

## ATF2 におけるビーム収束

KEK 加速器研究施設

奥木 敏行

toshiyuki.okugi@kek.jp

2013年5月10日

### 1 はじめに

#### 1.1 ILC のための加速器開発

2012年12月、国際リニアコライダー計画 (ILC, International Linear Collider) [1] の技術設計書 Technical Design Report (TDR) が完成した [2]。ILC のレイアウトを図 1 に示す。TDR は『ILC の物理』『加速器』『物理と測定器の詳細ベースライン設計』の 3 巻で構成されている。また、第 2 巻の『加速器』は、さらに 2 部構成になっていて、第 1 部には『世界各国での ILC のための R&D の報告』が纏められ、第 2 部には『ILC の基本的なデザイン』が書かれている。本稿で報告する、Accelerator Test Facility (ATF) での研究開発は、TDR 第 2 巻 1 部の『ILC のための R&D の報告』の内容に深く関係している。読者の方には、本稿の内容をとおして、ILC の加速器開発は ATF という KEK 内にある施設での研究開発であっても KEK だけでおこなっているわけではなく、国際的な枠組みで進められていること、そして、多少の紆余曲折はあるにしても、順調に ILC のための加速器開発は進められている様子を感じ取ってもらえたら嬉しいです。

ILC に要求される加速器技術として重要なことは、全長を短くするため、あるいは、限りあるトンネルの中で少しでも高いエネルギーに到達するため、高い加速勾配を目指していることはいままでのない。しかし、高エネルギー実験で ILC を使うためには、ただ高い加速勾配が得られればよいわけではない。何度も衝突のチャンスがある円形衝突器と異なり、ILC では 1 つの電子ビームや陽電子ビームに与えられる衝突のチャンスはたった 1 度だけである。この状況下で高いミノシティを確保するために ILC で工夫していることは 2 つある。1 つ目は単位時間当りに加速できるビームの数を出来る限り多くすること。そして、2 つ目には、ビームが交差する際に電子と陽電子が反応を起こす確率を極限まで上げることである。



図 1 International Linear Collider (ILC) のレイアウト図

ILC では単位時間あたりにたくさんのビームを加速するために、超伝導加速技術を用いたビーム加速を採用している。ILC の超伝導加速技術は、次号に KEK 早野氏が報告を予定しているの、そちらを参照いただきたい。

もう 1 つの ILC で高いミノシティを得るために必要な要素は、ビーム交差時の反応確率を上げることである。具体的には、衝突点でビームを出来る限り小さく絞り、ビーム同士を正確に衝突させることである。ATF では、それに必要な技術開発をおこなっている。

#### 1.2 Accelerator Test Facility (ATF)

衝突点でビームを小さく絞るために重要なことは 2 つある。1 つ目はビームの平行性を良くすることである。光を想像してもらおうとイメージしやすいと思うが、懐中電灯の光とレーザーの光を同じレンズで絞る場合、レーザー光の方が小さく絞ることができる。これはレーザー光の方が懐中電灯の光よりも平行性がよい光線 (ビーム) だからである。光と同じように電子や陽電子ビームにも平行性の良し悪しがあり、優れた平行性のビームを使うと、衝突点でビームを小さく絞ることができる。加速器の用語では、この平行性の指標をエミッタンスというパラメータで評価している。ATF にはダンピングリングという円形加速器があり、電子ビームをダンピングリングに通過させることで、電子ビームのエミッタンスを小さくすることができる。ATF で作られる電子ビームのエミッタンスは、世界トップクラスの小さな値であり、ATF では電子ビームを ILC で要求されるエミッタンスと同等の値まで小さくできる。

衝突点でビームを小さく絞るために必要な 2 つ目の要素は、出来るだけ収差の小さいレンズ系を作ることである。ビームには有限の大きさやエネルギーの広がりがあり、レンズ系の収差が大きいと、衝突点でビームサイズが広がってしまう。これも光の場合を想像すると分かりやすいと思うが、収差の小さいレンズ系を作るためには、複数枚のレンズを組み合わせた最終収束光学系を作る必要がある。ATF では、後に説明する ATF2 ビームラインで最終収束光学系の研究もおこなっている。

ATF2 のレイアウトを図 2 に示した。ATF ではビームを小さく絞るために、まずダンピングリングでビームのエミッ

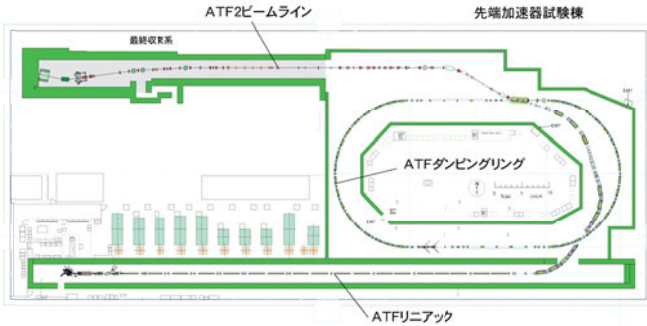


図2 Accelerator Test Facility (ATF)のレイアウト図

タンスを小さくする。その後、収差を小さく抑えた ATF2 ビームラインでビームを小さく絞っている。ILCでも ATF と同じように、最初にダンピングリングでビームのエミッタンスを小さくして、加速したのち、最後に収差の小さい最終収束光学系でビームを衝突点で小さく絞るように設計されている。

## 2 ATF2 ビームライン

### 2.1 ILC の最終収束光学系

1990 年代から 2000 年代にかけて、世界中には数多くのリニアコライダー計画があった。日本では Japan Linear Collider (JLC) という常伝導技術を使ったリニアコライダーを進めており、SLAC (アメリカ) でも Next Linear Collider (NLC) というリニアコライダー計画を進めていた。JLC と NLC は技術開発要素が近かったため、加速空洞をはじめさまざまな技術交流があった。当時、SLAC には Final Focus Test Beam (FFTB) というリニアコライダーの最終収束光学系を試験する施設があった。FFTB では Global Chromaticity Correction という収差補正方法の最終収束光学系でビーム収束試験をおこない、電子ビームを 70nm 程度まで絞り込むことに成功した[3]。JLC と NLC は、最終収束光学系のパラメータが近かったこともあり、FFTB には多くの日本の加速器研究者も参加し、その成果に貢献した。

FFTB での実験が終了した後、リニアコライダーの最終収束光学系の研究は、おもに計算機シミュレーションにより進められた。そして、現在の ILC のデザインでは、当時とは違う Local Chromaticity Correction の原理に基づいた最終収束光学系を使用することになっている[4]。現在の Local Chromaticity Correction の収差補正方法を用いた最終収束光学系は、かつて、FFTB で試験された Global Chromaticity Correction の原理に基づいた最終収束光学系に比べ、全長が約 1/3 と短く(図 3)、エネルギーアクセプタンスが広くとれ、かつ、ビームハローが大きく広がらないという特徴がある(図 4)。ビームラインの長さが短くなることは、そのまま建設コストの削減に繋がる。また、エネルギーアクセプタンスが広く、ビームハローが広がらない

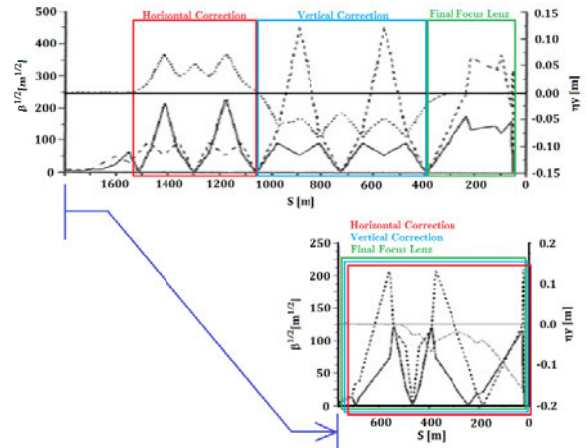


図3 Global Chromaticity Correction と Local Chromaticity Correction のビーム光学系の例。Global Correction では水平、垂直方向の色収差補正セクションと最終収束レンズ系が別々。一方、Local Correction は、最終収束レンズ系の中で水平、垂直両方の色収差補正をおこなうので、ビームラインをコンパクトにできる。

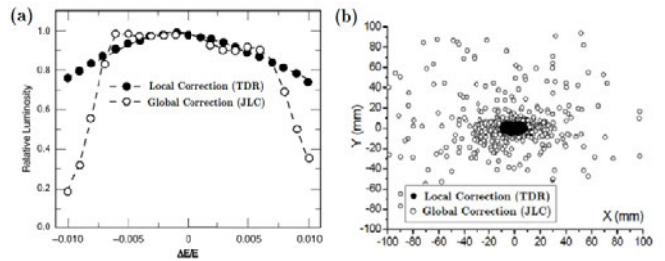


図4 Global Chromaticity Correction と Local Chromaticity Correction の性能比較。(a)エネルギー許容値。(b)焦点でのビームハローの分布。

という性質は、測定器設計に自由度を持たせ、マシンプロテクションの観点からも利点は多い。しかし、Local Chromaticity Correction 方式の最終収束光学系は、このように多くの利点があるが、ビーム調整が Global Chromaticity Correction 方式に比べて複雑であることや、何よりも実験的に原理証明がなされていないという問題もあった。

### 2.2 ATF2 プロジェクト

2004 年の International Technology Recommendation Panel (ITRP)で、それまで世界中にいくつもあったリニアコライダー計画を、超伝導加速技術を用いた ILC という世界に 1つの計画に統一するという意思決定がなされた。そして、2004 年 11 月に、KEK で ILC 計画がスタートして最初の国際ワークショップとなる LCWS2004 が開催された。この場において、ATF のビームエネルギーは ILC よりも 2 桁以上低いが、ATF が作り出す超低エミッタンスビームを使えば、ATF で ILC の最終収束光学系の原理証明が可能であるという提案がされた[5,6]。そして、この ATF のビームを使った ILC の最終収束光学系の試験施設をつくる計画を ATF2 プロジェクトと命名した。

Local Chromaticity Correction 方式の最終収束光学系の原理証明をすることは、ILC のデザインに大きなインパクトを与えると期待されていた。しかしながら、ILC 計画が発足した 2004 年の段階では FFTB はすでに稼働を終了しており、最終収束光学系の試験をおこなえる施設が世界中どこにも存在しなかった。このことが ATF2 プロジェクトを発足させた大きなモチベーションであった。

ATF2 プロジェクトは、2004 年の LCWS2004 で提案されたのち、国際協力によるプロジェクトとして推進してきた。2005 年度中は、プロジェクトを推進するための国際組織を作り、ハードウェアの検討、作業と予算の分配作業を進め、国際協力によるプロジェクトの骨格作りがなされた。その過程において、2005 年 8 月には ATF2 Proposal Vol.1 [7] を公表し、その中で『ATF2 の目的とハードウェア』をまとめた。さらに、2006 年 2 月には『ATF2 のスケジュール・推進体制・予算』を説明する ATF2 Proposal Vol.2 [8] を発表した。ATF2 プロジェクトは、アジア、ヨーロッパ、アメリカの 3 地域が同程度の貢献をすることを目指して、設計、製造および建設が分担された。そして、ILC 最終収束系の技術開発に興味を持つ世界中の研究者が参加できる枠組みを整備した。こういった ATF2 での経験は、ILC を実現する際の国際的協力分担体制のモデルとしても役立つものと期待している。

ATF2 ビームラインの建設は 2007 年から 2008 年の間おこなわれた[9]。その間に、新設部分の床の補強工事、放射線防御用コンクリートブロックの設置、冷却水などのインフラの整備、電磁石やモニターなどのハードウェアの製作、各種ハードウェアのビームラインへの設置などの作業がおこなわれた。ATF2 ビームラインの建設は、ホストである KEK の役割は当然として、電磁石システムやビームモニターなど多岐にわたる加速器要素を世界中の大学・研究機関が分担することで実現した。四極電磁石は IHEP (中国) で製作し、六極電磁石、最終収束電磁石、電磁石ムーバー、電磁石電源は SLAC が担当した。偏向電磁石は SLAC の設計・発注の下で IHEP が製造したものである。また、最終収束電磁石の架台システムは LAPP (フランス) が担当した。空洞型ビーム位置モニターは KEK が設計を行い、Pohang Accelerator Laboratory, PAL (韓国) が製作を担当した。ビーム位置モニターの読み出し回路は SLAC が設計製作し、ソフトウェアは Royal Holloway University of London, RHUL (イギリス) が担当している。

このような世界各国の研究機関との協力のもと、ATF2 ビームラインは建設され、2009 年に運転を開始した。ビーム運転に関しても、ビームラインの建設と同様、世界各国の研究者が参加している。図 5 には共同開発研究のために ATF を訪れた国内外の来訪者の数をしめた。国内よりも海外からの来訪者が多いことがわかれると思う。

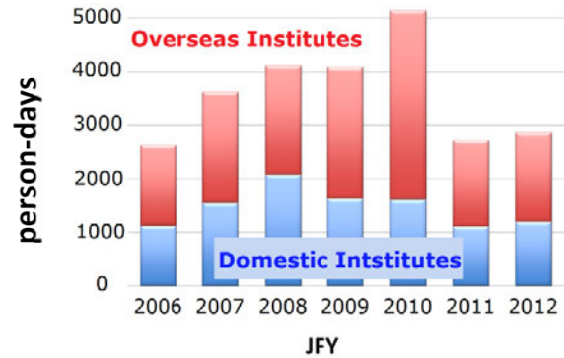


図 5 年度毎の ATF への国内、国外の研究者、学生の来訪者数。

## 2.3 ATF2 ビームライン

ATF2 ビームラインは ILC の最終収束光学系の原理証明を第一の目的としているので、Local Chromaticity Correction 方式のビーム光学系を採用している。また、電磁石の配置や名前も ILC の最終収束光学系と同じである (図 6)。そして、色収差 (エネルギーが違った粒子の収差) の強さ、個々の電磁石の強さ、設置位置誤差、振動に対する許容値も ILC と同程度になるように設計されている (図 7)。ただし、ILC

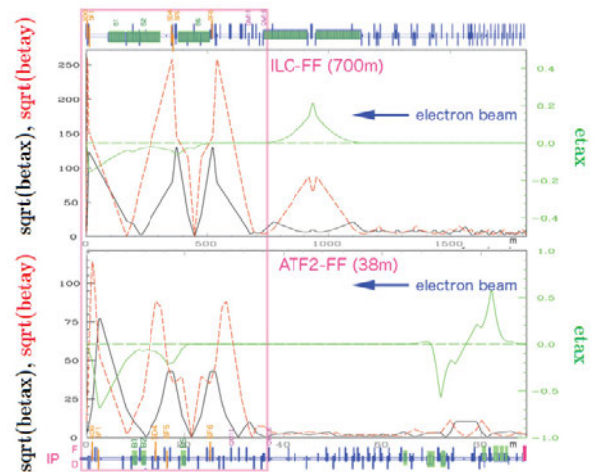


図 6 ILC と ATF2 のビーム光学系。ATF2 ビームラインは ILC のデザインと同じ電磁石の配置になっている。

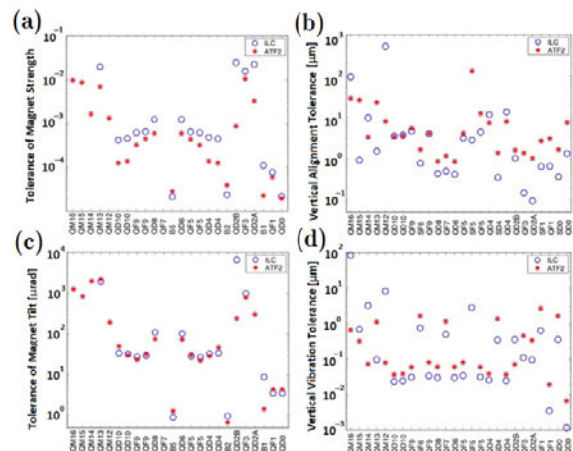


図 7 ILC と ATF2 の電磁石の許容値の比較。(a)磁場の強さの許容値。(b)電磁石の設置位置誤差の許容値。(c)電磁石の回転設置誤差の許容値。(d)電磁石の振動誤差に関する許容値。



表1 ATF2の仮想焦点のパラメータ。

	ILC-500GeV	ATF2	FFTB
Chromaticity Correction	Local Correction	Local Correction	Global Correction
Beam Energy	250GeV	1.3GeV	46.6GeV
$L^*$	3.5 m	1.0 m	0.4 m
$\beta_x^*$ [mm] $\times$ $\beta_y^*$ [mm]	11 $\times$ 0.48	40 $\times$ 0.1	10 $\times$ 0.1
$\epsilon_x$ [nm] $\times$ $\epsilon_y$ [pm]	0.02 $\times$ 0.07	2.0 $\times$ 12	0.33 $\times$ 20
$\sigma_y^*$ [nm]	5.9	37	45

のビームエネルギーが250GeVに対して、ATF2ビームラインでは1.3GeVと低いので、絞れるビームサイズは、ILC焦点の5.9nmに対してATF2仮想焦点では37nmとなっている。表1にILCとATF2、FFTBのパラメータを比較した。

また、ATF2ビームラインには仮想焦点でビームを小さく絞るだけでなく、仮想焦点で正確にビームの位置を制御するという2つ目の目的もある。ILCでは、それぞれ独立に加速された電子ビームと陽電子ビームを衝突点で正確に衝突させなければならない。そのためには、ビームサイズよりもよい精度で、衝突点でビームの位置を制御しなければならない。ILCでは衝突点でビームの位置を2nm以下に制御できることを前提に設計されている。このような精密なビーム位置制御についても原理証明がなされていないので、ATF2では、仮想焦点におけるビーム収束とともに、ビーム位置制御に関する研究も進めている。

### 3 ATF2 仮想衝突点でのビーム収束

#### 3.1 ビームサイズモニター(IP-BSM)

ATF2では電子ビームを仮想焦点で37nmまで絞ろうと考えている。しかし、ビームを小さく絞っても、それを測定できるビームサイズモニターがないと、実際にビームを小さく絞れたことを証明することができない。そのため、ATF2でビームを小さく絞るためには、ビームサイズモニター自体も非常に重要になってくる。ATF2仮想衝突点には、FFTBで使われていたビームサイズモニターIP-BSM(通称、新竹モニター)[10]を譲り受け使用している。ATF2でのIP-BSMの開発および改良は、東大とKEKと共同で担当している。ATF2で使用しているIP-BSMの写真を図8に示した。

IP-BSMは、レーザー干渉縞を利用したビームサイズモニターである。1台のレーザーから出射された光を2つに分け、仮想衝突点で交差させることで、仮想衝突点にレーザー光の干渉縞を作ることが出来る。この干渉縞に電子ビームが通過するとき、電子ビームとレーザーとのコンプトン散乱により $\gamma$ 線が生成される。電子ビームのビームサイズが干渉縞に比べて小さいときには、干渉縞の位置に応じて生成される $\gamma$ 線の発生量が変化する(以下、モジュレーション

ンが起こると記す)。一方、電子ビームのビームサイズが干渉縞よりも大きいときには、干渉縞の位置を変えても発生する $\gamma$ 線数にモジュレーションは起こらない。このように、干渉縞の位置を変えたときの $\gamma$ 線数のモジュレーションの大きさから、ビームサイズを評価することが出来る。

IP-BSMにより測定できるビームサイズの測定範囲は、干渉縞ピッチの約10%から35%の範囲と、干渉縞のピッチで決まる。干渉縞のピッチは2つのレーザー光の交差角に依存するが、最小でレーザー波長の半分まで小さくすることが出来る。ATF2では、小さなビームサイズでIP-BSMのビームサイズ測定感度が高くなるように、レーザーの波長をFFTBで使われていた1064nmから532nmに変更して使っている[11]。このことにより、ATF2のIP-BSMでは、レーザー光の交差角を最大にしたとき(174度)、25-90nmの範囲のビームサイズの測定が出来る。また、2-8度、30度とともに2つの小交差角モードを用意することで25nmから6 $\mu$ mまでの広い測定範囲を実現している(図9)。

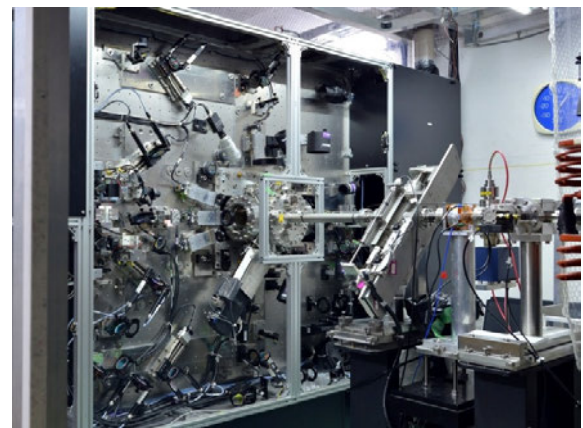


図8 ATF2 仮想衝突点に置かれている IP-BSM の写真

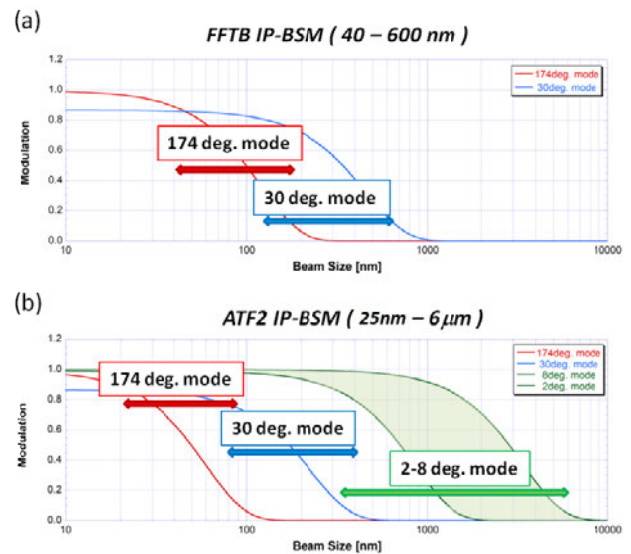


図9 FFTBとATF2で使われているIP-BSMによる仮想衝突点でのビームサイズの測定範囲。

### 3.2 ATF2 でのビーム調整技術

ATF2 ビームラインのすべての四極電磁石および六極電磁石は、電磁石ムーバーの上に設置されている。そして、ATF2 ビームラインには、軌道補正用のステアリング電磁石はいっさい設置せず、ATF2 での軌道調整は電磁石ムーバーを使っておこなっている。このようなビームラインの仕様は ILC の最終収束光学系と同じ仕様であり、ATF2 でのビーム軌道調整の経験は ILC のビーム制御技術に直結するものであると期待している。

また、仮想衝突点でのビームサイズ測定に関しても、ATF2 では電磁石ムーバーで六極電磁石の位置を変えることで、仮想焦点に電子ビームのウエスト位置を合わせたり、エネルギーの違った粒子の焦点の位置を 1 点に揃えたり、ビームの傾きを調整するなど、加速器用語では『線形光学系の調整』と呼ばれる調整をおこなっている。見ているモニターが、IP-BSM か、ルミノシティモニターかの違いはあるが、ATF2 仮想衝突点でのビームサイズの調整方法も ILC 焦点での調整方法と同じ手法を採っている[12]。

### 3.3 仮想焦点でのビームサイズ調整

ATF2 ビームラインは 2009 年に運転を開始した。運転開始当初は仮想焦点でビームをあまり小さく絞らず、おもにモニター類などのシステム確認をおこなった。ATF2 プロジェクトは国際協力で進められ、各デバイスは、前述の通りさまざまな国の研究機関や大学が担当し、かつ、それぞれの担当者は KEK に常駐できるわけではない。そのため、海外の担当者がいなくても各デバイスを使用できるように運転システムを構築することは、ATF2 プロジェクトにとって非常に重要なことだった。

2009 年の夏に IP-BSM のレーザーを高出力レーザーに入れ換えた。それに伴い IP-BSM のコンプトン $\gamma$ 線の信号レベルも上がった。この頃から IP-BSM の低交差角（干渉縞のピッチを大きくとる測定モード）でのビームサイズ測定が出来るようになってきた。ビームサイズ測定の精度が上がるのにあわせて、2010 年の年末から仮想焦点でビームサイズを設計値まで小さく絞りはじめた。そんな折の 2011 年 3 月 11 日に東日本大震災が起り、ATF でも加速器の放射線シールドがずれるなどの多大な被害を受けた。そのため 2011 年中は震災からの復旧作業に明け暮れた。

2012 年になると震災からの復旧作業も落ち着き、本格的な仮想衝突点でのビーム収束実験を開始した。しかし、ビームは仮想衝突点で 150nm 程度までしか絞れなかった。ATF2 ビームラインには、KEKB から借りたスキュー六極電磁石が 1 台入っていた。そこで、このスキュー六極電磁石を使って ATF2 ビームラインを通過する電子ビームを調べてみた。ATF2 ビームラインに入っている電磁石の多重極成分はすべて磁場測定で測定されている。電磁石の磁場測定

の値からの想定では、スキュー六極電磁石の強さの最適値は 2A 程度で、スキュー六極磁場によるビームサイズの寄与は 10-20nm 程度と考えられていた。しかし、測定されたスキュー六極磁場によるビームサイズの寄与は、予想よりも遥かに大きかった(図 10)。このことは、ATF2 ビームラインのどこかに想定よりも遥かに大きなスキュー六極磁場の存在を示唆していた。

本来ならば、この原因を探るべくビームライン上の電磁石の磁場を再確認すべきだが、ATF2 ビームラインに入っている電磁石はいろいろな国の研究期間が担当していて、KEK にはすべての電磁石にあった磁場測定装置がなかった。そこで、シミュレーションを中心とした検討をすすめ、4 台のスキュー六極電磁石を使えば、ビームライン上のどこかに強いスキュー六極磁場が存在していても、その誤差を補正出来る許容値が大幅に広がることがわかった(図 11)。さらに、4 台のスキュー六極電磁石を使うことで、スキュー六極磁場のエラーソースがどこにあるのかを調べることも可能だとの考えにいたった。2012 年夏の運転停止期間に KEKB から新たに 3 台のスキュー六極電磁石を借り、ATF2 ビームラインに合計 4 台のスキュー六極電磁石を入れて、2012 年秋からの運転に臨んだ。

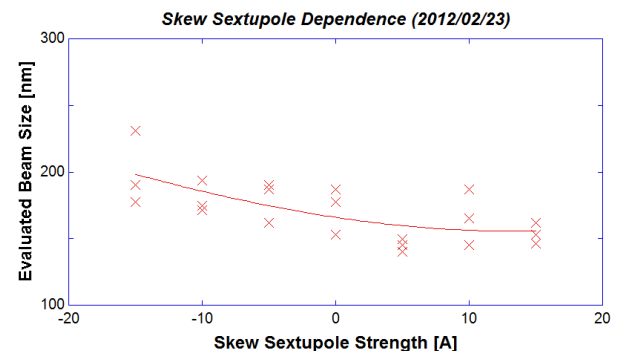


図 10 2012 年 2 月にスキュー六極電磁石の強さを変えたときの ATF2 仮想焦点でのビームサイズの変化。図では IP-BSM の系統誤差がないと仮定したときのビームサイズを示した。実際のビームサイズは、この値以下になる。

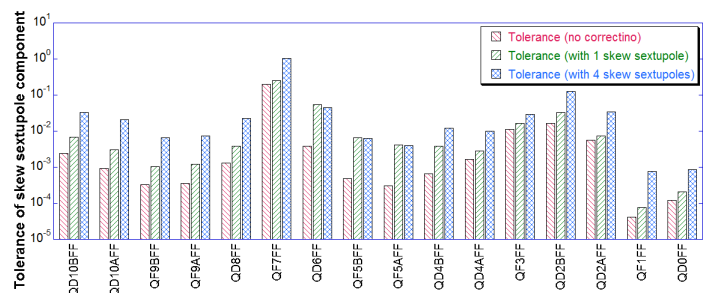


図 11 ATF2 の各四極電磁石のスキュー六極電磁石磁場の許容値。図にはビームライン上にまったくスキュー六極電磁石を置かなかった場合、1 台のスキュー六極電磁石を使って補正をおこなう場合、4 台のスキュー六極電磁石を使って補正をおこなう場合を示した。

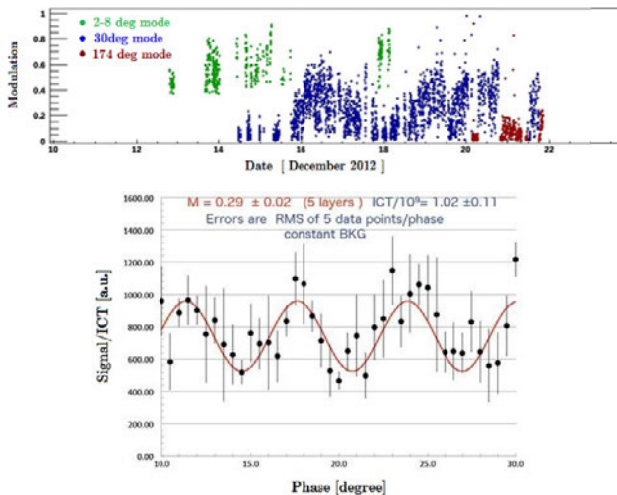


図12 2012年12月のIP-BSMでのモジュレーションの大きさの履歴とIP-BSMの174度モードでモジュレーションを測定した例。

2012年12月の運転では、4台のスクュー六極電磁石を使って仮想焦点でのビームサイズの補正をおこなった。このときはじめてIP-BSMの最大交差角の174度モード(測定範囲90nm以下)での仮想衝突点でのビームサイズの測定に成功した。図12には2012年12月の最後の2週間のIP-BSMで測定したモジュレーションの大きさ(モジュレーションが大きいほどビームサイズは小さい)の履歴と、174度モードで測定されたモジュレーションの例を示す。ビームサイズ調整ではビームサイズを小さくしていく過程で、干渉縞のピッチが大きいモードから小さなモードの測定に徐々に移行していく。図からはその様子がみてとれると思う。

2012年の運転終了後、実験結果とシミュレーションを比較して、ビームライン上のどこに強いスクュー六極磁場があるかを検討した。その結果、ある1台の六極電磁石に強いスクュー六極磁場があると考え、実験結果とシミュレーションがよい一致を示した。ここでも本来ならば、電磁石の磁場を再確認すべきだが、その電磁石に合ったすぐ使える磁場測定装置がなかった。そこで、電磁石のコイルの短絡の有無に問題を絞り、六極電磁石のコイルを分解し、ポール1つ1つに巻かれているコイルのアドミッタンスの測定をした。コイルの抵抗は小さいので、抵抗値の違いだけで短絡を調べるのは難しい。そこで、コイルの短絡があれば抵抗値だけでなくインダクタンスも変わるだろうと考えて、LCRメータを使って各コイルを調べることにした。その結果、1台の六極電磁石のポールの1つに巻かれていたコイルの短絡がわかり、これが今までビームを小さく絞れなかった原因であると判明した(図13)。

予備の六極電磁石がなかったため、短絡がわかった六極電磁石を、磁場が弱いところで使われている六極電磁石と交換した。その後は、スクュー六極電磁石を使った補正をおこなわずに、常に仮想焦点で100nm以下までビームを絞ることができるようになり、2013年4月時点では65nm以下までビームを絞ることが可能になった(図14)。

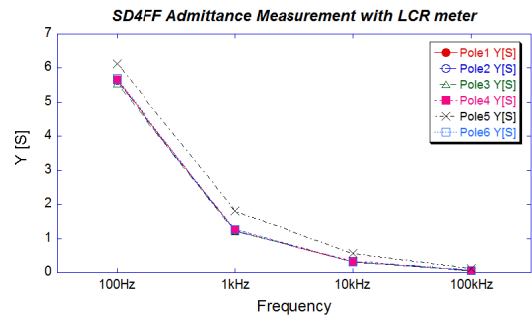


図13 SD4FFという電磁石のコイルを分解して、LCRメータを使いおこなったコイル毎のアドミッタンス。5番目のポールだけ、ほかのポールより有意にアドミッタンスが高かった。

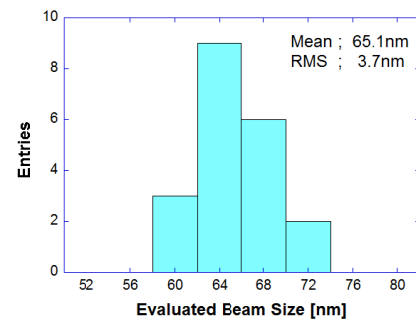


図14 2013年3月にATF2仮想衝突点で測定されたビームサイズ。図ではIP-BSMが完全であると仮定したときのビームサイズを示した。実際のビームサイズは、この値以下になる。

## 4 仮想衝突点でのビーム位置調整

### 4.1 ILCのビーム軌道フィードバック

ILCでは554nsの時間間隔で並んだ1312個のバンチと呼ばれる電子ビームを1つのRFパルスで加速する。ILCのバンチ構造は先頭のバンチから次のバンチが通過するまでに554nsの時間的なゆとりがあるので、この時間内に先頭のバンチの位置情報から次のバンチにフィードバックをかけることができる。このように長いバンチ間隔で加速出来ることが超伝導技術を使ったILCの特徴の1つである。このような特徴から、ILCはCompact Linear Collider (CLIC, バンチ間隔0.5ns)[13]などの常伝導技術を使ったりニアコライダー計画に比べて、衝突点での位置を正確に制御しやすい加速器となっている。

一般に、電子ビームと陽電子ビームが衝突点で交差するとき、2つのビームの位置が違っていると、一方のビームが他方のビームが作る電磁場で散乱される。その結果、衝突点を過ぎた後のビームの角度が変わる(図15)。ILCでは衝突点でビームを5.9nmと非常に小さく絞るため、衝突点で電子や陽電子ビームの密度が非常に高くなり、ビームの散乱角も大きくなる。ILCでは2つのビームのオフセットが数nmあると、衝突点から数m離れたモニターではビームの位置がマイクロオーダーで変わる。ILCでは衝突点でのビームの相対位置を、ビーム同士の散乱の大きさをモニターし、フィードバックで揃えることを考えている(図16)。



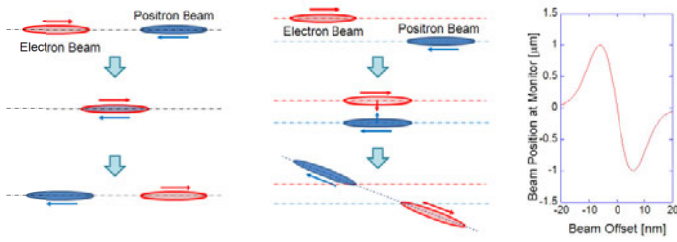


図 15 衝突点でビーム同士が散乱する様子を表した模式図。ILC ではビームのオフセットがあると、ビームの角度が大きく変わる。

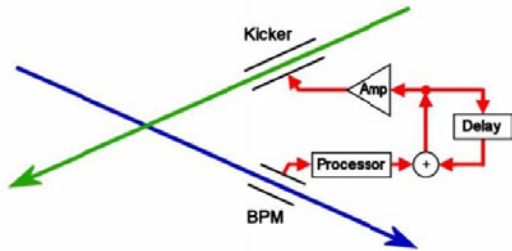


図 16 ILC の衝突点での位置フィードバックの概念図。

#### 4.2 ATF でのビーム軌道フィードバック

ATF2 ビームラインでは、仮想焦点でビームを小さく絞るだけでなく、仮想焦点で正確にビームの位置を制御するための研究もおこなっている。しかし、ATF2 ビームラインでは ILC と違い、ビームは電子ビーム 1 つしかない。そのため、ILC とまったく同じ衝突点でのビームの散乱を利用した位置フィードバックはできない。ATF2 でのフィードバックは、同一パルス内の ATF2 仮想焦点のビーム位置を基準位置に揃えるものである。この研究は Oxford University (イギリス) を中心に進めている。

ATF2 仮想衝突点でのビーム位置の安定化目標は 2nm 以下と ILC と同じ値においている。ILC では衝突点でのビーム散乱を利用できるためマイクロオーダーの位置分解能の位置モニターがあればよい。一方、ATF2 ビームラインではビーム散乱を利用できないため、ビームの位置もフィードバックの目標値である 2nm 以下で測定しなければならない。それだけの位置分解能がある位置モニターは現在世界に存在していない。ATF2 では、フィードバック以前のビームの位置測定のハードルが非常に高い。また、ATF でつくることができるビームの構造は、バンチ間隔 150ns のバンチを最大 3 個までしか作ることが出来ない。そのため、ATF2 の位置フィードバックは ILC で要求される応答時間よりも速い応答時間が要求される。こう考えると、ATF2 仮想焦点でのフィードバックは ILC のフィードバックよりも難しいものになっていることが分かってもらえると思う。

ATF2 ビームラインでは、いくつかの段階を踏みながら、フィードバック技術を磨いている。その最初の段階として、ATF2 ビームラインの中流でフィードバックのアルゴリズムの実証試験をおこなった。セットアップを図 17 に示す。衝突点でビームの位置を安定にするには、ビームライン中流ではビームの位置と角度の 2 つを安定化しなければなら

ない。そのためには 2 つのキッカーを使ったフィードバックが必要で、1 つのキッカーでフィードバックをかける ILC のフィードバックより複雑なものが要求される。

ここでは ATF2 ビームラインでの試験結果を簡単に報告する[14]。フィードバックの試験には前述のように 150ns 間隔に 3 つのバンチが並ぶ構造のビームを使った。そして、1 バンチ目のビームの情報から 2 番目、3 番目のビームの位置にフィードバックをかけた。フィードバックの試験結果を表 2 にまとめた。フィードバックをかけないと約 2 $\mu$ m あった 2 番目、3 番目のバンチの位置ジッターが、フィードバックをかけることで、それぞれ 0.4 $\mu$ m、0.8 $\mu$ m まで減少した。この結果を仮想焦点のジッターに換算すると、フィードバックなしでは仮想焦点で約 15nm あったジッターが、フィードバックをかけることで、それぞれ 2.6nm、5.2nm に減ったことに相当する。このように ILC よりも複雑な条件で、目標に近い精度でビーム軌道を制御できることがわかった。

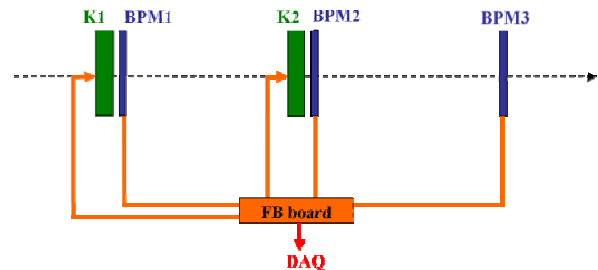


図 17 ATF ビームライン中流での位置フィードバックの概念図。

表 2 ATF ビームライン中流での位置フィードバックの効果。

( ) 内は仮想衝突点の位置ジッターへの換算値を示した。

	FB OFF	FB ON
Bunch #1	2.1 $\mu$ m (14.5nm)	2.1 $\mu$ m (14.5nm)
Bunch #2	2.2 $\mu$ m (14.7nm)	0.4 $\mu$ m (2.6nm)
Bunch #3	2.2 $\mu$ m (14.7nm)	0.8 $\mu$ m (5.2nm)

#### 4.3 ビーム位置モニターの開発

ATF2 の仮想焦点での位置フィードバックの研究には、位置分解能 2nm 以下のビーム位置モニターが要求されている。ATF では、この高い位置分解能を実現するための空洞型ビーム位置モニターの開発研究もすすめている[15]。現在は ATF2 ビームライン中流において、仮想衝突点に入れるためのビーム位置モニターのプロトタイプの試験を進めており、ATF2 の要求に近い 3.6nm の位置分解能が達成された[16]。達成された位置分解能は世界最高の分解能である。

実際に ATF2 仮想焦点に入れる空洞型ビーム位置モニターは Kyungpook National University (韓国) が現在製作しており、IP-BSM と両立可能に設計された真空チャンバーを LAL (フランス) が製作している。これらは 2013 年夏の運転停止期間に ATF2 仮想焦点に設置して、ATF2 仮想焦点での直接的なビーム位置制御をはじめるとの予定である。

## 5 まよめの前に…

高エネルギーニュースの記事ということで、単なる現状報告だけでは面白くないので、ATF2のビームサイズ調整を通して感じた私の雑感を少し書かせてもらおう。

ATF2プロジェクトは国際協力のもとで進められている。このことは、人的、物的資源の立場から多くの利点があることは紛れもない事実だ。しかし、国際協力によるデメリットがないわけでもない。

今回のように電磁石の磁場が疑わしいと感じたとき、KEK内だけで進められている実験ならば、担当者とのコンタクトは容易なので、担当者をとおして電磁石を調べることも簡単にできる。しかし、海外の研究所が担当しているデバイスの場合、提示された測定データを信じるしかない。また、ATF2プロジェクトでは、各デバイスをいろいろな国の研究機関が担当しているといっても、すべてのデバイスがATF2のために新たにつくられたものではなく、ほかの加速器で使われていたものを転用したものも少なくない。そのため、運転当初からすでに経年劣化しているデバイスが含まれていてもおかしくない。

そのような状況下で電磁石の磁場に疑問が生じたとき、磁場を再測定するには、新たにKEK内に磁場測定装置を作るか、送り返して測定しなおす以外方法はない。どちらもコストがかかるので、実際には磁場測定をおこなった方が早く正確に結論が出ると分かりながら、提示された測定結果に疑問を抱きながらも、原因をビームに聞くしかないのである。考えてみれば、非常に非効率なことだ。

とはいえ、暗中模索の中、できる限りビームの声に耳を傾けながら原因を探る作業をしたことは、プロジェクトとしては非効率だったとは思いますが、私個人としてはよい経験を積ませてもらったので、有意義な時間であった。

そして、実際にILCラボが出来た場合は、さまざまな国からの出資にはなるが、母体はラボに集約されるので、おなじ国際協力とはいっても、状況はまったく違うということは補足しておきたい。上で書いたことは、ATF2プロジェクトの国際協力の性質上起こる問題であって、国際協力全般にあてはまる話ではない。また、私自身ATF2プロジェクトを違った国際協力の骨格で進めることが難しいことも理解している。なので、ここで書いたことは単なる私の雑感にすぎないとことだと受け止めてほしい。

## 6 まよめ

ATF2ビームラインは、ILCの最終収束光学系の試験施設として、設計建設をとおして国際協力の枠組みで進められた。また、ATF2におけるビーム試験に関しても、国際協力でおこなっている。現在もILCに興味をもつ国内外の多くの研究者や学生とともに研究開発を進めている。

ATF2ビームラインはILCとまったく同じLocal Chromaticity Correctionの考え方で設計された光学系で、要求される難しさやビーム調整方法もILCとおなじである。これらのことからATF2でのビーム試験はILCの最終収束光学系の実証試験といっても過言でない。

ATF2ビームラインでの研究テーマは、仮想衝突点でビームを小さく絞ること、および、仮想衝突点でビームの位置ジッターを抑えることである。そして、ATF2仮想衝突点でのビーム収束試験の結果、ILCで使う予定のLocal Chromaticity Correction方式の最終収束光学系の原理実証をすることができた。また、ビーム位置安定化についてはATF2ビームライン中流でフィードバック回路の試験をおこなった。その結果、フィードバック回路はILCの焦点フィードバックに充分使えるレベルのものだとわかった。今後はATF2仮想焦点に高分解能のビーム位置モニターを設置して、仮想衝突点でビームジッターをフィードバックで実際に抑制できることを実証する予定である。

## 謝辞

本稿を書くにあたり、ATFグループをはじめとするILC関係者の方々には、たくさんの助言やアドバイスを頂きました。この場を借りて深く感謝申し上げます。また、KEKBの増澤美佳准教授には、スキュー六極電磁石を貸していただき、かつ、磁場測定をはじめとする電磁石に関する様々なアドバイスを頂きました。どうもありがとうございました。

## 参考文献

- [1] International Linear Collider, <http://www.linearcollider.org>
- [2] 山本明, 高エネルギーニュース **31-4**, 314 (2013).
- [3] V.Balakin *et al.*, Phys. Rev. Lett., **74** 2479 (1995).
- [4] P.Raimondi and A.Seryi, Phys. Rev. Lett. **86**, 3779 (2001).
- [5] <http://lcdev.kek.jp/ILCWS/WG4.php>
- [6] 佐貫智行, 高エネルギーニュース **24-4** (2006).
- [7] ATF2 Group, “ATF2 Proposal Vol.1”, KEK Report 2005-2.
- [8] ATF2 Group, “ATF2 Proposal Vol.2”, KEK Report 2005-9.
- [9] 照沼信浩, 奥木敏行, 高エネルギーニュース **27-4**, 230(2009).
- [10] T. Shintake, Nucl. Instru. Meth., **A311**, 455 (1992).
- [11] T. Suehara, Doctor Thesis, University of Tokyo (2008).
- [12] 奥木敏行「最終収束系の設計」 OHO'06 13 (2006).
- [13] CLIC Conceptual Design Report, CERN-2012-007 (2012).
- [14] D.R. Bett *et al.*, IPAC2012 Proceedings 2864 (2012).
- [15] Y. Inoue *et al.*, Phys. Rev. ST-AB, **11**, 062801 (2008).
- [16] Y.I.Kim, Doctor Thesis, Kyungpook National Univ. (2012).