

氏 名 家 入 孝 夫

学位（専攻分野） 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大乙第42号

学位授与の日付 平成9年9月30日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 Hysteresis Phenomena at Bunch Lengthening
Process in Electron Storage Rings

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 佐藤 康太郎
教 授 春日 俊夫
教 授 生出 勝宣
教 授 平松 成範
教 授 神谷 幸英（東京大学）
教 授 横谷 馨（高エネルギー加速器研究機構）

論文内容の要旨

バンチ長は、縦方向インピーダンスを知るためのパラメータの1つであるだけでなく、電子リング加速器の性能を決める重要な要素として使われている。バンチ長の変化は、多くの場合、Potential-Well DistortionやMicrowave Instabilityによって議論されている。その不安定性の閾値は実効的なインピーダンス (Z/n) で決まり、バンチ長はビーム電流の1/3乗で増加する、と言われている。しかしながら、バンチ長が短くなると、バンチのスペクトルが広がるので、実効的なインピーダンスは、必ずしも一定でなくなるであろう。そこで、実効的なインピーダンスの周波数依存性を変えて、バンチ長の変化を説明することをスケーリングパラメータを用いて試みた。又、Mode-Coupling Theoryによってバンチの不安定性をより一般的に説明することも試みられてきた。しかし、現実の加速器で測定されたバンチ長は、スケーリングパラメータやMode-Coupling Theoryでも説明できない複雑な現象が観測されている。このような背景から、バンチ長の複雑な振る舞いを詳しく調べる必要があるとなり、その原因を調べるのが重要である。

バンチ長は、一般にシンクロトロン放射光の時間軸プロファイルから測定される。その測定器として、市販されているストリークカメラやphoto diodeなどが用いられている。特に、ストリークカメラは、一般に広く用いられている装置である。又、シンクロトロン放射を量子的に検出し、統計処理で測定する方法も試みられている。上に述べた方法は、いずれも時間軸上での測定からバンチ形状を求めている。しかし、これらの方法は、ダイナミック特性に問題があったり、バンチ長の測定に時間がかかるため、バンチ長のダイナミックな変化を連続的に監視することには向いていない。

そこで、バンチ長の変化を実時間でもっと手軽に自動測定する方法を開発した。これは、バンチ長を周波数軸で測定することに基づく方法である。すなわち、ビームスペクトルの高い周波数域での伸びは、バンチ長に依存するので、ビームのある周波数成分を検出すればバンチ長を測定することができる。実際、1つの成分だけではビーム電流に依存するので、2つの成分の比からバンチ長が求められる。この方法は、バンチのプロファイルを求めることができないけれど、バンチ長の変化を連続的に測定することができる。

このバンチ長モニターは、トリスタンAR及びMRでテストされた。始めに、バンチがガウス分布していると思われる低電流域で行われた。測定値は、計算値とよく合い、このモニターが有用であることが確かめられた。測定の再現性は、20mmのバンチ長で ± 0.1 mm以内であった。アナログ演算を用いないで、直接検波出力を演算すると、バンチ長の標準偏差値が3mm (10ps) でも測定可能であることが確認された。このモニターの特徴は、リアルタイムで完全自動測定であること、高分解能であることである。

次に、バンチ長のビーム電流依存性を測定した。バンチは、Potential-Well Distortionや縦方向不安定性によってガウス分布からずれていくことが予想されるので、同時にストリークカメラでバンチのFWHMも測定した。このモニターの出力とストリークカメラのFWHMとは、実際異なった値を示した。その不一致を説明するために、ガウス分布でない分布について、FWHM、標準偏差 (rms.) 値と周波数成分比から求めたバンチ長とを比較した。分布関数によっては、FWHM/2.354と標準偏差値とは、30%近くずれる場合もある。計算の結果、AR及びMRで使われた検出周波数成分比から求めたバンチ長は、標準偏差値とよく

一致することがわかった。

このモニターを用いて、トリスタンARでバンチ長を測定した。ビームは、入射エネルギー、シングルバンチである。バンチ長をビーム電流や加速電圧の関数として測定すると、バンチ長の不連続性が観測され、ビーム電流や加速電圧などのパラメータを固定しても、バンチ長が2つの値をもつヒステリシス現象が観測された。2つのバンチ長に、約30%の差が生じた。バンチ形状に大きな差はないものの、シンクロトロン振動モードに明らかな違いが観測された。さらに、縦方向不安定性の電流閾値を調べるために、コヒーレントなシンクロトロン振動を観測した。その振動は、ヒステリシス現象が起きているビーム電流領域で観測されていたが、ヒステリシスを起こす電流より低い電流で発生していることもわかった。この電流閾値は、次に述べるシミュレーションでも確かめられた。

ヒステリシス現象の原因を調べるために、リングのインピーダンスを調査した。リングの代表的インピーダンス源である加速空洞とベローズと放射光マスクのウエイクファンクションをABCイで計算した。計算されたウエイクの周波数特性は、Broadband Impedance Modelとは全く異なった形であった。すなわち、空洞による成分は、主にビームスペクトル内に存在し、ベローズによる成分は、ビームスペクトルより高い周波数域にある。いわば、ARのインピーダンスは、空洞とベローズによる双峰特性を形していると言える。

このような計算されたARのウエイクのデータを用いてバンチの不安定性を計算機シミュレーションコードで調べた。このコードは、線形近似の基で時間変化する分布関数を扱うことができる。したがって、バンチの定常分布の他に、各振動モード毎にその成長率を計算することができる。その結果、不安定性の成長率をバンチのエネルギー広がり関数（成長率関数）として調べると、あるバンチ電流領域で、その成長率がエネルギー広がり関数に対して単純な減衰曲線とはならず、途中でピークをもった特性を示した。この特性は、「バンチ長やエネルギー幅が広くなればバンチは安定になる」と言う常識を覆す現象である。このバンチ長の変化の過程で、振動モードの遷移が見られた。この特性は、ピークの両側に2つのバンチ長が存在するであろうことを示唆している。シミュレーションで得られたピークを持つ電流領域は、実験で得られたヒステリシス領域とほぼ一致した。又、シミュレーションでの振動モードと観測された周波数とはほぼ一致した。シミュレーションで得られた他の多くの結果も、実験結果と矛盾していない。

このピークをもつ特性は、空洞とベローズの数に依存している。シミュレーションで、空洞のセルを減らしたり、ベローズの数を増やしたりすると、ピーク特性が緩和された。実際、ARで空洞を88セルから半分の44セルに減らしてビーム実験した結果、シミュレーションの予言どおり、ヒステリシス現象は、観測されなかった。すなわち、このヒステリシス現象は、成長率関数がピークをもつ特性と一致していて、このピーク特性は、ARの空洞とベローズで作る合成ウエイクによって作られると結論できる。又、コヒーレント振動の発生による不安定性の電流閾値と振動モードとは、実験とシミュレーションでほぼ一致した。これらの結果は、バンチの縦方向不安定性がシンクロトロン振動の径方向分布に依存するという解析の正当性を裏付けるものである。バンチ長の奇妙な振る舞いは、コヒーレント振動モードとシミュレーションの成長率関数を調べることによって予測可能となった。

論文の審査結果の要旨

家入孝夫氏の論文は、電子加速器（電子リング）におけるバンチ長のヒステリシス現象を解析したものである。

電子リングにおいては、電子はバンチと呼ばれる数センチメートルの長さで細いひも状の塊となって周回している。バンチはそのまわりに電磁場を伴っており、リングの真空パイプによってその電磁場が一部散乱される。バンチ電流が増加するとそれに伴って散乱波も強くなり、散乱電磁波によってバンチの長さが変化したり、形状が不安定になったりする。多くの場合はバンチ長は電流とともに長くなる。バンチ長は加速器の性能を示す重要なパラメーターの一つであり、今までに電子リングにおけるバンチ長の解析について多くの論文が発表されている。

本論文が扱うヒステリシス現象とは、バンチ長の変化が電流の増加する場合と減少する場合とで異なることを意味している。実際のバンチ長の変化には急激で不連続的な変化も伴っている。このヒステリシス現象を見つけその説明を試みたのは本論文が初めてである。

家入氏はまずバンチ長を常時測定できるシステムを開発した。電子リングにおいて電流が小さい場合には、バンチの長さは加速器の運転条件によって決定され、さらにバンチの長さ方向の電子分布がガウス型となりバンチ電流の周波数分布もガウス型のスペクトルになることが知られている。バンチの持つ周波数スペクトルの広がりやバンチ長に依存することから、スペクトルの型としてガウス型を仮定すると、二つの周波数でのバンチのスペクトルの比を求めることによってバンチ長を推定することができる。このシステムによる測定と、バンチの長さ方向の形状を直接測定できるストリークカメラの測定とを比較し、バンチ長モニターとして十分な性能を持っていることをまず確かめた。

このバンチ長モニターを蓄積リング（AR）に設置し、バンチ電流や加速電圧の関数としてバンチ長を測定すると、ヒステリシス現象を伴うバンチ長の不連続性が観測された。そこでヒステリシス現象の原因を調べるために、バンチ電流と、真空容器による散乱波との関係を定量化する、リングのインピーダンスを調査した。インピーダンスには高周波加速空洞と真空パイプ接続部のベローズが主に寄与し、それらの周波数領域が大きく異なるためにリング全体のインピーダンスは周波数領域において双峰特性をしていることがわかった。

このリングのインピーダンスでのバンチの不安定性を計算機を用いて数値解析を行った。その結果、不安定性の成長率がバンチのエネルギーの広がり（バンチ長に比例する量）の関数として単純な減少関数にならずに、途中でピークを持つ特性を示した。散乱波によってバンチ長がどのように変化するかについてのモデルとして、散乱波による不安定性の成長率がバ

ンチ内の振動の減衰率と釣り合うようなバンチ長が実現される、とする良く知られた方式を採用した。このモデルによれば、数値計算の結果は成長率のピークの両側に安定なバンチ長が二つ存在でき、ヒステリシス現象も存在することを意味する。定量的にも、実験で得られたヒステリシス現象の領域を説明することができた。また、数値計算で得られた他の多くの結果も、実験結果と矛盾しない。

ヒステリシス現象は、インピーダンスの双峰特性が原因と考えられることがわかった。加速空洞の数を減らすとヒステリシス現象が無くなることが数値計算によって予測されるが、確かに加速空洞の数を半分にして実験するとこの現象は見られなくなった。

以上、家入氏の論文は自身で開発したバンチ長モニターで、バンチ長のヒステリシス現象を発見し、その原因を調べ探し出したものである。また、バンチ長モニターのシステムについての考察を行い、測定器としての信頼性を十分に示している。

これらの仕事の結果を含む本論文は、学位論文として十分な価値があると審査委員全員が認めた。