

## 論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 （ 理 学 ）	氏名	大 崎 一 哉
学位授与の要件	学位規則第4条第①・2項該当		
論 文 題 目			
Theoretical studies on Doppler laser cooling of an ion beam in a storage ring and an emittance growth mechanism of intense hadron beams (蓄積リングにおけるドップラーレーザー冷却および高強度ハドロンビームのエミッタンス増大機構に関する理論的研究)			
論文審査担当者			
主 査	教 授	岡 本 宏 己	
審査委員	教 授	世 良 正 文	
審査委員	教 授	栗 木 雅 夫	
審査委員	准教授	樋 口 克 彦	
〔論文審査の要旨〕			
<p>荷電粒子ビームはその利用目的に応じて異なる“エネルギー”、“電流値”、“エミッタンス”を持つ。これらビームの性能を端的に表す指標の中でも、エミッタンスの良し悪しはほぼすべての応用に際して重視される。エミッタンスは6次元位相空間上で荷電粒子群が占有する体積に相当し、その値が小さければ小さいほど「ビームの質が高い」と主張できる。実際、エミッタンスの小さいビームほど細く絞ることが可能である。本論文はイオンビームのエミッタンス制御に関する研究成果をまとめたもので、具体的な内容は次の二つに大別される：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ドップラーレーザー冷却法の適用による極低温イオンビームの生成</li> <li>・ 初期ビーム不整合による二乗平均エミッタンス増大の理論的評価</li> </ul> <p>これらの研究テーマに関する成果は第2章および第3章にまとめられている。第1章はその後の理論解析に際して必要となる標準的なビーム軌道力学の解説や物理的概念の定義に充てられている。</p> <p>著者は京都大学化学研究所で行われた低エネルギーイオンビームのレーザー冷却実験に参画し、分子動力学コードを用いて観測データを詳細に分析した。京都大学宇治キャンパスに建設された“S-LSR”は周長 22.6 m の小型イオン蓄積リングで、<math>^{24}\text{Mg}^+</math>用のドップラーレーザー冷却システムを完備している。レーザー冷却法は非常に強力である反面、ビーム進行方向の一自由度に対してのみ有効で、進行方向に直交する残り二自由度に対しては直接的な効果を持たないという難点がある。この問題を解決するため、S-LSR では“共鳴結合冷却理論”が応用された。著者はこの実験が本格化した当初から理論面で継続的な役割を果たしており、とくに基本パラメータの最適化や観測データの評価に大きく貢献した。S-LSR では最終的に 20~30 K 程度の横方向ビーム温度（進行方向自由度は 1 K 以下）が実</p>			

現されたが、この値はおそらく現時点での世界記録であろう。本論文中の分子動力学計算は実験データを質的によく再現している。加えて著者は、現有冷却システムの簡単な調整により、横方向到達温度をさらに一桁以上 (0.1 K のオーダー付近まで) 下げることが可能であるとの結論に至っている。提案された最適な実験パラメータに基づく分子動力学シミュレーションによれば、S-LSR で“紐状の準クーロン結晶状態”の実現が期待できる。ビーム蓄積リングにおいてクーロン結晶の生成に成功したグループは過去になく、著者の提案に基づいた更なるレーザー冷却実験の継続が望まれる。

第3章は、ビーム構成粒子の初期分布が理想的な定常状態からずれている場合、すなわち初期不整合がある場合に発生する集団不安定性の解析がテーマとなっている。この種の問題の取り扱いには数学的にも数値的にも非常に難しいことが知られている。著者は M. Reiser が 1991 年に発表した二次元理論モデルを三次元に拡張し、一般的な高強度ビームが不整合を持つ場合にどの程度のエミッタンス劣化が起こり得るかを予測した。不整合ビームが含む過剰な自由エネルギーの計算に加えて、終状態の非等方な温度分布を近似的に再現する公式を見出し、任意のアスペクト比を持つ楕円体ビームに任意の初期不整合を与えた場合のエミッタンス増大率を評価した。また、系統的な多粒子シミュレーションを実施し、自身で導いたエミッタンス増大率の評価式が妥当なものであることを証明している。

以上のように本論文の著者は、イオンビームの高性能化に関連する複数のテーマについて非常に有益な成果を上げている。既存の蓄積リングにおけるビーム冷却の高効率化ならびに準クーロン結晶実現の手法を具体的に示すと共に、不整合駆動による高強度ビームのエミッタンス増大率が簡単に評価可能な理論式の導出に成功した。よって、この著者は博士 (理学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。