

レーザーワイヤビームプロファイルモニターの開発 - ATFダンピングリングでの超低エミッタンスビーム測定 -

京都大学理学部
阪井寛志*

hrsakai@issp.u-tokyo.ac.jp

2002年8月30日

1 はじめに

TeV 領域の物理を目的とした JLC (Japan Linear Collider) の開発が精力的に行なわれている。特に衝突点での必要な luminosity を得るために、超低エミッタンスの生成・実現を目的とした JLC の初段部分の試験加速器 ATF (Accelerator Test Facility) が 1997 年に KEK に建設され、運転が開始されている。ATF は約 80m の 1.28GeV 前段線形加速器とダンピングリング、および取り出しラインからなっていて、放射減衰過程を経てダンピングリング内で水平方向 $\varepsilon_x = 1.2 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{rad}$ 、垂直方向 $\varepsilon_y = 1.2 \times 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{rad}$ の超低エミッタンスビームが生成される [1]。この値はビームサイズにして水平方向 $100 \mu\text{m}$ 、垂直方向 $10 \mu\text{m}$ 以下に相当し、とりわけ垂直方向は非常に小さく、このようなビームサイズがダンピングリング内部で生成されているかどうかを確認することが、JLC 実現のためには重要となる。

リング内で生成された超低エミッタンスビームを測定するため、レーザーワイヤが設置されるまでは ATF では主に次の二つの方法が取られていた。一つは取り出しラインに設置したワイヤスキャナーを用いた方法であり、もう一つはリング内での SR 光の干渉を用いたものである。前者のモニターによる測定では、水平方向のエミッタンスはほぼデザイン値を達成した [2]。ただし、垂直方向は取り出しラインでは水平方向との coupling に

よる不確定要素が大きく、また運動量分散関数の寄与が大きかったため、測定の信頼性が問われる結果となり、不確定要素の原因究明が現在も行われている。後者はいわゆる SR 干渉モニターであり、現在 KEKB や放射光リングなどで通常用いられているモニターである。ATF でもこのモニターを用いた垂直方向のビームサイズ測定が行われているが、残念ながら、現在に至るまで到達エミッタンスに対し大体二倍近い違いがあり、この原因究明に精力が注がれている [3]。

このような状況を考慮し、我々はレーザーワイヤビームプロファイルモニターの開発を行った。本モニターは 2000 年にダンピングリング北直線部にインストールされ、ビームサイズの測定が 2000 年 6 月に初めて行われた [4]。その後、改良が加えられ、2000 年末に、ATF ダンピングリング内での垂直エミッタンスの測定に成功し、 $\varepsilon_y = (1.17 \pm 0.08) \times 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{rad}$ の値が得られ、ほぼ ATF の垂直エミッタンスが JLC の要求を満たしていることが確認された [5]。

本稿では、ATF ダンピングリング内での垂直エミッタンスの測定を実現したレーザーワイヤの測定器の特徴、開発経緯とそれを用いた測定結果、および今後の展望を紹介する。

2 本モニターの特徴

レーザーワイヤとは細く絞った大強度のレーザー光をワイヤスキャナーのワイヤの代わりに

* Present address: 東京大学物性研究所

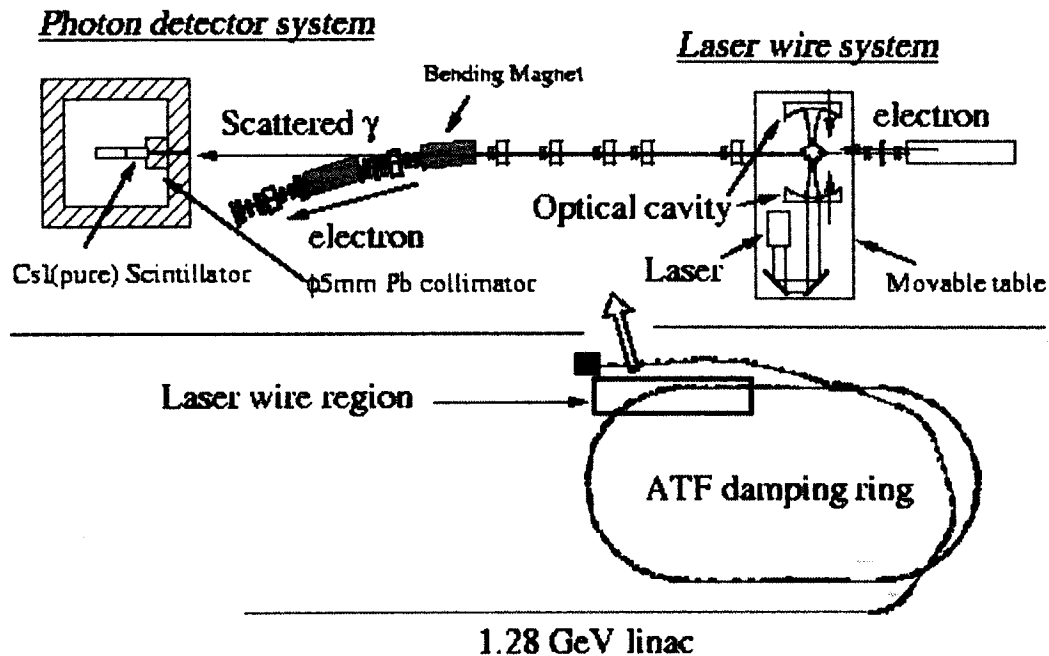


図 1: レーザーワイヤのセットアップ図。下が ATF 全体を表しており、上図がレーザーワイヤ付近のセットアップを示す。

ビームラインに置いた仮想ワイヤであり、われわれの場合、CW レーザーを光学共振器内で共鳴させ生成する。共振器内部で増幅し、絞られたレーザーと電子ビームとのコンプトン散乱過程を用いる。電子ビームと直角に交差するレーザーワイヤを、電子ビームに対し上下に動かし、レーザーワイヤの位置と得られたコンプトン散乱光の強度をプロットすることで、ミクロンサイズのビームサイズ測定を行う。放射光などの二次的な情報を用いないため、得られた結果に対しては不確定要素が入り難いのが特徴である。また、レーザーと電子との相互作用は金属ワイヤと電子との相互作用と比して非常に小さいため、リング内部での非破壊測定を可能にしている。

測定されたビームサイズ σ_{meas} は測定対象となるリング内のビームサイズ σ_y とレーザービームサイズ σ_l を用いて、 $\sigma_{meas}^2 = \sigma_y^2 + \sigma_l^2$ の関係があり、特にレーザーのビームサイズを小さくすること、およびそのサイズを測定し確認することが非常に重要となる。本モニターの特徴は光学共振器を用いることでレーザービームサイズの縮小化およびレーザー強度の増幅を同時に達成することが

可能であり、光学共振器を用いることで電子ビームサイズ測定に欠かせないレーザーワイヤのビームサイズを一意的に決定することができる。もちろん、このようなレーザーを用いたモニターには SLAC などが開発されているパルスレーザーを用いるビームサイズモニター [6]、レーザー干渉モニター [7] などが存在するが、約 2MHz で周回する準連続電子ビームに対しては、CW レーザーの方が適しているであろうと考えている。また SLAC の用いたパルスレーザーモニターではレーザーのサイズの確定が正確でないという問題が存在した [6]。その問題を払拭するため、光学共振器を用い、共振器の形からレーザーのサイズを決定することを検討した。他、第 5 節で述べるが、ATF ではマルチバンチ運転を行うため、2.8ns 間隔のバンチ毎のエミッタンス測定をすべて同時に行うには有効な点、電子ビームとレーザーとのタイミングを考慮しなくてもよい点、また CW レーザーと光学共振器の組み合わせは非常にコンパクトにまとめられ、電子ビームを動かしてスキャンするのではなく [7]、レーザーワイヤ全体をステッピングモーターで動かし、スキャンすることが可能で

ある点を考慮し、最終的にCWレーザーを光学共振器で増幅するタイプを選択した。

3 実験装置

3.1 概要

図1にセットアップを示す。測定器は主にレーザーワイヤ部分と検出器部分に分かれる。レーザーワイヤ部は3.2節で説明するが、全体が光学テーブルに載せられ、電子ビームに対し、垂直に動く。テーブルはキーエンスのレーザートラッカーで常にモニターされ、その測定精度は $1\mu\text{m}$ である。

検出器は(50mm×50mm×100mmの)純CsIシンチレータと光電子増倍管からなり、コンプトン散乱光はレーザーワイヤ部から12.8m下流で検出される。図2にコンプトン散乱光の微分散断面積を示す。1.28GeVの電子ビーム(E_0)に対し、波長532nm($k_0 = 2.33\text{eV}$)のレーザーが90度に入射した場合であり、電子ビーム方向を $\theta = 0$ として、コンプトン散乱光のほとんどが電子ビーム方向に出ているのが分かる。

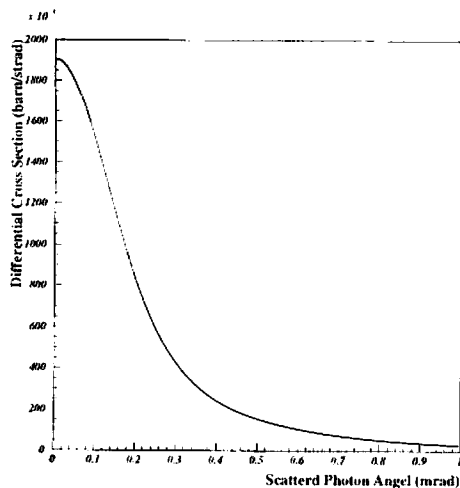


図2: 微分散断面積 $d\sigma_{comp}/d\Omega$ vs コンプトン散乱光の散乱角 θ 。

これらを考慮し、検出器の前には background を除去するため、 5ϕ の穴があいた100mm厚の鉛が置かれ、コンプトン散乱光は 5ϕ の穴を通り抜

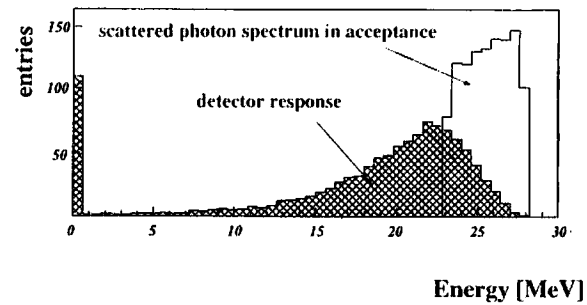


図3: コンプトン散乱光 [Hz/MeV] vs 散乱光エネルギー [MeV]。白抜き部は 5ϕ に入ってくるコンプトン散乱光の分布を示し、斜線部は入ってきたコンプトン散乱光が検出器で落ちエネルギーの分布を示す。

けて来る。これは $\theta < 0.2\text{mrad}$ の範囲のコンプトン散乱光を検出することになる。また角度分布 θ とコンプトン散乱光のエネルギーは式(1)で表され、23MeV以上のコンプトン散乱光を検出する。

$$k_s = \frac{k_0 E_0}{E_0 + k_0 - \sqrt{E_0^2 - m_e^2} \cos \theta} \quad (1)$$

入ってきたコンプトン散乱光がどのようなエネルギー分布を持つかを、具体的に計算したものが図3である。白抜き部は 5ϕ に入ってくるコンプトン散乱光のカウント数の分布を示し、最大エネルギー28.6MeVを有する23MeV以上のコンプトン散乱光を拾うと仮定すると、1.28GeVで1バンチ当たりの電子が 10^{10} 個、10Wの波長532nmのレーザーで、 $\sigma_{meas} \approx 10\mu\text{m}$ の場合、約1kHzのカウント数が得られる。その散乱光が検出器に入ったときのエネルギーデポジットを考慮したものが、図3斜線部である。エネルギーが低い方へ分布が移動し、15-25MeV辺りのカウント数が多くなっている。実際のデータ収集時には5MeVから10MeV置きに35MeVまで4段階の閾値を用意し、それぞれのエネルギーレベルでのコンプトン散乱光をスケータでカウントすることにした。なお、検出器の較正には ^{22}Na などの線源を用いている。

3.2 光学共振器

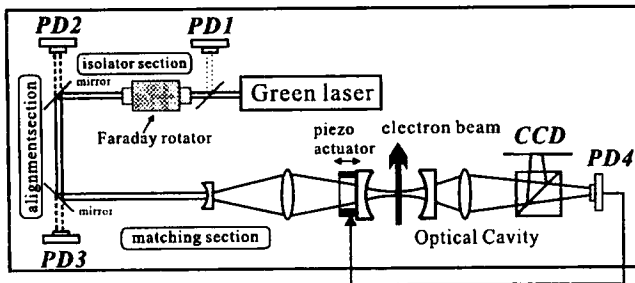


図 4: レーザーワイヤ部詳細。

図 4 はレーザーワイヤ部の詳細図である。レーザーワイヤ部の心臓部は 2 枚の高反射ミラーから成り立つ Fabry-Perot 型光学共振器である。共振器内の増幅率 S_{cav} はレーザー入射側のミラーの透過率 T_1 、反射率 R_1 、出射側のミラーの反射率 R_2 、および共振器長 D を用いて、

$$S_{cav} = \frac{T_1(1 + R_2)}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2\left(\frac{2\pi D}{\lambda}\right)} \quad (2)$$

と表される。レーザーが高反射ミラーの一方から入射し、特に共鳴条件が満たされるとき、すなわち共振器長 D がレーザーの半波長 $\lambda/2$ の整数倍であるとき、共振器内部にて増幅率 $S_{cav} = \frac{T_1(1+R_2)}{(1-\sqrt{R_1 R_2})^2}$ の TEM₀₀ モードのガウシアンビームが励起される。式 (2) のような関数を Airy 関数と呼び、共鳴点近くに鋭い peak を持つ。実際、この振舞いは共振器透過光にも反映され、図 5 のような形で測定されている (図 4 の PD4)。

開発上一つ目の困難は、安定に増幅されたレーザーワイヤを生成するため、この狭い共鳴 peak をいかに安定に保持するかであった。したがって共振器を堅牢なものにすること、およびピエゾ素子を用い共振器長を透過光の peak を一定に保持するようなフィードバック回路の製作の二点を重視し、実機を製作した。色々な失敗はあったものの、これらの製作の後、実測値 99%, 99.4% の反射率の高反射ミラーを用い、 $<0.2\text{nm}$ の共鳴の制御幅で安定なレーザーワイヤを実現した。図 6 はそのレーザーワイヤを電子ビーム方向から見たものである (空气中)。光源として波長 532nm (green)、出力

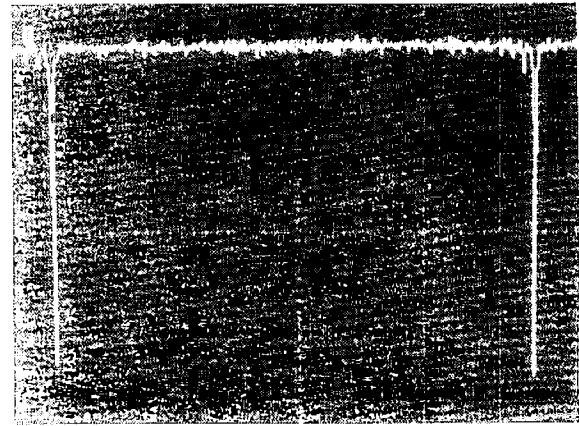


図 5: Airy 関数。横軸はピエゾを三角波で励振させており、共振器長 D と等価である。信号検出の関係上、上下反転しているが $\lambda/2$ 毎の鋭い peak が得られている。

100mW のレーザーを用いた。光学共振器の中で共鳴させる必要から線幅には注意を払い、 $<5\text{MHz}$ のものを選んだ。図 6 では分かり難いが、入射レーザー光の強度に対し、明らかに内部のレーザー光が増幅されているのが分かる。この時のミラーの反射率を用いると、増幅率は $S_{cav} = 220 \pm 20$ が得られる。特に幸運だったのは、このレーザーワイヤが見えるということであった。実際のインストールの際もアラインメントはレーザーワイヤを望遠鏡で横から直接見ることで、ビームラインに対して、 $100\mu\text{m}$ 以内で精度良く設置することが可能であった。

二つ目の開発上の課題はレーザーワイヤをいかに細くし、さらにいかに精度よくサイズを測定するかであった。レーザーワイヤの中心はビームウエスト (w_0) と呼ばれ、 $\sigma_l = w_0/2$ で与えられる。共鳴しているとき、ミラーの曲率半径を ρ とすると、 $w_0 = \sqrt{D(2\rho - D)}/2$ で表される。我々はビームウエストを小さくするため、 $\rho = 20\text{mm}$ のミラーを用い、共中心型に近い $2\rho - D \simeq 0.1\text{mm}$ を選択し、 $w_0 = 14\mu\text{m}$ 程度にセットした。実際このビームウエストが実現できているかどうかが一番の問題点であったため、われわれは二つの測定方法を考案し、ビームウエストの測定を行った [8]。一つ目は透過光のビームの広がり測定

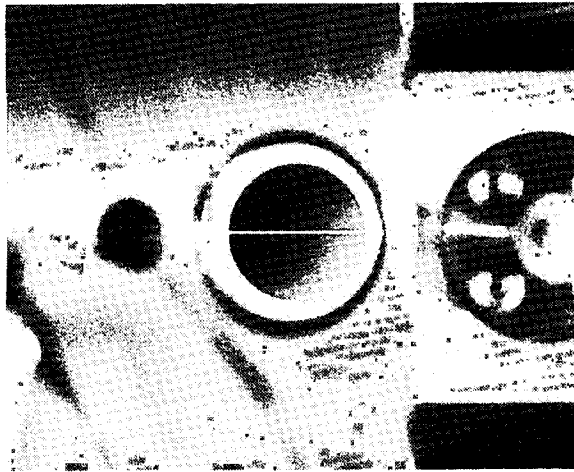


図 6: レーザーワイヤを電子ビーム方向から覗いたもの(空气中)。真ん中に見える輝線がレーザーワイヤそのものである。

する方法 (*beam divergence method*) であり、広がり角 a とビームウエストとの関係 $a = \frac{\lambda}{\pi w_0}$ から、 w_0 を決定する。二つ目は高次モード (TEM_{10}) を利用する方法 (*transverse method*) である。高次モードと基本モード TEM_{00} モードの共鳴条件の位相はわずかにずれており、そのずれ $\delta\phi$ は $\delta\phi = \frac{1}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{D}{\rho} - 1 \right) \right]$ で表される。実際高次モードの peak はレーザーの入射位置を変化させたとき、図 5 の peak の隣に現れ、異モード間と基本モード間の間隔の比 ($\delta\phi$) を測定することで、 D が分かり、 w_0 が求まる。表 1 にそれぞれの測定結果をまとめる。お互いに consistent な結果が得られている。これらの値はエミッタンス測定前後でも変化がなく、 $w_0 = 14.5 \pm 0.4 \mu\text{m}$ が得られていることが分かった ($\sigma_l = 7.3 \pm 0.2 \mu\text{m}$) [9]。

測定方法	測定値 w_0
beam divergence method	$15.1 \pm 0.7 \mu\text{m}$
transverse method	$14.0 \pm 0.6 \mu\text{m}$
combined	$14.5 \pm 0.4 \mu\text{m}$

表 1: ビームウエスト測定結果。

4 垂直エミッタンス測定

ダンピングリングの超低エミッタンスビーム生成のチューニングを行った後、垂直エミッタンス測定を 2000 年 12 月 5 日と 14 日の二回行った。ダンピングリング内の垂直電子ビームサイズ測定は以下の手順で行った。まず、架台 (レーザーワイヤ) をある位置に設置し、電子ビームをダンピングリングに入射し、そのまま 10 分~15 分ほど 1 秒毎にデータを取り続けコンプトン光のエネルギーレベル、レーザーの強度レベル、ビーム電流、レーザーワイヤの位置で分類されたカウント数を収集し、解析する。これを 1 run とし、次に架台を動かし、レーザーワイヤの位置とカウント数をプロットする。この手順が必要なのは ATF はエミッタンスが非常に小さいため、Touschek 効果によるビーム寿命が支配的であり、10 分~15 分ほどで、ビーム電流は 1/10 以下になってしまうためである。

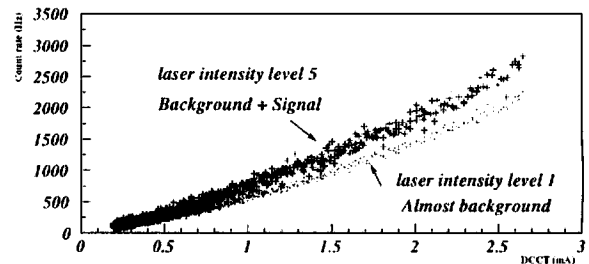


図 7: 1run での生シグナル。横軸はビーム電流、縦軸は検出器でのカウント数を表す。

2000 年 6 月の最初の測定で background が非常に多いことが分かったため、2000 年秋に、われわれは特にレーザーの on/off が瞬時に行えるシステムを製作し、signal と background を同時に測定することを可能にした。具体的には piezoelectric elements を 1kHz で大きく振らすことで、共鳴状態と非共鳴状態を分離させて、レーザーの on/off を行っている。図 7 は 1run での生シグナルである。レーザー強度は 5 つの level に分かれ、レーザーが off (level 1) に対してレーザー on (level 5) の状態のシグナルが増えているのが分かる。またこれにより、background と signal との分離を非常に

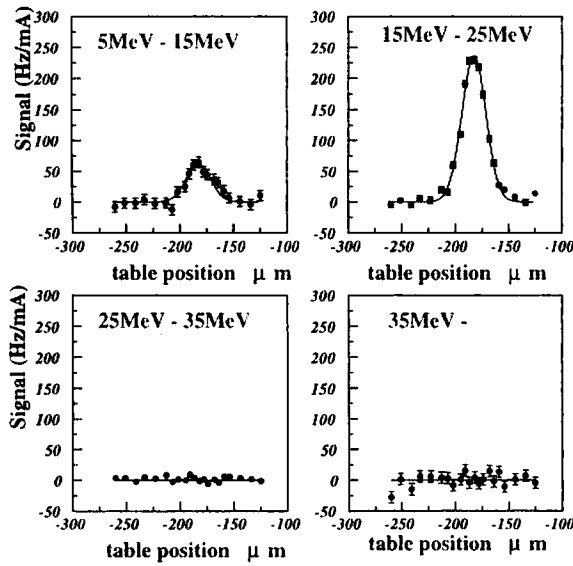


図 8: ビームプロファイル測定結果。4つのグラフはそれぞれ検出 γ 線のエネルギーレベル毎に分けてある。各グラフの横軸はレーザーワイヤの垂直位置 [μm] を表し、縦軸はシグナルカウント数を蓄積電流で規格化したもの [Hz/mA] である。

クリーンに行うことが可能になった。

図 8 が得られたビームプロファイルの一例である。縦軸のカウント数は既に background を差し引いたものである。図 3 で予想されるように 15-25MeV に一番多くシグナルが分布している。また 35MeV より上にはまったくシグナルが見当たらない。測定値は $\sigma_{meas} = 11.3 \pm 0.5 \mu\text{m}$ であり、このプロファイルの peak 値は 100mW のレーザーで増幅率 220 ± 20 および σ_{meas} を用いることで予想されるコンプトン散乱光のエネルギーデポジションのエネルギー分布と絶対値で非常に良い一致を示している。

プロファイル測定後、エミッタンスを導き出すために、まず、得られたデータを 0.4mA 毎の電流強度で分類し、個々の電流でのプロファイルからビームサイズ σ_{meas} を割り出した。その後、 $\sigma_y^2 = \sigma_{meas}^2 - \sigma_l^2$ の関係式でレーザーワイヤのビームサイズ σ_l に測定値を代入し、

$$\sigma_y = \sqrt{\beta_y \varepsilon_y + \left(\eta_y \frac{\sigma_p}{p} \right)^2} \simeq \sqrt{\beta_y \varepsilon_y} \quad (3)$$

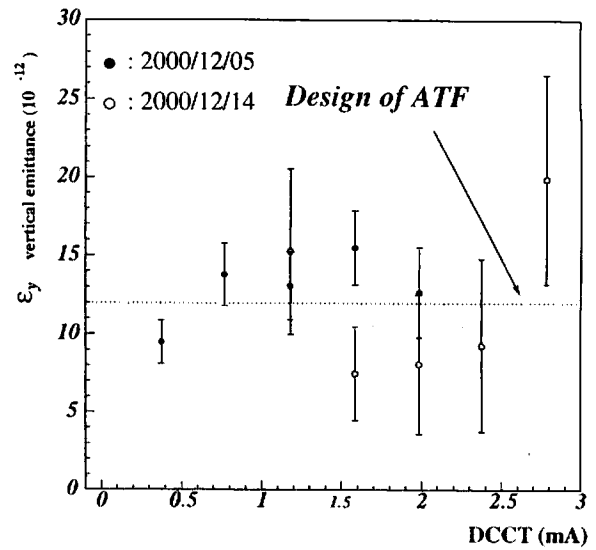


図 9: エミッタンス測定結果。横軸はビーム電流 [mA] を表し、縦軸は垂直エミッタンス [m-rad] を表す。黒丸が 2000 年 12 月 5 日のデータ、白丸が 2000 年 12 月 14 日のデータを示す。

から、エミッタンスを求める¹。 β_y はレーザーワイヤ点での垂直 β 関数であり、2000 年 12 月 5 日のは $5.77 \pm 0.07 \text{m}$ 、2000 年 12 月 14 日のは $3.97 \pm 0.17 \text{m}$ であり、図 9 に示すようにその値を用い、エミッタンスをビーム電流毎に求めた。二つの測定結果はおおむね一致して、それらを平均化することで $\varepsilon_y = (1.17 \pm 0.08) \times 10^{-11} \text{m-rad}$ を得た。図 9 から分かるように、この値は 1% 以下の xy カップリングというデザイン値を ATF がほぼ満たしていることを実証し、JLC 実現に向けて大きな一歩を踏み出したと言えよう [5]。

5 今後の展望

現在もまだまだ更なる開発が続いている。現在 ATF で特に注目されているのが、電子のパンチ内散乱 (intra-beam scattering) によるエミッタンス増大である。これは JLC の luminosity 減少とも直結する問題であり、詳細な研究が必要不可欠となっている。残念ながら、今回のデータだけで

¹測定した $\eta_y \frac{\sigma_p}{p}$ は $1.6 \mu\text{m}$ 以下と小さいため、今回の解析では無視した。

はエミッタンス増大の傾向をクリアに説明することができない。ただし、現在ではレーザーの強度増加およびミラーの反射率向上 ($S_{cav} \simeq 500$) により、S/Nが更に向上し、電子ビームのドリフトなどの影響なしに短時間(15分以下)でビームサイズが測定可能になりつつある。また2002年秋以降は垂直だけではなく、水平方向のレーザーワイヤも稼働する予定で、プロファイルを多次元的にみることで、バンチ内散乱の実験と理論との合否を詳細に研究する段階となっている。

またもう一つ重要な研究課題がマルチバンチビームでのバンチ毎のエミッタンス測定である。既に2002年6月までに何回かマルチバンチでのエミッタンス測定を行った[10]。純CsIシンチレータの速い立ち上がり時間を利用し、2.8ns間隔のバンチ毎の時間情報をバンチIDモジュールで弁別し、20バンチのプロファイルを得ている。マルチバンチ研究はATFでもまだ始まったばかりであり、イオントラッピングなどによる後方バンチのエミッタンス増大などの影響を詳細に調べることになるであろう。

また最近ではパルスレーザーを光学共振器で増幅させ、電子ビームと衝突させようという試みもあり、現レーザーワイヤ、およびパルスレーザーの強度をはるかにしのぐ大強度レーザーによるX線生成の実現に向けての新たな側面も見せている[11]。

6 最後に

レーザーワイヤの開発を通じ、ATFダンピングリングでの垂直エミッタンス測定について紹介した。この測定成功のお蔭か、その後SLAC、DESY、CERNからもレーザーワイヤを用いてlinear colliderでビームサイズ測定を実現したいという声がわれわれのところに集まり、昨年KEKで、第一回のLaser wire mini workshopが開催された(詳しくは<http://atfweb.kek.jp/atf/WS/ATF-WS-02/>)。様々な現場の声を聞くことができ非常に有意義であったと好評であった。今年2002年度も第

二回がローザンヌで開催される。どこの国もLCの早期実現を願う声は同じであり、モニター一つ取っても、このような開発成功の及ぼす影響は見くびれないと実感した次第である。

最後にATFのオペレーションを支えて頂いたATFの全スタッフ・学生の皆様にお礼を申し上げます。また苦勞を分かち合ったレーザーワイヤグループメンバーに感謝する。また、物心共に研究を支援して頂いたKEK菅原機構長に感謝の意を表します。なお、この研究は日本学術振興会の援助を受けて行われたものである。

参考文献

- [1] F. Hinode, *et al.* (edit), KEK Internal 95-4 (1995)
- [2] T. Okugi, *et al.*, Phys. Rev. Spec. Top. - Accel. Beams **2** (1999) 022801.
- [3] H. Hayano, T. Naito, *et al.*, proc. 1999 Particle Accelerator Conf. New York, 1999, 2143.
- [4] H. Sakai, *et al.*, Phys. Rev. Spec. Top. - Accel. Beams **4** (2001) 022801.
- [5] K. Kubo, *et al.*, Phys. Rev. Let. No.19 Vol.88 (2002)
- [6] M. Ross, *et al.*, LINAC96 proc., 1996, 308.
- [7] T. Shintake, Nucl. Instrum. Methods **A 311** (1992) 453.
- [8] H. Sakai, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods. **A 455** (2000) 113.
- [9] H. Sakai, *et al.*, accepted for publication to JJAP.
- [10] Y. Honda, *et al.*, proc. of ICFA Nanobeam, Lausanne, 2002.
- [11] M. Nomura, *et al.*, proc. 27th Linear Accelerator Meeting, Kyoto, 2002, 133.