangle$$

速度空間積分

$$\int dv^3 \tilde{f}_{\mathbf{k}}(z, v_{\parallel}, \mu) = \int_{-v_{max}}^{v_{max}} dv_{\parallel} \int_0^{v_{max}} dv_{\perp} 2\pi v_{\perp} \tilde{f}_{\mathbf{k}}(z, v_{\parallel}, \mu)$$