

令和 3 年 6 月 19 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11934

研究課題名（和文）非線形ビーム集束の一般化による自在なビーム強度分布変換の実証

研究課題名（英文）Demonstration of various transformations of the beam intensity distribution by the generalization of nonlinear focusing

研究代表者

百合 庸介（Yuri, Yosuke）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部・上席研究員（定常）

研究者番号：90414565

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、加速器で生成される荷電粒子ビームについて、従来法では成し得なかったビーム強度分布の多様な変換を実証することを目的として、非線形ビーム集束に関する研究を多面的に実施した。多重極電磁石の非線形力を受けたビームの運動を理論解析およびシミュレーションにより明らかにするとともに、8極電磁石等により適切にビームを集束することによって、横方向ビーム強度分布を様々な形状で中空化できることを実験により示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、多重極電磁石の非線形力に基づくビーム集束により、中空状等、多様な強度分布に変換できることを初めて実証するとともに、中空状ビームの利用例として、これまで有効な手法のなかった低速ミューオンの効率的な生成に利用できる可能性を示した。本成果は、非線形集束が従来手法では形成できない照射野を実現する新たなビーム形成手法としての有用性を示すものであり、ビーム物理学や加速器科学の学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：We performed a systematic study on nonlinear focusing of a charged-particle beam toward various transformations of the beam intensity distribution that cannot be realized by conventional methods. The kinetic behavior of the beam focused nonlinearly with multipole magnets was investigated theoretically and numerically. It was also experimentally demonstrated that the transverse intensity distribution of the beam can be transformed into a hollow profile with different shapes.

研究分野：ビーム物理学

キーワード：イオンビーム 多重極電磁石 非線形集束 ビーム強度分布 中空化 均一化 サイクロトロン

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

サイクロトロンやシンクロトロン等の粒子加速器で生成される MeV ~ GeV 級の高エネルギーイオンビームの照射利用において、ビームの横方向強度分布や照射野の形成には、4 極電磁石を用いた線形力による拡大・縮小、交流双極電磁石を用いた走査、スリット等による物理的形狀制限のいずれかまたはこれらの組み合わせが通常利用されている。これらにより様々な照射技術が開発・確立されてきた一方で、大強度ビームを用いた二次粒子生成、RI 製造、材料照射等の先端的利用では、線形集束では達成できない特徴的な(一様、中空状等)照射野の形成、加熱や放射化の影響が大きい大強度ビームの非破壊かつ非走査での大面積照射野形成等、従来手法の限界や制約を越えたビーム形成が求められている。

近年、そのようなビーム形成手法のひとつとして、多重極電磁石を用いたビーム形成法の開発が進められている。主として 8 極電磁石がもたらす 3 次の非線形力でビームを集束することによって、ガウス様分布のビームの裾を折りたたみ、均一な強度分布を形成することができる。このことを一般化し、多重極電磁石を含むビーム輸送系で適切にビームを非線形集束することで、線形集束や走査に基づく従来手法では実現困難な、あるいは、許容されない特異なビーム強度分布や照射野を形成できるのではないかとこの着想に至った。

### 2. 研究の目的

多重極電磁石がもたらす非線形集束力を駆使した、荷電粒子ビームの横方向強度分布の多様な変換をビーム物理に基づいて実証するとともに、ニーズに適合した照射野を実現することを研究の目的とした。本研究では、均一分布の改良および中空状強度分布の形成を主な対象とした。

### 3. 研究の方法

非線形ビーム集束に関する理論解析、粒子トラッキングシミュレーションおよびビーム実験により多面的に研究開発を実施した。

#### (1)非線形磁場の組み合わせによる均一分布の改良

上述のとおり、8 極電磁石の 3 次の非線形集束によりビーム強度分布を近似的に均一化することはできるが、元のガウス様分布の裾が折りたたまれる際に分布端部にピークが生じるため、ビーム強度分布全体を完全に均一化することはできない。均一照射においては、そのような端部ピークは不要であるが、高エネルギーまたは高強度のビームの場合、その除去はビーム飛程やコリメータの放射化や徐熱の観点から許容できず問題となる。そこで、理論的に予測されていた、8 極電磁石とより高次の非線形磁場を組み合わせた集束による均一分布の改良のため、実際のビームライン配置でトラッキングシミュレーションを実施し、そのビーム特性を調べた。

#### (2)非線形集束によるビーム強度分布の中空化

##### 理論解析

荷電粒子ビームに非線形力を作用させると、一般に位相空間における形状や分布が歪められることが知られている。そこで、ビーム輸送系において非線形集束を受けたビームについて、横方向の位相空間および実空間の形状や分布が変化する様子のパラメータ依存性等を明らかにするため、このビームの振る舞いを単粒子の運動を元に理論的に解析した。過去に研究代表者が構築した理論解析を拡張・発展させた。

##### ビーム形成実験およびトラッキングシミュレーション

非線形ビーム集束に関する実験研究は、量子科学技術研究開発機構(量研)高崎研のイオン照射研究施設(TIARA)において実施した。TIARA のサイクロトロンには、(通常の 4 極電磁石に加えて)6 極および 8 極電磁石を各 2 台備えた、非線形ビーム集束に関するビーム力学研究やビーム照射技術の開発およびそれらに基づいた照射利用を目的とする極めてユニークなビームライン(LB コース)が整備されており、そこで中空状ビーム形成実験を行った。

さらに、理論解析の妥当性の確認および実験結果の詳細な理解のため、ビーム輸送系における粒子トラッキングシミュレーションを実施した。非線形ビーム集束の研究のために本研究代表者が独自に開発したコードを用いた。4 極や双極の線形電磁石のみならず、12 極までの多重極電磁石の配置や磁場勾配を正確に模擬できること等が特徴である。

#### (3)サイクロトロン入射ビームの制御

非線形集束による中空ビーム等の形成では、ベータトロン振幅の大きな粒子はより強い集束・発散を受け、真空ダクト内壁に当たって失われることが問題となる。加速器に入射するビームの位相空間領域のうち、中空ビームを構成する領域とビーム損失となる領域が異なれば、中空ビーム部に到達する領域にのみビームの大部分を入射することでこれらのビーム損失を低減できる可能性がある。そこで、TIARA サイクロトロンに入射ラインにおいて、研究分担者がこれまで

に独自に開発したビーム位相空間制限システムを用いた中空ビーム領域及びビーム損失領域の測定を実施した。

#### (4) ミューオン生成のための中空状ビーム照射

大阪大学核物理研究センター(阪大 RCNP)では、近年、大強度ミューオンビーム施設(MuSIC)が整備された。ミューオンを用いた多彩な研究のため、ミューオンビーム強度の増強が求められているところである。通常、サイクロトロンからの高エネルギー陽子ビーム(392MeV、1 $\mu$ A)は標的(長さ20cm $\times$ 直径4cmの円柱状グラフィイト)の軸方向に沿って、丸いスポット状に集束され照射される。これに対して、標的の側表面近傍で生成されるパイオンおよびその崩壊に伴う表面ミューオンの生成量を増やす手法として、円柱状標的の側面の縁に強度分布を中空化したビームを集中して照射することを考案した。このような長い標的への中空状ビーム照射の実現可能性を明らかにするため、シミュレーションによりビーム光学系の基本設計を行うとともに、標的での多重散乱影響を調べた。

### 4. 研究成果

#### (1) 非線形磁場の組み合わせによる均一分布の改良

8極電磁石による横方向ビーム強度分布の均一化に関して、より高次の磁場を用いたビーム品質の改良を検討した。具体的には、量研 TIARA サイクロトロン LB コースの構成やパラメータを想定し、既存の8極電磁石(2台)に加えて、5次の非線形磁場を生成する12極電磁石(2台)を組み合わせることを検討した。

系統的なトラッキングシミュレーションの結果、これら4台の多重極電磁石を配置して、均一分布形成の要件である、水平・鉛直2方向の間のベータatron振動の結合が抑制できるビーム光学系が実現可能であり、標的位置でビーム強度分布は、端部のピークが形成されず、ほぼ均一化できることが分かった。この時必要な12極電磁石の磁場強度は、サイクロトロンで生成される1~2Tm程度の磁気剛性を持つビームに対して、ポア半径60mmとして0.1Tオーダーであり、常伝導電磁石で技術的に十分に実現可能な値である。また、従来の8極電磁石を用いる場合に比べて、今回の8極と12極電磁石の併用によるビーム形成では、発生するビーム損失を1桁程度低減できる可能性があることが分かった。

#### (2) 非線形集束によるビーム強度分布の中空化

##### 理論解析

ビーム輸送系において非線形集束されたビームの振る舞いを理論的に解析した。実際には水平・鉛直2方向の運動は互いに結合するが、ここでは、簡便のため1次元的な取り扱いとした。その結果、多重極電磁石(ここでは2台の8極電磁石を想定、積分磁場強度は $K_{O1}$ および $K_{O2}$ )により集束を受けた任意粒子の標的での位置と運動量( $x_t, p_t$ )(つまり、位相空間座標)は、ビーム輸送系の Twiss パラメータ等を用いて、1台目の多重極電磁石入口で位置 $x_1$ の関数として近似的に以下のように表せることを導出した：

$$x_t = \sqrt{\frac{\beta_t}{\beta_1}} \cos(\phi + \theta) x_1 - \frac{K_{O1}}{6} \sqrt{\beta_1 \beta_t} \sin(\phi + \theta) x_1^3 - \frac{K_{O2}}{6} \sqrt{\beta_2 \beta_t} \sin \theta \left( \sqrt{\frac{\beta_2}{\beta_1}} \cos \phi x_1 - \frac{K_{O1}}{6} \sqrt{\beta_1 \beta_2} \sin \phi x_1^3 \right)^3 \quad (1)$$

$$p_t = -\frac{1}{\sqrt{\beta_1 \beta_t}} \{ \sin(\phi + \theta) + \alpha_t \cos(\phi + \theta) \} x_1 - \frac{K_{O1}}{6} \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_t}} \{ \cos(\phi + \theta) - \alpha_t \sin(\phi + \theta) \} x_1^3 - \frac{K_{O2}}{6} \sqrt{\frac{\beta_2}{\beta_t}} (\cos \theta - \alpha_t \sin \theta) \left( \sqrt{\frac{\beta_2}{\beta_1}} \cos \phi x_1 - \frac{K_{O1}}{6} \sqrt{\beta_1 \beta_2} \sin \phi x_1^3 \right)^3 \quad (2)$$

ただし、 $\alpha$ および $\beta$ は線形光学系における Twiss パラメータであり、それらの下付き文字(1、2、t)は、位置(1台目8極電磁石、2台目8極電磁石、標的)を表す。 $\phi$ および $\theta$ は、それぞれ、2台の8極電磁石間の、および、2台目8極電磁石から標的までの線形光学系におけるベータatron振動の位相進度である。

これにより、1台目8極電磁石の入口にて位置 $x_1$ にある粒子が、標的上でどのような位相空間座標( $x_t, p_t$ )に達するかを式(1)および(2)を用いて近似的に予測することができる。すなわち、初期ビームの位相空間楕円の長軸が標的でどのように変化するかを示すことができる。さらに、標的位置での実空間分布は式(1)を通じて初期分布と関連付けられる。

この理論解析は8極電磁石の場合に限られず、同様のやり方で、6極電磁石(2次の非線形磁場)によるビーム集束の様子も定式化し、中空状ビームが形成できることを予測した。このようにして、非線形集束におけるビームライン設計やビーム運動の解析に有用な表式を導出した。

#### ビーム実験およびトラッキングシミュレーション

多重極電磁石を用いた中空状ビーム形成実験を量研高崎研 TIARA において実施した。AVF サイクロトロン( $K$ 値:110MeV)から引き出された陽子(10MeV)および炭素イオン(15.8MeV/n)のビームをLBコースに輸送した。図1に、線形光学系に基づいたビームラインのエンベロープ例を示す。従来行われているビーム均一化では、多重極電磁石位置において水平・鉛直2方向の

ビームサイズを非対称 ( $\sigma_x \gg \sigma_y$  または  $\sigma_x \ll \sigma_y$ ) にし、ベータトロン結合は十分に抑えられ、その結果均一ビームの断面形状は概ね矩形となる。これに対して、本研究では図1に示すように、特に上流側の多重極電磁石(図1の36m付近)において  $\sigma_x \approx \sigma_y$  であり、結合の影響がある。これにより、ビーム運動は複雑になるものの、後述するように多様なビーム形成が可能となった。

標的においてラジオクロミックフィルムを用いて測定した2次元ビーム強度分布を図2に示す。2台の8極電磁石を適切に励磁すると、元のガウス様分布のすそ野が内側に折りたたまれ、図2(a)に示すように、外縁部に鋭いピークを有する楕円形の中空状強度分布が形成された。外縁部の強度は一定ではなく、水平・鉛直軸上付近で極大であった。水平・鉛直軸上の少し内側の4カ所のピークからは、髭のようなスジが8本生じた。これは、大きなベータトロン振幅を持つ粒子によりベータトロン結合の影響で生成されたものである(最終的には、伸びたスジはダクトに当たってビーム損失となり、ダクトや周辺の放射化を引き起こす)。8極電磁石の上流(図1の34m付近)に設置されたスリットでビームの裾をあらかじめ切り落とすと、図2(b)のようにスジの発生が抑えられ、明瞭な中空状ビームが形成された。70~80mmのビーム径に対し外縁部ピークの半値全幅は1~2mmと細く、コントラスト(中心付近強度に対する外縁ピーク強度の比)は最大で14であった。また、ビームを構成する粒子の内、50%程度がこのピーク部分に集中することが分かった。

図2の状態から、2台の8極電磁石の磁場勾配を変更すると、中空状ビームの断面形状を楕円形から、四隅が丸くなった長方形やひし形等に変換できることが分かった。また、2台の8極電磁石の磁場強度を一定の比率のまま変化させることで、断面形状はほぼ同一のままビームサイズを拡大・縮小できることを見出した。これは中空ビーム等の照射野を効率的に調整できるという点で実用上重要な知見である。

理論解析および実験の結果の正当性を確かめるため、粒子トラッキングシミュレーションを行い、実験結果がよく再現されることを確かめた。位相空間形状は、8極磁場の3次の非線形力によりS字型に変形し、式(1)および(2)から予測される結果とよく一致した。これにより、理論解析の結果が妥当であることが示された。

また、次数の異なる6極電磁石を用いたビーム形成実験も実施した。6極電磁石の磁場分布の対称性から予想されるように、ビーム断面形状に三角形のような3回対称性が現れたことに加えて、2台の6極電磁石の磁場勾配の組み合わせによっては、概ね楕円形の断面形状で強度分布を中空化できることを見出した。

このようにして、多重極電磁石の非線形集束力により多様な中空状ビームが形成できることを初めて実証した。

### (3)サイクロトロン入射ビームの制御

TIARAサイクロトロン入射ラインに導入されているビーム位相空間制限システムを用いてビームを微小な位相空間領域として分割して切り出し、個々のビームレットをサイクロトロンで加速、LBラインに輸送し、非線形集束による振る舞いを追跡した。ここでは簡単のため、ビームは、制御可能な横方向の4次元位相空間のうち、水平・鉛直2次元の微小な実空間領域に分割した。

ビーム電流計測の結果、非線形集束により中空状ビームを構成する部分とベータトロン振幅

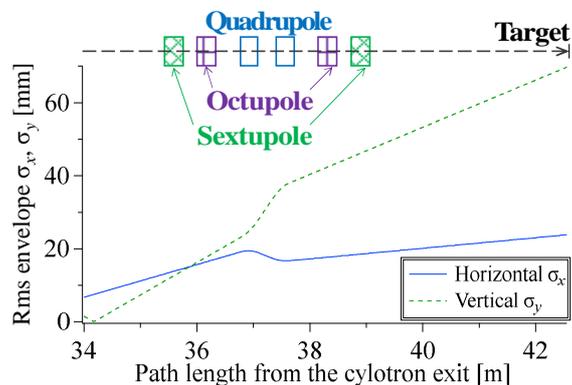


図1:量研TIARAサイクロトロンLBライン(標的の近傍)の模式図および中空状ビーム形成のためのビーム光学系(ビームエンベロープ)の例。

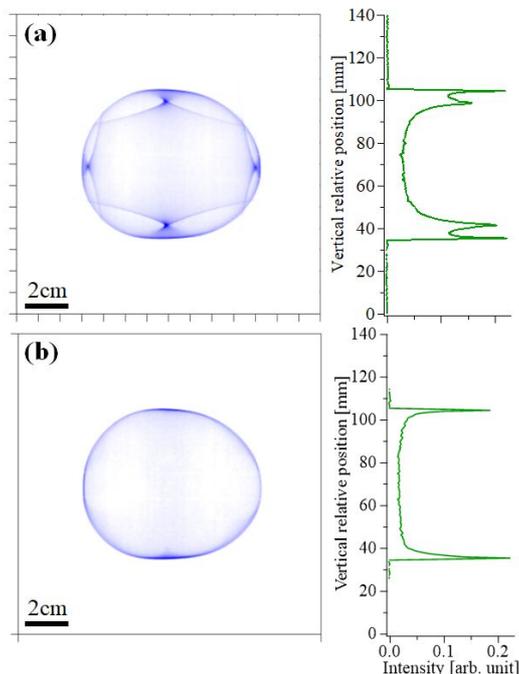


図2:(a)形成した中空状ビーム(10MeV陽子)の実空間分布。楕円形の断面形状を有する。(b)上流のスリットでガウス分布様ビームのすそ野を除去した場合。

が大きくスジ状のハローのようになる部分で分布に差異があることが分かった。この結果は、中空ビームとなる位相空間領域に重点的にビームを入射させるビーム整合が可能であることを示唆するもので、これにより、非線形集束に起因するビーム損失の低減が期待できる。

#### (4) ミューオン生成のための中空状ビーム照射

阪大RCNPのビームライン構成を前提に8極電磁石を2台用いて中空状ビームが形成可能な光学系を設計した。上で述べたような量研高崎研で実証されたものと同様の特性を持つ中空状ビームが形成できることをトラッキングシミュレーションにより確認した。また、長さ20cmのグラフィット標的に392MeV陽子ビームを入射した場合、エミッタンスは多重散乱により増大し、分布は滑らかになるものの、標的出口面に達しても中空状分布が概ね保たれることが分かった(図3)。以上のことから、非線形集束により形成した高エネルギーの中空状ビームが二次粒子生成等のための長い標的への照射に利用可能であることを明らかにした。

これまで、高エネルギービームの強度分布を中空化する手法は、Warm Dense Matter や重イオン慣性核融合の研究において標的を軸対称に照射・加熱することを目的として、プラズマレンズを用いる方式が開発されたのみであった。ガス中でパルス高電圧を印加することによりプラズマを生成するため、短バンチビームの時間幅を同期・整合させる必要がある。これに対して、多重極電磁石を用いる本手法は、非線形力の生成源が静磁場であることから、ビームのエネルギーや時間構造、イオン種等の制約が原理的になく、様々なビームに簡便に適用できるというメリットがある。本研究成果は中空状ビームを形成する新たな手法の原理を実証したものとして学術的に高い意義がある。

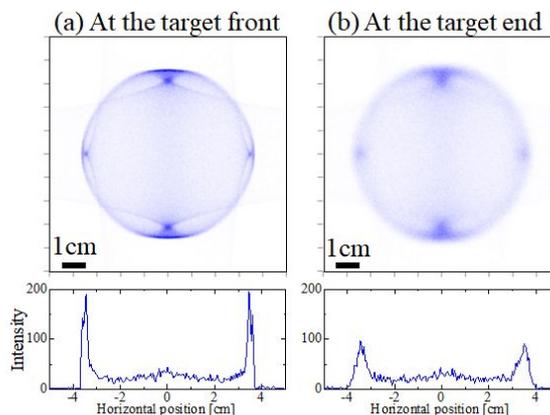


図3：(a)グラフィット標的の入口および(b)出口における中空状ビーム強度分布。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Yuri Yosuke, Yuyama Takahiro, Ishizaka Tomohisa, Fukuda Mitsuhiro	4. 巻 36
2. 論文標題 Shaping ion beams into hollow profiles using sextupole magnets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 100839
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.hedp.2020.100839	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 森田泰之, 福田光宏, 百合庸介, 友野大, 依田哲彦, 神田浩樹, 畑中吉治, 中尾政夫, 安田裕介, 中島悠太, Koay Hui Wen, 武田佳次郎, 原隆文, 大本恭平, 久松万里子, 荘俊謙	4. 巻 -
2. 論文標題 AI による中空ビーム制御手法の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 112, 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 湯山 貴裕, 百合 庸介, 石坂 知久, 柏木 啓次, 福田 光宏	4. 巻 -
2. 論文標題 多重極電磁石を用いた大面積均一ビームと中空ビームの形成	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 449, 452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Y. Yuri, T. Yuyama, T. Ishizaka and M. Fukuda	4. 巻 QST-M-29
2. 論文標題 Characterization Study of Hollow Ion Beams Formed Through Nonlinear Focusing of Multipole Magnets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 QST Takasaki Annual Report 2019	6. 最初と最後の頁 119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuri Yosuke, Fukuda Mitsuhiro, Yuyama Takahiro	4. 巻 2019
2. 論文標題 Formation of hollow ion beams of various shapes using multipole magnets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 053G01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuri Yosuke, Fukuda Mitsuhiro, Yuyama Takahiro	4. 巻 1350
2. 論文標題 Transverse profile shaping of a charged-particle beam using multipole magnets - Formation of hollow beams -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1350/1/012115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 百合庸介, 福田光宏, 湯山貴裕	4. 巻 -
2. 論文標題 多重極電磁石を用いたビーム強度分布中空化の実証	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 112, 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 明午伸一郎, 武井早憲, 松田洋樹, 百合庸介, 湯山貴裕	4. 巻 -
2. 論文標題 大強度陽子加速器のための標的上のプロファイルモニタの開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 515, 519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 百合 庸介	4. 巻 73
2. 論文標題 高エネルギーイオンビームのRoll-to-Roll均一照射技術の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本海水学会誌	6. 最初と最後の頁 203, 207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11457/swsj.73.4_203	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuri Yosuke, Yuyama Takahiro, Ishizaka Tomohisa	4. 巻 QST-M-23
2. 論文標題 Demonstration of Hollow Profile Shaping of a High-Energy Ion Beam Using Multipole Magnets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 QST Takasaki Annual Report 2018	6. 最初と最後の頁 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 百合庸介、湯山貴裕、吉田健一、石坂知久	4. 巻 -
2. 論文標題 非線形集束によるビーム強度分布の変換とその利用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 678, 681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 森田泰之、福田光宏、百合庸介、友野大、依田哲彦、神田浩樹、畑中吉治、中尾政夫、安田裕介、中島悠太、Koay Hui Wen、武田佳次郎、原隆文、大本恭平、久松万里子、 莊浚謙
2. 発表標題 AI による中空ビーム制御手法の開発
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 湯山貴裕, 百合庸介, 石坂知久, 柏木啓次, 福田光宏
2. 発表標題 多重極電磁石を用いた大面積均一ビームと中空ビームの形成
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 湯山貴裕, 百合庸介, 石坂知久, 柏木 啓次, 福田 光宏
2. 発表標題 非線形磁場を用いたビーム強度分布の変換ー中空ビーム形状の制御ー
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Yuri, M. Fukuda, and T. Yuyama
2. 発表標題 Transverse profile shaping of a charged-particle beam using multipole magnets - Formation of hollow beams -
3. 学会等名 10th International Particle Accelerator Conference, IPAC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 百合庸介, 福田光宏, 湯山貴裕
2. 発表標題 多重極電磁石を用いたビーム強度分布中空化の実証
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 明午伸一郎, 武井早恵, 松田洋樹, 百合庸介, 湯山貴裕
2. 発表標題 大強度陽子加速器のための標的上のプロファイルモニタの開発
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yuri, M. Fukuda, and T. Yuyama
2. 発表標題 Diverse Beam Profile Shapings through Nonlinear Focusing of Multipole Magnets in a Beam Transport Line
3. 学会等名 2019 North American Particle Accelerator Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yuri, M. Fukuda, and T. Yuyama
2. 発表標題 Shaping of Ion Beams into a Hollow Profile Using Multipole Magnets
3. 学会等名 11th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 百合庸介
2. 発表標題 非線形力によるビーム強度分布変換の理論的考察
3. 学会等名 ビーム物理研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 百合庸介、湯山貴裕、石坂知久、福田光宏
2. 発表標題 非線形力によるビームプロファイルの多様な変換 - 中空化の実証 -
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森田泰之、福田光宏、百合庸介、友野大、依田哲彦、神田浩樹、畑中吉治、安田裕介、中尾政夫、原周平、Koay Hui Wen、武田佳次郎、原隆文、大本恭平、中島悠太
2. 発表標題 ミュオンビーム生成のための八極電磁石を用いた中空ビーム形成法の開発
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 百合庸介、湯山貴裕、吉田健一、石坂知久
2. 発表標題 非線形集束によるビーム強度分布の変換とその利用
3. 学会等名 第15回日本加速器学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 百合庸介
2. 発表標題 多重極電磁石を用いたビーム強度分布の変換
3. 学会等名 ビーム物理研究会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柏木啓次、湯山貴裕、石坂知久、宮脇信正、百合庸介
2. 発表標題 非線形集束におけるビームロス低減に向けたビーム入射・加速方法の検討
3. 学会等名 第18回日本加速器学会年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 二次粒子生成装置、放射性同位体生成装置、二次粒子生成方法、及び放射性同位体生成方法	発明者 福田光宏、友野大、森田泰之、百合庸介	権利者 大阪大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-075957	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 荷電粒子ビーム強度分布可変装置、荷電粒子ビーム強度分布可変方法、二次粒子生成装置、及び放射性同位体生成装置	発明者 福田光宏、百合庸介	権利者 大阪大学、量子科学技術研究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-207270	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<a href="https://www.qst.go.jp/site/beam-engineering/">https://www.qst.go.jp/site/beam-engineering/</a>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	柏木 啓次  (Kashiwagi Hirotsugu)  (30391303)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部・主幹研究員(定常)    (82502)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	福田 光宏  (Fukuda Mitsuhiro)		
研究協力者	湯山 貴裕  (Yuyama Takahiro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関