

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月25日現在

機関番号：82118

研究種目：研究基盤（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22604012

研究課題名（和文）

Coded Apertureを用いた高速X線ビームプロファイルモニターの研究

研究課題名（英文）

Research on Coded Aperture-based high-speed x-ray beam profile monitors.

研究代表者

フラナガン ジョン (FLANAGAN JOHN)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号：00321539

研究成果の概要（和文）：

ATF（先端加速器試験装置）のATF2取り出しビームラインでX線 Coded Aperture（符号化口径）を用いて低エミッタンスビームのサイズ測定に成功した。ATF2ビーム取り出しラインの上流にある偏向電磁石をX線源とするX線ビームラインを建設し、Coded Apertureを通して検出されたX線のパターンを解析することにより、ビーム調整で絞ったビームサイズが最小で $7.5\mu\text{m}$ 程度であることが判った。これはCoded Apertureを利用して測定したビームサイズとしては世界最小記録である。

研究成果の概要（英文）：

We proposed to investigate the use of coded-aperture imaging techniques for x-ray beam profile monitoring of beams with transverse beam sized below  $10\mu\text{m}$ . At the ATF2 extraction line, we built an x-ray beam line using the final upstream bending magnet as an x-ray source, and successfully measured beam sizes down to  $\sim 7.5\mu\text{m}$ , the smallest beam size achievable through tuning of the extraction line optics. This beam size represents a new world record for the smallest beam size measured using x-ray coded aperture optics. We also developed parallel-processed code for analysis of beam profiles from coded aperture images, including non-Gaussian components.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：時限

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：加速器、x線、モニター、ビームプロファイル、ビーム診断、Coded Aperture、高速、高分解能

## 1. 研究開始当初の背景

SuperKEKB、ILC等の将来の超低エミッタンス加速器のルミノシティチ

ューニングには極小ビームのサイズ測定が必要不可欠である。ビーム軌道が変動するなかで、正確なビームサイズを測るにはバ

ンチ毎・ターン毎のビームサイズの瞬時の測定が必要となる。従来の加速器でのビームサイズの精密測定は測定器の高分解能化あるいは高速化によって可能となっていた。しかしながら低エミッタンスビームでバンチ毎・ターン毎のビームサイズを測るには高分解能で且つ高速の測定方法が必要となる。この条件を満たす測定方法の一つが Coded Aperture Imaging 法(符号化口径結像法、CAI 法)である。

CAI 法は、もともと X 線天文学の分野で開発された結像法である[1]。CAI では入射光子があるパターンマスクを通った後の画像の重なりをマスクのパターンの位置情報をもとに解く (deconvolution する) ことで元の画像を得ようとするものである。

CAI で良く使用されているマスクのパターンの一つに Uniformly Redundant Array (URA) がある[2]。このマスクのパターンは擬似乱数に基づいて作られており、利点として開口部が 50% と大きく入射光子を効率的に使えるということがあげられる。モノクロメータが不要なので広いスペクトルの光を利用できる。URA マスクのもう一つの利点は空間分解能が比較的良いことである。ピンホールカメラと同程度かそれよりもやや良い分解能で単発 (単バンチ、単ターン) の測定が可能になることも期待される。

我々はコーネル大学の CEsR TA 加速器でこの CAI 法のビームサイズ測定への応用を検討・開発してきた[3]。CESR TA では 1 バンチ単発測定で約 20  $\mu\text{m}$  程度の垂直ビームサイズの測定に成功し、この方法の有効性を証明した[4]。このビームサイズは当時の CESR TA で到達しうる最小ビームサイズであると思われていた。しかしながら、その後 CESR TA ではさらにビームチューニングが進み 11  $\mu\text{m}$  程度のビームサイズの測定にも成功している[5]。

#### 参考文献

- [1] R.H. Dicke, *Astrophys. Journ.*, 153, L101, (1968).
- [2] E.E. Fenimore and T.M. Cannon, *Appl. Optics*, V17, No. 3, p. 337 (1978).
- [3] W. Flanagan et al., "X-RAY MONITOR BASED ON CODED-APERTURE IMAGING FOR KEKB UPGRADE AND ILC DAMPING RING," *Proc. EPAC08*, Genoa, 1029 (2008).
- [4] J.W. Flanagan et al., "PERFORMANCE OF CODED APERTURE X-RAY OPTICS WITH LOW EMITTANCE BEAM AT CESR TA," *Proc. PAC09*, Vancouver, (2009).
- [5] J.W. Flanagan, et al., "MEASUREMENT OF LOW-EMITTANCE

BEAM WITH CODED APERTURE X RAY OPTICS AT CESR TA," *Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference (IPAC10)*, Kyoto, May 2010.

## 2. 研究の目的

シミュレーションの結果によると、CAI 法で CESR TA の最小ビームサイズよりもさらに小さい、半分以下のビームサイズの側手も可能ではないかという予想がたてられている。そこで今回の研究の主目的を 10  $\mu\text{m}$  以下の小さいビームサイズの測定の可能性の追求と実用化へ向けての検討の推進とした。

## 3. 研究の方法

10  $\mu\text{m}$  以下のより小さいビームサイズ測定法の研究開発のためには CESR TA よりも更に小さいビームを供給できるビームラインが必要となった。ATF (先端加速器試験装置) の ATF2 取り出しラインでは 5~10  $\mu\text{m}$  までビームを絞れることから本研究では ATF2 取り出しビームラインを利用することにした。

ATF2 で使用したパターンは 5  $\mu\text{m}$  のピクセル  $\times$  47 個からなる (因に CESR TA では 10  $\mu\text{m}$  ピクセル  $\times$  31 個のものを、SuperKEKB では 10  $\mu\text{m}$  ピクセル  $\times$  59 個のものをを使う計画である)。図 1 に ATF2 で使用したマスクパターンのを示す。ATF2 で使った URA パターンは 2  $\mu\text{m}$  厚の SiC/SiN 基板を 4  $\mu\text{m}$  厚のタンタルでマスクしたものである。CESR TA でも同じような材質のものを使ったが、マスクのパターンは異なっている。

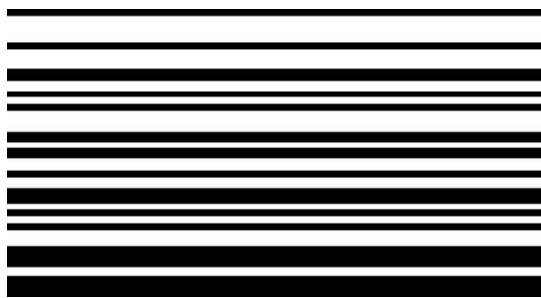


図 1 : ATF2 で使用した 47 ピクセルの URA マスクのパターン。

ATF2 での実験を開始するにあたり、まず X 線取り出し用のビームラインを建設することから始めた。次に、X 線のソースポイントの下流に 200  $\mu\text{m}$  厚のベリリウム窓を設置し、窓の外に URA マスクを自動ステージ上に設置した。マスクの下流には、カプトン窓付きの真空に引いたビームパイプを設置した。そのビームパイプの直下流には検出器

を自動ステージに載せて設置した。X線ソースポイントからマスクまでの距離は 1.43m、マスクから検出器までの距離は 8.33mであることから、このビームラインでの像の拡大率は 5.8 倍となる。



図 2 : ATF2 で建設した X 線取り出し用のビームライン。

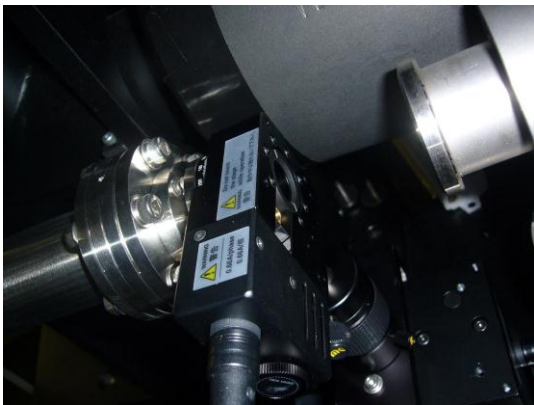


図 3 : 自動ステージ上に設置した URA マスク。

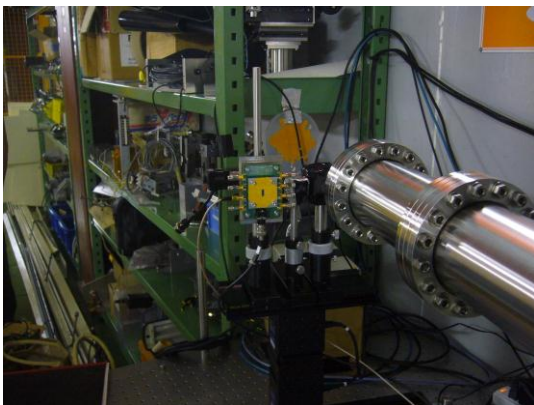


図 4 : 自動ステージに載せて設置した検出器。

X線源として取り出しビームラインの上流にある偏向電磁石を利用した。このソースポイントでの光学は通常の ATF2 運転では必ずしもビームサイズを絞るようにはなっていない。しかしながら ATF 光学グループの協力を得てビームサイズを従来の設定の約 3 分の 1 に絞るような光学を設定してもらい、この光学設定で実験を行った。ATF コミッショニングチームのご協力とご尽力に改めて感謝する。

検出器はピクセル高  $50\mu\text{m}$  の InGaAs pixel のアレイからなる。これは CestrTA での実験と同様のものである。ATF2 ではシングルピクセルを垂直方向に  $50\mu\text{m}$  ステップでスキャンした。垂直方向のビームのジッターはビームサイズの約 1/10 と充分小さかったことからゆっくりとしたスキャンでもビームプロファイル測定は可能であった。

スキャンの結果をいろいろなプロファイルのビームのシミュレーション結果と比較し、最も近いもの (nearest match) を正とした。ビームプロファイルを制御するパラメタとしては、ガウス分布のビームの場合、ビームポジションとビームサイズがある。Nearest match のパラメタを探す上で 3 2-コア・パラレルプロセッサコンピュータを用いた。

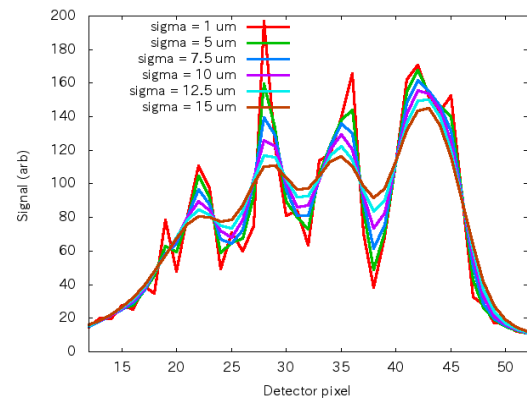


図 5 : ATF2 検出信号とビームサイズの関係 (シミュレーション)。

本研究の初年度には、X線ビームラインを建設し装置のアライメントまでを行った。が、引き続き予定されていた実験は東日本大震災の発生により中断され、実際の実験は次の年に行われることとなった。この実験で観測されたビームの大きさは約  $15\mu\text{m}$  (IBIC12 で発表) であった。その後更に光学系の改良やビームチューニングが進みビームサイズを  $7.5\mu\text{m}$  にまで絞ることに成功している。

#### 4. 研究成果

ATF 加速器の ATF 2 取り出しラインで X 線 Coded Aperture (符号化口径) を用いて低エミッタンスビームのサイズ測定に成功した。ATF 加速器のコミッショニングチームに X 線の発光点でのビームサイズを従来の 3 分の 1 に絞ってもらい、その発光点からの X 線を Coded Aperture を通して測定器で検出した。検出器でのパターンを解析して求めたビームサイズは一番小さい場合で  $7.5 \mu\text{m}$  (IBIC13 で発表予定)、と従来の光学設定でのビームサイズの 3 分の 1 となっていることが確認された。

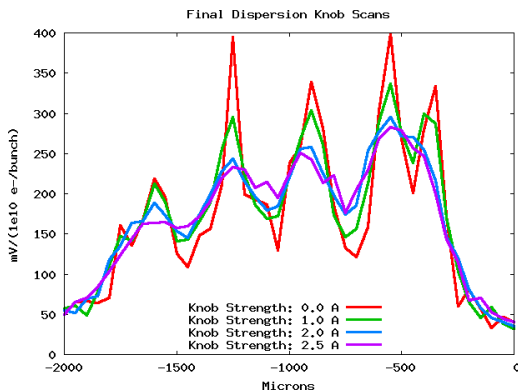


図 6 : ATF2 で検出器で観測したパターンの例 (実際のデータ)。ディスパージョンノブでビームサイズを変更し、異なるビームサイズでのデータを収集した。

この測定結果は Coded Aperture 測定法を用いて測定したビームサイズとしては世界新 (最小) 記録となる。この成功で  $10 \mu\text{m}$  以下のビームサイズの測定という本研究の最大の目的を達成することが出来た。

データ解析の方法についても工夫と改良を積み重ね、更に発展させた。32 コアの CPU を用いることにより計算処理スピードを上げ、より速くしかもより精度良く検出器で観測した信号から元のビームプロファイル (サイズ、位置、及び非ガウス成分含み) を求めることが出来る様になった。このシステムを用いて CEsrTA で収集したデータも再度解析してみた。データの中に電子雲による head-tail 不安定性で発生する可能性ある非ガウス成分を探したが、非ガウス成分が現れたという証拠は見つからなかった (ECLLOUD12 で発表)。これは CEsrTA で観測している電子雲によるビームブローアップのメカニズム解明に対する重要なヒントになる。このような高速ビーム解析システムを SuperKEKB でも応用する予定である。

今後、引き続き ATF2 ビーム取り出しラインにて実験を続け、システムのパラメタの最適化 (例えばピクセルの幅) を行って行きたい。CesrTA 及び SuperKEKB でも同様のシステムでビームサイズ測定を行う予定で ATF2 での研究は非常に有用なものとなる。また、現在開発中の SuperKEKB 用シングルバンチ、シングルショットのデータ読み出しシステム及び新型検出器を ATF 2 でテストすることについても現在検討中である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 6 件)

(1) 「FIRST MEASUREMENTS WITH CODED APERTURE X-RAY MONITOR AT THE ATF2 EXTRACTION LINE」

J.W. Flanagan, M. Arinaga, H. Fukuma, H. Ikeda, T. Mitsuhashi, G.S. Varner.

1<sup>st</sup> International Beam Instrumentation Conference (IBIC2012)、つくば市、2012年10月1日。

(2) 「Refined analysis of electron-cloud blow-up data at CesrTA using Coded Aperture and Pinhole X-ray Beam Size Monitor data」

J.W. Flanagan

The 5<sup>th</sup> Electron Cloud Workshop (ECLLOUD12)、イタリア・エルバ島、2012年6月8日。(口頭発表)

(3) 「DIAGNOSTICS FOR ULTRA-LOW EMITTANCE BEAMS」

J.W. Flanagan

2<sup>nd</sup> International Particle Accelerator Conference, (IPAC2011)、スペイン・サンセバスチャン、2011年9月7日。(口頭発表)

(4) 「OBSERVATION OF ELECTRON CLOUD INSTABILITY EFFECTS AT CESRTA USING CODED APERTURE X-RAY MONITOR」

J.W. Flanagan<sup>#</sup>, M. Arinaga, H. Ikeda, K. Ohmi, M. Billing, G. Dugan, M.A. Palmer, D.P. Peterson, N. Rider, K. Sonnad

第 8 回日本加速器学会年会、つくば市、2011年8月3日。(口頭発表)

(5) 「SINGLE-SHOT RESOLUTION OF X-RAY MONITOR USING CODED APERTURE IMAGING」

J.W. Flanagan, M. Arinaga, H. Fukuma, H. Ikeda, T. Mitsuhashi, J.S. Alexander, M.A. Palmer, D.P. Peterson, N. Rider, G. Varner

10<sup>th</sup> European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators (DIPAC2011)、ドイツ・ハンブルグ、2011年5月18日。(口頭発表)

(6) 「SuperKEKB 用 X 線ビームプロファイルモニタの検討」

John W. Flanagan, Mitsuhiro Arinaga, Hitomi Ikeda, Hitoshi Fukuma, Ken-ichi Kanazawa, Toshiyuki Mitsuhashi, Gary S. Varner

第7回日本物理学会年会、姫路市、2010年8月4日。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

Flanagan John (フラナガン ジョン)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授  
研究者番号： 00321539

(2) 研究分担者

三橋 利行 (Mitsuhashi Toshiyuki)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授  
研究者番号： 00181933

福間 均 (Fukuma Hitoshi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授  
研究者番号： 40150007

池田 仁美 (Ikeda Hitomi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教  
研究者番号： 80370071

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

バーナー ゲアリー (Varner Gary)  
ハワイ大学・物理・天文学科・准教授