

## Development of Beam Tuning Method for Particle Beam Therapy System

Takamichi Aoki<sup>\*A)</sup>, Hideaki Nishiuchi<sup>A)</sup>, Satoshi Totake<sup>B)</sup>, Futaro Ebina<sup>A)</sup>, Takahiro Yamada<sup>A)</sup>, Kazuyoshi Saito<sup>A)</sup>, Masumi Umezawa<sup>A)</sup>, Kazuo Hiramoto<sup>A)</sup>, Toshiyuki Terumuma<sup>C)</sup>, Takeji Sakae<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Energy and Environmental Systems Laboratory, Hitachi, Ltd.

7-2-1 Omika-cho Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 319-1221

<sup>B)</sup> Hitachi Works, Power Systems, Hitachi, Ltd.

3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 317-8511

<sup>C)</sup> Proton Medical Research Center, University of Tsukuba

1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-8575

### Abstract

A simplified beam tuning method, to shorten commissioning before ready for treatment, is requested according to recent widespread of particle beam therapy. Especially, beam position and size is needed to be tuned to a tolerance of sub-millimeters, in case of using a scanning irradiation system. Therefore, a new method of tuning beam transport is developed. Partial differential coefficients of beam parameters, such as beam sizes and dispersion function, with respect to K values of Q-magnets in beam transport are utilized in this method. A sensitivity matrix between the K values and the beam parameters is constructed from these coefficients, and utilized to obtain appropriate K values which realize target beam parameters precisely. This method was demonstrated in high energy beam transport of Proton Medical Research Center, University of Tsukuba. Results of tuning dispersion function and beam sizes by this method are reported here. The dispersion function was tuned from 5m to less than 0.2m and the both horizontal beam size and vertical beam size are tuned in the range of  $\pm 3\text{mm}$  respectively within 0.5mm precision.

## 粒子線治療システムにおけるビーム輸送系調整手法の開発

### 1. 背景と目的

近年、粒子線治療システム（以下、PBT）における早期の治療開始を実現するため、施設建設後から治療開始までのビーム調整期間の短縮化が求められている。また、照射野形成法によっては、適切なサイズのビームを所定の位置に、0.3mm程度の精度で照射するためにビーム輸送系の高精度な調整が求められる<sup>1)</sup>。さらに場合によっては、位置精度に加えてサイズにも1mm程度の精度での調整が求められる。

従来の輸送系調整ではQスキャンによるビームパラメータ測定<sup>2)</sup>と光学計算<sup>3)</sup>に基づき、四極電磁石の励磁量を得ていた。しかしながらPBTの輸送系では、設置面積の制約から、プロファイルモニタ台数が限られており、Qスキャン測定によるビームパラメータ測定が高精度にできない場合がある。また、四極電磁石や偏向電磁石が狭い範囲に複数設置されているため誤差磁場の影響を無視できず、光学計算で得るビームパラメータと実際のパラメータの間に差が生じる。以上の課題から、従来は目標の位置とビームサイズを実現するために複数回のQスキャン測定による四極電磁石調整が必要であった。

そこで、ビーム輸送系調整を容易に実現するため、一回のQスキャン測定で調整を完了させることを目標とした。従来の調整手法では実現が難しかった精度でビームパラメータ調整するために、ビーム形状の測定結果から目標ビームパラメータを実現する輸送系四極電磁石のK値を算出する手法を構築した。

### 2. 原理

複数台の四極電磁石によって下流のある点でのビームパラメータ（サイズ・分散関数など）を調整する場合を考える。開発した手法では、以下で定義する感度行列を用いる。感度行列は、下式(1)によって定義される、四極電磁石のK値によるビームパラメータの偏微分係数からなる行列である。ただし式(1)中の $K_j$ は四極電磁石のK値、 $p_i$ は調整対象となるビームパラメータで、水平・鉛直ビームサイズ、分散関数などである。また、四極電磁石のK値はビームの $B\rho$ 値を用いて下式(2)によって定義される。

$$S_{ij} = \frac{\partial p_i}{\partial K_j} \quad (1)$$

$$K = \frac{1}{B\rho} \frac{\partial B_x}{\partial y} = -\frac{1}{B\rho} \frac{\partial B_y}{\partial x} \quad (2)$$

この定義から、複数の四極電磁石のK値の微小変化を並べたベクトル $\Delta\mathbf{K}$ に対して、複数のビームパラメータの微小変化を並べたベクトル $\Delta\mathbf{p}$ は

$$\Delta\mathbf{p} = \mathbf{S} \cdot \Delta\mathbf{K} \quad (3)$$

と表わされる。ビーム輸送系中の四極電磁石の台数

\* takamichi.aoki.my@hitachi.com

を  $n$ 、調整対象のパラメータの数を  $m$  とすると、感度行列  $\mathbf{S}$  は  $n$  行  $m$  列の行列となる。ここで、 $m \leq n$  のとき、式(3)を解くことができ、微小なビームパラメータの変化  $\Delta \mathbf{p}$  に対して、

$$\Delta \mathbf{K} = \mathbf{M} \cdot \Delta \mathbf{p} \quad (4)$$

となる  $K$  値の変化量  $\Delta \mathbf{K}$  が存在する。上式 (4) に現れる行列  $\mathbf{M}$  は  $m = n$  の時は明らかに感度行列  $\mathbf{S}$  の逆行列であり、 $m < n$  の時は、 $\Delta \mathbf{K}$  の絶対値を最小化する条件を課すことにより感度行列  $\mathbf{S}$  の擬似逆行列となる。従って、以上をまとめて式(4)は

$$\Delta \mathbf{K} = (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \cdot \Delta \mathbf{p} \quad (5)$$

と表現できる。式(5)において、 $\Delta \mathbf{p}$  をビームパラメータの測定値と目標値の差とすると、左辺の  $\Delta \mathbf{K}$  は目標ビームパラメータを実現するための  $K$  値の変化量となる。すなわち、式(5)によって目標値を実現する四極電磁石の  $K$  値を得ることができる。

感度行列  $\mathbf{S}$  は以下の手法によって算出できる。まず  $Q$  スキャンによって輸送系入口での位相空間上の  $\sigma$  行列  $\sigma_i$  が測定できる。 $\sigma$  行列とはビームを構成する粒子の集団に対する、位相空間における分散共分散行列であり、下式(6)によって定義される。ここでは水平方向の変位を  $x$ 、鉛直方向の変位を  $y$ 、運動量のずれを  $\delta$  とおいた。 $\langle \cdot \rangle$  は平均を表わす。

$$\sigma = \begin{bmatrix} \langle xx \rangle & \langle xx' \rangle & \langle xy \rangle & \langle xy' \rangle & \langle x\delta \rangle \\ \langle x'x \rangle & \langle x'x' \rangle & \langle x'y \rangle & \langle x'y' \rangle & \langle x'\delta \rangle \\ \langle yx \rangle & \langle yx' \rangle & \langle yy \rangle & \langle yy' \rangle & \langle y\delta \rangle \\ \langle y'x \rangle & \langle y'x' \rangle & \langle y'y \rangle & \langle y'y' \rangle & \langle y'\delta \rangle \\ \langle \delta x \rangle & \langle \delta x' \rangle & \langle \delta y \rangle & \langle \delta y' \rangle & \langle \delta\delta \rangle \end{bmatrix} \quad (6)$$

通常、 $\langle xy \rangle$  など異なる空間成分の共分散は  $0$  となる。また、運動量と鉛直方向の運動も独立で  $\langle y\delta \rangle$  など  $0$  となる。以下ではそれを仮定する。輸送系の転送行列  $\mathbf{R}$  を用いて輸送系出口での  $\sigma$  行列  $\sigma_f$  は次式(7)によって表わされる。

$$\sigma_f = \mathbf{R} \sigma_i \mathbf{R}^T \quad (7)$$

ここで、輸送系を 1 台の四極電磁石とその上流と下流の系で分割し、それぞれの転送行列を  $\mathbf{R}_Q$ 、 $\mathbf{R}_1$ 、 $\mathbf{R}_2$  とおくと、 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_Q \mathbf{R}_1$  となる。また、四極電磁石の転送行列  $\mathbf{R}_Q$  とその  $K$  値による微分は、薄レンズ近似を用いることで

$$\mathbf{R}_Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \frac{d\mathbf{R}_Q}{dK} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

となる。さらに式(7)より、

$$\frac{\partial \sigma_f}{\partial K} = \mathbf{R}_2 \left\{ \frac{d\mathbf{R}_Q}{dK} \mathbf{R}_1 \sigma_i (\mathbf{R}_Q \mathbf{R}_1)^T + \mathbf{R}_Q \mathbf{R}_1 \sigma_i \left( \frac{d\mathbf{R}_Q}{dK} \mathbf{R}_1 \right)^T \right\} \mathbf{R}_2^T \quad (9)$$

となるため、この式から  $\sigma$  行列で表現できるパラメータの  $K$  値依存性が評価できる。例えば水平ビームサイズ  $\sigma_x$ 、鉛直ビームサイズ  $\sigma_y$ 、分散関数  $\eta_x$  とその勾配  $\eta'_x$  は、以下のようにそれぞれ  $\sigma$  行列の成分で表わされる。

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{\sigma_{11}}, \sigma_y = \sqrt{\sigma_{33}} \\ \eta_x &= \frac{\sigma_{15}}{\sigma_{55}}, \eta'_x = \frac{\sigma_{25}}{\sigma_{55}} \end{aligned} \quad (10)$$

これらのパラメータの  $K$  値による微分は

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial K} &= \frac{1}{2\sqrt{(\sigma_f)_{11}}} \cdot \left( \frac{\partial \sigma_f}{\partial K} \right)_{11} \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial K} &= \frac{1}{2\sqrt{(\sigma_f)_{33}}} \cdot \left( \frac{\partial \sigma_f}{\partial K} \right)_{33} \\ \frac{\partial \eta_x}{\partial K} &= \frac{1}{(\sigma_f)_{55}} \cdot \left\{ \left( \frac{\partial \sigma_f}{\partial K} \right)_{15} - \frac{(\sigma_f)_{15}}{(\sigma_f)_{55}} \cdot \left( \frac{\partial \sigma_f}{\partial K} \right)_{55} \right\} \\ \frac{\partial \eta'_x}{\partial K} &= \frac{1}{(\sigma_f)_{55}} \cdot \left\{ \left( \frac{\partial \sigma_f}{\partial K} \right)_{25} - \frac{(\sigma_f)_{25}}{(\sigma_f)_{55}} \cdot \left( \frac{\partial \sigma_f}{\partial K} \right)_{55} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

となる。この式(11)は各パラメータに対する感度行列の成分となる。式(7)(9)から式(11)の  $\sigma_f$  を消去できて、調整初期に一回の  $Q$  スキャン測定によって輸送系入口での  $\sigma$  行列  $\sigma_i$  が得られれば、各ビームパラメータと四極電磁石の  $K$  値依存性が導出できる。これを感度行列  $\mathbf{S}$  として構成し、式(5)を用いることで測定値を目標値に近づける  $K$  値の補正量を得ることができる。従来の光学計算で生じた目標ビームサイズと実測ビームサイズの差を低減可能となり、ビーム輸送系の調整が容易にできる。

### 3. 実証試験方法

前章の原理を用いた調整法を筑波大学陽子線医学利用研究センター（以下、PMRC）の高エネルギービーム輸送系（以下、HEBT）にて実証した。図1にHEBTの機器配置を示す。実験は偏向電磁石（以下、BM）1台を挟んだ二つの直線部で実施した。BMよりも上流の直線部を直線部A、下流の直線部を直線部Bとする。直線部AにはQ1～Q3の3台の四極電磁石が設置されている。直線部BにはQ4～Q9の6台の四極電磁石が設置されている。ビームの水平・鉛直形状を測定するプロファイルモニタが各直線部に1台ずつ設置されており、それらをP1～P2とする。これらのモニタは1mmピッチのマルチワイヤチェンバである。P1とP2で測定されるビーム形状のピーク位置をビーム位置とし、ビーム分布の標準偏差をビームサイズとした。

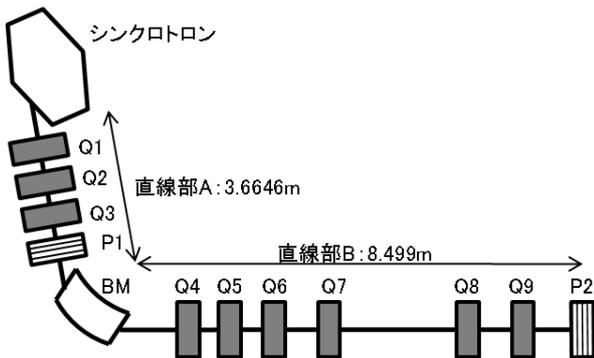


図1: PMRCのHEBT機器配置

実験は3ステップに分けられる。まず直線部AにおいてQスキャンによるビームパラメータ測定を実施した。続いて直線部Aの四極電磁石による分散関数調整、最後に直線部Bの四極電磁石によるビームサイズ調整の順に実施した。

プロファイルモニタでの分散関数は以下の手法で測定した。シンクロトロンから射出するビームエネルギーは200MeVを基準とし、この200MeVのビームと、エネルギーを-0.13%（運動量換算で-0.40%）変化させたビームの位置を測定する。運動量の異なる二種類のビーム間での水平方向ずれを $\Delta x$ 、運動量ずれを $\delta$ としたとき、分散関数 $\eta_x$ を

$$\eta_x = \frac{\Delta x}{\delta} \quad (12)$$

とした。

第1ステップのQスキャン測定では直線部AのQ1とQ2のK値を変化させ、P1でビームサイズと分散関数を各励磁量で測定した。この測定によって直線部Aの始点でのビームパラメータを得た。この結果得たビームパラメータから式(11)からP2におけるビームサイズと分散関数に対する感度行列を構築した。次に直線部Bで分散関数とその勾配が0になるように前章の原理に基づいてQ1～Q3を調整

し、P2での分散関数を測定し、分散関数が消えていることを確認した。最後に、B直線部のP2でのビームサイズ調整を実施した。P2において水平サイズ4.4mmと鉛直サイズ5.7mmを初期状態として、初期状態から $\pm 3\text{mm}$ の範囲で水平方向と鉛直方向独立に1mmごとに調整目標を選択した。ビームサイズの目標は初期状態からの差分によって表わし、水平ビームサイズに対する目標変化量を $\Delta\sigma_x$ とし、鉛直ビームサイズに対する目標変化量を $\Delta\sigma_y$ とする。調整目標は

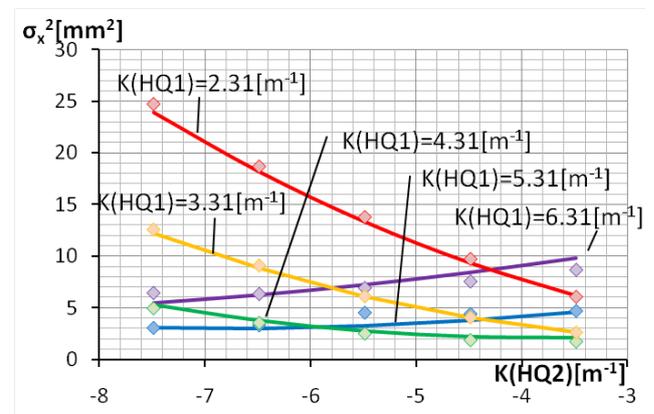
- $-3[\text{mm}] \leq \Delta\sigma_x \leq 3[\text{mm}]$ かつ $\Delta\sigma_y = 0[\text{mm}]$
- $-3[\text{mm}] \leq \Delta\sigma_y \leq 3[\text{mm}]$ かつ $\Delta\sigma_x = 0[\text{mm}]$
- $-3[\text{mm}] \leq \Delta\sigma_x \leq 3[\text{mm}]$ かつ $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y$
- $-3[\text{mm}] \leq \Delta\sigma_x \leq 3[\text{mm}]$ かつ $\Delta\sigma_x = -\Delta\sigma_y$

の4条件それぞれについて1mmごとに調整目標を定め、合計24ケースの調整目標についてビームサイズを前章の原理に基づいてQ4とQ6の励磁量を調整した。

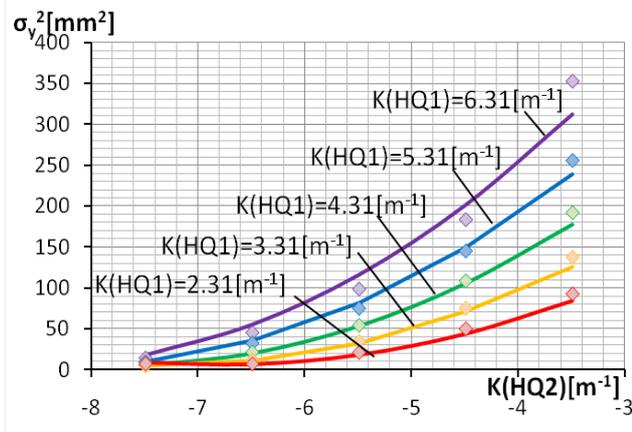
### 4. 実験結果

#### 4.1 ビームパラメータ測定結果

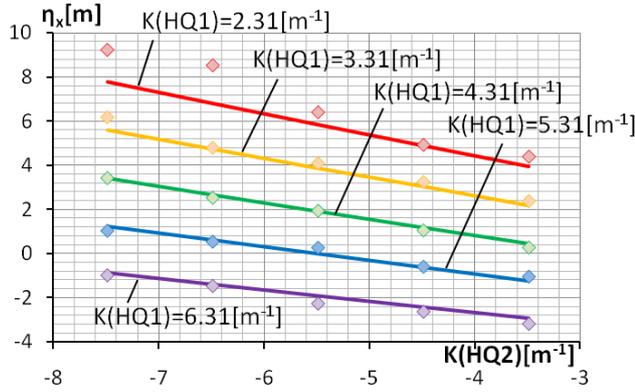
直線部AにおけるQスキャンの結果を図2に示す。(a)に水平ビームサイズ、(b)に鉛直ビームサイズ、(c)に分散関数のQスキャンでの振る舞いを示した。プロットは実測値を表わしている。光学計算に基づき、最小二乗法でこれらの測定結果を説明する直線部Aの始点でのビームのパラメータを求めた。下表1にその結果を示す。このパラメータを元に光学計算で得られるパラメータの振る舞いを図2に実線で示した。図2に示したように、光学計算と実際のビームサイズの間には最大で1.5mm程度、分散関数は最大1m程度のずれが生じる。そのため、以下で示すように、分散関数が5m程度生じた状態から、0mに調整でき、ビームサイズは $\pm 3\text{mm}$ の範囲で調整できれば、一度のQスキャンと光学計算による調整で残る調整残渣を開発した手法で補正できる。



(a)水平ビームサイズ



(b)鉛直ビームサイズ



(c)分散関数

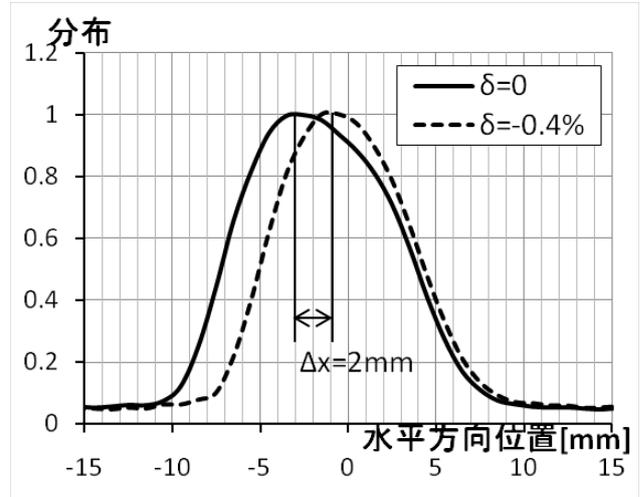
図 2: ビームサイズのQ スキャン測定結果

表 1: 直線部Aの始点での測定ビームパラメータ

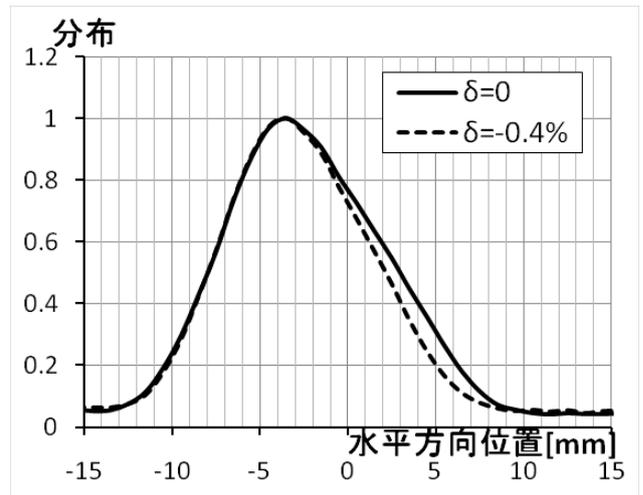
水平方向		鉛直方向	
項目	測定値	項目	測定値
$\sigma_{11}$	10.9[mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{33}$	20.6[mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{12}$	-0.79[mm mrad]	$\sigma_{34}$	3.0[mm mrad]
$\sigma_{22}$	0.47[ mrad <sup>2</sup> ]	$\sigma_{44}$	7.3[ mrad <sup>2</sup> ]
$\epsilon_x$	2.1[ $\pi$ mm mrad]	$\epsilon_y$	12[ $\pi$ mm mrad]
$\eta_x$	4.0[m]		
$\eta'_x$	0.4		

#### 4.2 分散関数調整結果

前節の結果から光学計算を用いて得た分散関数とその勾配に対する感度行列を構築し、調整前と調整後のP 2で測定された水平方向ビーム形状を図 3 に示す。実線が基準エネルギーのビーム形状、点線は運動量が 0.4% 小さいビームの形状である。図 3 から、調整前に分散関数が 5m 生じていたものを 0.2m 以下とすることができた。



(a)調整前の水平ビーム形状

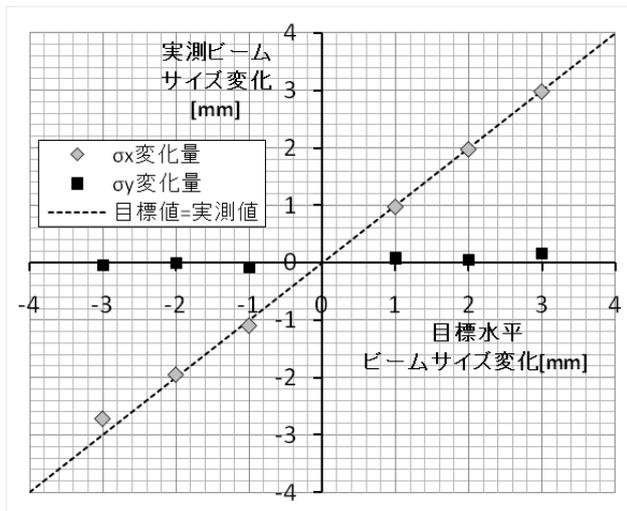


(b)調整後のビーム形状

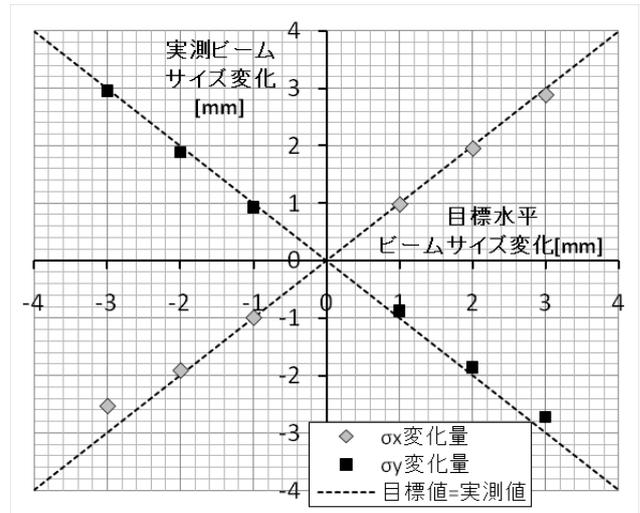
図 3: 分散関数の調整結果

#### 4.3 ビームサイズ調整結果

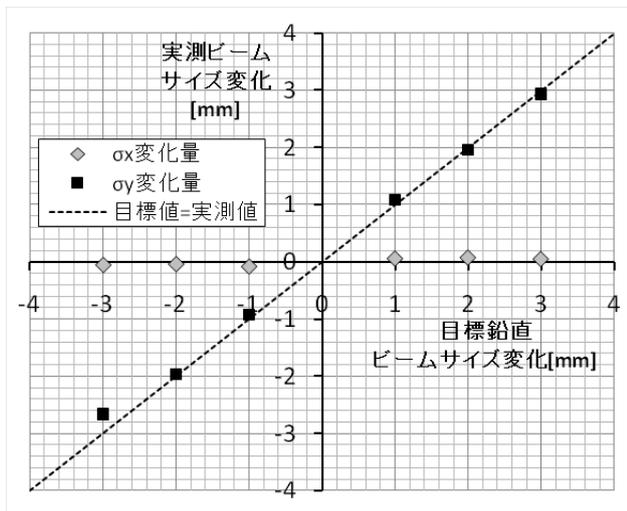
ビームサイズ調整結果を図 4 に示す。±3mm の範囲で水平ビームサイズのみを変化させた場合を(a)、鉛直ビームサイズのみを変化させた場合を(b)、各ビームサイズの変化目標値を同じ値とした場合を(c)、各ビームサイズの変化目標値を逆符号とした場合を(d)に示した。図 4 からわかるようにすべてのケースについて 0.5mm 以下の精度で調整が成功した。



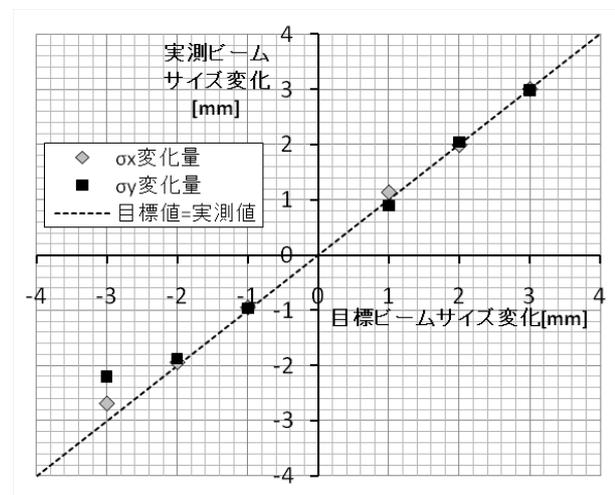
(a) 水平ビームサイズのみを±3mmで調整



(d) 水平・鉛直ビームサイズを異符号に同時調整



(b) 鉛直ビームサイズのみを±3mmで調整



(c) 水平・鉛直ビームサイズを同符号に同時調整

図 4: ビームサイズ調整結果

## 5. 結論

粒子線治療システムにおけるビーム輸送系調整手法を開発した。本手法はビームパラメータと四極電磁石のK値との関係を感度行列として表現し、K値の調整に用いる。感度行列は光学計算とQスキャン測定結果から導出する。PMRCのHEBTにて、ビームサイズと分散関数の調整について本手法を適用し、偏向電磁石直後の分散関数とその勾配の調整に成功した。分散関数は調整前5mだった状態から0.2m以下とすることができた。直線部におけるビームサイズは、±3mmの範囲で0.5mm以下の精度での調整に成功した。

今後はより複雑な機器配置、特にガントリー輸送系の先にあるアイソセンタでのビーム調整に本手法を適用し本手法を確立していく予定である。

## 参考文献

- [1] A.Smith, et al., "The M. D. Anderson proton therapy system", Medical Physics, Vol. 36, No. 9, September 2009
- [2] K.T. McDonald, D.P. Russell, "Methods of Emittance Measurement", [http://www.hep.princeton.edu/~mcdonald/accel/emit\\_meas.pdf](http://www.hep.princeton.edu/~mcdonald/accel/emit_meas.pdf), 1988
- [3] S.Y.Lee, "Accelerator Physics", World Scientific, p29~214, 1999