

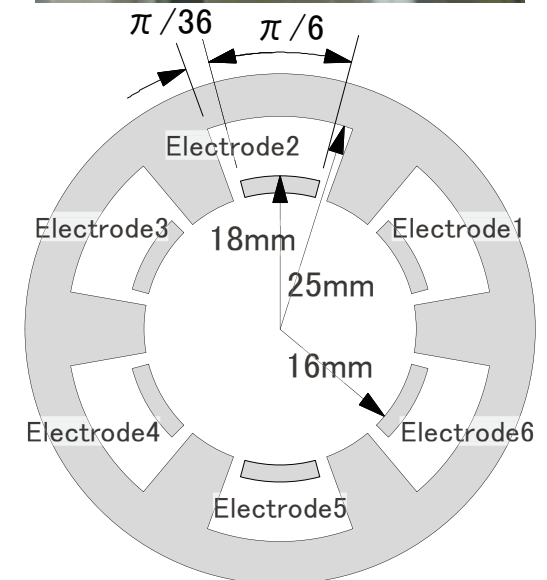
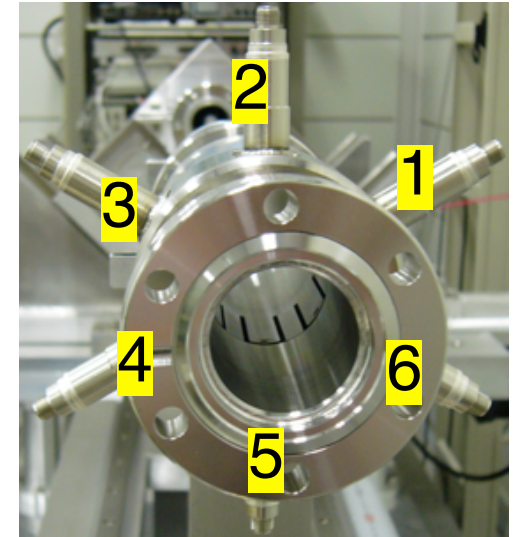
# SPring-8線型加速器に於ける六電極BPMを使用した ツイスパラメータ測定と整合

柳田謙一、鈴木伸介、花木博文

公益財団法人高輝度光科学研究センター

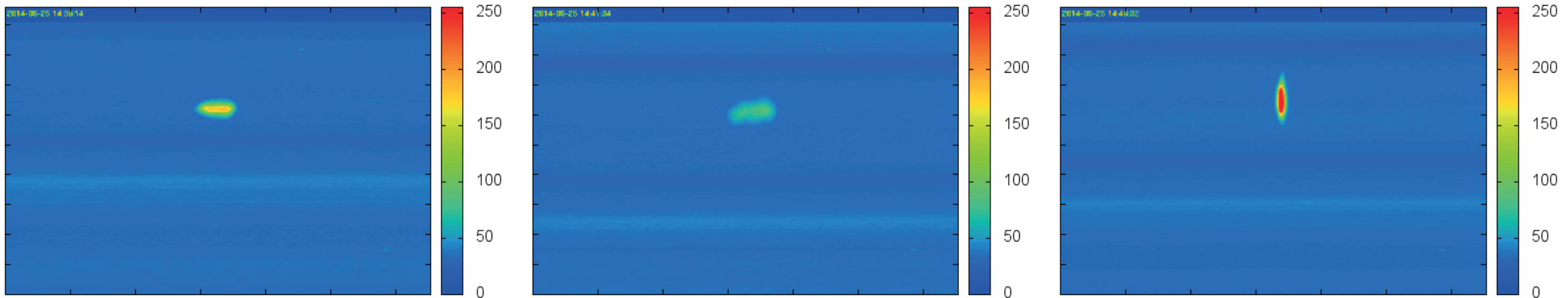
## 内容

- はじめに(何故BPMによるエミッタンス測定か?)
- 円形断面BPMの信号電圧差分と各次モーメントの関係
  - 信号電圧差分に於ける五次モーメントまでの寄与
  - 実効開口半径 (Effective Aperture Radius)
- 全体較正 (Entire Calibration)
- Qスキャンによるエミッタンス測定
- まとめと今後の課題



●はじめに(何故BPMによるエミッタンス測定か?)

- SPring-8線型加速器は1GeV電子ビームを供給(NS、Sy)
  - ビーム振分偏向電磁石直前でBT系ツイスパラメータ整合(LAM24、PASJ4)
  - 以前はワイヤスキャナーやプロファイルモニタ(PM)を使用
  - ビーム形状により信号強度の飽和・ノイズレベルまでの低下が起こる
  - 機器のゲイン調整が大変面倒
  - 精度向上のため機器数増→測定時間増(ビーム破壊型のため)
- ⇒日々の計測には不向き(時間が掛かる・ボタン1押しで測定完了でない)



プロファイルモニタによるビーム形状の測定(8ビット処理後)

- はじめに(何故BPMによるエミッタンス測定か?)続き
  - 以前からBPMを使用したビーム非破壊でのエミッタンス(ビームサイズ)測定の報告あり
  - SPring-8LINAC1GeVで同様な測定は可能かどうか?  
2009年頃からデザインスタディを開始  
特に手持ちの処理回路での分解能が重要
  - 検討の結果→多分、エミッタンスの測定は可能  
→まとめたものを[PRSTAB\(2012年\)](#)で発表
  - 六電極BPM本体の詳細設計 [PASJ8\(2011年\)](#)で報告
  - 六電極BPMシステムの設計 [PASJ9\(2012年\)](#)で報告  
【処理回路更新、DIボード更新、DB更新、  
全体較正の概念、実効開口半径の概念、  
二次相対モーメント $P_{g2}$ 測定とプロフィールモニタとの比較】
  - 三次モーメントの影響 [PASJ10\(2013年\)](#)で報告

●円形断面BPMの信号電圧差分と各次モーメントの関係

そもそも何故、信号電圧差分を高次モーメントを含む表記とするのか？

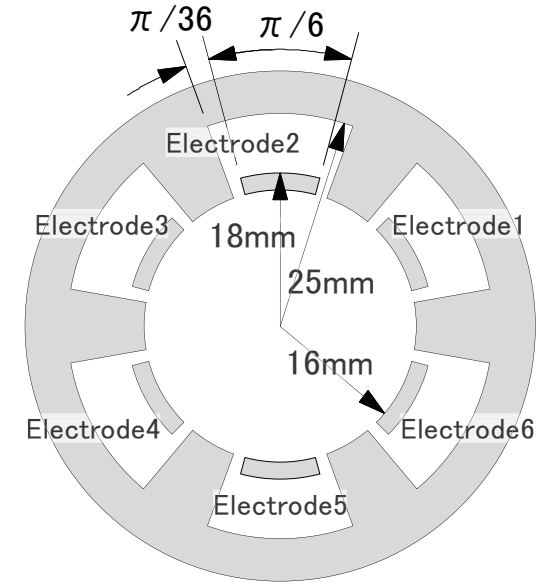
2012年当時 一次まで

$$C_1 = \frac{V_1 - V_3 - V_4 + V_6}{V_1 + V_3 + V_4 + V_6} \approx \frac{2}{R_{C1P1}} P_1$$

$$S_1 = \frac{V_1 + V_3 - V_4 - V_6}{V_1 + V_3 + V_4 + V_6} \approx \frac{2}{R_{S1Q1}} Q_1$$

$$S_{1'} = \frac{V_2 - V_5}{V_2 + V_5} \approx \frac{2}{R_{S1'Q1}} Q_1$$

RC1P1等は  
実効開口半径



※全体較正時  $S_1$ から計算される $Q_1$ と $S_{1'}$ から計算される $Q_1$ を

一致させるようにプログラムして計算すると⇒計算が暴走(必ず再現)

※ $S_1$ と及び $S_{1'}$ で個別に全体較正に掛けると異なるバランス係数値に？

※本来相対モーメントは一定だが、中心より外れると一定値からズれる

※ビーム形状が縦長と横長でビーム位置が異なる(PMでは同じ位置)

**二次モーメント以上の寄与が存在する！！**

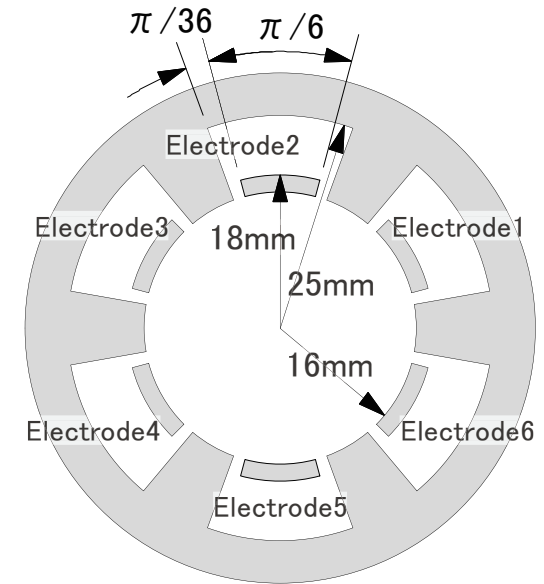
## ●円形断面BPMの信号電圧差分と各次モーメントの関係続き

2013年当時 三次まで

$$C_1 = \frac{V_1 - V_3 - V_4 + V_6}{V_1 + V_3 + V_4 + V_6} \approx \frac{2P_1}{R_{C1P1}} \left( 1 - \frac{2P_2}{R_{C1P2}^2} \right) + \frac{2P_3}{R_{C1P3}^3} \rightarrow \infty$$

$$S_1 = \frac{V_1 + V_3 - V_4 - V_6}{V_1 + V_3 + V_4 + V_6} \approx \frac{2Q_1}{R_{S1Q1}} \left( 1 - \frac{2P_2}{R_{S1P2}^2} \right) + \frac{2Q_3}{R_{S1Q3}^3}$$

$$S_{1'} = \frac{V_2 - V_5}{V_2 + V_5} \approx \frac{2Q_1}{R_{S1'Q1}} \left( 1 + \frac{2P_2}{R_{S1'P2}^2} \right) - \frac{2Q_3}{R_{S1'Q3}^3}$$



※全体較正時  $S_1$ から計算される $Q_1$ と $S_{1'}$ から計算される $Q_1$ が一致

三次モーメントの寄与がそれぞれ逆方向だった

※ビーム形状(縦長と横長)でビーム位置が異なる事は無くなった

※本来相対モーメントは一定だが、中心より外れると一定値からズれる

中心より位置が±3mm程度の範囲内ならズれない

位置が±3mmより大でも問題が起きないように五次まで含める

## ●円形断面BPMの信号電圧差分と各次モーメントの関係続き

2014年 三次までから五次までにするのに手間はあまり変わらない

$$C_1 = \frac{V_1 - V_3 - V_4 + V_6}{V_1 + V_3 + V_4 + V_6} \approx \frac{2P_1}{R_{C1P1}} \left( 1 - \frac{2P_2}{R_{C1P2}^2} + \frac{4P_2^2}{R_{C1P2}^4} + \frac{2P_4}{R_{C1P4}^4} \right) + \frac{2P_3}{R_{C1P3}^3} - \frac{2P_5}{R_{C1P5}^5}$$

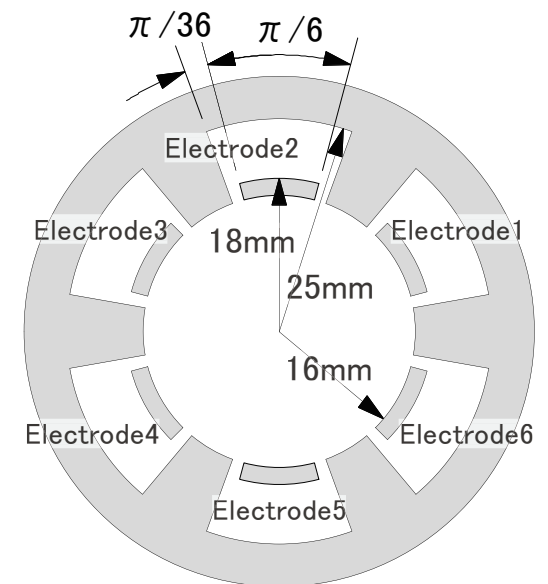
$$S_1 = \frac{V_1 + V_3 - V_4 - V_6}{V_1 + V_3 + V_4 + V_6} \approx \frac{2Q_1}{R_{S1Q1}} \left( 1 - \frac{2P_2}{R_{S1P2}^2} + \frac{4P_2^2}{R_{S1P2}^4} + \frac{2P_4}{R_{S1P4}^4} \right) + \frac{2Q_3}{R_{S1Q3}^3} + \frac{2Q_5}{R_{S1Q5}^5}$$

$$C_2 = \frac{V_1 + V_3 + V_4 + V_6 - 2(V_2 + V_5)}{V_1 + V_3 + V_4 + V_6 + 2(V_2 + V_5)} \approx \frac{2P_2}{R_{C2P2}^2} \left( 1 + \frac{2P_2}{R_{C2P2'}^2} \right) - \frac{2P_4}{R_{C2P4}^4}$$

$$S_2 = \frac{V_1 - V_3 + V_4 - V_6}{V_1 + V_3 + V_4 + V_6} \approx \frac{2Q_2}{R_{S2Q2}^2} \left( 1 - \frac{2P_2}{R_{S2P2}^2} \right) + \frac{2Q_4}{R_{S2Q4}^4}$$

$$S_3 = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4 + V_5 - V_6}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6} \approx \frac{2Q_3}{R_{S3Q3}^3}$$

▪  $R_{C,S_m P,Q,n}$  は実効開口半径 単位は[mm]



●円形断面BPMの信号電圧差分と各次モーメントの関係続き

・ $n$ 次絶対モーメント $P, Q_n$ の $C, S_m$ への寄与は実効開口半径で与えられる  
実効開口半径が小さいほど寄与は大きい

・BPMの開口半径を $R$   $R$ と $R_{C, S_m P, Q, n}$ はほぼ同じ大きさ  $R \leq R_{C, S_m P, Q, n}$

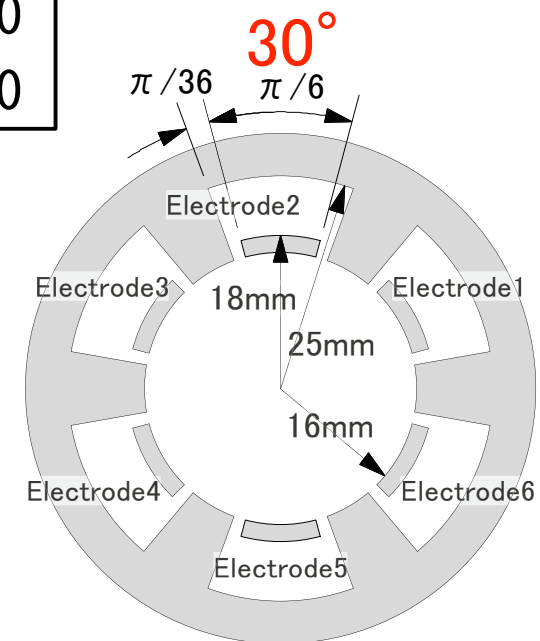
実効開口半径  $R_{C, S_m P, Q, n}$  [mm]

$R_{C1P1}$	18.688	$R_{S1P2}$	23.155	$R_{C1P4}$	18.029
$R_{C1P2}$	23.155	$R_{S1Q3}$	16.570	$R_{S2Q2}$	17.594
$R_{C1P3}$	$\infty$	$R_{S1P4}$	19.953	$R_{S2P2}$	23.155
$R_{C1P4}$	19.953	$R_{S1Q5}$	19.531	$R_{S2Q4}$	17.392
$R_{C1P5}$	17.499	$R_{C2P2}$	18.906	$R_{S3Q3}$	16.570
$R_{S1Q1}$	32.368	$R_{C2P2}'$	32.746	$R$	16.000

・ $R_{S1Q3}$ は16mm程度 電極位置で電場が $\cos n \pi$ の強度

・ $R_{C1P3}$ は無限大 電極位置で電場が $\sin n \pi$ の強度

・電極見込角 $30^\circ \rightarrow 0^\circ$  ならば $R_{S3Q3}$  16.570mm $\rightarrow$ 16mm



●円形断面BPMの信号電圧差分と各次モーメントの関係続き

・さて、 $P, Q_1 \sim P, Q_5$ の値はどのようにして得られるのか？

実際に測定値として得られるのは $P_1, Q_1, P_{g2}, Q_{g2}, Q_{g3}$ の五つのみ

測定出来ないモーメントは無視すると

$$P_1 = p_{G1},$$

$$Q_1 = q_{G1},$$

$$P_2 = p_{G2} + P_{g2},$$

$$Q_2 = q_{G2} + Q_{g2},$$

$$P_3 = p_{G3} + 3b_G a_{g2}^2 \cos(\beta_G + 2\alpha_{g2}), \quad Q_3 = q_{G3} + 3b_G a_{g2}^2 \sin(\beta_G + 2\alpha_{g2}) + Q_{g3},$$

$$P_4 = p_{G4} + 6b_G^2 a_{g2}^2 \cos(2\beta_G + 2\alpha_{g2}), \quad Q_4 = q_{G4} + 6b_G^2 a_{g2}^2 \sin(2\beta_G + 2\alpha_{g2}),$$

$$P_5 = p_{G5} + 10b_G^3 a_{g2}^2 \cos(3\beta_G + 2\alpha_{g2}), \quad Q_5 = q_{G5} + 10b_G^3 a_{g2}^2 \sin(3\beta_G + 2\alpha_{g2}),$$

$$p_{Gn} = b_G^n \cos n\beta_G,$$

$$q_{Gn} = b_G^n \sin n\beta_G,$$

$$P_{g2} = a_{g2}^2 \cos 2\alpha_{g2},$$

$$Q_{g2} = a_{g2}^2 \sin 2\alpha_{g2},$$

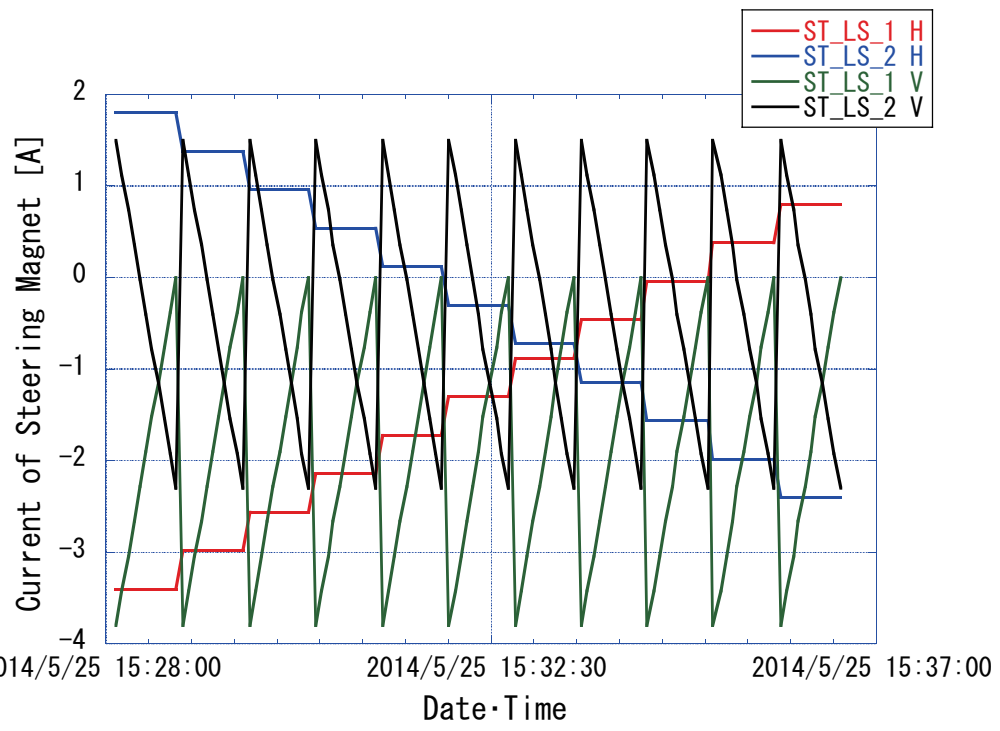
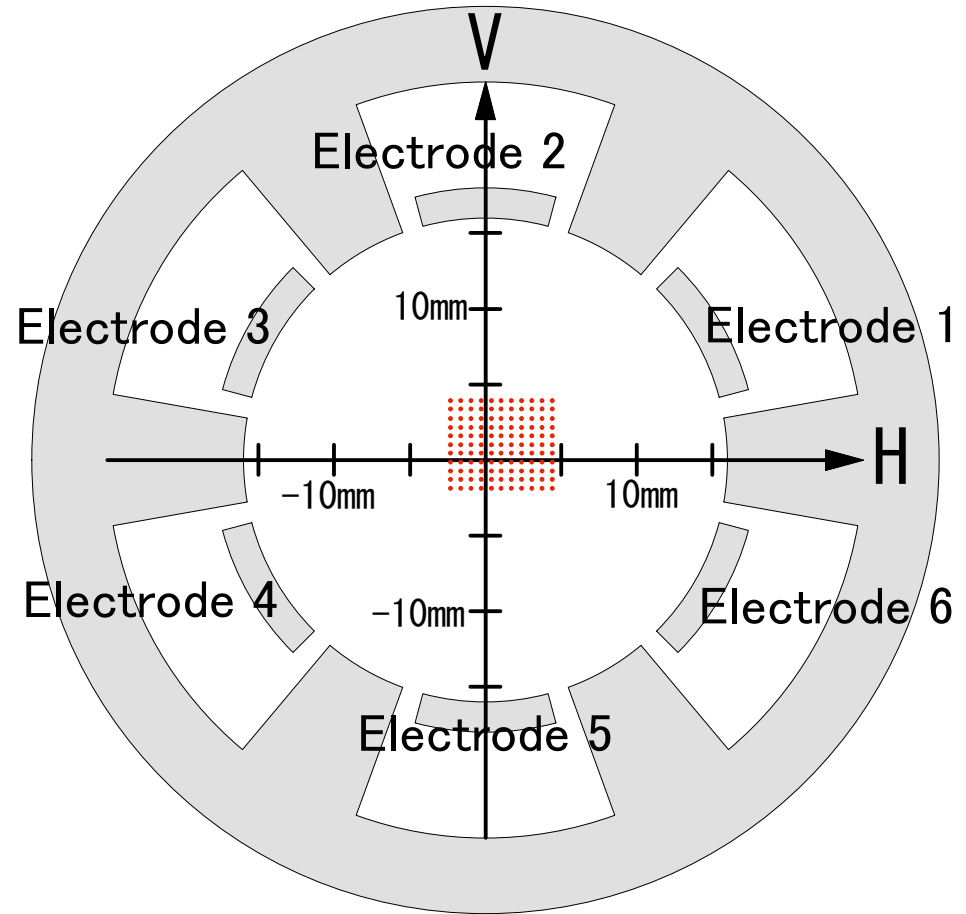
・上記 $P, Q_1 \sim P, Q_5$ を信号電圧差分式に入れて

全体較正及びエミッタンス測定を行った



●全体較正

六電極BPM内で右図のように  
ビームを上下左右に振り  
データを取得する  
赤点はマッピング点



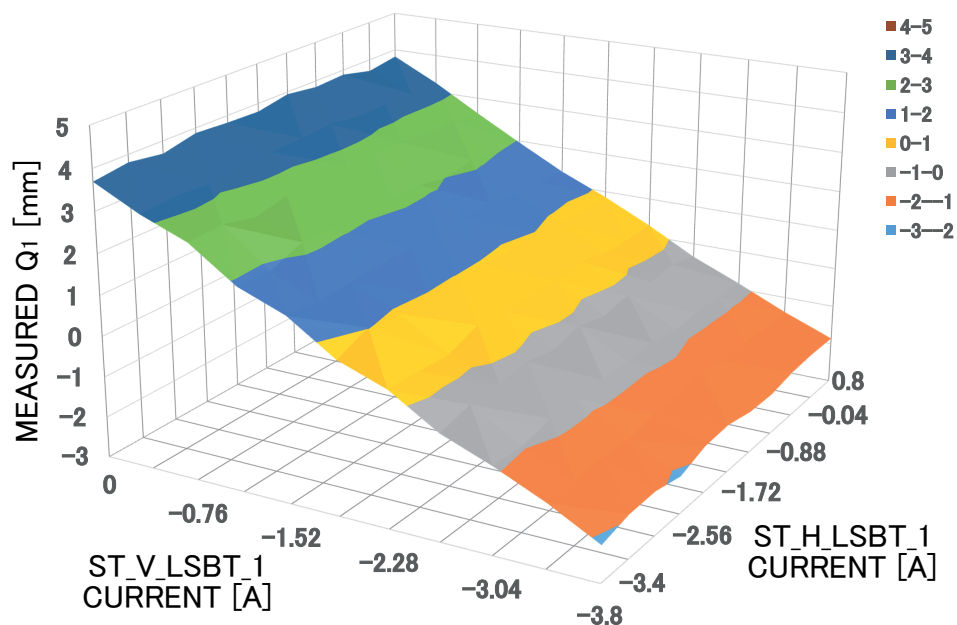
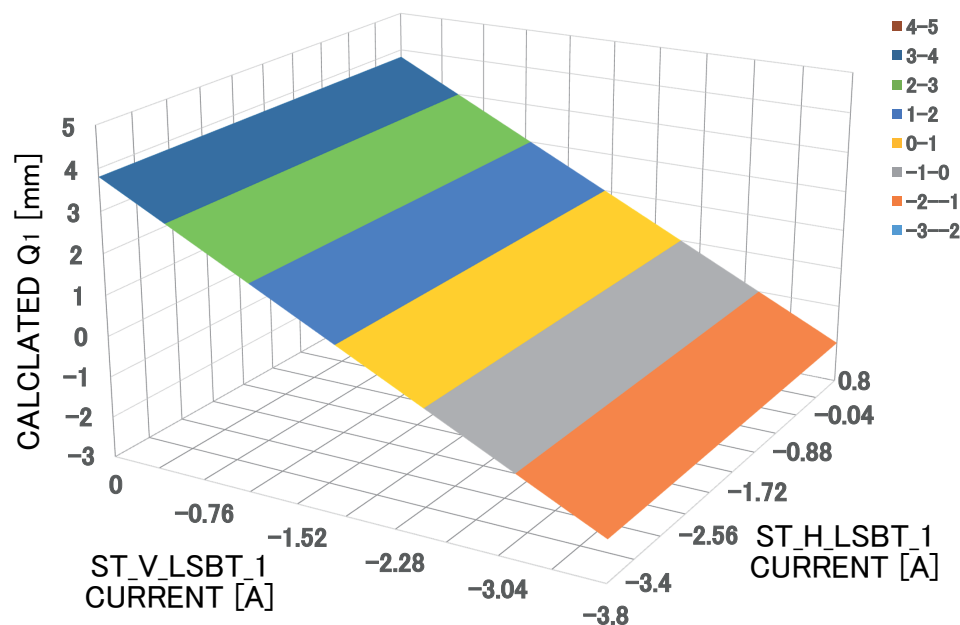
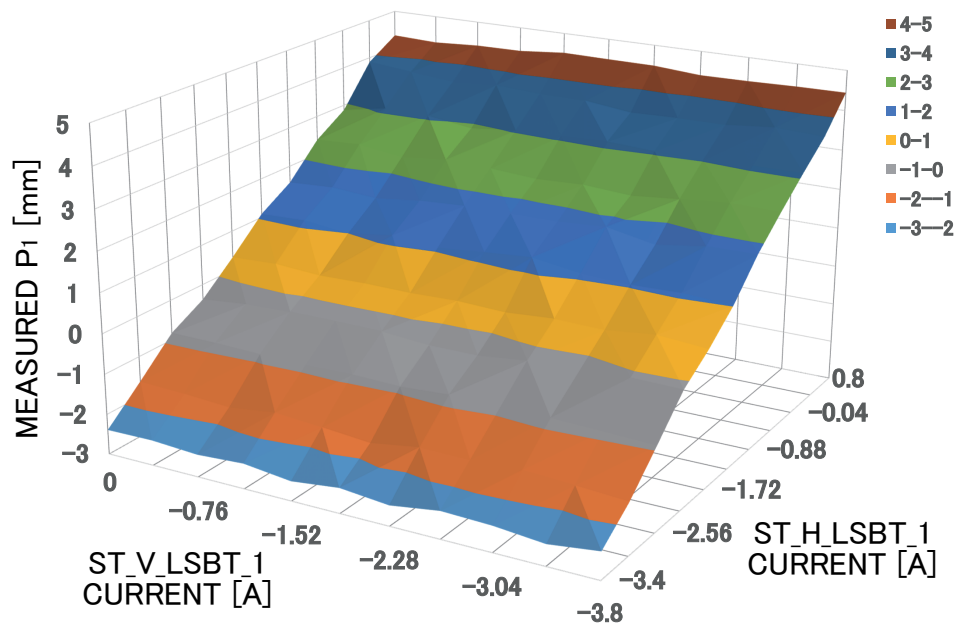
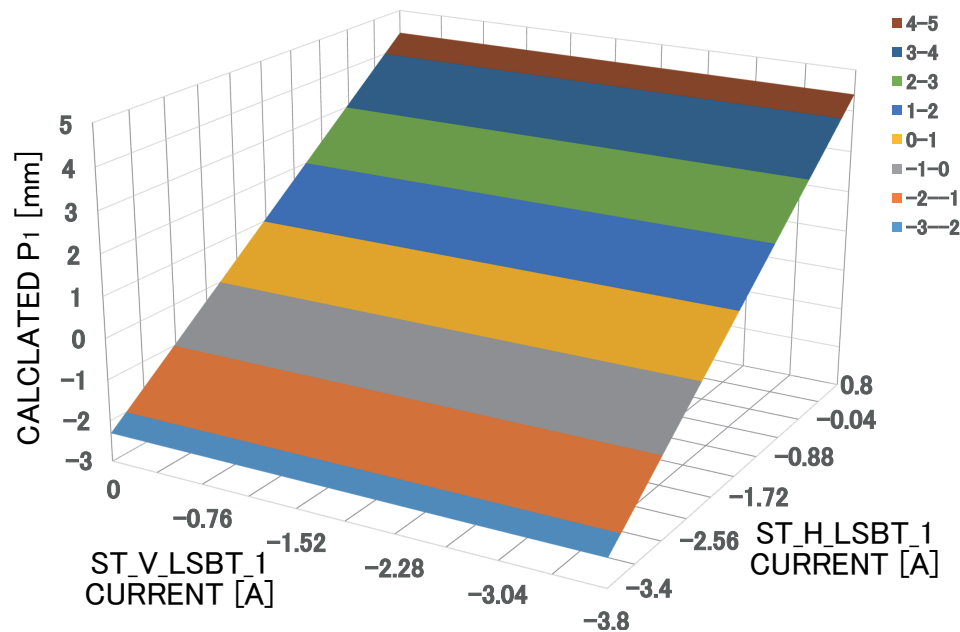
ステアリング電磁石電流値変化

BPM\_LS\_1内でのマッピング点

Measured Relative Attenuation Factors [dB]

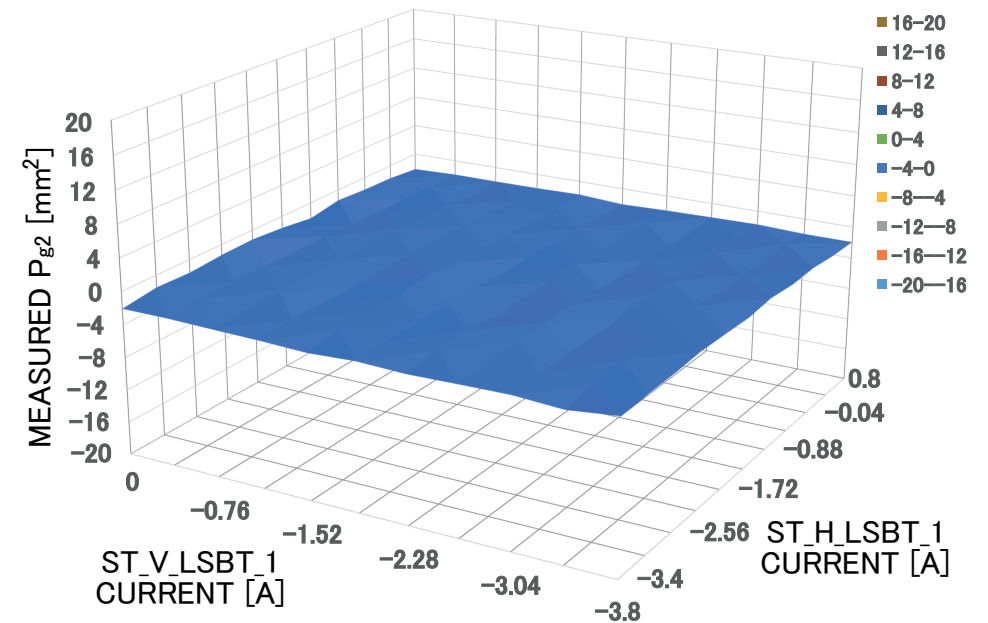
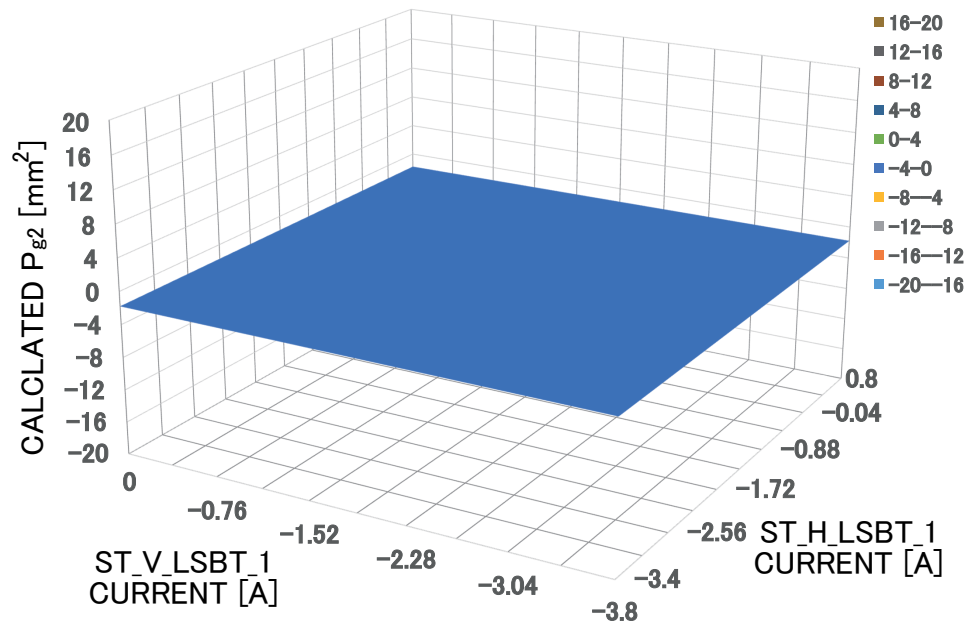
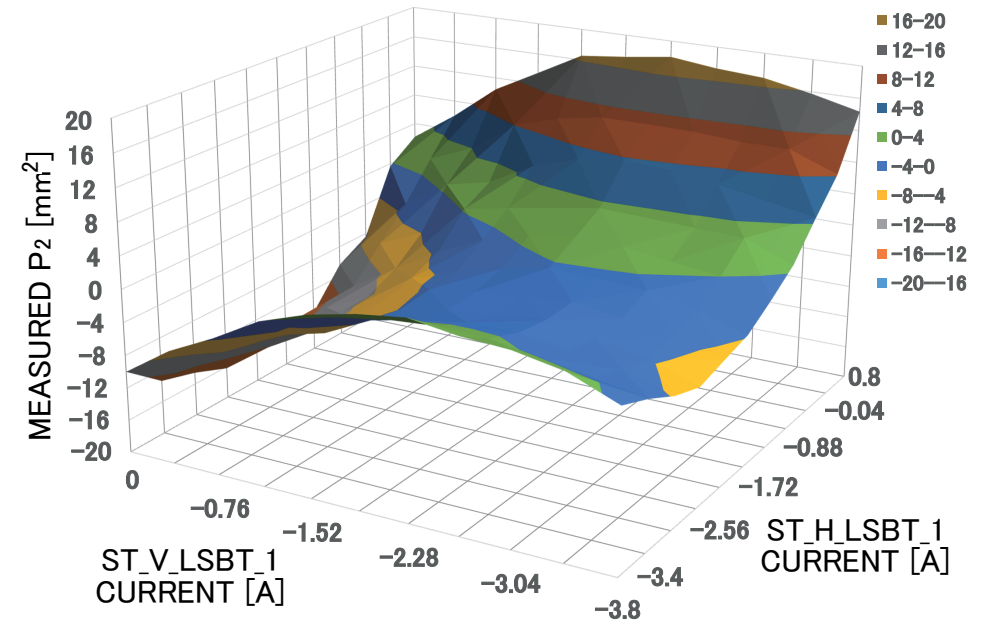
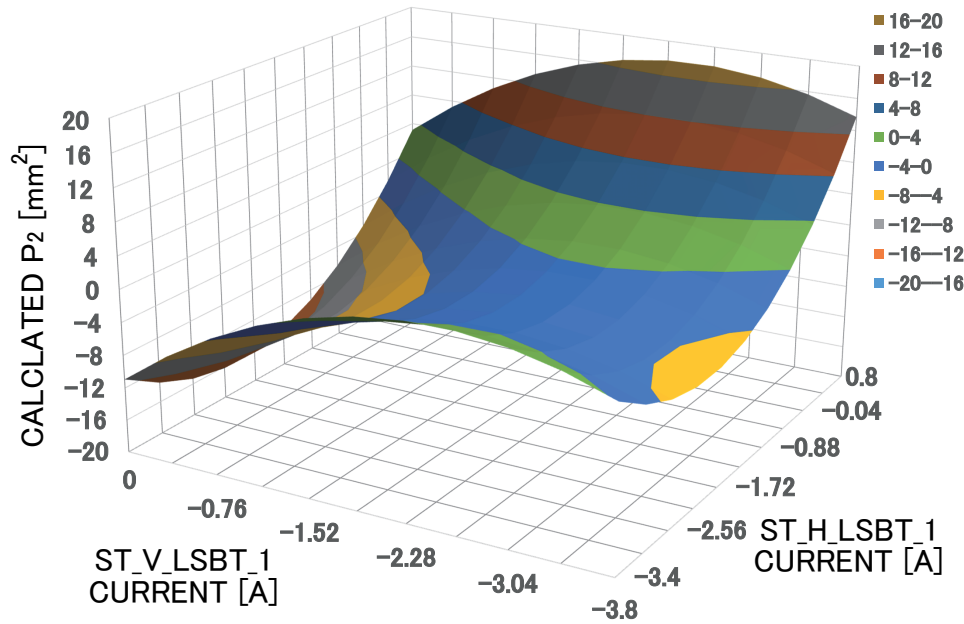
	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	Ch 5	Ch 6
BPM_LS_1	0.00	2.33	0.27	-0.59	0.85	-0.72
BPM_LS_8	0.00	0.57	0.57	0.05	-0.12	0.31
BPM_LS_2	0.00	1.50	0.73	0.29	2.08	0.54
BPM_LS_9	0.00	0.15	0.19	0.86	0.67	0.17

# ● 全体較正の例(デモンストレーションとして)



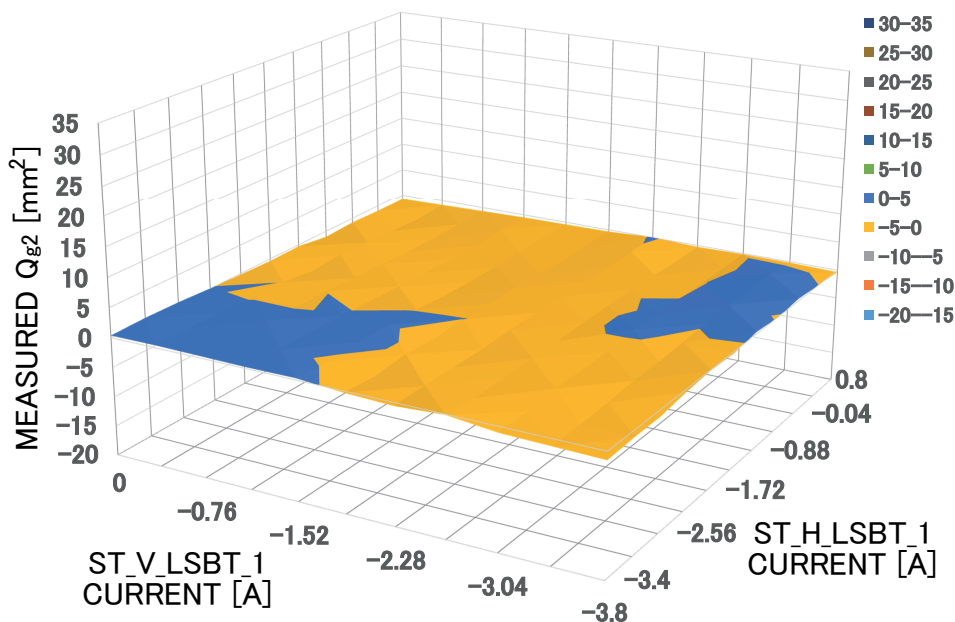
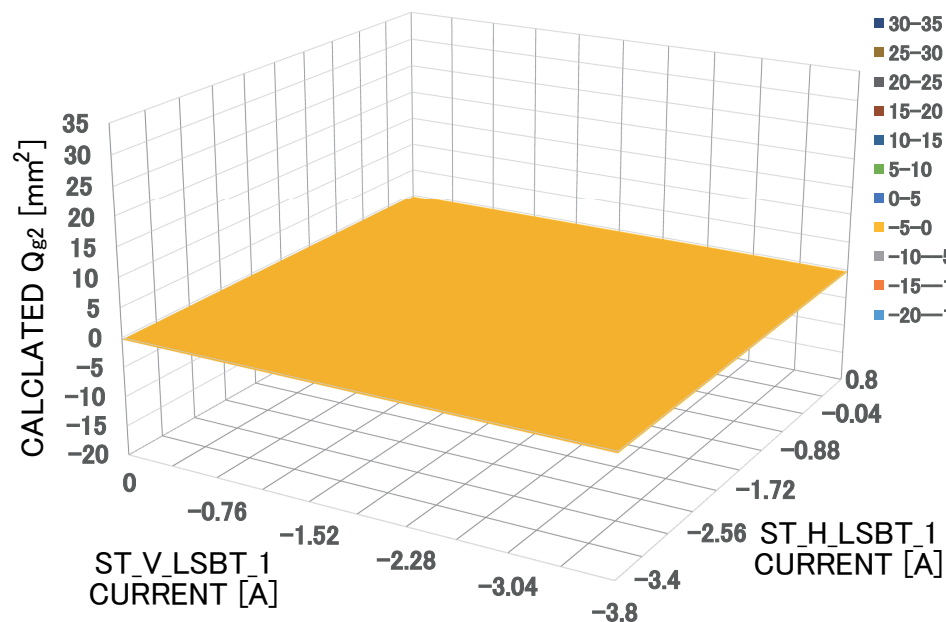
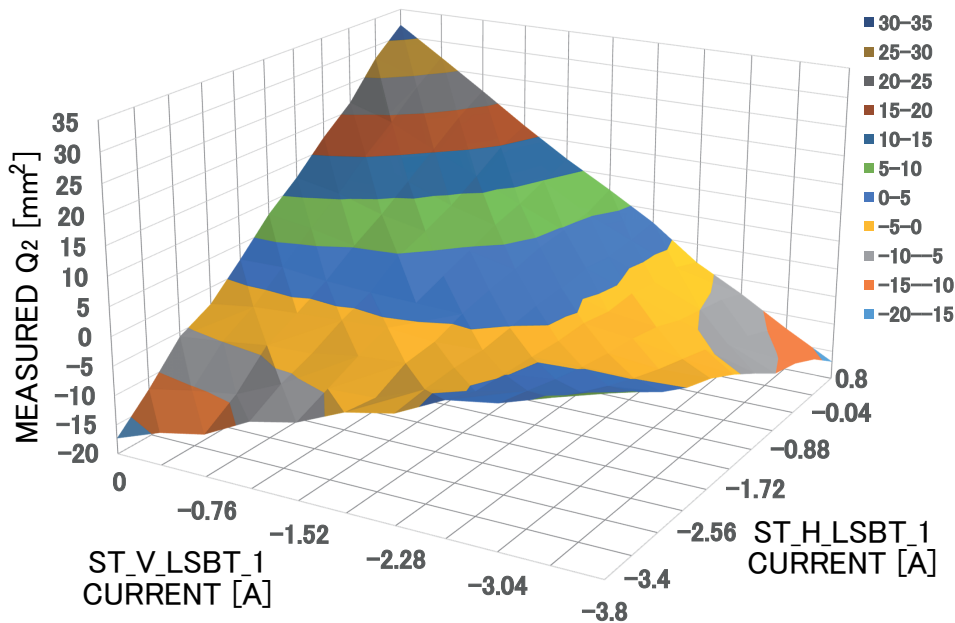
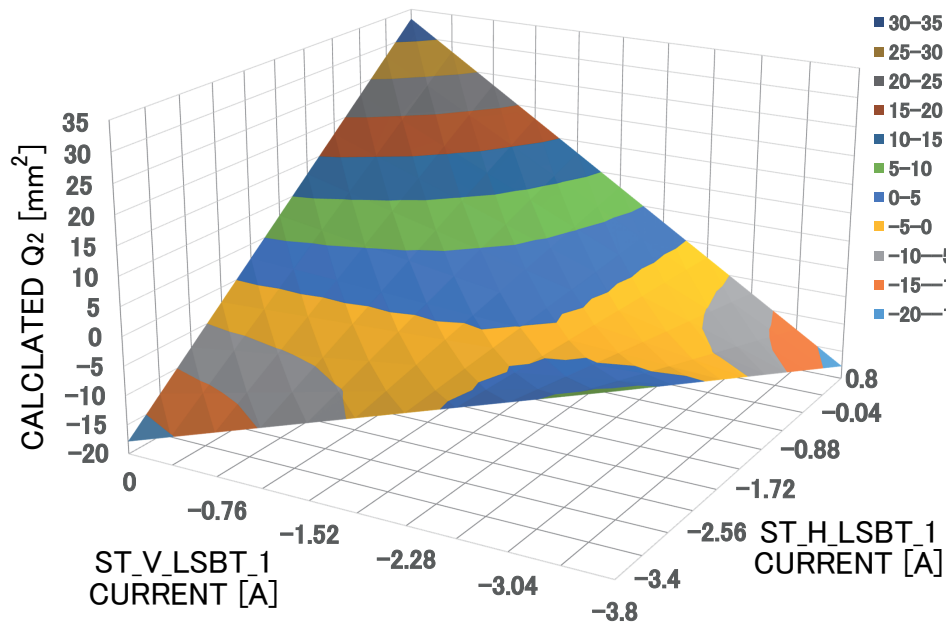
P1(上)及びQ1(下)のシミュレーション(左)と実測値(右)

# ● 全体較正の例(デモンストレーションとして)



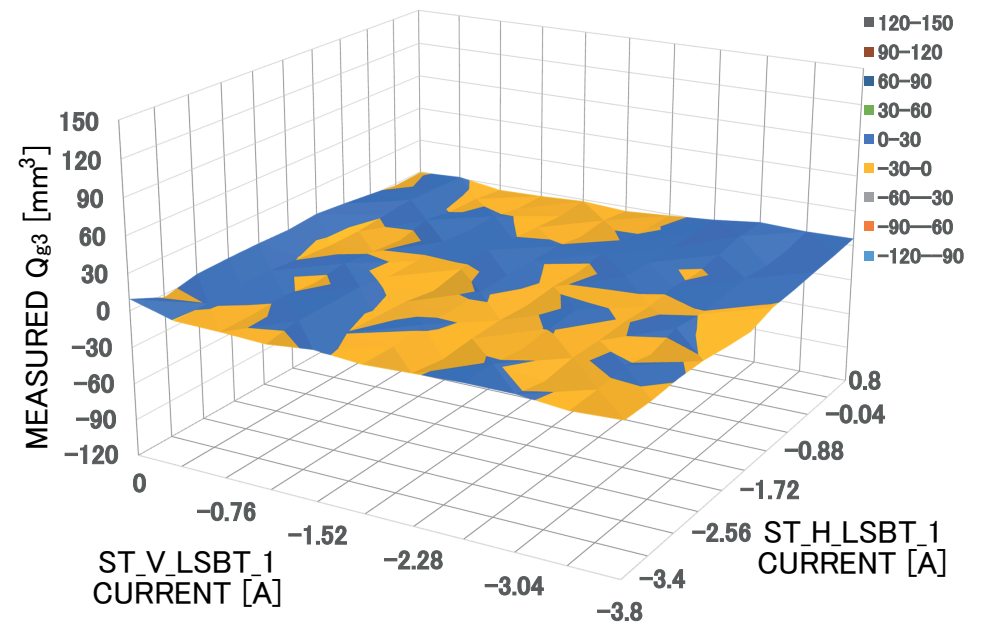
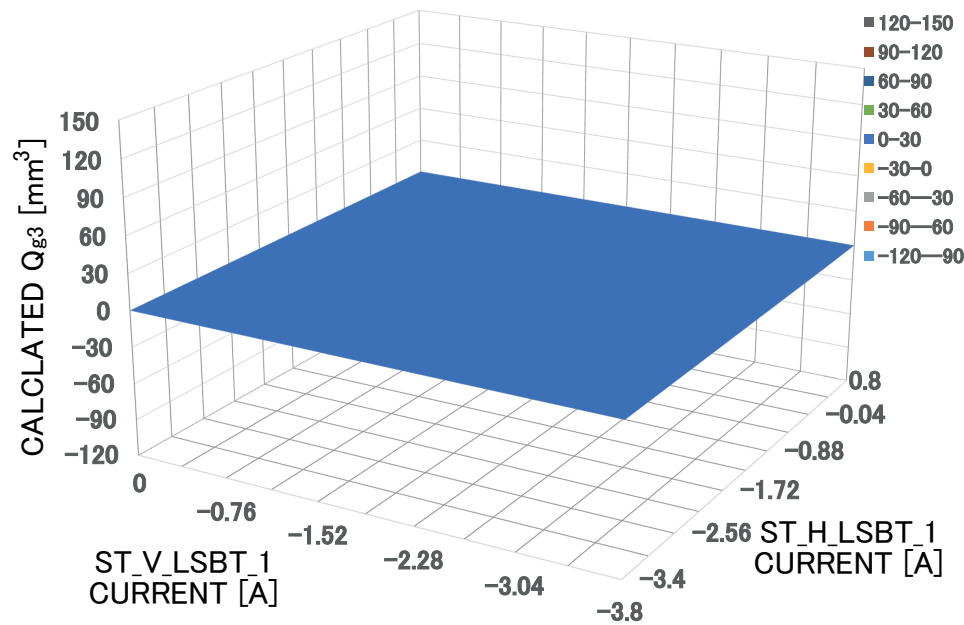
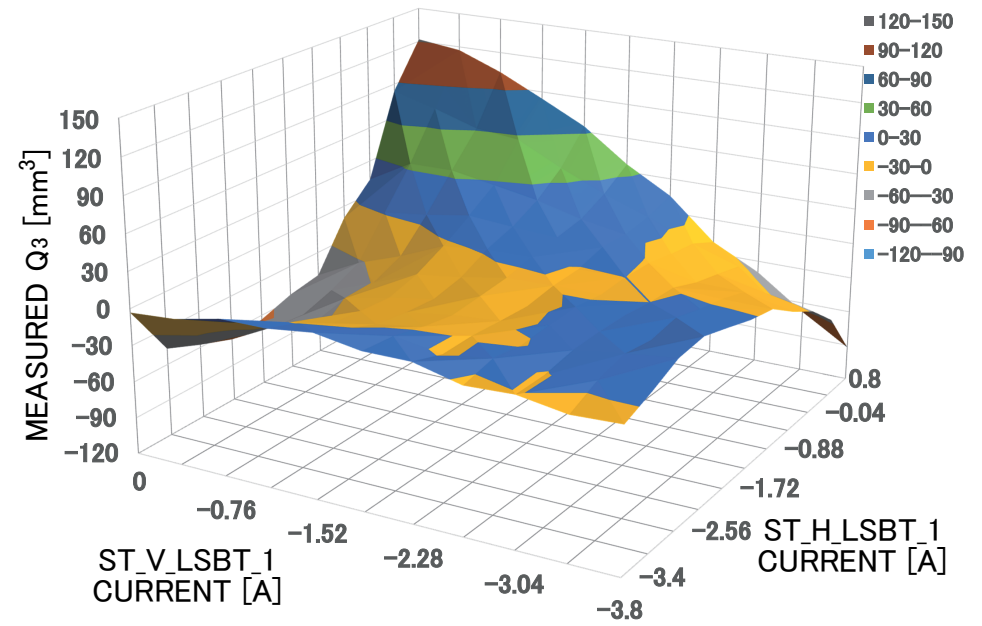
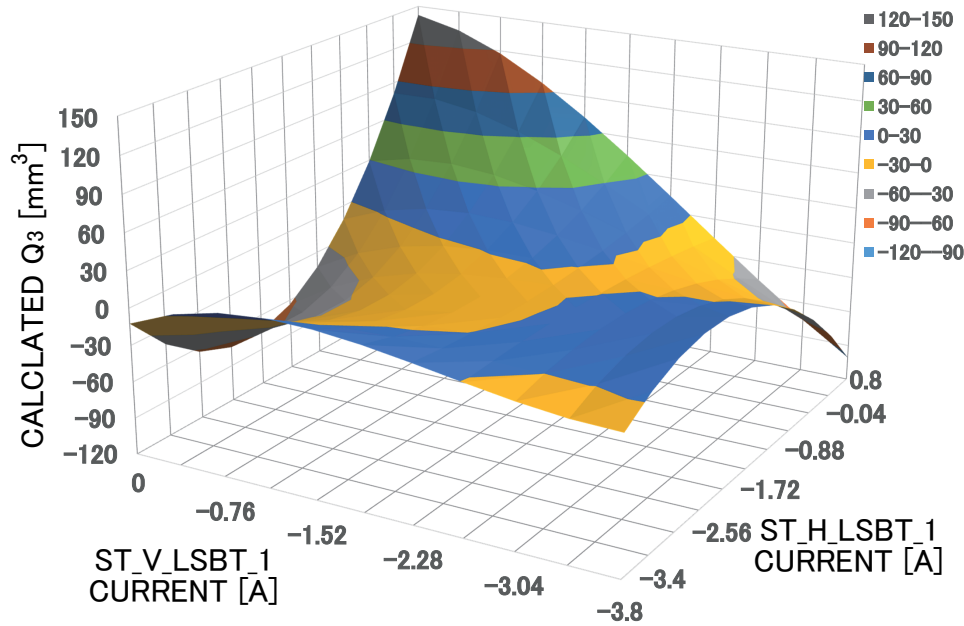
$P_2$ (上)及び $P_{g2}$ (下)のシミュレーション(左)と実測値(右)

# ● 全体較正の例(デモンストレーションとして)



Q<sub>2</sub>(上)及びQ<sub>g2</sub>(下)のシミュレーション(左)と実測値(右)

# ● 全体較正の例(デモンストレーションとして)



Q<sub>3</sub>(上)及びQ<sub>g3</sub>(下)のシミュレーション(左)と実測値(右)



## ● Qスキャンによるエミッタンス測定

- 2013年夏に4台の六電極BPMを4台のQMに挟み込む形で設置  
各BPM電極位置は各QM上流側ヨーク端面から約70mm上流
- Qスキャンの手法

QM4台電流値を変化させながらのBPM4台の $P_{g2\_M}$ を測定(計11セット)

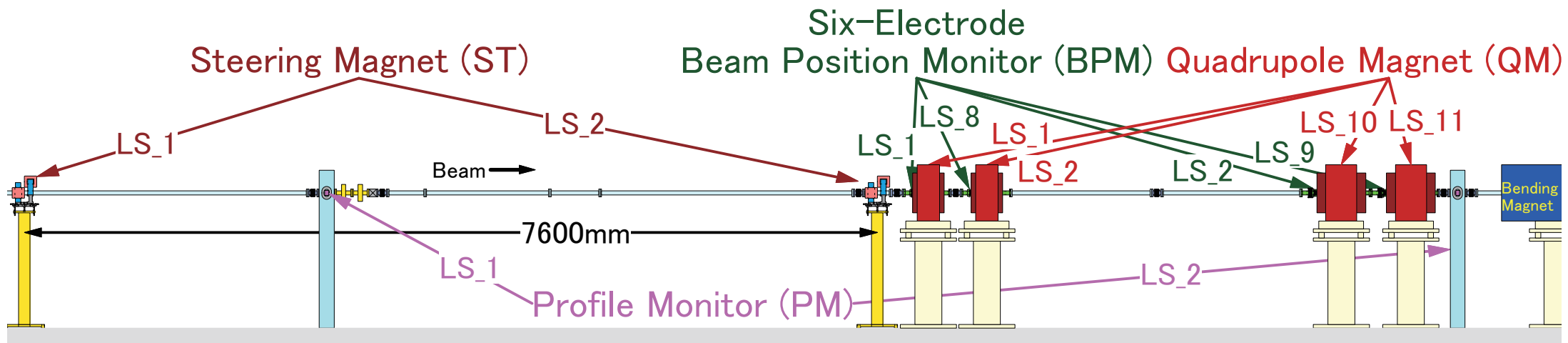
PM\_LS\_1地点でのエミッタンス&ツイスパラメータを仮定

下流側のビームサイズを計算 $\sigma_{H\_C}$ ,  $\sigma_{V\_C}$ とする

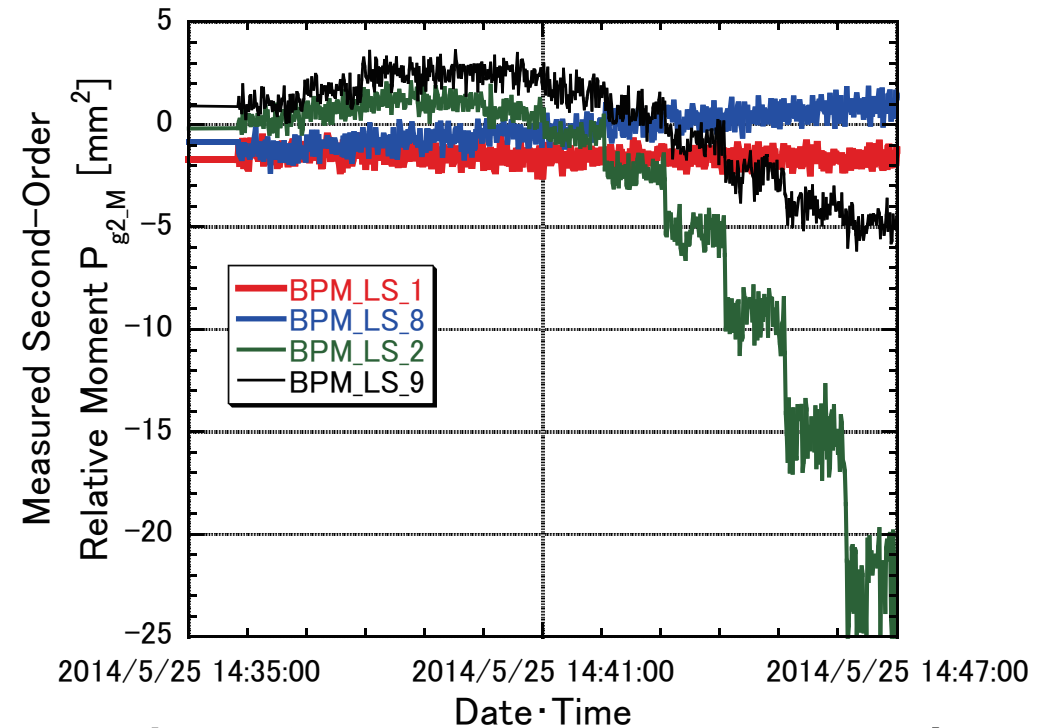
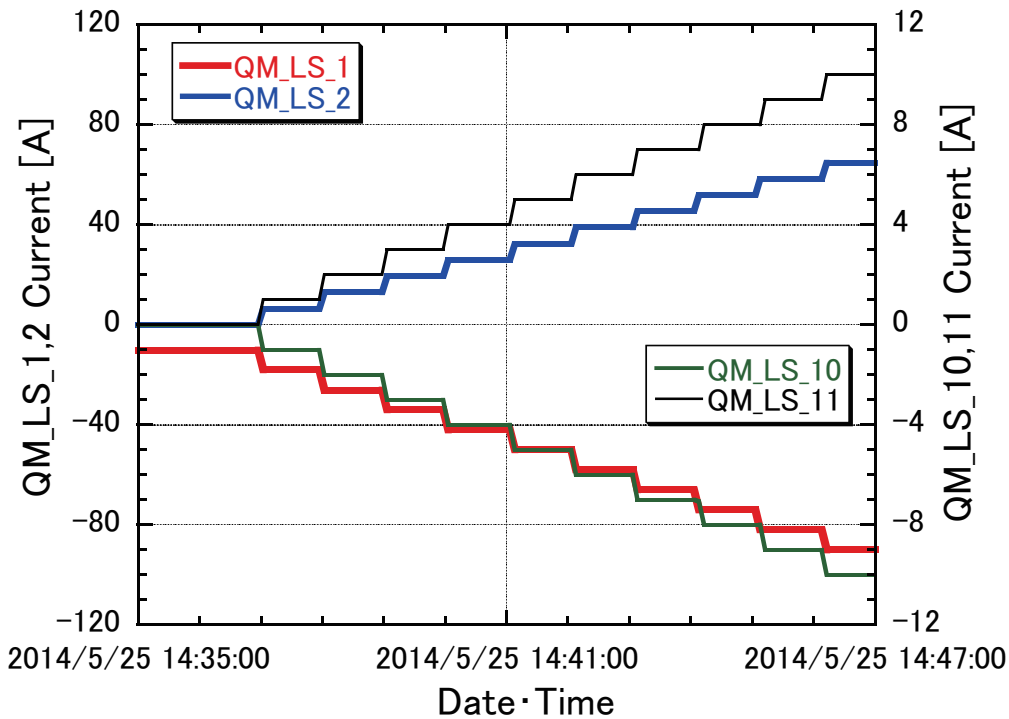
$$\sigma_{H\_C}^2 - \sigma_{V\_C}^2 = P_{g2\_C}$$

$P_{g2\_CM}$ と $P_{g2\_M}$ の差分二乗和(11セット×4台=44点)が最小となる

PM\_LS\_1地点でのエミッタンス&ツイスパラメータを探す



# ● Qスキャンによるエミッタンス測定続き



四極電磁石 (QM) 電流値変化

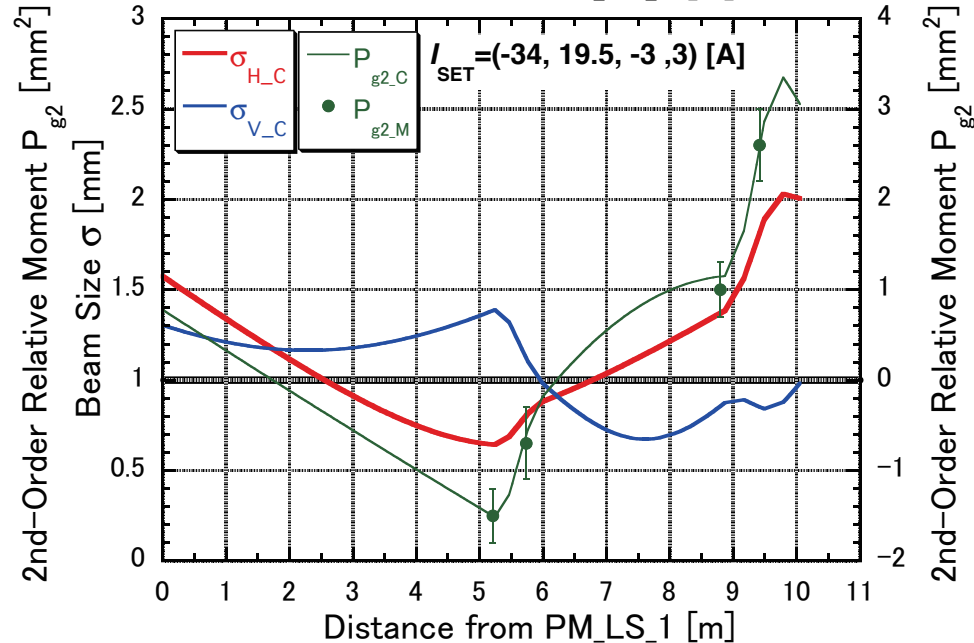
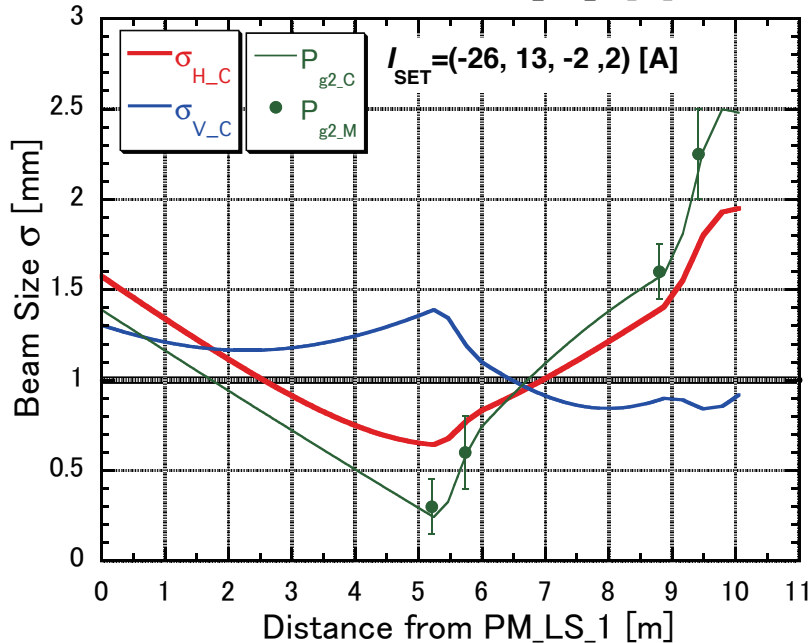
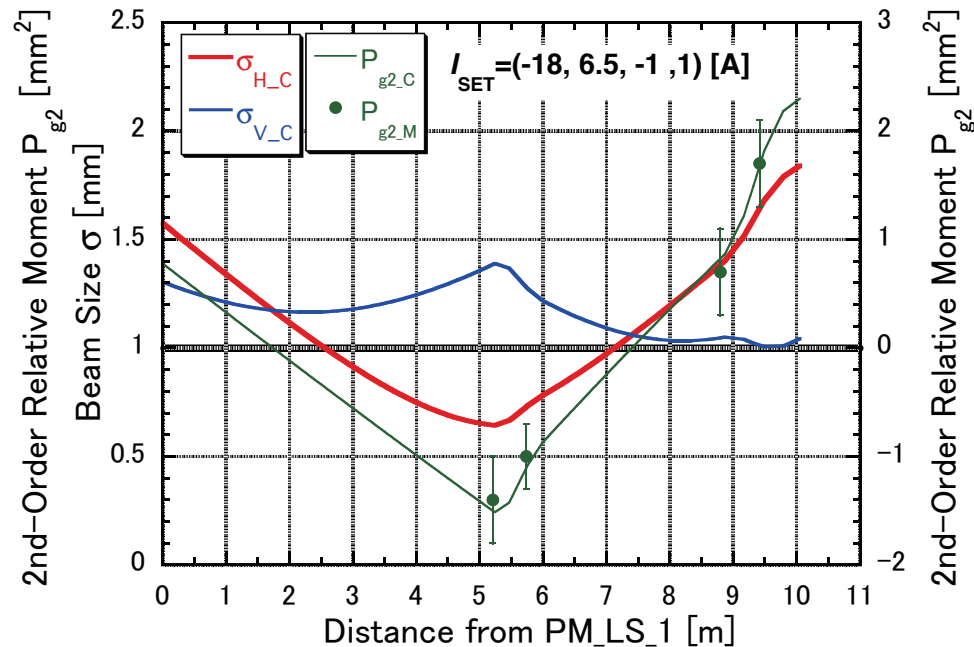
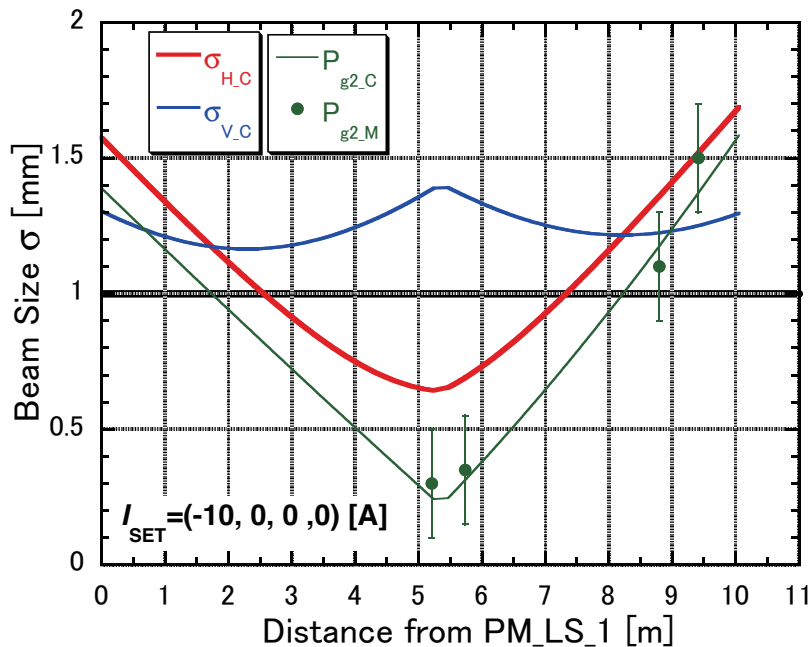
測定二次相対モーメント  $P_{g2_M}$  変化

各セットは  $I_{\text{set}} = (\text{QM\_LS\_1電流値}, \text{QM\_LS\_2電流値}, \text{QM\_LS\_10電流値}, \text{QM\_LS\_11電流値}) [\text{A}]$  で区別

## Deduced Emittances and Twiss Parameters

Parameter	Horizontal	Vertical
$\varepsilon$ [ $\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ]	$0.168 \pm 0.002$	$0.299 \pm 0.001$
$\beta$ [m]	$14.7 \pm 0.1$	$5.7 \pm 0.2$
$\alpha$	$2.25 \pm 0.04$	$0.50 \pm 0.03$

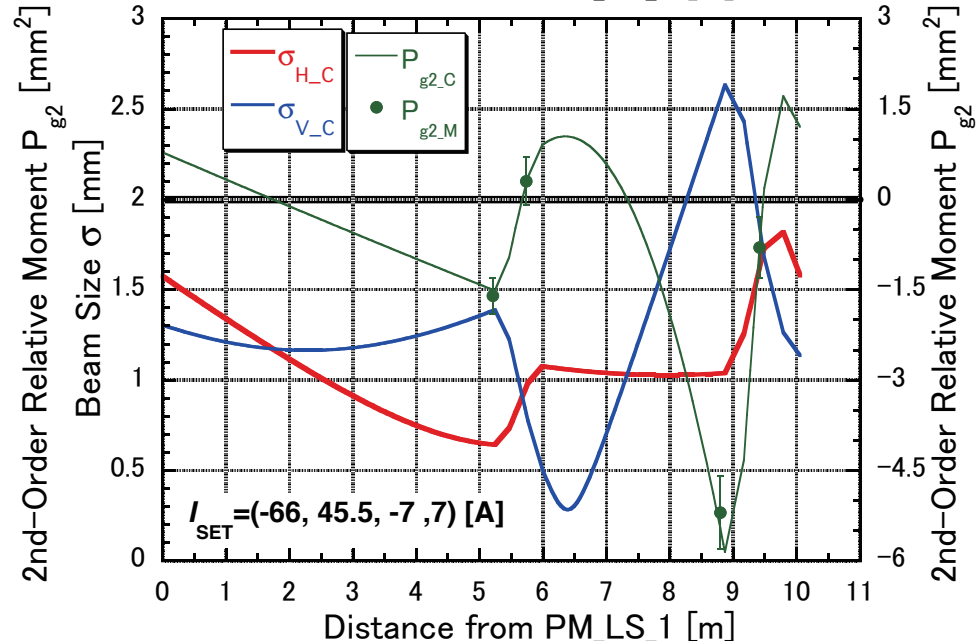
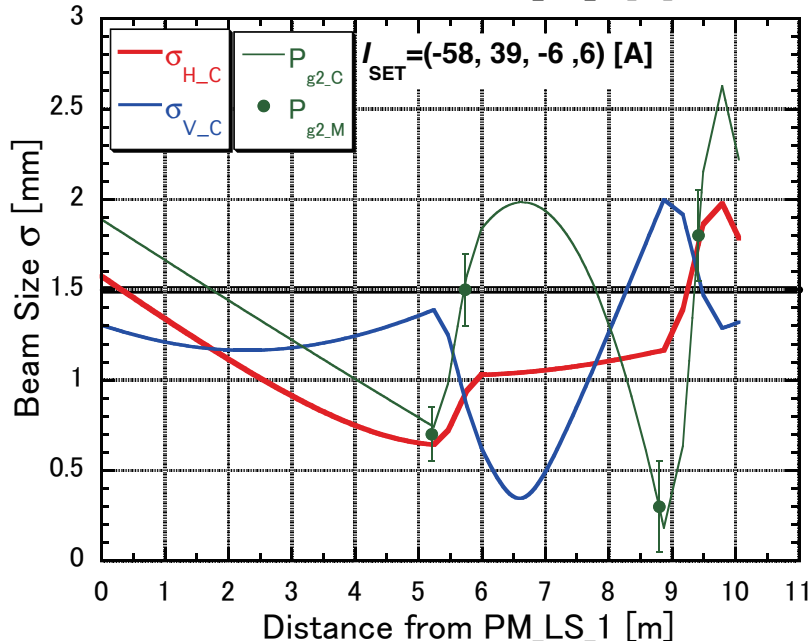
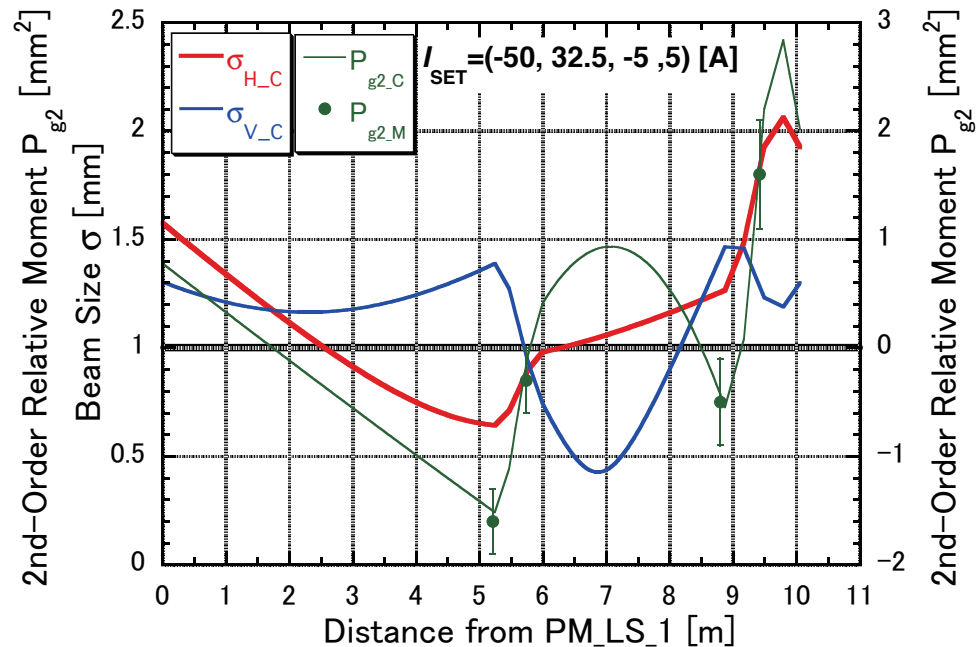
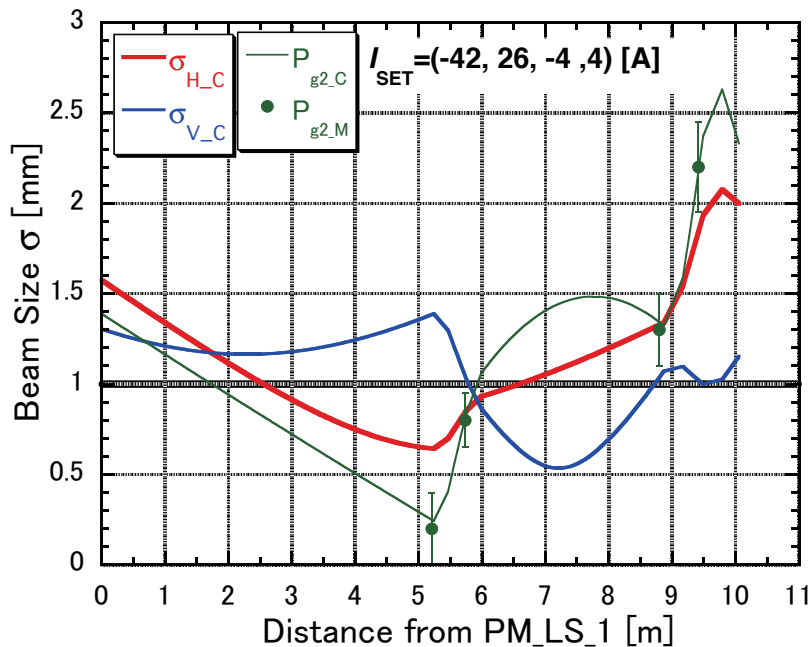
# ● Qスキャンによるエミッタンス測定続き



$\sigma$  及び  $P_{g^2}$  を長手方向に表示したグラフ

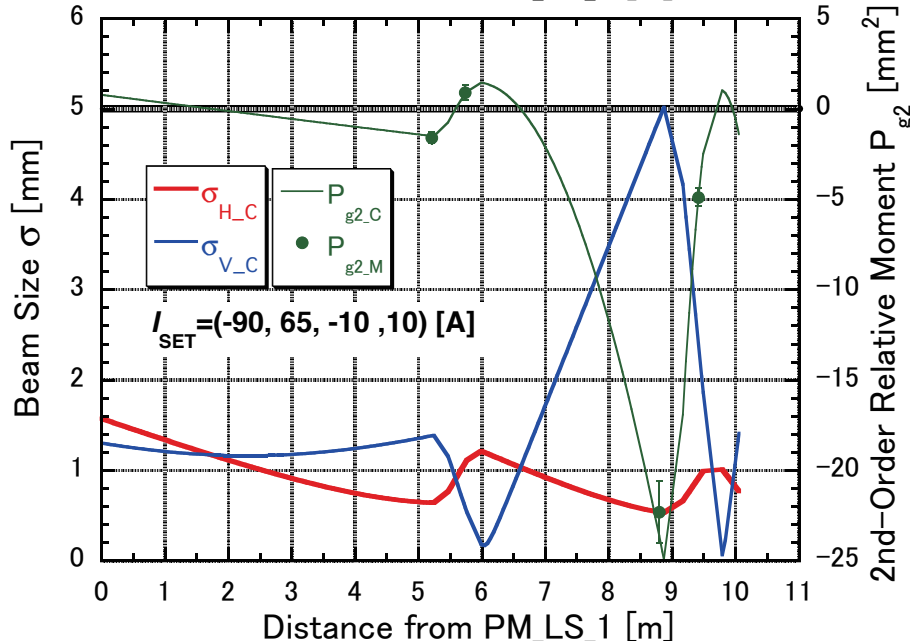
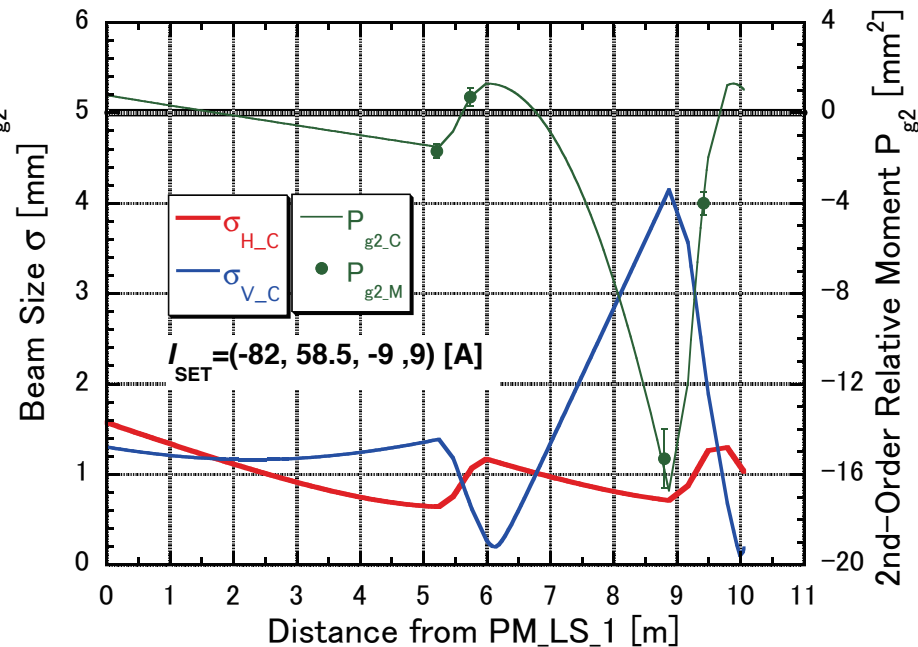
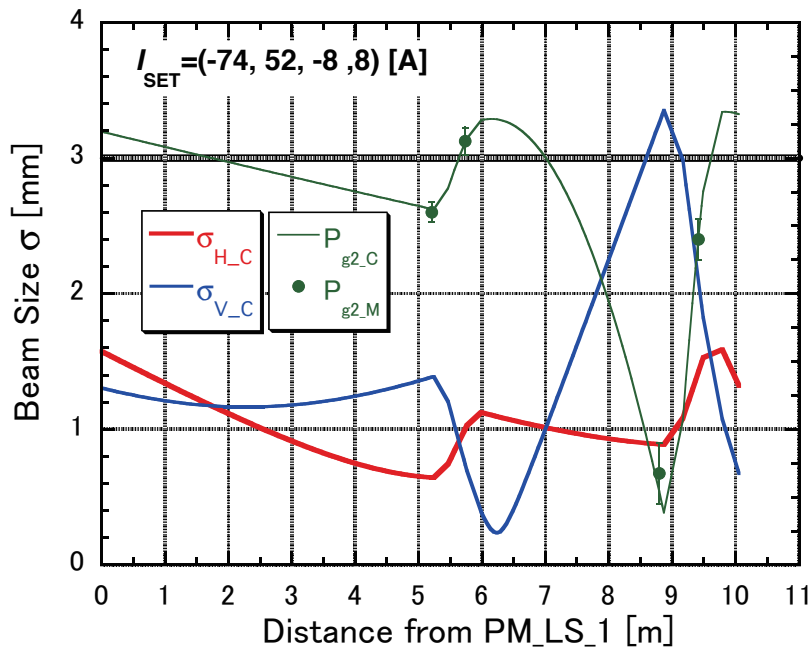


# ● Qスキャンによるエミッタンス測定続き



$\sigma$  及び  $P_{g2}$  を長手方向に表示したグラフ

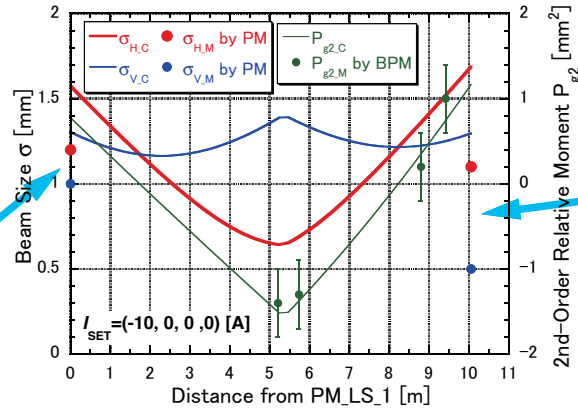
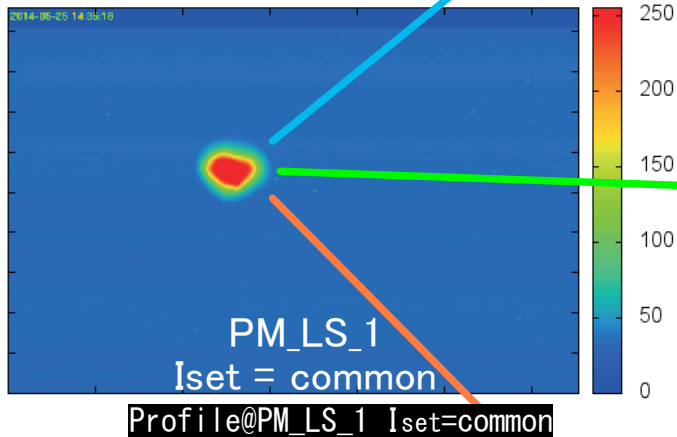
# ● Qスキャンによるエミッタンス測定続き



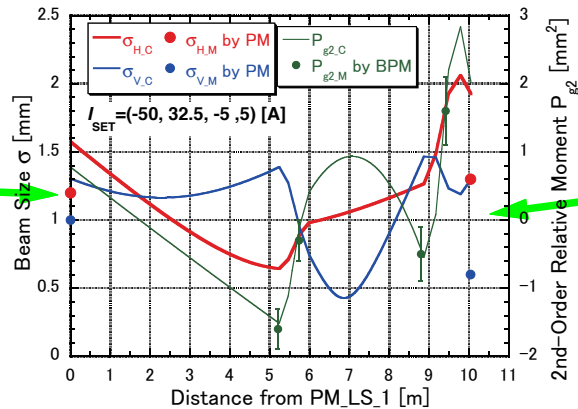
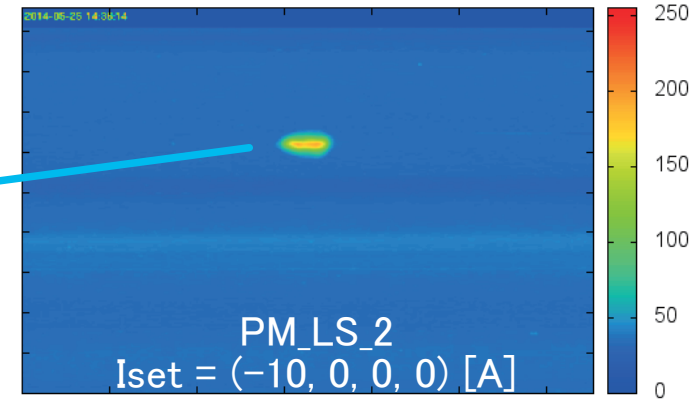
- ビームエネルギー975MeV  
 最初1GeVで計算していたが...
- 全44測定点で測定誤差内で一致  
 手法としては問題無い  
 あとは丁寧に実運用化

$\sigma$  及び  $P_{g^2}$  を長手方向に表示したグラフ

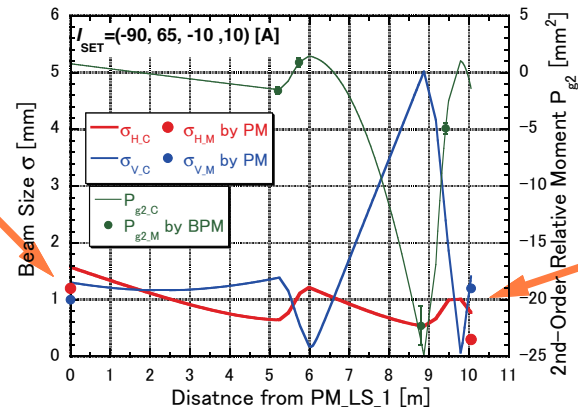
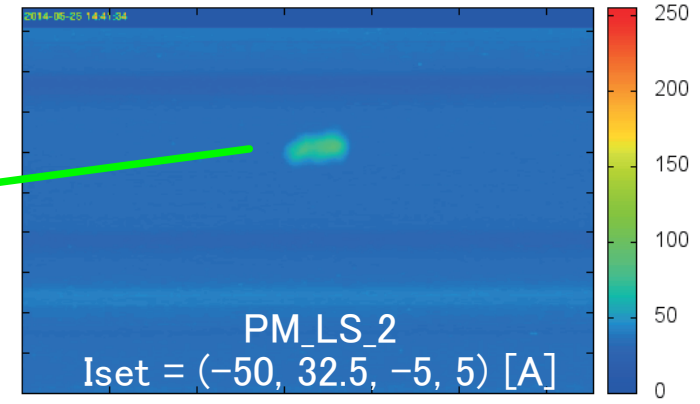
● Qスキャンによるエミッタンス測定続き  
 Qスキャンと同時にPMでのビーム形状を確認した→PMの方が若干小さい



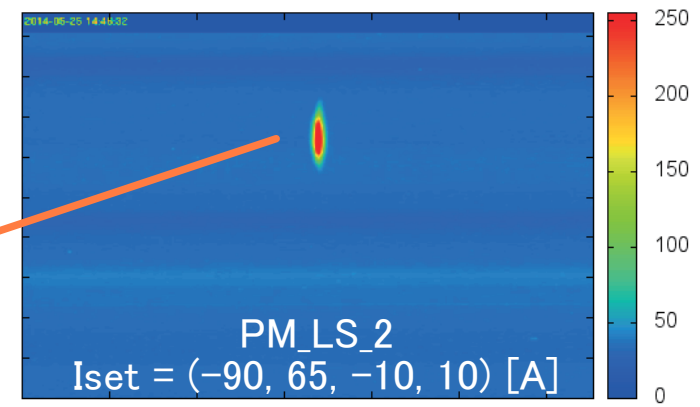
$\sigma$ 及び $P_{g2}$  Iset=(-10, 0, 0, 0) [A]



$\sigma$ 及び $P_{g2}$  Iset=(-50, 32.5, -5, 5) [A]

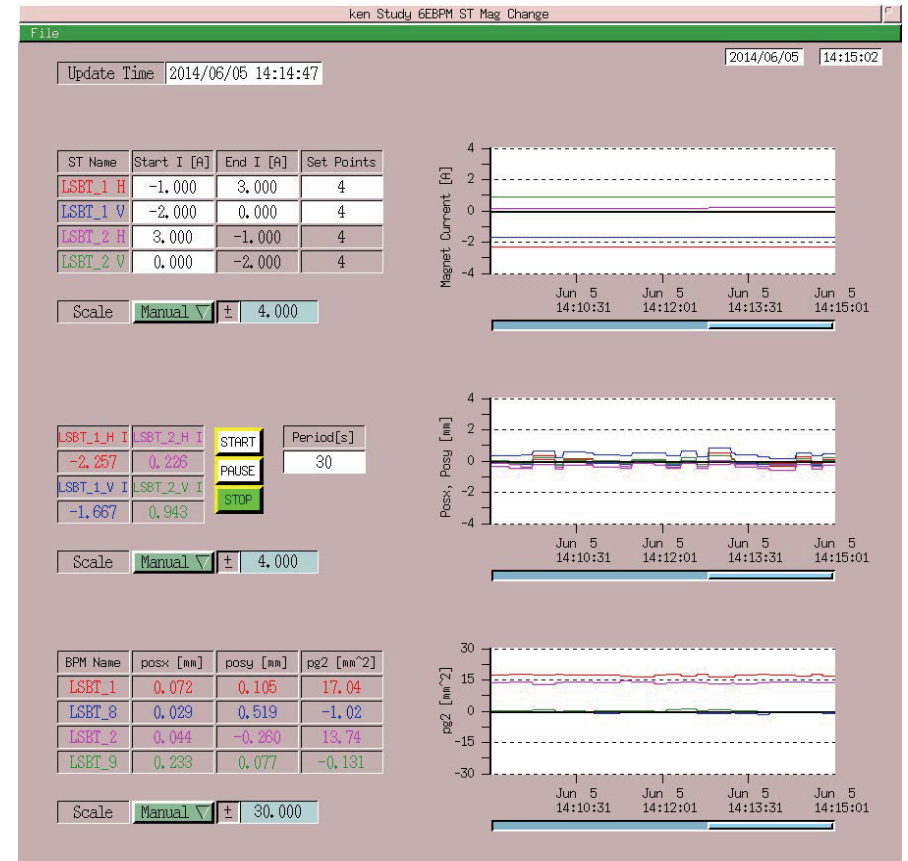


$\sigma$ 及び $P_{g2}$  Iset=(-90, 65, -10, 10) [A]



## ●まとめと今後の課題

- ・二次相対モーメントを正確に測定する為、信号電圧差分を五次のモーメントまで含む表記とした。各モーメントの寄与は実効開口半径で表される。
- ・全体較正に就いて、ほぼ理論(予想)通りの測定値が得られ、全体較正の手法が正しく且つ有用であることが確認された。
- ・Qスキンの手法により、六電極BPMのみの使用によりビームエミッタンス及びツイスパラメータが測定された。ビームエネルギー値による不確定性要因もあるが、それは今後の課題であろう。
- ・ツイスパラメータ整合はGUIを使用して行う予定で、現在準備を進めている  
→実運用化



自動的に全体較正を行うGUI (測定のみ計算は別)