

1 序

ビームのエネルギーや品質（エミッタンス）は加速器の設計により決まる。特に、未知の高エネルギーの粒子の探索また放射光リングの高輝度化に伴い、高品質（低エミッタンス）、大電流、超高エネルギーの電子・陽電子ビームの生成要求が急務とされてきている。その要求は同然ながら、前段の入射部である電子・陽電子リニアックに求められる。それとともに加速器の建設後これらの高品質ビームの生成、輸送、加速、及び維持をいかに行なうかが物理実験及び加速器運転時で極めて重要性を増してきた。すなわち、いかに我々がビームの状態（位置、電流、サイズ、長さエミッタンス、エネルギー、エネルギーの広がり）を把握しているかであり、これらを詳細に知ることが高品質ビームの生成の成否を握る鍵となる。その意味で、ビームの持つあらゆる情報をモニターすることが欠かせない。さらに高品質になればなるほど、詳細なモニターが必要不可欠となってくる。

本講義ではこれらのビームの性質を測定するビームモニター、特にビームの集団的な振舞いである、ビームサイズ、ビームの長さ、及び、ビームのエネルギー広がりについての測定の説明を行なう。まず、始めに簡単にビームの集団運動を記述する用語などの説明を行う。その後、ビームサイズ、エミッタンス、ビームの長さ、エネルギーの広がりの基本的な測定を説明し、具体的な測定例を取り上げる。

測定の具体例は、主として KEK-ATF の例を取り上げ説明を行なっていく。KEK-ATF では 80m 程の S-band 電子リニアックによって、1.28GeV にまで加速され、その後、円形加速器であるダンピングリングに入射され、設計エミッタンスにまで絞られ、その後取りだしラインにてエミッタンスなどのビームの

性質が測定される。

主に今回のテーマに即して、電子リニアックでの測定例を掲示しながら、話しを進めていく予定であるが、測定系はそのビームの性質によって、特化した場合が多い、そういう意味で、ATF での電子ビームの測定を行なう上で、一般的なことは議論出来るであろうが、今後、色々な加速器が出てくることを踏まえ、最近の色々なモニターの動向から、リングでも使用しているモニターも紹介していく予定である。

2 ビームプロファイル測定の基礎

2.1 ビームの集団運動

2.1.1 用語説明

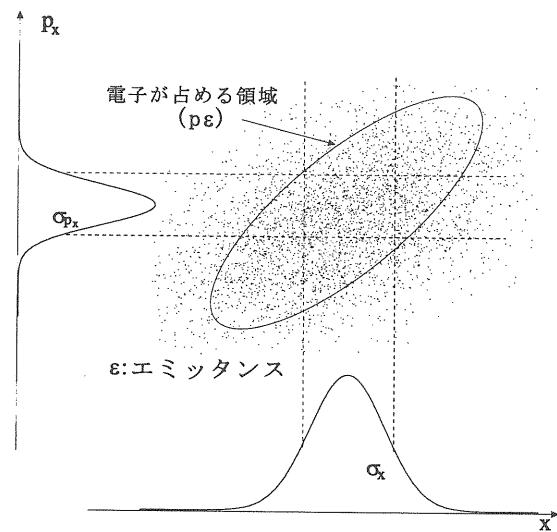


図 1: 位相空間上でのビームの広がり。楕円で占められる面積がエミッタンスである。

エミッタンス (emittance) ビームはビーム進行方向 (s) とそれらに垂直な横方向 (x, y) との 3 次元の運動を行ないながら輸送される

が、その運動を記述するときにそれら 3 次元に共役な運動量 (p_s, p_x, p_y) を用いた 6 次元の運動として位相空間上で扱うことが多い。その理由としてビームを集団的な振舞いとみると、個々の粒子が全て同一の運動方程式で記述される時、「ビームが位相空間上に占める面積は変わらない」という Liouville の定理が成り立つからである。ビームの振舞いは (x, p_x) のように各成分に独立の位相空間で扱い、このビームが位相空間上で占める面積 ($p\epsilon$ (MeV/c·m)) のことをエミッタance という ($p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_s^2}$)¹。普通はビームの 90% を占める面積を言ったり、ガウス分布でいう 1σ のカウンターの面積の部分を取り扱う場合が多く、ビームの光学的な取り扱いを行ないやすくするために、橢円で近似する。Liouville の定理から分かるように、このエミッタance はビームの進行方向の加速や収束によらない不变量であり、ビームの性質を示す重要なパラメータである。規格化エミッタance (normalized emittance) は $\gamma\beta\epsilon$ で定義される量であり、電子ビームの場合は $\beta \sim 1$ であるため、ほぼ $p\epsilon/(mc)$ の値である。 $(mc = 0.511 \text{ (MeV/c)})$ 。

バンチ (bunch) 電子ビームは一般的に電子入射器によって加速され、蓄積リングに入射したり、標的に照射したりする。その際電子ビームは高周波にのせて加速される。この高周波にのせるためにビームは進行方向 (s 方向) にある一定の長さをもった固まりとして、輸送される。この固まりのことをバンチと呼ぶ。バンチの長さ（バンチ長）は高周波の周波数によって決定され、ビームの性質を決める重要なパラメータである。このような高周波加速では図 2 のように電子陽電子は電場の

¹ 通常は $(x, x' = p_x/p)$ 平面で扱うことが一般的でこのときの占める面積 (ϵ) のことを（幾何学的）エミッタance という。

ほぼ一番高いところ (crest) にのせられ加速する。この高周波にのらない部分は crest 部に比べ加速エネルギーが少なく、やがてビームの中でエネルギーの尾をひき、蓄積リングに入射できずビーム電流を失うことになる。このようにバンチの長さはエネルギーの広がりとも関係しており、ビームのエネルギーの広がりを詳細に測定すること、またバンチ長が理想通りの長さになって輸送されているかを測定し、確認することが重要になってくる。

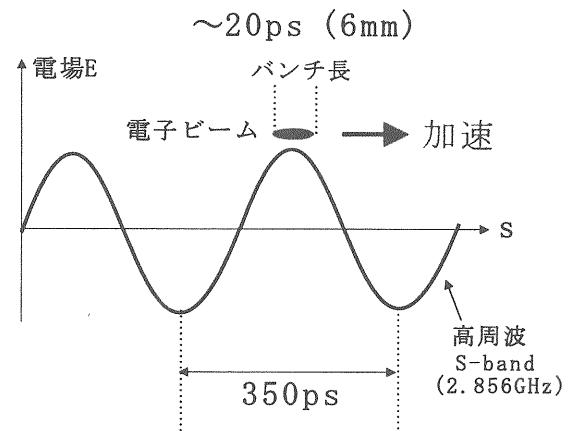


図 2: 図は S-band(2.856GHz) の高周波加速を行った時の加速電場内でのビームの振舞いを示す。電場の高い所で加速されるため、バンチ長さは crest 部分にのるように短くして加速する。具体的には S-band の場合 20ps(6mm) くらいが理想的に加速される。

プロファイル (profile) ビーム方向とは電子陽電子リニアックの場合、加速方向 (s 方向) を指し、ビームのプロファイルとは一般的には s 方向に対して垂直な実空間の x - y 平面の広がりを示す。 $(s$ 方向の広がりは前述のバンチ長と呼ぶ。) これは図 1 でいう実空間 x (または y) への射影である。具体的にはビームプロファイルは図 3 のようにビームラインに螢光板などのスクリーンを置き、 x - y 平面のビームの強度分布をカメラや CCD などで観測す

ることが可能である。(測定詳細は後述。) このプロファイルが x-y 平面上で傾いている場合には x と y は独立の運動とみることができなくなり、複雑な振舞をしめす。またビームのプロファイルがガウス分布をしているかどうかを測定することも重要な意味をもってくる。

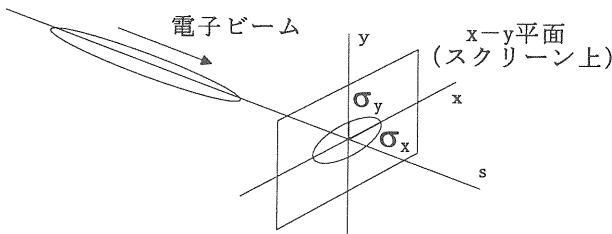


図 3: 実空間上でのビームの広がり。横方向のビームサイズは x-y 平面の射影であるが、ビームが傾いている場合などはその傾きなどが重要なパラメータとなる。

2.1.2 基本パラメータ

エミッタンス測定の前にビームの運動に対して簡単に出て来る用語の概略・説明を付随しておく。ビームの単粒子の振舞についての詳しい説明は [1],[2], [3],[4] など多くの参考書があるので、本稿では詳しく述べないが、概略のみ説明する。

Twiss parameter ビームライン s 上の粒子一つ一つはビームラインに沿って横方向に単振動に似た振動(ベータトロン振動)をしており、一般的には $(x(s), x'(s) = p_x/p)$ は

$$x(s) = A\sqrt{\beta(s)} \cos(\phi(s) + \phi_0) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x'(s) &= \frac{A\beta'(s)}{2\sqrt{\beta(s)}} \cos(\phi(s) + \phi_0) \\ &\quad - \frac{A}{\sqrt{\beta(s)}} \sin(\phi(s) + \phi_0) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\phi(s) = \int^s \frac{ds'}{\beta(s')} \quad (3)$$

と書ける。 $\phi(s)$ はビームライン上のある場所からの位相空間上の位相の進みを示す。ここで $\alpha(s) = -\beta'(s)/2$ であり、 $\gamma(s) = \frac{1+\alpha(s)^2}{\beta(s)}$ を用いると、式(4)の示される振幅 A を持つ橈円の軌道上にしか存在しないことがわかる。

$$\gamma(s)x^2(s) + 2\alpha(s)x(s)x'(s) + \beta(s)x'^2(s) = A^2 \quad (4)$$

これら $(\alpha(s), \beta(s), \gamma(s))$ は Twiss parameter と呼ばれる。振幅 A、もとの位相 ϕ_0 は個々の粒子それぞれ違う値を持つが、Twiss parameter はある位置 s の関数であり、エミッタンス等のようにビームのそのものの性質から決まる量ではなく、加速器の配置によってのみ決まる関数である。

Transfer Matrix ビームライン上のある point1 から point2 への粒子の伝搬は transfer matrix $R_{1 \rightarrow 2}$ により記述され、

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_2 = R_{1 \rightarrow 2} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_1 \quad (5)$$

のような関係がある。式 (1)(2) を用いて $R_{1 \rightarrow 2}$ 計算すると、それぞれのコンポーネントは

$$R_{11} = \sqrt{\frac{\beta_2}{\beta_1}} (\cos \Delta\phi + \alpha_1 \sin \Delta\phi) \quad (6)$$

$$R_{12} = \sqrt{\beta_1 \beta_2} \sin \Delta\phi \quad (7)$$

$$R_{21} = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\sqrt{\beta_1 \beta_2}} \cos \Delta\phi - \frac{1 + \alpha_1 \alpha_2}{\sqrt{\beta_1 \beta_2}} \sin \Delta\phi \quad (8)$$

$$R_{22} = \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}} (\cos \Delta\phi - \alpha_2 \sin \Delta\phi) \quad (9)$$

Twiss parameter が加速器そのものの配置などによって決まるため、これら Transfer Matrix も当然加速器の配置によって決まるものである。具体的には後に示す式 (22),(23) にあるようにドリフトスペースや四極電磁石などのコンポーネントによって決まる量である

が、一般的には 2 点間の twiss parameter を関係づける形で記述される。ここで 2 点の位相空間の回転は $\Delta\phi$ によって決定され、この $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = \int_1^2 \frac{ds}{\beta(s)} \quad (10)$$

で与えられる。

運動量分散関数 (dispersion function)
ビームは必ずしもすべて同一の運動量を持ってビームラインを運ばれていくわけではなく、理想的な運動量の値からはずれた粒子も存在する。これらの粒子はずれ $\Delta p/p \neq 0$ に反映された軌道を通ることになる。このずれが横方向の運動に反映されるとき運動量のずれに比例した係数を運動量分散関数といい、ビームの軌道 $x(s)$ は

$$x(s) = x_\beta(s) + \eta_x(s) \frac{\Delta p}{p} \quad (11)$$

で記述される。 $x_\beta(s)$ はベータトロン振動で記述される軌道であり、 $\eta_x(s)$ が運動量分散関数を表す。一般的に曲がった軌道を通らない限り、 η_x はゼロであるが、図 4 に見られるように偏向電磁石などを通過する時には運動量の違いから横方向の軌道のずれが生じ、運動量分散関数がゼロで無くなる。

2.1.3 多体粒子の伝搬

ビームライン s の (x, x') 位相空間上のビームの粒子の分布は橙円を仮定すると以下のような σ -Matrix の形で表される。

$$\begin{pmatrix} x & x' \end{pmatrix} \sigma^{-1} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = 1 \quad (12)$$

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} \end{pmatrix} \quad (13)$$

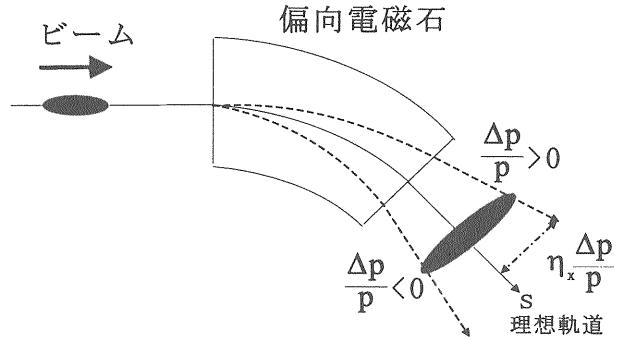


図 4: 偏向電磁石を通過した際のビームの軌道のずれ。理想軌道は $\Delta p/p = 0$ の軌道を表している。運動量が大きいものは偏向電磁石の外側、小さいものは内側を通り、軌道のずれが生じているのが分かる。これに乗じてビームサイズも大きくなる。

これは書き方を変えると以下のようない形になり、橙円をあらわしていることがわかる。

$$\sigma_{22}x^2 - 2\sigma_{12}xx' + \sigma_{11}x'^2 = \det \sigma \equiv \varepsilon_x^2 \quad (14)$$

図 5 は式 (14) を位相空間で表したものである。ここではエミッタанс ε_x を (x, x') 上のガウス分布の 1σ の等高線の面積を π で割ったものと定義する。(以降もこのエミッタансの定義は変わらない。)

さてこの分布が式 (4) の加速器の配置から決まる位相空間の橙円と一致(相似)していた場合、ビームは加速器の光学系と Matching しているといい、位相空間でそれらの係数を比較して、 1σ の等高線の分布を考慮し、

$$\sigma_{11} = \beta(s)\varepsilon \quad (15)$$

$$\sigma_{22} = \gamma(s)\varepsilon \quad (16)$$

$$\sigma_{12} = -\alpha(s)\varepsilon \quad (17)$$

が得られる。加速器の設計はビームが光学系とマッチするように設計を行っているため、上記 3 式はビームを記述する非常に重要な関係式となる。今はビームの輸送を議論するため、

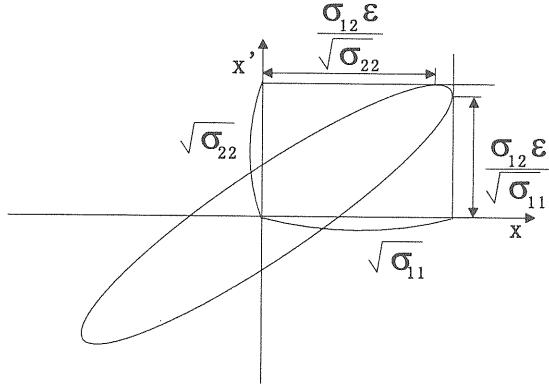


図 5: 図 1 からわかるように、 $\sqrt{\sigma_{11}}$ がビームサイズを表す。また

σ -Matrix を用いて話を進めていく。さてビームライン上のある位置 (point1) のこの機能円上に存在する (x, x') の分布がビームライン上を通じて (point2) までたどり付いた時、ビームのプロファイルを決める σ Matrix は 1-2 間でどういう関係にあるかを考える。point1,2 での σ -Matrix をそれぞれ σ_1, σ_2 、位相空間上の座標を $(x, x')_1, (x, x')_2$ とすると、1-2 間は transfer Matrix $R_{1 \rightarrow 2}$ を用いた式 (5) で記述できる。一方、各 point1,2 でのビームの振舞はそれぞれ以下の式

$$(x, x')_1 \sigma_1^{-1} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_1 = 1 \quad (18)$$

$$(x, x')_2 \sigma_2^{-1} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_2 = 1 \quad (19)$$

で記述できるため、式 (18) に式 (5) を代入した

$$(x, x')_1 R_{1 \rightarrow 2}^t \sigma_1^{-1} R_{1 \rightarrow 2} \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}_1 = 1 \quad (20)$$

と式 (19) を較べる事で、

$$\sigma_2 = R_{1 \rightarrow 2} \sigma_1 R_{1 \rightarrow 2}^t \quad (21)$$

の関係が得られることが分かる。一般的にエネルギーが変わらず、x-y 間に coupling ない

場合、式 (21) の両辺の determinant をとると $\det R_{1 \rightarrow 2} = 1$ なので、 $\det \sigma_1 = \det \sigma_2$ の関係が得られる。これはビームの輸送中はエミッタスが保存することを意味している。

2.2 ビームプロファイル測定方法

ビームの性質を決めるエミッタス、バンチ長および運動量の広がりの測定原理を説明する。

2.2.1 エミッタス測定方法

エミッタス測定 1 (Q-scan/Waist-scan)
図 6 のような四極電磁石とドリフトスペース L があるビームラインを考え、そこでビームサイズを測定するものとする。

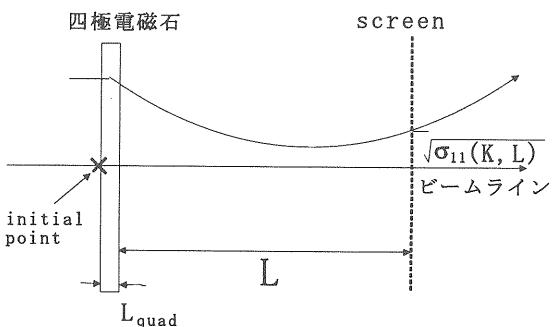


図 6: 実空間でのビームライン。収束力 K の四極電磁石のあとに L のドリフトスペースがあり、そこでビームサイズを測定する場合を考える。

簡単のため四極電磁石の厚みは十分うすいものとすると (thin lens 近似)、ドリフトスペースと四極電磁石の transfer Matrix はそれぞれ以下のように書かれる。

$$R_{\text{drift}} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{R}_{\text{quad}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -K & 1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

ここで K は収束力を表すパラメータであり、 $K = \frac{\partial B_y}{\partial x} \frac{L_{\text{quad}}}{(B\rho)}$ で表される。(これらの Matrix 表現は参考文献 [1] 参照。) 光学的な扱いを考慮すると焦点距離 $f=1/K$ のレンズが置かれたのと同じことである。

さて、initial point を四極電磁石のすぐ手前においてそこから図 6 のスクリーンまでの transfer matrix を $\mathbf{R}(K, L)$ とすると、

$$\mathbf{R}(K, L) = \mathbf{R}_{\text{drift}} \mathbf{R}_{\text{quad}} = \begin{pmatrix} 1 - KL & L \\ -K & 1 \end{pmatrix} \quad (24)$$

であるため、スクリーン上の σ -Matrix $\sigma(K, L)$ は initial point の σ -Matrix $\sigma_0 = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} \end{pmatrix}$ を用いて、

$$\begin{aligned} \sigma(K, L) &= \mathbf{R}(K, L) \sigma_0 \mathbf{R}^t(K, L) \\ &= \begin{pmatrix} 1 - KL & L \\ -K & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} 1 - KL & -K \\ L & 1 \end{pmatrix} \quad (25) \end{aligned}$$

スクリーン上で我々の測定の対象はビームサイズの 2 乗を示す σ -Matrix の (1,1) 成分のみであるので、式 (25) から計算して、

$$\begin{aligned} \sigma_{11}(K, L) &= (1 - KL)^2 \sigma_{11} \\ &+ 2L(1 - KL)\sigma_{12} + L^2\sigma_{22} \quad (26) \end{aligned}$$

となる。ここで K に注目し、式 (26) 変形すると、

$$\sigma_{11}(K, L) = \underbrace{L^2\sigma_{11}}_A \left\{ K - \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{11}} + \frac{1}{L} \right) \right\}^2$$

$$+ \frac{L^2}{\sigma_{11}} \underbrace{(\sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{12}^2)}_{\det \sigma = \varepsilon^2} \quad (27)$$

となる。これを図 7 はビームサイズ $\sigma_{11}(K, L)$ を K の関数としてグラフ化したものである。グラフからもわかるように関数の最小値が $L^2\varepsilon^2/\sigma_{11}$ を表しており、また slope から $A = L^2\sigma_{11}$ がわかる。 L は既知なので、この 2 つの値からエミッタンス ε が求められる。実際の測定では K は四極電磁石に流れる電流を変える事で変化させることができあり、図 7 に見られるよう K を変化させた時のビームサイズの 2 乗をプロットし 2 次曲線で fit させることでエミッタンス測定が行われる。

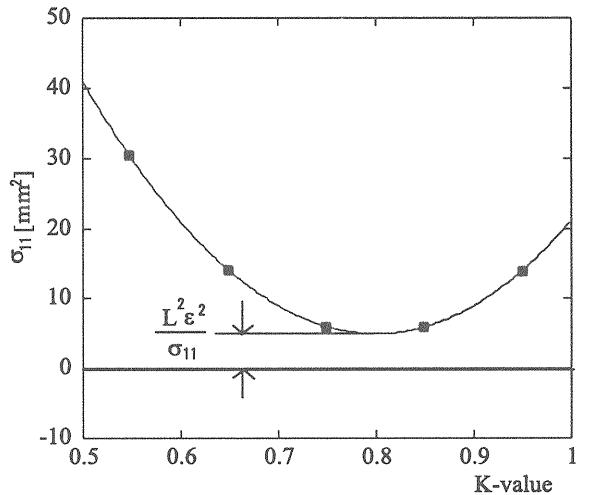


図 7: $\sigma_{11}(K, L)$ と K とのプロット。

エミッタンス測定 2 (phase plot) もう一つのエミッタンス測定方法はビームライン上のいくつかの場所でビームサイズを測定し、それらサイズ測定を逆算、総合し、エミッタンスを求める方法である。今図 8 のように多くのスクリーンにてビームサイズが測定可能だ

とすると、intial point の σ -Matrix を用いてそれぞれの測定点での σ -Matrix は intial point からの transfer matrix $R_{0 \rightarrow i}$ ($i = 1, 2, 3, \dots$) を用いて以下のように記述できる。

$$\sigma_1 = R_{0 \rightarrow 1} \sigma_0 R_{0 \rightarrow 1}^t \quad (28)$$

$$\sigma_2 = R_{0 \rightarrow 2} \sigma_0 R_{0 \rightarrow 2}^t \quad (29)$$

$$\sigma_3 = R_{0 \rightarrow 3} \sigma_0 R_{0 \rightarrow 3}^t \quad (30)$$

...

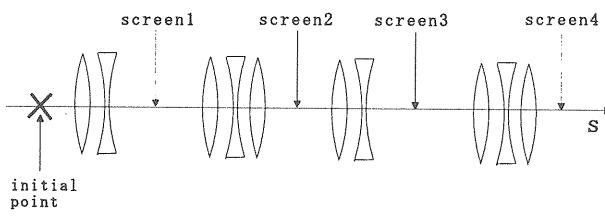


図 8: ビームライン上に多くの測定点が存在する場合。凸レンズ、凹レンズはそれぞれ四極電磁石の focus、defocus を表す。

これらの transfer matrix は式 (22), (23) のドリフトスペースや四極電磁石などの加速器のコンポーネントの組合せで表され、一般的にはビームライン上のコンポーネントの配置によって記述される Twiss parameter ($\alpha(s), \beta(s), \gamma(s)$) によって記述される。 σ_0 は三つの独立なパラメータからなっているため、 $R_{0 \rightarrow 1}, R_{0 \rightarrow 2}, R_{0 \rightarrow 3}$ がわかっているものとすると、screen1,2,3 上の 3 つのビームサイズ $\sqrt{\sigma_{i11}}$ ($i = 1, 2, 3$) を測定する事で、 σ_0 を全て記述する事が可能である。さらに σ_0 の測定エラーを含めて評価する場合には screen4,5, ... と多くの測定点から逆算してやればよい。但し注意すべきは transfer Matrix の位相空間の回転 $\Delta\phi$ (phase advance) が 0 や 360° の場所を選んでしまった場合は図 9 の (b) に見られるよう、位相空間上では区別できない。そのため、測定のちょっととした誤差で σ_0 の楕

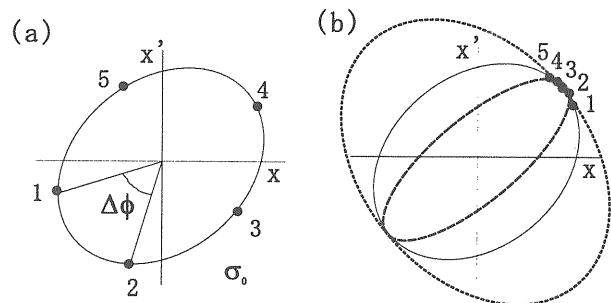


図 9: Screen1~5までのビームサイズを測定し transfer matrix から逆算したのち σ_0 -Matrix をプロットしたものである。(a)のように phase advance が位相空間上で均等にはらまかれている時はほとんど一意に決まった楕円で fit 可能であるが、(b)のように phase advance がほとんどないところのみ測定していた場合は楕円の fit に不確定要素が入り込む余地がある。

円のプロットはどうしても変化する。図 9 の (a) に見られるように位相回転 $\Delta\phi$ が適度なところで測定することが必要である。この測定法の利点は四極電磁石を変える事がないため、光学系を変えずに測定が行えるというところにあり、またビームが理想通りの光学系とマッチしているかどうかを隨時点検、確認できる。さらに Q-scan のように最小値を求めずとも、エミッタノス測定が可能であるため、わざわざ小さなビームサイズを測定する必要がない。但し欠点はそれに応じた光学系を組むセクションを長く取らないといけないため、加速器の配置に余裕がないと中々組む事ができない。

2.2.2 バンチ長測定方法

バンチの長さはビームがほぼ光速で進行している場合、ビームのある場所を通過する時間情報を測定する事で長さを測定できる。通常はビームを金属ターゲットに当てた時に生

じる遷移放射光 (Transition radiation) や偏
向電磁石によって曲げられて出て来るシンク
ロトロン放射光を用いて、その光の長さを測
定する事で、バンチ長を測定する。遷移放射
光やシンクロトロン放射光は基本的な発光原
理は同じであり、発光時間が fs(フェムト秒)
オーダーであるため、[バンチ長／光速] であ
る数十 ps(ピコ秒) よりも十分短く、バンチ長
の測定を可能にしている。これらの光（主に
可視光）を光学系で測定室まで輸送し、光の
長さを測定する。具体的な測定装置は測定例
のところで後述する。

またビームポジションモニターなどのよう
な電極からのピックアップ電流を用い、そのパ
ルス長を測定することでバンチ長測定も行わ
れている。この測定に関しては今回は触れな
いが、詳しくは文献 [5] を参考されて欲しい。

2.2.3 運動量の広がり測定方法

運動量の広がりは運動量分散関数の大きい
所に反映される。これは具体的にはビームサ
イズに反映され、ビームサイズ σ_x は

$$\sigma_x = \sqrt{\beta_x \varepsilon_x + \left(\eta_x \frac{\sigma_p}{p}\right)^2} \quad (31)$$

のように記述され、通常の式 15 で表される
ビームサイズ $\sqrt{\beta_x \varepsilon_x}$ に運動量の広がり σ_p/p
に運動量分散関数 η_x をかけたものの 2 乗和
が入って来る。したがって、この関係をうまく
使う事で σ_p/p を測定する事ができる。具
体的な配置は図 10 のような加速器の配置を行
えばよい。偏向電磁石を通過する際に η_x が
発生するため、その手前で β_x を四極電磁石
で小さくする。偏向電磁石通過後、 β_x が一番
小さいところでスクリーンを置きビームサ
イズを測定する。この時、 $\beta_x \varepsilon_x \ll (\eta_x \sigma_p/p)^2$
あれば、

$$\sigma_x \simeq \eta_x \frac{\sigma_p}{p} \quad (32)$$

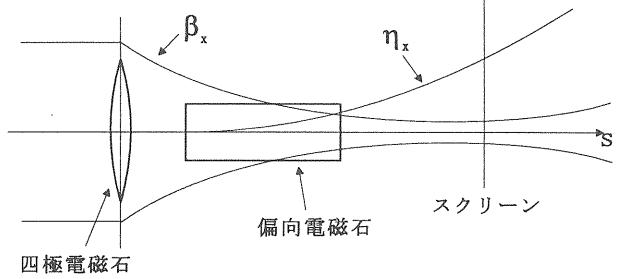


図 10: 運動量の広がり測定例

となり、運動量分散関数が分かっているので、
そこから運動量の広がり σ_p/p が求まる。

3 ビームプロファイル測定

次に具体的なビームプロファイル測定を
KEK-ATF(以下 ATF) でのビーム運転を通じ
て例を挙げていく。

3.1 KEK-ATF

3.1.1 概要

ATF(Accelerator Test Facility) は名前の
示す通り、次期電子陽電子線形加速器 (Lin
ear Collider) のための試験加速器であり、特
に Linear collider 実験に必要不可欠な超低エ
ミッタントビームの生成を目的としている。
[6] 図 11 は ATF 全体像である。約 100m 弱の
前段の S-band 電子リニアックがあり、電子
は 1.28GeV まで加速される。その後、ビーム
トランスポートを経て、ダンピングリングに
入射し、規格化エミッタントで水平方向 (x)
で $\gamma \varepsilon_x = 3.0 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{m}$ 、垂直方向 (y) で
 $\gamma \varepsilon_y = 3.0 \times 10^{-8} \text{ rad} \cdot \text{m}$ の値まで絞られる。絞
られたビームは取り出しラインへと輸送され、
ビームのエミッタントが測定される。[7][8]

Accelerator Test Facility for JLC

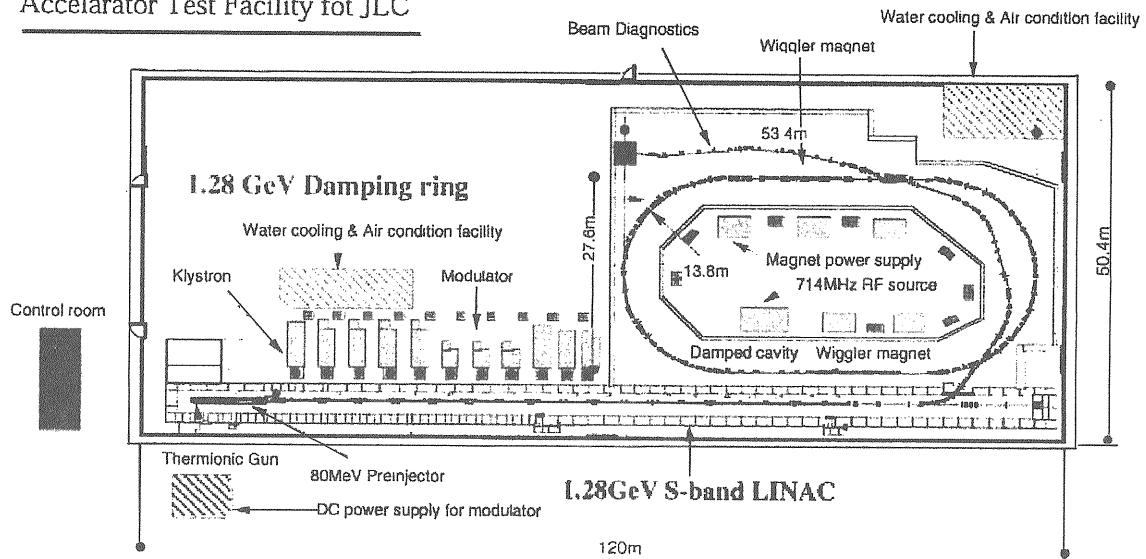


図 11: Accelerator Test Facility の概略図。

3.1.2 S-band 電子リニアック

ATF リニアックは図 12 に示されるように前段入射部の 80MeV プレインジェクター及び 16 本の 3m の S-band 加速管からなっている。まず、前段入射部は熱電子銃、2 つのサブハーモニックバンチャー、バンチャー、そして L0 と呼ばれる S-band の 3m の加速管からなっている。熱電子銃を出た 1ns 幅のビームは図 13 に示されるように 2 つのサブハーモニックバンチャー、バンチャーで 20ps 以下にまでバンチ長が圧縮され、L0 の加速電場の crest にのせられ、電子ビームは 80MeV まで加速される。その後、前段入射診断セクションを過ぎ、四極電磁石(図 12 中の Q□□□と書かれている。) 16 本の S-band 加速管(図 12 中 L1～L16) を交互に過ぎ、最後の加速管の出口ではビームは 1.28GeV にまで加速される。

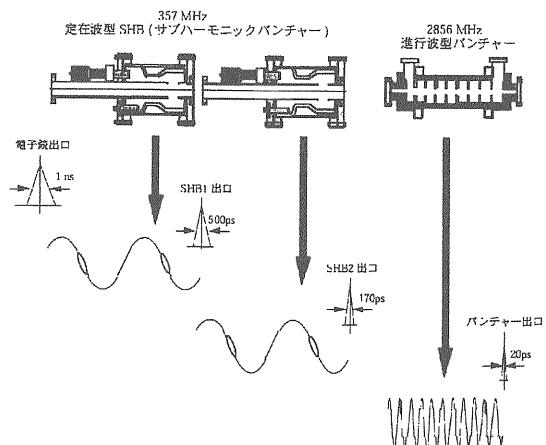


図 13: 前段入射部でのパンチ長圧縮。

ATFリニアック配置図

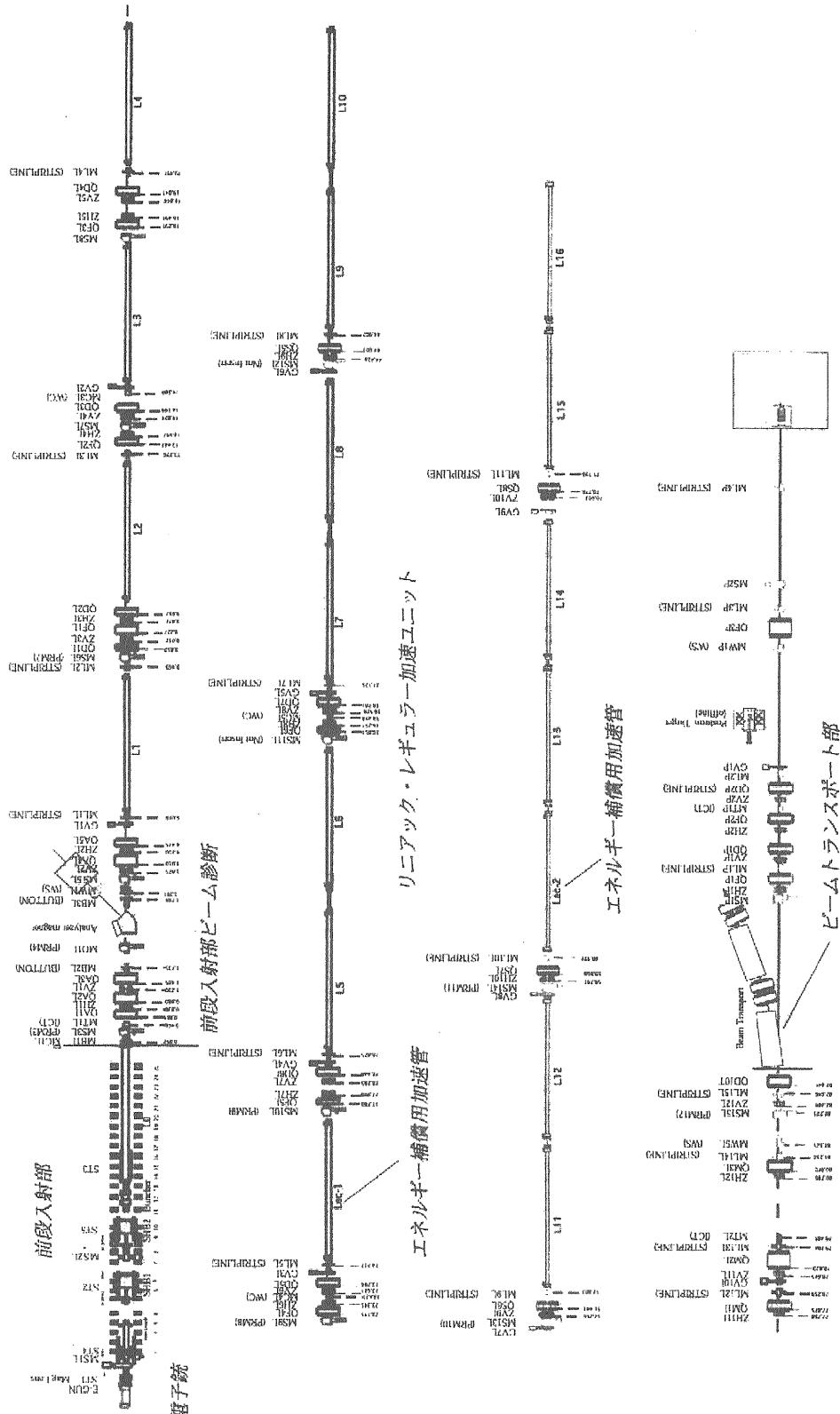


図 12: ATF リニアックの全体図。

3.1.3 各モニターの配置

図 12 でのモニターの具体的配置を紹介する。まず始めにモニターなどは略記されているため、簡単に説明する。(ビーム位置モニター、電流モニターの詳細は [9] を参照。)

- ML(MB) □□ : ビーム位置モニター (Beam Position Monitor)
- MT □□ : ビーム電流モニター (Integrated Current Transfer)
- MS □□ : スクリーンモニター (Screen Monitor)
- MO □□ : 金属板 (OTR 光を発生し、バンチ長を測定)
- MW □□ : ワイヤースキャナー (Wire Scanner)

ビーム位置モニターは前段入射診断部に 3 台、リニアック加速管部（特に四極電磁石が配置されている部分）に計 15 台設置され、ほぼ加速管毎に配置され、ビームの軌道が常時モニターされ、数 $10 \mu\text{m}$ の分解能でビームが制御可能である。電流モニターは前段入射部直後及び、リニアックエンドと 2箇所に設置されており、ビームが前段入射部でロスしていないか、また加速管を通る際に電流値が減っていないかを調べる。リニアック加速管部（これも四極電磁石が配置されている部分）にスクリーンモニターが計 15 台配置され、ビームのプロファイル測定がほぼ加速管ごとに行われる。また前段部ではビームのエネルギーが低く（バンチャ一直後で 2 MeV 程度）、非相対論的領域にあるため、空間電荷効果により、ビームが発散しやすい、この発散を抑えるため、サブハーモニックバンチャー、バンチャー、L0 に渡って、Helmholz coil が巻かれ、磁場をビーム方向にかけることでビームの発散を抑制している。この調整が行われているかを前段入射部及び診断部には計 3 台のスクリーンモニターが置かれ、モニターしている。また同様に前段のバンチングが設計通りおこなわれているかを診断するため、前段入射ビーム診断部に金属板が置かれ、これによるバンチ長測定が行われている。²スクリーンモニター以外でのビームプロファイル測定にもう一つワイヤースキャナーと呼ばれるプロファイルモニターがあり、これにより、より定量的なビームサイズ測定が行われる。（3.2.2 節参照）また前段入射ビーム診断部には Analyzer Magnet と呼ばれる Magnet が置かれており、L0 直後、80 MeV まで加速されたビームの運動量、及び、運動量の広がりを Analyzer Magnet で曲げて測定を行う。運動量、及び、運動量の広がりはリニアック直後、ビームトランスポートラインに入る偏向電磁石直後でも同様に行われる。

これらモニターの配置は多いに越したことはないが、主には設置スペース及び、予算などとの関係上色々削除されやすい。しかしあとで「ここにモニター置いておけば良かった」などと言わぬいためにも設計時に必要なのは

- 出射直後のビームがその後のビームのクオリティを決定するため、極力、出射直後にモニターを充実させるべし。
- 加速部はビームのオプティクスを決める四極電磁石にモニターを充実させるべし。

この 2つを最低遵守すべきであろう。ATF の場合は Test Facility として役目を果たす以上ビームの詳細を知る必要があるため、これら 2つの要求を満たしている。

²リニアック出口にも同様に最近はバンチ長測定が行われている。

3.2 各ビームプロファイル測定

次に具体的な測定器の説明を行い、それらを用いた測定結果を述べる。

3.2.1 スクリーンモニター

スクリーン及び駆動機構 プロファイル測定に通常用いられるモニターとして一番有力なのはスクリーンモニターである。[10] 蛍光板であるスクリーンをビームラインに出し入れして、その発光量分布を見ることでビームの位置やプロファイルを測定する。この方法の特徴は位置やプロファイルなどが2次元情報として、測定可能であり、ビーム診断が瞬時に可能である点である。

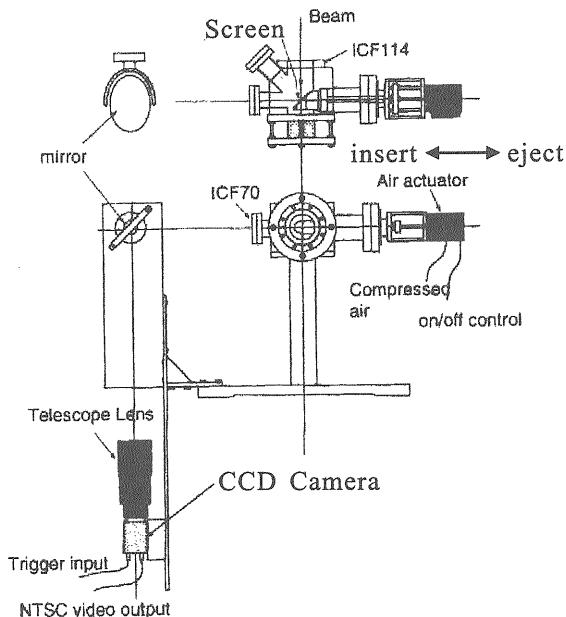


図 14: スクリーンモニターの具体的配置。ビームラインを上から見たもの（上図）。ビームライン正面から見たもの。（下図）

図14はリニアックに設置されたスクリーンモニターの真空容器、発光ガイド、CCD 及び

スクリーンの駆動部分である。スクリーンの駆動に ATF ではエアシリンダーとベローズを用いており、エアアクチュエイターを 100V の電源で on/off することで、スクリーンがシリンドーガイド（ロッド）に沿って出し入れされる。これらの出し入れの精度は駆動装置の工作精度で決まり、ATF では毎回の出し入れに対しても、数ミクロンの精度を保っている。1秒程度で出し入れが行われる。

螢光板スクリーンの物質としては、よく知られているものとして、デマルケスト (Desmarquest) 社の製品で AF995R が用いられ、ATF リニアックでも用いられている。[11] 組成は化学的にはルビーと同じであり、 $(99.5\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CrO}_3)$ である。電子の照射に対し、発光波長が 700nm 近傍の赤色を発する。このようなアルミナセラミックスが用いられる理由としては、

- 他のものに較べ高温に耐える。(1850 度)
- ガス放出が少ないため、超高真空に適している。
- 放射線による変質が少ない。
- 機械的強度が保持されている。
- 市販で存在し、安価である。

などがあげられる。また発光感度のリニアリティに関しても ATF での screen の測定にて使用範囲内ではほぼ一定であることは保証されている。

スクリーンは図 15 のようにビームに対し、斜め 45 度に取り付けられ、スクリーン上には 1mm 間隔でメモリが刻まれている。但し、ビームに対して、CCD が垂直に見る事を考慮し、斜め 45 度方向のメモリはもう一方のメモリの間隔の $\sqrt{2}$ 倍に刻まれている。これらはビームサイズの測定の校正に用いら

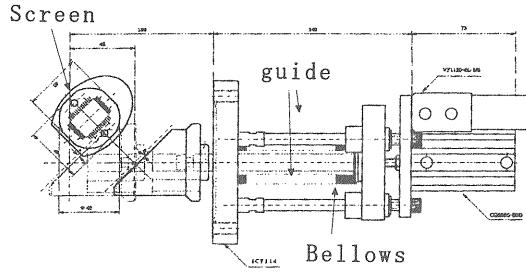


図15: スクリーンモニター本体拡大図。斜め45度にアルミプレートが張り付けられている。それらは圧空式のエアシリンダーで抜き差しができる。

れ、横から光を当てて、メモリを確認するようしている。

またスクリーンに電子ビームを当てた時にスクリーン上ににじみが出る。この効果により、ビームサイズの分解能が悪くなるが、この分解能はスクリーンの厚み程度だと考えられており、厚さ $100\mu\text{m}$ のスクリーンだと分解能が $100\mu\text{m}$ 程度となる。

CCD カメラ及びタイミング スクリーンで発光した光は図14のように一旦ミラーを介し、CCD 上に焦点を結ぶ。これは CCD がビームライン面上の放射線による損傷をうけるのを防ぐためである。実際 ATF での運転でもスクリーンモニター一式のなかで一番損傷を受けるのが、CCD の素子である。1年に数個の単位で交換をよぎなくされるため、極力放射線の当たらないよう心がけている。CCD の前には光学レンズ(凸レンズ)が設けられ、焦点深度を調整し、ピントをあわせる。

CCD 本体を選ぶ際に注意しなければいけない点は以下の点である。

- 1pixel の大きさ。
- 画素数。

- bit 数
- linearity(線形性)
- γ 特性

これは実験の条件にもよるが、通常の CCD は 1pixel が $10\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ くらいなので、リニアックのビームをモニターするには十分の解像度である。また画素数は縦 480 × 横 600 くらいあれば通常の運転では問題ないと思われる。次に bit 数であるが、市販の CCD では大抵が 8bit であり、CCD の強度情報は 256 段階くらいの情報で保持される。これもプロファイルを見る分には問題ないが強度の強い部分と弱い部分を同時に比較するような場合には問題になるであろう。10bit、12bit や 16bit の CCD も当然売り出されているが、bit 数が上がる毎に値段も上ることを考慮して、CCD を選択して欲しい。linearity の確保はプロファイルを見る上でかかせない。これは独自で校正を行えば良いが、強度が高くなるにつれて、電荷の飽和状態に近くなり、linearity が悪くなる。あと重要なパラメータとして、 γ 特性というものがある。市販の CCD などでは肉眼に近い見え方に補正するため、

$$V \propto P^\gamma$$

で示される式にしたがった形で $\gamma = 0.45$ にあわせている。(V はカメラ出力電圧、P は光のパワー) この場合だと linearity は確保されない。 $\gamma = 1$ にして linearity を確保する必要がある。

ATF リニアックは通常 1.56Hz で運転しており、そのタイミングにあわせて CCD に画像を取り込む必要がある。また、極力その画像は次のタイミングが来るまで、無くならないで保持されて欲しいというスキームから我々は、ランダムトリガーがかけれる JAI corp-

ration の CV-M10³ という CCD カメラと画像情報を保持するメモリーユニットを設けた。図 16 に示されようにトリガーはメモリーユニットを介し、CCD にかけられそのタイミング (TRIG) で CCD 上に電荷がチャージされ画像を取得する。前 pixel に電荷がチャージされ、決められた一定のシャッタースピード時間の後、メモリーユニットに画像データを書き込みに行く (WEN)。その画像情報は NTSC 信号で TV などに送られる。通常の CCD は TV の画像と同期を取るため、内部に一定の水平同期シグナル (HD) 及び、垂直同期シグナル (XV1~3) を持つておらず、その周期で画像を取り込み、1HD 毎に XSUB が立ち、電荷が捨てられる。それに対し、我々の場合のランダムトリガーモードでは図 16 下に見られるよう、TRIG のタイミングに合わせて、XSUB が立ち、一旦電荷が捨てられた後、XSUB をシャッタースピードの間一旦停止する。その後、XSG が立ち、電荷が転送され、同時に立った WEN により、メモリーユニットに画像情報が確保されていくことになる。この動作により、画像情報が常にトリガータイミング毎に更新されていくことになる。また CCD のシャッタースピード、ゲインなどは RS232C を通じてコントロールすることが可能である。

エミッタンス測定 画像は最終的にはビデオ信号、デジタル信号を受け取るビデオキャプチャーボード、フレームグラバーボードなどを通じて、パソコン上に取り込まれる。図 17 はリニアック下流 (MS15L) にて取り込まれたスクリーンの画像である。この取り込まれた画像を x 方向 (水平)、y 方向 (垂直) に射影し、

³ 残念ながら、CV-M10 は 2002 年 4 月にて販売を中止した。これと同様の取り込み方式は最近は竹中システム機器株式会社の FC300M にて行うことが可能である。

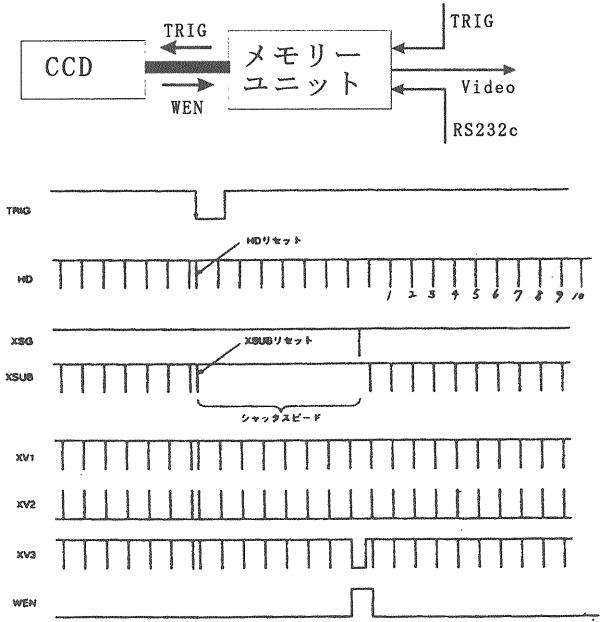


図 16: CCD からの画像情報取得のブロックダイアグラム及びタイミングチャート

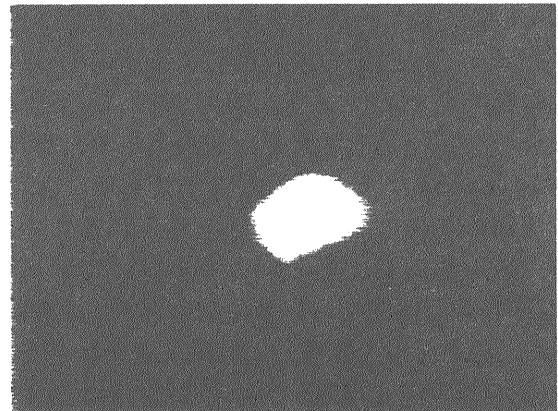


図 17: リニアック下流にてスクリーンモニターによって得られた画像 (MS15L)。

強度分布をプロットし、ガウシアンフィットをかけることで、ビームサイズが得られる。さて図 6 と同じように Q-scan でリニアック下流のエミッタансを測定した。図 18 がその結果である。ここからリニアック下流のエミッタансは $\gamma\varepsilon_x = 2.2 \times 10^{-4} \text{m}\cdot\text{rad}$ 、 $\gamma\varepsilon_y = 2.8 \times 10^{-4} \text{m}\cdot\text{rad}$ であることがわかった。

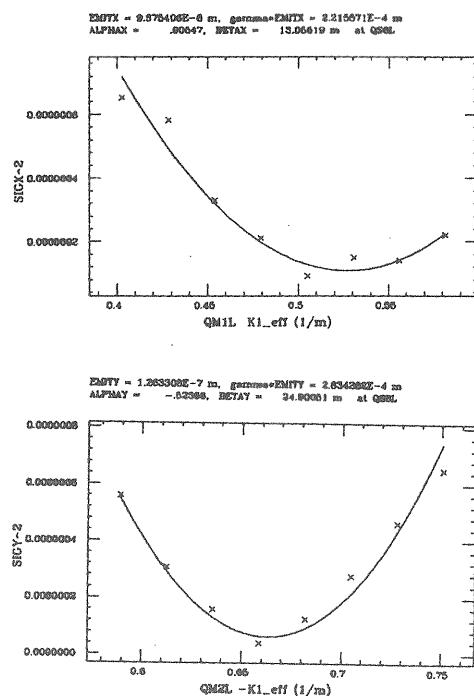


図 18: リニアック下流にてスクリーンモニターによる Q-scan によるエミッタанс測定。上が水平、下が垂直方向の測定を表している。

3.2.2 ワイヤースキャナー

電子ビームのプロファイルを測定するもう一つの方法として、ワイヤーを用いる方法がある。[12] 図 19 ある一定の太さのワイヤーをビームライン上に置き、そのワイヤーを電子ビームの方向に対して、垂直に動かす。電

子ビームとワイヤー（物質）との衝突によって出て来る制動放射光 (γ 線) が出て来る。電子ビームサイズよりワイヤーの太さが小さい場合には出て来る γ 線の量をそのワイヤーの位置関数としてプロットすることでビームのプロファイルが得られる。この方法のメリットは分解能がワイヤーの太さで決められる事であり、スクリーンモニターでは測定できないより小さなビームサイズを正確に測定可能にしている。

ATF の場合を例に挙げよう。図 19 はワイヤースキャナーの測定セットアップである。50 μm , 10 μm のタングステンワイヤーが水平、45 度、垂直の 3 方向に張られており、それらを 0.5 μm ステップのステッピングモーターで斜め 45 度に動かし、ワイヤーを電子ビームに対して、スキャンしていく。電子ビームがワイヤーに当たって出て来るほとんどの γ 線は電子ビームと同方向に出て来るので、理想的な状況としては、図 19 に示すように電子ビームと γ 線は下流の偏向電磁石で分けて、直進する γ 線のみを検出する。検出には光電子増倍管 (Photomultiprior)などを用いるだけでもよいが、エネルギーの低いバックグラウンド γ 線を排除するため、ATF では Air Cherenkov を用いた方法で検出している。具体的には飛んでくる γ 線を一旦 Pb 板に当て、エネルギーの高い電子・陽電子に変換し、その後、電子・陽電子が空気中を通るときに発生する Cherenkov 光を集光し、光電子増倍管で γ 線強度を測定する。余談であるが、リニアックなどが長く前方に置けない時なども S/N 比を考慮することで、斜めの位置に光電子増倍管を置く事も具体的に可能である。

測定例を図 20 に示す。この測定はリニアックではなく、ダンピングリングを通り、取り出しラインで行われたものである。従って、エミッタансが非常に小さいため、ビームサイズが小さく、垂直方向では 10 μm 程度となる。

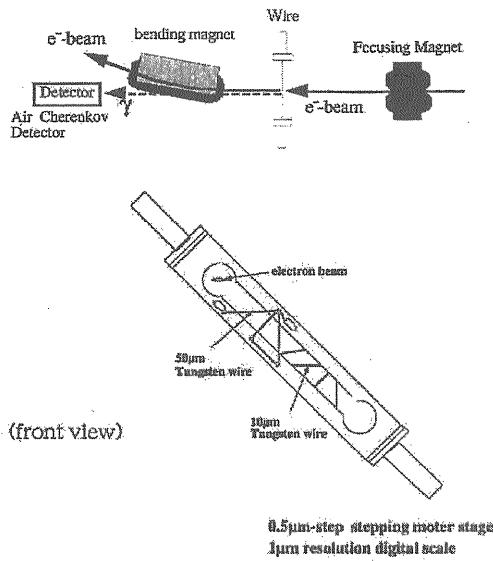


図 19: ワイヤースキャナーのセットアップ及び詳細

図 20 の y, u, x はそれぞれビームの垂直方向、45 度方向、水平方向のビームサイズの測定結果を表している。各グラフの横軸はワイヤーの位置、縦軸は γ 線の量を表す。SIGMA を見ればわかるように、横方向 $100\mu\text{m}$ 程度、縦方向 $10\mu\text{m}$ 程度のビームサイズが測定されている。またななめ 45 度方向も測定することで、ビームの傾きも測定されている。さてここでエミッタスを測定するが、取り出しラインでは合計 5 だいのワイヤースキャナーが入っており、四極電磁石を変化させることなく、phase plot にてエミッタス測定が行われている。図 21 にワイヤースキャナーの位置及び、測定結果をのせる。各位置でのビームサイズからビームの光学系（オプティクス）を用いて、フィットし、そこから位相空間上の楕円の面積を求めている。この測定結果より、垂直方向のエミッタスは $1.6 \times 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{rad}$ という値が測定されて非常に小さいエミッタスがダンピングリングを経る事で達成されていることがわかる。

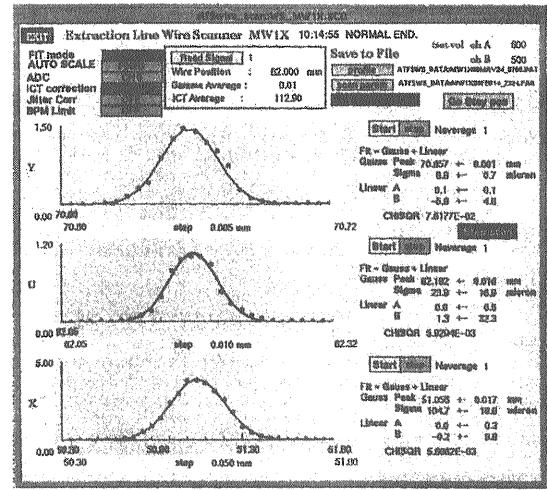


図 20: ワイヤースキャナーでの得られた結果。

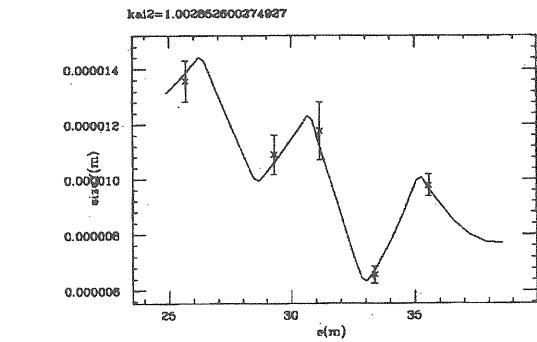
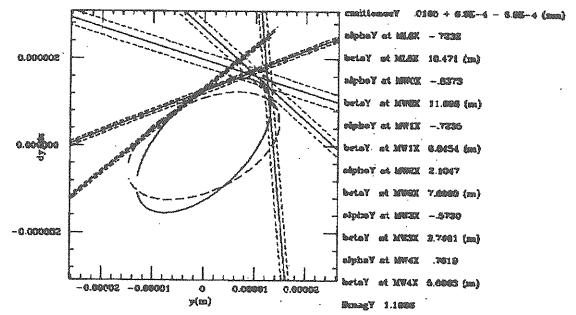


図 21: ワイヤースキャナーでのエミッタス測定。下図はオプティクスのフィットを表し、上図はそれを位相空間上でフィットを行った時の楕円を表す。この面積がエミッタスを表す。

電子・陽電子入射器の8GeVまで加速された電子ビームのビームプロファイルモニタとして8GeVまで加速された後、ワイヤースキナーが4台設置されており、ATF同様、phase plotを用い、オプティクスのマッチングの測定及び、エミッタス測定に威力を発揮している。また検出するものが γ 線であるため、多パンチ運転の際にもアバランシェ型のフォトダイオードなどの時間分解能の良い検出器(<0.7ns)を用いることでパンチ毎のプロファイル測定にも大きな威力を発揮する。[13]

3.2.3 ストリーカカメラ

前に述べたようにパンチ長の測定には主に金属ターゲット(Alなど)から発生するOTR光を用いて詳細な測定がなされる場合が多い。ただ電子ビーム($\sim 20\text{ps}$)と同程度の短パルスの光はフォトダイオード、光電子増倍管などでは、時間分解能が無いため、測定には向きであり、このようなpsオーダーの測定には通常、ストリーカカメラと呼ばれる光測定器で、パンチ長を測定する。図22はストリーカカメラの原理図である。[14] OTR光はレンズ系で集光され光電面で一旦電子に変換される。その後、電子は加速され、蛍光面で到達してまた可視光に変換し、CCDでその光を読み取るのだが、掃引電極により、電子の方向とは垂直に電場を徐々に一定のslopeでかけることで、電子が曲げられ、パルスの先頭にいた光は電場によって曲げられず、蛍光板にあたり、後方の光は強い電場によって曲げられ、蛍光面の上部にあたる。この電場により、パンチ(パルス)の時間情報が蛍光板上では空間の垂直方向の情報として記録されるCCD上でその光量分布を測定する事で、パンチ長が測定できる。

OTR光はスクリーンの光などに較べ、 10^{-5} も光量が弱いため、通常は、蛍光面の手前に

MCPを置き、電子を増幅させ、ゲインをかけている。また熱雑音によるnoiseを抑えるため、冷却CCDなどを用いることもある。時間情報が空間情報に焼き直されるため、入って来る光が太いと分解能が悪くなる。従って初段のスリットで光の幅を狭めて、光電面に入射する。大体このような作業を行ったのちの時間分解能は数ps以下であり、20ps程度のパンチ長の測定には十分である。時間軸の校正はパルス長の分かっている単パルスレーザー(σ で30psくらい)のものを用いて、校正を行う。

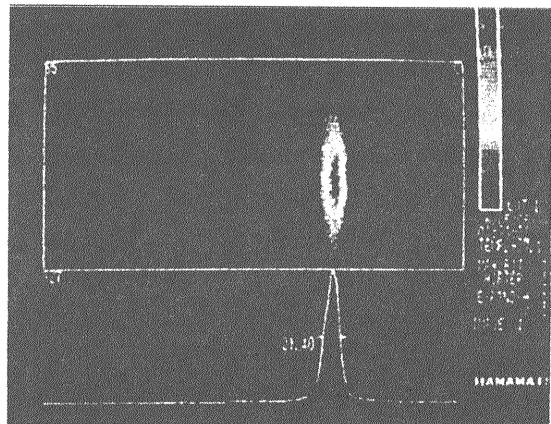


図 23: ストリーカカメラによるパンチ長測定。

実際ストリーカカメラを使用する場合、掃引電極にかけるトリガーは電子ビームが来る前(見るレンジにもよるが大体~数十ns前)にかける必要がある。パンチ長を測定するには電子銃のトリガーをかける前の同期信号をもらってきて、掃引用に用いるか、もしくはトリガーを1パンチ遅れさせて取るかする必要がある。またストレージリングなどのSR光などを用いる時は周回毎にパンチ長測定が行われるため、毎回データが重ならないように横方向にさらに掃引を行い、パンチ長測定を行う。もちろんこの横方向にかけるトリガーも電子ビームよりも先にもらう必要がある。図23はス

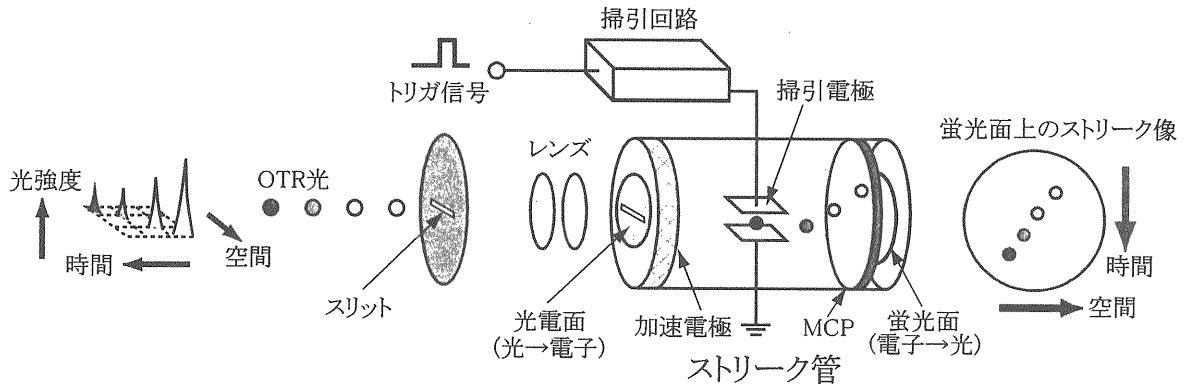


図 22: ストリークカメラの原理。

トリークカメラを用いたバンチ長測定の結果である。この測定は前段入射部の MO1L で行われたものである。ストリークカメラは浜松フォトニクスの C5680 シリーズを用いた。横軸が時間軸に対応し、得られた画像の射影の分布が電子の時間分布をしめす。FWHM でバンチ長 (22ps) が得られており、前段のバンチャーパーティで理想通りバンチングされていることがわかる。

3.2.4 運動量の広がり測定

2.2 節の運動量測定方法で示したように運動量の広がりは偏向電磁石などの直後などの運動量分散関数の大きいところでビームサイズに反映される。従って、偏向電磁石がないリニアックでは前段入射部ビーム診断部で Analyzer Magnet を置き、電子ビームを曲げた後、スクリーンモニターを置き、ビームサイズを画像として取り込む。またこの電磁石の磁場 B がわかっているので、 $p[\text{GeV}/c] = 0.3B[\text{T}]\rho[\text{m}]$ の関係からエネルギーの測定も行う。

リニアック下流からビームトランスポートに入る手前の偏向電磁石でも具体的な運動量の測定が可能である。

図 24 はリニアック後のビームトランスポー

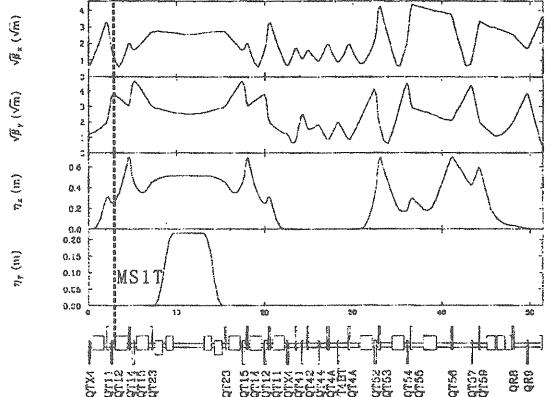


図 24: リニアック後のビームトランスポートラインのオプティクス。上から順に β_x 、 β_y 、 η_x 、 η_y を表す。一番下の絵はビームラインの電磁石の配置を表し、左端が上流すなわちリニアック直後、右端がリングの入射部分を表す。

トラインのオプティクスであり、図 24 の偏向電磁石直後に MS1T というスクリーンモニターが設置されている。図 24 の一段目を三段目を見てもらえばわかるように β_x が小さく、 η_x が大きいところに置かれている。リニアックで加速された 1.28GeV の電子ビームは規格化エミッタンスで大体 $\gamma\varepsilon_x = 2 \times 10^{-4}\text{m}\cdot\text{rad}$ 程度なので、 $\gamma \sim 2500$ を考えると $\beta_x\varepsilon_x \sim 8 \times 10^{-8}$ それに対し、 $\sigma_p/p \sim 1\%$ を考慮す

ると、MS1T の場所では $\eta_x = 0.26\text{m}$ より、 $\eta_x \sigma_p / p = 2.6 \times 10^{-3}$ から $\beta_x \varepsilon_x \ll (\eta_x \sigma_p / p)^2$ を満たしており、式(32)が使える。

図 25 は MS1T でのスクリーンでの測定結果である。この画像では横方向が運動量の広がりを示しており、図の左がエネルギーの高い方向を示している。バンチング及び加速の波にうまく運ばれて、リニアック下流まで電子ビームが運ばれていれば、この横の広がりが小さくなるのだが、図 25 をみれば分かるように運動量の低い方向に若干尾を引いているのがわかる。この尾を引いている部分が加速位相にのっていない部分である。

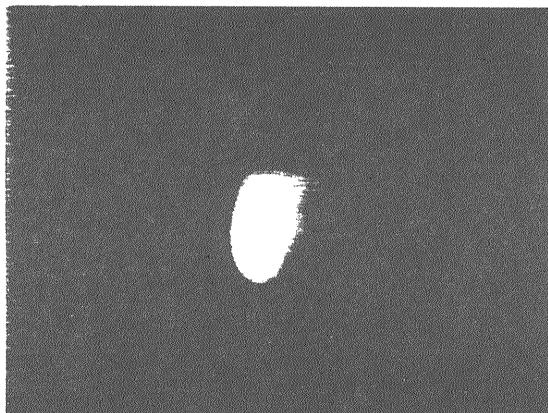


図 25: MS1T によるプロファイル測定。横方向が運動量の広がりに対応している。

3.2.5 フィードバック・調整

これら、モニターを用いて、ビームの状態を見ることで加速器の調整を行うことが目的である。また予想しないビームの不安定性が発見されたりした時もモニターを用いて不安定性の原因を探るためにも詳細な測定は極めて重要な意味を持って来る。

まず、ビームがなかなかリニアックを通らない場合などが、多々存在する。その時はバンチ長を測定したり、運動量の広がり、エネ

ルギーの測定などを行い、まず、バンチングができているか?を確認したり、バンチングされていなかつたら、前段のバンチャーなどの位相を調整し、バンチングを行う。また加速管の位相やタイミングを変えてエネルギーの調整を行ったりする。そうすることで、ビームのロスが無く、リニアックを通ってくれる。またビームが理想のオプティクスを通っていない場合は加速管の壁にぶつかっている場合などが考えられる。その場合はプロファイルやビームの位置を確認し、理想軌道を通すよう持つて行く作業が必要となる。このような調整の自動化などの細かい部分は [15] を参照して頂くことにして、このような作業を経て、ビームの調整後、リニアックを出たビームはダンピングリングに入射し、放射冷却過程を経て低エミッタンスビームが取り出される。

3.3 低エミッタンスビームプロファイル測定

電子リニアックでのビームプロファイルに関しては前節でのモニターで大体の調整が行われる。但し、ATF のように低エミッタンスを目的とした場合にはそれに特化したモニターが必要となってくる。すなわち加速器の設計により必要とされるモニターが隨時変わつて来る。このように将来的にビームモニターは低エミッタンス化が必要となった場合を考慮し、次にリニアックを通った後、ダンピングリングに入った低エミッタンスビームプロファイルの測定をいくつかの例を上げながら具体的に説明していくことにする。

3.3.1 SR 干渉モニター

ストレージリングなどではビームサイズモニターとして放射光 (SOR 光・可視光) の発散角からビームサイズを測定する SR モニ

Layout of the SR-interferometer

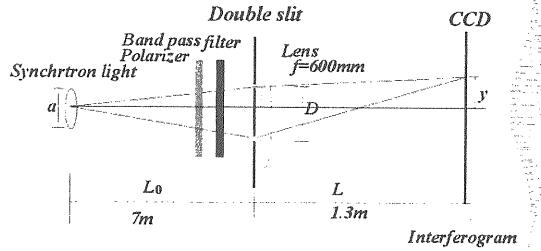


図 26: SR 干渉モニターの原理図

ターが用いられている。(参考文献[18]を参照されたし。) 但し、ビームサイズが小さくなるにつれ、SOR 光はビームサイズに対応した空間干渉性を持つようになる。従来の SR モニターではこのような空間干渉性が回折限界として測定できるビームサイズの下限を決めており、ATF のダンピングリングのような $10\mu\text{m}$ 程度のビームサイズ測定は SR モニターでは測定不可能であった。しかし、このような光の波動性をむしろ効果的に使い、より小さなビームサイズを測定可能にしたのが、SR 干渉モニターである。このモニターの原理は van Cittert-Zernike の定理[19]、すなわち空間干渉度が光源の強度分布のフーリエ変換で与えられるという原理を用いてビームモニターとして応用している。[16][17]

図 26 は測定原理図である。polarizer、Band pass filter を通じてダブルスリットを通じた後の干渉縞を CCD で見る。ビームサイズ σ_{beam} は干渉縞のコントラストである visibility $\gamma = \frac{V_{max}-V_{min}}{V_{max}+V_{min}}$ を用いて、

$$\sigma_{beam} = \frac{\lambda L_0}{\sqrt{2\pi}D} \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)} \quad (33)$$

で与えられる。 λ は波長、 L_0 はビームとダブルスリットの距離、 D はダブルスリットの間隔を表す。visibility が大きいほど、ビーム

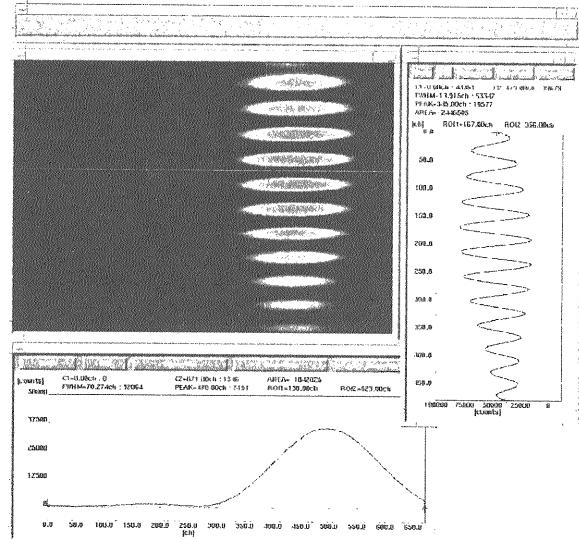


図 27: SR 干渉モニターの測定結果

サイズが絞られていることを意味し、ビームサイズが完全に点光源である場合、(すなわち $\sigma_{beam} = 0\mu\text{m}$) では SOR 光は空間的にコヒーレントな状態となり、CCD 上にはくっきりとした干渉縞(つまり $\gamma = 1$) が見られる。図 27 に測定結果を載せる。

図 27 は垂直方向のビームサイズ測定結果であり、画面の横への射影が干渉縞のプロファイルを示す。ATF では場所にもよるがこのような測定で水平方向 $40\mu\text{m}$ 弱、垂直方向 $7\mu\text{m}$ 弱のビームサイズが常時モニターされており、ビームサイズの位置やサイズの変化を通じてダンピングリングの状況をモニターすることが可能である。ただ、SOR 光を反射するミラーの熱変形、ミラーの炭素汚染、選択波長の広がりなどが測定上の問題であり、変形や波長の広がりなどを考慮したり、補正関数をいれたりすることで、正確なビームサイズの測定を行うように工夫をしている。[20]

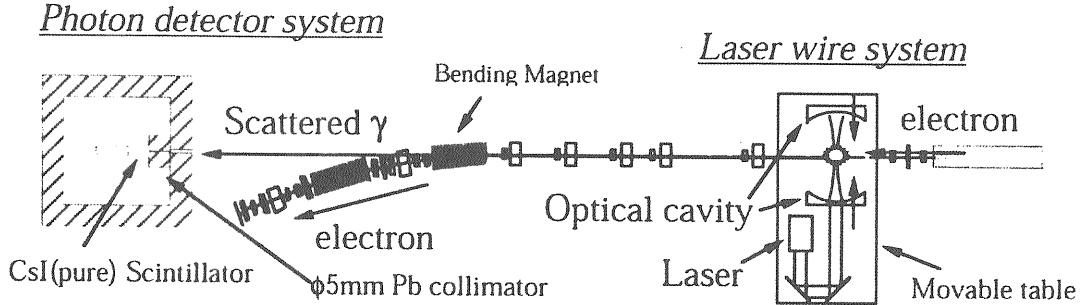


図 28: Laser wire 全体図。

3.3.2 レーザーワイヤー

通常のワイヤスキャナーは周回するビームに対して破壊的であり、リングのように周回するビームの測定に対して適応することは不可能である。そこでダンピングリングの中のビームサイズを測定するためにレーザーワイヤービームプロファイルモニターを新たに開発した。レーザーを仮想ワイヤーとして用い、電子ビームに対して垂直に入射し、コンプトン散乱光を下流の検出器で測定することでリング内のビームサイズを測定する。レーザーと電子の相互作用が弱いためこのような非破壊測定を可能にしている。パルスレーザーを用いたものが SLAC には存在する [21] が、ダンピングリングでの測定は一周毎にレーザーと電子を当てる考え、CW(Continuous wave) レーザーを用いている。[22]

セットアップを図 28 に示す。光標的であるレーザーはビームサイズと同程度 ($10\mu\text{m}$ 程度) のサイズを実現し、しかもレーザー強度は 10W 程度と非常に強くなければならない。それらを実現可能にしているのがこのモニターの心臓部である光学共振器 (Optical Cavity) である。光学共振器は 2 枚の高反射ミラーから成り、laser を一方のミラーから入射することで、ビームサイズの縮小とレーザー強度の増幅を同時に可能にしている。この光学共振

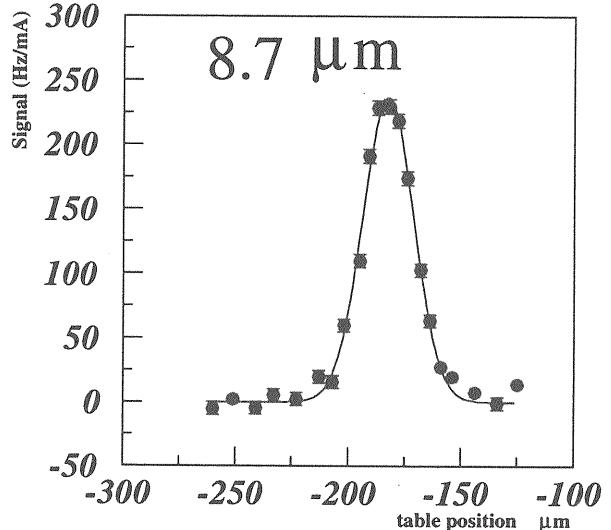


図 29: レーザーワイヤーでの測定結果。横軸がレーザーワイヤーの位置、縦軸がコンプトン散乱光のカウント数 (Hz/mA)。

器内部で実現される仮想ワイヤーをレーザーワイヤーと呼び、それを電子ビームに対し、垂直に動かすことにより、ビームのプロファイルを測定することができる。図 29 はレーザーワイヤーによるビームサイズ測定の結果である。clean なプロファイルが得られており、 $8.7\mu\text{m}$ のビームサイズが測定された。これらの測定から各電子ビームの強度毎に垂直エミッタスに焼き直したもののが図 30 である。測定は 2 回行なわれ、それらがほぼ ATF の de-

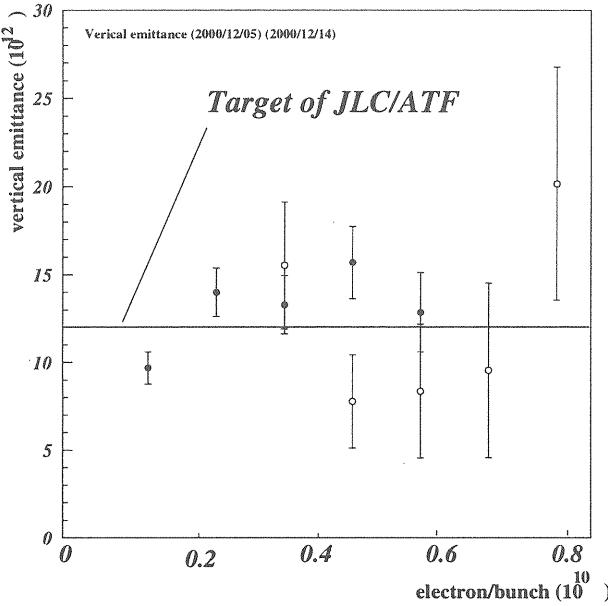


図 30: レーザーワイヤでの垂直エミッタンス測定。横軸がダンピングリングのビームカレント、縦軸が垂直エミッタンスを表す。

sign の値に到達していることが実現されている。[23] この測定では誤差の範囲内で垂直エミッタンスが電子ビームに寄らず、Flat な結果を示しているが、今後、レーザー強度上げ、測定を行なうことで、詳細なふるまいを調べることが可能である。

3.3.3 OTR モニター

スクリーンモニターでのプロファイル測定は測定限界が数 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 程度であるため低エミッタンスピームサイズ測定には向きである。但しこのような画像として、瞬時に測定可能であるシステムはビームオペレーションには非常に有効な手段である。OTR 光を用いたプロファイルモニターはそのような測定限界が測定する光の波長レベルであるため、スクリーンモニターで考えられる測定限界以下の測定を可能にしている。[24] [25]

図 31 は ATF の取り出しラインに設置され

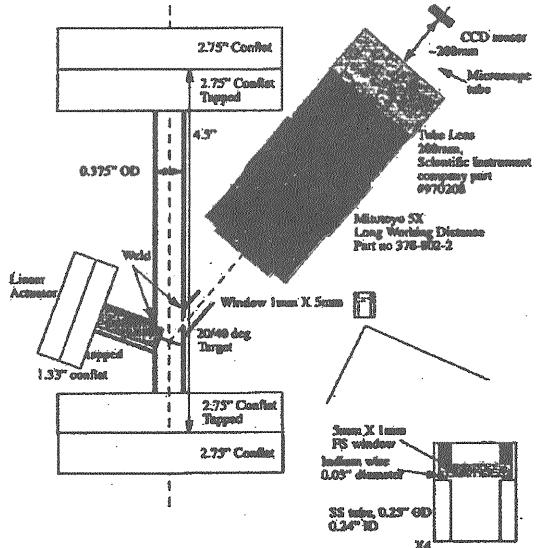


図 31: OTR モニターのセットアップ

た OTR モニターのセットアップである。左から金属ターゲットを出し入れできるようになっており、金属面で発光した OTR 光を右ななめ 45 度から取り出し、凸レンズで集光させ、CCD でプロファイルを測定する。ターゲットは表面がよく磨かれた Cu や Be を用いている。OTR 光は発散角が $1/\gamma$ で広がるため、得られたプロファイルの測定を正確にするため、凸レンズを極力発光点のすぐ脇に設置するようなシステムになっている。

図 32 は測定結果である。OTR の光を集光が CCD 上でイメージを結んでいることがわかる。この測定結果から、垂直方向は $7 \mu\text{m}$ 程度のビームサイズが測定されている。このモニターで Q-scan によるエミッタンス測定を行った結果ほぼ取り出しラインにあるワイヤースキャナーとの結果と一致したため、OTR 光を用いたモニターも低エミッタンスモニターとして有効であることがわかる。

ただし、問題点もいくつか存在する。ひとつは発光量がスクリーンモニターなどに較べ

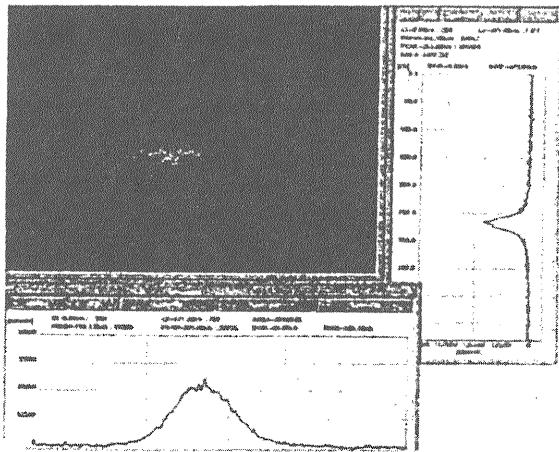


図 32: OTR 光によるビームサイズ測定結果。

て、非常に少ないことである。もう一つは電子ビームの密度が高い場合、金属と電子ビームとの衝突による熱負荷のため、表面がただれてしまい、ある程度使用しているとプロファイルが乱れてしまうことである。熱負荷を減らすために原子番号の小さい Be を用いて、測定が行われているが、やはりある程度のダメージはさけられないようである。このような問題を解決すべくターゲットには直接当てず、ターゲットと電子ビームとの回折波 (Diffraction radiation) を用いた非破壊型のビームサイズモニターとして、ODR モニターの開発も ATF では進められているがまだビームサイズ測定までは至っていない。[27] 今後このような問題を解決していくことがこのモニターの重要な使命であろう。

4 様々なモニターの開発・応用

世の中には色々な加速器が存在する。それに応じて、測定すべき対象が異なる。それらのビームプロファイル測定に対しても、できれば、

- ワンショットで

- 多次元のプロファイルが
- 高精度で
- より小さなビームサイズに対して
- 非破壊的に

測定できるのが、究極の目的である。これらの全てに応じることができるかはアイデアと実際作った時のモニターの‘でき’による。ここでは様々な電子・陽電子加速器に応じたビームプロファイルモニターの開発・応用をいくつか紹介する。

4.1 レーザー干渉モニター

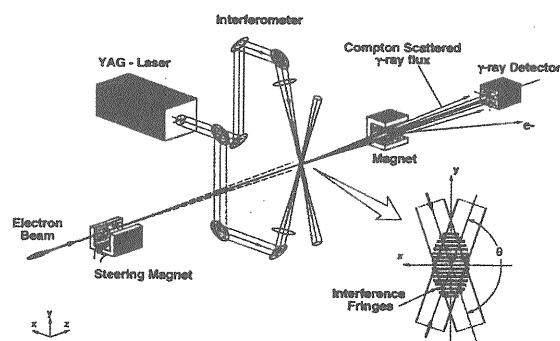


図 33: レーザー干渉モニターのセットアップ

このモニターは SLAC の linear collider の最終収束系を模した Test Facility である FFTB の電子ビームサイズを測定するのに使われたモニターである。FTTB では 2 マイルの加速器をまっすぐ延長して収束磁石系を並べ、電子ビームを収束し、水平方向 $1\mu\text{m}$ 、垂直方向 60nm 程度の微小スポットサイズを生成する。レーザ干渉モニターはこのナノメータサイズのビームサイズを測定可能にしたいわば夢のモニターである。[26]

測定のセットアップを図 33 に示す。Nd:YAG レーザー (1064nm) から出た光を

ハーフミラーで2つに分け、それぞれ上下から電子ビームラインで重ね合わせる。この重なりにより干渉縞が生じ、そこを垂直に電子ビームが抜けていく。電子ビームとレーザーが当たった場合はそのコンプトン散乱光が前方の γ 線検出器で測定される。上流に用意した電磁石にて電子ビームの軌道を干渉縞の横切る方向にスキャンしながら、パルス毎の γ 線量を測定する。ビームサイズが干渉縞の間隔 $\lambda/2$ より小さい場合はスキャンにより、増減の激しい γ 線の分布が得られるのに対し、ビームサイズが大きい場合は干渉縞の明暗を”ビーム”が見ることはないため、増減のない平均化された γ 線量が得られる。

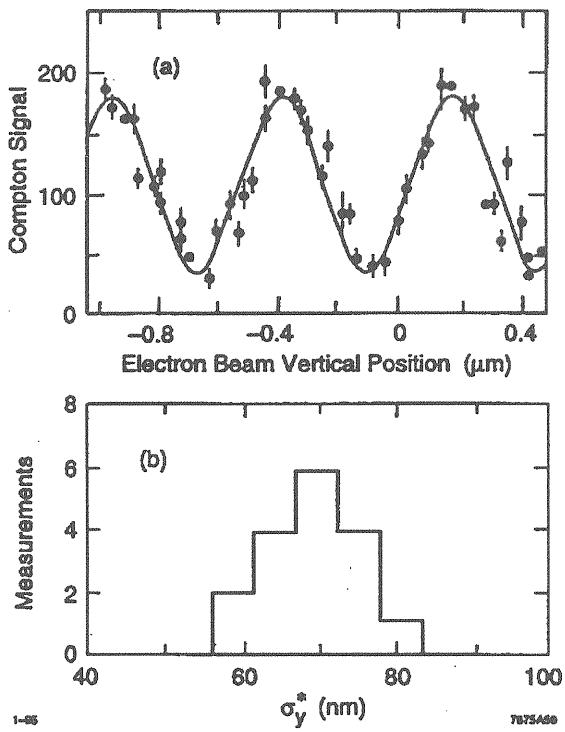


図 34: 測定結果。(a) が測定の一例であり、干渉縞が見える。(b) はそれらの測定の3時間に渡る測定の結果である。

具体的には電子ビームの位置をy、サイズ

を σ_y^* 、レーザーの交差角を θ レーザーのy方向の波数を k_y とすると γ 線のカウント数 N_γ はyの関数で

$$N_\gamma \propto 1 - \exp\left(-\frac{(2k_y\sigma_y^*)^2}{2}\right) \cdot \cos\theta \cdot \cos 2k_y y \quad (34)$$

と表される。電子ビームをガウシアンビームと仮定するとこの visibility $V = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}}$ は、

$$V = |\cos\theta| \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}(2k_y\sigma_y^*)^2\right) \quad (35)$$

で表される。これも一種のフーリエ変換であり、レーザー干渉を通じてビームの強度分布がフーリエ変換される。測定結果を図34に示す。(a) の横軸がビームの位置であり、縦軸がコンプトン γ 線数である。クリアな干渉パターンが見られている。ここから逆算してビームサイズを求めたものが(b) のグラフである。大体 70nm のビームサイズが測定されているのがわかる。測定原理はレーザーワイヤと同じであるが、レーザーワイヤはレーザー波長より大きな領域しか使えないのに対し、干渉縞を用いることで、波長以下の領域すなわちレーザー波長の $\lambda/20$ 程度の領域まで測定が可能になり、極微のビームサイズの測定を可能にいる。

4.2 XSR モニター

放射光リングの光輝度化に向けて、低エミッタンスモニターの必要性が高まっている。ただし、光輝度放射光リングのモニターとしてはレーザーワイヤなどを除いては今のところ SR 干渉モニターを用いる以外に正確な測定を行うことができない状況である。回折限界を解消するためこのような干渉モニターを用いるが、モニターする波長を可視光より短くすることで、回折限界を無くす方法もある。こ

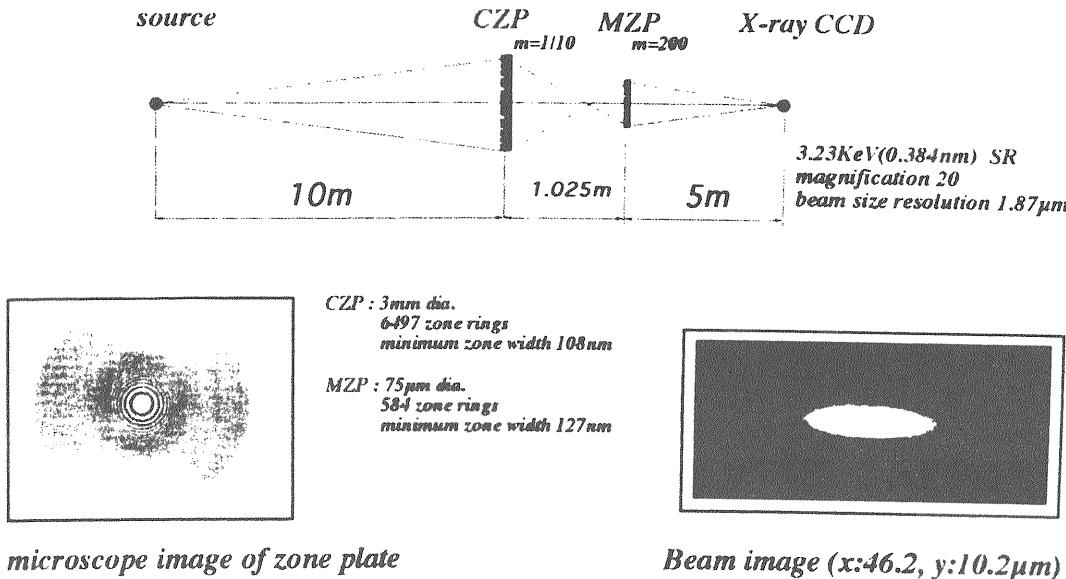


図 35: XSR モニターのセットアップの概念図、及び測定結果。

のような発想から考案されたものがこの XSR モニターである。[28]

図 35 は ATF ダンピングリングに設置された XSR モニターの測定時のセットアップの概念図及び、測定結果である。このモニターの心臓部は 2 枚の Fresnel Zone Plate(FZP) である。3keV 程度の X-ray を用いてビームサイズの像を得るために、2 枚の FZP を X-ray の光学系として用い、X 線 CCD カメラ上に像を結ぶ。Fresnel Zone Plate は NTT のものを用いた。(図 35 左下が FZP の顕微鏡写真である。) ナノテクノロジーの発展のおかげで、市販で FZP が購入でき、これにより、発光点のサイズに対して 20 倍の增幅率を得ている。図 35 は X 線 CCD 上にイメージされた像である。倍率 20 倍を仮定した時の測定したビームサイズは水平方向 46μm、垂直方向 10μm のビームサイズが測定されている。ビームサイズの測定限界は CCD の 1pixel が 20μm 程度だとしても、実際のビームは 1/20

の 1μm の解像度で測定可能である。また波長領域が 3keV であるため、回折限界によるビームサイズの測定限界も 1μm 以下であり、このような低エミッタントビームの測定を可能にしている。このモニターの利点は SR 干渉モニターが 1 次元の情報しか得られないのに対し、スクリーンモニターのように 2 次元の情報としてデータを取得できる点である。したがって、ビームの傾きなどの情報が瞬時に得られる。また測定時間数十 ms と短いため、温度変化などのドリフトなどの効果が入りにくい。但し、光学系のアライメントが非常にシビアであるため、モニターの設計時には設置の精度を最初から追い込み測定する必要がある。今後、実用化が期待されるモニターであろう。

4.3 3次元トモグラフィー

ビームプロファイルを様々な角度からもつと詳細に見るために最近では、トモグラフィーの方法を当てはめてみることがある。トモグラフィーは医学などで良く用いられて方法で、CT-scanなどで被写体（人間の脳など）の断面を色々な角度から見ることで被写体の立体像を作り出す。この方法をビームにも当てはめようというものである。細かい説明は[29][30]を見て頂くことにして、簡単な説明だけ掲載する。

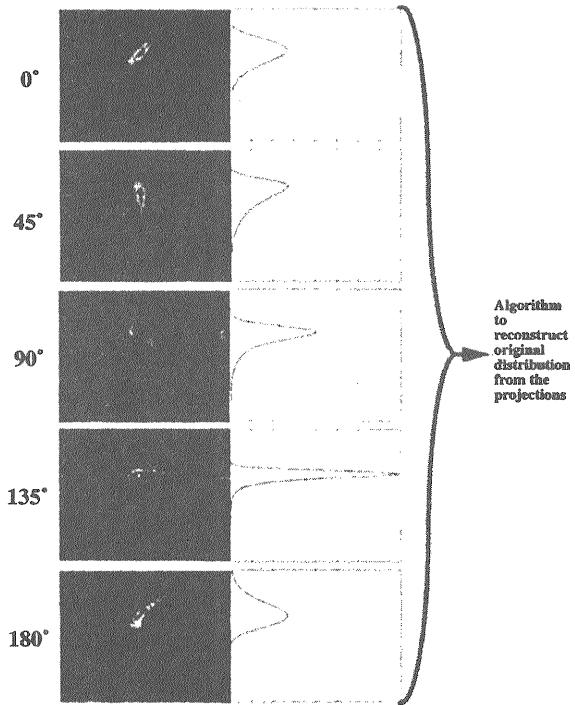


図 36: 横方向のトモグラフィーの例

横方向の2次元のプロファイルを用いたトモグラフィーの例（測定結果）を図36に示す。Q-scanと同様、四極電磁石の強さを変えて、スクリーンモニターなどで測定を行い、phaseの動きを追っていき、それらを組み合わせて、位相空間上でのビームの振舞に焼き直す。この方法だと、測定したものが橢円であろうが、

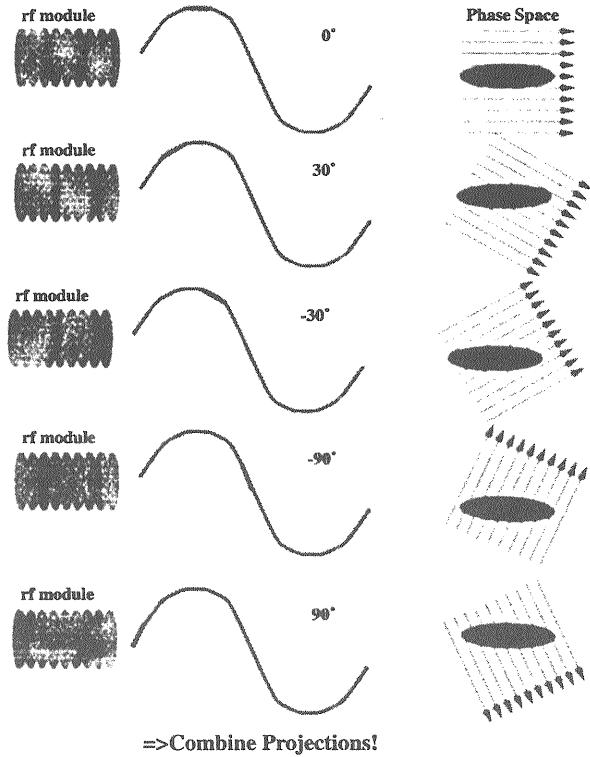


図 37: 縦方向のトモグラフィーの例

なんであろうが、すべてのビームの形を位相空間上のイメージに焼き直せる。画像処理の技術とコンピュータの処理能力が発達した現在ではこのような方法が詳しいビームの振舞を調べるのに適していると言えよう。

縦方向のプロファイルを用いたトモグラフィーも考えられている。図37は縦方向トモグラフィーの例である。ビームをスクリーン手前の加速管で色々な加速phaseに乗せ、ビームの縦方向の振舞を色々な角度から見る。ビームの縦と横の同時のエミッタノス測定も可能であり、FELなどで必要なスライスしたエミッタノスなども調べられる。

5 最後に

ビームプロファイル測定を ATF の測定を通じて基礎的なところから話してきたつもりであるが、随所に分かりにくい所があったかもしれません。また今後の様々な加速器に対して、現段階で開発が進められているモニターを紹介してきたつもりである。これら紹介したモニターがそのまま今後設計する様々な加速器のモニターとして有益に使用できるかは要求するビームと”相談”しながら設計を進めていくしかない。ただ、読者が今後新たな放射光リングや電子源・陽電子源などの開発あるいは加速管の開発などで、測定する”目”を見失わないよう本書が、参考になれば幸いである。またいつの日か本書に書かれているモニターよりも使用のいいモニターを開発して頂けるよう期待している。

最後にモニターの簡単なまとめが載っている教科書は少ないが参考文献として [31] を紹介して筆を置きたいと思う。

謝辞

東京大学物性研究所、柿崎明人施設長始め、軌道放射物性研究施設の皆様、特に中村典雄助教授、高木宏之助手には極紫外高輝度光源計画の設計で多忙な最中、本稿を通じて、改めて加速器の勉強をする機会を設けて頂いたことに感謝します。また浦川順治助教授、早野仁助教授はじめとする KEK-ATF 全スタッフ及び学生の皆様には ATF の運転を通じて数多くのことを学ばせ頂いた。特にモニターに関しての詳細は内藤孝氏に様々な助言を頂いた。また校正には原田健太郎助手に手伝って頂いた。感謝の意を捧げる。最後にこのような機会を頂いた榎本収志主幹、及び、鎌田進教授にこの場を借りてお礼を申し上げる。

参考文献

- [1] 大西幸喜, ”单粒子力学”, OHO 2000
- [2] 鎌田進,”ビーム物理学入門”, OHO 1997
- [3] 神谷幸秀, ”加速器の原理”, OHO 1984
- [4] H.Wiedemann, ”Particle Accelerator Physics” 2nd ed., Springer-Verlag , New York, 1999
- [5] 家入孝夫,”KEKB のビーム不安定性”, OHO 2000
- [6] F.Hinode et.al. (edit), “ATF Design and Study Report”, KEK Internal 95-4 (1995)
- [7] T.Okugi et.al., ”Evaluation of extremely small horizontal emittance” Phys. Rev. ST Accel. Beams 2 022801 (1999)
- [8] K.Kubo et.al., ”Extremely Low Vertical-Emittance Beam in the Accelerator Test Facility at KEK” Phys. Rev. Let. No.19 Vol.88 (2002)
- [9] 諏訪田剛,”ビーム計測 1 ”, OHO 2002
- [10] 榎本収志,”電子リニアックでのビームモニター”, OHO 1986
- [11] Y.Hashimoto, et.al., ”Beam Profile Monitor Using Alumina Screen and CCD Camera”, INS-T-511 August (1992).
- [12] M.C.Ross et.al., ”Wire scanners for Beam Size and Emittance Measurement at the SLC”, PAC 1991 San Francisco (1991)

- [13] H.Hayano et.al. "Wire scanner for multibunch beam", 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, Osaka (2001) to PRST-AB. see also KEK Report No.2002-5.
- [14] 浜松フォトニクス株式会社、"ストリーカカメラハンドブック", see <http://www.hpk.co.jp/>
- [15] 古川和朗、上窪田紀彦,"制御系、タイミング系",OHO 2002
- [16] T.Mitsuhashi et.al. , 'Synchrotron Radiation Monitor for KEKB B-Factory' KEK Proceedings 99-24 (2000) p.134
- [17] T.Mitsuhashi et.al. 'Measurement of Beam size at the ATF damping ring with the SR Interferometer'. EPAC 1998 Stockholm (1998)
- [18] 三橋利行, "光モニター",OHO 1993
- [19] P.H.van Cittert, Phisica, 1 201 (1934)
- [20] J.W.Flanagan, "Correction of mirror distortion effects in beam-size measurement using SR interferometer", 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, Osaka (2001)
- [21] M.C.Ross et.al., "A High Performance Spot Size Monitor", LINAC 96 Proceedings p.308 (1996)
- [22] H.Sakai et.al., "Measurement of an electron beam size with a laser wire beam profile monitor" Phys. Rev. ST Accel. Beams 4 022801 (2001)
- [23] H.Sakai et.al., "Measurement of a small vertical emittance with a laser wire beam profile monitor" submitted
- [24] J.Bosser et.al. "Optical transition radiation Proton beam profile monitor", NIM A238 p45 (1985)
- [25] T.Naito et.al, "Beam Profile Measurement by OTR Monitor" リニアック研究会 (1994)
- [26] T.Shintake, "Beam-Profile Monitors for Very Small Transverse and Longitudinal Dimensions using Laser Interferometer and Heterodyne Techniques, KEK-Preprint 96-81 (1996)
- [27] A.P.Potylitsyn,"Transition radiation and diffraction radiation. Similarities and differences", NIM B145 p169 (1998)
- [28] N.Nakamura et.al., "Design of a beam size monitor using Fresnel Zone Plates", PAC 2001 Chicago (2001)
- [29] K.N.Ricci, T.I.Smith , "Longitudinal electron beam and free electron laser microbunch measurements using off-phase rf acceleration" Phys. Rev. ST Accel. Beams 3 032801 (2000)
- [30] S.Kashiwagi et.al. , "Photo-electron beam diagnostics using tomography technique", 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, Osaka (2001)
- [31] A.Chao and M.Tigner (edit), 'Handbook of Accelerator Physics and Engineering', World Scientific (1998)