

GKVにおける磁場データ読み込み およびパラメータ設定について

沼波政倫 (NIFS)

開発チーム： 渡邊智彦、前山伸也 (名大)、石澤明宏 (京大)
仲田資季、洲鎌英雄 (NIFS)、

Contents

- ▶ 実験データ → 計算実行の流れ
- ▶ GKVのパラメータ設定: gkvp_f0.55_namelist
- ▶ Appendix
 - ▶ 磁気座標構成ツールの使用方法

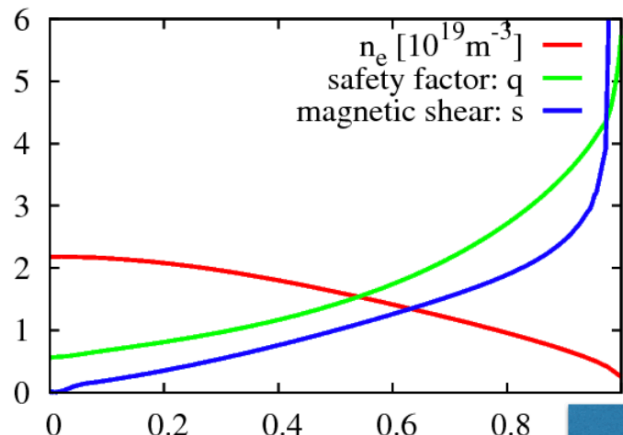
実験データ → 計算実行の流れ

- ▶ 実験データを選定(shot# & timing)し、平衡データや各種分布情報を実験研究者やデータベースから取得する。
 - ▶ トカマク実平衡に対しては、G-EQDSK形式の平衡データを取得
 - ▶ ステラレータ実平衡に対しては、VMEC形式の平衡データを取得
 - ▶ 分布データ形式は機関ごとで異なるので注意(e.g., 点列データ、fitting係数)
- ▶ インターフェースコードIGS(トカマク)あるいはBZX(ステラレータ)を用いて、GKVのnamelistで指定する磁気座標データを作成。
 - ▶ IGS から METRIC_axi.dat あるいは BZX から metric_boozer.bin.dat
- ▶ 温度・密度・q分布などからGKVへインプットする局所パラメータを換算
 - ▶ 規格化や定義に注意して局所パラメータ値を計算(cf. LHD_Profiles_20190117.xlsx)。
- ▶ 計算設定(namelist, gkvp_f0.55_header.f90, job投入script)を行った後、実行および解析(diag)を行う。 <---
ハンズオン講習 (cf. 前山さんの資料)

実験データ → 計算実行の流れ

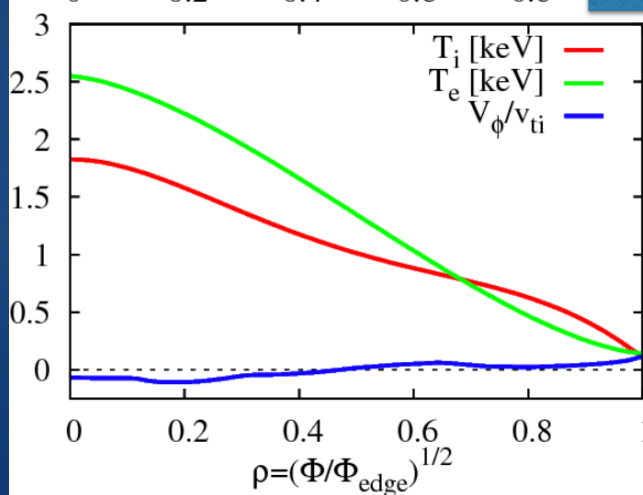
(実験)分布データ

フィッティング係数等の入力



	A	B	C	D	E	F	G
1	species	species ID	an0	an1	an2	an3	an4
2	e	0	1.5756	-1.9071	6.9594	-7.073	1
3	H	1	0.96895	-0.82024	2.9335	-2.5791	0.02
4	He	2	0.26377	-0.22327	0.79849	-0.70203	0.006
5	C	3	0.013187	-0.10676	0.40502	-0.51532	0.2

GKVの規格化・パラメータ定義に沿う限り、方法・様式は各ユーザーの使い易い形式を推奨。



LHDの標準fitting
関数:

$$f(\rho) = \sum_{n=0}^4 a_n \rho^{2n}$$

各磁気面における局所パラメータの生成

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	rho	ne	nH	nHe	nC	Te	Ti	d(ne)/drho	d(nH)/drho			
2	0.00	1.5756	0.96895	0.26377	0.013187	3.2461	4.0451	0	0			
3	0.01	1.57540936	0.968868005	0.263747681	0.013144361	3.245866012	4.044216782	-0.038114167	-0.016393068			
4	0.02	1.574838273	0.968622373	0.26368082	0.013091244	3.245184185	4.041568347	-0.076061435	-0.032715778			
5	0.03	1.573889242	0.968214158	0.263569703	0.0130391244	3.243994936	4.037158354	-0.113675416	-0.048897958			
6	0.04	1.572566427	0.967645115	0.263414809	0.013017219	3.242358954	4.030992895	-0.150790738	-0.064869809			
7	0.05	1.570875636	0.966917694	0.263216805	0.012922623	3.240257203	4.023080487	-0.187243554	-0.080562086			
8	0.06	1.568824304	0.966035034	0.262976544	0.012807889	3.237690916	4.013432058	-0.222872049	-0.095906288			
9	0.07	1.566421474	0.965000954	0.262695066	0.01267354	3.234661586	4.002060935	-0.257516944	-0.110834844			
10	0.08	1.563677765	0.963819944	0.262373594	0.012520191	3.231170969	3.98898282	-0.291021994	-0.125281295			
11	0.09	1.560605343	0.962497152	0.262013529	0.012348544	3.227221068	3.974215773	-0.323234489	-0.13918048			
12	0.10	1.55721788	0.961038371	0.261616447	0.012159389	3.22281413	3.957780181	-0.35400575	-0.152468726			
13	0.11	1.553530513	0.959450021	0.261184096	0.011953595	3.217952637	3.939698733	-0.383191615	-0.165084026			
14	0.12	1.549559797	0.957739135	0.260718391	0.011732111	3.212639292	3.919996382	-0.410652929	-0.176966233			
15	0.13	1.545323649	0.955913334	0.260221406	0.011495963	3.206877011	3.898700313	-0.436256021	-0.188057236			
16	0.14	1.540841297	0.953980814	0.259695371	0.011246247	3.200668911	3.875839902	-0.459873183	-0.198301151			
17	0.15	1.53613321	0.951950313	0.259142666	0.010984125	3.194018292	3.851446671	-0.481383133	-0.207644505			
18	0.16	1.53122104	0.949831095	0.258565811	0.010710822	3.186928629	3.825554242	-0.500671482	-0.21603642			
19	0.17	1.526127544	0.947632917	0.257967463	0.010427619	3.179403549	3.798198287	-0.517631186	-0.223428796			
20	0.18	1.52087651	0.945366002	0.257350405	0.010135852	3.171446823	3.769416474	-0.532162992	-0.229776498			
21	0.19	1.515492681	0.94304101	0.256717537	0.0098369	3.163062338	3.739248412	-0.54417588	-0.235037541			
22	0.20	1.510001665	0.940669003	0.256071872	0.009532185	3.154254086	3.707735584	-0.553587489	-0.23917327			
23	0.21	1.504429848	0.938261413	0.25541652	0.009223162	3.145026143	3.674921291	-0.560324539	-0.242148548			
24	0.22	1.498804303	0.935830005	0.254754685	0.008911316	3.135382644	3.640850577	-0.56432324	-0.243931937			

サンプル: LHD_Profiles_20190117.xlsx

GKV実行の流れ

- ▶ GKV実行の手順 (※ PSでは「module load tcsuite-fx fftw-fx」を予め実行しライブラリを設定する)

```
cd gkvp_f0.55/run/
```

```
cp -r (BZXを計算した場所)/geom/metric_boozero.bin.dat ./input_vmec
```

```
vi ../src/gkvp_f0.53_header.f90 (grid数、分割数などを設定。)
```

```
vi gkvp_f0.53_namelist (各種パラメータの設定。平衡fileの指定: metric_boozero.bin.dat)
```

```
make (コンパイル)
```

```
vi sub.q (バッチジョブスクリプトを編集)
```

```
vi shoot (job 投入スクリプトを編集)
```

```
./shoot 1 3 (001~ 003のジョブをステップジョブとして実行)
```

```
ポスト処理(diag)を実行し、出力データを解析する
```

具体的な設定はハンズオン講習にて。

GKVのパラメータ設定 1

gkvp_f0.55_namelist

▶ gkvp_f0.55_namelistの編集

<code>&calct calc_type="linear",</code>	計算種別: linear / nonlinear
<code>z_bound="outflow",</code>	磁力線方向境界条件: outflow(流入・流出境界) / zerofixed (固定境界) / mixed
<code>z_filt="off",</code>	磁力線方向フィルタ: off / on
<code>z_calc = "up5"</code>	磁力線方向差分スキーム: cf4 (4次中心差分 w/ nzb=2) / up5 (5次風上差分 w/ nzb=3)
<code>art_diff = 0.d0,</code>	磁力線方向数値粘性(の強度) for z_calc="cf4"
<code>num_triad_diag=0 &end</code>	エントロピー伝達解析用 (本講習では割愛)
<code>&triad mxt=0, myt = 0/</code>	エントロピー伝達解析用 (本講習では割愛)
<code>&equib equib_type = "vmec", &end</code>	平衡磁場タイプ
	"analytic" - Analytic helical field (simplified equilibrium)
	"s-alpha" - s-alpha model with alpha = 0 (simplified equilibrium)
	"circ-MHD" - Concentric circular field with the consistent metric
	"vmec" - Stellarator field from the VMEC code via BZX code
	"eqdsk" - Tokamak field (G-EQDSK) via IGS code

GKVのパラメータ設定 2

▶ gkvp_f0.55_namelistの編集 (続き)

```
&run_n inum=1,  
  ch_res = .false., &end  
&files f_log="./log/gkvp_f0.53",  
  f_hst="./hst/gkvp_f0.53",  
  f_phi="./phi/gkvp_f0.53",  
  f_fxv="./fxv/gkvp_f0.53",  
  f_cnt="./cnt/gkvp_f0.53", &end  
&runlm e_limit =3500.d0, &end  
&times tend = 150.d0,  
  dtout_fxv = 150.d0,  
  dtout_ptn = 150.d0,  
  dtout_eng = 5.d-3,  
  dtout_dtc = 500.d0, &end  
&deltt dt_max = 1.d0,  
  adapt_dt = .true.,  
  courant_num = 0.6d0,  
  time_advnc = "rkg4", &end
```

ジョブ番号(投入スクリプトから自動設定)

(ジョブ途中から)解像度変更 (本講習では割愛)

name tag for output data (投入スクリプトから自動設定)

※ L_{ref}/V_{ref} はGKVにおける時間規格化因子。
ここでは、 $L_{ref}=R_{ax}$:磁気軸主半径、
 $V_{ref} = \sqrt{T_{ref}/m_{ref}} = \sqrt{T_i/m_p}$: プロトン
熱速度ととる。

経過時間制限 [sec]

シミュレーション時間制限 [L_{ref}/V_{ref}]

分布関数出力間隔 [L_{ref}/V_{ref}]

ポテンシャル(&モーメント量)出力間隔 [L_{ref}/V_{ref}]

時間発展データ出力間隔 [L_{ref}/V_{ref}]

adaptive time-step changeの評価間隔 [L_{ref}/V_{ref}]

時間ステップ幅の上限

adaptive time-step の有効/無効

CFL number

時間積分法の切り替え

"rkg4"

"imp_colli"

"auto_init"

4次Runge-Kutta-Gill

衝突項陰解法

自動選択

GKVのパラメータ設定 3

▶ gkvp_f0.55_namelistの編集 (続き)

並び: e, ion1, ion2, ...

&physp R0_Ln = 3.d0, 3.d0, 3.d0, ...

R0_Lt = 9.d0, 6.d0, 6.d0, ...

nu = 1.d0, 1.d0, 1.d0, ...

Anum = 5.446170221661534d-4, 2.d0, 4.d0, ...

Znum = 1.d0, 1.d0, 2.d0, ...

fcs = 1.d0, 0.8d0, 0.1d0, ...

sgn = -1.d0, 1.d0, 1.d0, ...

tau = 1.2d0, 1.d0, 1.d0, ...

dns1 = 1.d-3, 1.d-3, 1.d-3, ...

tau_ad = 1.d0,

lambda_i = 2.d-3,

beta = 5.d-4,

ibprime = 0,

vmax = 5.d0,

nx0 = 30, &end

$L_{\text{ref}}/L_{n_s}, L_{n_s}^{-1} = -d \ln n_s / d(a\rho)$

$a = (2\Phi_{\text{edge}}/B_{\text{ax}})^{1/2}$

$L_{\text{ref}}/L_{T_s}, L_{T_s}^{-1} = -d \ln T_s / d(a\rho)$

for GKV

1.d0 (for finite collision), 0.d0 (for collisionless)

A-number: m_s/m_{ref}

Z-number: e_s/e_{ref}

charge density: $n_s Z_s / n_{\text{ref}}$ (note that $\sum_{s \neq e} n_s Z_s / n_e = 1$)

sign of charge

T_s/T_{ref}

initial amplitude of perturbations

Te/Ti(ETG) or Ti/Te(ITG) for nprocs=1, but is fixed to 1.d0 for nprocs > 1

$\lambda_{D\text{ref}}^2 / \rho_{\text{ref}}^2 = (\epsilon_0 T_{\text{ref}} / e_{\text{ref}}^2 n_{\text{ref}}) / \rho_{\text{ref}}^2, \rho_{\text{ref}} = m_{\text{ref}} v_{\text{ref}} / e_{\text{ref}} B_{\text{ref}}$

$\beta_{\text{ref}} = \mu_0 n_{\text{ref}} T_{\text{ref}} / B_{\text{ref}}^2$

$a_{\text{GKV}} = (2\Phi_{\text{edge}}/B_{\text{ax}})^{1/2}$ ignore(0) or include(1) the grad-p part in the magnetic drift

maximum value of velocity space coordinate in $v_{\text{ref}} = (T_{\text{ref}}/m_{\text{ref}})^{1/2}$

the radial wavenumber imposing initial perturbations

GKVのパラメータ設定 4

▶ gkvp_f0.55_namelistの編集 (続き)

```
&nperi n_tht =4,
      kymin = 0.4d0,
      m_j = 1
      del_c = 0.d0, &end
&confp eps_r = 0.18d0,
      eps_rnew = 1.d0,
      q_0 = 1.5d0,
      s_hat = 0.8d0,
      lprd = 0.d0,
      mprd = 0.d0,
      eps_hor = 0.d0,
      eps_mor = 0.d0,
      eps_por = 0.d0,
      rdeps00 = 0.d0,
      rdeps1_0 = 1.d0,
      rdeps1_10 = 0.d0,
      rdeps2_10 = 0.d0,
      rdeps3_10 = 0.d0,
      malpha = 0.d0, &end
```

磁力線方向ボックスサイズ(ポロイダル角で $\pm n_tht \cdot \pi$)

磁力線ラベル方向ボックスサイズ $l_y = \pi / kymin$

半径方向ボックスサイズ $l_x = \pi / kxmin$, $kxmin = |2 \cdot \pi \cdot \hat{s} \cdot kymin / m_j|$

磁力線方向境界条件の位相因子 (通常は0.d0)

$\epsilon(rho_0)$ ($= a/R_{ax} \cdot rho_0$): eqdsk/vmecの場合は自動で上書き

$q(rho_0)$: eqdsk/vmecの場合は自動で上書き

$\hat{s}(rho_0)$: eqdsk/vmecの場合は自動で上書き

$$\hat{s}(\rho) = (\rho/q)(dq/d\rho)$$

モデル磁場: analytic, s-alpha, circ-MHDでの磁場形状パラメータ



GKVのパラメータ設定 5

▶ gkvp_f0.55_namelistの編集 (続き)

```
&vmecp s_input = 0.65,
      nss = 301,
      ntheta = 1024, &end
&bozxf f_bozx="%%DIR%%/vmec/", &end
```

radial position of interest: rho_0 $\rho = (\Phi/\Phi_{\text{edge}})^{1/2}$ for GKV
 nrho in BZX toroidal flux
 ntht in BZX (=2 * global_nz)
 specify the directory of "metric_boozer.bin.dat"

```
&igsp s_input = 0.50,
      mc_type = 0,
      q_type = 1,
      nss = 2048,
      ntheta = 65, &end
&igsf f_igs="%%DIR%%/eqdsk/", &end
```

radial position of interest: rho_0
 is fixed to 0 (自然座標系を使用)
 is fixed to 1 (実平衡のqで上書き)
 NPSI in IGS
 NCHI in IGS +1 (=2*global_nz/n_tht +1)
 specify the directory of "METRIC_axi.OUT"

```
&nu_ref Nref = 1.d19,
      Lref = 3.5d0,
      Tref = 3.d0,
      col_type = "LB",
      iFLR = 1,
      icode = 0, &end
```

n_{ref} (=n_e) [m⁻³]
 L_{ref} (=R_{ax}) [m]
 T_{ref} = (T_i) [keV]
 selection of collision operator: "LB", "lorentz", "full"
 with(1) and without(0) FLR terms in collision
 is fixed to 0 (this is for debug)

LB: Lenard-Bernstein type collision
 lorentz: Lorentz model collision
 full: multi-species linearized collision

設定値や各粒子種の規格化衝突周波数等は、log/gkvp_f0.53.***.*.log.***に出力される。

**本計算の前にテスト計算で確認することを推奨。

GKVのパラメータ設定 6

▶ gkvp_f0.55_namelistの編集 (続き)

▶ ExB回転効果に関するパラメータ

&rotat mach = 0.d0,	Mach number
uprime = 0.d0,	
gamma_e = 0.d0, &end	Normalized γ_E

▶ gamma_e について :

$$\gamma_E = \frac{1}{B_{ref}} (\partial_x^2 \phi)_{\rho=\rho_0}$$

$\rho = \rho_0$ での径電場シア $(\partial_x^2 \phi) = \frac{1}{a} (\partial_\rho^2 \phi)$ [V/m²] の計測データに対して、
磁気軸の磁場 B_{ref} [T], 主イオンの熱速度 v_{ref} [m/s], 磁気軸の大半径 $R_0 = L_{ref}$ [m]
を用いて、 $B_{ref} L_{ref} / v_{ref}$ で規格化した値が gamma_e に対応



Appendix

磁気座標構成ツールBZX (for stellarators)の使用方法

- ▶ 必要なライブラリ：特になし。ただしVMECとその付属ツールであるBoozXformを用いる。
- ▶ VMEC, BoozXformに関する情報: https://bitbucket.org/lazerson_princeton/stellopt/wiki/BOOZ_XFORM

計算条件の設定 **前もってvmecのinput fileと出力ファイルwoutをもらっておく。

```
tar zxvf BZX_20190117.tgz
cd BZX_20190117
cp (somewhere)/wout_****.txt (somewhere)/input.*** . (VMECデータwoutとinputを実行dirにコピー)
```

BZX.f90冒頭部のfname_tag, nrho(径方向点数), ntth(θ 方向点数), nzeta(ζ 方向点数),
alpha_fix(磁力線ラベル $\alpha=q\theta-\zeta$), Ntheta_gkv(磁力線方向のドメインサイズ: n_tht in GKV namelist)を編集。
**磁気面形状の確認を行いたい時にはnzeta=finiteとし、GKV用のfield-aligned座標としてのデータを出力
する際にはnzeta=0とする。**

実行する (今回はPlasma Simulator上にあるVisualization Processing Server1 or 2で

```
run_BoozXform_and_BZX.shの冒頭部の変数tagにvmec-inputのinput.***の***の部分セットする。
./run_BoozXform_and_BZX.sh
-> ./checkや./geomにデータが出力され、./geom/metric_boozer.bin.datがGKVの入力に用いられる。
```

****R_{ax}, B_{ax}, a_{gkv}の値はlog_BZX.datに。**

補足：磁気面形状(nzeta=finite)やJacobianの整合性を確認する際には、
gnuplot shape_check.gnp あるいは gnuplot metric_check.gnpを実行。

磁気座標構成ツールIGS (for tokamaks)の使用方法 1

- ▶ 必要なライブラリ : FFTW, Lapack, BLAS, MPI (MPI対応コンパイラ)

インストール

```
tar zxvf igs_20181011.tgz
cd igs_20181011
./make uninstall (念のため余分なファイルを削除)
```

makefile.incを使用環境に応じて編集：

INSDIR="makefile.incがあるディレクトリ (フルパス) "

ライブラリのリンクを設定。

mpiifort(インテルコンパイラ環境: e.g., Helios)

module purge

module load intel intelmpi

make install

mpifrt (Fujitsuコンパイラ : PS data解析srv.)

module unload tcsuite-fx/2.0.0-04

module load tcsuite-rx/1.2.0-15 fftw-rx/3.3.4

make install

./EQDSK : EQDSK形式の平衡データ格納ディレクトリ

./igs : IGSの実行ディレクトリ (input file, 実行モジュール、出力データ)

その他 : 設定不要&削除禁止

磁気座標構成ツールIGS (for tokamaks)の使用方法 2

インプットファイルの編集

```
cd igs_20181011/igs
```

EQDSKデータをどこかに配置：この例ではigs_20181011/EQDSK内に配置。

INPUT.DATAを編集：基本的に色付きのところのみ編集でOK。

&NEWRUN

```
EQFILE='../EQDSK/geqdsk_circ.dat',  
FIELDTYPE= 0,  
LABELTYPE= 1,  
FILETYPE= 1,  
FORT11_ZTOP=F,  
SOLVER=1,  
SDIV=4.,  
NTETP=40000,  
SCRAPE_OFF=0.e-5,  
REPRODUCE=F,
```

&OUTPUT

```
WOUT_GKV=T,  
WOUT_ETCREL=F,  
WOUT_BOOZXFORM=F,  
WOUT_MATLAB=F,
```

&EQSIZE

```
NRP= 1025,  
NZN= 1025,  
KEQUI= 1025,
```

NPSI= 512, (rho-grid num. : 任意)

NCHI= 64, (theta-grid num. : 2*global_nz/n_tht in GKV)

```
NMCUT= 256,
```

注意：GKVで設定したいglobal_nz/
n_thtの2倍値をNCHIに設定

補足：それぞれの詳しい説明は
INPUT.DATAの下部に記載

磁気座標構成ツールIGS (for tokamaks)の使用方法 3

IGSの実行

```
mpiifort (インテル環境)  
cd igs_20181011/igs  
./IGS.exe >& LOG.OUT
```

```
mpifrt (Fujitsu環境)  
cd igs_20181011/igs  
pjsub sub_das.q
```

一連の出力データ****.OUTがigsディレクトリ内に出力される。(METRIC_axi.OUTをGKVへ入力)

実行結果のログ情報はLOG.OUTに出力されている:

特に、Raxi, Baxi, a_phiの値はGKVの規格化をSI単位系などに戻す際に必要。

プラズマ半径aの定義は、 $a_phi = \sqrt{2 \cdot \Phi_edge / Baxi}$,

規格化小半径rhoの定義は、 $rho = \sqrt{\Phi / \Phi_edge}$,

ただしPhi_edgeはポロイダル断面を貫く全トロイダル磁束/2pi

補足：磁気面や、q値、磁気シア[s_hat]分布をgnuplotでプロットしたいとき：

```
plot "MC1D.OUT" u 1:4 ti "q" w l
```

```
plot "MC1D.OUT" u 1:13 ti "s_hat"
```

```
plot "MC2Dt.OUT" every :::0::511 u 3:6 w l
```

0番目からNPSI-1 (=511)番目までの磁気面をプロット

(NPSI=11にして実行するとrho=0.1ずつのプロットに対応。)