

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 —シミュレーション実行編—

前山伸也

名大理

GKV講習会
2017年12月15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_171215/ をホームディレクトリにコピー。

```
cp -r /tmp/GKV_Training_171215/ ./
```

ソースコードを展開。

```
cd GKV_Training_171215/  
tar xzvf linear_test.tar.gz
```

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。

GKVのコード構造(バージョンgkvp_f0.48)

gkvp_f0.48/

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_f0.48_header.f90 解像度、MPIの設定モジュール

gkvp_f0.48_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

v29diag.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_f0.48_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

円形トカマクモデル磁場の下で、微視的不安定性の線形解析をする。

1. 物理パラメータを `run/gkvp_f0.48_namelist` に入力する。
2. `src/gkvp_f0.48_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. 物理パラメータをnamelistに入力する。

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

1. 物理パラメータをnamelistに入力する。

run/gkvp_f0.48_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="up5",

art_diff=0.d0,

num_triad_diag=0, &end

&triad mxt = 0, myt = 0/

&equib **equib_type = "analytic"**, &end 平衡磁場モデル analytic / s-alpha / vmec / eqdsk

...

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

× **tend = 200.d0**,

dtout_fxv = 10.d0,

dtout_ptn = 0.1d0,

dtout_eng = 0.1d0,

dtout_dtc = 0.1d0, &end

計算実行の実時間[秒]

シミュレーション上の上限時間

データ出力の時間間隔1

データ出力の時間間隔2

データ出力の時間間隔3

自動時間刻み幅の調整間隔

...

1. 物理パラメータをnamelistに入力する。

```
&physp R0_Ln = 2.22d0,  
       R0_Lt = 6.92d0,  
       nu = 1.d0,  
       Anum = 1.d0,  
       Znum = 1.d0,  
       fcs = 1.d0,  
       sgn = 1.d0,  
       tau = 1.d0,
```

密度勾配パラメータ R_0/L_{ns}
温度勾配パラメータ R_0/L_{Ts}

質量 m_s/m_{ref}
価数の絶対値 $|e_s|/e$
電荷密度 $|e_s|n_s$
電荷の符号 $e_s/|e_s|$
温度 T_s/T_{ref}

run/gkvp_f0.48_namelist

...

```
&nperi n_tht = 3,  
       kymin = 0.05d0,  
       m_j = 1,  
       del_c = 0.d0, &end
```

磁力線方向ボックスサイズ (ポロイダル角で $\pm n_tht * \pi$)
磁力線ラベル方向ボックスサイズ $ly = \pi / kymin$
半径径方向ボックスサイズ $lx = \pi / kxmin$

$kxmin = |2 * \pi * s_hat * kymin / m_j|$

```
&confp eps_r = 0.18d0, 逆アスペクト比  $r/R_0$   
       eps_rnew = 1.d0,  
       q_0 = 1.4d0, 安全係数  $q$   
       s_hat = 0.8d0, 磁気シア  $s$ 
```

...

2.src/gkvp_f0.48_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_f0.48_header.f90

integer, parameter :: **nxw = 2, nyw = 20**

integer, parameter :: **nx = 0, global_ny = 12** ! 2/3 de-aliasing rule

integer, parameter :: **global_nz = 48, global_nv = 24, global_nm = 15**

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 = 2, nprocz = 4, nprocv = 4, nprocm = 2, nprocs = 1**

2.src/gkvp_f0.48_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 17293
```

```
## 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にディレクトリの設定をする。

run/shoot

```
#### Environment setting
```

```
set DIR=/data/ing/maeyama/gkv_training/linear_test 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_f0.48_namelist
```

```
set SC=pjsub
```

```
set JS=sub.q
```

```
## For VMEC, set VMCDIR including metric_boozer.bin.dat
```

```
#set VMCDIR=./input_vmec
```

```
## For IGS, set IGSDIR including METRIC_{axi,boz,ham}.OUT
```

```
#set IGSDIR=./input_eqdsk
```

VMECやIGSで生成した平衡データのあるディレクトリ

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 run/  
module purge  
module load tcsuite-fx fftw-fx  
make clean  
make
```

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/`)
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_f0.48_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

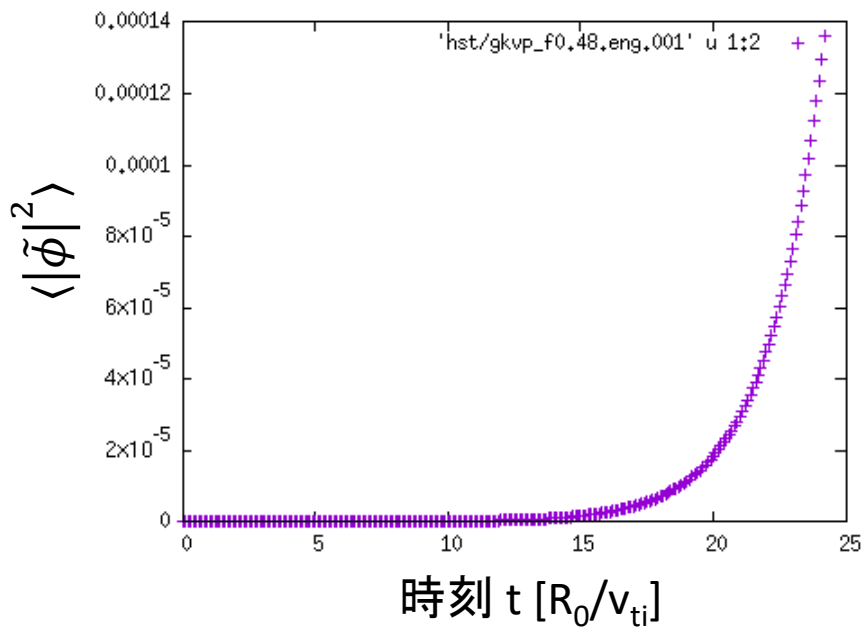
※diagの使い方に関しては後半の「ポスト処理編」にて。

6-a). hst/のアスキー標準出力をプロットする。

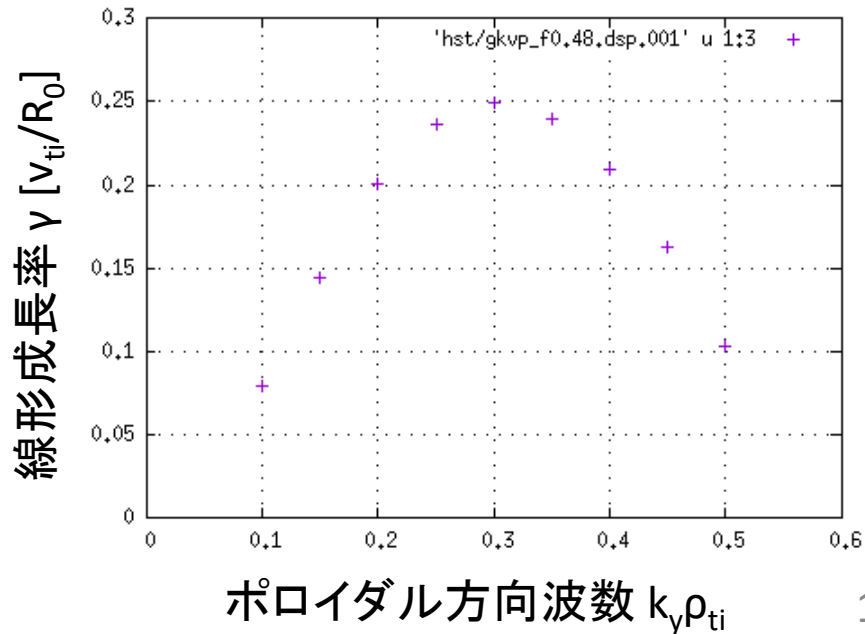
例として、`cd /data/Inq/maeyama/gkv_training/linear_test/`
`gnuplot`

```
plot 'hst/gkvp_f0.48.eng.001' u 1:2  
plot 'hst/gkvp_f0.48.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/ln/maeyama/gkv_training/linear_test/](#))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
```

```
./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。)

コーヒーブレイク

実習前半、ーシミュレーション実行編ーはここまで。

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。

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_f0.48.(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: $nprocw * nprocz * nprocv * nprocm * nprocs * (\text{総ラン数})$
- 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_f0.48.(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_f0.48.(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、

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

*.phi.*には、

$$\tilde{\phi}_{\mathbf{k}} = \frac{\rho_{ref} T_{ref}}{L_{ref} e_{ref}} \bar{\phi}_{\mathbf{k}}$$

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

phi/gkvp_f0.48.(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_f0.48.(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_f0.48.(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} , Γ_{SEk} , Γ_{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: $\sum_{k_x} \sum_{k_y} I_{sk} = 0$, $\sum_{k_x} E_{sk} = 0$) 27

phi/gkvp_f0.48.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:

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

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、 $J_{sk}^{p,q} = \delta_{ref}^2 \frac{v_{ref}}{L_{ref}} n_{ref} T_{ref} \bar{J}_{sk}^{p,q}$,

hst/gkvp_f0.48.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_f0.48.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_f0.48.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_f0.48.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_f0.48.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_f0.48.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_f0.48.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_f0.48.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_f0.48.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:

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

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_f0.48.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_f0.48.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lequib_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_f0.48.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_f0.48.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_f0.48.(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、

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

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

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

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

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

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

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

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