

DEVELOPMENT OF SIX-ELECTRODE BPM SYSTEM IN SPring-8 LINAC

Kenichi Yanagida*, Shinsuke Suzuki, Takemasa Masuda and Hirofumi Hanaki,
Japan Synchrotron Radiation Research Institute / SPring-8
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

Abstract

For an enhancement of beam observation system during the top-up operation the non-destructive beam position monitor (BPM) system is being upgraded to which can measure second-order moments in the SPring-8 linear accelerator. Equipments, i.e., BPMs, a signal processor and a digital input device, were developed so as to be suited for a high resolution six-channel parallel data acquisition with no requirement for additional physical spaces. The developed equipments are six-electrode BPMs with circular and quasi-elliptical cross section, a low noise six-channel signal processor and an OPT-VME 128-bit digital input board. A resolution of the BPM system is designed as $\sim 2 \mu\text{m}$ for first-order, $\sim 20 \mu\text{m}^2$ for second-order and $\sim 200 \mu\text{m}^3$ for third-order moments. From a result of beam test normalized moments of the BPM with circular cross section showed good agreement with the theory.

SPring-8 線型加速器六電極 BPM システムの開発

1. はじめに

SPring-8 線型加速器では、主にトップアップ運転時のビーム監視機能を増強させるため、非破壊型六電極ビーム位置モニタ (BPM) システムを整備している。1 台の六電極 BPM を使用した場合、ビーム広がり (サイズ) に関する物理量である二次モーメントが測定可能である。複数地点に設置された六電極 BPM から得られる複数地点の二次モーメントを測定すれば、分散部、非分散部を問わずビームサイズを演繹することも可能となる [1]。

昨年 の 年 会 に 於 いて、SPring-8 線型加速器では二次モーメント測定用円形断面六電極 BPM が設計・製作され、設置されることが報告された [2]。六電極 BPM のシステムは既存の四電極 BPM のシステムに比べチャンネル数が 1.5 倍となり、システムの拡張が必要となった。但し、空間の拡張性が殆ど無い機器設置場所が存在するため、全データ取得系を空間の拡張を伴わずに 4 系統から 6 系統へ系統数のみ拡張することとした。

新規に開発された機器は円形及び准楕円形断面六電極 BPM、六回路 BPM 信号処理回路及び OPT-VME128 ビットデジタル入力ボードである。ビームの二次モーメントを精度良く測定する為には、信号処理回路は低ノイズである必要があり、既存の四回路信号処理回路より一桁程度ノイズレベルの低い信号処理回路を開発した。

今年会ではこれら六系統を有する機器の開発状況を述べると共に、円形断面六電極 BPM の特性を確認するために行ったビーム試験の結果に就いて述べる。

2. 円形及び准楕円形断面六電極 BPM

図 1 は昨年報告した円形断面六電極 BPM の写真である。ダクト半径は 16 mm で、ストリップライン長は 27 mm である。ストリップライン形状は全て同一であり、特性インピーダンスは 50 Ω で設計されている。ダクト中心 (機械中心) からの各電極の占有角 (見込み角) は 30° である。

円形断面六電極 BPM は 2010 年度に 3 台納入され、2011 年 8 月に L4 ビーム輸送系内の円形断面四電極 BPM [3] 3 台と置き換えられた。目的は二次モーメントを測定し、ビームの Twiss パラメータ等の再現性を監視するためである。

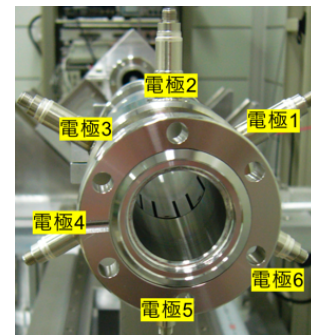


図 1: 円形断面六電極 BPM (写真)

図 2 及び図 3 は准楕円形断面六電極 BPM の写真及び図面である。機械加工を容易にするため、断面は楕円形ではなく、4 つの円弧からなる准楕円とした。准楕円の長半径及び短半径は 28 mm 及び 14 mm で、ストリップライン長は 27 mm である。ストリップライン形状は 2 種類あるが、特性インピーダンスは 50 Ω で、ダクト中心 (機械中心) からの各電極の占有角 (見込み角) は 30° で設計されている。

准楕円形断面六電極 BPM は 2011 年度に 2 台納入され、2012 年 7 月にシケイン部及び LS ビーム輸送系分散部の准楕円形断面四電極 BPM [4] 2 台と置き換えられた。目的は二次モーメントを測定し、ビームのエネルギー広がり ($\Delta E/E$) を監視するためである。

3. 絶対モーメントと規格化モーメント

ダクト中心 (機械中心) を原点とする n 次モーメントは絶対 n 次モーメント (n は自然数) と呼ばれる。図 1 及び図 2 の様な六電極 BPM に於いて測定可能な絶対モーメントは P_1 、 Q_1 、 P_2 、 Q_2 及び Q_3 である [5]。こ

* ken@spring8.or.jp

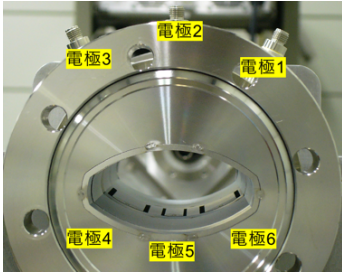


図 2: 准楕円形断面六電極 BPM (写真)

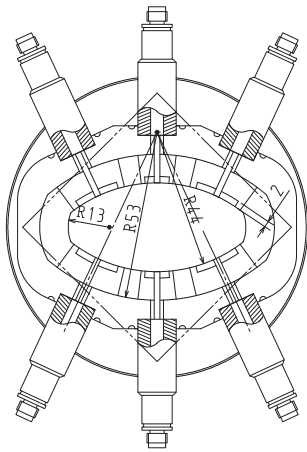


図 3: 准楕円形断面六電極 BPM (図面)

これらの絶対モーメントを得るために、各電極からの出力電圧の差分 C_1 、 S_1 、 C_2 、 S_2 及び S_3 を定義する。各電極からの出力電圧を $V_d (d = 1, \dots, 6)$ とする場合、

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \frac{V_1 - V_3 - V_4 + V_6}{V_1 + V_3 + V_4 + V_6}, \\
 S_1 &= \frac{V_1 + V_3 - V_4 - V_6}{V_1 + V_3 + V_4 + V_6}, \\
 C_2 &= \frac{kV_1 - 2V_2 + kV_3 + kV_4 - 2V_5 + kV_6}{kV_1 + 2V_2 + kV_3 + kV_4 + 2V_5 + kV_6}, \\
 S_2 &= \frac{V_1 - V_3 + V_4 - V_6}{V_1 + V_3 + V_4 + V_6}, \\
 S_3 &= \frac{KV_1 - V_2 + KV_3 - KV_4 + V_5 - KV_6}{KV_1 + V_2 + KV_3 + KV_4 + V_5 + KV_6}
 \end{aligned} \quad (1)$$

と定義する。 k 及び K は表 1 の通りである。

表 1: k 及び K パラメータ

	円形断面 (解析計算)	准楕円形断面 (数値計算)
k	1.000	1.918
K	1.000	3.056

絶対モーメントと出力電圧差分の比 P_1/C_1 、 Q_1/S_1 、 P_2/C_2 、 Q_2/S_2 及び Q_3/S_3 は幾何学的なパラメータで規格化モーメント^[5]と呼ばれる。図 1 及び図 2 のような六電極 BPM に於いては、規格化モーメントは実効開口半径 R_{Pn} 、 R_{Qn} の関数として式 (2) の様に表される。

R_{Pn} 、 R_{Qn} は表 3 の通りである。絶対モーメント P_n 及び Q_n を得る式は、式 (2) を変形して式 (3) となる。

$$\begin{aligned}
 \frac{P_n}{C_n} &= \frac{R_{Pn}^n}{2}, \\
 \frac{Q_n}{S_n} &= \frac{R_{Qn}^n}{2}.
 \end{aligned} \quad (2)$$

表 2: 実効開口半径 R_{Pn} 、 R_{Qn} [mm]

	円形断面 (解析計算)	准楕円形断面 (数値計算)
R_{P1}	18.69	18.03
R_{Q1}	32.38	54.84
R_{P2}	18.91	18.42
R_{Q2}	17.59	22.48
R_{Q3}	16.57	18.55

$$\begin{aligned}
 P_n &= \frac{R_{Pn}^n}{2} C_n, \\
 Q_n &= \frac{R_{Qn}^n}{2} S_n.
 \end{aligned} \quad (3)$$

4. 六回路 BPM 信号処理回路

線型加速器の BPM システムではシングルショットでのデータ取得が行われる。六電極 BPM システムに於いては 6 系統の信号処理及びデータ取得が平行して行われなければならない。既存システムは 4 系統であるため、2 系統を新たに追加し、拡張する必要がある。拡張の方法は 2 つ有り、一つは機器密度を変えず、旧来の信号処理回路及びデータ収集系にもう 2 系統追加する方法。もう一つは新規の 6 系統の信号処理回路やデータ収集系を開発し、機器密度を 1.5 倍に上げ、旧来機器のスペースに収める方法である。SPRING-8 線型加速器では後者の手法を採用することとした。

旧来の四回路 BPM 信号処理回路は NIM2 中のモジュール 2 台で構成される^[6]。一つはバンドパスフィルター (BPF) モジュールで他方は検波 (Detector) モジュールである。両方共に 4 系統の信号入出力がある。検波モジュール内部は過密状態であるため 2 系統を追加する余裕は無く、オフセット調整回路、タイミング遅延調整回路、サンプルホールド回路、サンプルホールドモニタ出力、アナログ出力を廃止して 2 系統分のスペースを確保した。

サンプルホールド回路を廃止した理由は、それがノイズ (バラツキ) の発生原因であったためである。近年、高速且つ低ノイズの ADC が発売されたため、サンプルホールド回路の必要性はなくなった。

図 4 は 2011 年度に開発された六回路 BPM 信号処理回路の写真である。対数検波回路としてアナログデバイス社の ADL5513 が使用されている。出力はデジタル出力のみとなった。ディジットは四回路 BPM 信号処理回路と同じ 16 ビットである。6 系統で合計 96 ビット分のデジタル出力が必要となるが、ケル社の 80 ピンコネクタ 2 個で 96 ビット分を確保している。

四回路 BPM 信号処理回路では $\pm 10V$ のアナログ出力が存在する。SPRING-8 線型加速器では今後も四回路及び

六回路信号処理回路が混在して使用されるため、便宜上六回路 BPM 信号処理回路のデジタル出力を ±10V のアナログ出力へ換算して使用する。換算は 0x0 ⇒ 0.0V、0x7FFF ⇒ 9.9997V、0x8000 ⇒ -10.0V 及び 0xFFFF ⇒ -0.0003V である。CW 入力パワーと出力電圧の換算は四回路 BPM 信号処理回路と同じく -60dBm ⇒ -6V、-30dBm ⇒ 0V 及び 0dBm ⇒ 6V である。

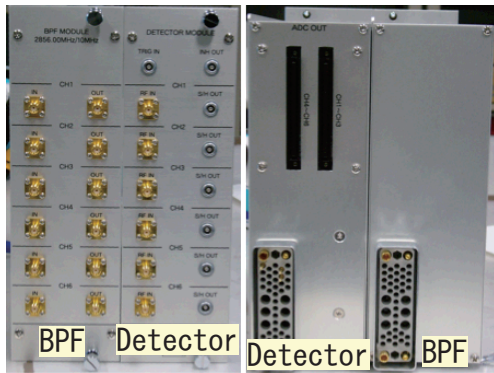


図 4: 六回路 BPM 信号処理回路 (写真)

ADC にはリニアテクノロジー社の LTC-2393-16 が使用されている。アキュイジション時間は 385 ns と高速で且つ、ノイズレベルは 0.3 bit (typical) と低ノイズである。ノイズレベルが 1 ビットより十分小さいため、予想されるショット毎のバラツキ (測定精度) は 0.5 ビット程度となる。これは、CW 入力レベルが 0 dBm 程度の場合、バラツキ (測定精度) w は 1.0×10^{-4} 程度となることを示している。測定精度 w は出力電圧差分と同じ無次元量である。

測定精度 w が決まると、絶対モーメントの分解能は単純に測定精度 w と規格化モーメント $R_{Pn}^n/2, R_{Qn}^n/2$ の積で求まり、表 3 の様になる。

表 3: 各絶対モーメントの分解能

	円形断面	准楕円形断面
P_1 [μm]	0.9345	0.9015
Q_1 [μm]	1.619	2.742
P_2 [μm^2]	17.88	16.96
Q_2 [μm^2]	15.47	25.27
Q_3 [μm^3]	227.5	319.2

5. 128 ビットデジタル入力ボード

図 5 は旧来の OPT-VME64 ビットデジタル入力 (DI) ボード (左側) と新規に開発された OPT-VME128 ビット DI ボード (右側) の写真である。128 ビット DI ボードは 2011 年度に開発された。64 ビット DI ボードでは入力用に高密度 26 ピン D-sub コネクタが 4 個が使用されていたが、128 ビット DI ボードでは六回路 BPM 信号処理回路と同じくケル社の 80 ピンコネクタが 2 個使用されている。六回路 BPM 信号処理回路と 128 ビット DI ボードとの結線はストレートである。入力ビット数は 96 ビットで十分なのであるが、64 ビット DI + 64 ビッ

ト DO ボードの DO 部を DI 部へ改造し、全て DI としたため 128 ビット DI となった。



図 5: OPT-VME64 ビット DI ボード (左側) と OPT-VME128 ビット DI ボード (右側)

6. データベースの信号変更

四電極 BPM を六電極 BPM に置き換えた場合、データベースに格納される信号点数が増え、データベースを拡張しなければならない。しかし、六電極 BPM へ置き換える度に、データベースに変更を加えるのは効率的では無い。そこで、全ての BPM の信号を六電極対応にした。

制御系の上位から見ると、四電極 BPM または六電極 BPM の如何に拘わらず、全て六電極対応のデータが VME 上のプロセスから送られる。四電極 BPM では対応する信号が存在しない場合があるが、その場合はゼロに相当する値が送られる。表 4 は四電極から六電極へ変更される信号の対応表である。

表 4: 四電極から六電極への信号名称変更

旧四電極対応		新六電極対応
Voltage1 [V]	→	Voltage1 [V]
	→	Voltage2 [V]
Voltage2 [V]	→	Voltage3 [V]
Voltage3 [V]	→	Voltage4 [V]
	→	Voltage5 [V]
Voltage4 [V]	→	Voltage6 [V]
Posx (=P ₁) [mm]	→	Posx (=P ₁) [mm]
Posy (=Q ₁) [mm]	→	Posy (=Q ₁) [mm]
	→	P _{g2} [mm ²]
Error (=Q ₂) [mm ²]	→	Q _{g2} [mm ²]
	→	Q _{g3} [mm ³]
Average Voltage [V]	→	Charge [nC]

7. 円形断面六電極 BPM のビーム試験

円形断面六電極 BPM は 2011 年 8 月に L4 ビーム輸送系内に設置され、2011 年 12 月及び 2012 年 2 月にビーム試験が行われた。不足する信号処理の系統は予備の四回路 BPM 信号処理回路を充当した。制御系データ収集系が六電極に未対応なため、現場近くに仮設のローカルなデータ収集系を構築した。BPM 信号処理回路のデジタル出力は全て高インピーダンス系なので、信号を二分岐することが可能である。BPM 信号処理回路からの信号の一方はローカルなデータ収集系へ接続され、残りは既存の制御系データ収集系へ接続された。既存の制御系データ収集系へ接続した理由は、ビーム位置を測定し、ビーム位置の自動補正を行っているためである。

ビーム試験の手法は、六電極 BPM より上流側の四極電磁石励磁量を変化させ、六電極 BPM 出力電圧から計算されたモーメントと隣接するスクリーンモニタのビームプロファイルから計算されたモーメントを比較した。図 6 及び図 7 はスクリーンモニタで取得されたビームプロファイル画像及びその等高線図である。



図 6: ビームプロファイル (画像データ)

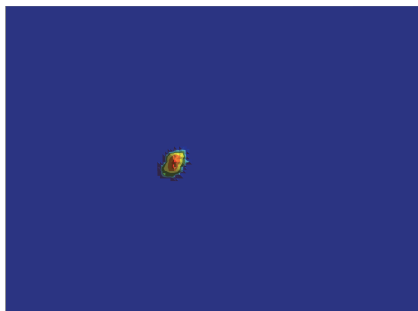


図 7: ビームプロファイル (等高線図)

図 7 で示される様な画像データに於いて、各セルの輝度分布を $I(x_i, y_j)$ とする。 x_i 及び y_j はスクリーン中心から各セルへの座標とする。 n 次絶対モーメントを計算するために、直交座標系での n 次モーメント $m_{n(l-n)}$ を式 (4) の様に定義する。 n 次絶対モーメントは式 (5)

から得られる。

$$\begin{aligned} m_{00} &= \sum_i \sum_j I(x_i, y_j), m_{10} = \sum_i \sum_j x_i I(x_i, y_j), \\ m_{01} &= \sum_i \sum_j y_j I(x_i, y_j), m_{20} = \sum_i \sum_j x_i^2 I(x_i, y_j), \\ m_{11} &= \sum_i \sum_j x_i y_j I(x_i, y_j), m_{02} = \sum_i \sum_j y_j^2 I(x_i, y_j), \\ m_{21} &= \sum_i \sum_j x_i^2 y_j I(x_i, y_j), m_{03} = \sum_i \sum_j y_j^3 I(x_i, y_j). \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} m_{00}P_1 &= m_{10}, m_{00}Q_1 = m_{01}, \\ m_{00}P_2 &= m_{20} - m_{02}, m_{00}Q_2 = 2m_{11}, \\ m_{00}Q_3 &= 3m_{21} - m_{03}. \end{aligned} \quad (5)$$

図 7 で示される画像データを式 (5) を用いて計算した結果、 $P_1 = 1.674 \text{ mm}$ 、 $Q_1 = 0.651 \text{ mm}$ 、 $P_2 = 1.987 \text{ mm}^2$ 、 $Q_2 = 3.544 \text{ mm}^2$ 及び $Q_3 = 11.448 \text{ mm}^3$ が得られた。ここで、モーメントの比較を行うのだが、BPM のダクト (機械) 中心とスクリーン中心が完全に一致していなければ絶対モーメントの比較は不可能である。しかしながら、相対モーメント (=ビームプロファイル重心からのモーメント) であれば、ビームプロファイルがほぼ同一なので比較可能となる。相対モーメント P_{g2} 、 Q_{g2} 及び Q_{g3} は絶対モーメントから式 (6) を使用して算出される^[5]。

$$\begin{aligned} P_1 &= b_G \cos \beta_G, Q_1 = b_G \sin \beta_G, \\ P_{g2} &= a_{g2}^2 \cos 2\alpha_{g2} = P_2 - b_G^2 \cos 2\beta_G, \\ Q_{g2} &= a_{g2}^2 \sin 2\alpha_{g2} = Q_2 - b_G^2 \sin 2\beta_G, \\ Q_{g3} &= Q_3 - b_G^3 \sin 3\beta_G - 3b_G a_{g2}^2 \sin(\beta_G + 2\alpha_{g2}). \end{aligned} \quad (6)$$

図 7 で示される画像データを式 (6) を用いて計算した結果、 $P_{g2} = -0.391 \text{ mm}^2$ 、 $Q_{g2} = 1.366 \text{ mm}^2$ 及び $Q_{g3} = 0.161 \text{ mm}^3$ が得られた。相対二次モーメント Q_{g2} が大きな値を持つ理由は、ビームプロファイルが 45° 方向に傾いているためである。

さて、2011 年 12 月のビーム試験で四極電磁石励磁量を変化させ、ビームプロファイルを変化させながら相対二次モーメントを測定したところ、相対二次モーメントの変化分は BPM とスクリーンモニタでほぼ一致したが、絶対値は一致しなかった。調査の結果、各電極間の減衰率が正しくなく、アンバランスな状態であることが判明した。そこで、2012 年 1 月にケーブルやバンドパスフィルター等の較正を行ったが、それでも無視できない程度に電極間減衰率のアンバランスが残った。

そこで、実ビームを使用してアンバランスを解消する手法を考案した。BPM の直上流にステアリング電磁石が存在し、ステアリング電磁石と BPM 間はドリフトスペースである。このような配置で、ステアリング電磁石の励磁量を変化させた場合、ビームがダクトや電極に当たらなければ相対モーメントは変化しない。2012 年 2 月のビーム試験では、ステアリング電磁石励磁量を変化させても、相対モーメント P_{g2} 、 Q_{g2} 及び Q_{g3} が変化しないようなバランス係数 (減衰率) を求めた。

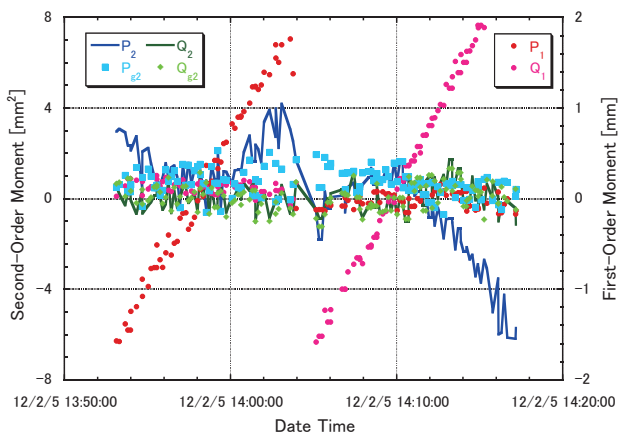


図 8: ステアリング電磁石励磁量変化時の各モーメント

図 8 は 2012 年 2 月ビーム試験の時系列データ (参考) である。ステアリング電磁石励磁量を変化させても相対モーメントが変化しない様な電極間バランス係数を入力してある。

このビーム試験により得られた電極間バランス係数を使用して、2011 年 12 月のデータを再解析した。スクリーンモニタと BPM で得られた相対二次モーメントの相関を示すグラフが図 9 及び図 10 である。残念ながら同一ビームショットでのプロットでは無いが、ショット毎のプロファイル変化がバラツキがとなって現れているが、原点を通り、ほぼ相関係数 1 を示している。これが意味するのは、このタイプの BPM に於いて、理論的な計算により規格化モーメントが正確に計算され、自己完結的な実ビームによるバランス較正を行えば、正常に動作させることが可能であることを示している。

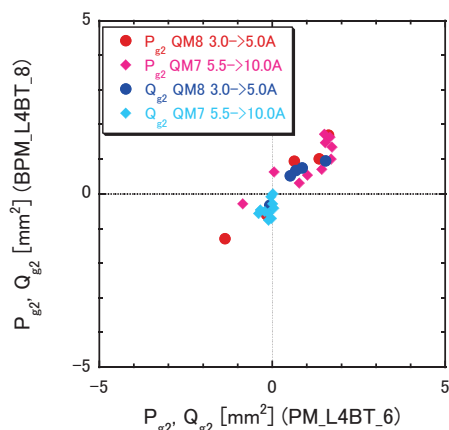


図 9: 四極電磁石励磁量変化時のモーメント相関

8. まとめ

二次モーメント測定用の六電極 BPM 本体、六回路 BPM 信号処理回路及び 128 ビットデジタル入力ボードを開発した。開発した各機器は、空間的な占有スペースは同じで、データ取得システムを 4 系統から 1.5 倍の 6 系統に拡張したものである。ハードウェア的には既存システムの系統拡張であるが、対数検波回路変更やサンプル

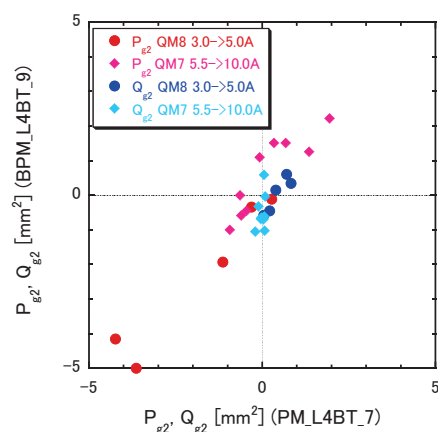


図 10: 四極電磁石励磁量変化時のモーメント相関

ホールド回路の廃止など、S/N を改善するための改良も同時に行われた。六電極化に伴い、取得される信号数が 1.5 倍に増加するため、これを機会にデータを格納するデータベースの拡張も行った。

円形断面六電極 BPM を L4 ビーム輸送系内に設置し、実ビーム試験を行った。各電極間のバランス係数 (減衰率) の決定には、ビーム位置を変化させても相対モーメントが変化しない特性を利用した。四極電磁石励磁量を変化させ、ビームプロファイルを変化させ、スクリーンモニタと六電極 BPM から得られる相対二次モーメントを比較した。相関は原点を通り、相関係数もほぼ 1 であった。これは、このタイプ (ストリップライン型) の BPM では、理論的な計算のみで正確な規格化モーメントが得られる事を示している。

参考文献

- [1] R. H. Miller, et al., "Nonintercepting Emittance Monitor", Proc. 12th Int. Conf. High-Energy Accel. (HEAC'83), Fermilab USA, 1983, pp. 603-605.
- [2] K. Yanagida, et al., "Design of The Six-Electrode Circular Cross-Sectional BPM for Second-Order Moment Measurement", Proc. of the 8th Particle Accel. Soc. of Japan, Tsukuba, August 2011, pp. 446-450, http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/MOPS063.pdf.
- [3] K. Yanagida, et al., "A BPM System for the SPring-8 Linac", Proc. of the 20th Int. Linac Conf., Monterey USA, Aug. 2000, pp. 190-192, <http://www.slac.stanford.edu/econf/C000821/MOC17.pdf>.
- [4] K. Yanagida, et al., "Beam Instrumentation Using BPM System of The SPring-8 Linac", Proc. of the 22th Int. Linac Conf., Lubeck Germany, Aug. 2004, pp. 438-440, <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/104/PAPERS/TUP73.PDF>.
- [5] K. Yanagida, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**, 012801 (2012), <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.15.012801>.
- [6] K. Yanagida, et al., "Signal Processor for SPring-8 Linac BPM", Proc. of the 5th European Workshop on Diagnostics and Beam Instr., Grenoble France, May 2001, pp. 162-164, <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/d01/papers/PM02.pdf>.