

論文要旨

電子・陽電子衝突型線形加速器のための衝突部 ビームフィードバックシステム (FEATHER) の開発

高エネルギー実験研究室
0383452 藤本 紘行



高エネルギー実験の研究とは、物質の窮極構造とそれらを支配する基本法則を実験的に探求する学問である。この学問の前進、すなわち人類がこれまでに探ったことのないミクロの世界を探求するためには、より高いエネルギーの加速器の開発が必要になる。

次世代に建設が計画されている加速器として、電子・陽電子衝突型線形加速器がある。この加速器は電子と陽電子がレプトンであるため、強い相互作用によるバックグラウンドが少なく、Higgs 粒子の観測や未知の粒子である SUSY 粒子の観測など、現在の素粒子理論や実験において注目される事象が、陽子と陽子の衝突に比べて、精密に観測されると考えられている。これまでの電子・陽電子衝突型加速器は、LEP に代表されるように円形のリング型加速器が使用されてきた。線形加速器をリング型加速器と比較したときに大きな長所として、電子と陽電子のシンクロトロン放射が原理上ないことが考えられるが、逆に短所としてはリング型加速器のようにビームを蓄えることができないことが考えられる。この短所を克服するためには、たった一度の電子ビームと陽電子ビームの衝突で、より多くの電子・陽電子反応を行なう必要がある。そこで、電子や陽電子の垂直方向のビームサイズを絞る必要があり、次世代加速器として計画されていた GLC の設計では 3nm 程までビームを絞る。さらに反応量を増やすためには、ビームとビームの垂直方向のずれをなくすることが課題となる。GLC の場合、仮にオフセットが $5\sigma = 15nm$ であれば、反応のロス量は 61%にも達する。ビームの位置はさまざまな要因により常に変わっていく。そしてそれらの要因をすべて取り除くことはできない。そこで衝突点でだけ、垂直方向のオフセットがない状態を作りたい。

FEATHER は、次世代加速器の衝突点において、ビームとビームの垂直方向のずれをなくし、衝突効率の向上を目指す技術開発のための実験である。衝突点において反応せずに通過した電子ビームの位置の偏差を検出し、これから衝突に向かうビームトレインの後方を走る電子の垂直方向位置の補正を行なうものである。そのために、加速器では成功例のない 10ns オーダーでのフィードバックシステムを開発することが目標である。それを実現するための技術要素である、Beam Position Monitor(BPM)、フィードバック回路、kicker の開発と電子ビームによる試験、これらが本論文のテーマである。

これらの技術要素を利用したビームフィードバックの流れは、次の 1 から 4 のようになる。

1. BPM によりビームの位置情報を電磁場として捕らえ (図 1①)、パルス信号に変

換して出力する。

2. そのパルス信号をフィードバック回路により加工する (図 1@2)。
3. 加工されたパルス信号を kicker 電極に送り (図 1@3)、パルス信号の起こす電磁場によりビームを蹴る。
4. 蹴る量の調整により、衝突点でのオフセットをなくす (図 1@4)。

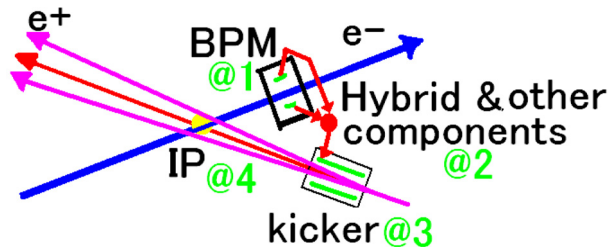


図 1: FEATHER のフィードバックシステム (概念図)

BPM はボタン型の 2 電極式、kicker はストリップライン型の 2 電極型を用いた。FEATHER 実験の BPM と kicker には電極が可動式であるという大きな特徴がある。電極をビームすれすれまで近づけることができるので、BPM では電子ビームの垂直位置を感度良く知ることができる。また kicker では、小さなパルスにより、電子ビームを大きく蹴ることができる。この電極上下駆動の機構は、当初手動式であった。まずこの BPM と kicker の上下に微量駆動が可能なステップモータを取り付けた。また、遠隔より BPM と kicker の位置を把握するための位置検出器 (リニアゲージ) を BPM に二つ、kicker に四つ取り付けた。これにより手動式では困難であり問題となっていた BPM のキャリブレーションを高精度にできるようになった。

フィードバック回路については、まず、SPICE プログラムによるシミュレーションとネットワークアナライザによるフィルタのテストを行った。BPM パルス形状をコンピュータで表現できたことは、次のステップであるパルスの整流回路の開発に大いに役に立つであろう。さらにシグナルジェネレータにより AMP と、BPM の上下のシグナルの差分をとる高周波デバイス (Hybrid)、改造後の kicker と BPM の基本的な特性を把握した。

ビームテストは高エネルギー加速器研究機構の先端加速器施設である ATF (Accelerator Test Facility) を利用した。シングルバンチを利用し、ケーブルによるシグナルの減衰測定、ATF のパルスマグネットからくるノイズの測定、Hybrid のキャリブレーション、BPM キャリブレーションなどの研究を行なった。

本論文では kicker や BPM、その制御やモニタシステムの製作と導入、技術要素の特性測定についての詳細な報告をまとめた。また、高エネルギー実験の要求するフィードバックシステムを構築するためには何が必要であるかを念頭に置き、個々の技術要素について考察した。

電子・陽電子衝突型線形加速器のための
衝突部ビームフィードバックシステム
(FEATHER) の開発

東京都立大学大学院
理学研究科物理学専攻
藤本 紘行

2005年1月11日

1	3
1.1 電子・陽電子衝突型線形加速器	3
2 FEATHER	8
2.1 GLC のような電子・陽電子衝突型線形加速器のフィードバックシステムのデザイン	8
2.1.1 kicker デザインの概念	11
2.2 ATF での FEATHER 実験のデザイン	14
3 FEATHER	18
3.1 kicker	18
3.2 BPM (Beam Position Monitor)	21
3.3 駆動システム	21
3.4 リニアゲージ (位置検出器)	23
3.5 フィードバック回路	24
3.5.1 コネクタ	25
3.5.2 ケーブル	26
3.5.3 ディバイダ (分岐器)	27
3.5.4 LPF(Low Pass Filter)	27
3.5.5 Hybrid (演算用高周波デバイス)	28
3.5.6 AMP	32
3.6 データ収集システム	33
4	34
4.1 kicker 電極の特性インピーダンス測定	34
4.2 kicker 電極のたわみの測定	36
4.3 kicker 電極の平行度測定	37
4.4 フィードバック回路要素のシグナルジェネレータによるテスト	39
4.4.1 Hybrid のテスト	39
4.4.2 AMP の増幅率と AMP による遅延時間の測定	41
4.4.3 kicker 電極のパルス通過率測定	43
5	44
5.1 BPM パルスの 20m ケーブルによる減衰率測定	44

5.2	SPICEによるシミュレーションのパルスと実際のパルスの比較 (LPF 後まで)	45
5.3	ATF ダンピングリング内に発生するノイズの観測	49
5.4	Hybridによる上下電極の差のパルスの観測	49
5.5	BPM キャリブレーションのためのデータ取得	52
5.6	Hybridを使ったBPM キャリブレーションのためのデータ取得	54
6	BPM	55
6.1	BPM キャリブレーション	55
6.2	Hybridを利用したBPM キャリブレーション	58
7		60
7.1	kicker	60
7.2	BPM	61
7.3	電気回路系	62
7.3.1	Hybrid	62
7.3.2	AMP	62
7.3.3	LPF	62
7.3.4	SPICEモデル	62
7.3.5	ダイオード	63
7.4	データ収集システム	63
7.5	ビームを使った研究	63
8		64

1

1.1

FEATHER 実験は、GLC (global liner collider) のファイナルフォーカスでの利用を第一の目的として立ち上げられた。GLCは電子・陽電子衝突型であり、図 1.1 のように果てしなく長い直線の加速部を持つ線形加速器で、次世代の加速器として建設が計画されたものである。先に実験がスタートする LHC (Large Hadron Collider) で、質量の起源に関する Higgs 粒子や、標準モデルを超える理論として有力となっている超対称性論で予言される SUSY 粒子などが発見される可能性がある。しかし LHC では強い相互作用によるバックグラウンドが非常に大きく、それらの粒子の質量やそのほかのパラメータの正確な測定は困難である。GLC では電子・陽電子がレプトンであるため、電弱相互作用で反応することから反応は非常にクリーンである。そのためにこれらの新粒子が LHC で発表された場合に、より詳細な研究は GLC において行なわれると考えられている。

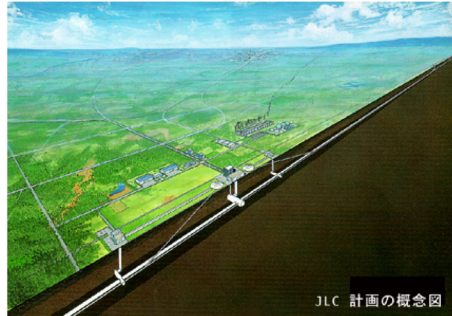


図 1.1: GLC 計画の概念図。GLC 計画は当初 JLC (Japan liner collider) と呼ばれていた。予算の都合もあり、国際協力が欠かせないことから、GLC と名称変更された。

エネルギーが 100 GeV までの電子・陽電子衝突型加速器としては、トリスタンや LEP のようなリング加速器が最適である。しかし、電子のように静止質量が非常に軽い粒子をビームとして用いる場合、100 GeV 以上のエネルギーでは、リング加速器を回るときのシンクロトロン放射によるエネルギーの消費がいちじむしい。電力消費を抑えるには、リングの周長をビームエネルギーの 4 乗で大きくしなければならない。よって 1 TeV の領域を測定するためには、曲線部分のない線形加速器の方が適している。線形加速器では電子・陽電子ビームは直線上に加速されるので、原理的には放射光損失がなく、電力消費に対する加速効率が良い。図 1.2 に GLC の加

速器システムの全体図を示す。2GeV までそれぞれの線形加速器で加速された電子と陽電子ビームは、ダンピングリングで超低エミッタンス化され、前段加速器で予備加速された後、主線形加速器の端部まで輸送される。そこでビームを衝突点に向けてUターンさせ、250GeV~500GeVまで加速した後、ファイナルフォーカス系で絞り込んで衝突させる。

表 1.1 は GLC のスペックである。エネルギーは建設直後の第一期で 500GeV、アップグレード後の第二期で 1000GeV である。また x (水平方向)、y (垂直方向)、z (ビーム進行方向) のビームサイズは 243nm、3.0nm、100 μ m (第一期) である。バンチ間隔は 1.4ns で、これを周波数に直すと 714MHz である。

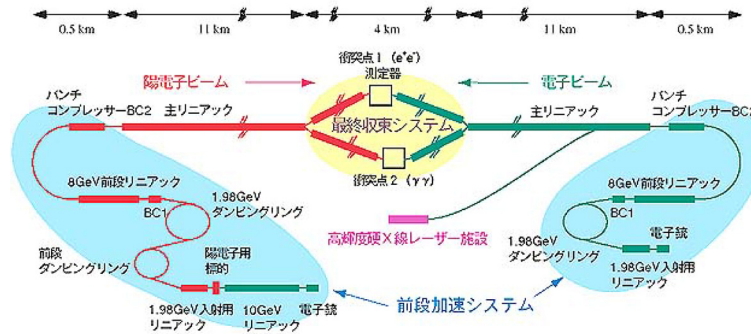


図 1.2: GLC のレイアウト (計画)

	第一期	第二期
エネルギー	500GeV	1000GeV
ルミノシティ	$25 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	
ビームサイズ σ_x	243nm	219nm
ビームサイズ σ_y	3.0nm	2.1nm
ビームサイズ σ_z	100 μ m	
x 方向のエミッタンス	$360 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{rad}$	
y 方向のエミッタンス	$4 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{rad}$	
トレイン長	268.9ns	
バンチスペース	1.4ns	
繰返し f	714Hz	
1 バンチ内の電子数 N	0.75×10^{10}	
クライストロンの周波数	11.4GHz	
加速勾配	49.8MV/m	

表 1.1: GLC のスペック。

ところで加速器実験の実験効率を考えると、ルミノシティーという量を利用すると便利である。ルミノシティー L は

$$L = \frac{N_1 N_2 f}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1.1)$$

のように書け、電子と陽電子の衝突頻度に比例する量である。ここで σ_x と σ_y はそれぞれ x と y 方向のビームサイズであり、 N_1 と N_2 は電子と陽電子の1バンチあたりの粒子数である。また f は1秒間のうちの衝突回数である。GLCの目標とするルミノシティーは $25 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ である。衝突部でのビームサイズ σ_x 、 σ_y を減少させることにより、 L を大きくすることができる。ただし、上の式はビーム同士がきちんとずれなく衝突した場合であり、ビームとビームとにずれ (offset) があつた場合はもちろん衝突頻度はもっと小さくなる。

線形加速器の場合、ビームが衝突するチャンスはそのビームに関しては一度きりである。リング加速器であれば、衝突しなかったビームを何度も周回させることで再利用が可能であるが、線形加速器ではそれができない。そのため、GLCで十分によい実験成果をあげるためには、ビーム衝突部でのビームサイズや offset を減少させる必要がある。まずビームのエミッタンス量を小さくする必要があるが、それに関しては電子銃や前段加速器、ダンピングリングにより行う。次に、offset を減らすことを考えるが、そのとき、垂直方向に注目したほうがいい。ビームのサイズは通常、横方向よりも縦方向のほうを小さくするからである。表 1.1 からわかるように、GLCの計画でも x 方向のビームサイズに比べて y 方向のビームサイズは2桁小さい。そこで垂直方向の offset を小さくすることに注目する。そのビームの垂直方向の offset をより小さくするための技術開発実験が、FEATHER (FEedback AT High Energy Requirments) 実験の目的である。

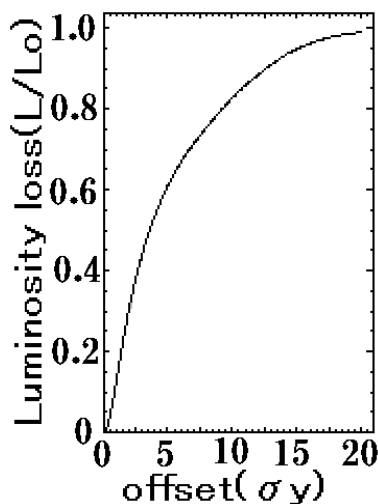


図 1.3: 垂直方向のビームの offset とルミノシティーのロスの関係。

垂直方向の offset	ルミノシティーのロス L/L_0	GLCでの offset (nm)
$10.0 \times \sigma_y$	0.83	30.0
$7.5 \times \sigma_y$	0.71	22.5
$5.0 \times \sigma_y$	0.61	15.0
$2.5 \times \sigma_y$	0.38	7.5
$2.0 \times \sigma_y$	0.29	6.0
$1.5 \times \sigma_y$	0.26	4.5
$1.0 \times \sigma_y$	0.12	3.0
$0.5 \times \sigma_y$	0.04	1.5

図 1.4:

図 1.3 は GLC のルミノシティーのロス量をグラフにしたものである。横軸がビームとビームの垂直方向の offset であり、縦軸がそのときのルミノシティーのロス量をあらわしている。垂直方向のビームの offset が小さければ小さいほど、当然ルミノシティーのロス量が小さくなる。offset に対し、ルミノシティーのロスが少なすぎるのではとの指摘があるかもしれないが、ビームの持つ電荷によりビームとビームが引き合うため、この程度の反応はある。それでもビームの垂直方向の offset が Root Mean Square (RMS) の 10 倍のとき、すなわち 30nm のとき、ルミノシティーのロスは 83 %もある (図 1.4)。そして、offset が RMS の 0.5 倍のとき、すなわち 1.5nm のとき、ルミノシティーのロスはわずか 4 %となる。この実験が GLC のような線形加速器にとっていかに重要かがわかる。GLC では 1nm 以下の offset を目指す。

ところで、次世代加速器についての技術として、常温での加速を行う方式の設計と、超伝導を使う方式の設計とがある。前者は X-band と呼ばれる加速管を利用する。この加速管は従来の加速管 S-band と比べて、周波数が 4 倍、波長が 4 分の 1 という開発中の新技術である (周波数 11.4GeV、加速勾配 53MV/m)。後者は TESLA が代表するように、超伝導加速空洞を利用してビームを加速する (周波数 1.3GHz、加速勾配 35MV/m)。これまでの GLC についての説明はすべて常温での加速方式についてのものである。そして FEATHER の実験は、この常温の方式でのルミノシティーのロスを減らすために必要な開発実験である。

また、CERN では次世代の加速器として、やはり電子陽電子衝突型の加速器である CLIC の構想 (図 1.5) を練っており、FEATHER の技術はこの加速器での利用も可能である。CLIC の計画では y 方向のビームサイズは表 1.2 のとおり 0.7nm と GLC の計画よりさらに小さくなるため、FEATHER のようなビームフィードバックの技術はさらに重要度が増す。

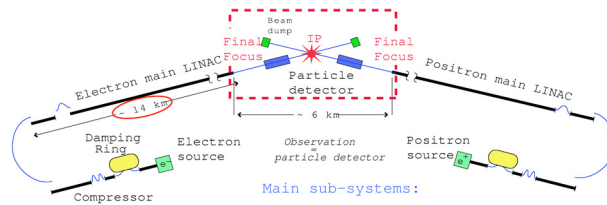


図 1.5: 次世代加速器、CLIC のレイアウト (計画)

エネルギー	3000GeV
ルミノシティー	$88 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
ビームサイズ σ_x	60nm
ビームサイズ σ_y	0.7nm

表 1.2: CLIC の計画上のスペック。

2 FEATHER

FEATHER は GLC の設計を念頭において、さまざまな設計を行なった。そこでこの章では GLC のフィードバックシステムのデザインについて書く。さらにフィードバックをテストするためのデザインについて述べる。

2.1 GLC

FEATHER 実験はバンチスペース 1.4ns(GLC) という非常に短い時間間隔に対応できる位置補正システムの構築を目標とする。FEATHER 実験の要素としては大きく分けて次の3つがある。

- BPM (Beam Position Monitor)
→ ビームの位置をモニタする。
- フィードバック回路 (Hybrid とその他の電子回路)
→ パルスを整形、輸送する。
- kicker
→ ビームに補正を与える。(kick する。)

図 2.1 は GLC のような電子・陽電子衝突型線形加速器の衝突部付近のシステムを簡単に示したものである。垂直方向のビームの offset を減少させる手順としては、まず電子の垂直方向の位置を Beam Position Monitor(BPM) により検出する (図 2.1(@1))。BPM と kicker の設置位置は、衝突部において発生するさまざまなノイズの影響を少なくするために、衝突部からある程度離す。逆に遠すぎると、ビームを kick するのに角度がついてしまうし、フィードバックに要する時間が大きくなってしまう。そこで衝突部より 4m 程の地点が適切であると思われる。BPM で検出した位置情報はパルスの電圧の大きさとして取り出せる。その情報 (高周波パルス) を Hybrid とその他の電子回路によりビームをキックしやすいパルスに整形する (図 2.1(@2))。ここで Hybrid とは、二つのパルスの電圧の和もしくは差をとる、受動の高周波デバイスである。このデバイスで BPM の上電極の情報と下電極の情報の和と差をとる。さらにその整形したパルスを kicker 電極へ通し、陽電子ビームを kick する (図 2.1(@3))。kicker もやはり、衝突点から 4m くらい離して設置する。また、BPM から kicker ま

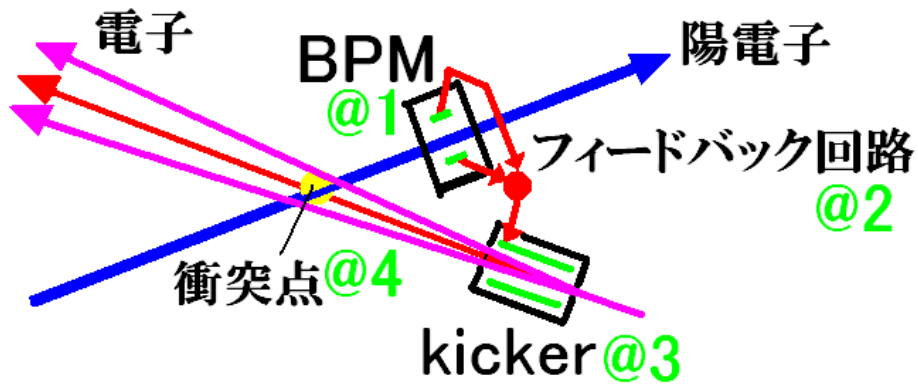


図 2.1: GLC のような電子・陽電子衝突型線形加速器の衝突部付近の図

での直線距離は1.5m くらいになると思われる。電子ビームの位置情報を、電子ビームを蹴るのに使おうとすると、ケーブルの長さは8m 以上になり、フィードバックが遅くなってしましノイズも多く乗ってしまうと思われるため、電子ビームの情報を陽電子ビームのほうへフィードバックする。kicker によって陽電子を kick することにより、衝突点付近 (図 2.1(@4)) でのビームの垂直方向のずれをなくすことをめざす。

フィードバックシステムに必要な kicker、BPM についてだが、kicker の電極については図 2.2 に示すとおりストリップライン型の 2 極式を想定する。BPM の電極については図 2.3 に示すとおりボタン型の 2 極式を想定する。

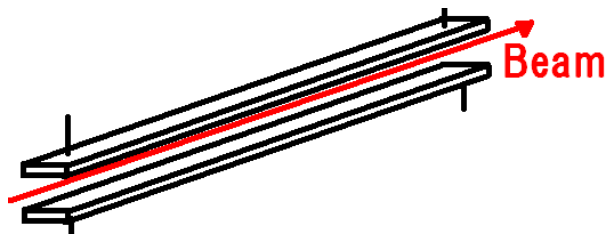


図 2.2: ストリップライン型 2 極式 kicker の電極の形の概念図。

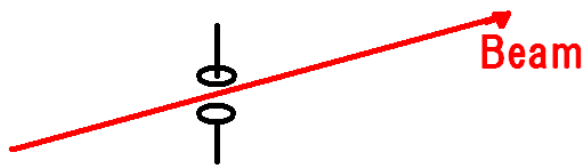


図 2.3: ボタン型 2 極式 BPM の電極の形の概念図。

FEATHERが補正を目指すのは、地盤振動などからくるビーム位置のずれである。地盤の振動のおおもとは自然界の例えば海洋による振動0.2Hzから、文化的要因1~100Hzまでさまざまである。これらすべての振動の原因を取り除くことは不可能であるので、FEATHERのようなビームフィードバックによる補正が必要となる。図2.4は、愛知県の花崗岩地質での地盤振動の測定結果である。この測定結果は、日本のGLCの候補地のいくつかの測定結果の一例である。横軸が振動の周波数を表している。左縦軸が振動のスペクトラム強度 (m/Hz) をあらわしており、実線に対応する。右縦軸が振動のスペクトラム強度をフーリエ積分した振動量 (m) で、破線に対応する。破線からこの候補地の地盤には40nm以下の振動があることがわかる。GLCは100nm以下の振動である頑丈な地盤に建設することを計画し、それに対応してビームフィードバックの技術も100nm以下の位置補正をめざす。

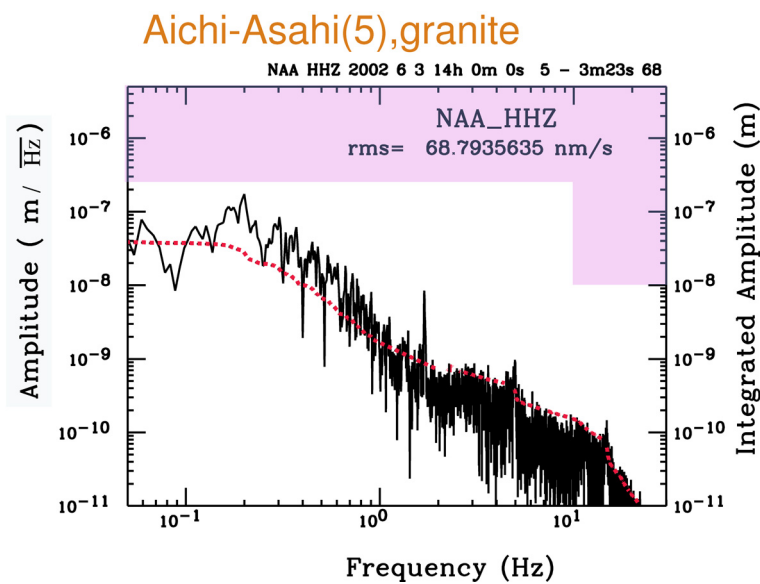


図 2.4: 地盤振動の測定値の一例。愛知県の花崗岩地質のときのもの。実線は振動のパワースペクトラムであり、FFT ををおこない積分したものが破線である。この地盤には40nm以下の小さな振動があることがわかる。

また、GLCでは1nm以下のビーム offset を目指す。これは offset によるルミノシティーの減少をほぼなくす (1%以下にする) ことのできる量である。よってGLCの計画のビームフィードバックでめざすBPMの精度は1nmである。つまりフィードバックのシステムは100nmまでの offset を1nmの精度で調整する技術を要求される。

ビームフィードバックはバンチトレインの最初のほうのバンチの位置情報を、バンチトレインの後方のビームの位置補正に利用することで行なわれる。トレイン内のフィードバックが目標である。GLCのビームのバンチ構造は図2.5のとおりである。GLCの場合、1.4nsのバンチスペースで100バンチをひとくくりにしたトレインをなす。そのため、 $1.4ns \times 100 = 140ns$ 以内のフィードバックが求められる。も

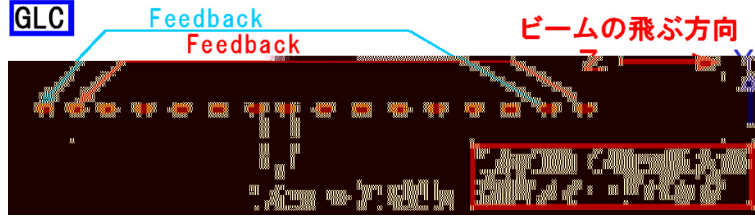


図 2.5: GLC のビームのバンチ構造の図。

もちろん、140ns 後にフィードバックができたとしても、位置補正できる粒子がないので意味がない。フィードバックにかかる時間は短ければ短いほど良い。衝突点から BPM まで 4m のビームの飛行時間 13.3ns と、BPM から kicker までのケーブル 1.5m のパルスの通過時間 7.5ns、kicker から衝突点まで 4m のビームの飛行時間 13.3ns、あわせて $13.3ns + 7.5ns + 13.3ns = 34.1ns$ はフィードバックに絶対に必要な時間である。それ以外にフィードバック回路のパルス整形コンポーネント通過のための時間が必要である。

2.1.1 kicker

kicker による kick 力は kicker 電極内に送り込まれた電磁気力によるものである。電極の中心をビームが通るとすると、kicker 電極に入れられた一定電流の電場による kick 力 F_E の効果、磁場による kick 力 F_B の効果は

$$F_E \text{ の効果} = \frac{qV}{R} \times \frac{1}{m\gamma} \times \frac{L}{c} \times \frac{D}{c} \quad (2.1)$$

$$F_B \text{ の効果} = qcB \times \frac{1}{m\gamma} \times \frac{L}{c} \times \frac{D}{c} \quad (2.2)$$

$$B = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-a}^{+a} \frac{I((a^2 + R^2)^{1/2})}{(a^2 + R^2)^{3/2}} \times \frac{R}{(a^2 + R^2)^{1/2}} da \quad (2.3)$$

となる。ここで L は kicker の電極の長さ、 D は kicker から衝突点までの距離、 a は kicker の電極の横幅、 q は単位電荷、 V はパルスの電圧、 I はパルスの電流、 R は kicker の電極間の距離の半分、 $m\gamma$ は高速の電子の質量、 c は光の速度である。

パルスを kicker の上流から入れた場合とパルスを kicker の下流から入れた場合は、電場と磁場の影響による kick の方向が異なる。図 2.6 のように、パルスを kicker の上流から入れた場合は、電場と磁場の効果の向きが逆向きになり、ほぼキャンセルされて蹴られなくなる。逆に、パルスを kicker の下流から入れた場合は、電場と磁場の向きが同じ方向になり、kick 力はほぼ 2 倍になる。そこでこれ以降、kicker へは下流から電流を入れるとし、話を進める。

上の F_E の効果と F_B の効果はパルスではなく一定電流での kick の効果である。実際は BPM からのパルスを利用して kick する。BPM からのパルスは、マルチバンチ

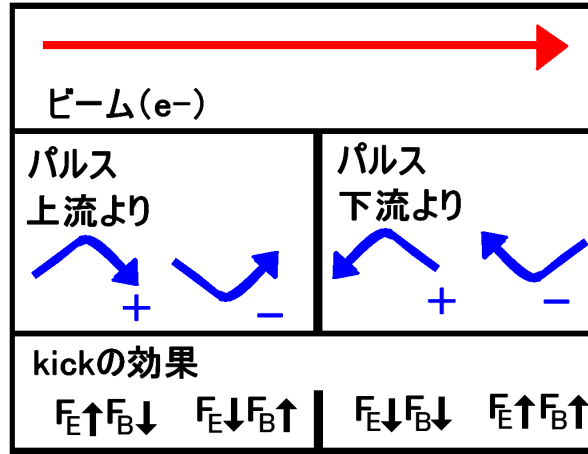


図 2.6: パルスを上流より入れた場合と下流より入れた場合の kick の効果の違いの概念図。

の場合、そのバンチスペースの影響から周波数成分が決まる。GLC の場合、バンチスペースが 1.4ns であるから、パルスの持つ周波数成分のうち主要なものは 714MHz となる。

次に BPM から取り出されるパルスの周波数成分を GLC なら 714MHz のように限定して考える。この周波数を持つ sin 波型のパルスを仮定し、一定電流による kick の効果と比較してみる。この量は図 2.7 で説明できる。図中のピンク色の棒が kicker、オレンジ色の楕円がビーム、青色の波がパルスを表す。パルスの電流はパルスを kicker の下流から入れた場合を考える。そこでビームとパルスは、逆方向に進む。時刻 $t = t_0$ でビームが kicker 電極のある部分にさしかかり、その後の時刻 $t = t_2$ でビームが kicker 電極を通り抜けるとする。ビームがちょうど kicker の電極の中心にいるとき、パルスの最大値をとる場合に、kick 力は最大になる。図 2.7 はその場合の図である。もしビームとパルスのタイミングがそのようになっていなければ、最長で 1.4ns の時間の遅延をフェーズシフタで作ることによりタイミングを合わせることができる。また、図の緑色の部分はパルスがビームに電磁場の影響を与える範囲である。

kick の効果は、図 2.7 中の θ を利用することにより

$$\int_{-\theta}^{\theta} \frac{\cos \theta}{2\theta} \theta = \frac{1}{2\theta} [\sin \theta]_{-\theta}^{\theta} = \frac{\sin \theta}{\theta} \quad (2.4)$$

と計算できる。電子の速度は高速と考え、電極中でのパルスの速度を v 、周波数を 714MHz とすると、

$$\theta = 2\pi \times L \times \frac{(v + c)}{2vc} \times 714 \times 10^6 \quad (2.5)$$

となり、 θ は kicker 電極の長さと同電極中でのパルスの速度（つまりは電極を支えるサポートのセラミックスの誘電率）より決まる。もし θ が π に近ければ kicker 電極中で電子とパルスが通り過ぎるとき、上向きと下向きの両方に蹴られてしまい、結

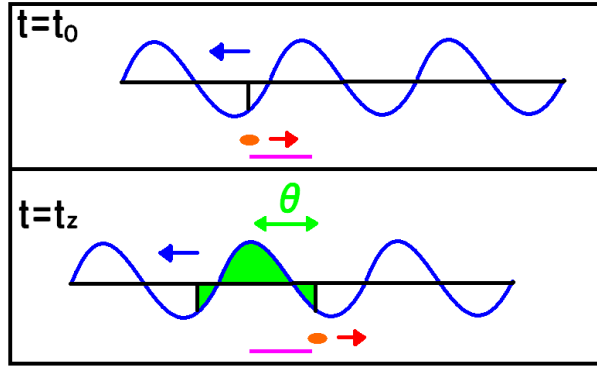


図 2.7: sin 波型パルスとビーム相互作用の図

果として kick による効果がキャンセルされてしまう。 θ が $\frac{\pi}{2}$ 以下となるとき、すなわち kicker の長さが短いときは片側だけの kick を考えればよい。GLC の周波数で考えると、 θ が $\frac{\pi}{2}$ 以下となるのは L が 10.5cm 以下のときである。

GLC の設計で 100nm ビームを kick するためには、パルスの電圧を 30V、電極間の距離の半分 R を 0.5mm と仮定して一定電流で考えると、kicker 電極の長さ L は約 10cm 必要である。sin 波型では kick の効果が約 $\times \frac{2}{\pi}$ になるので、約 15cm 必要である。この場合、kick が上向きと下向きの両方に蹴られてすべてではないがキャンセルしてしまうので、kick 力がたりなくなる。

そこで、kick の効果が上向きと下向きでキャンセルされないように、パルスを整流することを考える。図 2.8 は整流したパルスとビームの相互作用を説明するための図である。整流が行なわれた場合は、片方向にしか kick の効果がないので GLC での設計で 100nm の kick が可能となる。

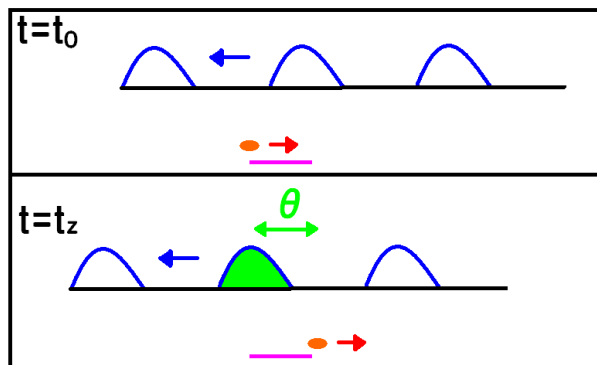


図 2.8: 整流したパルスとビーム相互作用の図

今回、GLC の設計での kick の目標を 100nm、パルスの電圧を 30V、電極間の距離を 0.5mm と仮定して議論を行なったが、これらのパラメータはもちろん変更の余地がある。大まかな見積もりであると考えてほしい。

BPM のパルスを整流することを考えるとフィードバック回路は 3.5 節の図 3.13 の

ようになる。このフィードバック回路については3.5節に詳しく書く。GLCの設計で、回路について要求されることは、大きくはフィードバックに要する時間を短くすることとパルスの整流、パルス電圧をある程度（30V程度まで）大きくすることである。

2.2 ATF FEATHER

FEATHER システム構築のための実験施設として高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の Accelerator Test Facility (ATF) を利用した。ATF は電子・陽電子衝突型線形加速器の実現上もっとも重要な課題である低エミッタンスビームの生成に焦点を合わせた開発研究を行っている施設である。この施設は図 2.9 のとおり、80MeV プリインジェクターリニアック、1.28GeV リニアック、ダンピングリング、取り出しラインからなる。ATF の主要なスペックは表 2.2 のとおりである。ビームエネルギーが GLC の計画と 3 桁異なり、ビームサイズも 3 桁異なる。エネルギーの強い粒子の方が電磁気力で曲げにくいことから、GLC よりもエネルギーの小さい ATF でも GLC スペックのフィードバックのテストが可能である。バンチスペースは 2.8ns と GLC よりも 2 倍遅い。これにより、BPM から取り出されるパルスの主要な周波数成分は GLC よりもゆっくりなものとなる。また、1バンチ内の電子の個数は GLC とオーダーで等しい。これにより、BPM から取り出されるパルスの高さは GLC の場合とオーダーで等しいことになる。

エネルギー	1.28GeV
ビームサイズ σ_x	70 μ m
ビームサイズ σ_y	7 μ m
ビームサイズ σ_z	6mm
x 方向のエミッタンス	1.33 $\times 10^9 m \cdot rad$
y 方向のエミッタンス	1.1 $\times 10^{11} m \cdot rad$
トレイン長	56.0ns
バンチスペース	2.8ns
	357Hz
繰り返し f	1.54Hz
1バンチ内の電子数 N (マルチバンチのとき)	0.7 $\times 10^{10}$
1バンチ内の電子数 N (シングルバンチのとき)	1.2 $\times 10^{10}$
クライストロンの周波数	2.856GHz
加速勾配	28.7MV/m

表 2.1: ATF のスペック。

GLC での設計の BPM から kicker までの直線距離を考慮し、kicker と BPM の間は 1.5m とした。GLC では 2 本のビームラインの片方からもう片方へ、フィードバック

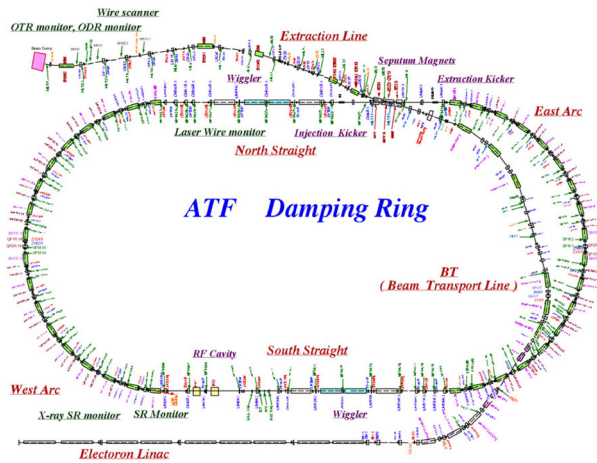


図 2.9: ATF のリニアック、ダンピングリング、取り出しラインの図。FEATHER のシステムはこのうち、取り出しライン（図の上部）に設置した。



図 2.10: FEATHER 実験の kicker、BPM の設置の模式図。

垂直方向の offset	ルミノシティのロス L/L_0	ATF での offset (μm)
$10.0 \times \sigma_y$	0.83	70.0
$7.5 \times \sigma_y$	0.71	52.5
$5.0 \times \sigma_y$	0.61	35.0
$2.5 \times \sigma_y$	0.38	17.5
$2.0 \times \sigma_y$	0.29	14.0
$1.5 \times \sigma_y$	0.26	10.5
$1.0 \times \sigma_y$	0.12	7.0
$0.5 \times \sigma_y$	0.04	3.5

表 2.2: ATF での垂直方向のビームの offset とルミノシティのロスの関係。

ループを形成する予定であるが、ATF でのテストでは1つのラインによりフィードバックによる位置補正のテストを行う。ATF でのテストはフィードフォワードの形式でもテストできるが、GLC の設計にあわせてフィードバックになるように図 2.10 のように、ビームの上流より、kicker、BPM の順で設置した。

また、ATF でのビームのバンチ構造は、図 2.11 のようになる。テストでは、 $2.8\text{ns} \times 20$ バンチ、すなわち 56ns 以内でのフィードバックが必要となる。

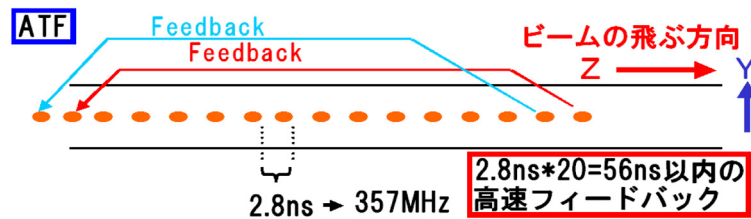


図 2.11: ATF のビームのバンチ構造の図。

FEATHER では、パルスが装置の各コンポーネントを通過する時間を少なくしたほうがよい。フィードバックに要する時間を減らせば減らすほど、反応効率向上のためのよりよい技術となるからである。フィードバックにかかる必要時間は、kicker から BPM までの電子の飛行時間とコンポーネントの間をパルスが通り抜けるのに要する時間の足し合わせである。FEATHER のシステムの場合、kicker から BPM までの距離は 1.5m なので、電子の飛行時間は

$$\text{電子の飛行時間} = \frac{1.5\text{m}}{c} = 5\text{ns} \quad (2.6)$$

である。また BPM から kicker までのフィードバック回路がすべてケーブルであれば、ケーブル長を少し長めに考慮して 2.5m として、

$$\text{フィードバックのケーブルを通過する時間} = \frac{2.5m}{\frac{2}{3} \times c} = 12.5ns \quad (2.7)$$

となる。そのほかのコンポーネントについては、増幅回路（AMP）が一番時間を要すると思われるのでAMPでのパルス遅延時間は特に測定しておく必要がある。テストを行なうためには、電子の飛行時間とパルスがケーブルを通過する時間を差し引いて、38.5nsでフィードバック回路を構成すればよく、難しくない。

2.1節においてGLCの場合の場合についてkick力とその効果について考えたが、ATFのテストではビームのバンチスペース、ビームのエネルギー、BPMまでの距離の3点が異なる。ATFのビームのバンチスペースがGLCより短くなったことで、BPMから取り出されるパルスの周波数成分が変化する。357MHzが中心となる。このBPMパルスを整流することを考えれば、kickerの長さは21cmから42cmまでどの値をとってもkickの効果は同じとなる。そこでATFでのテストのkickerの長さは38cmとした。

GLCではkickの効果は最大100nmまで1nm精度で調整することを目標としたが、ATFでのテストはビームのエネルギーが $\frac{1.28GeV}{500GeV} = \frac{1}{390}$ 倍であることと、BPMまでの距離が $\frac{1.5m}{4.0m}$ 倍であることから、最大15 μ mまで、0.15 μ mの精度で調整することが最終目標となる。BPMまでの距離がGLCで4.0mに対しATFでのテストは1.5mであるが、BPMから取り出されるパルス電圧の高さが $\frac{1.5m}{4.0m}$ 倍に小さくなる分、kickの効果が $\frac{1.5m}{4.0m} = \frac{1}{2.67}$ 倍に小さくなるのでパルスの増幅率は同じでよい。

kicker電極の位置精度は、kick力の精度となる。kick力について1%ずれることは、最大の15 μ mをkickしたときに0.15 μ mずれることになり、これが目標の精度である。

以上の見積もりにより、BPMの精度は0.15 μ mを目指すべきであることがわかる。ただし0.15 μ mの精度を達成するためには、BPM電極の位置測定システムが高価となることから、今回BPMの精度は1 μ mを目指すこととした。これによりBPMの精度目標は $\frac{0.15\mu}{1\mu} = \frac{1}{6.7}$ 倍になる。BPMの精度目標を6.7倍にしたことから、kickerの精度目標も $\frac{1}{6.7}$ 倍に落とす。kicker電極の位置精度はビームからの距離を500 μ mとすると、33.5 μ mが精度の目標となる。ただし、kicker電極の位置の精度は再現性があればよく、電極の傾きは100 μ m程度なら許容の範囲内である。

今回のATFのテストではBPMはボタン型の2極式を利用したが、現在ATFやSLAC（米）において、精度の良いCavity型のBPMが開発中であり、フィードバックにもそのような型のBPMが利用されると考えられる。また今回の設計は、フィードバック技術の開発の初期段階のものとして考えてほしい。よって今回の設計のさまざまなパラメータは、フィードバック技術の開発が進むにあたり、当然変化し得る。

3 FEATHER

FEATHER 実験は最終的にはビームを使ったフィードバックの構築を目指す、はじめにフィードバックのために必要な構成要素を個別に考え、テストする必要がある。この章では、フィードバックに必要な構成要素について、現在までにテストが行われたものについて書く。

3.1 kicker

FEATHER の kicker は、前述のとおり、ATF の取り出しラインにアライメントした。この kicker は、図 2.2 のようなストリップライン型の 2 極式で、ほぼすべての部品がステンレスで作られている。電極は長さは 38cm で、ビームをはさむように上下についている。この電極を支えるために、やはり長さ 38cm のセラミックスがついている。また、kicker の電極の位置を真空の外から覗くための窓が 2 つ備え付けてある。

われわれの kicker の一番の特徴は、上電極と下電極共に、電極が上下に動く点である。これにより普通の kicker よりもビームに近い位置でビームを蹴ることができる。よって、普通の固定式の kicker に比べて、同じ大きさのパルスを利用すれば、より大きく kick することができる。裏を返せば、ある大きさの位置補正をしたいときに、より小さなパルスでビームを蹴ることができる。

当初、我々の kicker には、いくつかの問題点があることがわかっていた。その問題点とは以下のとおりである。

- kicker 自身の電極がビームラインに対して平行になっていないこと。
- それを調整することができないこと。
- 手動で kicker の電極位置を合わせなければならないため、電極を調整するためにはいちいちダンピングリングへアクセスしなければならない、時間がかかること。
- マイクロメータのゲージヘッドで押し付けることにより電極を動かしていたが、その部分が kicker の中央にないためゆがみがあること。

また、kicker の電極に関して、電極のギャップによってはインピーダンスミスマッチが起こり、パルスが十分入らないと考えていた。それらの点に注意して、2004 年の夏に kicker の改良を行った。具体的には次の点を改良した。

- kicker の駆動としてステッピングモータを取り付け、電極の駆動をリモートコントロールできるようにした。
- ビームラインに対し電極を平行にするための調整として押しねじ（図 3.1）を取り付け、電極の上流と下流の高さを調整できるようにした。
- kicker の構造を左右対称にし、アンバランスをなくした。結果、kicker のゆがみがなくなり、駆動がスムーズになった。

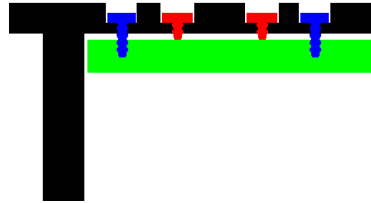


図 3.1: 押しネジによる kicker の平行調整の概念図。青が止めネジ、赤が押しネジ。

これらの改良について詳しく書く。まず kicker のゆがみを取り除くため、どれだけの自重と真空圧力がかかるかを計算した。その後 kicker の電極と連動する、圧力が一番かかる板（アーム）がどれだけの厚みになればよいのか、その板を直方体と近似して、必要な厚みを計算した。

一般に、ヤング率を E 、棒の真ん中を押す力を P 、断面二次モーメントを I 、棒の長さを a とすると、棒のたわみは、

$$V = \frac{pa^3}{48EI} \quad (3.1)$$

となる。断面二次モーメントは、直方体の棒状（図 3.2）のような場合は

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3.2)$$

と書ける。これらの式より、もし kicker のアームの厚みを 30mm にすれば、kicker のアームのたわみは $10.88\mu\text{m}$ となることがわかり、その情報を基にして kicker を設計した。改造前の kicker のたわみは上の計算方法では、アームの厚みが 5mm のところがあったことから、 $1343\mu\text{m}$ であった。これらの改造により、計算上のたわみは 100 分の 1 以下となった。図 3.3 と図 3.4 はそれぞれ改良前、改良後の kicker の写真である。

また、電極の断面の形状を図 3.5 から図 3.6 のように変えた。この改造で 50Ω でインピーダンスマッチングするための電極のギャップがせまくなり、kick 力が強くなると考えた。改良前では 1.4mm ギャップでインピーダンスマッチングがとれると計算されるが、改良後ではそれより 0.4mm 狭い 1.0mm ギャップでインピーダンスマッチングすると計算される。これにより kick の効果は、 $1.4\text{mm}/1.0\text{mm} = 1.4$ 倍になると計算される。

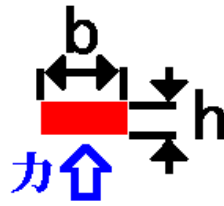


図 3.2: 直方体の棒の断面図とかかる力の方向。

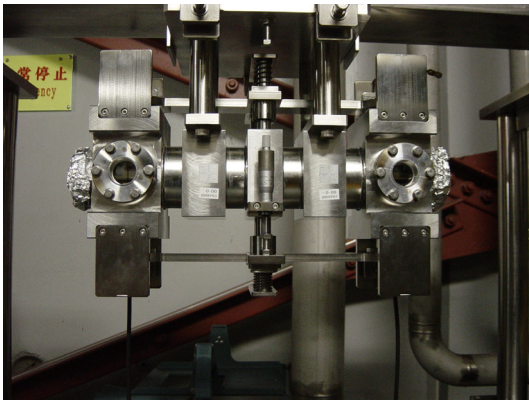


図 3.3: kicker の改造前の写真。

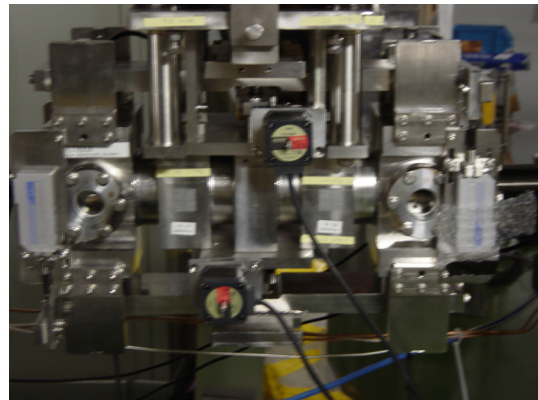


図 3.4: kicker の改造後の写真。



図 3.5: kicker の改造前の電極の断面図。

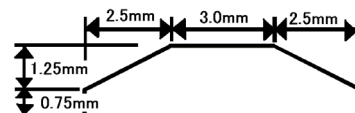


図 3.6: kicker の改造後の電極の断面図。

3.2 BPM Beam Position Monitor

前述のとおり、FEATHERのBPMもATFの取り出しラインにアイメントした。このBPMは図2.3に示すとおりボタン型の2極式で、電極はビームラインを挟み込むように上下についている。電極からはインピーダンスマッチングがとれた設計のフィードスルーがあり、SMAコネクタのセミフレックスケーブルが取り付けられている。もちろん、駆動に際し、セミフレックスケーブルが障害にならないように設計した。駆動はボールネジとウォームギアをステッピングモータに連結させることにより動かす。自重と真空の圧力により、BPMの駆動に関する部分でギアがかんでしまってもータが動かなくなったりしないよう、BPMはほぼ回転対称につくった。

われわれのBPMの特徴はkickerと同じで、電極が上下に動く点である。これにより普通のBPMよりもビームに近い位置でビームの電磁場を感知することができる。よって、普通の固定式のBPMに比べて、同じ大きさのビームが通れば、より大きなパルスを得ることができる。当初、我々のBPMもkickerと同様、手動でBPMの電極位置を合わせなければならぬため、電極の位置を調整するためにはいちいちダンピングリングへアクセスしなければならず、時間がかかる問題点があった。

この問題点はkickerと同様にステッピングモータをつけることで回避できた。これには重大な意味がある。われわれのBPMは電極が駆動式のため非常にBPMのキャリブレーションが困難である。当初電極位置をモニターするための数 μm の精度のマイクロゲージがついていた。しかし、電極の位置を変えるたびにダンピングリングへアクセスせねばならぬため、なかなかたくさん電極位置でのキャリブレーションデータが取れない。BPMのセルフキャリブレーション(6.1節参照)のためには何回もダンピングリングにアクセスしなければならないので、もし、モータ駆動のシステムつけなかったならば、詳細なキャリブレーションは不可能であったろう。これらの改造により、BPMは図3.7から図3.8のように変わった。

BPMの電極の形状の詳細は図3.9のとおりである。BPMパルスをLow pass filter(LPF)やその他のフィードバック回路要素を通過させたときの、SPICEプログラムによるテストのために、BPMの電極の静電容量Cを次の式を使って求めた。

$$C = \frac{E \cdot S}{D} \quad (3.3)$$

ここでEは真空の誘電率、Sは電極の面積、Dは電極と電極を囲む金属の間のギャップである。求めた静電容量(およそ1pF)をSPICEシミュレーションに利用した。

3.3

駆動システムはkickerについては $10\mu\text{m}$ 、BPMについては $1\mu\text{m}$ の精度を目指した。kickerについては電極の傾きなどの心配があるが、傾きは押しねじにより補正するとして、全体の動き(支点の動き)をその精度で動かす必要がある。ステッピングモータはkickerに2つ、BPMに2つ、計4つをつけた。ステッピングモータの1ステップでの駆動量は次の式で計算できる。

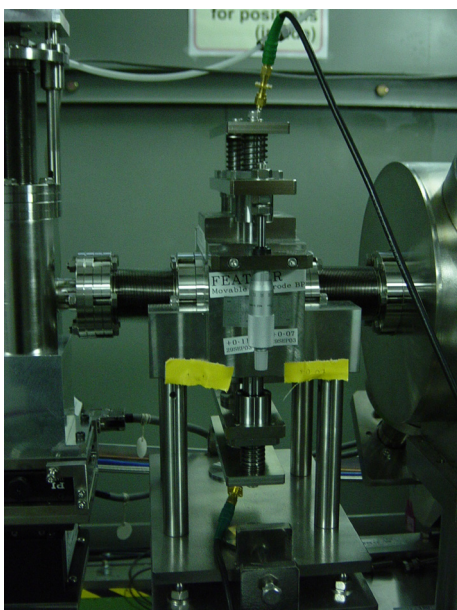


図 3.7: BPM の改造前の写真。



図 3.8: BPM の改造後の写真。

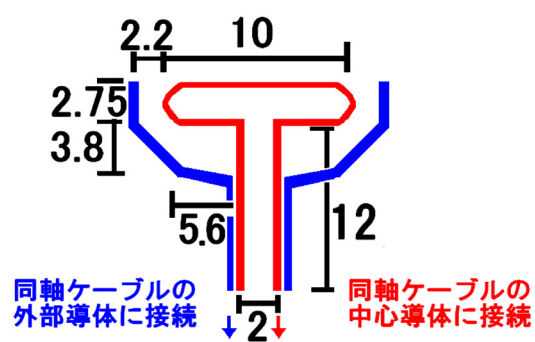


図 3.9: BPM の電極の形の概念図。

$$1 \text{ ステップによる駆動量} = \frac{\text{基本ステップ角}}{360 \text{ 度}} \times \text{リード} \times \text{条数} \times \text{減速比} \quad (3.4)$$

図3.10は駆動システムのモータ、ギア、ボールねじの写真である。モータからウォーム、ウォームギア、ボールねじ、kickerのアームの順で動力が伝わる。駆動のためのボールネジは径が14mmφ、リードが4mmのものを利用した。ウォームギアの条数は2、減速比は1/40で作成した。またステッピングモータの最小のステップ角は、0.72度のものを使用した。これにより1000パルスにより400μm動くことになる。つまり電極は最小で0.4μmと十分細かく動かせることになる。

またモーターの力はどれほど必要かを、kickerもしくはBPMにかかる真空の圧力と自重より計算してモータを選んだ。しかし、摩擦力についての見積りが足らなかつたためであると思うが、モータがときおり空回りしてしまうことがわかった。そのあと、何度かの組み立て直しや摩擦を取り除く工夫、駆動速度を遅くするなどにより、ある程度滑らかに駆動するに至った。実験に差し障らない程度ではあるが、ときおりモータが空回りするので注意が必要となった。

駆動にはステッピングモータを利用しているので細かいステップでの駆動が可能ではあるが、実際は歯車のバックラッシュと、モータのトルクの弱さ、さらにkickerに関しては構造のたわみやねじれにより、ステッピングモータのみによる位置の精度は計算どおりには信頼できない。位置の精度に関して信頼できる情報は、リニアゲージのシステムにより測定される。

また、当初モーターによる駆動範囲を制限するためのリミットスイッチを利用する予定で設計したが、モータのトルクが弱いので必要ないと判断し、取り付けなかった。



図 3.10: モータ、ギア、ボールねじ部分の写真。

3.4

位置検査器も、kickerについては10μmの精度、BPMについては1μmの精度が目標である。また、ダイナミックレンジは共に10mmが目標である。そこでこれらの目標値をみたす検出器としてリニアゲージを選んだ。

リニアゲージは接触式の位置検査器である。リニアゲージのヘッドがばね構造になっていて、接触により押し込まれ、その押し込まれた量を読み出す仕組みである。BPM用のリニアゲージはミットヨのLGF-0110Lを、kicker用のリニアゲージはやはりミットヨのLGF-0510Lを利用した。kickerに対しては精度 $2\mu\text{m}$ 、BPMに対しては $1\mu\text{m}$ のものを選んだ。ダイナミックレンジは共に 10mm である。kickerについては上下方向に 38cm と長いため、上電極上流、上電極下流、下電極上流、下電極下流の4チャンネル、BPMは電極が $10\text{mm}\phi$ と小さいので、リニアゲージを上下2チャンネルだけつけた。

図3.11はリニアゲージと接触金具を撮った写真である。図3.12はリニアゲージと接触点を模式的に示した図である。kicker、BPMともに電極が開いた状態（図3.12の左の図）ではリニアゲージはkickerまたはBPMの電極と連動して動く接触金具に接していない。このことにより、電極間の開いた状態でゲージのゼロ点が理解できる。電極間の距離を近づけることにより、ゲージが接点に接触し、距離が測れる（図3.12の右の図）。もし常に接触しているような設計にしていたら、ゲージのリセットもしくはエラーによりゼロ点を見失ってしまう。リニアゲージのコントロールはRS232CからLANもしくはその逆の情報処理をするコンポーネントiT10により、コントロール用のPCから、制御シグナルを送ることができる。また、ゲージからのリードバック情報はデータ取得の際、同時にPCへ取り込めるようにした。

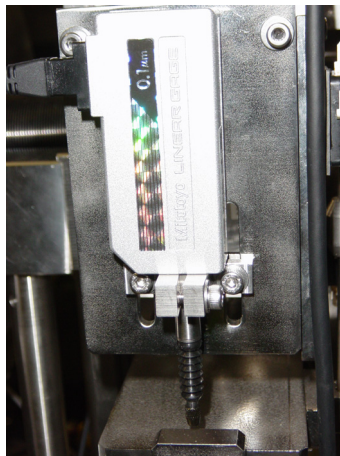


図 3.11: リニアゲージと接触点。接触点はゲージヘッドの先にある金具。写真撮影時は電極間が開いている。このときゲージのヘッドと接触点は離れている。(写真はBPM用のもの。)

3.5

フィードバック回路は、より早い回路、より正確な回路が必要である。今回、FEATHER実験としてまだまだ基礎的な研究が必要であることから、一番簡単であると思われる

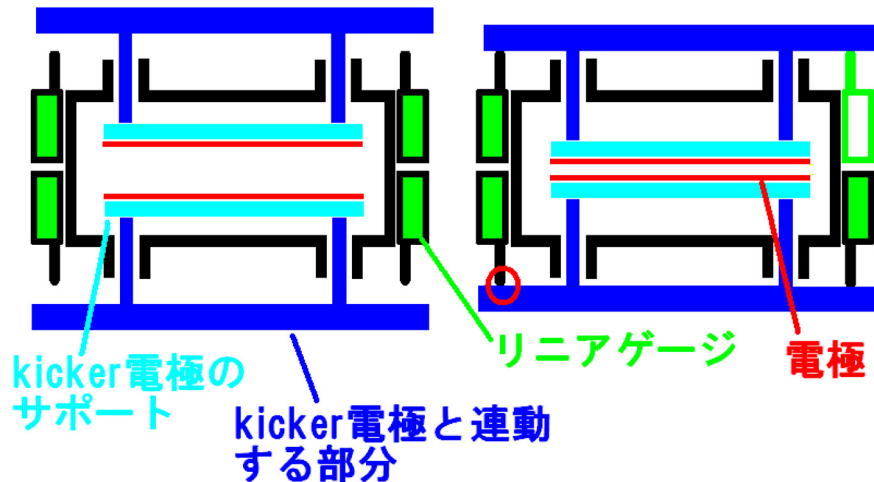


図 3.12: ゲージによる電極位置の測定の概念図。(kicker 左:kicker 開、右:kicker 閉)

る、357MHz の周辺の周波数成分のみを利用したフィードバック回路を作ること考えた。そのフィードバック回路として図 3.13 のような回路を考えた。

まず BPM 上電極と下電極からパルスを取り出す。BPM のフィードスルーには 10cm のセミフレックスケーブルがそれぞれついている。そのすぐあとに、550MHz の LPF をつける。BPM の生パルスは、非常に高い周波数の成分が含まれているため、それらの成分をここで落としてしまう。そうすることにより、Hybrid (演算回路 (3.5.5 小節参照)) 以降のパルスの振る舞いについての考察が簡単になる。なぜなら、高周波成分はケーブルでのロスも大きく、Hybrid での振る舞いも複雑になると思われるし、また、AMP も高周波成分対応となると非常に高価になってしまうからである。そのあと、357MHz のままでは周波数と kicker 電極の長さの関係で kick できないから、BPM パルスを整流する。その後 BPM の上電極パルスと下電極パルスを引き算するために、Hybrid を利用する。さらにそのパルスを AMP に入れ信号を増幅する。そのあと Phase Shifter により、位相の調整を行う。最後に Programmable Attenuator で適量までパルスを小さくし、kicker の下流フィードスルーからパルスを入れる。パルスは kicker 内の電極を通り、kicker の上流へ進み、フィードスルーからとりだされターミネートされる。

3.5.1

コネクタを選ぶ際に重要なことは、特に BPM に直接つながるコネクタで、BPM からのパルスのフィードバックのために必要な成分が減衰したり反射したりしないかという点である。BPM のフィードスルーから SMA コネクタを使い、セミフレックスケーブルがつながっている。SMA コネクタの対応する周波数領域はカタログ上 18GHz までである。BPM で拾われるパルスはもっと高い周波数も含まれると思われるが、そのような高い周波数成分はすぐに減衰してなくなるため、重視しない。

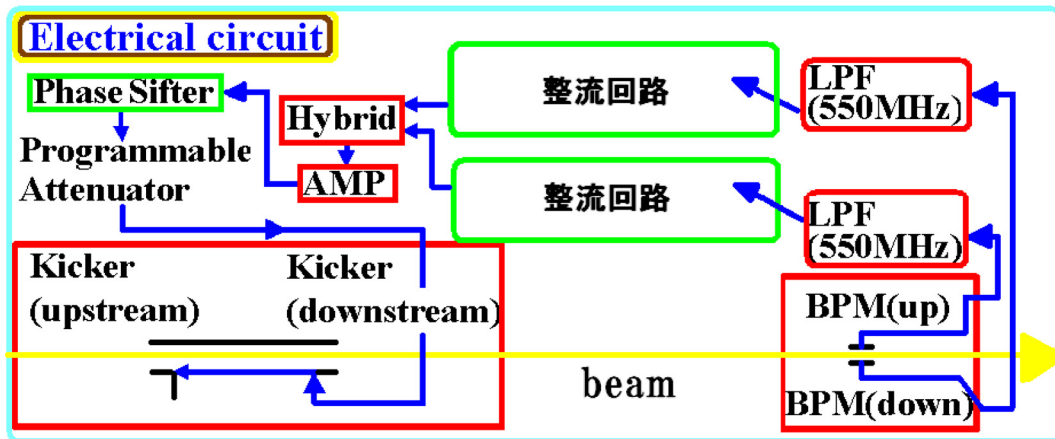


図 3.13: FEATHER のフィードバックの回路図。

その後、すぐに 550MHz の LPF を通すので、4GHz がカタログ上の上限である BNC ケーブルも問題なく使用できると考えられる。

3.5.2

ケーブルについては高周波領域での減衰が少ないものが良い。フィードバック回路に用いるケーブルは RG-58C/U を利用した。そのスペックは表 3.1 と表 3.2 のとおりである。減衰の量は周波数によって異なる (表 3.2)。1m 以下の長さの同軸ケーブルでは、パルスの減衰は無視できる。しかし 20m ほどになると、無視できなくなる。kicker や BPM のある取り出しラインから、GPIB のつながっているオシロス

名称	静電容量 (nF/km)	特性インピーダンス (Ω)
RG-58C/U	102	50

表 3.1: ケーブルのスペック 1。

標準減衰量 (dB/km)					
1MHz	10MHz	30MHz	100MHz	200MHz	400MHz
14	48	81	160	230	459

表 3.2: ケーブルのスペック 2。

コープまでは 20m 程度はなれているので、そこまでのパルスの減衰は考慮する必要があることがわかる。

また同軸ケーブルの単位長さあたりの静電容量Cは、同軸導体上に分布する電荷をQ、同軸導体間の電位差をV、同軸ケーブルの内径をa、外形をb、導体間の誘電率を ϵ とすると、

$$V = \int_a^b \frac{Q}{a\pi\epsilon r} dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.5)$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (3.6)$$

となる。また、同軸ケーブルの単位長さあたりのインダクタンスLは、電流をI、同軸導体間を通る単位長さあたりの磁束を Φ 、磁界の強さを H_r 、透磁率を μ とすると、

$$\Phi = \int_a^b \mu H_r dr = \mu \frac{I}{2\pi} \int_a^b \frac{dr}{r} = \frac{\mu I}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.7)$$

$$L = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \approx 60 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.8)$$

となる。これらにより、ケーブルの効果をSPICEシミュレーションに取り込むことができるはずである。しかし同軸ケーブルは単純な二重の同心円の構造ではないため自分で計算したものはあまり実際のケーブルのスペックをあらわしていない。そこで、長いケーブルについてネットワークアナライザなどで周波数に対する効果を測定するなど、シミュレーションに利用するには何らかの工夫が必要である。いずれにしても1m以下のケーブルならその効果は無視できるということが計算によりわかった。

3.5.3

ディバイダは、フィードバック回路の図3.13には書かれていないが、テスト時に要所でのパルスの形を見るために、利用することがある。今回フィードバックのために使いたい周波数領域は357MHzとその周辺の周波数成分だが、そのあたりの周波数成分を持つパルスの問題なく分岐できるディバイダが必要である。

今回利用したディバイダはMiniCircuits社のzfsc2-4であり、周波数帯域は0.2MHzから1000MHzである。

3.5.4 LPF(Low Pass Filter)

LPF (Low pass filter) は使いたい周波数を確実に取り出せ、かつ使わない周波数成分をきれいに除去してくれるのが良い。今回の実験では357MHzの周辺の周波数成分のみをフィードバックに利用しようと考えていたため、550MHzのLPFをテストした。また、357MHzの高調波である714MHzなどの周波数成分を今後フィードバックに利用する可能性があるため、合わせて1200MHzのLPFもテストした。550MHzのLPFとしてMiniCircuitsのSLP-550を利用した。SLP-550、SLP1200はそれぞれ550MHzのLPF、1200MHzのLPFである。

この LPF の周波数特性をネットワークアナライザにより測定した。測定結果は SLP-550 については図 3.17、SLP-1200 については図 3.18 に示した。横軸は周波数で縦軸は LPF を通した後のシグナルの減衰量を表している。SLP-550 に対しては 440MHz から 743MHz までの範囲、SLP-1200 に対しては 100MHz から 10GHz までの範囲について測定を行った。この測定により、これらの LPF の特性が、カタログのスペックの示すとおりの、鋭い曲線となり、550MHz、あるいは 1200MHz 以上の高周波成分をきれいに落とすことができることがわかった。また、我々の実験で使いたい周波数は 357MHz であるが、その近辺でほぼ減衰がないとわかった。

さらに、これから構築する整流、平滑回路のためのシミュレーションの準備として、SLP-550 および SLP-1200 LPF により近い LPF のモデルについてシミュレーションのテストを行った。モデルとしては、T 型 LPF (図 3.14)、連立チェビシェフ型 (図 3.15)、バターワース型 (図 3.16)、定 K 型 (図 3.16) を試みた。SPICE モデルに入れるときに、グラウンドとのインピーダンスのため、 50Ω の抵抗 RA、RZ (図 3.14) を書く必要がある。T 型以外も同様である。SPICE 回路に入れた静電容量とインダクタンスの値は 550MHz の LPF については表 3.3、1200MHz の LPF については表 3.4 のとおりである。

4 種類の型の LPF はそれぞれ周波数での減衰量にちがいがあある。ネットワークアナライザでの測定結果と、SPICE シミュレーションの比較は図 3.19、図 3.20 であり、それを拡大したものが図 3.21 と図 3.22 である。グラフの 801 と 802 は T 型、803 と 804 は連立チェビシェフ型、805 と 806 はバターワース型、807 と 808 は定 K 型である。これらの LPF で完全に SLP-550 もしくは SLP-1200 の周波数特性を満たすものはない。しかし、重要なのは LPF によってカットされる周波数が実際のデバイスと似ているものであると考えた。このとき、図 3.21 を見ると、カットされ始める周波数から 20dB まで減衰する周波数までのところで、連立チェビシェフ型の LPF と SLP-550 の周波数特性が似ていることがわかる。この部分がシミュレーションで最も重要であると考え、以降の BPM パルスのシミュレーションには、550MHz の LPF としてこの連立チェビシェフ型の回路を利用することにした。

もし BPM からのパルスの 357MHz の高調波までフィードバックに利用しようと考えた場合には、今回の 1200MHz の LPF の周波数特性の測定と SPICE シミュレーションが利用できる。図 3.22 を見ると今回調べた LPF の SPICE モデルの中では 0dB から 20dB 間での減衰量で、連立チェビシェフ型の回路が SLP-1200 に一番近いように思われる。しかし 1200MHz よりも少し低い周波数で LPF を設計すれば、実際の SLP-1200 とさらに近いモデルが見つかると思われる。

3.5.5 Hybrid

BPM の上電極と下電極からきたパルスはそれぞれビームの軌道から上電極、下電極までの距離の情報をもっている。これらの情報の差を取り、ビームのインテンシティでノーマライズすることにより、ビームの位置 y を知ることができる。すなわち、

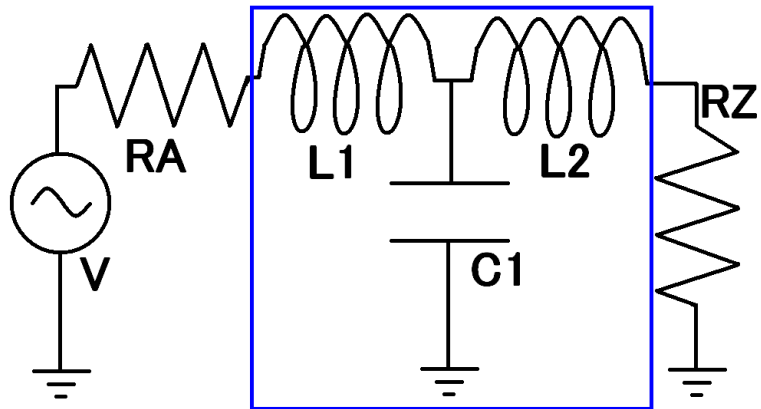


図 3.14: SPICE プログラムへ入れた回路図 (T 型の LPF)。

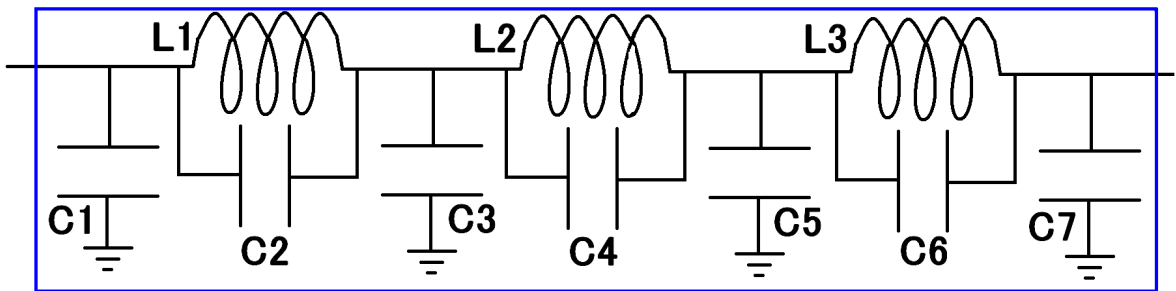


図 3.15: SPICE プログラムへ入れた回路図 (連立チェビシェフ型)。

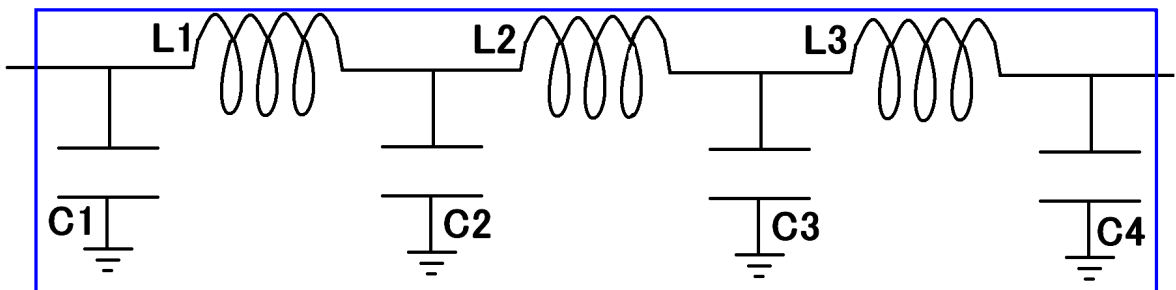


図 3.16: SPICE プログラムへ入れた回路図 (バターワース、定 K 型の LPF)。

550MHzLPF										
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	L1	L2	L3
T型	4.11							48.4	48.4	
連立チェビシェフ型	5.00	0.54	8.74	2.52	8.05	1.90	3.89	19.13	16.0	15.2
バターワース型	2.58	10.4	10.4	2.58				20	30	20
定K型	5.79	11.6	11.6	5.79				30	30	30

表 3.3: 550MHz の LPF 設計の静電容量とインダクタンスの値。

1200MHzLPF										
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	L1	L2	L3
T型	1.88							22.2	22.2	
連立チェビシェフ型	22.8	0.246	4.01	1.15	3.69	0.872	1.78	8.77	7.36	6.97
バターワース型	1.18	4.78	4.78	1.18				10	10	10
定K型	2.65	5.31	5.31	2.65				10	10	10

表 3.4: 1200MHz の LPF 設計の静電容量とインダクタンスの値。

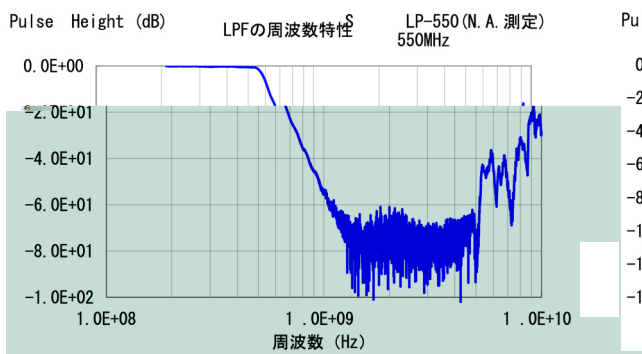


図 3.17: 550MHz の LPF、SLP-550 のネットワークアナライザによる周波数特性測定。

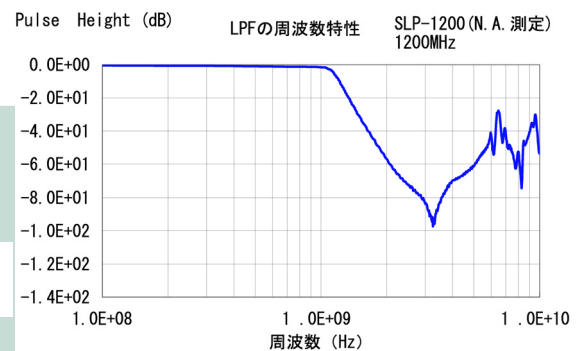


図 3.18: 1200MHz の LPF、SLP-550 のネットワークアナライザによる周波数特性測定。

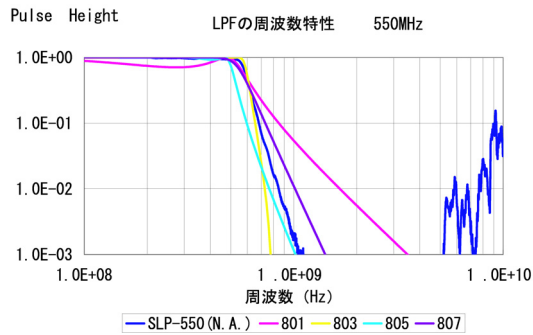


図 3.19: 550MHz の LPF のモデルとの比較。

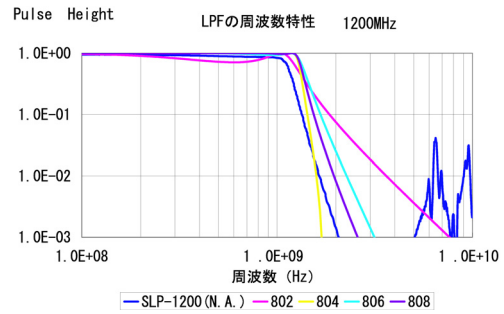


図 3.20: 1200MHz の LPF のモデルとの比較。

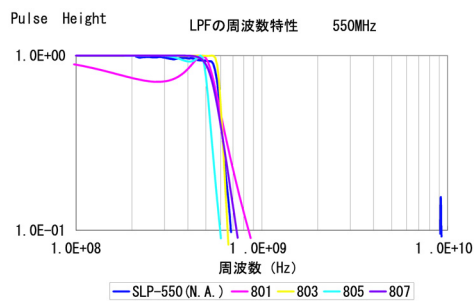


図 3.21: 550MHz の LPF のモデルとの比較 (拡大)。

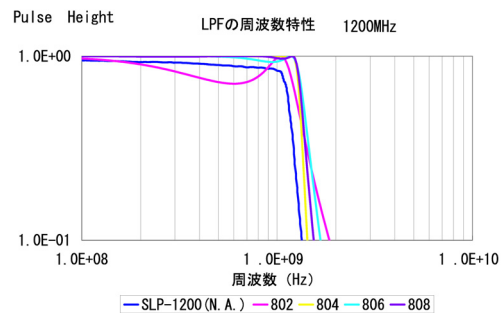


図 3.22: 1200MHz の LPF のモデルとの比較 (拡大)。

$$y = Sy \frac{V_{up} - V_{down}}{V_{up} + V_{down}} \quad (3.9)$$

ここで Sy は位置感度係数と呼ばれる。通常この計算は、計算機に入れて算術的に単に計算すればよい。だが FEATHER の目指すシステムの場合、情報を得てから数 10ns 後にはフィードバックしなければならないから、計算機で計算するのでは遅すぎる。そこで、高周波パルスを手動回路的に引き算することを考える。

上電極からきたパルスと下電極からきたパルスは、ケーブルの長さをそろえてやれば、ほぼ同じタイミングでやってくる。そこで、一方のパルスを他方のパルスに対して 180° 位相をずらし、足し合わせれば、引き算をしたことになる。足し合わせとは、単に同じケーブルラインに信号をのせてやればよい。パルスは波動なので、重ね合わせの原理により足しあわされる。

Hybrid は、それを受動的に行う高周波デバイスである。今回 Hybrid は macom 社の HHS110 を利用した。図 3.23 はその HHS110 を銅基盤に半田付けしたものである。また図 3.24 は Hybrid でのシグナルの進む方向をと出力を表したものである。BPM の上電極からのパルスが A (写真左上) へ、BPM の下電極からのパルスが B (写真左下) へと入る。A から入ったパルスは C へは反転されず、D へは反転されて進む。B から入ったパルスは反転されずそのまま C、D へ進む。以上により C からはパルスの和、D からはパルスの差が取り出される。

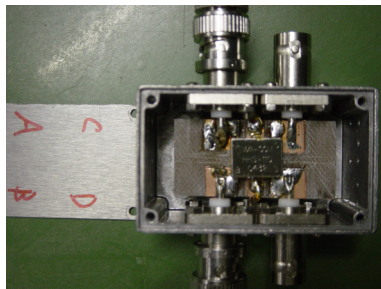


図 3.23: 銅基盤に半田付けした Hybrid の写真。

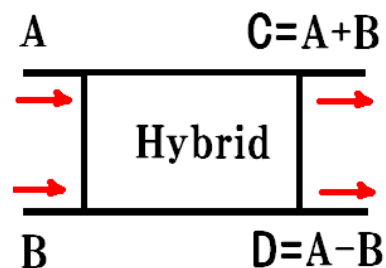


図 3.24: Hybrid の動作の概念図。

3.5.6 AMP

Hybird から取り出されたパルスはそのままでパワーが弱すぎて、kick するのに不十分である。そこで AMP を使ってパルス高を大きくする。今回 2 つの AMP のテストを行った。

一つ目は増幅率が 20dB、利用可能な周波数領域が 100kHz から 1.8GHz の Phillips 社の MODEL6954 という AMP である。図 3.25 がこの AMP の写真である。典型的なパルスの遅延時間はカタログでは 1.0ns である。50Ω で使用して、2V まで出力できる。

二つ目の AMP は増幅率が 47dB、周波数領域が 20MHz から 500MHz の Mini-Circuits 社の LZY-1 という AMP である。図 3.26 がこの AMP の写真である。典型的なパルスの遅延時間はカタログにはなかった。50W まで利用できるので、50Ω では 50V まで出力できる。

これらの AMP の増幅率と遅延時間は独自にも測定した。その結果は 4.4.2 小節に書いた。また、これらの AMP は整流回路の後のパルスの形により使用を判断する。

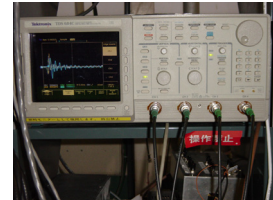
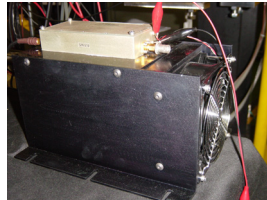
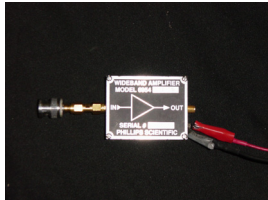


図 3.25: AMP、MODEL 6954 の写真。

図 3.26: AMP、LZY-1 の写真。

図 3.27: スコープの写真。パルスデータの取得時。

3.6

データ収集システムとして、GPIB とオシロスコープを利用した。オシロスコープは対応する周波数が 1GHz のものを利用した。図 3.27 はオシロスコープの写真である。これらは kicker、BPM からケーブルの長さで約 20m に置いた。この GPIB システムは、オシロスコープの情報をそのまま PC へ取り込めるので非常に便利である。反面、データ取得に際し、チャンネルごとのトリガタイミングがまったく異なってしまう。このため、ショットバイショットのデータ取得ができないことが非常に精密な測定に向いていない。データはパルスの形をすべて PC に取り込んだ。

4

FEATHER の技術要素はたくさんあるが、フィードバックを行なうためにはそれらの装置の特性を詳しく知っておく必要がある。そこでそれらの技術要素の特性を測定した。FEATHER のような技術開発のための実験にとっては技術要素の特性測定は実験の本質である。この章では技術要素の特性測定と結果のうち、ビームを使わないものをまとめた。

4.1 kicker

kicker 電極の特性インピーダンスが 50Ω にインピーダンスマッチングしていないと、そのところでパルス一部の成分の反射が起こってしまい、kicker の中をすべてのパルスが通過していかない。そうすると kick 量をコントロールするときに問題となると思われる。そこで、kicker 電極の特性インピーダンスの測定を TDR (Time Domain Reflectometry) により行った。この測定は改良前の電極において行なった。TDR は極めて早い立ち上がり特性を持ったパルス信号を周波数特性を調べたいコンポーネントに入力し、そこからの反射波形を高速で得てその波形からインピーダンスを演算して求める方法である。図 4.1 は TDR による特性インピーダンスの測定の図である。TDR から kicker 電極の片側へケーブルをつなぎ、kicker 電極を通して反対側へパルスを送る。そこからやはりケーブルをつなぎ、最後に 50Ω でターミネートした。この方法により真空中での kicker 電極中でのインピーダンスが測定された。設計でのインピーダンスは、kicker の電極のすべての点において一様である。しかし実際の kicker はそうはなっていないことがオシロスコープの表示画面 (図 4.2) よりわかる。この画面で横軸が時間で左側が TDR の出力に近いほうに対応する。縦軸がインピーダンスである。オーバーシュートしているところがフィードスルーの部分に対応すると思われる。また、山になっている部分が kicker の電極であると思われる。フィードスルーや電極間で、インピーダンスが一定になっていない。これにより、kicker のギャップをどんな値にしても、反射が起こり、すべての電流が反対側のフィードスルーから抜けては行かないことがわかった。図 4.3 は kicker 電極の中央と kicker 電極を抜けた後のインピーダンスの値である。kicker 電極の電極間距離を変化させたときに、そこでの特性インピーダンスが変化していることがわかる。インピーダンスはある電極間距離で 50Ω になっていることがこのグラフからわかる。よって、大まかなインピーダンスの値は予想と合っていることになる。

ただしその詳細を考えると、TDR 測定の画面図 4.2 のすべての点でインピーダン

スが 50Ω になっていてほしいが、先ほど述べたように一定にはなっていない。そのインピーダンスミスマッチの原因が具体的にはどこから来るのかわからない。たとえば、原因は kicker 電極のたわみなのか、それとも kicker とサポートを止めるねじなのか、そういった電極の部分の改善のために必要な情報がわからない。よって、確実なインピーダンスマッチングの保証のないまま、電極の改造に踏み切る形となった。もしインピーダンスマッチングについて繊細に考えて電極を改良するのなら、フィードスルーを含めた電極の形状をさまざまに変えてみて、シミュレーションで計算するということが必要である。

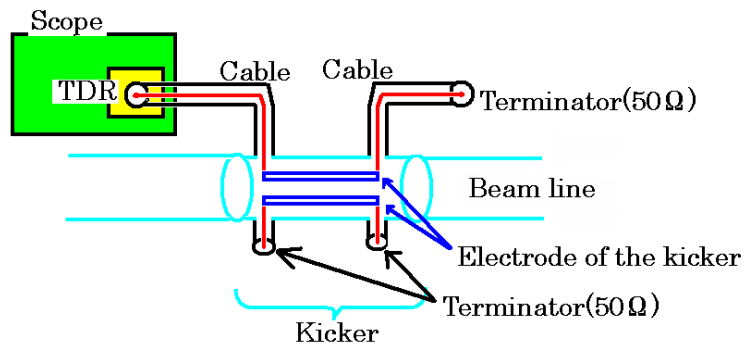


図 4.1: TDR 測定の設定の図。

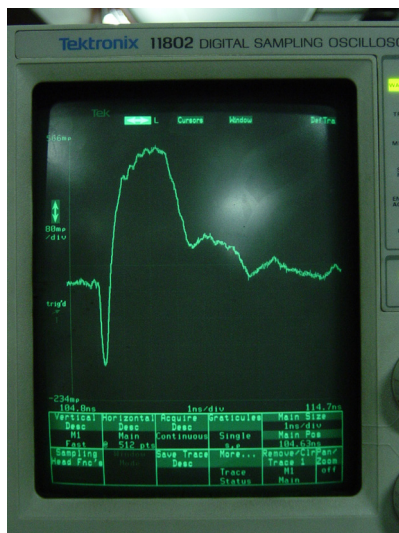


図 4.2: TDR 測定時の測定時のスコープの画面。

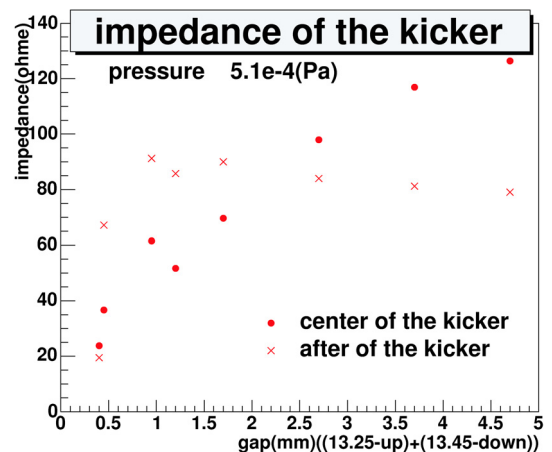


図 4.3: kicker のインピーダンスの値。丸印は kicker 電極の中央の値。ばつ印は kicker 電極の端の値。

4.2 kicker

電極がたわみを持っていることは次の点で FEATHER 実験の弊害となる。

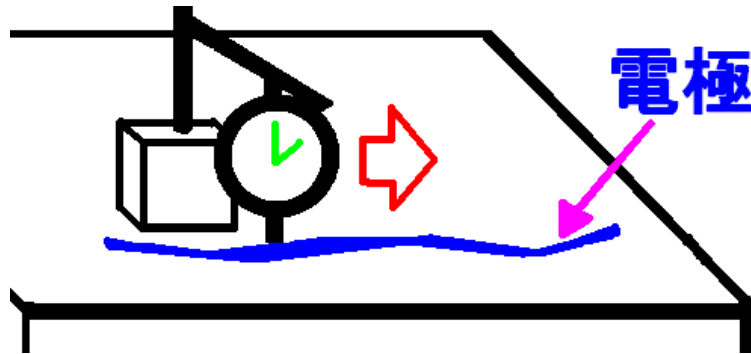


図 4.4: kicker 電極のたわみの測定の図。

- インピーダンスミスマッチにより、パルスが反射してしまうこと
- 電極からビームまでの距離が均一でなく、kick 量を計算することが困難になってしまうこと。
- もし、kick を定電流で行わないならば、kicker に入れるパルスのフェーズによっても kick 量が変わってしまうこと。
- 上下の電極を十分に近づけることが困難になること。(それにより kick できる量は減ってしまう。)

TDR 測定から kicker の電極がたわみを持っていることが予想されたので、kicker 電極のたわみを測定した。

kicker 電極のたわみを電極を kicker からはずした状態で測定した。図 4.4 は kicker 電極のたわみの測定の図である。石定盤の上に電極をのせ、高さを固定したマイクロゲージで電極をなでるようにして電極のたわみを測定した。

図 4.5 は改良前の kicker 電極のたわみである。長さ 38cm にわたり、中央部分はかなり平であるが、外側の方で最大 $275\mu\text{m}$ のたわみがある。図 4.6 はセラミックに固定する前の改良後の電極のたわみである。電極の厚みを 2mm に増やしたのにもかかわらず、 $100\mu\text{m}$ 以上のたわみがあることがわかる。図 4.7 はセラミックに固定した改良後の電極のたわみである。ネジにより電極をセラミックの台に固定する段階で補正はできるものの、やはり平ではなかった。

下電極上流の面取りの際に削りすぎた部分を除くと、 $125\mu\text{m}$ 程度のたわみがある。電極にネジ穴を開ける加工と、さらに改造後の電極に関しては、上部の角を取り除く面取りの加工の段階で熱が発生し、電極自身がたわみをもってしまふと推測される。

ただし、後で述べるように駆動には再現性がある。そのため、BPM からのコンポーネントやケーブルの長さもすべて変えなければ、たとえ電極がたわみを持っていても常に一定量の kick を得ることはできる。

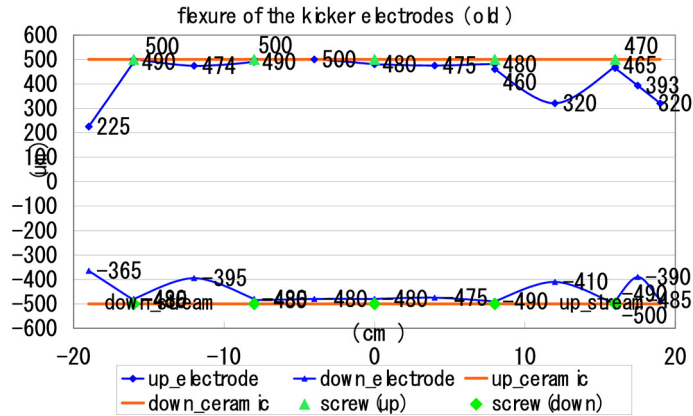


図 4.5: 改良前の kicker 電極のたわみ

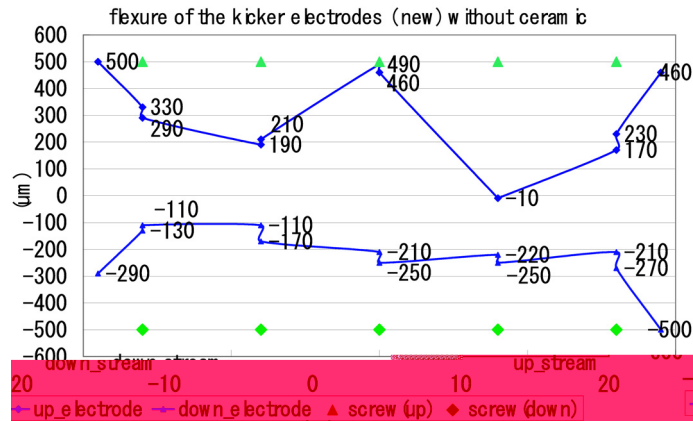


図 4.6: 新しい kicker 電極のたわみ (セラミックにねじ止めする前の状態)

4.3 kicker

kicker の上下二枚の電極の傾きがビームに対して平行になっていないと、kicker の電極間を狭めたときに、ビームが電極を通過しなかったり、また、kick の量が制御できなかったりすることが考えられる。そこで、kicker を駆動した際の kicker の平行度について、取り付けたりニアゲージとトランシット (アライメント用望遠鏡) により測定した。

トランシットは kicker の位置よりおよそ 1.5m ほどのところに配置し、kicker 電極を覗くための窓から確認した。この方法での位置精度は $30\mu\text{m}$ 程度であるので、リニアゲージによる測定のほうが信頼性が高い。しかし、この方法では上電極と下電極、あるいは kicker の近くにある四極マグネットなどを同じ測定系として観測することができるというメリットがある。その点リニアゲージによる測定では、上下のゲージは独立に動くので電極間距離がわからない。絶対的な垂直方向の位置測定の目的でトランシットによる測定を利用した。また、同時にリニアゲージにより電極位置の測定を行ない、ビーム軌道の絶対的な位置 (四極マグネットの位置) と電極

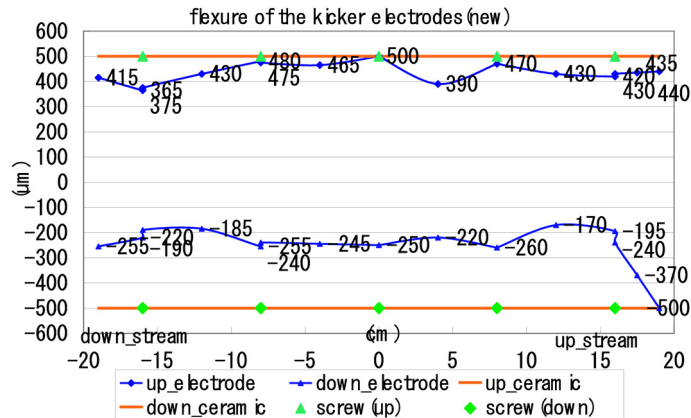


図 4.7: 改良後の kicker 電極のたわみ

の対応付けられたデータを精度よく得た。図 4.8 は、kicker 電極のギャップを変えていったときに、上流の電極と下流の電極の高さの差を示したものである。opening のデータは電極を開く方向へ動かして電極の高さを測定した場合であり、closing のデータは逆に電極を閉じる方向へ動かして電極の高さを測定した場合である。また、トランシット測定時のデータは電極を開いたり閉じたりを何度か行なった場合であり、よって、同じ位置であっても、”上流位置一下流位置” は同じになっていないことがある。kicker の電極を開いていくときと閉じていくときは、グラフでの線の形が同じような構造を持っていることがわかる。これはある高さでの kicker 電極の傾きが、閉じる場合と開く場合の差（ねじり込み方向による差）が一定量あり、全体としては電極の傾きはその電極の高さによるとわかる。ねじり込み方向による差はボールねじの螺旋の向きと関係する。また、駆動には再現性が見られた。

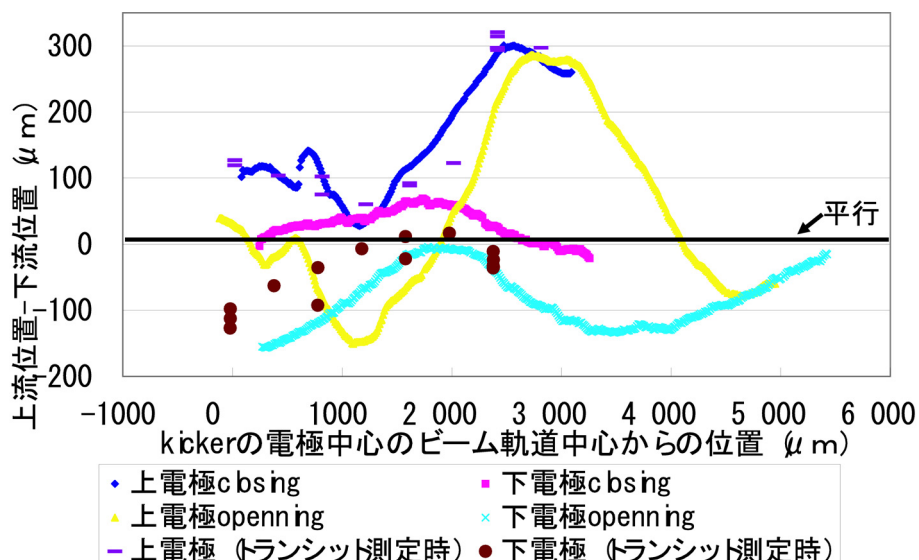


図 4.8: 電極移動時の電極の上流の位置と下流の位置の差

4.4

ビームを使った実験は大掛かりであり、また、ビームが安定でないことがあるため大変である。そこで 357MHz、16 バンチのマルチバンチビームを検出したときの BPM のパルスに擬似的なパルスを発生できるシグナルジェネレータを使用し、ディバイダ、Hybrid、AMP、kicker についてテストをした。図 4.9 はそのシグナルジェネレータで作ったパルスを帯域バンド幅 1GHz のオシロスコープで見た波形である。各バンチの最大値は 25%程度、最小値は 10%程度のばらつきがあることがわかる。ただし、このパルスは 1GHz のオシロスコープでの観測値であり、シグナルジェネレータの出力をそのまま見ているわけではないことに注意する必要がある。

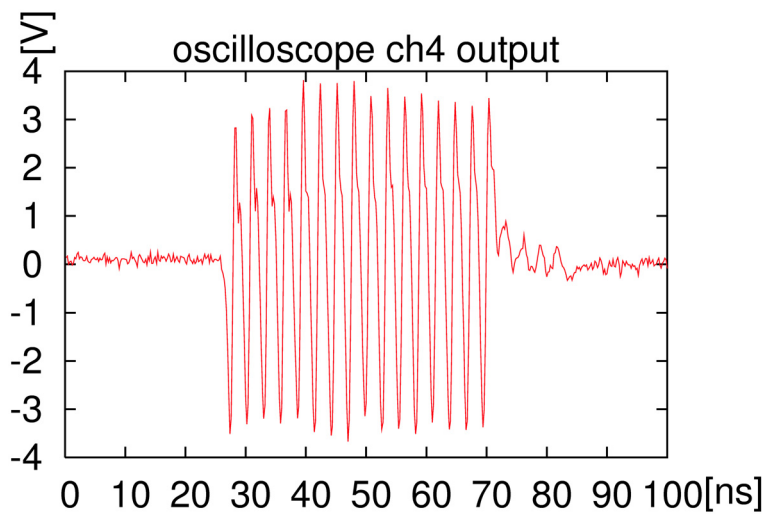


図 4.9: 16 バンチシグナルジェネレータの出力パルス

4.4.1 Hybrid

Hybrid のキャリブレーションを BPM からのシングルバンチのパルスを考え、4.10 のような回路で行なった。「Att?dB」のところには表 4.1 に示される量の減衰率のアテネータを入れ減衰させた。本当は片方のチャンネルのパルスは減衰させずにもう片方のチャンネルにだけアテネータを入れて測定するほうが望ましい。しかしアテネータを挿入したときの通過時間により Hybrid へのパルスの到達時間がずれることを避けるため、両方のチャンネルにアテネータを入れた。これにより両方のチャンネルのアテネータによる時間遅延の量は同量である。測定結果は図 4.11 である。横軸を実際に測定された Hybrid のアウトプットのパルスの高さ、縦軸をアテネータの減衰量を計算機で計算して求めたパルスの高さとした。また、パルスの最大値を利用した場合の和を Σ_{max} 、パルスの最小値を利用した場合の和を Σ_{min} 、パルスの

最大値を利用した場合の差を Δ_{max} 、パルスの最小値を利用した場合の差を Δ_{min} とした。

今回のこの測定では、357MHzにおいて、Hybridが確かにパルスの差をとるデバイスとして動くことが確かめられたことになる。ただしこの測定では、パルス間の電圧の差が4dB (1.58倍) から10dB (3.16倍) である場合のみでのテストであった。またパルスとパルスの電圧の差が Hybridによりいったいどの程度まで演算できるのか、確かめる必要がある。また今回行なったような測定は、本来は整流した後のパルスにより行なうべきである。整流回路を作製した後、もう一度測定することにする。

1ch	9dB	9dB	8dB	7dB	7dB	6dB
2ch	13dB	14dB	14dB	15dB	16dB	16dB
差	4dB	5dB	6dB	8dB	9dB	10dB

表 4.1: Hybrid のキャリブレーション時のアテネータ挿入量

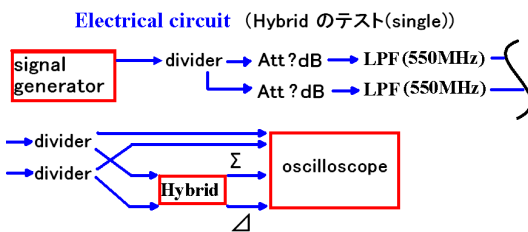


図 4.10: Hybrid のシングルバンチ特性をシグナルジェネレータでテストしたときの回路図。

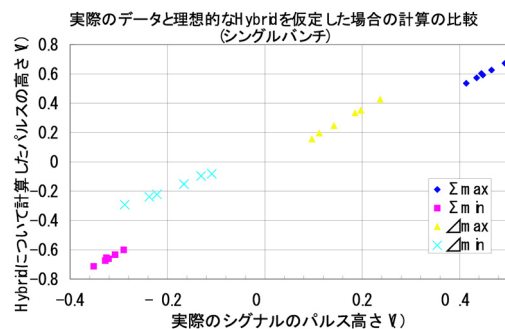


図 4.11: 実際のデータ (シグナルジェネレータからのシングルバンチパルス) と理想的な Hybrid を仮定した場合の計算の比較

下式はシングルバンチの場合の Hybrid のキャリブレーションのフィットの関数である。それぞれ、パルスの最大値を利用した場合の和、パルスの最小値を利用した場合の和、パルスの最大値を利用した場合の差、パルスの最小値を利用した場合の差のデータを直線でフィットしたときの関数と R^2 の値 (決定係数) である。決定係数がほぼ1であり、この直線がデータの良い近似曲線になっていることがわかる。

$$\Sigma_{max} : y = 1.695x - 0.1621 : R^2 = 0.9841 \quad (4.1)$$

$$\Sigma_{min} : y = 1.8058x - 0.0077 : R^2 = 0.9759 \quad (4.2)$$

$$\Delta_{max} : y = 1.9016x - 0.0224 : R^2 = 0.9984 \quad (4.3)$$

$$\Delta_{min} : y = 1.211x + 0.0541 : R^2 = 0.9954 \quad (4.4)$$

同様に図 4.12 の回路で 16 バンチのマルチバンチでの Hybrid のキャリブレーションを行なった。測定結果は図 4.13 である。この場合もシングルバンチのテストと同様に良い線形性が測定された。

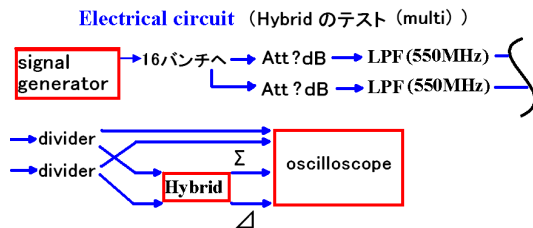


図 4.12: Hybrid のマルチバンチ特性をシグナルジェネレータでテストしたときの回路図。

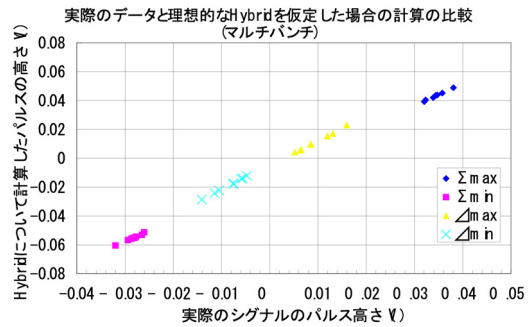


図 4.13: 実際のデータ (シグナルジェネレータからのマルチバンチパルス) と理想的な Hybrid を仮定した場合の計算の比較

下式はシングルバンチと同様に、マルチバンチの場合のフィットの関数である。それぞれパルスの最大値を利用した場合の和、パルスの最小値を利用した場合の和、パルスの最大値を利用した場合の差、パルスの最小値を利用した場合の差のデータを直線でフィットしたときの関数と R^2 の値 (決定係数) である。決定係数がほぼ 1 であり、この直線がデータの良い近似曲線になっていることがわかる。

$$\Sigma_{max} : y = 1.5432x - 0.0098 : R^2 = 0.9890 \quad (4.5)$$

$$\Sigma_{min} : y = 1.4406x - 0.0145 : R^2 = 0.9865 \quad (4.6)$$

$$\Delta_{max} : y = 1.7468x - 0.0053 : R^2 = 0.9980 \quad (4.7)$$

$$\Delta_{min} : y = 1.7488x + 0.0041 : R^2 = 0.9974 \quad (4.8)$$

4.4.2 AMP AMP

図 4.14 の回路によりアンプの特性を調べた。シグナルジェネレータの 16 バンチパルスを 2 本取り出し、片方を 6dB、もう片方を 16dB のアテネータで減衰させ、LPF を通過させた後 Hybrid に入れた。Hybrid の出力である差のパルス (Δ) をアンプ

Electrical circuit (AMP MODEL6954 のテスト)

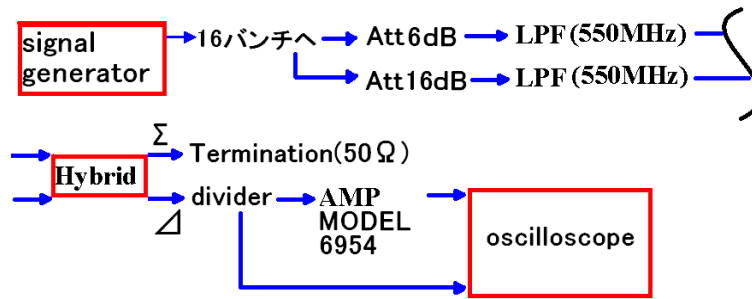


図 4.14: AMP の特性をテストした時の回路図。

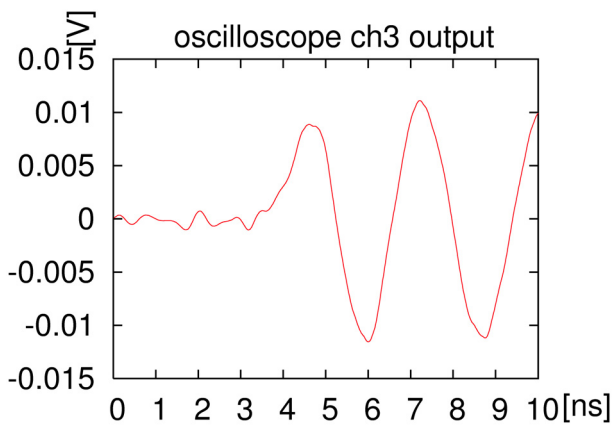


図 4.15: AMP MODEL6954 を回路に入れる前のパルス

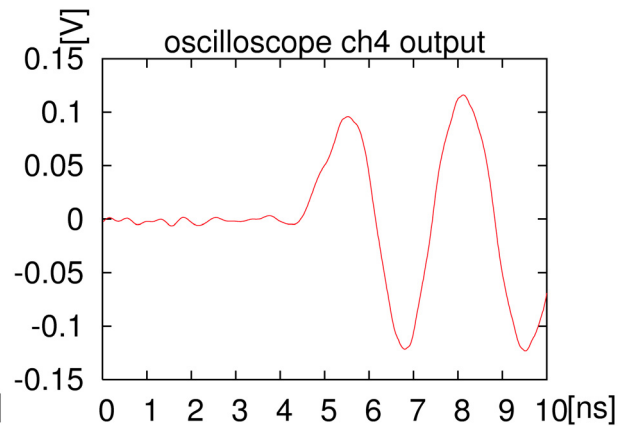


図 4.16: AMP MODEL6954 を回路入れた後のパルス

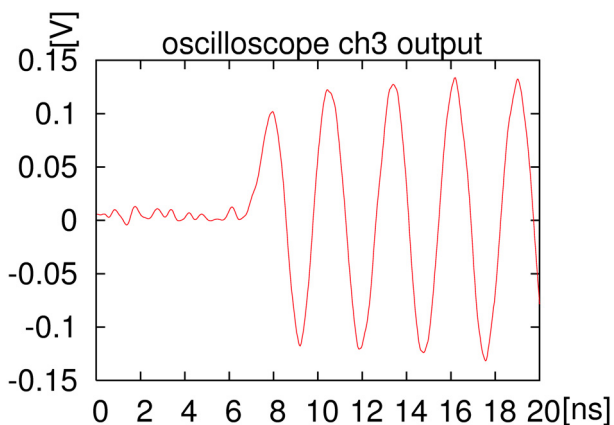


図 4.17: AMP LZY-1 を回路入れる前のパルス

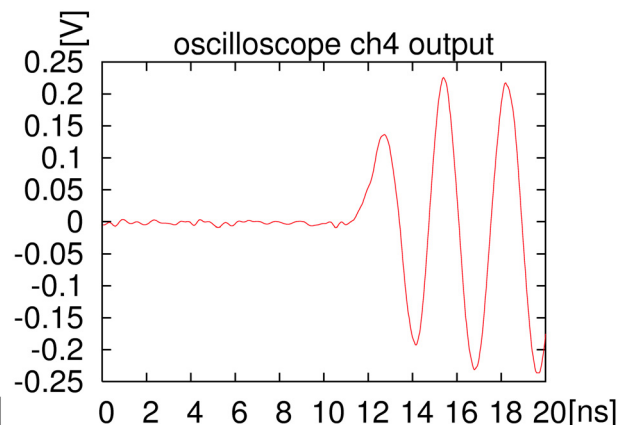


図 4.18: AMP LZY-1 を回路入れた後のパルス

に通す場合と通さない場合を両方とも測定した。そして前者をアンプの入力、後者をアンプの出力と考えた。図 4.15 はアンプの MODEL6954 の入力、図 4.16 はアンプの MODEL6954 の出力のパルスである。横軸は時間で、図 4.15 と図 4.16 の立ち上がり時間の差がそのままアンプによる遅延時間である。縦軸はパルスの高さである。同様に図 4.17 はアンプ LZY-1 の入力、図 4.18 はアンプ LZY-1 の出力である。(図 4.18 の測定回路にはアテネータが 40dB 入れてある。)

AMP の増幅率をシグナルジェネレータのパルスを増幅することにより確かめた。MODEL6954 については、 $20.76 \pm 0.03dB$ 、LZY-1 については、 $44.47 \pm 0.01dB$ であった。これは、 10.914 ± 0.704 倍と 167.25 ± 5.03 倍に相当する。

またこの二つのアンプによるパルスの遅延時間は、同様にシグナルジェネレータのパルスにより、MODEL6954 については $0.8 \pm 0.02ns$ 、LZY-1 については $4.8 \pm 0.1ns$ がかかることがわかった。

4.4.3 kicker

インピーダンスミスマッチが起こると、パルスは kicker 電極に入りにくくなる。kicker 電極中にどれだけの量のパルスが入っていくかをシグナルジェネレータを利用してテストした。入力のパルスの大きさを一定にして、kicker の電極間のギャップを変えて行き、そのとき通過したパルスの大きさを測定した。測定時の回路図は図 4.19 である。

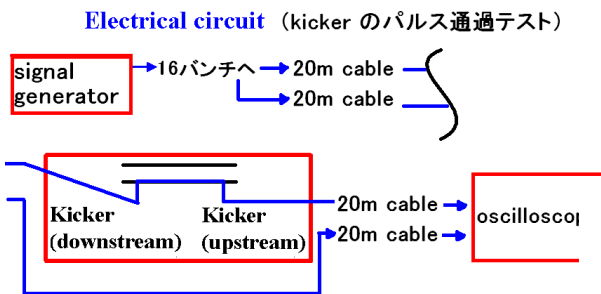


図 4.19: kicker 電極のパルス通過量測定時の回路図。

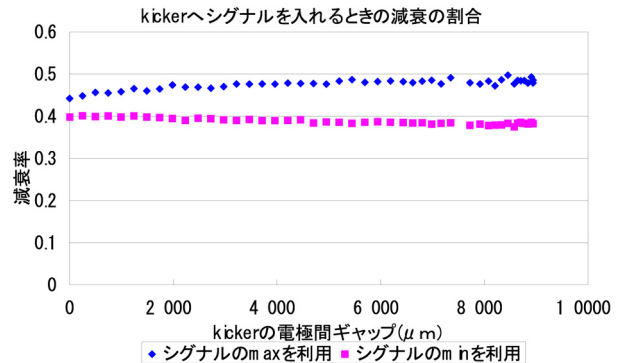


図 4.20: シグナルジェネレータのパルスの kicker 通過量測定結果。

測定の結果は図 4.20 である。横軸が電極間のギャップで 0mm から 9mm まで測定した。結果として電極間を通り抜けるパルスの大きさは、電極間の広さにより変化しないことがわかった。

5

前章と同様にフィードバックの構成要素について、特性測定を行なった。この章では特にビームを利用した特性測定の結果について書く。

前述のように、ビームによる測定はKEKのATFにおいて行なった。FEATHERの実験のためには、ビームが蹴られる前と蹴られた後の位置を比較したい。その為にビームが直進できるビームラインである、ATFのビーム取り出しラインにBPMとkickerを設置した。また、オシロスコープなどのデータ取得システムは、ビームのより放射化をしないようにするために、ATFのトンネルの外の地点に置いた。BPMやkickerからデータ取得用オシロスコープまでは、ケーブルの長さで約20mである。

5.1 BPM 20m

BPMからのパルスをわれわれが観測するとき、ダンピングリングの内側でのデータ収集はできない。そこからオシロスコープのある場所までのケーブルの長さは約20mある。そこで、その20mでどれだけパルスが減衰するかを、BPMのパルスを利用して測定した。図5.1に減衰を測定する回路の概略を示す。BPMパルスをも550MHzのLPFに入れ、約20mのケーブルを通過させ、その後ディバイダを使って信号を分ける。分けたうちの一方をそのままオシロスコープへ、もう一方を再び別の約20mのケーブルを使って往復させ、そのあとオシロスコープに入れた。

この測定で、二つの点を単純化して考える。ひとつは周波数によって、ケーブル内でのパルスの減衰率が違うという点である。もし生のシグナルで直接パルスの減衰量を測定したならば、BPMから取り出された後、初めの20mケーブルで一番減衰することになる。BPMフィードスルーのすぐ後、(正確にはBPMのフィードスルーに取り付けてあるセミフレックスケーブルのすぐ後に、)LPFを入れることによって、パルスの高周波成分がなくなる。高周波の成分がなくなった後は、パルスの主要な周波数成分は357MHzと考えていい。もうひとつの点はATFのダンピングリング内を通過する際ノイズがのることを考慮すべきかということだが、それも考慮する必要はない。BPMの生パルスはそのノイズとなるパルスと比べて十分大きい。

この測定はマルチバンチのBPMパルスを利用して行なった。図5.2は20mケーブルの往復により減衰する前のパルス、図5.3は20mのケーブルの往復により減衰した後のパルスの形である。BPM20回の測定の平均値よりで約20mケーブルでの

BPM パルスの減衰値はおよそ 0.634 ± 0.042 倍 となった。

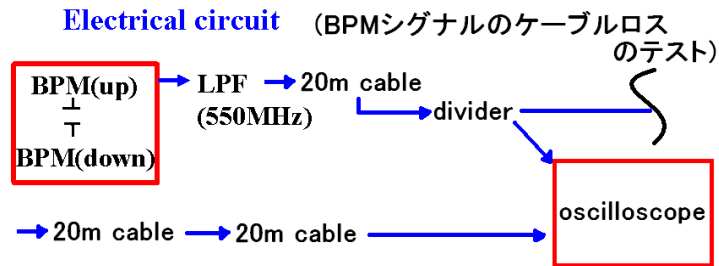


図 5.1: BPM パルスの減衰測定時の回路図。

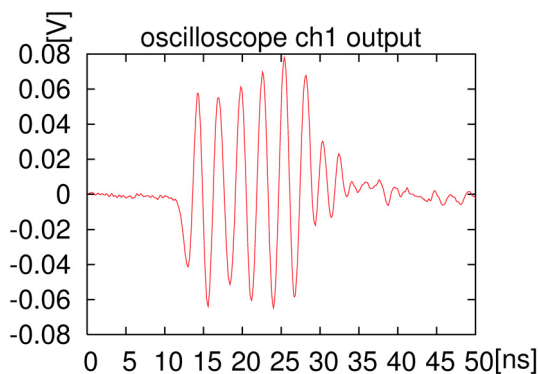


図 5.2: BPM パルスの減衰測定時の減衰
前のパルス

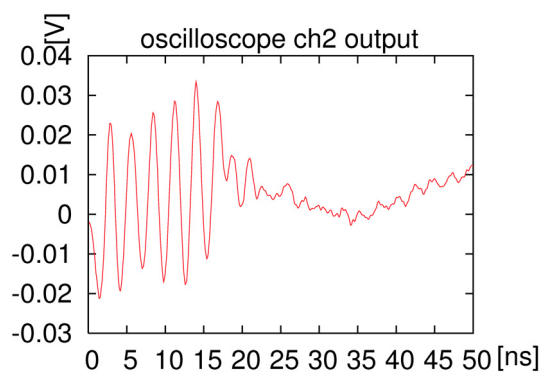


図 5.3: BPM パルスの減衰測定時の減衰
後のパルス

5.2 SPICE

LPF

SPICE によるシミュレーションは集中定数で書かれる回路について、半田付けをすることなくコンピュータにより特性を測定することができるが大変に便利である。しかし、BPM 電極から取り出されるパルスは単純な sin 波などではないため、まずこのパルスの形を SPICE プログラム上に構築する必要がある。そこで BPM から取り出されたシングルバンチのパルスの形状と、SPICE シミュレーションのパルスとを比較した。SPICE モデルには前述の 550MHz 連立チェビシェフ型 LPF を用いた。これと、BPM の電極の形から求めた静電容量 CA を並列につなぎ、 50Ω の抵抗をつけたものでシミュレーションを走らせた。BPM の電極の形は図 3.9 のとおりであるが、この形は図面から読み取ったもので正確な形がわからなかった。CA=1pF として計算したが、この 1pF という値には有効数字 1 桁も精度がない。だがとにかくその値でシミュレーションを走らせた。

BPM のパルスの形は KEK の早野先生の作ったシミュレーションを利用した。このシミュレーションには、1つのバンチの形と BPM 電極のおおよその形が入っている。また、相対論的な効果として、ビームによる電磁場がほぼビームの進行方向に垂直な方向にしか効果を及ぼさないことを利用している。すなわち、BPM 電極の円をビームの進行方向に垂直な向きに切り刻んでそこでの効果を計算し、BPM 電極全体で積分して計算している。さらにその計算を時間ごとに行うことにより、BPM 電極から取り出されるパルスの形を計算している。

シミュレーションのパルスの形状と実際の BPM を比べる際、オシロスコープの周波数帯域が 1GHz までであることに注意する必要がある。もし仮にパルスがもっと高周波の成分を持っていたとしても、われわれの今回使うオシロスコープでは観測できる周波数帯は 1 GHz までである。

はじめにシミュレーションを行なったときの回路図は、図 5.4 である。図 5.5 は 550MHz の LPF を入れなかったときの RZ にかかる電圧の時間変化であり、図 5.6 は 550MHz の LPF を入れたときの RZ にかかる電圧の時間変化である。実際の BPM パルスの測定の回路図は図 5.7 である。この回路図で 550MHz の LPF を入れなかったときのオシロスコープでのパルス形が図 5.8 であり、550MHz の LPF を入れたときのオシロスコープでのパルスの形が図 5.9 である。図 5.5 と図 5.8、図 5.6 と図 5.9 はパルスの形が異なっていることがわかる。つまり図 5.4 の回路ではシミュレーションにより BPM のパルスが再現できていない。

BPM の静電容量 1pF を多少変化させても、あるいはオシロスコープのバンド幅のための 1GHz の LPF の型を変えたりしても、シミュレーションと実際の BPM のパルスとは一致しなかった。また、ケーブルの効果をシミュレーションに入れても状況は変わらなかった。そこで、BPM 電極の構造として、インダクタンスを直列に入れた (図 5.10)。このときのシミュレーションによるパルスの形が 550MHz の LPF なしの場合で図 5.11、550MHz の LPF ありの場合で図 5.12 である。これらを図 5.8 と図 5.9 とそれぞれ比較することにより、実際の BPM パルスの形とシミュレーションのパルスの形がとても似ているものとなったことがわかる。ただし、シミュレーションの縦軸は定数倍して、実際のシグナルと合うようにしてある。70nH のインダクタンスを入れることにより、シミュレーションと実際の BPM のパルスの形が合う理由を考えるならば、BPM が感知した直後のパルスは非常に高周波の成分を持っていることによると思われる。BPM 電極は 50Ω の同軸フィードスルーへパルスを送る前に、約 12mm の剥き出しの導体を通過する。この導体でのインダクタンスではないかと思われる。確かなことはわからないが、パルスの形が一致したので、図 5.10 の形を今後の整流回路開発のシミュレーションに利用することにする。

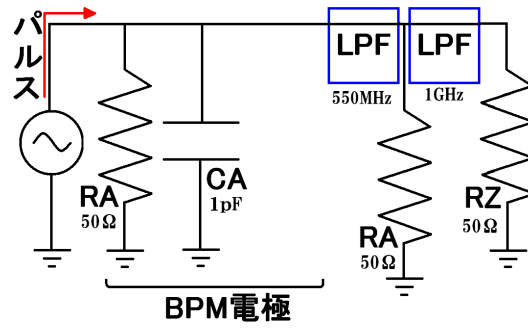


図 5.4: はじめに SPICE モデルに入れた回路図。

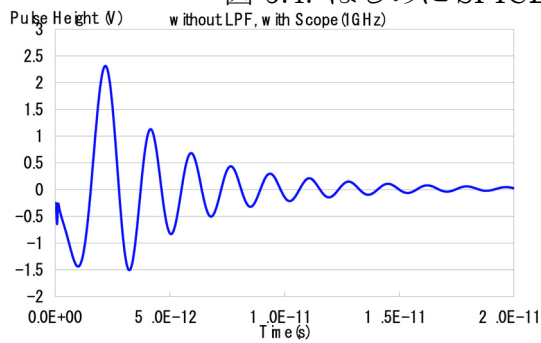


図 5.5: Spice によるシングルバンチ BPM パルスのシミュレーション (withoutLPF、withScope)

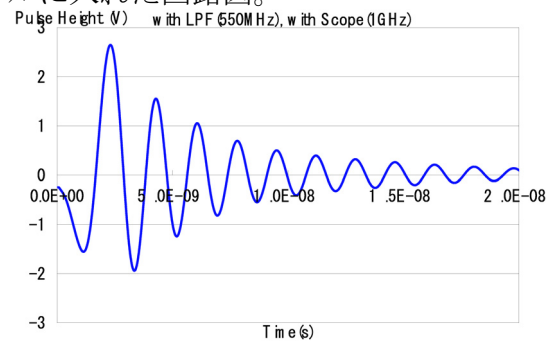


図 5.6: Spice によるシングルバンチ BPM パルスのシミュレーション (with-LPF、withScope)

Electrical circuit (BPMシグナルの観測)

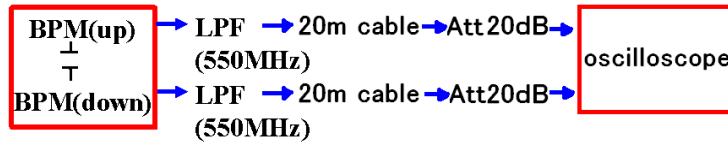


図 5.7: BPM パルス測定時の回路図。

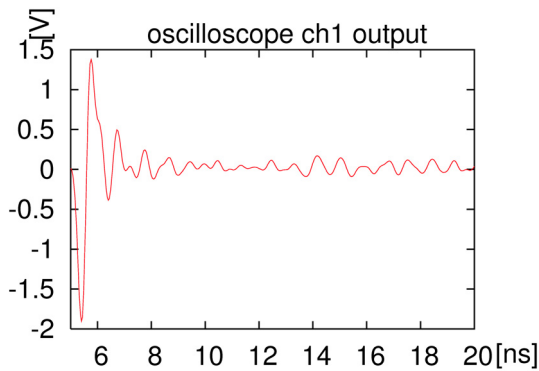


図 5.8: BPM 生パルス

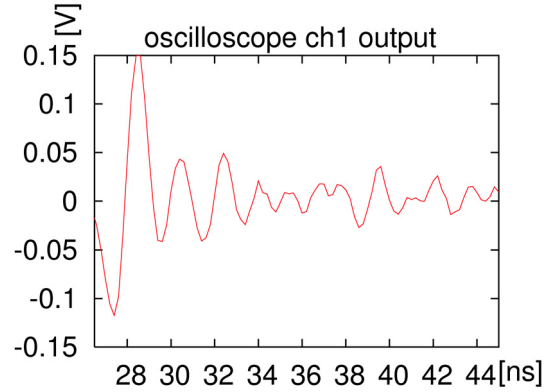


図 5.9: BPM → 550MHzLPF。左の図と横軸のレンジが違うので注意。

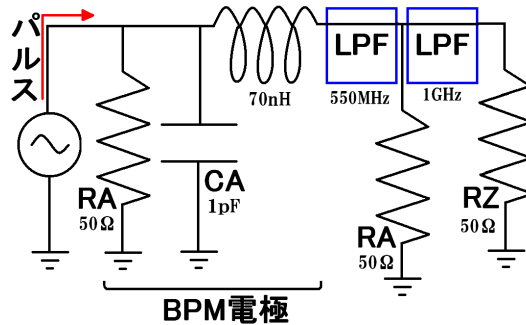


図 5.10: 70nH のインダクタンスを入れた後の SPICE モデルに入れた回路図。

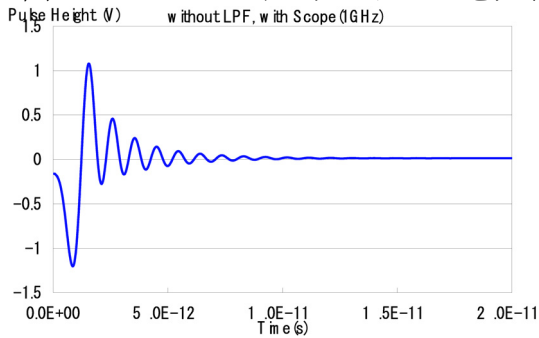


図 5.11: Spice によるシングルバンチ BPM パルスのシミュレーション (withoutLPF withScope)

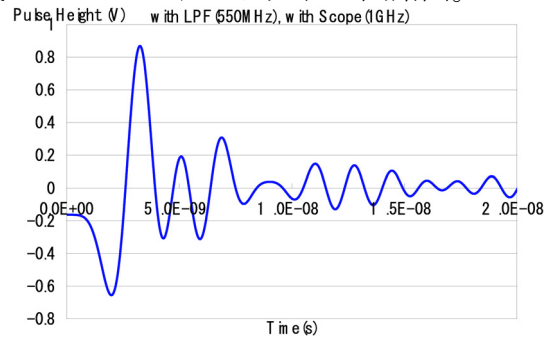


図 5.12: Spice によるシングルバンチ BPM パルスのシミュレーション (with-LPF、withScope)

5.3 ATF

ATFの取り出しラインにビームを取り出すとき、パルスマグネット（FEATHERのkickerとは別の場所にある、取り出し用kickerのこと）を使っているが、ビームを取り出す瞬間に非常に高い電圧をかける。それにより発生する電磁波がケーブルにのってしまい、大きなノイズとなる。このノイズはBPMのパルスを単にスコープで見ている分には問題にならない量であるが、Hybridの出力の差（ Δ ）の弱いパルスを観測するときには大変に邪魔になる。そこでこのノイズの電圧や形を測定した。測定の回路図は図5.13のとおりで、単にOpenにしたダンピングリング内のケーブルをオシロスコープにつないただけである。

オシロスコープにトリガされるノイズの大きさはその瞬間ごとによって異なるが、図5.14、図5.15の2タイプのノイズがトリガされた。電圧の大きなほうは20mVとなっている。このノイズは通常のBPMパルスを単にオシロスコープで観るだけのときにはまったく見えない。これはオシロスコープのbit数の小ささから、この大きさのパルスが隠れてしまうことによる。だが、Hybridにおいて Δ 信号を検出するときに邪魔になる。このノイズはおよそ40MHzの周波数成分をもつ。

これらのノイズシグナルはダンピングリング内にあるすべてのケーブルにのると思われるので、ノイズが全くのらないようにすることは不可能である。また、BPMからkickerまでのフィードバック回路でどのくらいのノイズがのってしまうかは、推測が困難である。

Electrical circuit (ノイズシグナルの観測)

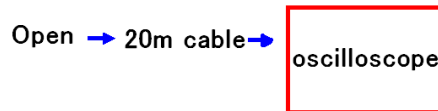


図 5.13: ATF のダンピングリング内のノイズ測定時の回路図。

5.4 Hybrid

HybridがBPMのパルスできちんと動くかを確認するため、Hybridへの入力のパルスと出力のパルスの両方を観測した。BPMからのパルスを、LPFを通過後、Hybridに入れてパルスの和と差を作り、それらのパルスを観測した。観測の回路図は図5.16のとおりである。チャンネル1はBPMの上電極からLPFを通じ、ディバイダでパルスを分けた後、すぐに20mのケーブルを介してオシロスコープへ（パルス形は図5.17）。チャンネル2は下電極から同様にオシロスコープへ（パルス形は図5.18）。チャンネル3はパルスをHybridに入れた後の Σ （パルス形は図5.19）、チャンネル4は Δ （パルス形は図5.20）である。

また、この測定はマルチバンチのビームで行なった。チャンネル1とチャンネル2

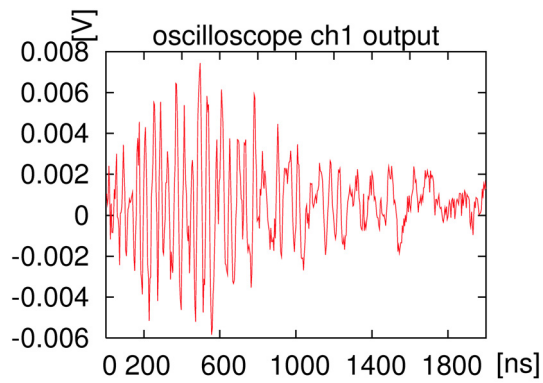


図 5.14: ダンピングリング内のケーブルに
のるノイズシグナル1

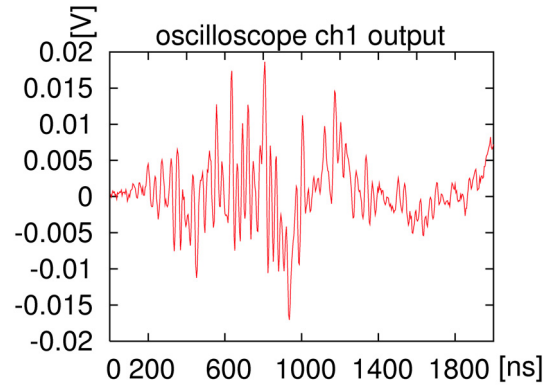


図 5.15: ダンピングリング内のケーブルに
のるノイズシグナル2

に比べて、チャンネル4のパルスはリングングの比率が多いように見える。これはチャンネル1とチャンネル2のリングングがそのまま伝播したことによると思われる。リングングに対する対処が必要であることがわかる。

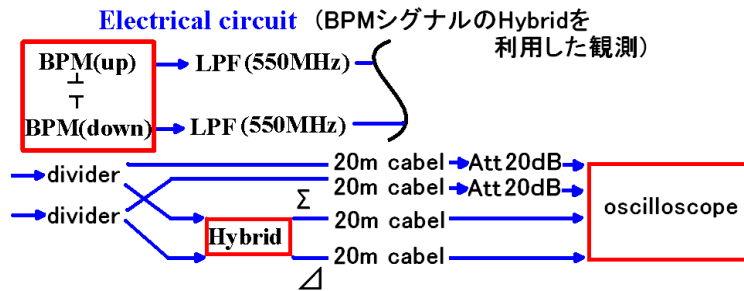


図 5.16: Hybrid を利用した BPM の差のパルスの測定時の回路図。

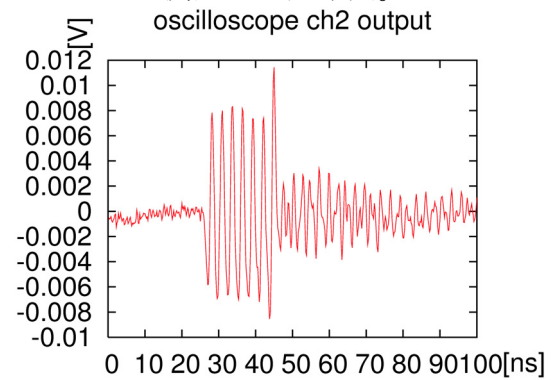
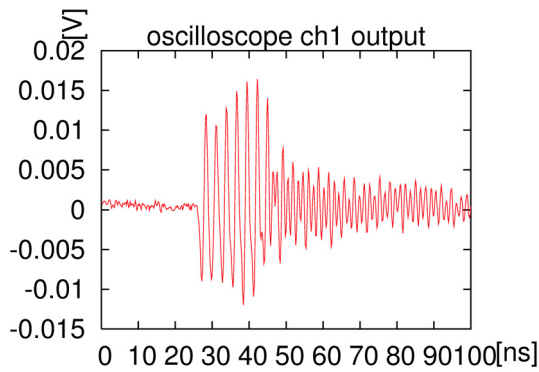


図 5.17: BPM 上電極生パルス+550MHzLPF チャンネル 1

図 5.18: BPM 下電極生パルス+550MHzLPF チャンネル 2

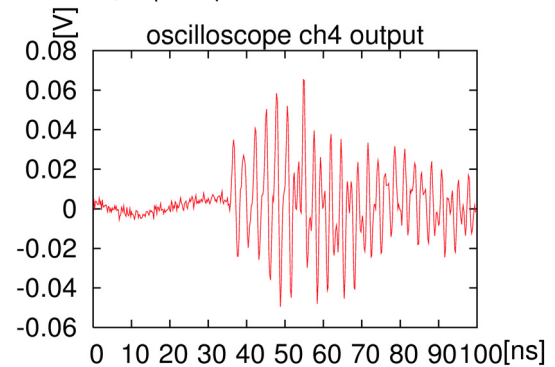
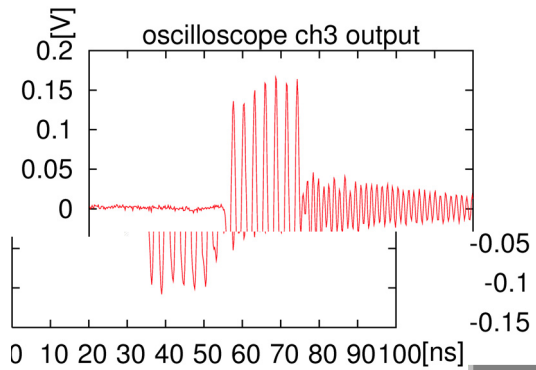


図 5.19: BPM 生パルス+550MHzLPF+Hybrid (和) チャンネル 3

図 5.20: BPM 生パルス+550MHzLPF+Hybrid (差) チャンネル 4

5.5 BPM

BPMをモニタとして利用する、あるいは、適切な量をフィードバックするためには、BPMのキャリブレーションを行なう必要がある。駆動式BPMのキャリブレーションを片側のみ電極の位置を固定してもう一方の電極の位置を変えていくという方法で行った(図5.21)。このとき電極は一方方向にだけしか動かしてはならない。なぜならば、BPMの電極も数 μm ほどの傾きを持つことが考えられるからである。

BPMキャリブレーションの方法として他には、両方の電極を同じ量だけ離してゆくことによりビームの軌道中心からのポジションを一定にする方法や、両方の電極を同じ方向へ移動させ電極間の距離を保存させる方法も考えられる。しかし、それらの方法は両方の電極を同時に動かすため、ビームの軌道の変化があったときにそれを理解することが難しいので、今回は片側電極の位置のみを移動させる方法を用いた。

あるいは他のBPMによりビームの軌道をモニタするという方法も考えられる。その場合にはキャリブレーションしたいわれわれのBPMの前後二つ以上のBPMを利用することになる。この方法も可能ではあるが、そのときは前後のBPMの精度が問題となる。ATFのBPMは精度 $20\mu\text{m}$ である。この場合は400回の測定を行い、かつビームの軌道が安定だった場合に、 $1\mu\text{m}$ の精度となる。ビームの軌道が安定である確証はないから、電極片方固定、片方移動の方法のほうが簡易的である。

ビームの軌道位置はその瞬間その瞬間により、変わってしまうと思われる。そこで本来この測定を精密に行なおうとするのなら、ショットバイショットでのデータ収集が有用である。しかし今回の測定ではショットバイショットの測定は行なっていない。代わりに20ショットの平均を取ることでデータのばらつきを抑えることにした。これにより、誤差はビームの軌道が大きくずれなければ $\frac{1}{\sqrt{n}}$ になる。

測定結果の例としては図5.22のようになった。横軸が電極間のギャップで、 $245\mu\text{m}$ から約 $4\mu\text{m}$ ステップで $330\mu\text{m}$ まで測定した。測定ミスとモータと駆動による誤差で必ずしも正確な $4\mu\text{m}$ ステップにはなっていない。縦軸が上電極からのパルスの電圧を V_1 、下電極からのパルスの電圧を V_2 としたときの

$$\frac{(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)} \quad (5.1)$$

の値である。ひとつの点は20回の測定の平均値で誤差として統計誤差をつけた。

$245\mu\text{m}$ 付近でのデータが一定となっているが、これはBPM電極の傾きによると考えられる。BPM電極を十分にせばめた後、電極を広げていけば、このようなデータにはならない。

キャリブレーションの解析については6.1節に書いた。

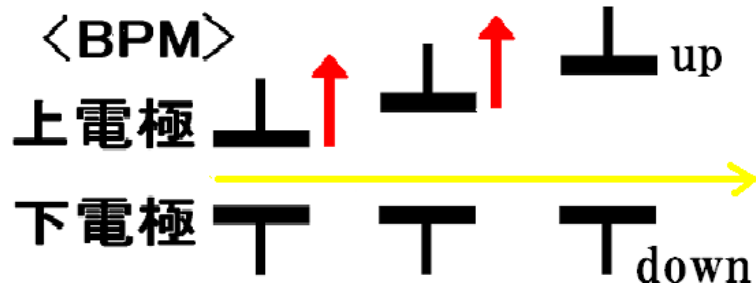


図 5.21: BPM キャリブレーションの測定の図。(上電極を動かした場合)

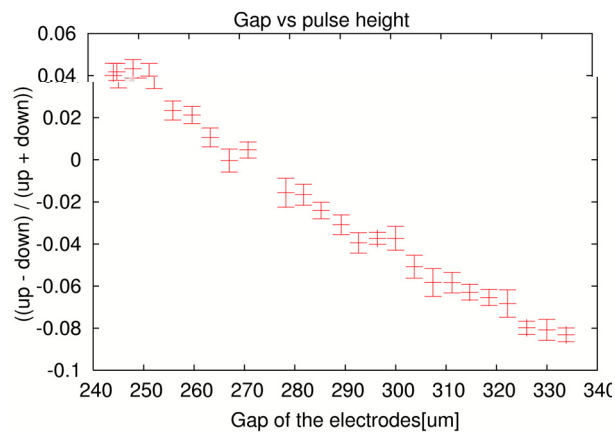


図 5.22: BPM キャリブレーションの測定結果 (上電極を動かした場合)

5.6 Hybrid BPM

BPMのパルスをフィードバックに利用するときHybridを使うのであれば、Hybridまで含めた形でBPMのキャリブレーションを行なう必要がある。Hybridを使ったキャリブレーションをHybridを利用しない場合と同様に片側電極を固定する方法で行なった。その時の回路は図5.16と同じであるが、上電極を固定し下電極を動かした。オシロスコープの1チャンネル2チャンネルはBPMのそれぞれ上下の電極からのパルスを、3チャンネルはHybridからの和(Σ)のパルス、4チャンネルはHybridからの差(Δ)のパルスをモニタした。Hybridを利用している場合には、上電極からくるパルスと下電極からくるパルスをすぐにHybridで演算するため、ショットバイショットのデータ取得といえる。

測定結果の例としては図5.23のようになった。横軸が電極間のギャップで、 $242\mu\text{m}$ から $253\mu\text{m}$ までを6点測定した。このうち $237\mu\text{m}$ にある2点は上電極と下電極の電圧の割合が他のデータと比べて明らかに違っていたのでカットの対象となる。縦軸がHybridの出力パルスである Δ と Σ を利用し計算した、 Δ/Σ の値である。ひとつの点は20回の測定の平均値で誤差として統計誤差をつけた。

Hybridを使ったBPMキャリブレーションの解析については6.2節に書いた。

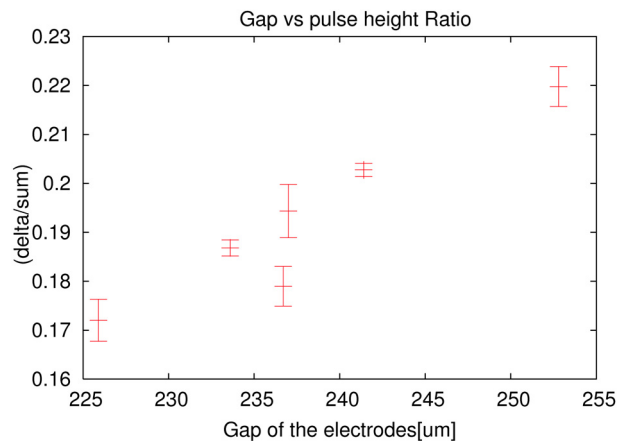


図 5.23: Hybrid を利用した BPM キャリブレーションの測定結果。縦軸は (Δ/Σ)。(下電極を動かした場合)

6 BPM

この章ではBPMのキャリブレーションを解析的に行なう方法とその結果について書いた。

6.1 BPM

BPMのキャリブレーションで求めたいものは、本来は電極から取り出されたパルスの電圧をビームと電極の距離の関数として知ることである。だがその部分をブラックボックスの中に押し込めて、電極間の中心からのビームの位置のずれとして一足飛びにBPMのキャリブレーションをすることを考えた。この方法は、BPMについて完全には理解したことにはならない。だが、次の二つを考えると、その思考方法の便利さが際立つ。

まず一つ目として、ビームのインテンシティーが一定であればビームと電極との距離と取り出されたパルスの電圧の関係が測定できるが、現実にはビームのインテンシティーはばらつきがあると思われる。そこで、ビームのインテンシティーによりパルス電圧をノーマライズすることが必要となる。ビームのインテンシティーによりノーマライズするときは何を用いて行なうかであるが、キャリブレーションしたいBPM以外の測定装置での測定値をノーマライズに利用しようと考えたと、BPMとその測定装置の間の相関関係が問題となる。たとえば、キャリブレーションしたいBPMの近くにある、別のBPMでの値を利用しようとするれば、そのBPMまでの距離とビームの角度、インテンシティー以外の情報のずれ（例えば位置の情報のずれやバンチ構造の変化など）を考慮したい。それらを考慮し、あるいは無視できるものを無視したとして、さらに必要となるのがショットバイショットでの測定である。もしこれらのことがわずらわしければ、キャリブレーションしたいBPM自身の測定値をノーマライズに利用すればよい。

さらに二つ目として、BPMで取り出されたパルスの電圧はビームと電極との距離の関数であるが、片側電極からのパルスのみを利用した場合と二つの電極からのパルスを利用した場合は後者の方がビームの精度が出るのは当然である。電極間の中心を通るときは2倍、ビームが中心より片側にずれているときは2倍以上精度が出る。

そこで、下の式のようにして、ビームの電極間の中心からのずれ y を理解することにする。

$$y = Sy \frac{(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)} \quad (6.1)$$

ここで V_1 と V_2 はそれぞれ上電極と下電極からそれぞれ取り出されたパルス高さである。この式は、ビームの y 方向の位置が電極の中心から大きくずれない範囲で有効である。また、 Sy は一般に位置感度係数と呼ばれるもので、もし電極の間隔が一定であれば定数である。

次に電極の位置を Δy 移動させる。ビームの位置は変えないで上電極を Δy 上へ移動させたとき、ビームの位置は電極間の中心から $-\frac{\Delta y}{2}$ ずれたように見える。また、ビームの位置は変えないで下電極を Δy 下へ移動させたとき、ビームの位置は電極間の中心から $+\frac{\Delta y}{2}$ ずれたように見える。このことを数式で表すと、

$$y \mp \frac{\Delta y}{2} = Sy' \frac{(V'_1 - V'_2)}{(V'_1 + V'_2)} \quad (6.2)$$

となる。(符合は上電極を動かした場合、下電極を動かした場合の順。) パルスの電圧 V はビームと電極との距離に反比例すると仮定すると、

$$Sy = \alpha R \quad (6.3)$$

とかける。

このことから式 6.1 は

$$y = Sy \frac{(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)} = \alpha R \frac{(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)} \quad (6.4)$$

となり、また、

$$y \mp \frac{\Delta y}{2} = Sy' \frac{(V'_1 - V'_2)}{(V'_1 + V'_2)} = \alpha (R + \frac{\Delta y}{2}) \frac{(V'_1 - V'_2)}{(V'_1 + V'_2)} \quad (6.5)$$

となる。

これらのことから、式 6.4 と式 6.5 を利用すれば、電極位置を移動しながらのパルス電圧測定により位置感度係数 Sy を求めることができる。

図 6.1 は第 5 章の図 5.22 のデータのうち電極間のギャップが $270\mu\text{m}$ 前後のデータのみを抜き出したグラフである。言い換えれば、ビームの軌道が電極間の中心付近のデータである。フィットは一次の方程式 $y=ax+b$ で、 a と b をフリーのパラメータとして行なった。このとき、

$$a = -0.001678 \pm 0.00007 \quad (6.6)$$

$$b = -0.456093 \pm 0.01993 \quad (6.7)$$

となった。フィットの自由度は 11 で、 $\chi^2 = 0.948621$ であり、よいフィットになっているといえる。つまり、電極間距離が $270\mu\text{m}$ のときの $\pm 20\mu\text{m}$ の範囲でキャリブレーションが成功したといえる。

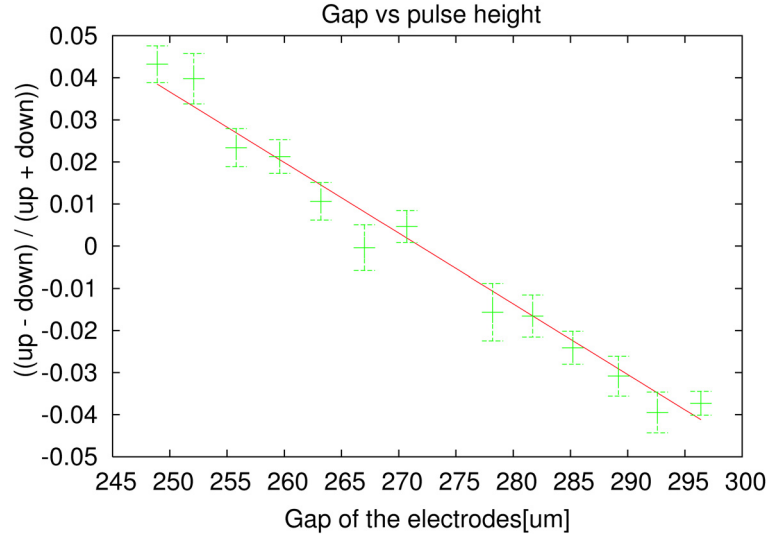


図 6.1: BPM キャリブレーションの測定結果のうち、ビームの軌道が電極間の中心付近のデータ（上電極を動かした場合）。

この方法により求めた位置感度係数は、電極間のギャップが約 $270\mu\text{m}$ のときの電極間中心付近で

$$S_y = \frac{1}{2a}\mu\text{m} = 298.0\mu\text{m} \quad (6.8)$$

となる。（片側電極しか動かしていないので2で割った。） a の誤差は、4.312%であるから、 S_y を誤差付きで考えると、

$$S_y = 298.0 \pm 12.85\mu\text{m} \quad (6.9)$$

となる。

BPMの精度は次のように求めることができる。フィットの関数を

$$y = ax + b \quad (6.10)$$

とすると、 x について解くことで

$$x(a, b) = \frac{y - b}{a} \quad (6.11)$$

となる。6.1式を誤差の伝播の式

$$\epsilon_x^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial a}\right)\epsilon_a^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial b}\right)\epsilon_b^2 \quad (6.12)$$

に代入すると、

$$\epsilon_x = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_b}{y - b}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_a}{a}\right)^2}x \quad (6.13)$$

となる。ここで、 ϵ_x 、 ϵ_a 、 ϵ_b はそれぞれ、 x 、 a 、 b の誤差である。

この計算によりもとまる ϵ_x を 2 で割ったものが BPM の精度となるので、これらにより

$$BPM \text{ の精度} = 8.29\mu m \quad (6.14)$$

となる。

BPM の精度が $8.29\mu m$ では、1 ショットで細かい kick や精度の良い kick を検出するためには不十分である。しかし、統計量を上げることにより、この精度でも kick を検出することは可能である。特に、ATF の取り出しラインの BPM の精度である $20\mu m$ を超える精度であることは FEATHER にとって価値がある結果といえる。

6.2 Hybrid BPM

Hybrid を利用した場合も、利用せずに行なった場合とほぼ同様である。Hybrid の線形性は、上電極と下電極のパルスの電圧の比が 1.58 から 3.16 のときは確かめられている。今回の場合、(上電極からのパルスの電圧) / (下電極からのパルスの電圧) = 1.14 であり、Hybrid の線形性の調べられていない範囲である。

図 6.2 は第 5 章の図 5.22 のデータのうち、ビームの軌道が大きくずれたと思われる 2 点をカットしたものである。フィットは一次の方程式 $y=ax+b$ で、 a と b をフリーのパラメータとして行なった。このとき、

$$a = 0.00186735 \pm 0.0001342 \quad (6.15)$$

$$b = -0.248869 \pm 0.032 \quad (6.16)$$

となった。フィットの自由度は 2 で、 $\chi^2 = 0.619447$ であり、データの数が少ないが、よいフィットになっているといえる。つまり、電極間距離が $240\mu m$ のときの $\pm 15\mu m$ の範囲でキャリブレーションが成功したといえる。ただし、ビームの軌道は電極間の中心ではない。

この方法により求めた位置感度係数は、

$$S_y = \frac{1}{2a} \mu m = 267.8\mu m \quad (6.17)$$

となる。(片側電極しか動かしていないので 2 で割った。) a の誤差は、7.185% であるから、 S_y を誤差付きで考えると、

$$S_y = 267.8 \pm 19.24\mu m \quad (6.18)$$

となる。BPM の精度は 6.1 節と同様にして、

$$BPM \text{ の精度} = 17.7\mu m \quad (6.19)$$

となる。

BPM の精度が $17.7\mu m$ では、1 ショットで細かい kick や精度の良い kick を検出するためには不十分である。ただし図 6.2 の y 軸方向の統計誤差は非常に小さく、 y 方

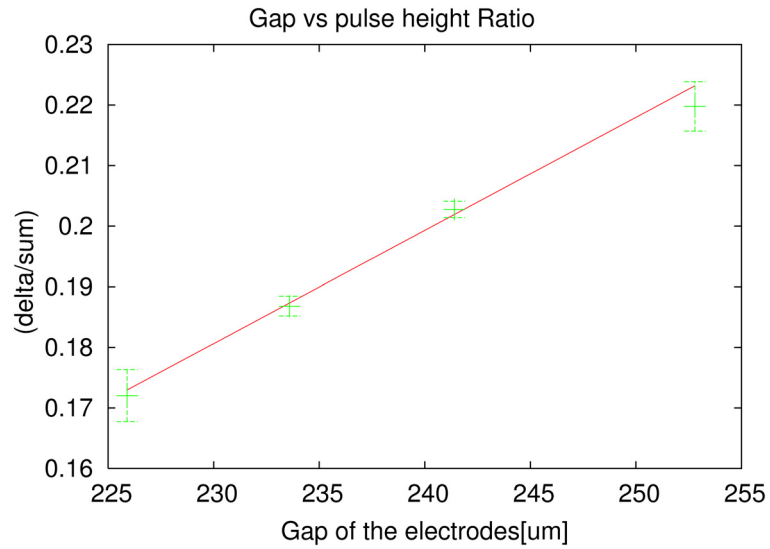


図 6.2: Hybrid を利用した BPM キャリブレーションの測定結果のうち、2 点をカットしたもの（下電極を動かした場合）。

向の誤差を x 方向にやきなおして 2 で割ると、BPM の精度は $2\mu\text{m}$ 程度であるように見える。今後、データの数を増やすことにより、BPM の精度が数学的な考察でも $2\mu\text{m}$ となることが予想できる。精度が $2\mu\text{m}$ であれば、1 ショットでの kick の検出にも十分に役に立つ。

7

7.1 kicker

FEATHER の kicker はビームを蹴りたい量だけ正確に蹴ることが目標である。そのためには kicker 電極のたわみなどは、なるべく少ないほうがいい。電極のたわみはいくら測定できるとはいえ、その測定結果を利用して、kick 力の見積もりに利用できるかといえばそうではない。電極全体のたわみを把握するのは、平らな電極を作るよりもずっと難しいと思われる。今回 kicker 電極の製作を依頼した会社はそれはそれで努力した結果ではあるのだろうが、現在のさまざまな産業分野における微細加工技術をおもんばかれば、38cm(長さ)×8mm(幅)×1mm(厚さ)の平らな棒を作ることはそんなに難しいとは思えない。製造工程(手順)を工夫することや、そもそも加工方法を工夫すること(たとえばエッチングなど)、ステンレス以外の材料を利用する、等々、さまざまな改善策が考えられる。あるいは電極の厚さを5mm程度に増やしても電極の幅を調整することにより、特性インピーダンスの50Ωへのマッチングは可能である。

今回の測定では、インピーダンスミスマッチによる悪影響として、kicker にパルスが入っていかないといったことはあまり顕著には見られなかった。このことを考えると、とりあえずインピーダンスミスマッチについては深く考慮せず、電極のたわみをなくする方向を優先したほうがよいことになる。もし、高周波を利用した kick まで測定したなら、インピーダンスミスマッチによる効果としてのスタンディングウェーブが悪影響を起こすかもしれない。

kicker の平行度は、ボールねじとギアを使った機構では、ボールねじのリードをもっと小さくすることにより精度を上げられると思われる。もし、直径10mmφ、リード1mmのボールネジを利用していたら、kicker の並行からのずれの移動曲線の最大値と最小値は1/4になると予想できる。代わりにその部分の強度は約0.26倍になるので、それに耐えられるように構造を工夫する必要がある。

そのための工夫のひとつに、真空圧力がかかる部分を減らすことが考えられる。現在の kicker では、フィードスルのために30mmφの円筒状の切り口が開いていて、それによる真空圧力が、上側と下側にそれぞれ $2 \times 1.5 \times 1.5\pi = 14\text{kgf}$ がかかっているが、もしこの径を15mmφにすれば1/4の4.5kgfまで減らすことができる。これにより、強度的には上のボールねじの径を小さくすることができる。さらに、今回の kicker はすべてステンレスにより作られているが、これを部分的にアルミなど軽い材料と置き換えれば、自重を減らすことができる。

kicker 電極中でのパルスの速度は kicker の電極を支えるセラミックスのサポート

の誘電率によって変化すると思われるので、もし kicker 内にパルスをできるだけ長く留まらせたいなら、サポートの材質を検討する必要がある。

今回の駆動システムでは、ステッピングモータの強度が駆動にぎりぎりであったように感じた。同じ大きさのモータでギアが入っているタイプが利用しやすくトルクも3倍くらいまで大きくできる。

kicker 電極の長さは今回の実験では 38cm であったが、この長さだと生パルスによる kick の方法が使えない。kicker 電極の長さを約半分にすれば生パルスによる kick が可能と思われる。もし可能であるなら、kicker 電極の長さだけ後で調整できる設計のほうがよい。インピーダンスミスマッチによる影響を深く考えないでよいのなら、それも可能であると思われる。あるいは、インピーダンスマッチングが取れるように計算しなおせばよい。

7.2 BPM

BPM に関してはその電極の平行度について特に計測をしなかったが、ビームによる測定では BPM 電極のビームラインに対する非並行による影響も観測された。kicker との比率で考えるなら、190 : 5 なので、kicker 電極の傾きを約 $150\mu\text{m}$ とするならば確かに $4\mu\text{m}$ 程度の傾きがあることがあることが計算できる。今後、今回作成した BPM での詳細なビーム測定をするならば、そのことを考慮に入れて、必ず電極間隔を十分に狭めた後目的のギャップまで電極を移動するなどの工夫が必要となる。つまりギャップあわせに際して一定方向に動かすことが必要である。

BPM の電極の形は、SPICE シミュレーションを行うにあたって、その形状が非常に重要となる。そこで BPM 電極の形状と、その支え部分の形状を、わかりやすい形に変えたほうが計算しやすい。例えば四角いボタン電極であればそこから発生するパルスの高さも計算しやすい。また電極から同軸までの部分は一般には誘電体で固定するようである。BPM の電極の形は HFSS などのマクスウェル方程式を計算するシミュレーションプログラムに入れることによって、分布定数としての LCR を計算することができる。

今回の測定では BPM の位置分解能は $2\mu\text{m}$ 程度であったが、測定回数をもっと多くすることによりもっと良い位置分解能がでると思う。あるいは BPM 電極の平行についてや後述の検出系の改良ができれば、さらにより性能の BPM が作れると思われる。それに際し、BPM 電極の位置を測定するゲージの精度はもっとよいものが求められる。今回使ったゲージのシリーズでは、精度が $0.1\mu\text{m}$ のものまでである。この高性能のゲージはレーザーを利用して測定するようである。位置測定に関しては別のものを利用してよいが、やはりゲージは $0.1\mu\text{m}$ よりもよい精度を追求すると、値段が高価になることが予想される。今回の計算で BPM のキャリブレーションの関数は単純ではないことがわかったが、それにしても、ATF の BPM が電極間距離 10cm で分解能 $20\mu\text{m}$ であることを考えると FEATHER の BPM は電極間距離 $200\mu\text{m}$ で利用すれば、

$$20\mu m \times \frac{200\mu m}{10cm} = 0.04\mu m \quad (7.1)$$

くらいの分解能は狙えるはずである。

7.3

7.3.1 Hybrid

Hybrid はシグナルジェネレータでのテストにより十分な直線性が得られたといっ
てよい。ただしその範囲は狭く、もっと広い範囲での測定が必要である。また、整
流後のパルスのバンド幅について Hybrid が利用できるか、注意が必要である。

7.3.2 AMP

AMP については今後、ノイズの評価と整流した後のバンド幅との関係が重要と
なる。整流後のパルスの周波数が今回テストを行なった AMP のバンド幅を通過で
きればテストした AMP を利用できる。AMP による 5ns の遅延時間はフィードバッ
クのテストのためにはさほど問題にならない。

7.3.3 LPF

今回 LPF に 550MHz のものを利用したが、1200MHz の LPF を利用し、357MHz
の高調波の 714MHz 近辺の周波数もフィードバックに利用することもできる。それ
により BPM の分解能は 2 倍程度向上すると思われる。

7.3.4 SPICE

今回 BPM シグナルを LPF のシミュレーションまで行った。これから先、シグナ
ルを整流するに当たり、このシミュレーションが役に立つと思われる。独特の周波
数領域を持つ BPM のシグナルを整流するには、シミュレーションの効果に入らな
い回路要素があることに注意する必要があるが、テストベンチでのシグナルジェネ
レータによるテストと組み合わせることによって回路を開発できると思われる。よ
り詳細なシミュレーションをするためには BPM 電極の部分を LCR メータなどでイ
ンピーダンスを測定した方がよい。さらに、同軸ケーブルについてもシミュレーシ
ョンに組み込んだ方がよい。Hybrid はアイソレーションロスなどをシミュレーシ
ョンに入れられるが、そのためには Hybrid についてネットワークアナライザにより周波
数特性を調べることが必要である。

7.3.5

BPMからのパルスの電圧の高さがわかったことから、整流に使うためのダイオードを選ぶことができる。その時大切なポイントは、逆回復時間など時間に関する特性である。

7.4

今回のシステムは非常に手軽にデータをとれる GPIB システムを利用した。この出の精密な測定には限界がある。まず、ショットバイショットの検出には GPIB としては対応していない。ビームの位置変動に強いシステムを作るためにはショットバイショットのデータ収集システムを導入すると良い。また、このオシロスコープは8ビットであり、レンジの1/256までしか分解能がない。よってもしグナルをプラスマイナス共に完全に見るとするなら、シグナルの大きさを2.0Vとして $2.0/256ch = 7.8 \text{ mV}$ までしか見えず、たとえばATFのダンピングリング内のノイズ20mVははっきりとは見えなくなってしまふ。精度の良い測定のためには10bit以上のデータ収集システムが望ましい。

7.5

まずHybridの Δ シグナルを詳細に見るためには、ATFのダンピングリング内にあるノイズの除去が非常に重要となる。このノイズを取り除くためにHigh Pass Filterを利用することが良いと思われる。

BPM キャリブレーションについてはHybridを使わない場合も使った場合も、精度 $1\mu\text{m}$ でのキャリブレーションは完全には行なえていない。しかしビームを絞りデータ数を増やすことで、もっと良い精度でのキャリブレーションが可能であると思われる。その際、ショットバイショットでのデータが取得できるHybridを使ったキャリブレーションが有効であると思われる。さらに、Hybridの線形性をより詳しく調べ、Hybridが線形である範囲でBPMキャリブレーションを行なうことが良いと思われる。

さらに、BPM単独よりもビームのゆらぎに強いのが、FEATHERのBPMよりもっと精度のいいBPMを利用する方法である。ATFでは先に書いたようにCavity型のBPMを開発中で、現在数百nm、将来的には数nmの精度を出すことを目標にしている。このような高精度のCavity型のBPMを、開発の途中の段階でも良いので利用し、FEATHERのBPMをキャリブレーションするとより良い精度がでると考えられる。

8

FEATHER の今後すべき実験

- Hybrid を利用した BPM キャリブレーションについての詳細な測定
- 整流回路の SPICE モデルによる構築
- 整流回路のテストベンチでのテスト
- 整流したシグナルの AMP テスト
- シグナルジェネレータ、整流回路を利用した、kick の測定 (kick を見るために BPM を利用)
- BPM シグナルを利用したフィードバックループの作成
- プログラマブルアテネータでの kick 力の調整

1	FEATHER のフィードバックシステム (概念図)	2
1.1	GLC 計画の概念図。GLC 計画は当初 JLC(Japan liner collider) と呼ばれて いた。予算の都合もあり、国際協力が欠かせないことから、GLC と名称変更された。	3
1.2	GLC のレイアウト (計画)	4
1.3	垂直方向のビームの offset とルミノシティのロスの関係。	6
1.4	6
1.5	次世代加速器、CLIC のレイアウト (計画)	6
2.1	GLC のような電子・陽電子衝突型線形加速器の衝突部付近の図	9
2.2	ストリップライン型 2 極式 kicker の電極の形の概念図。	9
2.3	ボタン型 2 極式 BPM の電極の形の概念図。	9
2.4	地盤振動の測定値の一例。愛知県の花崗岩地質のときのもの。実線は 振動のパワースペクトラムであり、FFT ををおこない積分したものが 破線である。この地盤には 40nm 以下の小さな振動があることがわ かる。	10
2.5	GLC のビームのバンチ構造の図。	11
2.6	パルスを上流より入れた場合と下流より入れた場合の kick の効果の違 いの概念図。	12
2.7	sin 波型パルスとビーム相互作用の図	13
2.8	整流したパルスとビーム相互作用の図	13
2.9	ATF のリニアック、ダンピングリング、取り出しラインの図。FEATHER のシステムはこのうち、取り出しライン (図の上部) に設置した。	15
2.10	FEATHER 実験の kicker、BPM の設置の模式図。	15
2.11	ATF のビームのバンチ構造の図。	16
3.1	押しネジによる kicker の平行調整の概念図。青が止めネジ、赤が押し ネジ。	19
3.2	直方体の棒の断面図とかかる力の方向。	20
3.3	kicker の改造前の写真。	20
3.4	kicker の改造後の写真。	20
3.5	kicker の改造前の電極の断面図。	20
3.6	kicker の改造後の電極の断面図。	20

3.7	BPM の改造前の写真。	22
3.8	BPM の改造後の写真。	22
3.9	BPM の電極の形の概念図。	22
3.10	モータ、ギア、ボールねじ部分の写真。	23
3.11	リニアゲージと接触点。接触点はゲージヘッドの先にある金具。写真撮影時は電極間が開いている。このときゲージのヘッドと接触点は離れている。(写真は BPM 用のもの。)	24
3.12	ゲージによる電極位置の測定の概念図。(kicker 左:kicker 開、右:kicker 閉)	25
3.13	FEATHER のフィードバックの回路図。	26
3.14	SPICE プログラムへ入れた回路図 (T 型の LPF)。	29
3.15	SPICE プログラムへ入れた回路図 (連立チェビシェフ型)。	29
3.16	SPICE プログラムへ入れた回路図 (バターワース、定 K 型の LPF)。	29
3.17	550MHz の LPF、SLP-550 のネットワークアナライザによる周波数特性測定。	30
3.18	1200MHz の LPF、SLP-550 のネットワークアナライザによる周波数特性測定。	30
3.19	550MHz の LPF のモデルとの比較。	31
3.20	1200MHz の LPF のモデルとの比較。	31
3.21	550MHz の LPF のモデルとの比較 (拡大)。	31
3.22	1200MHz の LPF のモデルとの比較 (拡大)。	31
3.23	銅基盤に半田付けした Hybrid の写真。	32
3.24	Hybrid の動作の概念図。	32
3.25	AMP、MODEL 6954 の写真。	33
3.26	AMP、LZY-1 の写真。	33
3.27	スコープの写真。パルスデータの取得時。	33
4.1	TDR 測定の設定の図。	35
4.2	TDR 測定時の測定時のスコープの画面。	35
4.3	kicker のインピーダンスの値。丸印は kicker 電極の中央の値。ばつ印は kicker 電極の端の値。	35
4.4	kicker 電極のたわみの測定の図。	36
4.5	改良前の kicker 電極のたわみ	37
4.6	新しい kicker 電極のたわみ (セラミックにねじ止めする前の状態)	37
4.7	改良後の kicker 電極のたわみ	38
4.8	電極移動時の電極の上流の位置と下流の位置の差	38
4.9	16 バンチシグナルジェネレータの出力パルス	39
4.10	Hybrid のシングルバンチ特性をシグナルジェネレータでテストしたときの回路図。	40
4.11	実際のデータ (シグナルジェネレータからのシングルバンチパルス) と理想的な Hybrid を仮定した場合の計算の比較	40

4.12	Hybrid のマルチバンチ特性をシグナルジェネレータでテストしたときの回路図。	41
4.13	実際のデータ (シグナルジェネレータからのマルチバンチパルス) と理想的な Hybrid を仮定した場合の計算の比較	41
4.14	AMP の特性をテストした時の回路図。	42
4.15	AMP MODEL6954 を回路に入れる前のパルス	42
4.16	AMP MODEL6954 を回路入れた後のパルス	42
4.17	AMP LZY-1 を回路入れる前のパルス	42
4.18	AMP LZY-1 を回路入れた後のパルス	42
4.19	kicker 電極のパルス通過量測定時の回路図。	43
4.20	シグナルジェネレータのパルスの kicker 通過量測定結果。	43
5.1	BPM パルスの減衰測定時の回路図。	45
5.2	BPM パルスの減衰測定時の減衰前のパルス	45
5.3	BPM パルスの減衰測定時の減衰後のパルス	45
5.4	はじめに SPICE モデルに入れた回路図。	47
5.5	Spice によるシングルバンチ BPM パルスのシミュレーション (withoutLPF、withScope)	47
5.6	Spice によるシングルバンチ BPM パルスのシミュレーション (withLPF、withScope)	47
5.7	BPM パルス測定時の回路図。	48
5.8	BPM 生パルス	48
5.9	BPM → 550MHzLPF。左の図と横軸のレンジが違うので注意。	48
5.10	70nH のインダクタンスを入れた後の SPICE モデルに入れた回路図。 . . .	48
5.11	Spice によるシングルバンチ BPM パルスのシミュレーション (withoutLPF、withScope)	48
5.12	Spice によるシングルバンチ BPM パルスのシミュレーション (withLPF、withScope)	48
5.13	ATF のダンピングリング内のノイズ測定時の回路図。	49
5.14	ダンピングリング内のケーブルにのるノイズシグナル1	50
5.15	ダンピングリング内のケーブルにのるノイズシグナル2	50
5.16	Hybrid を利用した BPM の差のパルスの測定時の回路図。	51
5.17	BPM 上電極生パルス+550MHzLPF チャンネル1	51
5.18	BPM 下電極生パルス+550MHzLPF チャンネル2	51
5.19	BPM 生パルス+550MHzLPF+Hybrid (和) チャンネル3	51
5.20	BPM 生パルス+550MHzLPF+Hybrid (差) チャンネル4	51
5.21	BPM キャリブレーションの測定の図。(上電極を動かした場合)	53
5.22	BPM キャリブレーションの測定結果 (上電極を動かした場合)	53
5.23	Hybrid を利用した BPM キャリブレーションの測定結果。縦軸は (Δ/Σ)。 (下電極を動かした場合)	54

6.1	BPM キャリブレーションの測定結果のうち、ビームの軌道が電極間の中心付近のデータ（上電極を動かした場合）。	57
6.2	Hybrid を利用した BPM キャリブレーションの測定結果のうち、2 点をカットしたもの（下電極を動かした場合）。	59

1.1	GLC のスペック。	5
1.2	CLIC の計画上のスペック。	7
2.1	ATF のスペック。	14
2.2	ATF での垂直方向のビームの offset とルミノシティのロスの関係。	16
3.1	ケーブルのスペック 1。	26
3.2	ケーブルのスペック 2。	26
3.3	550MHz の LPF 設計の静電容量とインダクタンスの値。	30
3.4	1200MHz の LPF 設計の静電容量とインダクタンスの値。	30
4.1	Hybrid のキャリブレーション時のアテネータ挿入量	40

- [1] High Energy Accelerator Research Organization, "GLC Project Linear Collider for TeV Physics"
- [2] 早野仁司, "ビーム診断 (ハードウェア編) "
- [3] 早野仁司, "Proposal of high resolution single shot BPM electronics replacement for ATF-DR"
- [4] 田内利明, "Plans for fast feedback R&D at ATF/KEK"
- [5] N.Delerue, "A Fast Intra-pulse Feedback System for the JLC"
- [6] N.Delerue, "Design of a Kicker with a Movable Electrode for the FEATHER Project", KEK Report 2003-6 July 2003 A/H"
- [7] Simon Jolly, "An Intra-Pulse Fast Feedback System for a Future Linear Collider"
- [8] 谷口慶治, "マイクロ波電子回路-設計の基礎-"
- [9] 市川裕一, 青木勝, "GHz 時代の高周波回路設計"
- [10] 遠坂俊昭, "計測のためのフィルタ回路設計"
- [11] 森英二, "LC フィルタの設計&製作"
- [12] ポール W. トゥネンガ, "SPICE による電子回路設計入門"
- [13] 棚木義則, "電子回路シュミレータ PSpice 入門編"

あつという間の2年間でした。私自身はとても充実した経験ができ、非常にためになりました。他方で、私はかなりわがままに、研究生活に取り組んできたので、多くの方にご迷惑と心労をおかけしたことと思います。

住吉先生にはこの FEATHER 実験にお誘いいただいたことを大変感謝しています。また、修士論文の提出と発表に関し、たくさん心配をおかけしまして、どうもすみません。修士論文と発表に関するたくさんのアドバイスをど本当にありがとうございました。

浜津先生には ZEUS とチャネリング実験に関し、お世話になりました。太田君と受けていた ZEUS のゼミは、懐かしい思い出です。

松本さん、飲み会でたくさんおごっていただき、また、ユーモアを振りまいていただきありがとうございました。

神谷さんは本当によき先輩であったと思います。研究に関しても人間的な魅力も両方共に学ぶべきところがありました。大変感謝しています。

李さんと加藤さんには就職活動時に励ましていただいたことを深く感謝しています。

DESY での日々は太田君抜きでは語れません。

石水君は「そっすねえ」。

山本君からは忍耐の大切さを学びました。

その他、研究室の皆さん、どうもありがとうございます。

田内先生、たくさんわがままを聞いてくださり本当に感謝しています。私に至らぬところもたくさんあったと思いますが、我慢とご指導をしてくださり感謝しています。ほんとに生意気ですみませんでした。台湾でのプレゼンテーションなども見ていただいて感謝しています。ほんとに生意気ですみませんでした。

早野先生には研究の仕方、楽しさを教えてくださったことを深く感謝しています。実験に関しても、知識と考え方をを見せてくださり、本当に勉強になりました。また、早野先生のおかげで大きな目標を持って会社に入ることができます。さらに私が教育をする立場になったときには、早野先生の方針を思い出し、自分なりのアレンジを加えつつ、後輩を育てたいと思いました。まだまだ早野先生から学びたいこと、学ぶべきことがたくさんあると思いますが、自分で考える大切さを教えてくださった先生でもあると思うので、就職しがんばっていこうと思います。

Nicolas-san, Thank you for your teaching about experiments.

困ったときは内藤さんを頼りにしていました。

ネットワークと KEK での日々の暮らしのことを荒木さんにはお世話になりました。

本田さん、質問に答えてくださりありがとうございました。

福田さんも、質問に答えてくださりありがとうございました。

竹澤さん、ATF での生活を 1.5 倍くらい楽しいものにしてくれてありがとう。

渡辺君、車でいろいろなところに連れて行ってくれてありがとう。

その他 ATF の皆さんどうもありがとうございました。

最後に大学院まで行かせて頂いたことを両親に感謝します。