

ATF の最終収束試験における微小ビームサイズの達成 ACHIEVEMENT OF SMALL BEAM SIZE IN FINAL FOCUS TEST AT ATF

久保 浄[#]、奥木 敏行
Kiyoshi Kubo [#], Toshiyuki Okugi
KEK、 High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

In ATF (Accelerator Test Facility) at KEK, using the extremely small emittance beam extracted from the damping ring, study of the final focus system has been performed. The project is called ATF2. The purpose of the project is test and demonstration of the final focus method called “Local Chromaticity Correction”, which will be used in ILC (International Linear Collider). The ATF2 beam line optics is designed as same as the final focus system of ILC, with the similar beam energy spread (about 0.1%) and natural chromaticity (about 10000), tolerances of magnetic field errors are also similar. We confirmed the vertical beam size smaller than 70 nm with low intensity by December 2012. During following experiments, tuning procedure for such small beam size has been established, though the observed beam size was larger than that expected from the beam emittance and the beam line optics (37 nm).

1. はじめに

ILC[1]のレイアウトを図 1 に示す。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、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。この状況下で高いルミノシティを確保するために、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が重要になる。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行っている。

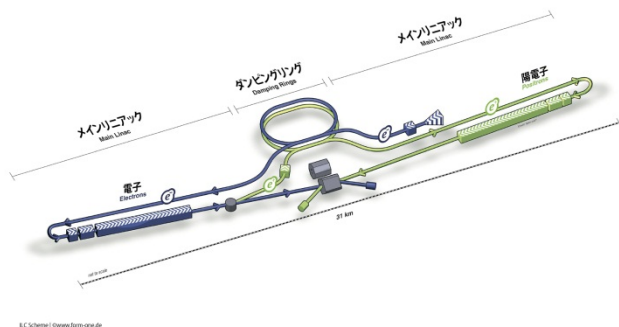


Figure 1: ILC Layout

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 つ目はビームのエミッタンスを良くすることである。ATF にはダンピングリングがあり、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出来る。ATF で生成さ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まで小さくできる[2]。

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。ATF では、ATF2 ビームラインで ILC のための最終収束光学系の研究も行っている。

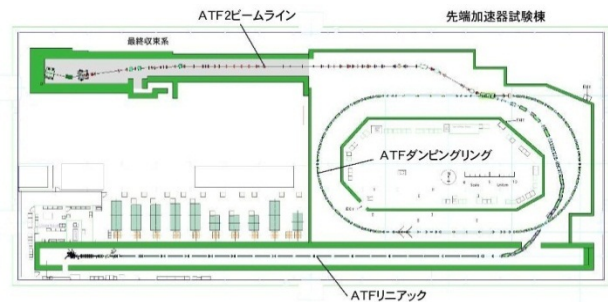


Figure 2: ATF Layout

ATF 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

SLAC には 1990 年代に、Final Focus Test Beam (FFTB) というリニアコライダ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

[#] kiyoshi.kubo@kek.jp

束光学系でビーム収束試験を行い、電子ビームを70nm程度まで絞り込むことに成功した[3]。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、主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、当時とは異なる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、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。ビームラインの長さが短くなることは、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が多い。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。そこで、2004年11月のLCWS2004で、ATFが作り出す超低エミッタンスビームを使えば、ILCよりも2桁以上低いエネルギーでも、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をし、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、ATFに新設された最終収束光学系をATF2ビームラインと命名した。

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。ただし、ILCのビームエネルギー250GeVに対して、ATF2は1.3GeVと低いので、絞れるビームサイズは、ILC衝突点の5.9nmに対してATF2の仮想衝突点では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。

Table 1: ATF2 parameters at the virtual interaction point

	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
$\beta_x^* [\text{mm}] \times \beta_y^* [\text{mm}]$	11×0.48	40×0.1	10×0.1
$\epsilon_x [\text{nm}] \times \epsilon_y [\text{pm}]$	0.02×0.07	2.0×12	0.33×20
$\sigma_x^* [\text{nm}]$	5.9	37	45

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。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。

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では電子ビームを焦点(仮想衝突点)で37nmまで絞ろうと考えている。しかし、小さなビームを測定できるビームサイズモニターがなければ、ビームを絞るための調整が困難であり、仮に小さく絞れたとしてもそれを証明することができない。そのため、ATF2で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)(新竹モニター)[5]を譲り受け、改造して使用している。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3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、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 γ 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 γ 線の発生量が大きく変化する(以下、モジュレーションが起こると記す)。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 γ 線数にモジュレーションはほとんど起こらない。このように、干渉縞の位置を変えたときの γ 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。測定されたモジュレーションとビームサイズの関係は、

$$\sigma_y = \frac{1}{k_y} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{C |\cos \theta|}{M} \right)}, \quad k_y = \frac{\pi}{d}$$

と表せる。ここで、 d はレーザー干渉縞のピッチ、 θ はレーザーの交差角である。

ATF2では、レーザーの波長をFFTBで使われていた1064nmから532nmに変更することで、IP-BSMのビームサイズ測定感度を小さなビームサイズで高くなるようにしている[6]。ATF2のIP-BSM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度とさらに2つの小交差角モードを用意することで25nmから6 μ mまでの広い測定範囲を実現している(図4)。

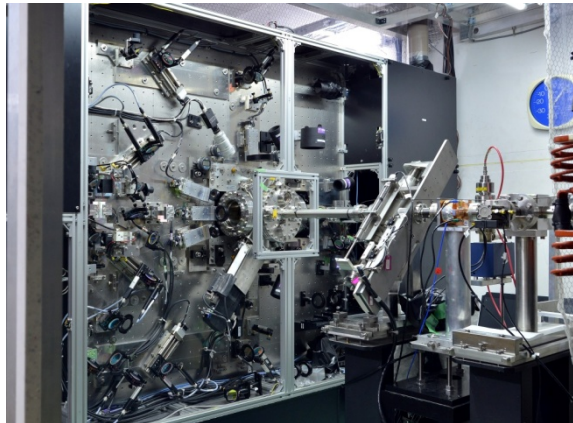


Figure 3: IP-BSM of ATF2

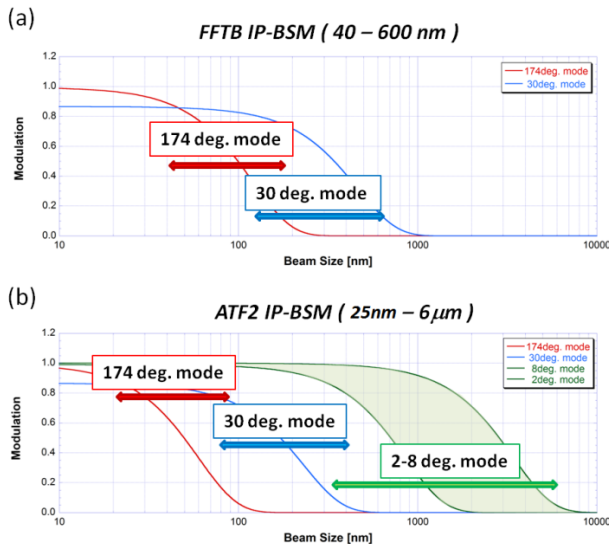


Figure 4: Measureable beam size regions of IP-BSM used for FFTB and ATF2

3.2 ATF2 でのビーム調整方法

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ムーバーの上に設置されている。仮想衝突点でのビームサイズ測定は、電磁石ムーバーで六極電磁石の位置を変えることで、線形光学系の調整を行っている [7]。また、2 次の非線形光学系の調整は、六極電磁石、スキュー六極電磁石の強さを変えることで行っている。図 5 に線形光学系の調整の例を示す。

2012 年の夏までの運転では、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。このスキュー六極電磁石を使って調べたところ、ビームライン上に存在するスキュー六極電磁石は、予想よりも遥かに大きいものだとわかった。そこで、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 [8]。4 台のスキュー六極電磁石を使うことで、スキュー六極電磁石のエラーソースがどこにあるのかを調べることが可能であり、その誤差を補正出来る許容値を大幅に広げることができる (図 6)。

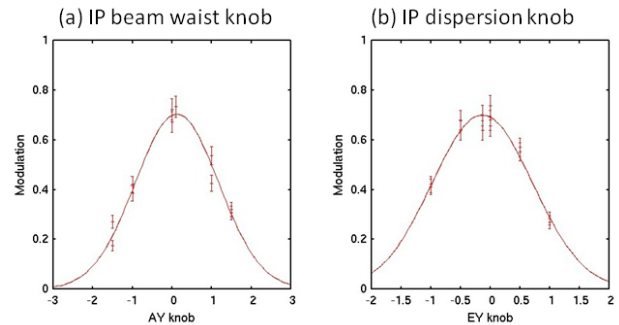


Figure 5: Examples of linear optics tuning. Modulation vs. (a) focal point change, and (b) dispersion change, with IP-BSM crossing angle 30 degree mode.

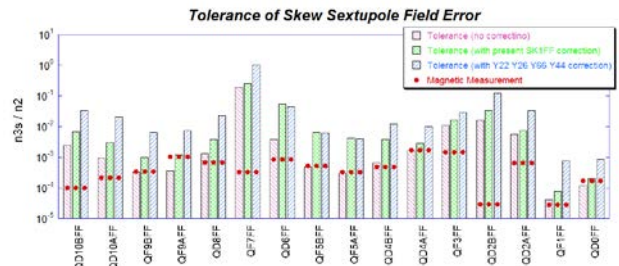


Figure 6: Skew-sextupole field error evaluated from magnetic field measurement (dots) and tolerance without correction (red), tolerance with correction using one skew-sextupole corrector (green) and tolerance with correction using four skew-sextupole correctors (green), for each quadrupole magnet.

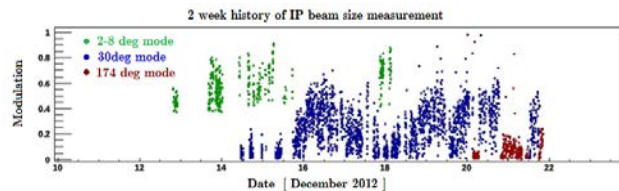


Figure 7: History of IP-BSM modulation in December 2012. Green: crossing angle 2-8 degree mode, blue: 30 degree mode and red: 174 degree mode.

2012 年 12 月の運転で仮想衝突点でのビームサイズは、ビーム強度に強く依存していることがわかった。現在まで、仮想衝突点で微小ビームサイズ (IP-BSM 交差角 174 度でのモジュレーション) の観測は、バンチ辺り 0.1~0.2 nC 程度の低電荷の場合に限られている。このビーム強度依存性は、ベータ関数の大きなところでの Wakefield が原因であると考えられ

ている。今までのところはっきりした結果は得られていないが、強い wakefield 源となり得るものをビームラインからできるだけ取り除き、さらに wakefield 源を可動台上に載せ位置の変化による軌道変化やビームサイズへの影響を測定するなど様々な研究が行われている。

また、2012年12月の運転では4台のスキュー六極電磁石を使って仮想衝突点でのビームサイズの補正を行った。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7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か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した。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年の実験では、ビームサイズを絞るにあたり、強いスキュー六極磁場の補正が必要だった。この年の運転終了後、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キ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キュー六極磁場があると考えると、実験結果とシミュレーションがよい一致を示した。そこで、六極電磁石のコイルを分解し、磁極1つ1つに巻かれているコイルのアドミッタンスを測定することで、電磁石のコイルの短絡の有無を調べた。その結果、1台の六極電磁石の磁極の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。

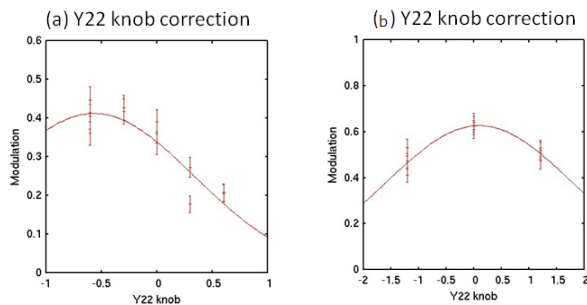


Figure 8: Examples of tuning using skew-sextupole correctors in (a) December 2012 and (b) March 2013. Maximum modulation is observed with strong correction in (a), but with almost zero correction in (b).

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、スキュー六極電磁石を使った補正を行わずに、常に交差角 174 度モードでビームサイズ測定ができる程度(90nm 以下)までビームを絞ることができるようになった。図8に、この交換前(2012年12月)と交換後(2013年3月)のスキュー六極電磁石を使った調整の様子を示す。交換以前は補正の強いところで、交換後

では補正がほぼゼロで IP-BSM のモジュレーションが最大になっており、六極磁石の磁場の誤差を減少させることができたことを示している。

これまで IP-BSM 交差角 174 度では最大で約 30% のモジュレーションが観測されている。図9に最大モジュレーションが観測された2013年3月のビームサイズの分布(IP-BSM の系統誤差を無視してモジュレーションから計算したもの)を示す。中心値は約 65nm である。

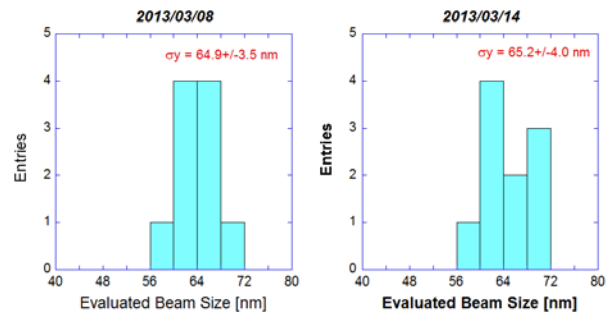


Figure 9: Distributions of vertical beam size, evaluated from modulations of IP-BSM 174 degree mode (assuming no systematic error of the monitor) in 2013, on (left) March 8 and (right) March 14.

4. まとめ

ATF において、ダンピングリングから取り出される超低エミッタンス電子ビームを収束させる実験を行い、これまでに 65 nm 程度の微小なビームサイズを確認することができた。この実験では ILC の最終収束系の設計で採用されているのと同じ Local Chromaticity Correction 方式を用いており、この方式の有効性を実証したことになる。ただし、ビームのエミッタンスと光学系の設計から期待される 37 nm のビームサイズの確認には至っておらず、又、焦点でのビームサイズがバンチ当たりの電荷に強く依存するという問題がある。今後もこれらの問題を解明し、さらに小さなビームサイズの確認のための研究を続ける必要がある。

参考文献

- [1] International Linear Collider, <http://www.linearcollider.org>
- [2] ATF Collaboration, Phys. Rev. Lett., 88, 194801 (2002).
- [3] V. Balakin et al., Phys. Rev. Lett., 74 2479 (1995).
- [4] P.Raimondi and A.Seryi, Phys. Rev. Lett. 86, 3779 (2001).
- [5] T. Shintake, Nucl. Instru. Meth., A311, 455 (1992).
- [6] T. Suehara, Doctor Thesis, University of Tokyo (2008).
- [7] 奥木敏行、「最終収束系の設計」OHO'06 13 (2006).
- [8] 奥木敏行、第9回加速器学会年会、950 (2012)