

論文審査の結果の要旨

氏名 安居 孝晃

本論文は5章からなる。第1章は、イントロダクションである。本論文の研究動機として、大強度陽子シンクロトン加速器のビーム強度を増強する際のビーム周回中のビーム損失とビーム軌道の共鳴状態の関係の重要性について述べられている。本研究は、世界最高レベルの大強度陽子加速器である JPARC (Japan Accelerator Research Complex) のメインリングを用いて、共鳴状態を励起する起源とその影響、及び、光学系による補正方法についての研究を行ったものである。さらに、本論文で使用される加速器科学の基本的な方程式と研究対象となる J-PARC の詳細について解説されている。

第2章は、現在の運転中の軌道の近傍に存在する強い共鳴状態の励起源の研究について述べられている。加速器中を周回する粒子は、磁石設定によって作られた光学系で決定されるあるビーム軌道を取って周回する。運転中のビーム軌道は、位相空間中で安定に周回できる点に設定される。しかし、様々な理由でその軌道は位相空間内で分布を持ち、ビーム軌道も変化する。その過程で周回中の粒子が、共鳴状態に陥ると中心ビーム軌道周りの振動が大きくなりビーム損失を生じる。特に、高強度ビームにおいて問題となるのは、空間荷電効果による分布の広がりである。本研究では、ビーム軌道を変化させながら、ビーム幅の測定を行い、共鳴状態の影響を評価した。測定結果をシミュレーションと比較することで、シミュレーションの有効性と実際のビーム運転において強い共鳴状態の励起源となっているものが空間電荷効果による位相空間内でのビームの広がりであることを実証した。

第3章は、加速器の構造に由来する共鳴状態を補正する新たな光学系の導入と実証について述べられている。上記のように、ビーム損失を議論する上で、ビーム軌道との共鳴状態と運転時のビーム軌道設定との関係は、重要なパラメータとなっている。本章では、三次構造共鳴と呼ばれる共鳴状態を打ち消すような光学系を、加速器の対称性を利用し開発し、実際に実装し、その効果を実証した。運転中のビーム軌道を表すには、加速器のチューンと呼ばれる粒子が加速器内を1周回するうちに、ビーム中心軌道周りで何回振動するかというパラメータを用いる。今回の研究では、その x 方向のチューン v_x と y 方向のチューン v_y が、 $v_x - 2v_y = -21$ という関係を満たす共鳴状態を打ち消す光学系を提案し、その効果を実証した。共鳴状態は、 $n \cdot v_x + m \cdot v_y = k$ (n, m, k : 整数) と表されるが、J-PARC の加速器は3回対称性を持つため、 k が3の整数倍であるときは、構造共鳴状態と呼ばれ強い共鳴状態を示す。本論文では、粒子の軌道振動の位相を光学系の設定により調整し、この共鳴状態を打ち消すことが可能であることを示した。さらに、その光学系を実際に適用した粒子の周回実験を行いビーム幅を x 方向、 y 方向それぞれで測定した。この結果、補正前には共鳴状態の影響により x 方向のビーム幅が y 方向へと影響する現象が見られたが、補正後にはそのような共鳴状態が喪失することが確認された。さらに、ビーム損失の減少も測定された。

第4章は、現在の運転モードの近傍に存在する共鳴状態への空間電荷効果の影響の系統的な研究とその補正について述べられている。まず、現在の運転の設定点の近傍に対して、空間電荷効果の影響を評価する系統的な解析計算を実施した。その際に、 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_x + \mathbf{m} \cdot \mathbf{v}_y = \mathbf{k}$ の式において、 $\mathbf{n} + \mathbf{m} = 10$ となる \mathbf{n}, \mathbf{m} の組み合わせまでを考慮に入れた。計算では、運転の設定点からのチューンのずれを空間電荷効果により評価し、特に、ビームの周辺部に強く影響を与える \mathbf{n} と \mathbf{m} の組み合わせを抽出した。その共鳴状態に対して、シミュレーションを実施し、その中で特に影響が大きそうな共鳴状態 ($8\nu_y = 171$) に対する補正光学系を開発した。補正光学系の効果は、ビーム損失の量として測定され、16%のビーム損失削減の効果があることが示された。

第5章は、論文全体の結論であり、本研究の動機・目的・実験手法・結果などについてのまとめが述べられている。

上記で得られた結果は、ビーム損失の原因となる加速器軌道の共鳴状態を励起する原因やその補正方法に対して既存の研究にない新たな知見を加えたものであり、大強度陽子加速器のビーム損失の削減に対して大きな意義がある。

また、本論文第2章から第4章は、五十嵐 進・佐藤 洋一・小関 忠との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験及び解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。