

ビーム輸送系の役割とそのビーム力学

1. はじめに

J-PARC L3BT は、線形加速器と RCS を接続するビーム輸送系である。J-PARC は、最終的には 1MW と大強度の陽子ビームを供給する加速器であり、既存の加速器と比べて、ビーム損失を極力低減する必要がある。L3BT は線形加速器と RCS を接続するだけでなく、RCS でのビーム損失を抑制するために、運動量拡がりやエミッタンスの大きさを抑制したり、整合を取った入射を行ったりするための重要なセクションである。RCS 入射点で要求されるビームパラメータは以下の通りである。

運動量拡がり $\pm 0.2\%$ 以下

ビームエミッタンス $< 6\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 以下

L3BT は直線部、アーク部、スクレーパ部、および入射部から構成される。L3BT には 2 台のデバンチャーが設置され、RCS 入射点での運動量拡がりを $\pm 0.2\%$ 以下にするという要求仕様を満足するために使用される。

本講義では、その中でもデバンチャーとスクレーパのビーム力学について説明する。

2. デバンチャーシステム

2.1. 序論

一般に、デバンチャーシステムには、2 つの役割がある。1 つは、リング入射点での運動量拡がりを最小にするために、縦方向位相空間でビームを回転させることである。もう一つは、線形加速器出口での運動量のジッターを修正することである。L3BT で採用している 2 空洞デバンチャーシステムでは、上流の空洞は、リング入射点での運動量のジッターを最小にするために使用され、後段の空洞は、運動量拡がりを調整するために使用される。デバンチャーを構成する 2 つの空洞は、それぞれの機能が分離できるよう配置されている

ので、運動量ジッターの補正効率を悪化させることなく、運動量拡がりの調整を実行することができる。^[1]大強度リングへの入射の際には、縦方向位相空間での空間電荷効果の抑制が必要となるので、運動量拡がりの柔軟な調整を実現することは、非常に重要である。

2.2. 分析モデル

本項では、空間電荷効果を無視し、簡単な分析モデルを用いて、デバンチャーシステムの最適化について議論する。

ここで、 $(z-\Delta p/p)$ 位相空間の σ_z 行列を(2-1)式で定義する。

$$\sigma_z = \begin{bmatrix} \beta_z & -\alpha_z \\ -\alpha_z & \gamma_z \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

Twiss パラメータは、ビームラインに沿って変化するもので、一般に、 σ_z 行列はビームラインに沿った距離 s に関する関数となる。縦方向位相空間でのトランスファー行列が 2×2 行列で表されるので、 s_1 での σ_z 行列は、トランスファー行列を用いて(2-2)式で表される。

$$\sigma_z(s_1) = M(s_0 : s_1) \sigma_z(s_0) M^T(s_0 : s_1) \quad (2-2)$$

ここで、 $M(s_0 : s_1)$ は、 $s=s_0$ から $s=s_1$ までのトランスファー行列である。

デバンチャー空洞は、平衡位相-90度の thin ギャップとしてモデル化される。そして、デバンチャー空洞のトランスファー行列は、焦点距離 f を用いて(2-3)式で表される。

$$M_f(f) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

ここで、焦点距離 f は、空洞のパラメータを用いて、(2-4)式で求まる。

$$\frac{1}{f} = \frac{2\pi |q| E_0 T L}{\beta^3 \gamma m_0 c^2 \lambda} \quad (2-4)$$

ドリフトのトランスファー行列は、幾何学的なドリフト長 \tilde{l} または有効ドリフト長 $l = \tilde{l} / \gamma^2$ を用いて、(2-5)式で表される。

$$M_l(\tilde{l}) = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{l} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

ここで、2 種類のデバンチャーシステムの概略のレイアウトを Fig. 1 に示す。

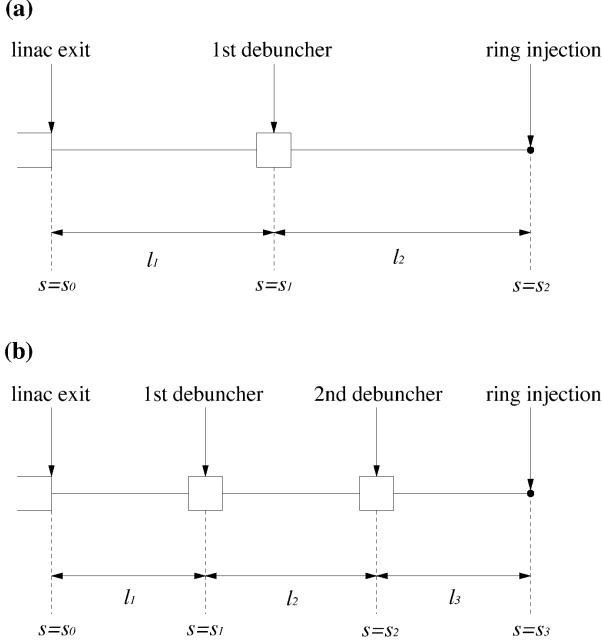


Fig. 1 デバンチャーシステムの概略レイアウト：
(a) 1 空洞システム；(b) 2 空洞のシステム

Fig. 1 (a)に、従来の1 空洞のデバンチャーシステムのレイアウトを示す。ここでは、運動量拡がりや運動量のジッターの両方が、1 台の空洞の電圧を調整することによって最適化される。

一方、Fig. 1 (b)に、2 空洞のデバンチャーシステムのレイアウトを示す。このシステムでは、運動量拡がりや運動量のジッターを最適化するために、2 台の空洞の電圧を2 個の独立のノブとして使用できることが重要である。

ここで、焦点距離が f_1 と f_2 である 2 台のデバンチャー空洞を考える。そして、線形加速器出口と第1 デバンチャー間の有効ドリフト長を l_1 、第1 デバンチャーと第2 デバンチャー間の有効ドリフト長を l_2 、そして、第2 デバンチャーとリング入射点間の有効ドリフト長を l_3 とする。また、線形加速器出口を $s=s_0$ 、第1、第2 デバンチャー

の位置をそれぞれ $s=s_1$ 、 $s=s_2$ 、そして、リング入射点の位置を $s=s_3$ とする。すると、2 空洞デバンチャーシステムの総トランスファー行列は(2-6)式で表される。

$$M_{total} = M_l(\tilde{l}_3) \cdot M_f(f_2) \cdot M_l(\tilde{l}_2) \cdot M_f(f_1) \cdot M_l(\tilde{l}_1) \quad (2-6)$$

トランスファー行列の各成分は、(2-7)～(2-10)式で計算される。

$$M_{total}(1,1) = \frac{f_1 f_2 + l_2 l_3 - f_1 l_3 - f_2 l_2 - f_2 l_3}{f_1 f_2} \quad (2-7)$$

$$M_{total}(1,2) = \frac{f_1 f_2 (l_1 + l_2 + l_3) - f_1 (l_1 l_3 + l_2 l_3)}{f_1 f_2} - \frac{f_2 (l_1 l_2 + l_1 l_3) - l_1 l_2 l_3}{f_1 f_2} \quad (2-8)$$

$$M_{total}(2,1) = -\frac{f_1 + f_2 - l_2}{f_1 f_2} \quad (2-9)$$

$$M_{total}(2,2) = \frac{f_1 f_2 + l_1 l_2 - f_1 l_1 - f_1 l_2 - f_2 l_1}{f_1 f_2} \quad (2-10)$$

一般に、ビーム楕円は、線形加速器の出口の縦方向位相空間では、ほとんど直立していて、加速電場がなくなった後に急速に傾き始める。したがって、簡単のために線形加速器出口では、 $z=0$ とする。すると、線形加速器出口の σ_z 行列は(2-11)式で表される。

$$\sigma_z(s_0) = \begin{bmatrix} \beta_z(s_0) & 0 \\ 0 & \gamma_z(s_0) \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

ここで、線形加速器出口を $s=s_0$ とすると、リング入射点での Twiss パラメータは、(2-12)～(2-14)式で求まる。

$$\alpha_z(s_3) = -\beta_z(s_0) M_{total}(1,1) M_{total}(2,1) - \gamma_z(s_0) M_{total}(1,2) M_{total}(2,2) \quad (2-12)$$

$$\beta_z(s_3) = \beta_z(s_0) M_{total}(1,1)^2 + \gamma_z(s_0) M_{total}(1,2)^2 \quad (2-13)$$

$$\gamma_z(s_3) = \beta_z(s_0) M_{total}(2,1)^2 + \gamma_z(s_0) M_{total}(2,2)^2 \quad (2-14)$$

その結果、リング入射点での運動量拡がり、以下の2条件で最小となる。

$$f_1 + f_2 - l_2 = 0 \quad (2-15)$$

$$f_1 f_2 + l_1 l_2 - f_1 l_1 - f_1 l_2 - f_2 l_1 = 0 \quad (2-16)$$

しかしながら、両式を同時に満足する現実的な解はない。そこで、デバンチャー位置での非線形性について検討する。第1デバンチャー空洞の非線形性は、以下のパラメータによって評価できる。

$$\xi_1 = \sqrt{\{\beta_z(s_0) + \gamma_z(s_0)l_1^2\} \varepsilon_z} + |l_1 \delta| \quad (2-17)$$

ここで、 ε_z は、線形加速器出口での縦方向エミッタンスである。 ξ_1 は、 l_1 の単調増加関数であり、第1デバンチャーの非線形効果を抑制するためには、より小さい l_1 が望ましいと結論付けられる。2空洞のデバンチャーシステムでは、最終的な運動量拡がりを犠牲にしないで、より小さい l_1 を採用できることが、2空洞のデバンチャーシステムの重要な利点である。同様にして、第2デバンチャー空洞の非線形性は、以下のパラメータによって評価できる。

$$\xi_2 = \sqrt{\left\{ \beta_z(s_0) \left(1 - \frac{l_2}{f_1}\right)^2 + \gamma_z(s_0) \left(l_1 + l_2 - \frac{l_1 l_2}{f_1}\right)^2 \right\} \varepsilon_z} + \left| \left(l_1 + l_2 - \frac{l_1 l_2}{f_1} \right) \delta \right| \quad (2-18)$$

パラメータ ξ_2 は、以下の2条件で、最小になる。

$$1 - \frac{l_2}{f_1} = 0 \quad (2-19)$$

$$l_1 + l_2 - \frac{l_1 l_2}{f_1} = 0 \quad (2-20)$$

(2-19)を(2-20)に代入すると、 $l_2 = 0$ となり、1空洞のデバンチャーシステムになってしまうので、両式を同時に満足する現実的な解はない。(2-20)式と比較して、(2-16)式を以下のように書き直す。

$$\left(1 - \frac{l_1}{f_1}\right) - \frac{1}{f_2} \left(l_1 + l_2 - \frac{l_1 l_2}{f_1} \right) = 0 \quad (2-21)$$

ここで、(2-16)式と(2-20)式が同時に採用できないことが分かる。ここで、デバンチャーの最適化

を特徴付ける以下の5つのパラメータを定義する。

$$\zeta_1 = l_1 + l_2 - \frac{l_1 l_2}{f_1} \quad (2-22)$$

$$\zeta_2 = \left(1 - \frac{l_1}{f_1}\right) - \frac{\zeta_1}{f_2} \quad (2-23)$$

$$\zeta_3 = \frac{f_1 + f_2 - l_2}{f_1 f_2} \quad (2-24)$$

$$\zeta_4 = 1 - \frac{l_2}{f_1} \quad (2-25)$$

$$\zeta_5 = l_1 \quad (2-26)$$

パラメータ ζ_2 と ζ_3 は、リング入射点での運動量拡がりに、パラメータ ζ_1 と ζ_4 は、第2デバンチャーの非線形性に、 ζ_5 は、第1デバンチャーの非線形性に関連付けられる。上記の5つのパラメータを最小にすることによって、デバンチャーシステムの最適な設定を見つけることができる。しかしながら、パラメータのいくつかは、同時に最小化することが出来ない。そこで、最適化するパラメータの優先順位を明確にして、各パラメータに適切な重み付けを設定することが重要とある。J-PARC L3BTの場合には、 ζ_1 と ζ_2 に優先権を与えることとし、非線形性を考慮してパラメータの慎重な選択を行い、 $\zeta_1 = 0$ の条件を採用する。すると、第1デバンチャーの強さは、(2-27)式で求まる。

$$f_1 = \frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2} \quad (2-27)$$

そのとき、パラメータ ζ_2 は

$$\zeta_2 = -\frac{l_1}{l_2} \quad (2-28)$$

となる。(2-26)式より、リング入射点でのより小さい運動量拡がりを達成するためには、より小さい l_1 とより大きい l_2 が望ましいことが分かる。(2-27)式を用いると残りのパラメータ ζ_3 と ζ_4 は、

$$\zeta_3 = -\frac{l_2}{f_2 l_1} + \frac{l_1 + l_2}{l_1 l_2} \quad (2-29)$$

$$\zeta_4 = -\frac{l_2}{l_1} \quad (2-30)$$

となる。ここで、問題なく $\zeta_3 = 0$ とすることが出来るので、第2 デバンチャーの強さが以下のよう
に求まる。

$$f_2 = \frac{l_2^2}{l_1 + l_2} \quad (2-31)$$

ここで、 f_1 と f_2 には、以下の関係式が成り立つ。

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{l_1}{l_2} \quad (2-32)$$

経験的に、適切な l_1/l_2 の値は、およそ0.2~0.3
であるように思える。しかしながら、運動量ジッ
ターの補正効率、達成可能な最小運動量拡がり、
デバンチャー空洞とそれらの電源の費用、幾何学
的な制限などの様々な要素を検討した上で、それ
ぞれの加速器の特徴に応じて、最適なパラメータ
を決定する必要がある。

L3BT のデバンチャーシステムに関しては、幾何
学的な配置の制限を考慮して、線形加速器出口と
第1 デバンチャー間の距離を 33.9m、第1、第2
デバンチャー間の距離を 122.7m、第2 デバンチャー
と RCS 入射点間の距離を 164.6m と決定した。
その結果、第1 デバンチャー空洞の焦点距離 f_1 は
18.7m、第2 デバンチャー空洞の焦点距離 f_2 は
67.6m と求まる。

2.3. シミュレーション

デバンチャーシステムの機能を確認するために、
PARMILA^[2]を用いてMEBT から RCS 入射点までのシ
ミュレーションを実施する。ピーク電流は 30mA
を仮定する。MEBT 入口でのビームの初期分布とし
ては、RFQ の実験とシミュレーション結果から求
めたビーム分布を使用する。初期パラメータを
Table 1 に、L3BT のデバンチャーシステムの設計
仕様を Table 2 に、シミュレーション結果を Table
3 に示す。

Table 3 の最後の2列が、リング入射点での運
動量ジッターを含む 99.9%運動量拡がりの最大値
と最小値を示す。RCS 入射点での運動量拡がりを
 $\pm 0.2\%$ 以下にするという要求仕様を満足してい
ることが確認できる。

Table 1 MEBT 入口での初期パラメータ

粒子数	95322 粒子
$\epsilon_{x0}(\text{rms})$	$0.212 \pi \text{ mm}^*\text{mrad}$
$\epsilon_{y0}(\text{rms})$	$0.212 \pi \text{ mm}^*\text{mrad}$
$\epsilon_{z0}(\text{rms})$	$0.091 \pi \text{ MeV}^*\text{deg}$
$\epsilon_{x0}(99.5\%)$	$2.08 \pi \text{ mm}^*\text{mrad}$
$\epsilon_{y0}(99.5\%)$	$2.05 \pi \text{ mm}^*\text{mrad}$
$\epsilon_{z0}(99.5\%)$	$1.32 \pi \text{ MeV}^*\text{deg}$

Table 2 デバンチャーシステムの設計仕様

	単位	仕様
\tilde{l}_1	m	33.9
V_1	MV	1.431
σ_1	deg	-90
\tilde{l}_2	m	122.7
V_2	MV	0.458
σ_2	deg	-90
\tilde{l}_3	m	164.6

Table 3 シミュレーション結果

		計算結果
W_1	MeV	181.024
Φ_1	deg	-89.439
ΔW_1	MeV	0.014
W_2	MeV	181.037
Φ_2	deg	-90.080
ΔW_2	deg	-0.001
W_3	MeV	181.037
$(\Delta p/p)_{max}$	%	0.019
$(\Delta p/p)_{min}$	%	-0.017

次に、第2 デバンチャーの電圧を変化させた場
合のリング入射点の運動量拡がり
と運動量ジッターのシミュレーション結果を Fig. 2、Fig. 3
に示す。Fig. 2、Fig. 3 より、第2 デバンチャー
の電圧を変化させることで、リング入射点の運動
量ジッターを殆ど変化させずに、運動量拡がりを
調整することができることが確認できる。

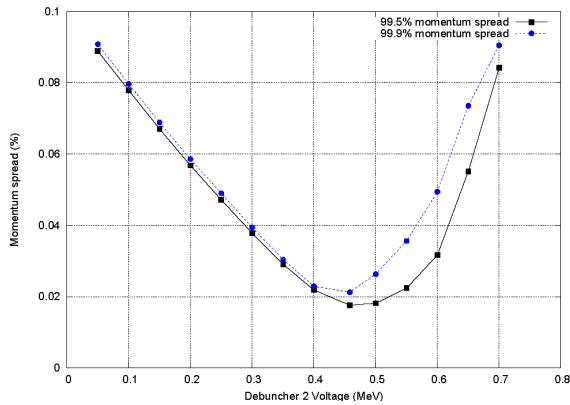


Fig. 2 第2デバンチャーの電圧と運動量拡がりのシミュレーション結果

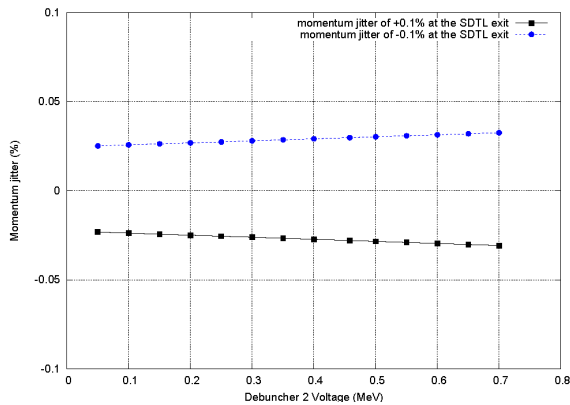


Fig. 3 第2デバンチャーの電圧と運動量ジッタのシミュレーション結果

2.4. ビームコミッショニング

ビームコミッショニングにて、デバンチャーシステムの機能を確認するために、最初にデバンチャーを用いた運動量拡がりの制御を試みた。デバンチャー機能を確認するためには、第2デバンチャーの下流で運動量拡がりの変化を測定する必要があるが、直接運動量拡がりの測定ができるビームモニタが設置されていない。そこで、運動量拡がりを評価するために、有限な分散関数が存在する位置での水平方向のビームサイズを測定することとした。具体的には、30度ダンプモードのビームコミッショニングにて、第2デバンチャーのパラメータを変化させて、ビームサイズを測定する。更に、第2デバンチャーの影響をビームサイズに大きく反映させる為、第1アークの4極電磁

石をDBAではなく、Fig. 4に示すような分散関数がダンプラインで発生するよう調整する。Fig. 4では、 s はビームラインに沿った距離を表し、 $s=0\text{m}$ はL3BT入口に対応している。この設定では、測定位置での電流0の分散関数 η_{nsc} は -8m に達する。そして、デバンチャー2の振幅と位相を変化させて、30度ダンプライン最下流のワイヤスキャナーでビームサイズを測定する。第2デバンチャーの振幅と位相をパラメータとして、分散関数の計算結果をTable 4、Table 5にそれぞれ示す。空間電荷有りの分散関数 η_{sc} は、第2デバンチャーの電圧に応じて $-7\sim-10\text{m}$ と変化する。

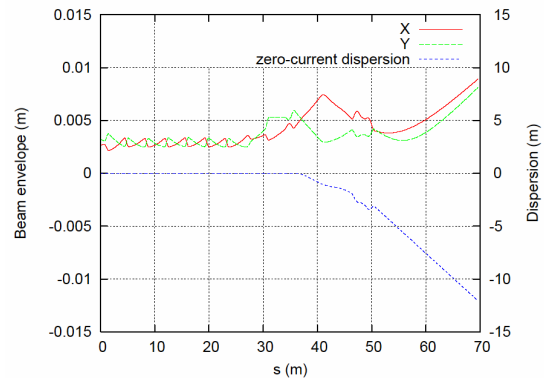


Fig. 4 運動量拡がり測定ために変更されたビームエンベロープ

Table 4 空間電荷有りと無しの分散関数と第2デバンチャー電圧の関係

$V_2(\text{MV})$	0.0	0.18	0.27	0.36	0.45	0.54
$\phi_2(\text{deg})$	-90	-90	-90	-90	-90	-90
$\eta_{sc}(\text{m})$	-7.71	-7.33	-7.23	-9.70	-9.36	-8.99
$\eta_{nsc}(\text{m})$	-8.06	-8.06	-8.06	-8.06	-8.06	-8.06

Table 5 空間電荷有りと無しの分散関数と第2デバンチャー位相の関係

$V_2(\text{MV})$	0.45	0.45	0.45	0.45
$\phi_2(\text{deg})$	-90	-100	-110	-130
$\eta_{sc}(\text{m})$	-9.36	-9.40	-9.52	-9.26
$\eta_{nsc}(\text{m})$	-8.06	-8.00	-8.02	-8.03

第2デバンチャーの振幅と位相を変化させて、ワイヤスキャナー位置でのビーム中心位置を測定した。Fig. 5に、第2デバンチャーの位相を変化させた場合のビーム中心位置のシフト量の測

定結果とシミュレーション結果を、Fig. 6 に、第 2 デバンチャーの振幅を変化させた場合のビーム中心位置のシフト量の測定結果とシミュレーション結果を比較して示す。Fig. 5 より、ビーム中心のシフト量の傾きから、実際にビームが感じる第 2 デバンチャーの RF 振幅を推定することができる。第 2 デバンチャーの振幅の推定値は、位相スキャンによる調整で得られた値より、およそ 8% 小さい。また、Fig. 6 より、第 2 デバンチャーの振幅を変化させた場合には、ビーム中心は変化しないはずであるが、第 2 デバンチャーの位相がずれていると仮定すると、ビーム中心位置の変化量の測定結果から、第 2 デバンチャーの位相のずれ量は、2 deg 程度と求まる。

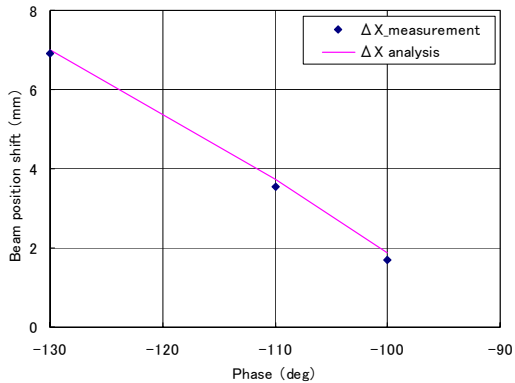


Fig. 5 ビーム中心変化量 (第 2 デバンチャーの位相を変化させた場合)

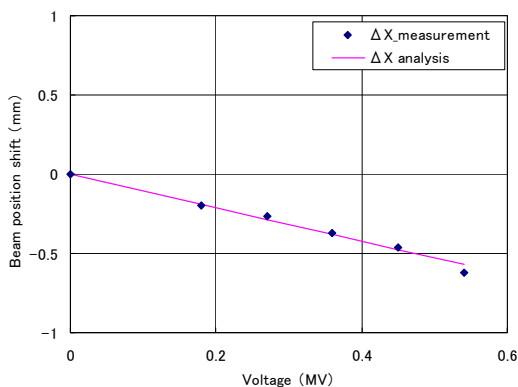


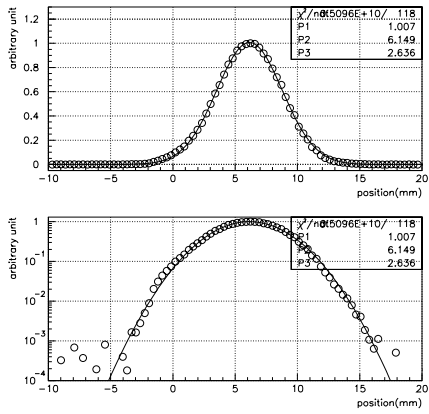
Fig. 6 ビーム中心変化量 (第 2 デバンチャーの振幅を変化させた場合)

これらの結果は、2 空洞デバンチャーシステムの設計手法が正しいことを示しており、それに用

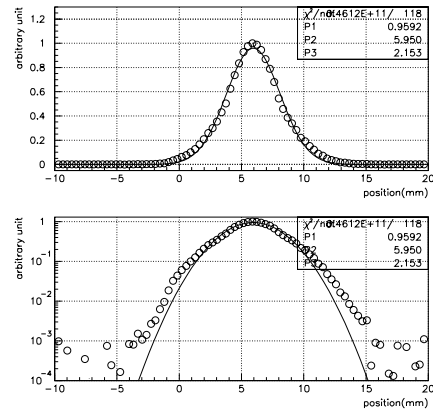
いた PARMILA によるビームシミュレーションは、実際のビームコミッショニングの結果を予測する上で非常に有効である。

更に、第 2 デバンチャーの振幅を変化させて、ワイヤスキャナーを用いてビームプロファイルを測定した。Fig. 7 に、第 2 デバンチャーの振幅を変化させた場合のビームプロファイルの測定結果を示す。Fig. 7 のグラフは、ワイヤスキャナーの測定結果を上段は縦軸を linear scale で、下段は log scale で表示したものである。Fig. 7 より、第 2 デバンチャーの振幅を変化させるとビームサイズが変化することが分かる。これは、第 2 デバンチャーの振幅により、ワイヤスキャナー位置での運動量拡がりが増加し、分散関数に依存してビームサイズが変化するためである。

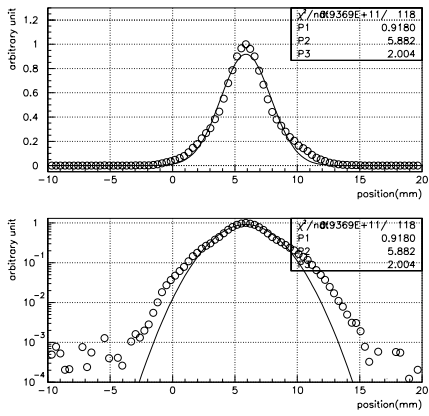
Fig. 7 の log scale の分布を見るとテールの部分が若干左右非対称になっていることが確認できる。これは、LINAC のビームがワイヤスキャナーの位置でエネルギーの低い粒子が若干多い分布になっていることを示している。但し、第 2 デバンチャーの振幅が小さい場合は、ビーム分布がガウス分布に近いことが確認できる。そして、第 2 デバンチャーの振幅が大きくなるにつれて、ビームテールが明確になる傾向がある。測定された現象は、Fig. 8 に示されるようにシミュレーションで再現することができる。Fig. 9 に示されるようにシミュレーションでは、わずかな縦方向のテールが SDTL 出口で引き起こされている。そして、高エネルギー成分が、低エネルギー成分より顕著である。Fig. 8 に示すように、第 2 デバンチャーを励起しない場合は、ビーム分布は、ほとんどガウス分布である。第 2 デバンチャーの振幅を増加させるにつれて、明確な縦方向のテールが現れる。このシミュレーションでは、SDTL 出口で縦方向のテールが、上流の DTL と SDTL の RF の調整誤差によって引き起こされていて、それが、ワイヤスキャナーの位置で、低エネルギー側のテールとして測定される。



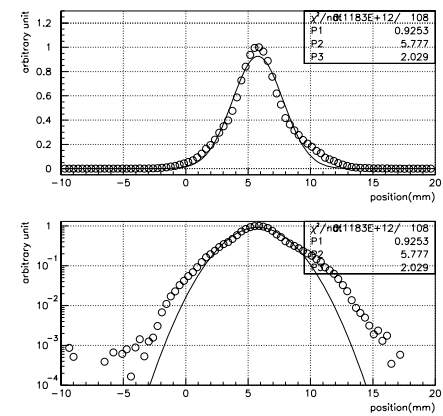
(1) 0.0 MV



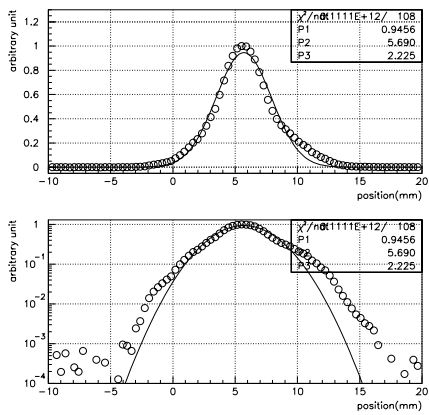
(2) 0.18 MV



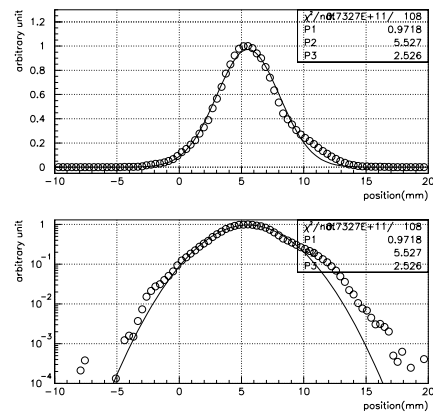
(3) 0.27 MV



(4) 0.36 MV



(5) 0.45 MV



(6) 0.54 MV

Fig. 7 ビームプロフィール測定結果

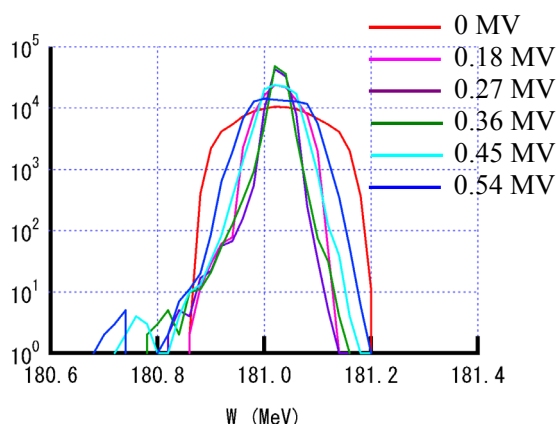


Fig. 8 ワイヤスキャナー位置での縦方向ビーム分布のシミュレーション結果

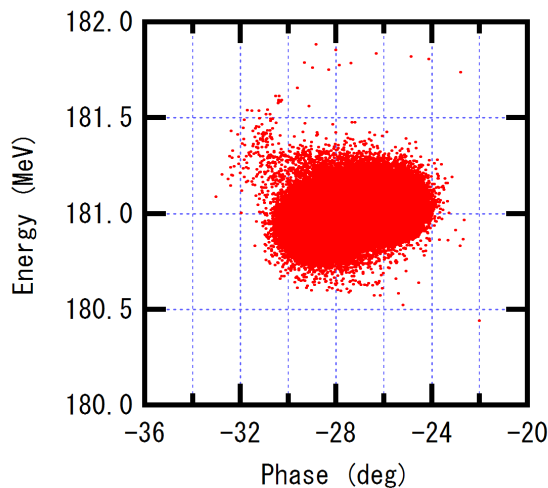


Fig. 9 SDTL 出口で縦方向位相空間のシミュレーション結果

3. 横方向スクレーパシステム

3.1. 序論

RCS 入射点での非規格化 99.9%エミッタンスが $6 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 以下の要求仕様を満足するために、L3BT には、横方向スクレーパシステムが設置されている。ここでは、スクレーパシステムのビーム力学について説明する。

大強度陽子線形加速器では、陽子の代わりに、負水素イオンが加速されている。そのため、RCS 入射点でのエミッタンスが要求仕様を満足する

ようテール粒子をスクレーパにて荷電変換し、スクレーパ以降最初の偏向電磁石にて主ビームから分離して、所定のダンプに輸送するスクレーパシステムが採用されている。J-PARC では、わずかなビーム損失でさえ激しい残留放射線を引き起こす可能性があるため、荷電変換された粒子を損失させることなく輸送することが重要である。このシステムでは、陽子と負水素イオンを同時に輸送する必要があり、負水素イオンに対しては、横方向のミスマッチを避けることが出来ないため、シミュレーションによりビーム損失を厳密に評価することが必要不可欠である。そのため、L3BT の横方向スクレーパに関する多粒子シミュレーションのために GEANT と IMPACT を組み合わせたシミュレーションツールを開発した。^[3]

J-PARC 線形加速器からの出力エネルギーは 181MeV である。線形加速器のピーク電流は 30mA であり、線形加速器のピーク出力は 38kW である。スクレーパシステムのためのビームダンプの容量が 2kW であるため、ビーム損失が許容できるレベルにある場合は、スクレーパで総ビーム電流の 5%を削除することができる。ビーム輸送系のビーム損失の限界は、メンテナンスのための実証的な限界として広く受け入れられている 1W/m に設定する。

3.2. スクレーパの光学設計

L3BT のスクレーパセクションは、4 周期の単純な FODO セルで構成され、水平方向スクレーパと垂直方向スクレーパがそれぞれ 4 台ずつ設置される。FODO セルの周期長は 8m で、1 セル当たりの位相進みはおよそ 45 度に設定されている。スクレーパの荷電変換フォイルとしては、1 対の独立に位置調整可能な炭素フォイルが用いられ、スクレーパ本体は、ビームハローを取り除くために、各 4 極電磁石の直後に設置される。8 台のスクレーパにより、水平、垂直方向とも位相空間では八角形のビームが形成される。テール粒子は、炭素フォイルにより陽子に荷電変換されて、スクレーパセクション入口から 67m 下流に位置するビームダンプに導かれる。

フォイルの厚さの選択は、スクレーパの設計で主要な問題であり、大角度散乱確率とフォイル寿命とのトレードオフを慎重に検討する必要がある。大角度散乱確率の増加は、非制御のビーム損失の増加につながり、その結果、スクレーパセクションのメンテナンス性を害するかもしれない。一方、フォイル寿命の減少は、フォイルスクレーパに短周期でのメンテナンスが必要となる。また、取り扱いの簡便さは、フォイル寿命と関連して重要な問題である。薄いフォイルは、誤った取り扱いや突然の真空パージによって、容易に破れることに注意すべきである。フォイル厚さの選択に関する基本的な考え方は、許容できるビームの損失の限界の中で最も厚いフォイルを選択することである。この点で、フォイル厚さを最適化する際に、非制御のビーム損失量を予測するための厳密な多粒子シミュレーションが必要となる。

3.3. 解析モデル

大強度ビームのシミュレーションを行うために IMPACT^[4]を採用する。IMPACT は LBNL で開発された 3 次元 PIC コードであり、空間電荷効果を考慮して、多種類のビームを扱うことができる。炭素フォイルと負水素イオンの衝突における散乱過程は、GEANT を用いてモデル化される。IMPACT と GEANT をシリーズで実行させることで、コリメーションを含む多粒子シミュレーションを実施する。

炭素フォイルと負水素イオンの衝突における散乱過程では、GEANT で求めた計算結果から得られるフィッティング関数を使用しないで、常に、フォイルスクレーパのそれぞれの散乱事象を GEANT を使用して計算する。それは、確率密度の典型的なフィッティング関数として、

$$f(\theta, dE_s) = A\theta \exp\left[-\left(\frac{\theta}{\sigma_\theta}\right)^{p_\theta}\right] \exp\left[-\left(\frac{dE_s}{\sigma_E}\right)^2\right] \quad (3-1)$$

を用いると、Fig. 10 に示すように、1.8~4mrad のまれな大角度散乱確率を過小評価するからである。それがかなり小さく見えたとしても、フォイルの厚さを最適化する際に非制御のビーム損失量を厳密に予測するためには、この過小評価を見落とすべきでない。

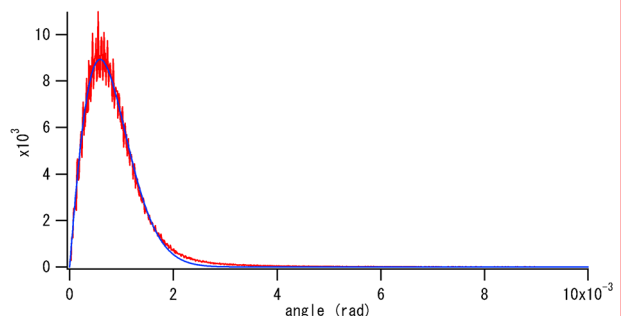


Fig. 10 確率密度の典型的なフィッティング関数

3.4. シミュレーション

スクレーパシステムの機能を確認するために、開発したシミュレーションツールを用いて MEBT 入口から RCS 入射点までのシミュレーションを実施する。ピーク電流は 30mA と仮定する。Table 1 に示したのと同じビーム分布を MEBT 入口でのビームの初期分布として用いる。スクレーパの荷電変換フォイルは、それぞれ上流の 4 極電磁石中心から 0.85m の位置に設置される。荷電変換フォイルの垂直または水平方向の設置位置は非正規化 99% エミッタンスと β 関数を用いて決定する。

8 台のスクレーパで荷電変換された粒子の偏向電磁石前後での粒子分布の計算結果を Fig. 11、Fig. 12 に示す。

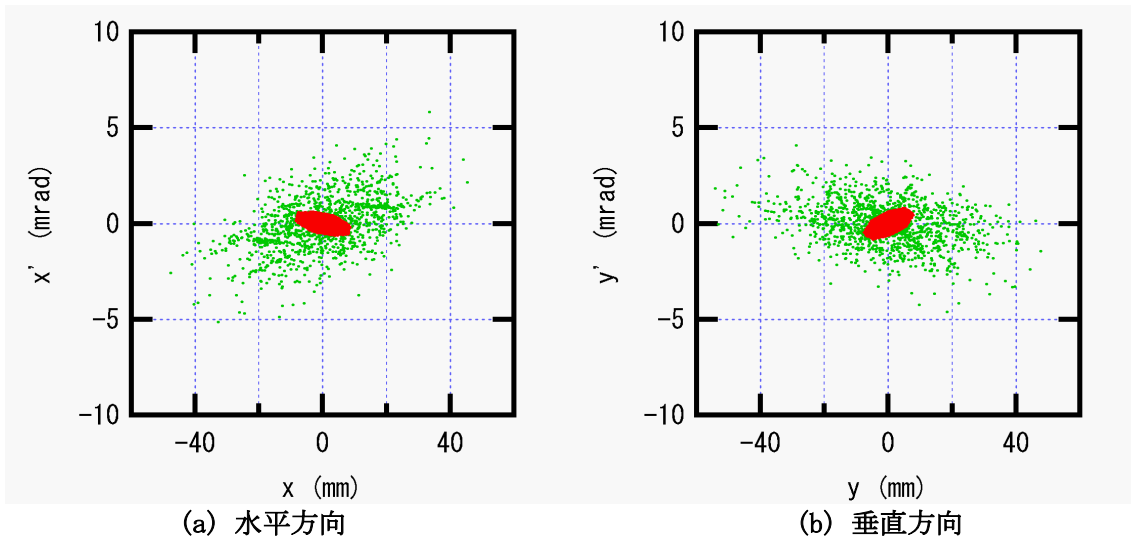


Fig. 11 粒子分布 (偏向電磁石直前)

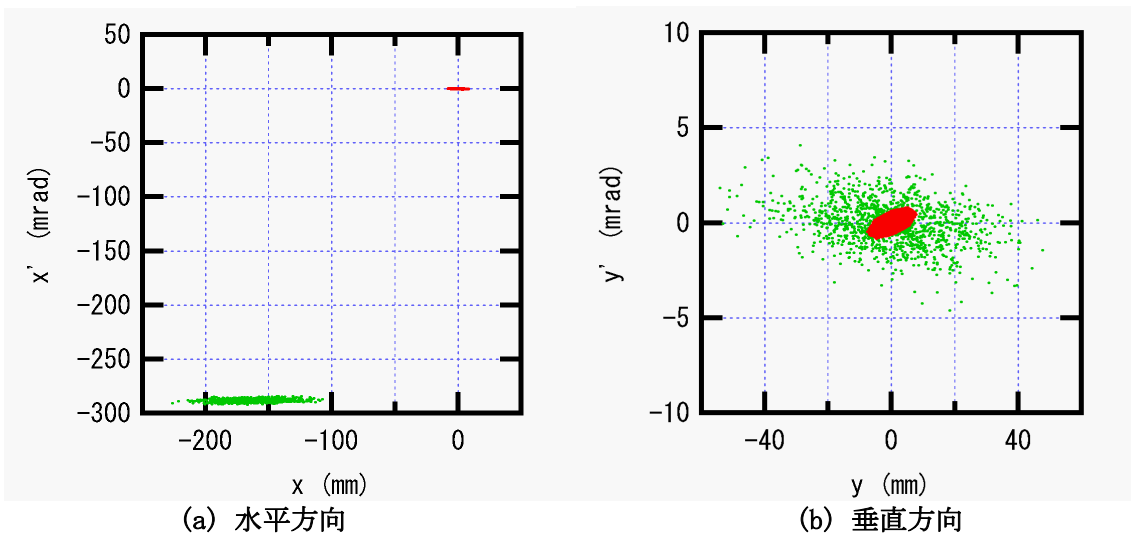


Fig. 12 粒子分布 (偏向電磁石直後)

偏向電磁石直後では、負水素ビームと陽子ビームは、水平方向に 164 mm 程度分離されている。また、初期分布 95322 粒子のうちスクレーパ部で 1342 粒子が荷電変換されている。スクレーパで荷電変換されるビーム出力をスクレーパ部で荷電変換される粒子の MEBT 入口での初期粒子数に対する比で評価すると 0.535 kW となる。

RCS 入射点での非規格化エミッタンスの計算結果を Table 6 に、粒子分布の計算結果を Fig. 13 に示す。Table 6 より、RCS 入射点でのエミッタンスは、スクレーパ無しの場合、非規格化 99.9% エミッタンスが要求仕様 $6\pi\text{ mm} \cdot \text{mrad}$ を大きく上回るが、スクレーパを用いることで、RCS 入射点

での非規格化 99.9% エミッタンスが $6\pi\text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 以下に低減されることが確認できる。

Table 6 シミュレーション結果

	単位	スクレーパ	スクレーパ
		無し	有り
$\epsilon_{X_{99.9}}$	$\pi\text{ mm} \cdot \text{mrad}$	8.94	4.98
$\epsilon_{Y_{99.9}}$	$\pi\text{ mm} \cdot \text{mrad}$	11.20	4.84
$\epsilon_{X_{100}}$	$\pi\text{ mm} \cdot \text{mrad}$	13.96	6.11
$\epsilon_{Y_{100}}$	$\pi\text{ mm} \cdot \text{mrad}$	27.73	5.78

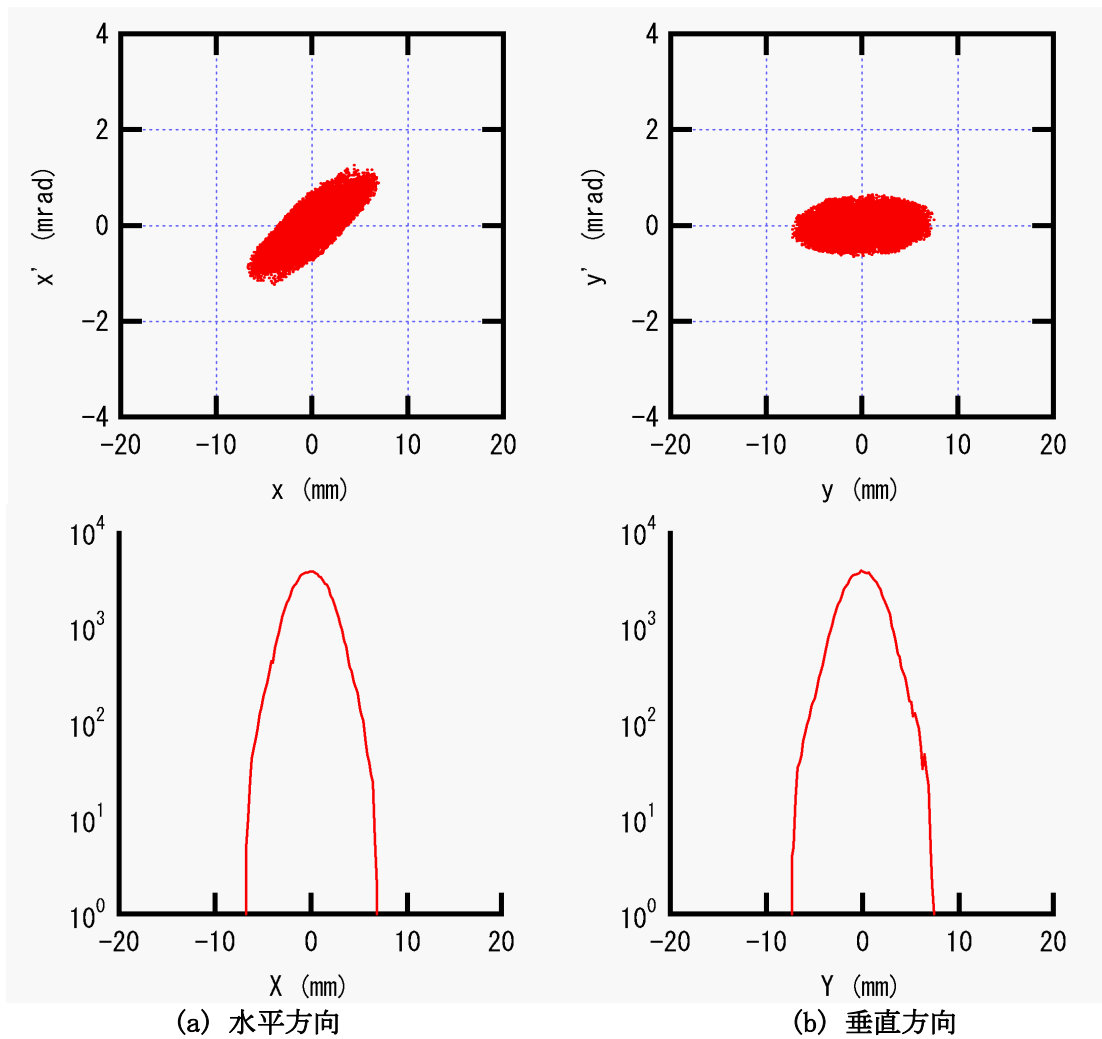


Fig. 13 粒子分布 (RCS 入射点)

スクレーパ部で陽子に荷電変換されたテール粒子は、スクレーパ部以降ビームダンプまで輸送される際に、ビームダクトに衝突することにより38粒子が消失する。スクレーパで荷電変換されるビーム出力を0.535 kW とすると、ビームダンプまでのビーム輸送系でダクトに衝突することにより生じるビーム損失量は、67 mで約15.2 Wとなり、許容値1 W/mより小さく問題ない。

参考文献

[1] T. Ohkawa, M. Ikegami, "Separate-function Configuration of a Two-cavity Debuncher System", Nucl. Instr. and Meth. A 581, p. 606, 2007.

- [2] H. Takeda, "PARMILA", Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-98-4487, 1998.
- [3] T. Ohkawa, M. Ikegami, J. Qiang, P. Saha, "Macro-particle simulation study on transverse halo collimator for J-PARC linac", Nucl. Instr. and Meth. A 589, p. 1, 2008.
- [4] J. Qiang, R. D. Ryne, S. Habib, V. Decyk, "An object-oriented parallel particle-in-cell code for beam dynamics simulation in linear accelerators", J. Comput. Phys. 163, 2000.