

# 博士学位論文審査要旨

2021年 12月 18日

論文題目: A Scintillation-Detection-Type Non-Destructive 2-D Beam Profile Monitor Using a Gas Sheet

(ガスシートを用いた蛍光検出による非破壊型二次元ビームプロフィールモニタ)

学位申請者: 山田 逸平

審査委員:

主査: 理工学研究科

教授 和田 元

副査: 理工学研究科

教授 粕谷 俊郎

副査: 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門

J-PARC センター 加速器ディビジョン ディビジョン長 金正 倫計

要旨:

本論文は、薄いガスシートを形成して高エネルギー粒子ビームに対して斜め方向に入射し、ビーム-ガス粒子相互作用により発生する光子放出の空間分布から、ビームの断面形状を求めるための実験・計算手続きについて研究した成果を纏めている。大強度陽子加速器施設においては、数億電子ボルトを越えるエネルギーの陽子ビームが真空容器内部を高速で飛行する。周辺部を飛行するビームの一部は本来の軌道から外れ、加速器真空容器の内壁に衝突して加速器を放射化し、加速器の運転を妨げる原因となる。そこで細いワイヤー状の電極を挿入することにより、ビーム断面形状を測定して運転を最適化しているが、このビーム形状測定はビーム強度を落として行う必要があるため大強度運転時の情報を正確に与えない。また、ビームの一部が失われるため、下流側のビーム計測が不可能となるなど、種々の問題があった。申請者はガスシートと高エネルギービーム相互作用による発光分布に着目し、イメージインテンシファイアを用いることにより十分な統計精度にもとづいたビーム形状の再構築方法を提案し、機器の校正、画像取得から強度分布計算までの一連の手続きを提案し、これらが有効であることを明らかにした。構築した計測システムと解析手法を用いれば、これまで不可能であった大強度での高エネルギー粒子ビームの断面形状測定が容易に行えるのみならず、むしろ大強度ビームに対してより高い計測精度が得られることを示した。原理的に高精度解を得ることが可能であることを証明した上で、申請者発案による関数フィットを用いれば、ビーム断面形状が短時間に得られることを実証した。さらにガス導入を行うことにより下流側に輸送されるビーム品質を向上する効果について確認したうえで、構築した計測システムを応用して、ビームの時間発展を追跡できることも併せて報告している。

本研究の成果は、単なる高エネルギービームの空間分布形状の測定に留まらず、ビーム断面形状の時間発展にもとづいた大電力加速器科学研究を新たな段階に押し上げるものとして高く評価できる。よって本論文を、博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分価値が高いものと認める。

## 総合試験結果の要旨

2021年 12月 18日

論文題目: **A Scintillation-Detection-Type Non-Destructive 2-D Beam Profile Monitor Using a Gas Sheet**  
(ガスシートを用いた蛍光検出による非破壊型二次元ビームプロフィールモニタ)

学位申請者: 山田 逸平

審査委員:

主査: 理工学研究科

教授 和田 元

副査: 理工学研究科

教授 粕谷 俊郎

副査: 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門

J-PARC センター 加速器ディビジョン ディビジョン長 金正 倫計

要 旨:

本論文の提出者は同志社大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士課程（前期課程）を2019年3月に修了し、2019年4月に本学理工学研究科電気電子工学専攻博士課程（後期課程）に入学し、現在、在籍中である。

本論文の主たる内容は「表面と真空」、62巻、(2019)、および *Physical Review Accelerators and Beams*, **24**, 042801 (2021)に掲載済みであり、既に十分な評価を受けている。2021年12月18日午後3時より二時間に亘り、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれた。講演後種々の質疑が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。公聴会終了後、審査委員による学力確認のための口頭試験を実施したところ、論文提出者の十分な学力を確認することができた。また、語学試験にも合格し、博士課程在学中に国際会議に第一著者として六件の論文を提出して自ら英語で発表を行うなど、高い英語運用能力を有するものと認められた。以上論文提出者の専門分野における学力、ならびに語学力は十分であることを確認した。よって総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目：A Scintillation-Detection-Type Non-Destructive 2-D Beam Profile Monitor Using a Gas Sheet

(ガスシートを用いた蛍光検出による非破壊型二次元ビームプロファイルモニタ)

氏名：山田 逸平

要旨：

本論文は大強度かつ低エネルギービームのプロファイル診断技術の確立を目的として、ガスシートを用いた非破壊型ビームプロファイルモニタを開発し、その有効性を実証したことを記すものである。このモニタはビームライン上にシート状に形成したガスを導入し、ビームとの相互作用で生じる光子を、光子増幅器を介して二次元画像として取得するものである。モニタの出力として得られる画像データはビームプロファイルに直接一致するわけではないため、得られる画像データに適切な解析を実施することでビームプロファイルを得る。このような方式のモニタ開発は世界的に注目されており、多数の開発例が報告されている。しかし、得られるデータから実際のビームプロファイルを再構成する定量的な解析手法の研究は不足している。本研究では特にプロファイル解析手法の確立を軸として以下の研究を行った。

まず、ガスシートモニタの開発について示す。ガスシートは希薄気体力学または真空工学に基づいて形成される。希薄気体力学は、無衝突条件と余弦則に従う反射過程によって特徴付けられる。ガスシート生成機を設計するために、この特徴を考慮したガスフローシミュレーションコードを開発した。シミュレーションによると、厚みが薄く幅が広い矩形のガス流路を用いることで、シート状のガス密度分布を実現できることが明らかとなった。そこで、ガスシート生成機を、長さ100 mm、幅50 mm、厚み0.1 mmの矩形流路をとした。また、ガス密度分布の計算結果から排気系を決定した。さらに、ガスシート分布の裾を形成する余分な成分をビームラインに導入せず事前に排気するために、カバーチャンバを設計した。シミュレーションによると、カバーチャンバの使用により、ビームラインに導入されるガス流量は72%削減される。シミュレーションに基づいて実際にガスシートモニタ系を開発し、各部のガス流量及びガスシート生成機のコンダクタンス測定を行った。その結果、ガスシート生成機に導入したガス流量のうち、77%がカバーチャンバにて排気されており、シミュレーションと一致した。一方コンダクタンス測定結果に関して、希薄気体力学の領域ではコンダクタンスはガス圧によらず一定値をとるが、実測結果はシート生成機上流側圧力に対して大きく変化した。この結果は測定したガス圧領域では、ガスシート生成機内での粒子間衝突が無視できないことを示唆する。つまり、希薄気体力学のモデルでうまく記述できない領域となっている可能性がある。

得られるデータからビームプロファイルを再構成するための解析手法を確立するために、ガスシートモニタを用いたビームプロファイル測定の原理を定量化した。ビームプロファイル信号から画像データへの変換の過程で、励起分子の運動、光学レンズのフォーカス点以外からの信号入力、及び光子増幅器による分解能低下によって、信号分布が拡散する。これらの効果は全て、点広がり関数を用いた積分式により表現することができる。これらをまとめると、ビームプロファイルと得られる画像の信号分布は三重積分方程式で結ばれる。この時、ガス密度分布や点広がり現象を記述する関数は、ガスシートモニタの応答関数として一つの関数で定義することができる。つまり、この応答関数を実測して積分方程式を解くことで、ビームプロファイルの定量的な解析

が可能となる。

ガスシートモニタの応答関数の測定手法はプロファイル測定の原理式である積分方程式から考案した。積分方程式によると、ガスシートモニタにデルタ関数的な細いビームを入力することで、出力として応答関数を得ることができる。そこで、3 keV の細い電子ビームを用いて開発したガスシートモニタの応答関数を実測した。さらに、この測定手法を応用して、ガスシートの厚み方向のガス密度分布の測定を行った。その結果、ガスシート生成機の導入圧力増加に対して、ガス分布が太くなることが明らかとなった。この結果はコンダクタンス測定の結果と一致しており、ガス分子間衝突により分布が広がったと考えられる。

以上により設計・開発してオフライン上でテストしたガスシートモニタを、J-PARC RFQ テストスタンドに導入して3 MeV 60mA の大強度・低エネルギー水素負イオンビームのプロファイル測定を行った。その結果、ガスシート生成機の導入圧力で0.1 Pa~1 kPa の範囲でビームガス相互作用により生じた光子の検出に成功した。また、1 kPa 導入においては、50us のビーム1パルスでの光子信号測定に成功した。この測定結果に対して前述のプロファイル再構成手法を適用して、大強度ビームプロファイルの解析を実施した。プロファイル解析手法は、積分方程式の取り扱いに対して、近似手法と厳密手法を提案した。近似手法は応答関数をデルタ関数的なガス分布を持つシートとして仮定し、その他の効果は無視するものである。この仮定により、積分方程式は単なる変数変換に単純化される。この手法は得られたデータを直接解析するため解析速度が速く、リアルタイム解析が可能な点でユーザー利用ビーム運転やビームコミッションングでの利用に適している。しかしながらこの手法は応答関数を近似して取り扱うため、再構成されるプロファイルに誤差が生じる。その誤差を解析的に見積もると、開発したモニタでは真のプロファイルに対して、垂直直方向のプロファイルが24%広がって測定される、という結果を得た。実際にJ-PARC ビームの解析を行うと、垂直方向のプロファイルは20%広がって測定された。一方で厳密手法による解析は、実測された応答関数を用いて積分方程式を解くものである。応答関数は四変数関数であるため計算コストが非常に高く、一つの二次元プロファイルの解析に数時間を要した。この手法は原理的には実験誤差の精度で正しいプロファイルを再構成できるため、ビーム力学の研究など、高精度なプロファイル解析が必要な場合に有効である。実験誤差として、特に応答関数測定における、電子ビームプロファイルのデルタ関数からの差が支配的である。電子ビームプロファイルがデルタ関数と比べて太くなるにしたがって、測定される応答関数は実際の応答関数と比べて広がったものとなる。その広がった応答関数を用いてプロファイル解析を行うと、再構成されるプロファイルは真のプロファイルより細くなる。この効果を解析的に検証した結果と、実際にプロファイル解析した結果は概ね一致した。以上から、考案した応答関数測定手法を含むプロファイル解析手法は説明可能な誤差の範囲でプロファイルを再構成することを実証した。

ガスシートモニタは非破壊型モニタの一種であるが、ビームラインに余分なガスを導入することによるビームへの影響が懸念される。そこで、ガス導入に対するビーム電流値の変化及びビーム位相空間分布の変化を調査した。その結果、ビームラインへのガス導入流量に対して、ビーム電流値の減少率は比例関係を示した。また、ビームの位相空間分布については、ビーム位相空間分布の面積を表すパラメータであるエミッタンスがガス流量の増加に伴って減少する結果を得た。エミッタンスの現象はビーム品質の向上を示すため、ガスシートモニタの利用は必ずしもビームに悪影響を及ぼすわけではないことを明らかにした。

最後に、開発したモニタの応用利用として、ビームプロファイルの時間発展を測定した。RFQ のような高周波加速器をビームが通過すると、ビームが作る電場によって加速電場が弱められ、ビームが不安定になる現象が報告されている。この現象を低減するために加速空洞には、加速電場を補正するフィードフォワード制御機能が搭載されている。この制御はプロファイルの安定化に対しては最適化されていないため、実測して調べる必要がある。そこで開発したガスシートモニタを応用してプロファイルの時間発展を測定した結果、ビームプロファイルは時間的に変化し

ており、フィードフォワード機能のオン・オフによりプロファイルに変化が見られることを明らかにした。

以上より、本研究では、ガスシートモニタを新たに開発し、定量的なプロファイル解析手法を考案して、その有効性を大強度ビームのプロファイル測定により実証した。さらにガスシートの導入によりビームエミッタンスが減少することを明らかにし、開発したモニタの新たな利点を発見した。