

BEAM FOCUSING AT ATF2 BEAMLINE

Toshiyuki Okugi ^{#,A)} and ATF international collaboration

^{A)} KEK, Accelerator Laboratory

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The ATF2 is a test beam line for the final focus system of ILC. The beam operation of ATF2 beam line was started in 2009 February. In 2012 spring beam operation, we corrected not only linear optics, but also sextupole field errors. After the correction, measured 55% of the modulation for IP-BSM 30 degree mode. Furthermore, we found the large skew sextupole error is on the beamline. Therefore, we will put 4 skew sextupole correctors to correct the field error.

ATF2 ビームラインにおけるビーム収束

1. はじめに

ILC では高いルミノシティを実現するために、衝突点で数ナノメートルまでビームを絞る必要がある。衝突点において急激にビームサイズを絞るため、このようなビームラインでは色収差が大きくなる。更に、色収差を補正するために6極電磁石を使用することになるが、この6極電磁石による幾何学収差の補正も最終収束系においては重要になる。ILCの最終収束系では、Local Chromaticity Correction という手法を用いた色収差補正をおこなっている[1]。この Local Chromaticity Correction を使うことにより、従来の色収差補正と比べ、ビームラインの長さが短くなるだけでなく、広いエネルギーアクセプタンスやビームテールを少なくすることが出来る。しかし、その反面、同じ電磁石を使って、水平方向、垂直方向双方の色収差の補正をおこなうため、ビームサイズの補正方法が複雑になる。KEKのATFは、ILCの最終収束系の試験加速器として、ATF2 ビームラインをつくり、現在運転をおこなっている。ATF2 ビームラインは、ILCの最終収束系と、同じ思想、同じ電磁石の配置、同程度の色収差になるように設計されている[2]。本発表では、ATF2 ビームラインにおけるビーム収束試験の結果、今後の方策について発表する。

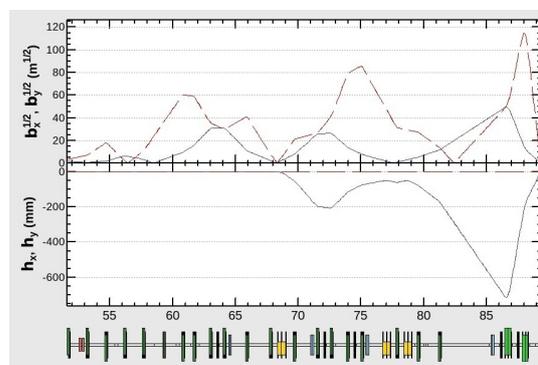


図1： ATF2 ビームラインのビーム光学系

Date	- 2/17	2/20 - 2/24	3/5 -
Energy	1.3GeV	1.3GeV	1.3GeV
ϵ_x / ϵ_y	2nm / 12pm	2nm / 12pm	2nm / 12pm
$\gamma\epsilon_x / \gamma\epsilon_y$	5e-6m / 3e-8	5e-6m / 3e-8	5e-6m / 3e-8
β_x^* / β_y^*	40mm / 1.0mm	40mm / 0.3mm	40mm / 0.1mm
σ_x^* / σ_y^*	8.9 μ m / 100nm	8.9 μ m / 60nm	8.9 μ m / 35nm

表1： ATF2の仮想衝突点のパラメータ

2. ATF2 ビームライン

ATF2 ビームラインのビーム光学系を図1に示す。また、2012年春の運転におけるATF2 ビームラインの仮想焦点における線形オプティクスから期待されるビームのパラメータを表1に示す。

ATF2の仮想焦点にはIP-BSMと呼ばれるレーザー干渉計を利用したビームサイズモニターが置かれている。仮想焦点でのビームサイズが小さくなると、IP-BSMで測定される信号に大きなモジュレーションが出来る。このモジュレーションの大きさからビームサイズを測定することができる[3]。

[#] toshiyuki.okugi@kek.jp

3. 線形オプティクスの補正

ATF2のビームラインには色収差、幾何学収差の補正のために5個の六極電磁石が置かれている。この六極電磁石を利用して、数々の仮想焦点でのビームサイズ補正をおこなうことができる。

最初に六極電磁石を使った線形オプティクスの補正について説明する。六極電磁石の位置を水平方向に動かすと、四極電磁石磁場と水平方向 dispersion が生じる。ビームライン上の5個の六極電磁石では、それぞれ違った四極電磁石磁場、dispersion が出来るので、それらの仮想焦点での影響を対角化し、水平方向のビームウエスト位置を動かす knob (AX knob)、垂直方向のビームウエストの位置を動かす knob (AY knob)、仮想焦点での水平方向 dispersion を動かす knob (EX knob)、仮想焦点で

の水平方向 dispersion の傾きを動かす knob (EPX knob)を作ることが出来る。

同様に、六極電磁石の位置を垂直方向に動かすと、Skew 四極電磁石磁場と垂直方向 dispersion が生じる。それらの仮想焦点での影響を対角化して、仮想焦点で垂直方向 dispersion を動かす knob (EY knob)、仮想焦点で垂直方向 dispersion の傾きを動かす knob (EPY knob)、そして、仮想焦点における垂直方向の位置と水平方向の角度の相関を操作する knob (<x'y> knob)を作ることが出来る。ATF では、これらのうち AY knob、EY knob、<x'y> knob を使って、仮想焦点におけるビームサイズ調整をおこなっている。

また、六極電磁石の位置は、仮想焦点における水平、垂直方向の位置の相関に感度が無いので、仮想焦点でのビームの傾きの補正は、カップリング補正のために取り出しラインに置かれている Skew 四極を使って補正することになる。Skew 四極を使った仮想焦点でのビームの傾きの補正結果を図 2 に示す。

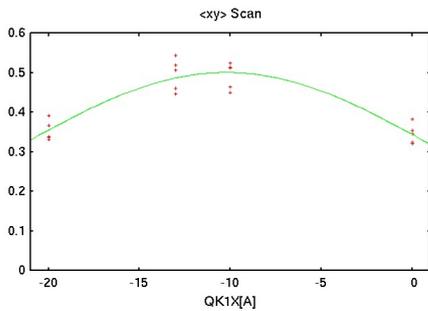


図 2 : Skew 四極を使ったビームの傾きの補正結果。

4. 六極電磁石磁場の補正

ビームライン上には多くの四極電磁石があり、その磁場は理想的なものではなく、高次成分の誤差磁場を生じる。六極電磁石の強さを変えることで、これらのうちの六極電磁石成分の誤差磁場を補正することができる。六極電磁石を通過する粒子の位置、エネルギーが規定のものからずれると、仮想焦点での水平方向の位置は、

$$\Delta X_{ip} = \frac{R_{12}K_2}{2} \left(\Delta x^2 + 2\eta \Delta x \frac{\Delta p}{p} + \eta^2 \frac{\Delta p^2}{p^2} - \Delta y^2 \right)$$

だけずれることになる。つまり、 X_{22} 、 X_{26} 、 X_{66} 、 X_{44} と 4 種類の収差が生じることになる。また、仮想焦点での垂直方向の位置は、

$$\Delta Y_{ip} = R_{12}K_2 \left(\Delta x \Delta y + \eta \Delta y \frac{\Delta p}{p} \right)$$

だけずれることになる。つまり、 Y_{24} 、 Y_{46} と 2 種類の収差が生じることになる。しかし、前述のように水平、垂直方向を合わせると収差の種類は全部で 6 種類ある。一方、ビームライン上には六極電磁石は 5 個しかない。そこで、六極電磁石磁場が生み出す

収差のうち一番影響の少ない X_{44} を除いた X_{22} 、 X_{26} 、 X_{66} 、 Y_{24} 、 Y_{46} を対角化することで、仮想焦点における六極電磁石成分の誤差磁場の影響を補正する knob を作ることが出来る。仮想焦点での垂直方向ビームサイズの調整には、これら対角化した knob のうち、 Y_{24} 、 Y_{46} を用いることになる。 Y_{24} 、 Y_{46} を使うことによる効果を図 3 に示す。個々の四極電磁石の六極電磁石成分の誤差磁場に対する許容値が劇的に向上していることが分かると思う。

実際に Y_{24} 、 Y_{46} knob の強さを変えたときの IP-BSM でのモジュレーションの変化を図 4 に示す。緑はモデルで、青はフィットした結果である。六極電磁石に設置誤差があるとき、モデルと測定値の間で違いが出てしまうが、そのことを考慮して考えると、概ね期待した通りの働きをしている。

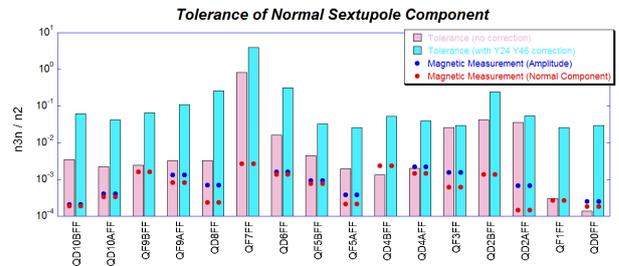
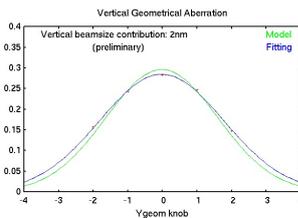


図 3 : Y_{24} 、 Y_{46} 補正前後での六極電磁石成分の誤差磁場の許容値。丸は磁場測定で測定した誤差磁場の強さ (赤は全振幅、青は Normal 成分のみの強さ)

(a) Y_{24} knob の効果



(b) Y_{46} knob の効果

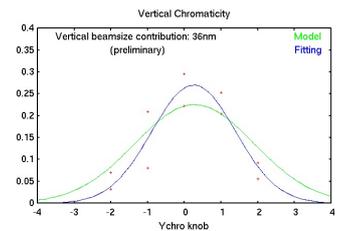


図 4 : 六極電磁石磁場の補正。

5. Skew 六極電磁石磁場の補正

ビームライン上の四極電磁石の六極電磁石成分の誤差磁場は Normal 成分の六極電磁石磁場だけでなく、Skew 六極電磁石成分の誤差磁場を生み出すこともある。この誤差磁場は六極電磁石の強さをかえるだけでは補正できない。そこで、ATF では、ビームライン上の最適と思われる位置に Skew 六極電磁石を置いている[4]。この Skew 六極電磁石を使うことによる影響を図 5 に示した。Skew 六極電磁石を置くことで、四極電磁石の Skew 六極電磁石成分の誤差磁場に対する許容値が向上する。図 5 から Skew 六極電磁石を使うことで、全ての四極電磁石

の誤差磁場の Skew 六極電磁石成分の誤差磁場は、許容値内に入るようになることがわかる。

それに対し Skew 六極電磁石の強さを変えたときの仮想焦点における IP-BSM のモジュレーションの変化に関する測定結果を図 6 に示す。

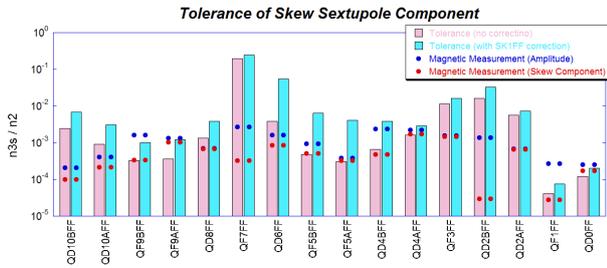


図 5 : skew 六極電磁石での補正前後での skew 六極電磁石成分の誤差磁場の許容値。丸は磁場測定結果 (赤は全振幅、青は skew 成分のみの強さ)

(a) 2012 年 2 月の測定

(b) 2012 年 6 月の測定

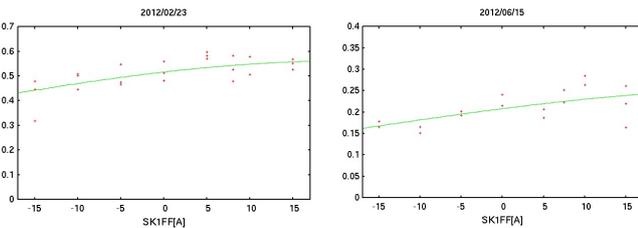


図 6 : Skew 六極電磁石の強さを変えたときの IP-BSM のモジュレーションの変化。

この測定は 2012 年 2 月と 6 月の 2 回おこなわれたが、どちらも磁場測定の結果から想定していた期待値(2A)から遥かに大きい約 15-20A で最適値を示した。この結果は、ATF2 ビームラインにおける電磁石の誤差磁場の測定結果が、実際のものとは違っている可能性を示唆する。現在の 1 個の Skew 六極電磁石を使った補正方法では、全ての電磁石に対して Skew 六極電磁石成分の誤差磁場は許容値内に入っているが、幾つかの電磁石では、磁場測定の測定値と許容値が非常に近い値になっている。そこで、Skew 六極電磁石の数を増やして、これらの許容値を更に高くすることを考える。Skew 六極電磁石を通過する粒子の位置、エネルギーが規定のものからずれると、仮想焦点での垂直方向の位置は、

$$\Delta y_{IP} = \frac{R_{34}K_{2S}}{2} (\Delta x^2 + 2\eta\Delta x \frac{\Delta p}{p} + \eta^2 \frac{\Delta p^2}{p^2} - \Delta y^2)$$

となり、実際は Y_{22} 、 Y_{26} 、 Y_{66} 、 Y_{44} と 4 種類の収差が生じることになる。今までの補正方法では、これら 4 種類の収差を補正することが出来る効果的な位置に、Skew 六極電磁石を 1 個おくことで収差の補正をおこなってきた。しかし、Skew 六極電磁石が 4 個あれば、この 4 種類の収差を効果的に補正する

ことが出来る。そこで、これまでの 1 個の Skew 六極電磁石を置いたときと、4 個の Skew 六極電磁石を使ったときの四極電磁石の Skew 六極電磁石磁場の許容値の違いを図 7 に示した。全ての 4 極電磁石での誤差磁場の許容値が向上していることが分かると思う。2012 年秋以降の運転では、Skew 六極電磁石の数を増やして、電磁石の誤差磁場の許容値を広げて運転をおこなう。

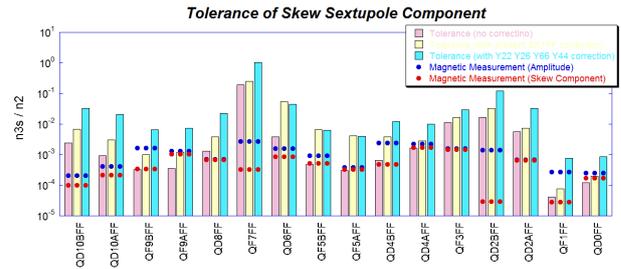


図 7 : Skew 六極電磁石成分の誤差磁場の許容値。赤棒が補正前、黄棒が 1 個、青棒が 4 個の Skew 六極電磁石を使った補正。

Date	2/13-2/17	2/20-2/24	3/5-3/9	6/11-
β_y^*	1.0mm	0.3mm	0.1mm	0.1mm
Mod (30deg.)	45%	55%	55%	35%
β_x^*	40mm	40mm	40mm	28mm
ϵ_x	2nm	2nm	2nm	3nm
σ_x^*	220 μ rad	220 μ rad	220 μ rad	330 μ rad
Mod (2-8deg.)	60-80%	60-80%	60-80%	40-60%

表 2 : 2012 年春の運転において、IP-BSM で測定されたモジュレーションと、ビームのパラメータ。

6. 2012 年春の運転でのビームサイズ

2012 年春のビーム運転では、上記のような線形オプティクス補正、六極電磁石磁場の補正等をおこない、ATF2 の仮想焦点におけるビームサイズ調整をおこなった。IP-BSM では、2-8 度の交差角モードと 30 度の交差角モードで、信号のモジュレーションを測定することが出来た。測定で得られた最大のモジュレーションを表 2 に纏めた。

3/15 の週では、IP-BSM の 30 度モードで最大 55% のモジュレーションが測定できたのに対して、6 月の運転では、同じ垂直方向のベータ関数であったにもかかわらず、最大で 35% までしかモジュレーションは上がらなかった。その理由の一つに、6 月の運転では水平方向のエミッタンスが大きく、水平方向のベータ関数が小さかったため、仮想衝突点におけるビーム拡がりが大きくなってしまったことが考えられる。それにより、六極電磁石磁場を含む非線形磁場の影響が大きくなったと考えられる。2012 年秋以降は Skew 六極電磁石を増やすことで、この効

果の影響は小さくできると期待している。

その他に考える要因は、IP-BSM に関する問題である。図 8 に理想的な IP-BSM の 30 度モード、8 度モード双方でのビームサイズとモジュレーションの関係を示した。表 2 に示したように、3/9 までの運転での 2-8 度モードでの最大のモジュレーションは 60-80%であった。この程度のモジュレーションでは 30 度モードで 10%以下のモジュレーションしか期待されないのだが、実際には最大 55%のモジュレーションが測定された。また、6/11 以降は 2-8 度モードでの最大のモジュレーションは 40-60%であったにもかかわらず、30 度モードで最大 35%のモジュレーションが測定された。これは IP-BSM で測定されたモジュレーションは、期待されている値よりも常に低い値を示していることを示唆する。

ここで、実験的確認は無いので現段階では仮説の域を出ないが、3/9 までの運転における、30 度モードでのモジュレーションは、最大でも 2-8 度モードでの最大値の 80%までしかいかなかったと考えると、仮想焦点でのビームは約 100nm まで絞れたと考えられる。また、6 月の運転でも、30 度モードでのモジュレーションの最大値は 2-8 度モードでの最大値の 60%までしかいかなかったと考えると、約 150nm まで絞れたと考えられる。2012 年 2-3 月の測定と 6 月の測定でビームサイズが違うのは、前述のように、仮想焦点における水平方向のビーム拡がりが違うため、非線形磁場の影響を受けたものと考えれば理解できる。しかし、現状では IP-BSM で測定されたモジュレーションからビームサイズを正確に求めることは難しいため、2012 年の夏に IP-BSM の改善をおこなう予定である。

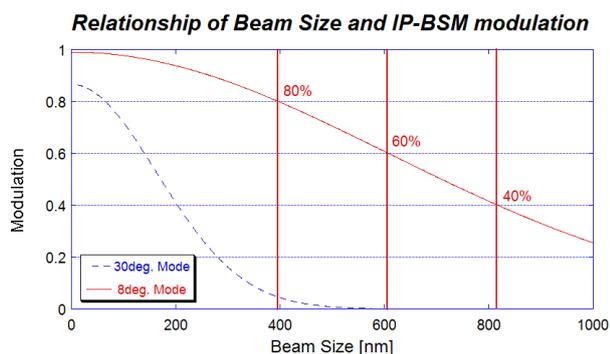


図 8 : IP-BSM が理想的な時のビームサイズとモジュレーションの関係 (青は 30 度モード、赤は 8 度モード)。

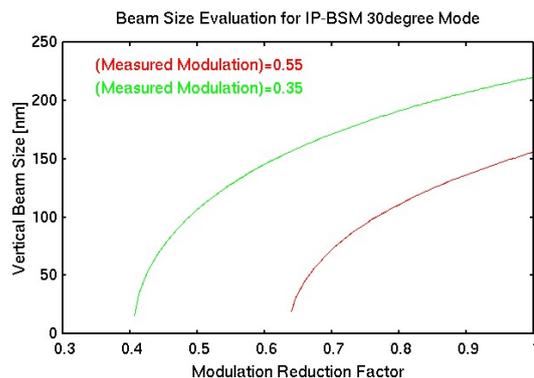


図 7 : IP-BSM の 30 度モードで測定できる最大のモジュレーションを仮定したときの仮想焦点でのビームサイズ (赤は 55%、緑は 35%)。

7. まとめ

ATF2 ビームラインでは、線形光学、六極電磁石磁場、Skew 六極電磁石磁場を補正する knob があり、それらは理想的にはたらいている。しかし、Skew 六極電磁石磁場の補正は、期待されている値よりも遥かに強い磁場をかけないと補正できない。このことは、実際のビームラインに存在する Skew 六極電磁石磁場は、磁場測定で求められた磁場よりも大きいことを示唆する。そこで、この Skew 六極電磁石磁場による影響を緩和するために、2012 年秋以降の運転では、合計 4 個の Skew 六極電磁石をビームラインに置くことを計画している。

また、2012 年春の運転では IP-BSM の 30 度モードで最大 55%のモジュレーションを測定できた。しかし、2-8 度モードの測定と比較すると、結果は大きく食い違っている。そこことから、現状では IP-BSM のモジュレーションからビームサイズを正確に推定することは難しいと思われる。そこで、2012 年の夏に IP-BSM の改善をおこなう予定である。

参考文献

- [1]奥木敏行「最終収束系の設計」OHO'06 13 (2006).
- [2]奥木敏行, 第 7 回加速器学会年会 WELH02 (2009).
- [3]Y.Kamiya *et al.*, Proceeding of IPAC'10, MOPE022 (2010).
- [4]E. Lacombe, ATF2 weekly meeting 11 May 2011, <http://ilcagenda.linearcollider.org/conferenceDisplay.py?confId=5141>