

## 話 題

## KEK-ATF における極小ビームサイズ達成

久保 浄\*

## Achievement of Extremely Small Beam Size at KEK-ATF

Kiyoshi KUBO\*

## Abstract

For linear colliders, extremely small and stable beam is required for high luminosity. At ILC (International Linear Collider), designed vertical beam size and required vertical position stability at the interaction point is nanometer level. For confirming feasibility of such small and stable beam, a prototype of the final focus system of ILC was constructed as an extension of ATF (Accelerator Test Facility) at KEK. This uses small emittance beams produced in and extracted from the damping ring of ATF. The project of final focus system study is called ATF2. One of the most important issues in squeezing beam is chromatic aberration, aberration caused by energy spread of beam. We have demonstrated the local chromatic correction method, which will be used for ILC, and observed the vertical beam size about 44 nm with low intensity beam.

## 1. はじめに

衝突型加速器（コライダー）において重心系のエネルギーとともに重要なことは、ビームとビームの衝突によってできるだけ多くの興味のある反応を起こさせること、すなわち高いルミノシティを実現することである。リニアコライダーでは、円形コライダーと異なり、ビームの各粒子は一回しか相手のビームとの衝突機会がない。従って、ビームを非常に細くし、密度を高くしてルミノシティを確保することになる。高密度のバンチ同士が衝突すれば、バンチ内の粒子は相手の作る電磁場によって大きな力を受け、エネルギーを失い角度変化を受ける。このビーム・ビーム力は、衝突の際の粒子密度に制限を与えるが、ビームの断面形状を扁平にすることによって影響を小さくできるため、垂直方向のサイズをできるだけ小さくする。さらに、円形コライダーのようにビームが安定に周回するよう衝突後のビームの質に気を配る必要はないので、粒子密度をより高くすることが許される。ILC (International Linear Collider) の衝突点での垂直方向の設計ビームサイズは

6 nm 程度である（水平方向は 500 nm 程度）<sup>1)</sup>。

このような極端に小さなビームを作ることはもちろん簡単ではなく、また、小さなビーム同士の位置を正確に合わせて衝突させることも必要である。ATF では、ビームを小さく絞り、軌道を安定させるための技術開発を行い、ILC で要求されるようなビームが実現可能であることを確かめる実証実験を行っている。これは、以前からあった ATF ビームラインを拡張して行われており ATF2 と呼ばれている。ATF2 の大きな特徴は、その設計段階から国際協力のもとに進められてきたことであり、アジア、ヨーロッパ、アメリカの 10 ヶ国以上から多数の大学・研究所が参加して（人・物・金を出して）行われている。また、大学院生、ポスドクなど特に若い研究者達の訓練の場としても重要な役割を果たしている。

ビームを小さく絞るために重要な低エミッタンスの電子ビームの生成は、既に ATF のダンピングリングで実証されている。そのエミッタンスは世界最小クラスの値であり（リング内のみでなくビームを取り出して利用する加速器としては世界最小の規格化エミッタンスである）、ILC で要求

\* 高エネルギー加速器研究機構、総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK) and Department of Accelerator Science, Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)  
(E-mail: kiyoshi.kubo@kek.jp)

されるエミッタンスと同等である<sup>2)</sup>。

低エミッタンスではあってもゼロではなく、エネルギーの拡がりもある。これがビームを小さく絞ることが簡単ではない原因である。すなわち、ビームを小さく絞るためには、エミッタンスによる収差 (geometrical aberration)、エネルギー拡がりによる収差 (chromatic aberration) の小さい収束システムを作る必要がある。ILC では後述べるような、“local chromatic correction” という補正方法を採用する。

ATF2 では以下の2つの目標を設定している。

- Goal-1: ILC と同じ local chromatic correction 方式による極小ビームサイズ生成の実証 (設計値 37 nm)
- Goal-2: 軌道のフィードバック補正による安定なビームの実現 (ナノメートルレベル)

Goal-1 については、2012年12月までに約70 nm のビームを確認して ILC の最終収束方法を実証することができた<sup>2,3)</sup>。さらに改良を進めることにより2014年夏までには約44 nm という設計値に近いビームサイズを確認することができた<sup>4,5)</sup>。ただし、バンチ当たりの電荷量を大きくすると測定されるビームサイズも大きくなってしまいうという、ATF2 特有と思われる問題がある。現在これについての詳しい検討が続いているが、ILC と比べて ATF2 のビームエネルギーが低くバンチ長が長いこと、横方向のウェーク場の影響が大きいことが原因と考えられる。

Goal-2 については、バンチ間隔 150 nm 程度のビームパルス内でのバンチ毎のフィードバックの実証試験が成功している。現在は、ナノメートルレベルの分解能をめざすビーム位置モニター (IPBPM) を最終収束点付近に設置し、分解能のテストを行っており、またこれを使ったナノメートルレベルのビーム安定化のための試験が続いている。

以下では、主に Goal-1 に関する研究のこれまでの結果と今後について述べる。

## 2. 最終収束での収差とその補正

最終収束系の設計上重要なのが色収差 (chromatic aberration) である。色収差とは、ビーム内の粒子のエネルギーの違いによる焦点距離のずれであり、同じ強さの磁場から受ける角度変化

がエネルギーによって異なることから発生する。これを表す量 “chromaticity” を、 $x(y)$  方向について以下のように定義することができる。

$$\xi_{x(y)} \equiv -\frac{d\phi_{x(y)}}{d\delta} \quad (1)$$

$\phi_{x(y)}$  はベータatron振動の位相、 $\delta (= \Delta E / E)$  は相対的なエネルギーのずれである (円形加速器でのクロマチシティの定義と係数  $-2\pi$  だけ異なっている)。4 極磁場のみによる (6 極磁場による補正がされていない) クロマチシティが “natural chromaticity” である。

垂直方向の設計ビームサイズは水平方向よりもはるかに小さいので、垂直方向がより問題となる。垂直方向の natural chromaticity の大部分は最後の4 極磁石によって発生し、その量は  $L^*$  を磁石から焦点までの距離、 $\beta_y^*$  を焦点でのベータ関数として近似的に、

$$\xi_y \approx L^* / \beta_y^* \quad (2)$$

である。また、chromaticity とエネルギーの拡がりによる焦点でビームサイズの増大の影響は近似的に

$$\sigma_y(\sigma_\delta) \sim \sigma_y(0) \sqrt{1 + (\xi_y \sigma_\delta)^2} \quad (3)$$

のように表すことができる ( $\sigma_\delta$  はエネルギー拡がり、 $\sigma_y(\sigma_\delta)$  はそれに依存するビームサイズ)。ILC では  $\sigma_\delta \sim 10^{-3}$ 、natural chromaticity  $\xi \sim 10^4$  程度であり、色収差の補正は必須である。

chromaticity は、円形加速器と同様に、6 極磁石を水平方向の dispersion のある場所に置くことによって補正することができる。6 極磁石の磁場は水平方向の位置に比例した収束力として働き、dispersion は粒子の位置がそのエネルギーに比例してずれるということであるから、結果として粒子のエネルギーに比例した収束力を与えることができる。

しかし、6 極磁石の非線形磁場のため新たな収差が発生する。エネルギーのずれに依存しないビーム位置の拡がり (ビームサイズ) のために生じる geometrical aberration や、高次の dispersion

であり、これも考慮に入れて補正しなくてはならない。

色収差の補正方法には“global chromatic correction”と“local chromatic correction”の2つの方法がある。

“global chromatic correction”では、**図1**に示すように、chromaticityのみを発生させ他の収差を生じないような領域をビームラインの上流に挿入する。“global”と呼ぶのは、chromaticityの主な発生源である最終収束4極磁石と、その補正のための領域が離れているからである。水平・垂直両方向の補正のため2つの領域が必要である。それぞれの領域には等しい強さの6極磁石2つが、ビーム光学的に対称な位置に置かれる。この対称性によって、重要な高次の収差をそれぞれの領域内で自動的に相殺させることができる。

“local chromatic correction”では、**図2**に示すように、6極磁石を最終収束4極磁石のすぐ隣に置き chromaticity をその場で補正してしまう<sup>6)</sup>。一方この6極磁石によって発生する geometrical aberration 等の余分の収差は、上流に2台（以上）の6極磁石を置いて補正する。この際、他の収差が大きくなるように光学パラメータを調整する必要がある。

“global chromatic correction”と“local chromatic correction”を比較すると、“local”のほうが必要なビームラインが短いという利点がある。energy band width が広い、ビームハローが小さいという利点も報告されている<sup>6)</sup>。これらの利点のために、ILCではlocal chromatic correctionの方法を採用する。

しかし、local correctionの光学系にはglobal correctionのような簡単な対称性がないために設計段階での最適化も複雑なものになる<sup>7,8)</sup>。さらに、水平・垂直方向の補正領域が分離していないことなどビーム調整が複雑で難しくなる要因がある。

リニアコライダーのためのビーム収束はglobal correctionの方法により1994年にSLACのFFTB (Final Focus Test Beam)での実験で実証されている<sup>9)</sup>。しかし、上で述べたようにlocal correctionではさらに難しさが予測されており、これがATF2で実証実験をする意義である。

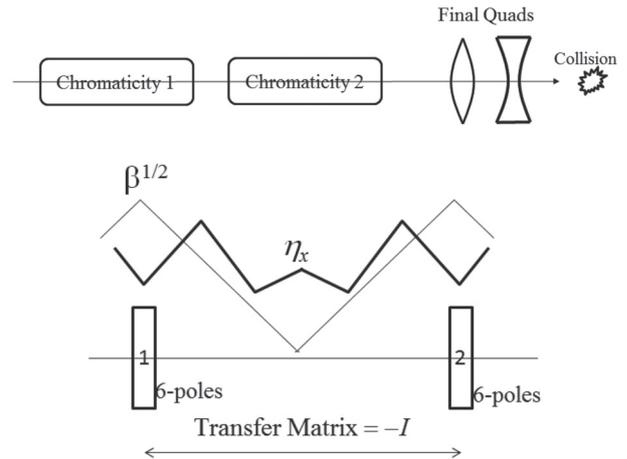


図1 Global chromatic correction の概念図

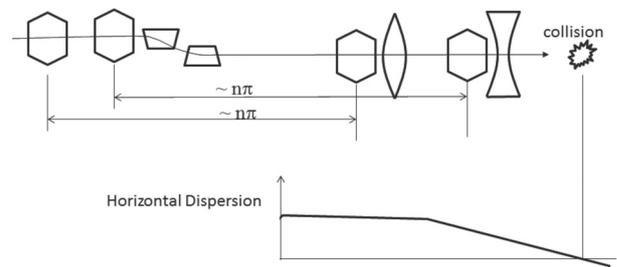


図2 Local chromatic correction の概念図

### 3. ATF2のビームライン

ATFの加速器は、光陰極-RF電子銃、1.3 GeV S-band線形加速器、ダンピングリング、取出しビームライン、最終収束システムからなっている。

ATFのダンピングリングでは低エミッタンスの電子ビームが生成される。最近の運転では垂直方向のエミッタンスの測定値は約8 pm（規格化エミッタンス20 nm）である。この規格化エミッタンスは、ILCのダンピングリングで要求される値と同等である。最終収束の試験では、この低エミッタンスビームを取り出して使用する。ATF2の設計では、12 pmを仮定しており、ビーム取り出しと輸送に伴うある程度のエミッタンス増加が考慮されている。

ILCとATF2の最終収束系の重要なパラメータの比較を表1に示す。ビームエネルギーは全く異なるが、エネルギーの相対的な広がりがほぼ同じであり、chromatic correctionの実証のため、ATF2のnatural chromaticityはILCと同程度になるように設計されている。

図3に ILC と ATF2 の最終収束ビームラインに沿った光学パラメータ ( $\beta$  関数と dispersion 関数) を示すが, この図からもわかるように, ビームエネルギーの違いのために長さは大きく異なるが, ATF2 はビーム光学的に ILC 最終収束システムとほとんど同じものであり, ビームライン上での磁石の構成がほぼ同じ (名前も同じ) になっている. また, 磁石の設置誤差や磁場誤差の許容度も同じ程度である<sup>10)</sup>.

表1 ILC 最終収束系と ATF2 のパラメータ

Parameter	ILC	ATF2
Beam Energy [GeV]	250	1.3
Energy Spread (e <sup>+</sup> /e <sup>-</sup> ) [%]	0.07/0.12	~0.07
Final Q - IP distance (L*) (SiD/ILD detector) [m]	3.5/4.5	1.0
Vertical beta function at IP ( $\sigma_y^*$ ) [mm]	0.48	0.1
Vertical emittance [pm]	0.07	12
Vertical beam size at IP ( $\sigma_y^*$ ) [nm]	5.9	37
L*/ $\beta_y^*$ (SiD/ILD detector)	7300/9400	10000

IP: Interaction Point (Focal Point)

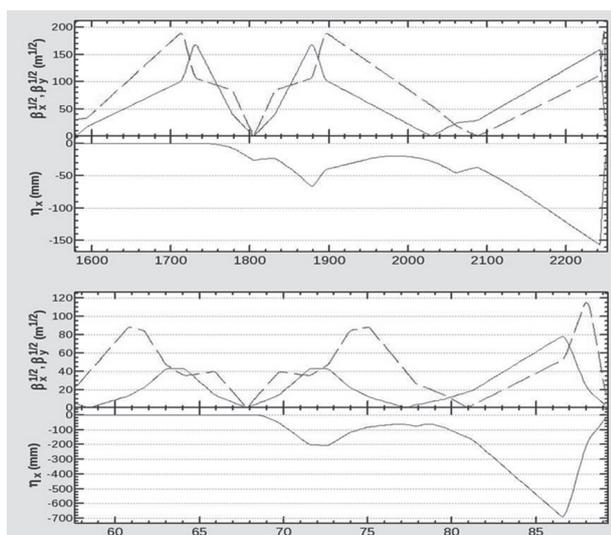


図3 ILC (上), ATF2 (下) の最終収束ラインの光学パラメータ ( $\beta$  関数と水平分散関数). 横軸は距離 (単位 m)

#### 4. 最終収束点のビームサイズモニター

ATF2 の最終収束点での垂直方向の設計ビームサイズは 37 nm であり, このような小さなビームサイズを測定する技術を開発することはこの計画の最も重要な課題の一つである. ATF2 では, FFTB で使用されたビームサイズモニターを再構築・改造して使用している. これは, 干渉させたレーザー光と電子ビームの散乱 (逆 Compton 散乱) を用いるもので, “IPBSM” (Interaction Point Beam Size Monitor), あるいは発明者の名前から “Shintake Monitor” と呼ばれている<sup>11)</sup>. 図4に IPBSM の概念図を示す<sup>12)</sup>. レーザー光 (波長  $\lambda$ ) がハーフミラーで2つの光路に分けられた後, ある角度 ( $\theta$ ) をもって交差する. 2つのレーザービームの重なった部分では光強度の干渉縞が形成され, そのコントラストは  $|\cos \theta|$ , 間隔は

$$d = \lambda / (2 \sin(\theta / 2)) \quad (4)$$

となる. ここに電子ビームの焦点を合わせて衝突させ, 発生する  $\gamma$  線を観測する. 干渉縞の位置 (以下では「位相」と表現する) は, 一方の光路の長さを変化させることによって調整できるようになっている.

図5のように, ビームサイズが干渉縞の間隔に比べて小さい場合には  $\gamma$  線の強度は位相に強く依存するが, ビームサイズが大きい場合には  $\gamma$  線の強度は位相を変えてもあまり変化しない. ビームサイズを求めるため, 干渉縞の位相を走査し, 各位相 ( $\phi$ ) での  $\gamma$  線の強度 ( $G(\phi)$ ) を記録する.

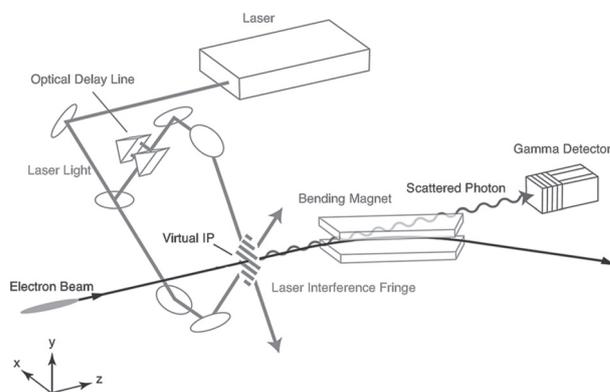


図4 最終収束点のビームサイズモニターの概念図<sup>12)</sup>

これを,  $G_0$ ,  $M$ ,  $\phi_0$  を free parameter として,

$$G(\phi) = G_0(1 + M\cos(\phi + \phi_0)) \quad (5)$$

という関数でフィットする. ここで,  $M$  は Modulation あるいは Visibility である. これを光強度のコントラストで割った  $M/|\cos\theta|$  は, 次式のように, 干渉縞に垂直な方向の電子ビームの密度分布 ( $\rho(y)$ ) の波数  $2\pi/d$  に対応したフーリエ成分の大きさになる.

$$M/|\cos\theta| = \frac{\left| \int \rho(y) e^{i2\pi y/d} dy \right|}{\int \rho(y) dy} \quad (6a)$$

密度分布が正規分布 (幅  $\sigma_y$ ) の場合には,

$$M/|\cos\theta| = \exp(-2\pi^2 \sigma_y^2 / d^2) \quad (6b)$$

となる. 実際には種々の誤差により Modulation が減少する可能性があり, その係数 ( $C_M < 1$ ) を考慮して, ビームサイズを表す式は,

$$\sigma_y = \frac{d}{2\pi} \sqrt{2 \ln(C_M |\cos\theta| / M)} \quad (7)$$

である. ただし,  $C_M$  を正確に評価することができていないため, 以下では  $C_M = 1$  として計算する. 従って, 得られた値はビームサイズの上限值である.

このモニターでは, 干渉縞の間隔に比べて極端に大きいビームサイズや極端に小さなビームサイズに対しては解像度がない. そこで ATF2 ではレーザー光の波長を FFTB で使用されたものの  $1/2$  にしてより小さなサイズを測定できるようにしている. また, レーザーの交差角の設定に3つ

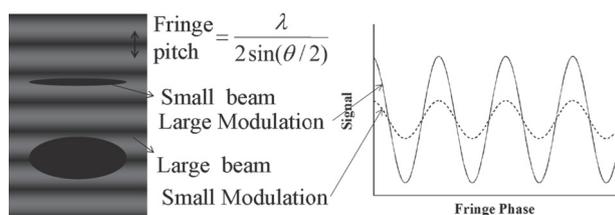


図5 ビームサイズ測定の実理

のモード (174 度, 30 度, 2-8 度) があり (2-8 度モードでは, 交差角を 2 度から 8 度の間の任意の値に設定できる) 干渉縞の間隔を変えられる (式 4). この結果, 約  $6 \mu\text{m}$  から  $25 \text{ nm}$  程度までのビームサイズを測定することができる<sup>13)</sup>. ビーム調整の初期の段階では小交差角モードを使用し, 調整の進行とともに大交差角モードに切り替えていく.

最終収束点には, 炭素繊維を使用したワイヤースキャナーによるビームサイズモニターもあり, 数ミクロン以上のサイズの測定に使用される.

## 5. ビーム調整の方法

ダンピングリングから取り出されたビームに対して, まず最終収束ラインの上流で dispersion, エミッタンス, Twiss パラメータ, x-y カップリングなどが測定され, 必要な補正が行われる.

垂直方向の dispersion 関数は, 水平方向の dispersion のある場所の 2 台 1 組の skew 4 極磁石と, 軌道の調整によって補正される. エミッタンスと Twiss パラメータは 4 台の Optical Transition Radiation を利用したビームサイズモニター (OTR monitor) によって測定される. この測定に基づいてビーム光学パラメータの補正が 4 極磁石の強さを調整することで行われる. x-y カップリングも OTR monitor の測定をしながら行われ, 合計 6 台ある skew 4 極磁石の強さを調整する.

最終収束ビームラインの全ての 4 極磁石と 6 極磁石は遠隔操作可能な 3 自由度 (水平方向・垂直方向・ビーム軸の周りの回転) の可動台の上に置かれている. ビームの軌道はいくつかの補正用 2 極磁石の強さと 4 極磁石の位置の調整によって行われる.

ビーム調整の最終段階が, 焦点でのビームサイズの調整である. そのためにいくつかの「調整ノブ」が用意されている<sup>14)</sup>. 表 2 に示すように, 調整ノブには, ビーム光学系の線形成分 (焦点の位置, dispersion, x-y カップリング) を調整するもの (Linear knob) と 2 次の成分 (chromaticity, 2 次の dispersion, 高次の geometric aberration 等) を調整するもの (Non-linear knob) とがある.

Linear knob では 6 極磁石の横方向の位置を変え, non-linear knob は 6 極磁石・スキュー 6 極

磁石の磁場の強さを変える。

実際のビーム調整では各調整 knob の大きさを変えながら垂直方向のビームサイズ ( $\sigma_y$ ) を測定する。この時、

$$\sigma_y^2 = \sigma_{\min}^2 + (c_k a_k)^2 \quad (8)$$

のような依存関係がある<sup>14)</sup> ( $a_k$  は knob の強さ,  $\sigma_{\min}$  はこの knob を変えて得られる最小ビームサイズ,  $c_k$  は各 knob 毎の定数)。式 (6b) から、IPBSM の modulation は

$$M = M_{\max} \exp(-2\pi^2 c_k^2 a_k^2 / d^2) \quad (9)$$

のように調整 knob の強さに対する Gauss 型関数になる。実際のビーム調整の例を図 6 に示す<sup>4)</sup>。各 knob は、測定の後、図のようなフィッティングで得られた頂点の値に設定され、次の knob の調整へと進む。

表 2 最終収束点垂直ビームサイズの調整ノブ

	Changing parameters	Corrected coupling
Linear knobs	6-poles horizontal move	$yy'$ (focal position)
	6-poles vertical moves	$yE$ (dispersion) $x'y$ (x-y coupling)
Non-linear knobs	6-poles Strength	$x'yy'$
		$yy'E$ (chromaticity)
	Skew 6-poles Strength	$Xxy$
		$xyE$
	$yEE$ (2 <sup>nd</sup> order dispersion)	
	$yy'y'$	

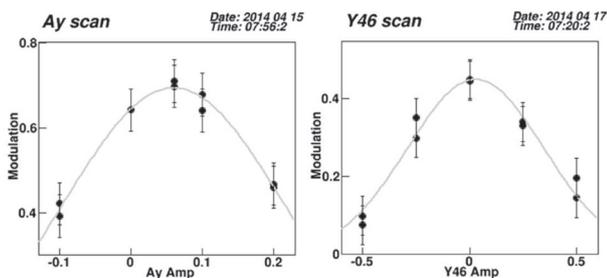


図 6 調整 knob を用いた焦点でのビームサイズ調整の例<sup>4)</sup>

## 6. 極小ビームサイズ達成

図 7 は確認された最小ビームサイズの推移を示している<sup>4)</sup>。IPBSM の改良とともに、以下に述べるようなビーム調整上の進展があった。

4 極磁石の磁場の高次成分への対策が重要である。特に、最終収束点の前の最後の水平方向の収束磁石 (QF1) の磁場精度に問題があることがわかった。水平方向のビームサイズはこの磁石の場所で最大で、x-y カップリングにより焦点での垂直ビームサイズが増大していた。そこで、2012 年 11 月にこの磁石を口径が大きく、高次の磁場成分が小さいものに置き換えた。また、最終収束点での水平方向の  $\beta$  関数を元の設計値の 10 倍にすることで他の磁石も含めた誤差による x-y カップリングが収束点での垂直ビームサイズに効かないようにして実験を行っている<sup>15)</sup>。

また、ビームサイズを最小にするためにかなり強いスキュー 6 極磁場による補正が必要であることがわかったが、これは、どこかに高次成分の磁場の誤差があることを示していた。実験データの解析からその場所を推測して調査した結果、1 台の 6 極磁石のコイルの一部の短絡が発見された<sup>3)</sup>。2013 年 1 月にこの磁石を弱い磁場設定で使用するよう他のものと場所を入れ替えた結果、強いスキュー 6 極磁場による補正が不要になった。さらに 2014 年 4 月からは、この磁石を使用しない (磁場ゼロ) ようにビーム光学系の設定を変えて実験を行っている。

ビーム軌道を安定化させたことも重要であった。ダンピングリングから取り出した後のビーム軌道には比較的ゆっくりした変動があるが、これを補正するための軌道フィードバックを改良してきたことも極小ビームサイズ達成に寄与したと思

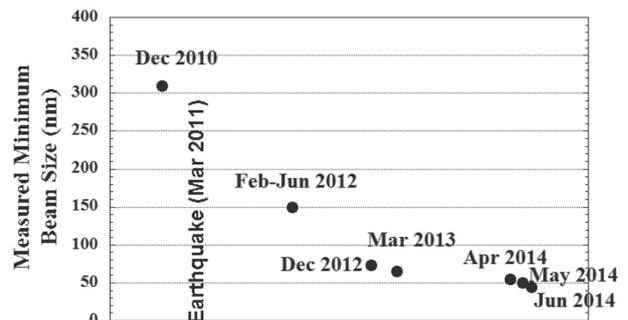


図 7 確認された最小ビームサイズの推移<sup>4)</sup>

われる。

図8に2014年6月に得られた10回連続のビームサイズ測定の結果を示す<sup>4)</sup>。  $C_M=1$  と仮定した場合のビームサイズの平均は44 nm, 標準偏差は3 nmである。10回の測定には約30分を要するが, この間ビームの調整は行っていない。ビ-

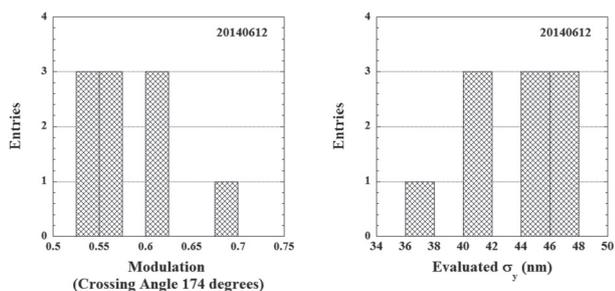


図8 10回連続のビームサイズ測定の結果. Modulation (左) と,  $C_M=1$  と仮定して計算したビームサイズ (右)<sup>4)</sup>

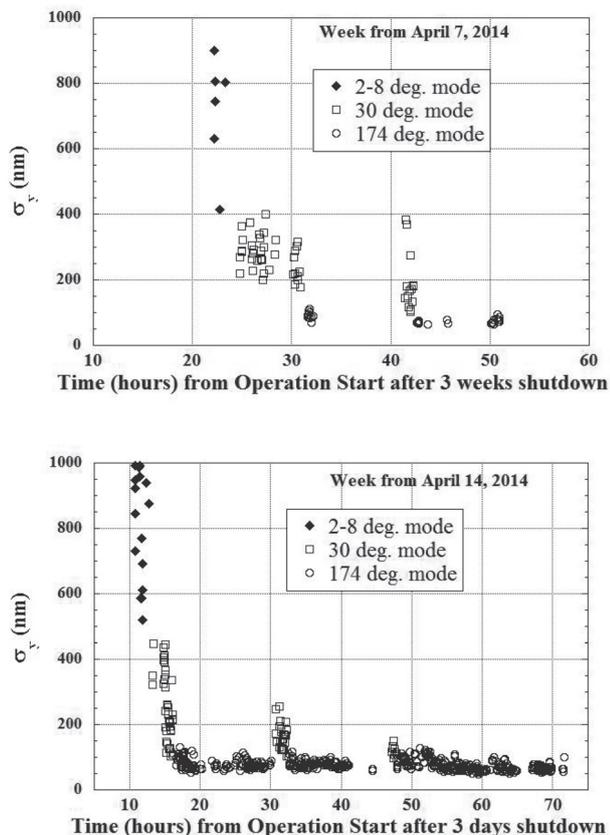


図9 運転再開後のビームサイズ測定結果の履歴の例<sup>4)</sup>. 各点が1回の測定を表す. 上は3週間の運転休止後, 下は3日間の休止後.

ムとモニターを含むシステムのこの程度の時間スケールでの安定性を示している。

6極磁場による色収差の補正を行わない場合のビームサイズの計算値は約450 nmであり, 得られた結果は用いられた“local chromatic correction”の方法の有効性が実証されたことを意味している。

これまでの重要な成果の一つは, 極小ビームサイズを繰り返す, 比較的短時間の調整で達成できるようになったことである。図9に運転休止からの再開後のビームサイズ測定の推移を示す<sup>4)</sup>。上は3週間の運転休止後, 下は3日間の休止後の例である。各点は1回のIPBSMの測定を表している。

## 7. 今後の研究

### 7.1 より小さなビームサイズの確認

これまでに確認できたビームサイズは約44 nmであり, 設計ビームサイズ37 nmよりもやや大きい。これにはいくつかの要因が考えられる。一つはIPBSMの誤差, 例えば使用しているレーザー光の変形や変動の影響などがある<sup>16, 17)</sup>。ダンピングリングからの取り出しから最終収束ラインに輸送される間のエミッタンス増大, ビーム軌道の変動のため見かけのビームサイズが大きくなる効果なども無視できない可能性がある。これらは調査が続いている状況で結論は出ていないが, 最終収束点付近に設置されたIPBPMで精度の高い測定が可能になれば, ビーム軌道の変動の影響は明らかになるはずである。

### 7.2 ビーム強度依存

以上のように, 目標値に近いビームサイズを確認できているが, ビーム強度を上げるとビームサイズが大きくなってしまいう問題がある。これは, ダンピングリングから取り出した後のビームラインのどこかでのウェーク場によるものと思われる。ILCと比べてATF2のビームはエネルギーが低くバンチ長が長いために, 横方向のウェーク場の影響が大きい。また, 設計・建設の段階ではウェーク場が重要な影響を与えるとは考えられていなかったために, ビームラインにある構造やパイプの継目などの設計にウェーク場の低減という観点あまりなかったことも影響を大きくしている要因と考えられる。

ビーム強度依存が ILC でも問題になるとは考えにくいですが、ATF2 での問題を定量的にも理解しておくことは必要であり、これまで種々の検討や改善の試みがある。実験・理論的な計算の両面からの検討により、いくつかの発見があり、ある程度の改善がみられている。例えば、ビームライン中に多数存在するベローズでのウェーク場が問題となり得ることがわかり、ほぼすべてのベローズにシールドを付けた。また、比較的ベータ関数の小さな上流部にあるためあまり効かないと思われていた 4 台のビームサイズモニター (OTR beam profile monitor) のチェンバーのウェーク場が最終収束点でのビームサイズに影響を与えることが実験によって発見され、以後はここでのウェーク場の影響を最小にするようにチェンバーの位置を調整している。

また、ビームサイズだけでなく、ウェーク場のビームの軌道への影響も調査され、実験と理論計算の比較が行われている。

この問題の検討は進行中であり、まだ完全にこの問題を理解するには至っていない。なお、この問題についてのさらに詳しい議論は、参考文献 18) を参照していただきたい。

## 8. 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、ILC の最終収束系と同じ方法で収束させる実験 (ATF2) を行い、これまでに当初の設計値 (37 nm) に近い 44 nm 程度の微小なビームサイズを確認することができた。これは、ATF2 の最も大きな目的である “Local Chromaticity Correction” の有効性の実証を意味する。さらに、エミッタンスと光学系の設計から計算されるビームサイズ 37 nm との差、ビームサイズの強いバンチ電荷依存、などの原因を特定して現象を理解するために研究を続けている。

## 参考文献

- 1) ILC Technical Design Report, URL: <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- 2) G. White, et al.: Phys. Rev. Lett. 112, 034802 (2014).
- 3) K. Kubo and T. Okugi: Proc. 10th PASJ, Nagoya, 1 (2013).
- 4) K. Kubo: Proceedings of IPAC14, Dresden, Germany, 2014. Paper ID WEZA0. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/weza01.pdf>
- 5) S. Kuroda: “ATF2 for Final Focus test Beam for Future Linear Colliders”, Proceedings of ICHEP14, Valencia, Spain, 2014.
- 6) P. Raimondi and A. Seryi: Phys. Rev. Lett. 86, 3779 (2001).
- 7) A. Seryi, M. Woodley and P. Raimondi: Conf. Proc. PAC03-RPAB018 C030512, 2766 (2003).
- 8) R. Tomas: Phys. Rev. ST Accel. Beams 9, 081001 (2006).
- 9) V. Balakin, et al.: Phys. Rev. Lett., 74 2479 (1995).
- 10) ATF2 Group: “ATF2 Proposal”, CERN-AB-2005-035, CLIC note 636, DESY 05-148, ILC-Asia-2005-22, JAI-2005-002, KEK Report 2005-2, SLAC-R-771, UT-ICEPP 05-02, (2005). URL: <http://lcdev.kek.jp/ATF2/proposal/>
- 11) T. Shintake: Nucl. Instrum. Meth., A311, 455 (1992).
- 12) Y. Yamaguchi: Master thesis at Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2010.
- 13) T. Suehara, et al.: Nucl. Instrum. Meth., A616 (2010) 1-8.
- 14) T. Okugi, et al.: Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 023501 (2014).
- 15) E. Marin, et al.: Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 021002 (2014).
- 16) J. Yan, et al.: Nucl. Instrum. Meth. A740 (2014) 131-137.
- 17) J. Yan, et al., “Measurement of nm Electron Beam Sizes using Laser Interference by Shintake Monitor”, In Proceedings of TIPP2014, June 2014, Amsterdam.
- 18) K. Kubo, A. Lyapin and J. Snruverink: “Wakefield Issues for the Linear Colliders”, in ICFA Beam Dynamics Newsletter No. 61 (2013).