

16電極ビームモニターの 開発の現状

京都大学 理学研究科 高エネルギー研究室 M2
リ ヨハン
李 耀漢

目次

1	目的と原理	
1.1	開発の動機及び目的	3
1.2	動作原理	7
1.3	回路構成	9
1.4	インストール場所	10
1.5	これまでの研究の流れ	11
2	進行中の研究	
2.1	Goerztelアルゴリズム	13
2.2	Goerztelアルゴリズムの限界	14
2.3	Linear Fitting アルゴリズム	15
2.4	ダイポールモーメント解析結果	17
2.5	遺伝的アルゴリズムによる解析	20
3	まとめ	

1 目的と原理

1.1 開発の動機及び目的

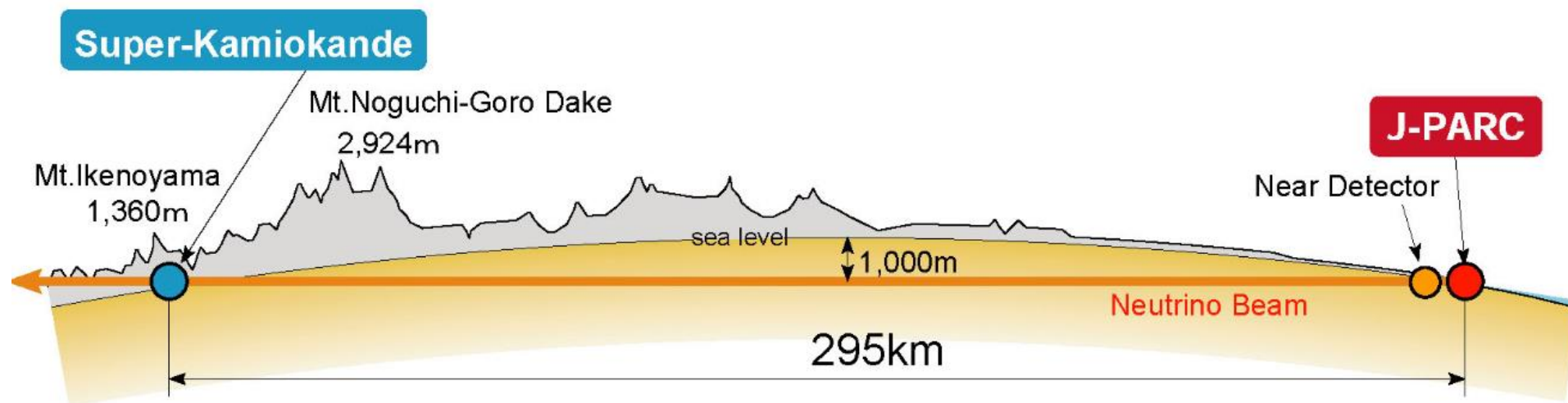
• J-PARCのビームの大強度化

- T2K実験のニュートリノ振動実験では、CP対称性の破れの発見を目指している
- パラメータの精密測定のため統計量の増大が必要になる
- MRの速い取り出し(Fast extraction, FX)のアップグレードが進行中
- 粒子数 (protons/pulse) を増やすか繰り返し周期 (Repetition cycle) を短くするか
- 今年、505 kW (粒子数： 2.6×10^{14} protons/pulse、周期：2.48 s) 達成
- 粒子数を25%増加、繰り返し周期を約1sに短縮することで、1.3 MWを目指す

Beam Power [kW]

$$= (30 \times 10^9 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{-3}) [\text{k}] \times \frac{\text{protons/pulse}}{\text{Repetition cycle} [\text{s}]}$$

式.1 ビーム強度



1.1 開発の動機及び目的

- 強度依存性のビームの不安定性が増大
 - ビームロス低減のためにビームダイナミクスの理解が必要
 - ビーム電荷が増えることによる非線形共鳴（Nonlinear Resonance）問題に着目
 - ビームプロファイル測定が重要課題となる

モニター名	台数	測定項目
DCCT	2	ビーム強度・ビームロス
FCT	7	ビーム強度
WCM	3	ビーム時間の分布
BPM	186	ビーム重心位置
Tapered-coupler BPM	2	バンチ内のビーム位置
BLM(proportional)	238	ビームロス
BLM(ionization)	36	ビームロス
BLM(scintillator)	2	ビームロス
IPM	3	横方向のビームプロファイル
FWM	2	横方向のビームプロファイル

表.1 MRのモニター

1.1 開発の動機及び目的

- Flying Wire Profile MonitorやIonization Profile Monitorによるビームサイズとビーム分布情報の測定が大強度ビームでは困難
- Flying Wire Profile Monitor(FWM)
 - ビームを横切るワイヤを動かし、ワイヤによる散乱粒子をシンチレータとPMTで測定する非破壊型ビームモニター
 - J-PARC MRでは直径7 μm のカーボンワイヤを使用し、5m/sの速さで動かしている
 - ビーム強度 4.4×10^{13} *protons/2bunches*でワイヤが切れる
- Ionization Profile Monitor(IPM)
 - 1方向のプロファイルを測る非破壊型ビームモニター
 - ビームが通過時に残るガスがイオンと電子に電離するときの信号を利用
 - 大強度のビームでは、ビーム自身による電場で歪みが生じ、精度が下がる

1.1 開発の動機及び目的

表2 モニター概要

モニター名	16電極ビームモニター 16PU(position Pick Up)		
モニター種類	ストリップライン型 非破壊型		
測定項目	横方向のビームプロファイル		
インストール台数	2台 (#13と#15)		
電極数	16個		
材質	SUS316L (高耐食ステンレス鋼)		
全体の長さ	500 mm	電極の長さ	320 mm
外径	195 mm	電極の厚み	5.0 mm
内径	165 mm	電極の幅	9.85 mm

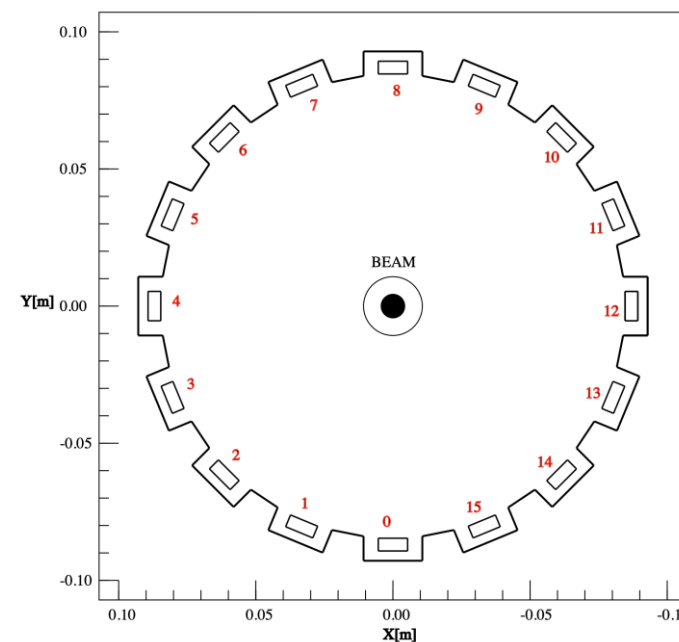
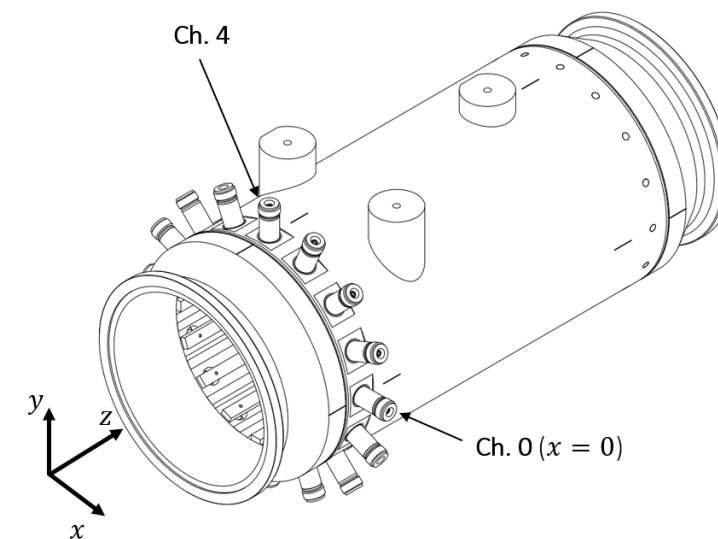


図.1
16電極ビーム
モニターの全
体像 (上) と
16電極ビーム
モニターの断
面 (下)

1.2 動作原理

- ビーム電荷（線密度 λ ）から誘導電荷密度 σ を計算

$$\begin{aligned} \sigma(R, \theta, r, \phi) &= \frac{\lambda}{2\pi R} \frac{R^2 - r^2}{R^2 + r^2 - 2ar \cos(\theta - \phi)} \quad \left(\frac{1 - r^2}{1 - 2r \cos \theta + r^2} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} r^n \cos n\theta \right) \\ &= \frac{\lambda}{2\pi R} \left[1 + 2 \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{\cos n\theta}{R^n} \text{Re}(x + iy)^n + \frac{\sin n\theta}{R^n} \text{Im}(x + iy)^n \right\} \right] \\ &= \frac{\lambda}{2\pi R} \left[1 + 2 \left(\frac{x}{R} \cos \theta + \frac{y}{R} \sin \theta \right) \leftarrow \text{Dipole moment (position)} \right. \\ &\quad \left. + 2 \left(\frac{x^2 - y^2}{R^2} \cos 2\theta + \frac{2xy}{R^2} \sin 2\theta \right) \leftarrow \text{Quadrupole moment (size)} \right. \\ &\quad \left. + 2 \left(\frac{x^3 - 3xy^2}{R^3} \cos 3\theta + \frac{3x^2y - y^3}{R^3} \sin 3\theta \right) \leftarrow \text{Sextupole moment} \right. \\ &\quad \left. + 2 \left(\frac{x^4 - 6x^2y^2 + y^4}{R^4} \cos 4\theta + \frac{4x^3y - 4xy^3}{R^4} \sin 4\theta \right) + \dots \right] \end{aligned}$$

Monopole moment
(intensity)

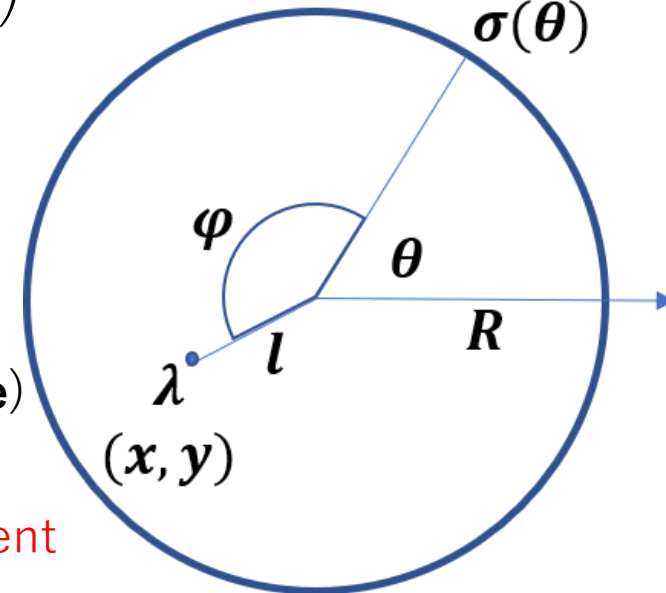


図.2 真空パイプの円筒座標系

Higher moment ...

式2 誘導電荷密度の式の展開。Dipole momentの以降、 $\cos \theta$ 項をnormal moment、 $\sin \theta$ 項をskew momentと呼ぶこともある。

1.2 動作原理

- 上記の式は以下の行列とベクトルで表現できる

データ処理

Output Voltage
信号

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ \vdots \\ V_{15} \end{pmatrix} = \frac{Q}{2\pi R} \begin{pmatrix} 1 & \frac{2 \cos \theta_0}{R} & \frac{2 \sin \theta_0}{R} & \frac{2 \cos 2\theta_0}{R^2} & \frac{2 \sin 2\theta_0}{R^2} & \dots \\ 1 & \frac{2 \cos \theta_1}{R} & \frac{2 \sin \theta_1}{R} & \frac{2 \cos 2\theta_1}{R^2} & \frac{2 \sin 2\theta_1}{R^2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{2 \cos \theta_{15}}{R} & \frac{2 \sin \theta_{15}}{R} & \frac{2 \cos 2\theta_{15}}{R^2} & \frac{2 \sin 2\theta_{15}}{R^2} & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \langle x \rangle \\ \langle y \rangle \\ \langle x^2 - y^2 \rangle \\ \langle 2xy \rangle \\ \langle x^3 - 3xy^2 \rangle \\ \langle 3x^2y - y^3 \rangle \\ \vdots \end{pmatrix}$$

Multipole Moments

$\begin{pmatrix} 1 \\ \langle x \rangle \\ \langle y \rangle \end{pmatrix}$

dipole

$\begin{pmatrix} \langle x^2 - y^2 \rangle \\ \langle 2xy \rangle \end{pmatrix}$

quadrupole

データ校正

- Bench Test
 - WC (Wire Calibration)
 - TDR (Time Domain Reflectometry)
 - Wide band response check with a taper pipe
- Beam Based Calibration
 - BBA (Beam Based Alignment)
 - BBGC (Beam Based Gain Calibration)

式.3 モーメント計算の行列とベクトル

- エミッタンス測定の例

$$\begin{aligned} \langle x^2 - y^2 \rangle &= \sigma_x^2 - \sigma_y^2 + \langle x \rangle^2 - \langle y \rangle^2 \\ &= \epsilon_x \beta_x - \epsilon_y \beta_y + \langle x \rangle^2 - \langle y \rangle^2 \end{aligned}$$

式.4 エミッタンスの計算例。2地点のモーメントの測定からエミッタンス

ϵ_x, ϵ_y が求まる。(ただし、 $\frac{\beta_{x,1}}{\beta_{x,2}} \neq \frac{\beta_{y,1}}{\beta_{y,2}}$)

1.3 回路構成

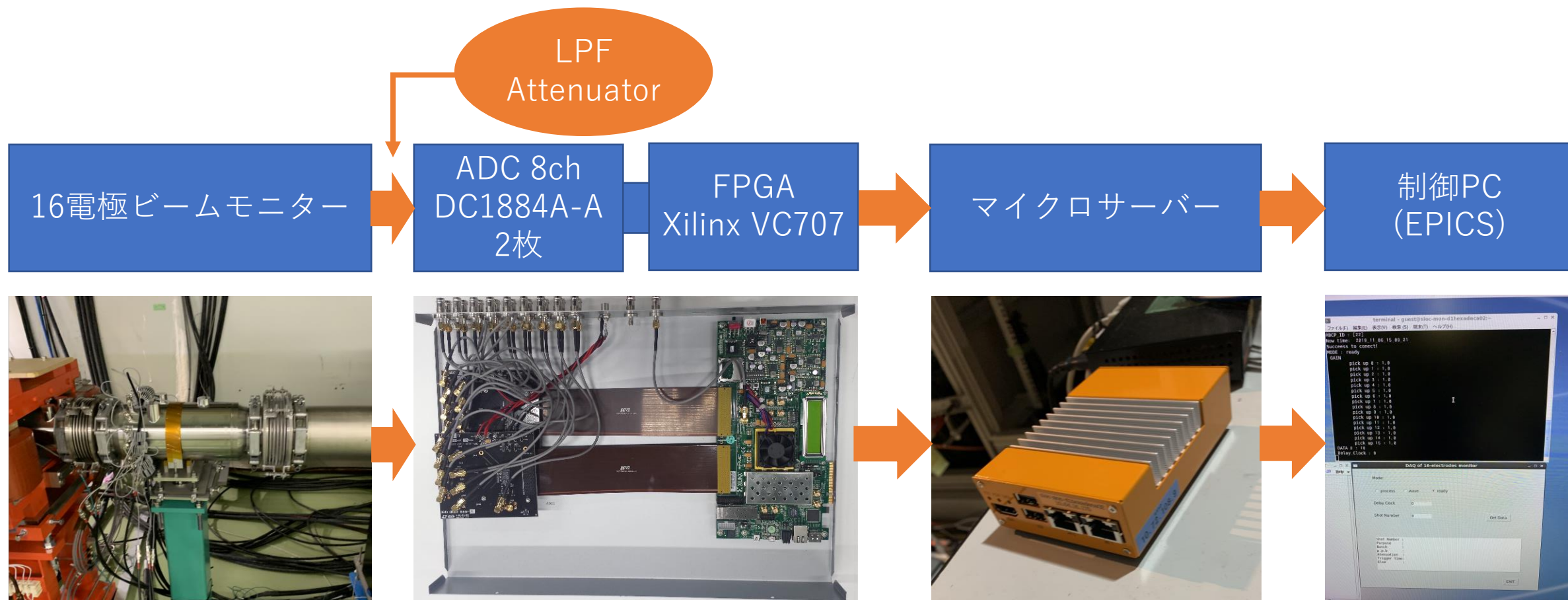


図.3 16電極ビームモニターの回路の構成の概略（上）とその写真（下）

1.4 インストール場所

- 現在16PUはJ-PARC MRの#13と#15の場所にインストールしている
- 16PUの位置とその理由
 - 異なる2地点のベータ関数の値とモーメントデータからエミッタンスを測定
 - 読み出し回路(FPGA)の場合、#13用は地上のD1電源棟に、#15用はトンネル内のサブトンネルに

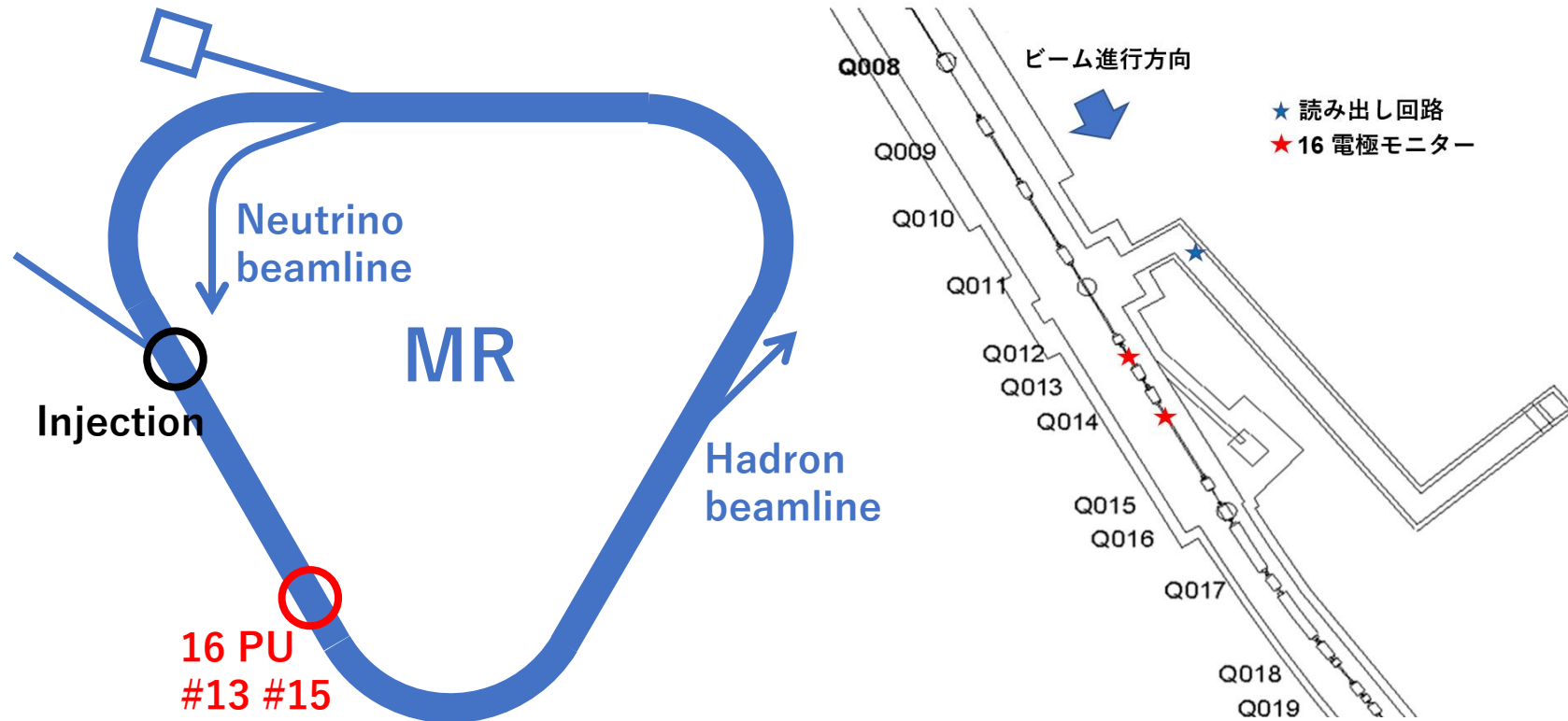


図.4 MRにおける
16PUのインストール
場所 (左) とその拡大
図 (右)

1.5 これまでの研究の流れ

中西
2016

J-PARC MRにおける多電極ビームモニターの開発

- 16電極ビームモニターの開発の必要性を検討
- #15に16電極ビームモニターを1台インストール

宇野
2017

16電極ビームモニターの処理回路・データ取得システムの開発

- #15の16電極ビームモニターのキャリブレーションを行う
- 読み出し回路とDAQシステムを開発

田島
2019

16電極ビームモニターの開発と非破壊エミッタンス測定

- #13にもう1台の16電極ビームモニターをインストール
- エミッタンスやその他のパラメータの測定を行う

李
2020

16電極ビームモニターのための新アルゴリズムの探索

- 解析のための新しいアルゴリズムの検討
- 全体の解析システム（データ取得からデータ処理まで）の安定化

2 進行中の研究

2.1 Goertzelアルゴリズム

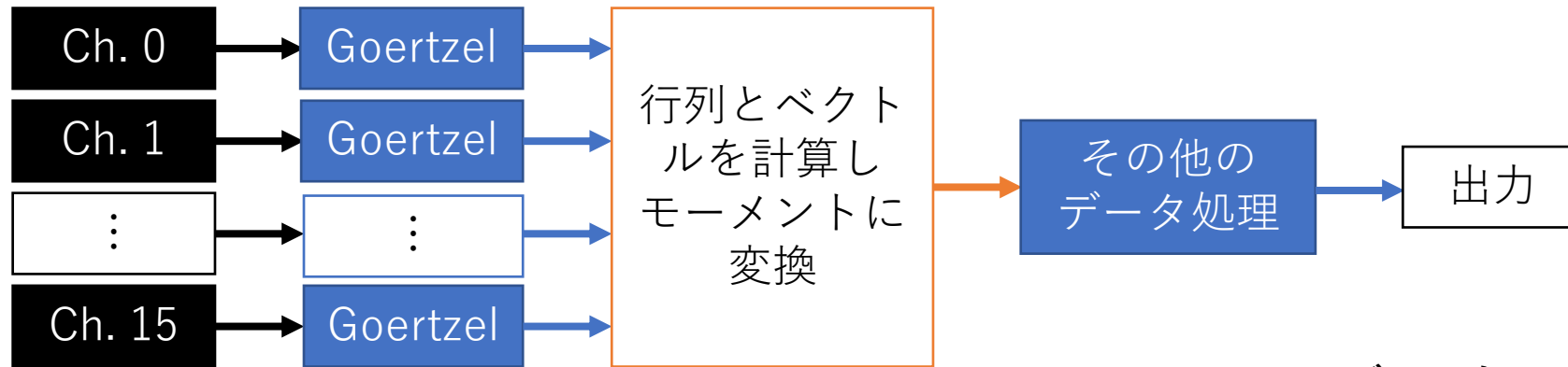


図.5 FPGAでのデータ処理の流れの概略図

$$s[n] = x[n] + 2 \cos \omega_0 s[n-1] - s[n-2]$$

$$y[N] = s[N] - e^{-j\omega_0} s[N-1]$$

式.5 Goertzelアルゴリズムの式。 $x[n]$ は n 番目のサンプリングデータ、 N はサンプリングデータの数、 $\omega_0 = 2\pi k/N$ ($k \in \mathcal{N}$)は取り出したい周波数であり、 $y[N]$ は取り出される周波数成分である。

- Goertzelアルゴリズムは信号から一つの周波数成分を取り出すDFTの一種
- Goertzelアルゴリズムの特徴
 - 処理量が少ないので、FPGA内で高速演算が可能になる。
 - アルゴリズム自体がIIRフィルターとして働き、信号の主成分だけを取り出し、ノイズを落とす。
 - 16PUではRF周波数の2倍の周波数成分3.34-3.44MHzを取り出し、モーメント解析を行っていた。

2.2 Goertzelアルゴリズムの限界

- 16PUと3-50BT MRPMとの測定結果が違う問題の原因の一つとして、取り上げられているのが、アルゴリズムの処理問題
 - 約20%のズレが報告された
- RF周波数成分を取り出したモーメントと、その2倍を取り出したモーメントの差が大きい
 - 60ターン付近からズレが発生して、徐々に広がる
 - 3.4MHzを取り出す方法では、ビームの主成分をとらえていない可能性がある。
 - エミッタンスを過小評価している可能性がある。
- 新しいアルゴリズムの探索が必要になってくる

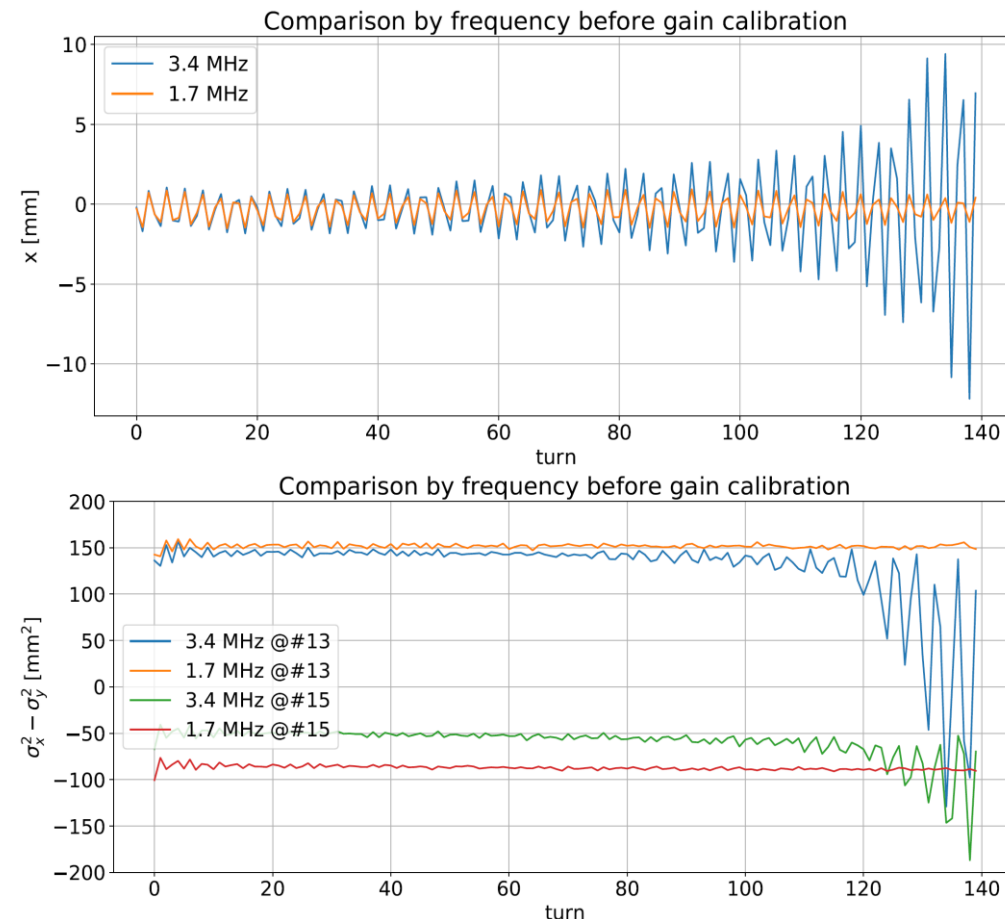


図.6 Goertzelアルゴリズムを使ったモーメント処理結果。上がDipole Momentの水平成分、下はQuadrupole Momentから求めたビームの広がり値である。田島(2019)

2.3 Linear Fitting アルゴリズム

- *R. Singh*, “Statistical Treatment of Beam Position Monitor Data”
 - 4電極BPMを仮定して、新しいアルゴリズムのシミュレーションを行った
- 従来のBPMの場合、右の図の信号サンプルの面積を信号の強度として使い、Dipole momentを計算した

$$\frac{x}{r} = \frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{S_L - S_R}{S_L + S_R}$$

式.6 従来のBPMのビームの位置の計算式。 S_L と S_R はそれぞれ、左の信号と右の信号を表し、 Δ と Σ はそれぞれ、左と右の信号の差と和を表す。

- 新しいアルゴリズムは、この式を直線の方程式

$$\Delta(t) = \langle m \rangle \Sigma(t) = \frac{\langle x \rangle}{r} \Sigma(t)$$

式.7 ビーム位置の直線方程式

とみて、ADCの各サンプルを上のにLeast-Square Minimizationする方法をとっている。

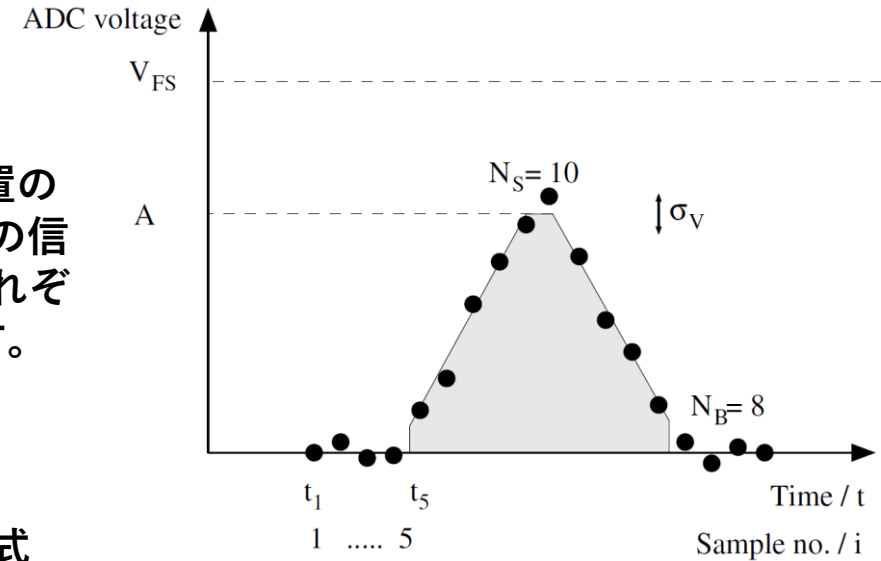


図.7 ADCにカウントされる信号サンプルのシミュレーション図。ここでは、ビームの信号を三角パルスと仮定した。

R. Singh(2018)

2.3 Linear Fitting アルゴリズム

- 実際にシミュレーションをしてみたのが図8
 - 論文では三角パルスだが、16PUはその微分波形
 - 微分波形をsin波と仮定して仮信号を出力
- 各サンプルに対し、右と左の信号の差分をプロットしてみたら、各点が直線に乗っている
- この傾き (パラメータ $\langle m \rangle = \langle x \rangle / r$) が、ビームの位置となる

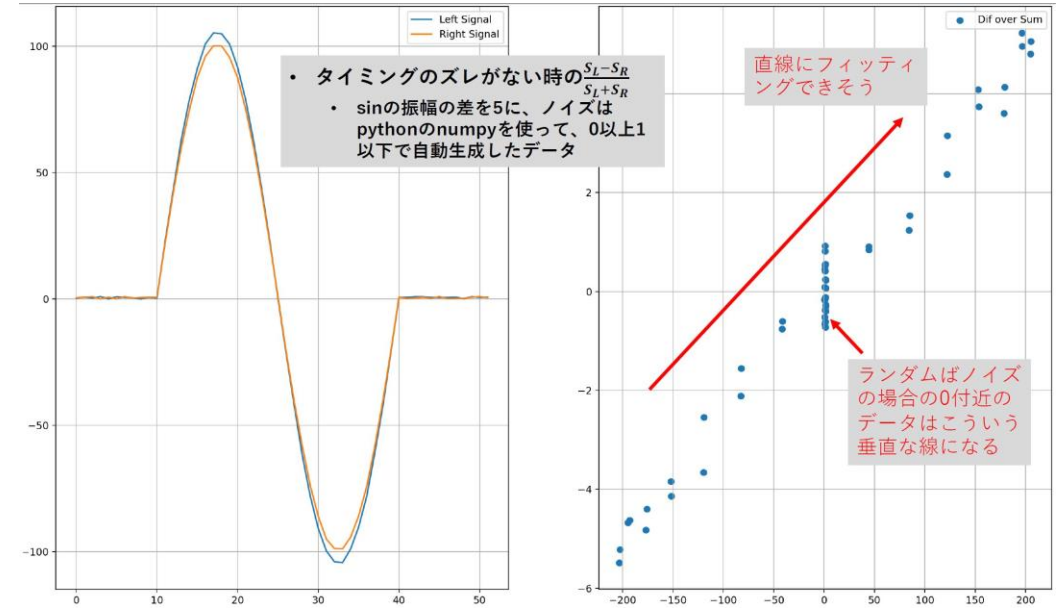


図.8 フィッティングアルゴリズムのシミュレーション結果

- Goerztelアルゴリズムでは、信号の周波数成分の中の1つの成分だけを利用する方法をとっていたため、本当のビームの主成分を切り捨てていた可能性がある
- 新しく紹介したフィッティング法は全サンプルを使う
- より詳しい情報を使っていると期待している

2.4 ダイポールモーメント解析結果

- ビームの形状が安定したビームの解析では、Goerztelアルゴリズムもフィッティングアルゴリズムも同じ振動様子を見せる

1.7MHz Goerztel 3.4MHz

Fitting

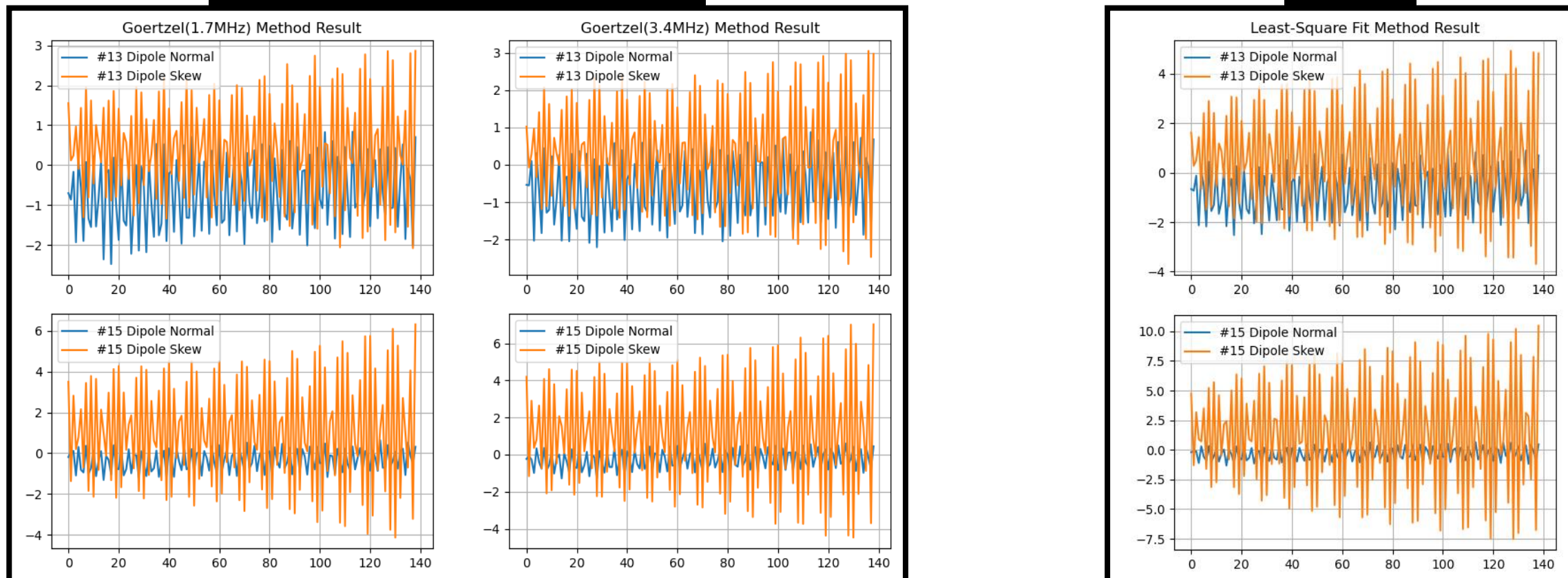


図.9 低強度の1バンチのビームのDipole Momentの解析結果。横軸はターン数で、縦軸はDipole Moment[mm]である。Normalは水平方向xを、Skewは垂直方向yを示す。

2.4 ダイポールモーメント解析結果

- RF空洞の影響を受けるビームの解析では、Goerztelアルゴリズムからの取り出した成分による違いが見えるが、フィッティングアルゴリズムはその問題からは自由

1.7MHz Goerztel 3.4MHz

Fitting

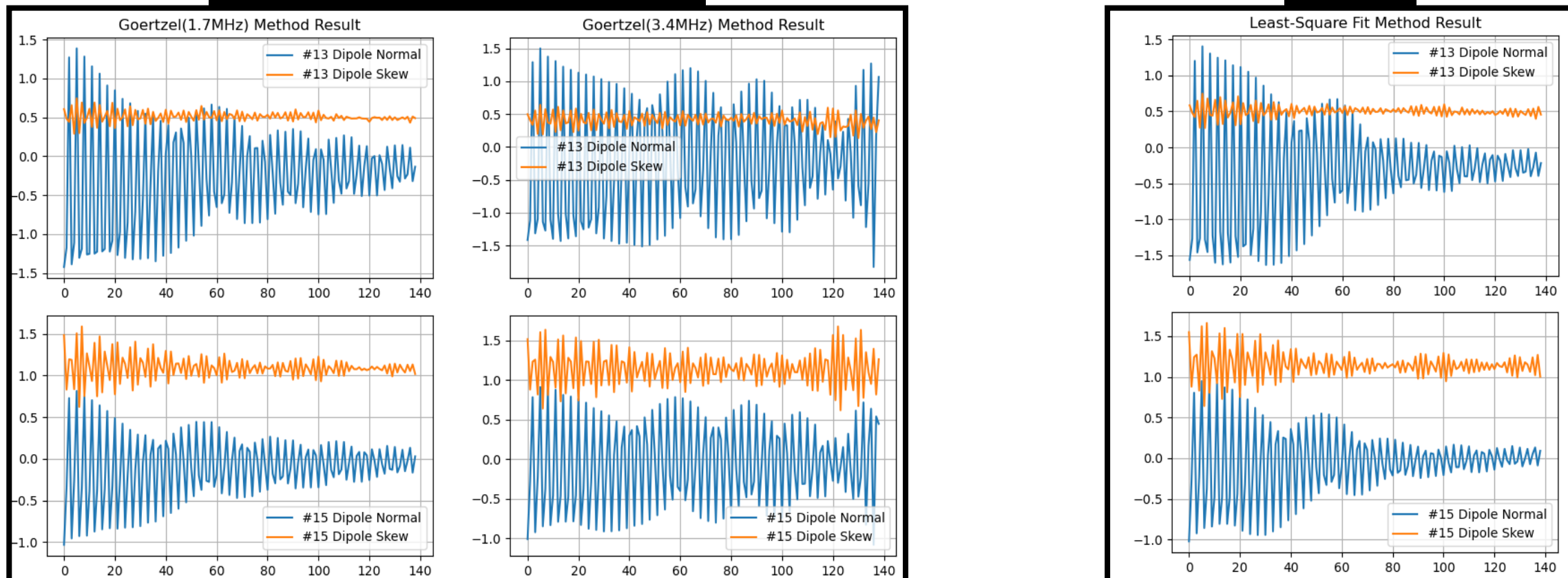


図.10 大強度の2バンチ中の1バンチのビームのDipole Momentの解析結果。横軸はターン数で、縦軸はDipole Moment[mm]である。Normalは水平方向xを、Skewは垂直方向yを示す。

2.4 ダイポールモーメント解析結果

Linear Fitting アルゴリズムの利点

- どの周波数成分を取り出すかによる解析結果の違いがなくなる。取り出した周波数が主成分なのかの問題から解放
- より多くの情報を使っていると期待できる

問題点

- time domainサンプルを使った時、サンプルのタイミングのズレに敏感になる
 - Frequency domainサンプルでフィッティングすることで解決
- 計算量が増える
 - Goerztelアルゴリズムの場合、140ターンの解析には (< 0.1秒)
 - フィッティングアルゴリズムは、140ターンの解析に (> 4秒)
- ビームの内部振動を解析するにはさらなる議論が必要

2.5 遺伝的アルゴリズムによる解析

- *Z. Omarov*, “Machine learning assisted non-destructive transverse beam profile imaging”
 - 多電極（8電極）の非破壊ストリップライン型のビームモニターを想定
 - 遺伝的アルゴリズムを利用しビームのプロファイルをシミュレーション
- 粒子の位置を染色体とし、その水平・垂直の座標をエンコーディング
- ビームサイズの振動・四重極モーメントの振動を最適化

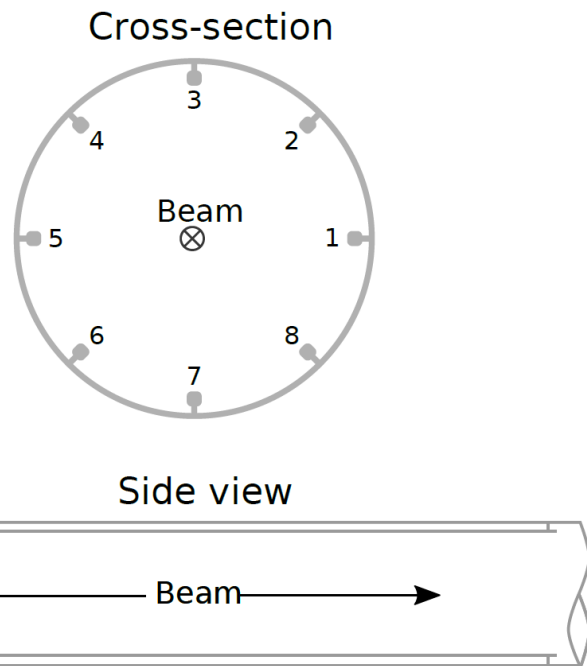


図.11 Omarovさんの論文で想定しているビームモニターの断面（上）とビームが通るパイプを見た概略図（下） Z.Omarov(2020)

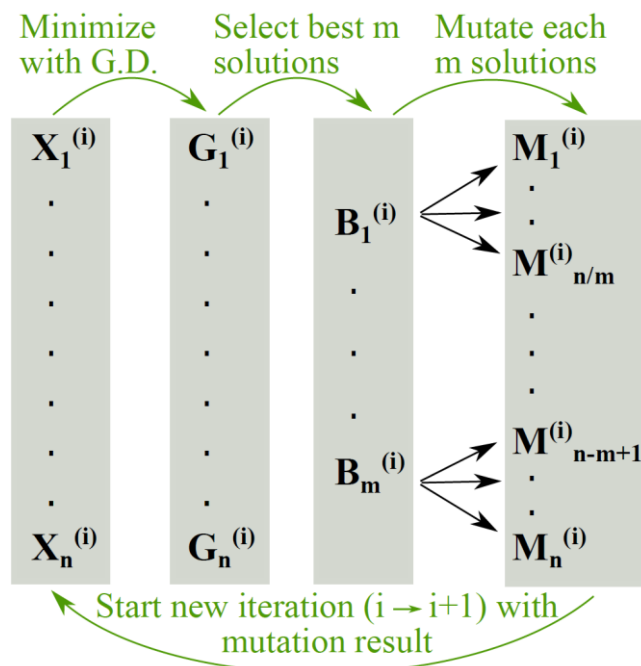


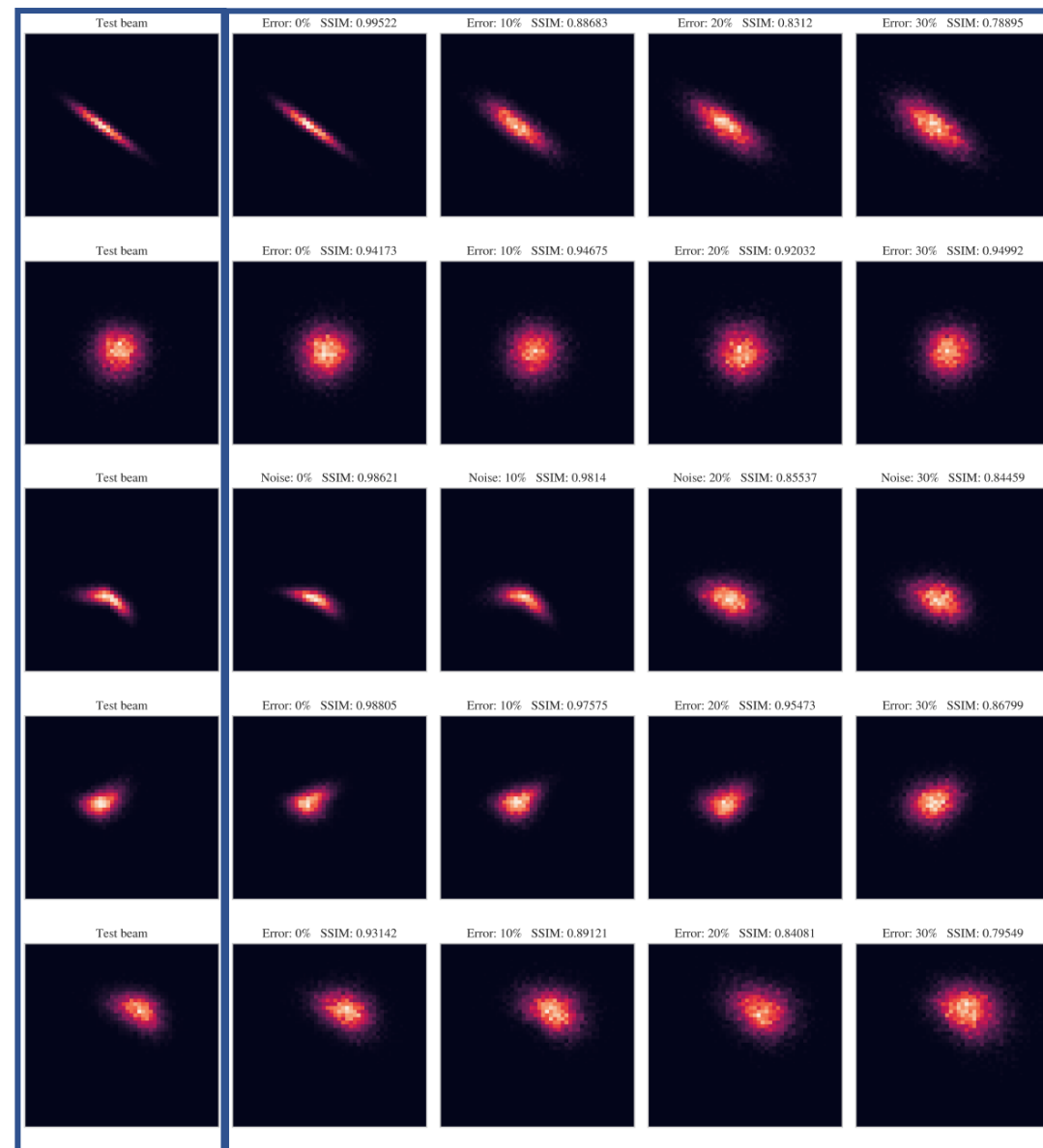
図.12 遺伝的アルゴリズムのフローチャート。 $X_n^{(i)}$ は評価前の染色体（粒子の座標）、 $G_n^{(i)}$ は評価後（スコア付きの）の染色体、 $B_n^{(i)}$ は選択後の染色体、 $M_n^{(i)}$ は突然変異（ランダム）を起こした後の染色体 Z.Omarov(2020)

2.5 遺伝的アルゴリズムによる解析

- ビームサイズを事前にわかっているほど（エラーが小さい）、ビームが歪んでないほど、ビーム形状がうまく再現できる
 - 再現性はStructural Similarity Index Measure(SSIM)で評価
- エラーをいかにコントロールするかが重要課題
 - ベータ関数の実際の値
 - ビーム位置の誤差
 - その他の統計誤差等

図.13 遺伝的アルゴリズムを使ったシミュレーション結果。一番左の列はシミュレーションに使ったテストビームの形状。その次の列から順番にビームサイズのエラーが0% 10% 20% 30% の場合の再構成したビーム形状である。

Z.Omarov(2020)



3 まとめ

3.1 まとめ

- J-PARC MRのアップグレードに合わせ、大強度ビームのプロファイル測定が可能な新しい形の16電極ビームモニターを開発している
 - 大強度のビームの環境では他のビームモニターを使った測定が困難な状況
- 現在MRの#13と#15にインストールしている
- 実際エミッタンス等を測定し実運用に向けて開発を進めている
 - 3-50BT MRPMとの比較でズレがあることが報告されている
 - 既存のアルゴリズムでは、エミッタンスを過小評価している可能性がある
- 新しいアルゴリズムを探している
 - R. SinghさんのLinear Fittingアルゴリズム
 - Z. Omarovさんの遺伝的アルゴリズムからのアプローチ
- 遺伝的アルゴリズムの学習方法等の勉強して、実際の16PUのデータに適用する
- 新しいアルゴリズムを16電極ビームモニターに適用するには、さらなる検討が必要