

S10CのBH曲線にバラツキがある場合のアクセプタンスの変化

有本靖

大阪大学大学院理学研究科

2005.5.19

概要

電磁石のBH曲線は磁石ごとに同じであることが望ましい。このためには、同じロットから材料を取るか、炭素含有量の少ない材料を用いる必要がある。しかし、実際にこれらのことを要求すると材料費が高くなる。また昨今の鉄市場では、これらの材料の入手自体も、困難である。そこで今回比較的入手性も良く価格も安い構造材のうち炭素含有量の管理されているS10Cを用いた場合、どのくらい磁場分布がバラつくか、また、BHカーブの違ったS10CでFFAGリングを作った場合、アクセプタンスがどのくらい変化するのか調べた。

1 S10Cについて

SC材は機械構造用炭素鋼の規格であり、表1に示すような種類がある。

記号 の種類	化学成分 (%) C	機械的性質 (参考)	
		引張強さ M/Pa	シャルピー衝撃値 J/cm ²
S10C	0.08~0.13	N>310	-
S12C	0.10~0.15	N>370	-
S15C	0.13~0.18	N>370	-
S17C	0.15~0.20	N>400	-
S20C	0.18~0.23	N>400	-
S22C	0.20~0.25	N>440	-
S25C	0.22~0.28	N>440	-
S28C	0.25~0.31	N>470, H>540	-
S30C	0.27~0.33	N>470, H>540	>108
S33C	0.30~0.36	N>510, H>570	-
S35C	0.32~0.38	N>510, H>570	>98

表 1: 機械構造用炭素鋼材 (JIS G 4051)

(注)

1. Mnの含有量は、S10C~S25Cのものは0.30~0.60%、S28C~S58Cのものは0.60~0.90%。
2. すべてSi 0.15~0.35%、P<0.030%、S<0.035%
3. 不純物としてCu 0.30%、Ni 0.20%、Cr 0.20%、Ni+Cr0.35%を超えてはならない。
4. Nは焼ならし状態、Hは焼入れ・焼戻し状態を表す。

鋼版 の種類	化学成分 (wt%)				
	C	Si	Mn	P	S
NKJ-1(JFE 規格)*	< 0.01	< 0.02	< 0.20	< 0.015	< 0.010
BBO (JSW 規格)	< 0.03	< 0.10	< 0.23	< 0.015	< 0.02
S10C (JIS 規格)	0.08~0.13	0.15~0.35	0.30~0.60	< 0.030	< 0.035

* 現在は JFE-EFE と呼ばれている。

表 2: 各鋼版の化学成分

これらはいずれもキルド鋼塊から製造され、低炭素の鋼 (0.25% 以下) は焼ならしのままで、強度の要求の少ないボルト、ナット、ピン、小物軸類に使用される。S30C から S58C は 830~880°C から水焼入れ、550~650°C で焼戻して使用される。炭素鋼は質量効果が大きく、焼入れ性も良くない鋼である。

S10C は炭素含有量が 0.1% 以下の亜共析鋼でフェライトとパーライト ($\alpha_{(0.02\%C)} + \text{Fe}_3\text{C}_{(6.67\%C)}$) の 2 つの組織から成る。一般的にパーライトが少ない方が結晶粒が大きくなるため磁気特性は良くなる。炭素含有量が 0.1% の時だいたいフェライト 90%、パーライト 10% の割合となる [1]。

表 3 に S10C の磁気特性データを示す。また表 4 にこの時の測定条件を示す。図 1 はこのデータをプロットしたものである。表 4 にないデータもプロットされているが、これは TOSCA の計算用に外挿または内挿したものである。PRISM-FFAG 電磁石の磁場計算にはこれらの BH 曲線を用いた。

T=165mm		T=210mm		T=165mm	
H (Oe.)	B (Gauss)	H (Oe.)	B (Gauss)	H (Oe.)	B (Gauss)
1.005309	0.13E4	1.005309	1900	1.005309	3700
2.010618	0.54E4	2.010618	6000	2.010618	8600
3.015926	0.79E4	3.015926	8500	3.015926	10700
5.026544	1.07E4	5.026544	11400	5.026544	12600
25.13272	1.58E4	25.13272	15700	25.13272	16000
125.6636	1.86E4	125.6636	18100	125.6636	18700
251.3272	2.03E4	251.3272	20000	251.3272	20200

表 3: S10C の BH 曲線の測定値

熱処理なし	
鋼版の厚み	165 mm, 210 mm, 290 mm
測定方法	JIS C2504
試験片形状	6Txφ45,φ33 リング,
試験片熱処理	750°Cx 0.5~1.0 Hr(試験片加工の歪み除去)

表 4: S10C 磁気特性の試験条件

[用語の説明]

- フェライト: αFe の中に他の元素が固溶した αFe の固溶体。
- αFe : 鉄は温度を上げてゆくと α 相, γ 相, δ 相 と結晶状態が変化する。 α 相は 911°C 以下の相。結晶構造は体心立方格子をとる。
- パーライト: フェライトと鉄の炭素化合物 (Fe_3C) であるセメンタイトの 2 相が層状に配列した組織のことである。
- キルド鋼: 転炉で所定の組織に精錬された溶鋼は凝固されて鋼塊となるが、この凝固途上に脱酸材を添加し、溶鋼中のガスを除去する。使用される脱酸剤には Mn, Si, Al があるが、脱酸力の弱い Mn の

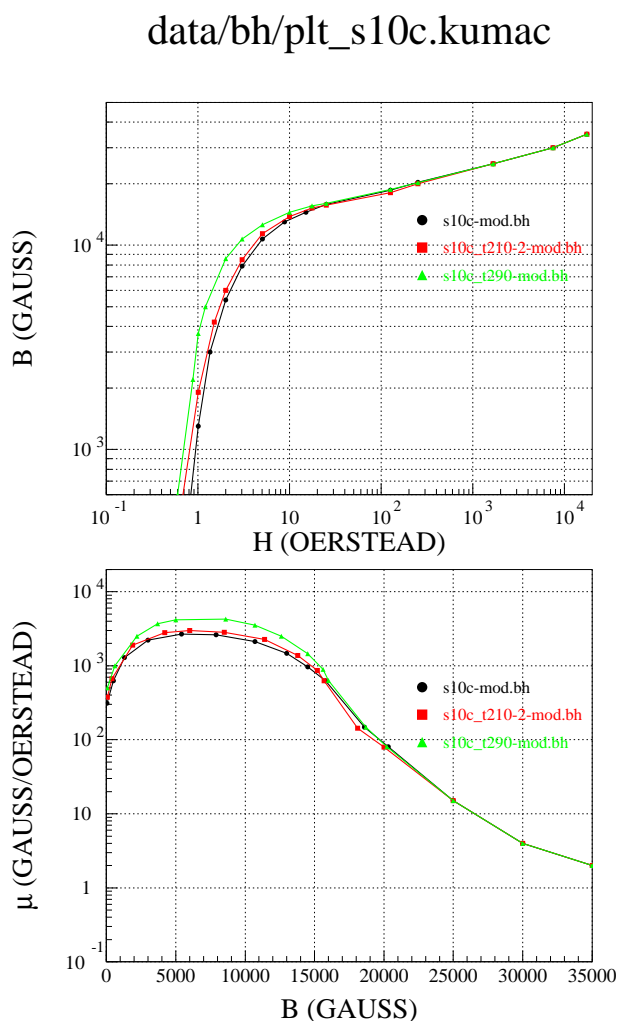


図 1: S10C の BH 曲線

みを添加してつくられた鋼をリムド鋼、脱酸能力の強い Si, Al を添加してつくられた鋼をキルド鋼という。キルド鋼塊は凝固時に上部に収縮孔ができ、その部分は切り取るため歩留まりは良くないが、良質な鋼である。脱酸が十分に効いているので、固まるときガスの放出がなく静かに凝固する。つまり死んだように静かな鋼というのでキルド (Killed) 鋼と呼ばれる。

2 PRISM-Magnet の磁場分布

これまでポール形状は NKJ-1 で最適化してきたが、S10C (鋼版の厚さ、 $T=165$ mm) でポール形状の最適化を行なった。リターンヨーク、磁極、フィールドクランプすべての磁性体に同一の BH 曲線を用いた。図 2 に NKJ1 で最適化した時のポール曲線と今回 S10C で最適化した時のポール曲線を示す。横軸、縦軸はそれぞれ r (リング中心からの距離)、中間平面 (メディアンプレーン) から磁極面までの高さである。だいたい同じ形であるが、ずれが一番大きい所は D 磁極で 3 mm 程の高さの違いが見られた。

図 3 に TOSCA で計算された磁場分布を示す。図 3(a),(b),(c) はそれぞれ $T=165$ mm, $T=210$ mm, $T=290$ mm の S10C の BH 曲線を用いた時の 3 次元磁場計算結果である。横軸はリング中心からの距離を表わす。縦軸は一番上の図が r に沿って積分した BL 積、真中の図は BL 積の $k+1$ 値、一番下の図は F/D 比を表わしている。実線と点線はそれぞれ磁場の F 成分と D 成分を表わしている。

図 4 に $T=165$ mm の S10C を用いた場合の磁場分布からのずれ量 (比をとって 1 をひいたもの) を示す。左図は BL 積のずれ量、右図は $k+1$ 値のずれ量を表わしている。実線と点線はそれぞれ F 成分、D 成分を表わす。BL 積は F 成分のずれは 1%、D 成分のずれは 6% 程度であり、また $k+1$ 値に関しては F 成分のずれはほとんどなく、D 成分のずれがだいたい 3% 程度であることがわかる。

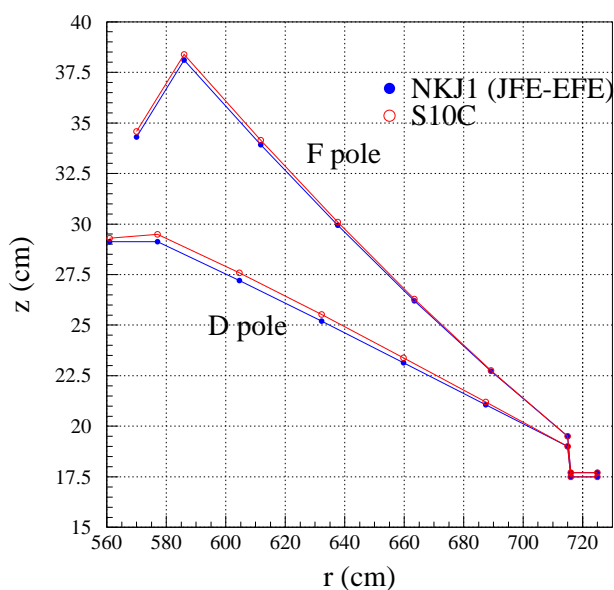


図 2: 磁極表面の曲線

3 トラッキング

前節で作成した 3 次元磁場マップを用いてトラッキングを行なった。T = 165 mm, T = 210 mm, T = 290 mm の S10C で作成した磁場マップを 1, 2, 3 と番号づける。これらの磁場マップを各セルに配置し、いろいろな組合せでトラッキングを行なった。

最初に 10 回対称の配置でトラッキングを行なった。磁場マップ 1 を用いて、リングを 7 周して生き残ったミュオンの初期位相 (ストレートセクションの中心) をプロットしたものを図 5 に示す。上から順に $r-r'$, $z-z'$, $r-z$, $r'-z'$ の位相空間プロットとなっている。10 回対称セルで磁場マップ 1, 2, 3 を用いたトラッキングにより得られた 4 次元位相空間のアクセプタンスを表 5 にまとめておく。磁場マップ 1 からの磁場分布のずれが大きくなるほどアクセプタンスは悪化することがわかる。

磁場マップ番号	4D Acceptance
1	738.0×10^6
2	729.7×10^6
3	665.3×10^6

表 5: 10 回対称セルの 4 次元位相空間アクセプタンス

次に 1 つのリングに磁場マップ 1, 2, 3 を混ぜることによって、10 回対称性をくずしてトラッキングを行なった。トラッキングによって得られた 4 次元位相空間アクセプタンスを図 7 に示す。磁場マップが 1 リングに 2 種類の場合は 4D アクセプタンスは 12121212 等の 5 回対称性リングの場合が最も大きかった。この時、10 回対称リングにおけるアクセプタンスの悪い方の磁場マップのアクセプタンスの大きさに近くなることが分かった。例えば、磁場マップ 1 と 2 の組み合わせでリングを作った場合、磁場マップ 2 のみの 10 回対称リングのアクセプタンスに近づく。

また、磁場マップが 1 リングに 3 種類の場合は配置を選ぶことにより、一番良い磁場の 10 回対称リングで行なったアクセプタンスに近づけることが出来た。

3.1 4 次元位相空間の比較

図 8-9 にそれぞれ磁場配置 1231231231 の時と磁場配置 1231231231 の時のストレートセクション中心の初期位相分布を示す。図 8 と 9 比較すると、 $(r-r')$ 空間で外側の粒子が削られているのが分かる。

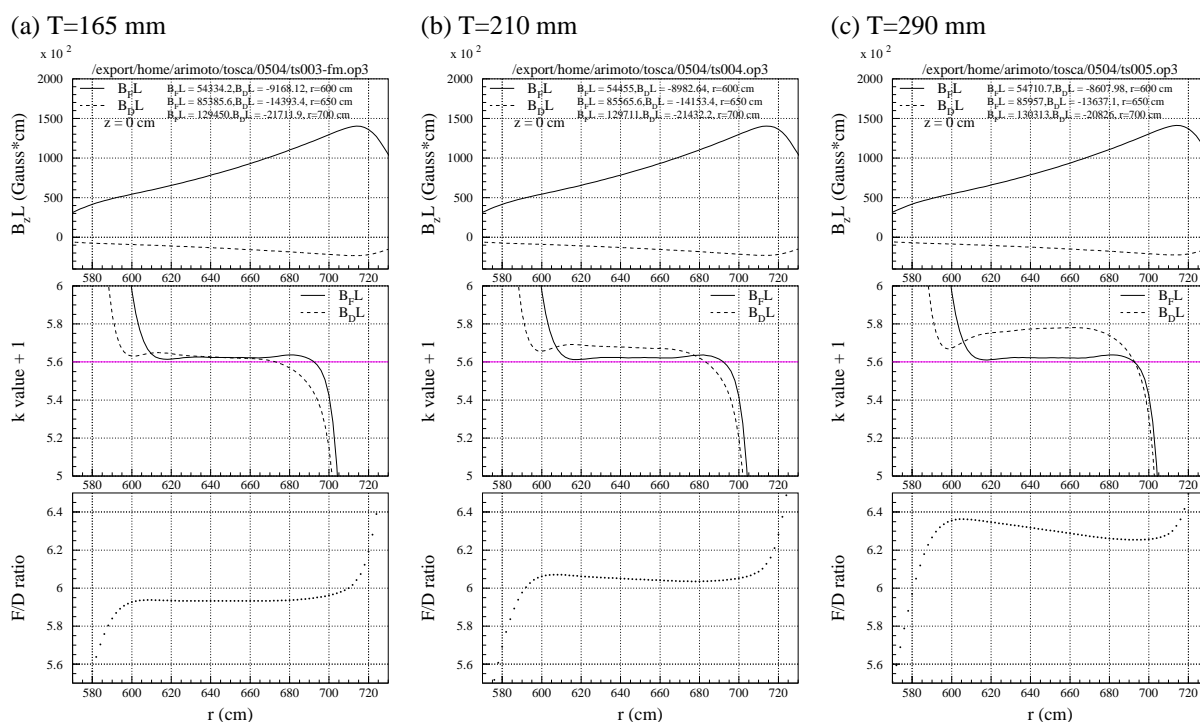


図3: それぞれ (a)T=165 mm, (b)T=210 mm, (c) T=290 mm、の S10C の BH 曲線による 3 次元磁場計算結果。横軸はリング中心からの距離。縦軸は一番上の図が r に沿って積分した BL 積、真中の図は BL 積の $k+1$ 値、一番下の図は F/D 比を表わしている。

3.2 チューンの比較

磁石配置の違いによるチューンの変化を見るために Horizontal と Vertical チューンを各軸に射影してみた。図 10 にチューンを射影ヒストグラムを示す。上段が水平方向のチューン、下段が鉛直方向のチューンを表わしている。一番左の図は 10 回対称リングで磁場マップ 1 を用いたもの、中央の図は磁場マップ配置が 1231231231 のもの、一番右の図が磁場マップ配置が 1112223331 としたものである。どの場合も水平方向のチューンはあまり広がりが無いが、鉛直方向のチューンはスパイク状になって広がっている。原因についてはよくわからない。

磁石配置ごとの違いについては、水平方向については大きな変化はないが、鉛直方向については、配置 1231231231 の場合、他の配置に比べるとヒストグラム中の一番左側のチューンが少なくなっている。

4 まとめ

S10C のバラツキが 4D アクセプタンスにどのように影響するのか調べた。アクセプタンスは電磁石の配置によって大きく変化することがわかった。また、配置を選べば BH 曲線のバラツキによるアクセプタンスのロスが 2% 程度に出来ることが分った。

参考文献

- [1] 打越二彌著、機械材料、東京電機大学出版局

S10C; Model=ts003-fm.oppre

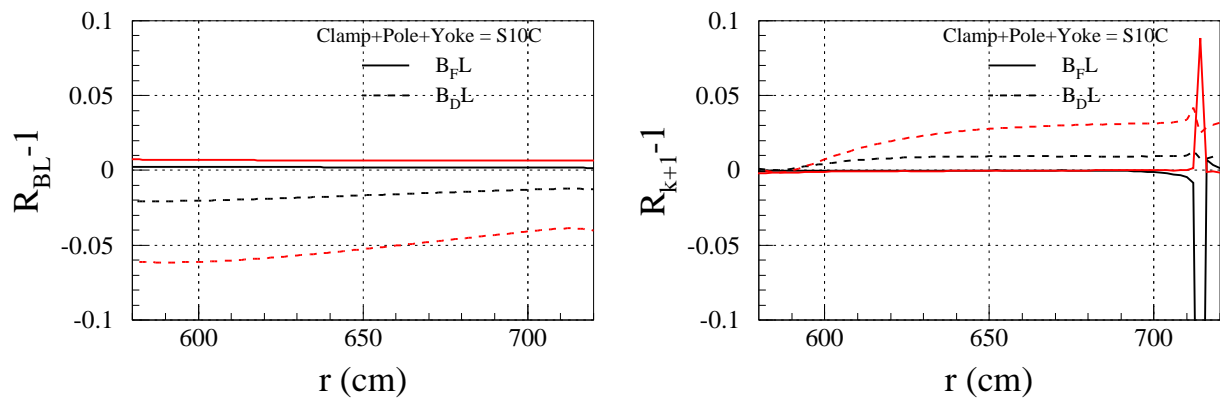


図 4: S10C の BH 曲線の違いによる磁場分布の比較。左図 : BL 積のずれ, 右図 : k+1 値のずれ。

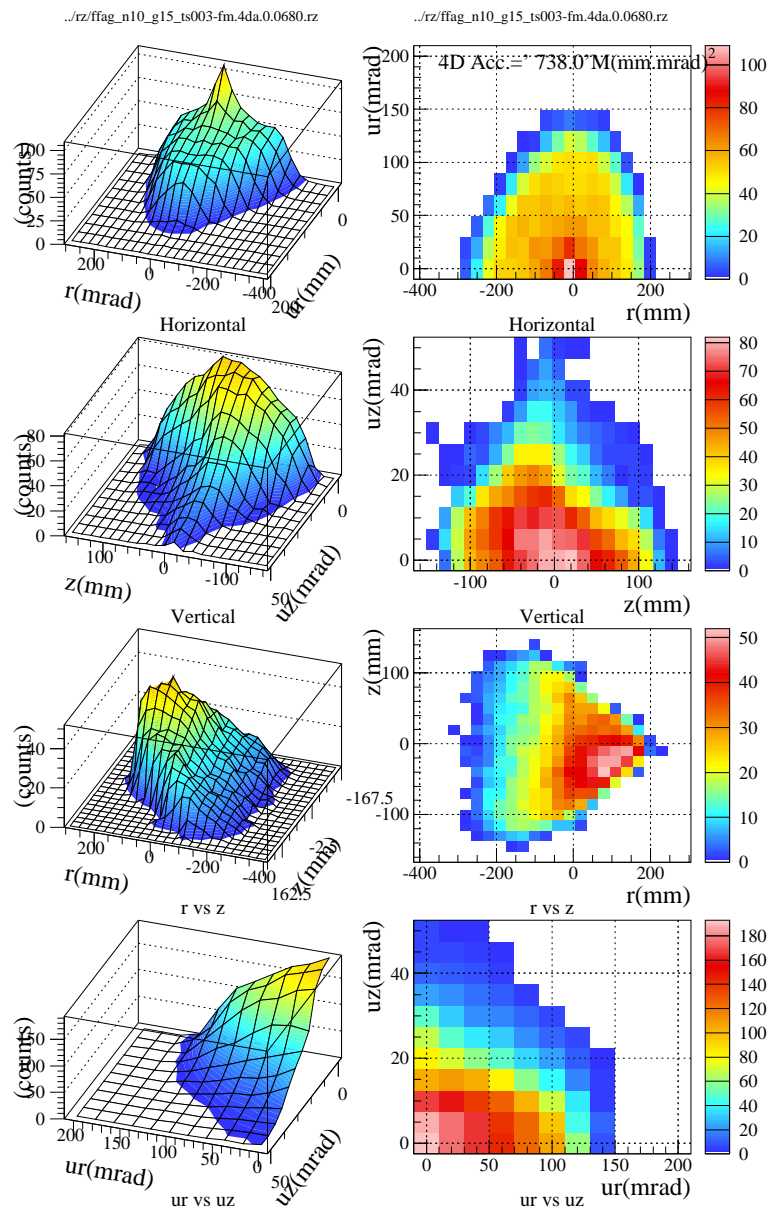


図 5: 磁場マップ 1 を用いてトラッキングを行なった時の 7 周して生き残ったストレートセクション中心でのミュオンの初期位相分布。上から順に $r - r'$, $z - z'$, $r - z$, $r' - z'$ の位相空間分布。

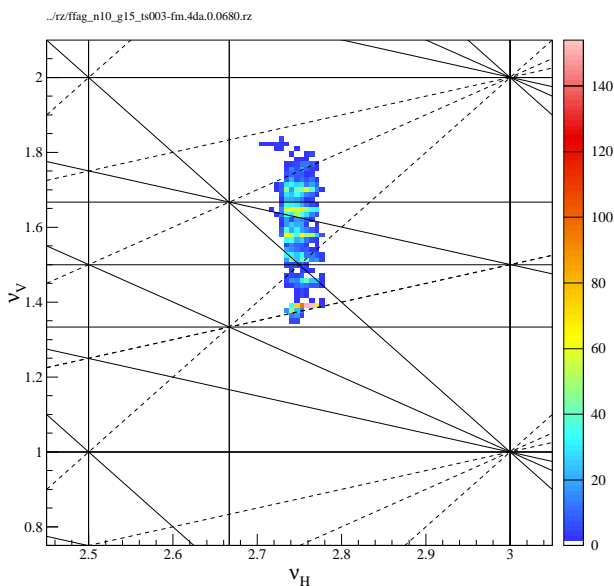


図 6: 磁場マップ 1 を用いてトラッキングを行なった時のチューンダイアグラム。

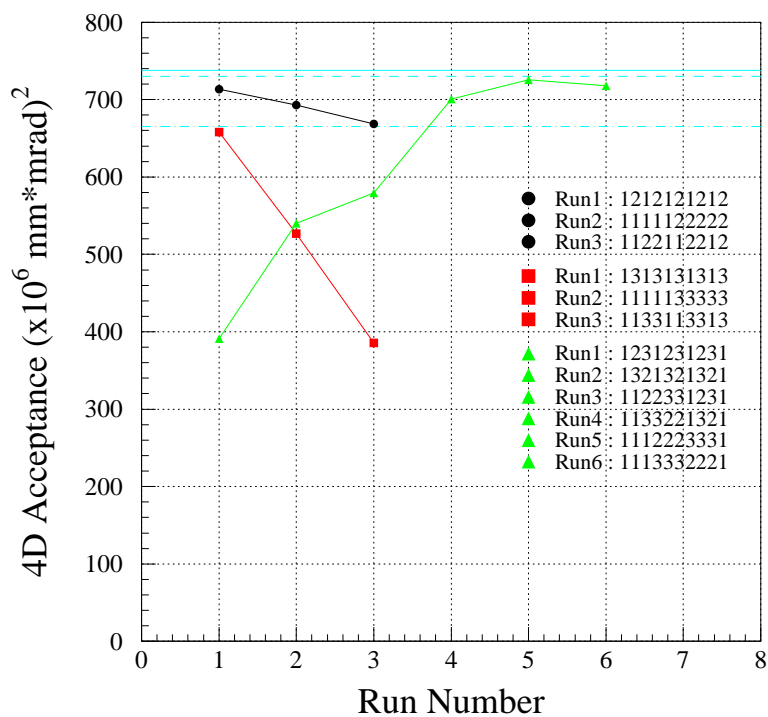


図 7: トラッキングで得られた 4 次元アクセプタンス。横軸は Run 番号。縦軸は 4 次元位相空間のアクセプタンス。 は磁場マップ 1,2 を 5 つずつ 10 セルに配置したもの。 は磁場マップ 1,3 を 5 つずつ 10 セルに配置したもの。 は磁場マップ 1 を 4 つ、磁場マップ 2 を 3 つ、磁場マップ 3 を 3 つ 10 セルに配置したもの。それぞれの磁場マップを並べる順番は図中の 10 ケタの数字を参照のこと。水色の実線、点線、1 点鎖線はそれぞれ磁場マップ 1、磁場マップ 2、磁場マップ 3、を 10 セルすべてに配置した時の 4D アクセプタンスを示す。

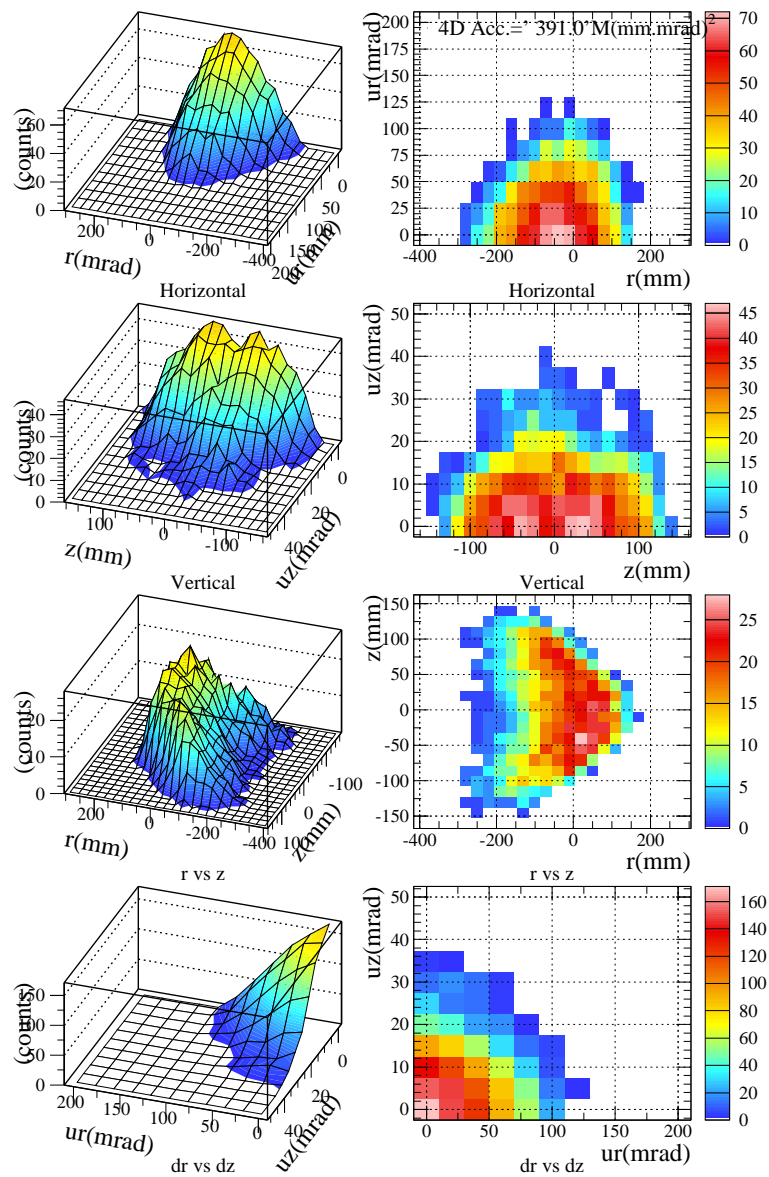


図 8: 磁場マップ配置 1231231231 の時のミュオンの初期位相分布。上から順に $r - r'$, $z - z'$, $r - z$, $r' - z'$ の位相空間分布。

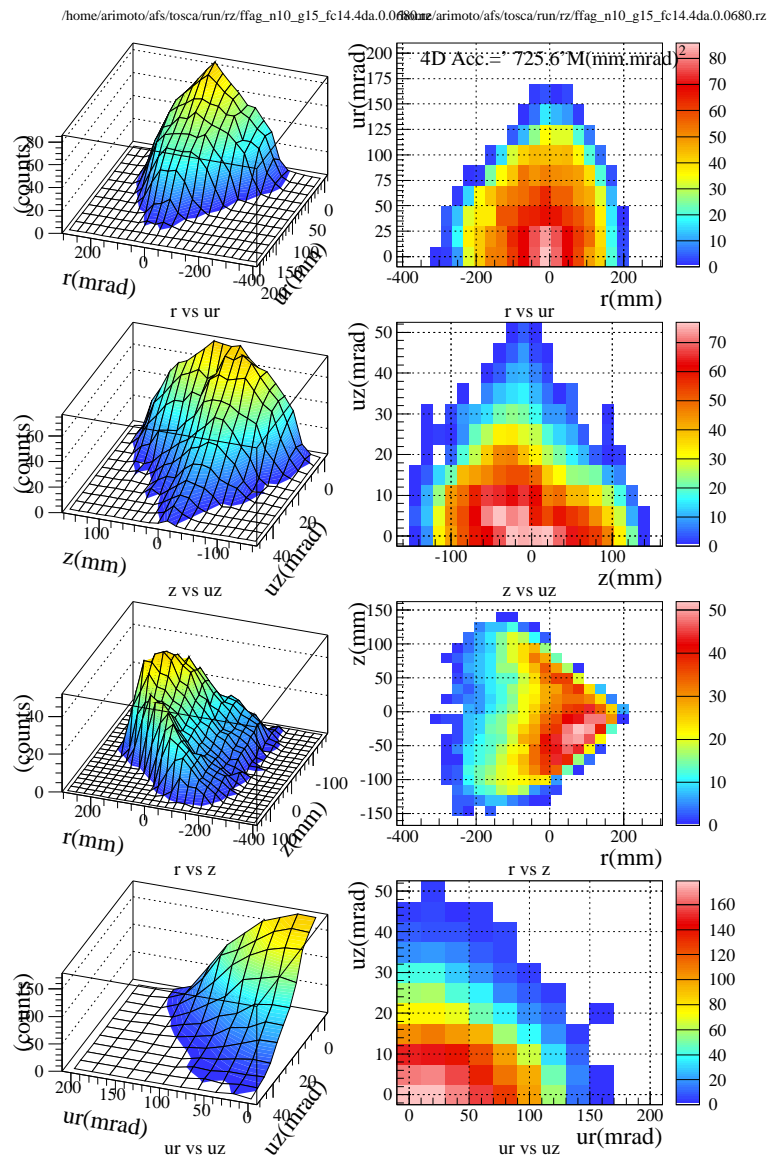


図9: 磁場マップ配置 1112223331 の時のミュオンの初期位相分布。上から順に $r - r'$, $z - z'$, $r - z$, $r' - z'$ の位相空間分布。

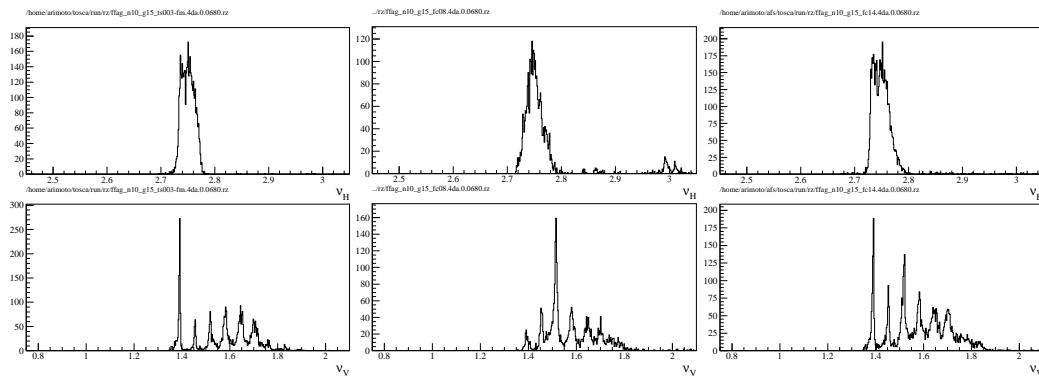


図 10: チューンの射影 (上段:水平チューンを水平軸に射影、下段:鉛直チューンを鉛直軸に射影したもの) ヒストグラム。左図: 10 回対称、磁場マップ 1, 中央図: 磁場マップ配置 1231231231, 右図: 磁場マップ配置 1112223331。