

論文内容の要旨

論文題目 **Study of Resonance Crossing in Strong Focusing Accelerator**
(強収束加速器における共鳴横切りに関する研究)

氏名 相場 政光

本研究は強収束加速器における共鳴横切りに関する研究であり、現在から将来にかけての固定磁場強収束加速器 (FFAG 加速器) 開発を念頭に置いて行われた。FFAG 加速器では磁場の非線形成分を導入することで、原理的に全ての運動量の粒子に対して一定のベータトロンチューンを持つ (零色収差)。しかし実際の加速器では、漏れ磁場や磁場飽和のため、また FFAG 加速器が原理的に要する磁場の非線形成分のために、完全に一定なチューンを実現することは困難である。一方で、加速器設計の当初からチューンを一定にするという条件を排除することによって、強収束加速器でありながら近似的に等時性を満たしたり、原型の FFAG 加速器では難しかった非常に長い直線部を設けることができたりといった利点が得られる。ビームの軌道及びその周りでの粒子の運動が相似形をなしているという意味で、本来の FFAG 加速器をスケールリング FFAG と呼ぶのに対して、このように積極的にチューンが変化することを受け入れたものはノンスケールリング FFAG と呼ばれ、現在世界中の加速器研究者の間で研究が進められている。

FFAG 加速器の原理は、1953 年に大河千弘によって初めて考案されたものである。その後、米国における MURA 計画で、2 台の電子 FFAG 加速器が試験的に製作され、加速器としての実証が行われた。当時その潜在的優位性が認知されながらも、磁石設計及び製作や加速空洞の技術的困難のため、FFAG 加速器の開発はその後 50 年近く閉ざされていた。しかし近年、技術的な進歩によってこれらの問題が解決され、世界初となる陽子 FFAG 加

速器 (PoP-FFAG) が高エネルギー加速器研究機構 (KEK) において製作され、陽子ビーム加速に成功した。その成功を受けて、実用機としての FFAG 加速器の可能性を確立するために、150MeV 陽子 FFAG 加速器が同じく KEK において建設され、ビーム加速に成功している。

現在、加速器の応用は多分野に渡り、またその要求も様々なものとなっている。FFAG 加速器は固定磁場であるという特徴から、シンクロトロンに比べ高繰り返しのパルスビームにより強度の高いビームを得ることができる。また同様に固定磁場であるサイクロトロンと比べても、磁場勾配が大きいいため比較的コンパクトであり、等時性を満たす必要が無いので磁場精度の許容範囲も広く、安定度の高い運転が可能となる。こうした特長から、特にエネルギー生産や医学利用の分野において FFAG 加速器が注目を集めている。また、ミュオン貯蔵リングをベースとしたニュートリノファクトリーを実現するために、FFAG 加速器をミュオン加速器として応用することが現実的な案であると考えられ、ノンスケールリング・ミュオン FFAG の研究が盛んに行われている。その中で共鳴横切りに関する研究が重要な課題となっている。こうした背景の基に本研究が行われた。

まず始めに共鳴横切りのビームダイナミクスに関して、一般的な議論を行った。共鳴横切りにおいて主要なパラメータは、共鳴の強さ、チューンの振幅依存性、横切るスピード、ビームエミッタンスの4つである。共鳴横切りのビームダイナミクスは、磁場の非線形成分 (基本的に8極成分) が支配的かどうか、すなわちチューンの振幅依存性が強いかな否かによって、異なった取り扱いをしなければならない。振幅依存性が無視できるときには、共鳴横切りによるビームエミッタンスの増大が、共鳴の強さをスピードの平方根で割った量に比例することが一般的に知られている。

FFAG 加速器における共鳴横切りを考えると、より関心があるのは非線形成分が支配的な場合である。これに対して、1970年代に A.W. Chao らによって、“アイランドによる粒子捕獲”モデルが示された。これによると、磁場の非線形成分、すなわちベータトロンチューンの振幅依存性が強いときに共鳴を横切ると、位相空間における中心以外の安定固定点 (アイランド) によって、ビームの一部が捕獲され、チューンが共鳴から離れるにつれて無限遠へ持ち去られる。このモデルはシミュレーションによって確かめられたものの、その後最近まで実際のビーム実験によって観測されたことはなかった。本研究におけるビーム実験及び同時期に進められていた CERN-PS における実験が、初めての粒子捕獲モデルの実験的確認である。しかし、後者はシンクロトロンにおけるビーム取り出しへの応用という全く異なった目的のものである。本研究では、単に粒子捕獲を観測するに留まらず十分速い横切りスピードによって捕獲量が観測精度以下の無視できる量となることを確認することも重要な目的である。さらに、粒子捕獲が起きる向きとは逆向きに共鳴を横切る場合についても、理論的考察、シミュレーション及びビーム実験を通してビームへの影響は粒子捕獲ではなくエミッタンス増大となることを明らかにし、またエミッタンス

増大量を定量的に表す式を導出した。逆向きに共鳴を横切ることに関しては、P.A.Sturrock が唯一定性的な事柄を述べただけで、定量的に取り扱ったのは本研究が初めてである。

ビーム実験は PoP-FFAG および HIMAC シンクロトロン（放射線医学総合研究所）において行った。いずれの実験でも三次共鳴横切りにおけるアイランド捕獲がはっきりと観測された。PoP-FFAG における実験では、共鳴の強さおよび横切りスピードを変えて、捕獲効率の依存性を観測することができた。また、横切りスピードが比較的速いときには、粒子が全く捕獲されないという測定結果が得られた。HIMAC シンクロトロンにおける実験では、横切る向きを変えたときに、ビームへの影響が全く異なるものであることが観測された。

PoP-FFAG における実験結果を、理論及びシミュレーションと比較した。その際、主要なパラメータである、共鳴の強さ、チューンの振幅依存性、横切るスピード、ビームエミッタンスがずれることによって、どの程度捕獲効率が変化するかを詳細に検討した。この検討の中で、横方向の2次元運動やシンクロトロン振動による捕獲効率への影響は、モデルにおいては含まれていないものであり重要な事柄である。こういった検討を踏まえて比較を行った結果、シミュレーションと実験結果は非常に良い一致を示した。一方で、粒子捕獲のモデルによって理論的に導かれた捕獲効率は、かなり少ないものとなった。その理由はモデルでは捕獲効率を導出する際に、共鳴の強さに対して非線形成分が十分大きいと仮定しているが、実験におけるパラメータは十分にその仮定を満たしていないためだと考えられる。以上から、実験結果を定量的に理解することができた。また、横切るスピードが十分に速いときは捕獲が全く見られなかったが、どの程度スピードが速ければ十分かを、定量的に見出した。

以上で述べたように、磁場の非線形成分が支配的な場合について共鳴横切りに関する研究を行った。得られた結果をまとめると、

1. A.W.Chao らによって示されたように、磁場の非線形成分が支配的な場合に共鳴を横切ると、“アイランドによる粒子捕獲”が起こる。本研究におけるビーム実験では、粒子捕獲をはっきりと観測した。粒子捕獲はこれまでシミュレーションによってのみ確認されていたが、本研究でのビーム実験、及び同時期に行われていた CERN-PS におけるビーム実験が、初めての粒子捕獲の実験的確認となる。また、粒子捕獲が起きる向きと逆向きに共鳴を横切る場合について、理論的考察、シミュレーション及び実験を通して、ビームへの影響がエミッタンス増大となることを明らかにし、初めて定量的な取り扱いを確立した。

2. PoP-FFAG におけるビーム実験では、共鳴の強さ及び横切るスピードをパラメータとして、これらのパラメータへの捕獲効率の依存性を測定した。主要なパラメータがずれることによって、どの程度、捕獲効率が変化するかを詳細に検討した。この検討の中で、横方向の2次元運動やシンクロトロン振動による、捕獲効率への影響は、モデルにおいては含まれていないものであり重要な事柄である。こういった検討を踏まえて比較を行った結果、シミュレーションと実験結果は非常に良い一致を示し、実験結果を定量的に理解することができた。また HIMAC におけるビーム実験では、横切る向きによってビームへの影響が、異なるものであることを観測した。

3. 粒子捕獲では、最終的に捕獲された粒子はビームロスとなるが、逆向き横切りでは単にエミッタンスが増大するのみであり三次共鳴の場合ではスピードが無限に遅くても、エミッタンス増大は制限されたものであることを示した。従って、逆向きに横切りのほうが、より安全な横切りであると言える。しかし、粒子捕獲の場合でも横切るスピードが十分に速ければ、捕獲は起きないことを示した。以上から、いずれの場合でも適切なパラメータのもとでは問題なく共鳴横切りがなされると結論できる。