

## 平成17年度科学研究費補助金（学術創成研究費）研究進捗状況報告書

ふりがな		くの よしたか		②所属研究機関		大阪大学・大学院理学研究科 ・教授
①研究代表者氏名		久野 良孝		・部局・職		
③研究課題名	和文	ミュオン物理学の新展開を狙うスーパー・ミュオン・ビームの研究				
	英文	A Study of A Super Muon Beam for New Initiative on Muon Physics				
④研究経費 (直接経費) 18年度以降は内約額 単位:千円	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	総合計
	85,200	82,000	75,900	75,000	76,900	395,000
⑤研究組織 (研究代表者及び研究分担者)						
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担 (研究実施計画に対する分担事項)			
久野良孝	大阪大学・大学院理学研究科・教授	素粒子物理実験	統括			
能町正治	大阪大学・大学院理学研究科・教授	素粒子原子核物理	電磁石磁場計算			
中野貴志	大阪大学・核物理研究センター・教授	原子核物理学	キッカー磁石設計			
青木正治	大阪大学・大学院理学研究科・助教授	素粒子物理実験	高周波加速空洞設計			
菅谷頼仁	大阪大学・大学院理学研究科・助手	原子核物理	真空系設計			
二宮史郎	大阪大学・核物理研究センター・助手	加速器物理	ビーム・ラティス設計			
佐藤朗	大阪大学・大学院理学研究科・特任助手(常勤)	素粒子物理実験	電磁石設計			
吉村浩司	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教授	高エネルギー物理学	電磁石設計			
大森千広	高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助手	加速器物理	高周波加速空洞設計			
吉井正人	高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助手	加速器物理	真空系設計			
高木昭	高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助手	加速器物理	高周波加速空洞電源設計			
⑥当初の研究目的 (交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。)						
<p>ミュオンは、学際領域を含む様々な幅広い研究分野に応用されていて、ミュオン科学は既に数多くの実績をあげている。しかし、現在利用できるミュオン・ビームでは、そのビーム強度、ビーム性質とも不十分であり、実験条件には厳しい制約が課されている。そこで、我々は、ミュオンのビーム強度を従来の約1万倍程度に増加し、さらに「位相空間回転」や「イオン化冷却」などの高輝度化技術を施すことでビーム・エネルギーの揃ったいわゆる「スーパー・ミュオン・ビーム」の実現を検討している。</p> <p>本学術創成研究では、特に、スーパー・ミュオン・ビームの高輝度化技術の技術的な確立を目的とする。これらの高輝度化技術として、位相空間回転法やイオン化冷却法がある。とくに、位相空間回転法の確立を優先的に進める。ここで、位相空間回転法とは、高周波電場を使って、遅いミュオンを加速し、速いミュオンを減速させ、ミュオンの運動エネルギーを揃える方法である。特に、負電荷ミュオンに対して有用である。ミュオンのような不安定二次粒子に、平均寿命内で、位相空間回転を完了させるためには、高電圧の高周波空洞が多数必要となる。我々は、高周波加速空洞を、線型システムの代わりに、大口径の円型加速器リングに組み込むという革新的なアイデアで、この問題に取り組む。本研究では、実用サイズの位相空間回転リングを建設し、最終的に、位相空間回転の実証実験をすることを目指すものである。位相空間回転は通常の加速器システムでは行われているが、短寿命の不安定二次粒子ビームラインに対して行う試みは、これが世界で最初である。これらの研究開発は、ミュオン科学の発展のみならず、将来の加速器計画（たとえば、ニュートリノ・ファクトリやミュオン・コライダ計画など）への波及効果も大きく、多大な技術的貢献をなすものである。</p>						

⑦これまでの研究経過

I 本研究は、学術創成研究費の趣旨の3つの観点のうち、どの観点に主眼を置いて研究を行っているかについてお書きください。

本研究は、「(1)創造性・革新的・学際的学問領域の創成」に主眼をおいている。短寿命のミュオンを円型加速器リングへ入射して位相空間回転を行い、そのエネルギーを揃えようとする計画は、それ自身大胆で斬新な創造性あふれる発想である。この研究を発展させることにより世界に類を見ないスーパー・ミュオン・ビームが実現すれば、ミュオン科学は質的な革新を遂げ、全く新しい学問領域を創成する可能性がある。さらに、本研究の先端加速技術が開く波及効果は多大である。たとえば、ミュオン加速を基盤としてニュートリノ・ファクトリ計画は、米国、英国、欧州で検討されており、本研究の貢献は、「(3)国際的に対応を強く要請される研究」にもあたる。

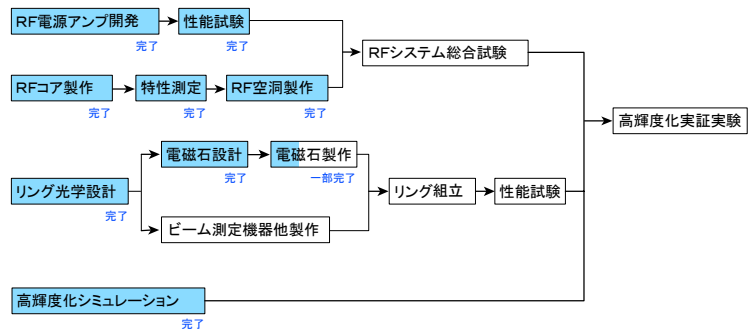
II 研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、研究組織内の連携状況を含め、具体的に記入してください。

本研究計画は大きく二つの段階に分けられる。第1段階は位相空間回転リングの設計と各種コンポーネントの設計・製作・試験及び高輝度化シミュレーション計算などの基礎研究開発であり、第2段階はリングの性能試験及び高輝度化の実証実験である。平成15、16年度の2年間で、第1段階の内、(1)高周波加速電源アンプシステムの開発、(2)ナノ結晶軟磁性体合金コアを用いた高電場勾配加速空洞の開発、(3)大アクセタンス位相空間回転リングの設計、(4)シミュレーションによる位相空間回転の最適化、を完了した。研究計画の概略と進捗状況を下に図示する。

(1) 高周波加速電源アンプシステムの開発、(2) 高電場勾配加速空洞の開発の部分に関しては、大阪大学メンバー、KEKメンバーおよび専門業者が定期的にKEKや大阪大学で打合せを行いながら設計を行って製作した。完成したシステムは大阪大学の施設に設置し、動作試験やシステムの改良は、KEKメンバーと大阪大学メンバーが密に連携をとりながら推進している。これまでの試験で5MHzにおいて世界最高電場勾配を達成し、高周波加速電源アンプと加速空洞とも要求した性能を満たすことが確認され、これらの開発に成功したと言える。詳細は次項目で述べる。

(3) 大口径位相空間回転リングの設計と(4)シミュレーションによる位相空間回転の最適化に関しては、KEKメンバーの加速器科学専門家としての助言を元にして遂行した。毎週定期的に、グループのテレビ会議を開催しており、緊密に議論を積み重ねながら、研究を進めている。その結果、従来の加速器科学でとられてきた方法論を越えた非常に独創的な設計手法の開発に成功し、大口径位相空間回転リングの設計が完了した。また、シミュレーション計算により、(1)-(3)の開発要素を組み合わせることにより、当初計画通りの性能を持った高輝度ミュオンビームを生成できる見通しを確認した。

このように、第1段階はほぼ計画通りに進行しており、平成17年度から電磁石の製作に取りかかっている。



III その他

## ⑧特記事項

〔 これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入するとともに、推薦者の期待がどの程度達成されつつあるかについて記入してください。 〕

円形加速器リング内の周回中にミュオン・ビームを高輝度化する位相空間回転の手法は、本研究代表者らにより、1997年に提案された全く独創的な方法であり、世界の研究者より高く評価されている。本学術創成の推薦者からも、このミュオン・ビーム高輝度化技術の確立が期待されている。この2年間における研究で得られた主要な成果を以下にまとめる。

#### 超高加速勾配高周波加速システムの開発

位相空間回転では、高周波電場により、遅いミュオンを加速し、速いミュオンを減速して、ビームの運動エネルギーをそろえて、高輝度化する。ミュオンの静止寿命は約 $2\mu$ 秒なので、短時間に加速または減速することが必要となる。そのため、超高加速勾配の高周波加速システムを開発することが成功の鍵であった。我々は、高出力真空管を用いた高周波アンプ、電源、また、ナノ結晶軟磁性体合金の大口徑コアを使用した加速空洞を製作した。これらの試験結果、当初目標とした加速勾配150-200kV/m（周波数5 MHz）が達成された。この加速勾配は、図に示すように、従来の加速空洞システムにくらべて約5倍以上の値であり、加速器分野に大きなインパクトを与えるものであった。ここで確立した技術は、将来の様々な加速器開発に応用されると期待される。

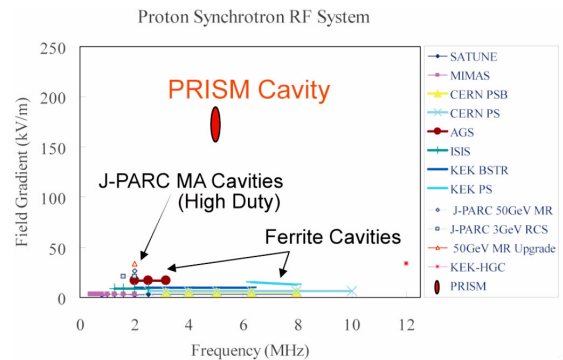


図1 加速勾配の比較

#### 大きなアクセプタンス（口径）をもつ位相空間回転リングのビーム光学設計と磁石設計

高輝度化技術確立のもう一つの鍵は、位相空間回転・ビーム冷却前の空間及び運動量分布の広いビームを許容する大アクセプタンスの冷却リングの設計にある。というのは、陽子ビーム照射で生成されたパイオンまたはミュオンは、非常に広がった空間的分布、運動量分布を持っているからである。検討の結果、固定磁場強収束型(FFAG)リングを採用することに決定した。FFAGでは、それぞれの磁石が強い非線形磁場成分をもつため、その設計は容易ではない。従来の行列計算に基づくビーム光学計算は、FFAGリングでは、その計算結果が実磁場を用いた結果と十分には一致しないという問題があった。これは、周辺磁場や磁極周辺部での磁場の取り扱いに問題があったからである。そこで、我々は2次元差分法により得た磁場マップを補間し、それから作成した3次元磁場中での単粒子シミュレーションを行うという方法を考案し、短時間で現実的なビーム力学評価が得られる手法を確立した。これにより、当初の設計をはるかに超える大アクセプタンスを持つFFAGリングのラティス設計に成功した。我々の手法は、短時間で高い精度のラティス評価を可能にするものであり、FFAG研究の分野で高く評価された。また、世界で初めて縦方向30cm、横方向100cmにおよぶ大口徑のFFAGリング磁石を設計した。非線形磁場を非常に高精度で再現できることを、3次元磁場計算プログラムを使用して、確認した。

#### 円型加速器リングの性能に基づいた位相空間回転の評価

上記の実際に製作される高加速勾配高周波加速システム、及び大アクセプタンスFFAGリングの性能を計算機コードに入力し、シミュレーションによる詳細な位相空間回転の最適化を行った。この結果によると、リングを6周する間にビーム運動量の広がりには10分の1に減少し、このときミュオン生存率は60%となる。これは当初の目標を十分満足する性能である。

このように、ミュオン・ビーム高輝度化技術の確立にむけて、重要なポイントの基礎開発及び設計に成功し、リング建設・実証試験に向けて着実に進展している。

## ⑨研究成果の発表状況

〔 この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（掲載が確定しているものを含む。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）、最初と最後のページ、発表年（西暦）、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。 〕

### 論文及び国際会議、学会発表

- Sato, M. Aoki, Y. Arimoto, Y. Kuno, Y. Kuriyama, T. Matsushima, K. Nakahara, S. Nakaoka, M. Yoshida, M. Aiba, S. Machida, Y. Mori, C. Ohmori, T. Yokoi, M. Yoshimoto, K. Yoshimura, Y. Iwashita, N. Sasao, S. Ninomiya, "Design and Construction Status of an FFAG for the PRISM Project", Proc. of Cyclotrons 2004, To be published.
- Y. Arimoto, M. Aoki, Y. Kuno, Y. Kuriyama, T. Matsushima, K. Nakahara, S. Nakaoka, A. Sato, M. Yoshida, Y. Iwashita, M. Aiba, S. Machida, Y. Mori, C. Ohmori, T. Yokoi, M. Yoshimoto, K. Yoshimura, S. Ninomiya, "Study of the PRISM FFAG Magnet", Proc. of Cyclotrons 2004, To be published.
- C. Ohmori, M. Aoki, Y. Kuriyama, M. Yoshida, Y. Arimoto, M. A. Sato, Y. Kuno, Y. Iwashita, and S. Ninomiya, "Ultra-High Field Gradient RF For Bunch Rotation.", Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), To be published, Prepared for the 6th International Workshop On Neutrino Factories & Superbeams (NuFact 04), Osaka U., Osaka, July 2004.
- Y. Kuno, "PRIME -Muon LFV experiments-" Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), To be published, Prepared for the 6th International Workshop On Neutrino Factories & Superbeams (NuFact 04), Osaka U., Osaka, July 2004.
- Y. Arimoto, "Magnet design for PRISM-FFAG using anisotropic interpole.", Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), To be published, Prepared for the 6th International Workshop On Neutrino Factories & Superbeams (NuFact 04), Osaka U., Osaka, July 2004.
- Sato, M. Aoki, Y. Arimoto, Y. Kuno, M. Yoshida, Y. Iwashita, S. Machida, Y. Mori, C. Ohmori, T. Yokoi, K. Yoshimura, and S. Ninomiya, "FFAG as Phase Rotator for the PRISM Project", Proc. of EPAC 2004, p.713-715.
- Sato, and S. Machida, "Lattice Design of Large Acceptance FFAGs for the PRISM Project", Proc. of EPAC 2004, p.1345-1347.
- Y. Iwashita, Y. Arimoto, and A. Sato, "Gradient Field Generation in a Uniform Gapped Magnet", Proc. of EPAC2004, p.1705-1707.
- M. Aoki, "Lepton Flavor Violation: Experimental.", Nuclear Physics Proc. Suppl. 143, p.64-69, (2005), Prepared for the 21st International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2004), Paris, June 2004.
- Y. Kuno, "Role of Cooling in Muon and Neutrino Physics.", Nuclear Instruments and Methods, A532, p.92-96, (2004), Prepared for International Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL03), Mt. Fuji, Japan, 19-23 May 2003.
- Y. Kuno, "High Intensity Muon Beam Facilities with FFAG", Particle Accelerator Conference (PAC2005), Tennessee, USA, 2005年5月
- 栗山靖敏他, "PRISM-FFAG の開発(VII);RF 開発", 日本物理学会第 60 回年次大会, 東京理科大学, 2005 年 3 月.
- 中原健吾他, "PRISM-FFAG の開発(VIII);輸送チャンネルシミュレーション", 日本物理学会第 60 回年次大会, 東京理科大学, 2005 年 3 月
- 佐藤朗他, "PRISM-FFAG の開発(IX);入射取り出しの検討", 日本物理学会第 60 回年次大会, 東京理科大学, 2005 年 3 月
- 有本靖他, "PRISM-FFAG の開発(X);電磁石開発 I", 日本物理学会第 60 回年次大会, 東京理科大学, 2005 年 3 月
- 中丘未広他, "PRISM-FFAG の開発(XI);電磁石開発 II; 電磁石性能及びシミュレーション", 日本物理学会第 60 回年次大会, 東京理科大学, 2005 年 3 月
- 有本靖他, "PRISM-FFAG の開発 Development of PRISM-FFAG", 第 1 回日本加速器学会年会, 日本大学, 2004 年 8 月.
- 栗山靖敏他, "PRISM-FFAG 用 RF の開発 Development of RF for PRISM-FFAG", 第 1 回日本加速器学会年会, 日本大学, 2004 年 8 月.
- 岩下芳久他, "異方性中間磁極による磁場分布の制御と漏れ磁場の抑制", 第 1 回日本加速器学会年会, 日本大学, 2004 年 8 月
- 佐藤朗他, "PRISM-FFAG の開発(IV)-計画概要と FFAG 性能-", 日本物理学会秋季大会, 高知大学, 2004 年 9 月
- 中丘未広他, "PRISM-FFAG の開発(XI)-電磁石開発-", 日本物理学会秋季大会, 高知大学, 2004 年 9 月
- 栗山靖敏他, "PRISM-FFAG の開発(VI)-RF 開発-", 日本物理学会秋季大会, 高知大学, 2004 年 9 月
- 佐藤朗他, "PRISM-FFAG の開発(I)-ラティス設計-", 日本物理学会第 59 回年次大会, 九州大学, 2004 年 3 月
- 岩下芳久他, "PRISM-FFAG の開発(II)-電磁石開発 1-", 日本物理学会第 59 回年次大会, 九州大学, 2004 年 3 月
- 有本靖他, "PRISM-FFAG の開発(III)-電磁石開発 2-", 日本物理学会第 59 回年次大会, 九州大学, 2004 年 3 月
- 久野良孝, "PRISM 計画", 日本物理学会秋季大会, 宮崎, 2003 年 9 月 (招待講演)

### その他研究会等での発表

- FFAG Workshop, Fermi National Accelerator Laboratory, Vavaria, USA, April 2005, 4 件
- International workshop on Muon Science Instrumentation (MSI05), KEK, 2005 年 3 月, 1 件
- The 3rd international workshop on nuclear and particle physics at J-PARC (NP04), Tokai, Aug. 2004, 5 件
- FFAG Accelerator Workshop (FFAG04), KEK, Tsukuba, Oct. 2004, 1 件
- Workshop at RHIC & AGS annual user's meeting, BNL, NY, May 2004, 1 件
- FFAG Workshop 2004, TRIUMF, Vancouver, April 2004, 1 件
- TRIUMF symposium on FFAGs, TRIUMF, Vancouver, April 2004, 1 件 (Invited)
- 第 14 回加速器科学研究発表会, つくば国際会議場, 2003 年 11 月, 2 件
- ビーム物理研究会, SPring-8, 2003 年 10 月, 1 件
- FFAG Accelerator Workshop (FFAG03), KEK, July 2003, 1 件
- The 5th International Workshop on Neutrino Factories & Superbeams (NuFact 03), Columbia U., New York, June 2003, 4 件
- "第 4 回研究会" ミューオン蓄積リングを使ったニュートリノ源とそれが拓く物理", 東京都立大学, 2003 年 5 月, 3 件

### 特許

- [名称] 磁場分布制御方法、磁場発生装置及び加速器、[出願番号] 特願 2004-92188、[発明者] 岩下芳久、佐藤朗、有本靖