

超小型シンクロトロンみらくる 20 の 赤外線発生専用機への改造

高島亮、南圭一郎、豊杉典生、浅野之治、東間崇寛、中村祐基、菊沢健、文雅司、遠山勲、
山田廣成

立命館大学理工 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

概要

超小型シンクロトロン“MIRRORCLE-20”を遠赤外線発生専用機として改造した。リング内入射軌道上に発生するフリンジング磁場によりビームが発散するのを防ぐために、四極永久磁石をリング内に設置して、ビーム入射を行っていたが、遠赤外線レーザー発振に向けてリング内に円形の光共振器を設置するため、四極永久磁石を設置することが出来なくなった。今回、環状永久補正磁石を組み込むことで、フリンジング磁場をキャンセル出来た。電子ビームの入射効率は、改造磁場を用いたシミュレーションどおりであり、ほぼ 100%であった。

1 “MIRRORCLE-20” の HISTORY

1.1 “MIRRORCLE-20”

本研究室では、外径 1.2 m、高さ 1.5 m、電子の中心軌道半径 0.156 m という、新型光源 MIRRORCLE-20[1-4]の開発を行っている (図 1)。これは世界最小の完全円形電子蓄積リングである。科学技術振興事業団さきがけ研究 21[5]、科研費基盤研究 A[6]、などの学外資金で開発した。物理設計、機械設計から組み立て、据付、入射実験までの全てを、山田及び学生で行った。小型とはいえ、新型加速器の開発を私立大学の一研究室で行ったのは多分歴史上初めてのことである。2000 年にシンクロトロン成功発表を行った。MIRRORCLE-20 は、遠赤外線領域から硬 X 線領域に互る光を発生させることが出来る。

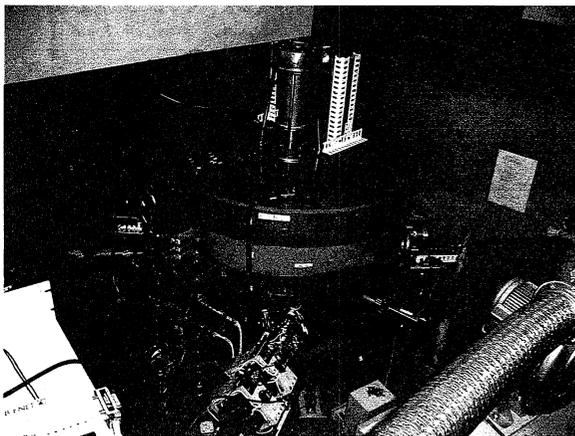


図 1 : MIRRORCLE 20 全景

1.2 “MIRRORCLE-20” の目的

MIRRORCLE-20 の目的は、硬 X 線の発生と光蓄積リング理論[7][8]に基づくレーザー発振の実証である。

既に硬 X 線発生には成功している。シンクロトロン内を周回する電子の中心軌道上に細線ターゲット (鉛、アルミ、銅等) を設置し、制動放射を起こさせる。この方法を用いることにより低エネルギー電子でも、硬 X 線の発生が可能となる。細線ターゲットを使用する為、多重散乱が起こらず放射光と同様に放射が前方に集中する。これまでにイメージング実験、癌照射実験、蛍光 X 線分析等の利用で成果を上げた。

今後は以下に述べる光蓄積リング理論を実証する為及び高輝度赤外線利用の専用機にシフトする。即ち電子軌道面と同一平面内に完全円形の光共振器 (以下ミラー) を設置し、全周から発生する放射光をミラー内面に蓄積し、運動している電子と相互作用させることでレーザー発振を起こす。その結果、遠赤外領域の大パワー光の発生を目指す。これは自由電子レーザーと形は異なるが、同じ発生機構を持つ。レーザー発振が出来れば、RF パワー 1kW 投入によって平均で連続 100W 程度の単色の遠赤外線が発生する予定である。利用目的として、動脈硬化の治療、癌治療などの医学利用や、生体ダイナミクスの研究を通じた生命活動と遠赤外線の相関を解明する。

1.3 光蓄積リングを実施する上での問題点

MIRRORCLE-20 では、パートベータ (パルス磁場発生器) を用いた 2/3 共鳴入射法[9]によるビーム入射を確認している。これまで MIRRORCLE-20 のシンクロトロン主磁場にはフリンジング磁場による強い発散力が存在した。そこでビームの入射には、共鳴入射だけではなく、同時に四極永久磁石によるビームの収束を行う必要があった。

今後レーザー発振を起こす為にミラーを設置しなければならないが、これまで用いていた 4 極永久磁石は、ミラーとは位置的に干渉することが問題であった。我々は 4 極永久磁石を使わずに効率よく入射を行う事が出来るように、磁場分布の改良を行った。

2 四極永久磁石を使わないでビーム入射を可能にする方法

2.1 主磁場の補正を行う為のアイディア

主磁場のフリンジング磁場を打ち消す為、永久磁石を用いることを検討した。永久磁石は、空気に近い透磁率を持つために、電磁石の作る磁場と永久磁石のつくる磁場を重ね合わせるだけで必要磁場を生成できる。電子軌道と同心の環状永久磁石1対を軸対称に置くことを検討した。永久磁石の径、強さが適当ならば、半径 $r=250\text{mm}$ から $r=300\text{mm}$ あたりに存在するフリンジング磁場をキャンセル出来ると考えた。

我々は永久磁石の仕様を決定するために、磁場解析ソフトを使って発生する磁場分布を計算した。計算領域としては、対称性から、軌道の中心を含む鉛直面でのシンクロトロン断面を再現すれば十分である。モデリングは FEMAP[10]で行った。計算は PHOTO-MAG[11]を用いた。MIRRORCLE-20 内部の構造を考慮して、設置可能な領域の範囲内で、補正永久磁石の設置位置、大きさ、強度等をパラメータとして計算を行った。その結果、補正磁石の断面形状、最適な設置位置を見出す事が出来た。永久磁石の磁場分布のピーク値が 1000Gauss となる場合について、主磁場と重ね合わせた結果を図 2 に示す。図 2 から、主磁場の漏れ磁場成分をキャンセルする事が出来ている事が分かる。

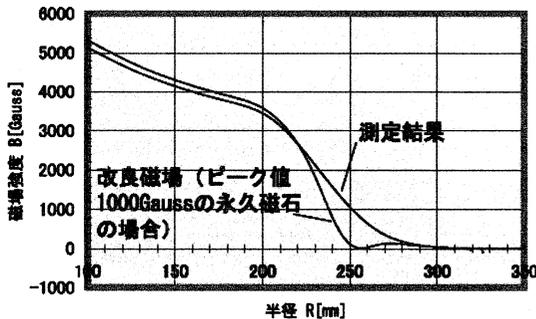


図 2 : 磁場分布

シミュレーションで得られた結果を元に、補正永久磁石を製作した。サマリウムコバルトで製作した補正磁石は、銅版に円周状に取り付けられた。永久磁石を設置した際のリングの断面図を図 3 に示す。

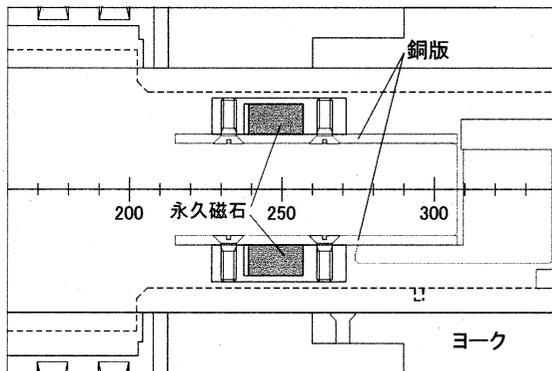


図 3 : 永久磁石設置後のリング断面図

2.2 シミュレーションについて

入射ポートやミラー等の装置と干渉しないような、入射可能な軌道を、数値シミュレーションによって見出した。

edynan コードは MIRRORCLE-20 内部の主磁場、トリムコイル磁場、パータベータ、加速空洞などを再現して電子の軌道を計算している。

まず先に電子の軌道計算をする。シンクロトロン内部で、入射平面上に電子を置く。電子の初期条件及び磁場分布、加速空洞電場強度等の条件を与える。電子を置いた点を出発点として、1 個の電子がどのような軌道を描いて周回するかを計算する。入射出来たかどうかの判定は、電子が 1000 回転したかどうかで行う事とした。

次に入射点を見出すために、MIRRORCLE-20 内部で電子が 1000 回転したときの条件を用いて、時間を逆方向に進ませて入射ポート付近の、入射点までの軌道を計算する。

上記 2 つの計算から、入射平面上においてどのような初期位置と初期角度を持った電子が MIRRORCLE-20 の中を周回続けることができるかを見ることが出来る。計算によってパータベータの強度、パルス幅、タイミング、高周波加速空洞の電場強度それぞれの最適値を得た。それを表 1 に示す。

表 1 ビーム入射に最適なパラメータ

パータベータ強度	6000A
パータベータのパルス幅	0.21 μs
パータベータ摂動磁場のタイミング	0.036 μs
高周波加速空洞の電場強度	25kV

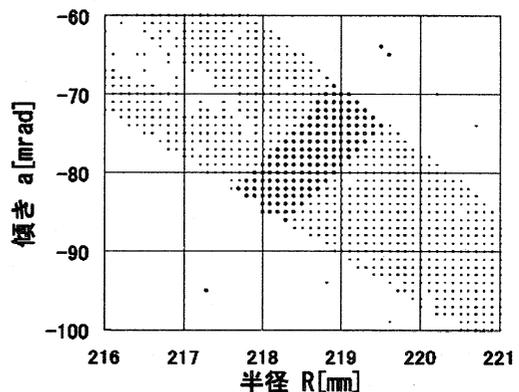


図 4 : 計算したアクセプタンス

表 1 のパラメータを用いた計算から、図 4 に示すような位相空間上 (ここで R は電子の動径方向位置、 a は動径方向運動量であり、 R を軌道に沿った距離 s で微分したもの) のプロット図を得た。プロットしている点は、ビーム電子がリング内で 1000 回転の周回を行う事が出来る R と a の組を示す。その中でも、装置との干渉を起こさずに入射が出来る点を、少し大きい点でプロットしてある。大きい点をプロットしている領域の面積が MIRRORCLE-20 のアクセプタンスである。図 3 からアクセプタンス値 $15.0 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ を得る。最適な入射ポイントは、得られたアクセプタンスの領域の中ほどの点、 $R=218.6 \text{ mm}$ 、 $a=-79 \text{ mrad}$ と決定した。

この入射ポイントに入射した場合の電子の軌道の様子を図 5 に示す。電子軌道に加えて真空チャンバー及びパータベータ、加速空洞の外形を重ねて描いたものである。a)はパータベータ OFF の場合で、b)は ON の場合である。ON の場合は回り始めた最初の 3 回転だけを描いた。また、真空チャンバーには全部で 16 本のポートがあるが、図 5 では簡単のためビーム入射ポートと光を取り出すポートだけを描いている。

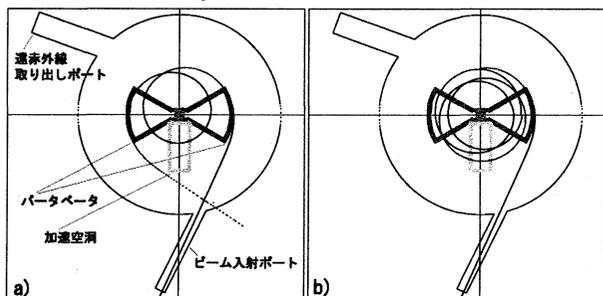


図 5：最適入射点から計算した軌道

3 入射実験

補正磁石を設置してビーム入射実験を行った。入射が出来るかどうかを見るために、円形ミラーは設置していない状態である。ビーム輸送管上に設置した、軌道修正用の偏向電磁石、四極電磁石を用いて、図 4 に示している軌道の再現を試みた。マイクロトロンから入射する電流のピーク値 8~12mA、繰り返し数 40Hz の実験で、以下の事を確認できた。

- ・電子軌道を確認するために、蛍光物質を塗布した 5 μ m 厚の Al 箔で出来たスクリーンモニターをアームに取り付けて、リングの外側から挿入する。パータベータを ON にした状態では、Al 箔が明るく光る。OFF にした状態では光らないか、若しくは暗く光る。

- ・円形ミラーを入れない状態での遠赤外線の予備的な計測を MCT 検出器で行った。準楕円ミラーを設置してリング内で放射した光の 1/4 を集めた。パータベータ ON で Al 箔が明るく光る場合には、ターゲットを軌道から外したときに、電圧 10mV~80mV、寿命 4ms~20ms 程度の遠赤外線を検出した。観測した波形の例として、ピーク電圧 80mV、寿命約 20ms の波形を図 6 に示す。パータベータ OFF の状態では信号は得られなかった。検出器の立ち上がり時定数は、6ms と長いために、実際の、寿命はもっと長いと考えて良いが、現在のところ不明である。

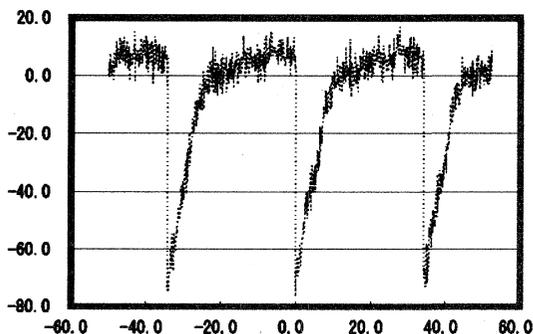


図 6：MCT で計測した遠赤外線信号

- ・パータベータ OFF では、一旦入射した電子は、周回を続ける事が出来ずにチャンバー内壁にぶつかる。チャンバー内壁に蛍光板を置いて、CCD カメラで観測した。パータベータ ON では蛍光板は光らない。OFF では、蛍光板が光る。

- ・入射は、正確に理論入射軌道を追跡することで成功した。パータベータ OFF の状態で、Al 箔スクリーンの位置を径方向に動かして、その 2 回の周回軌道付近に持っていくと前項の蛍光版の光が消える。

以上の事実は、磁場改造後のシンクロトロンで、電子が理論どおりに周回していることを示している。MCT の強度から判定できる入射効率、ほぼ 100%であった。

4 まとめ

MIRRORCLE20 を赤外線レーザー発振専用機として改造するために、四極永久磁石を用いず、環状永久磁石を開発して入射実験を行った。MCT による観測結果から MIRRORCLE20 への電子ビーム入射は、ほぼ 100% の入射効率があることがわかった。今後は、円形ミラーを設置してレーザー発振を行うと共に、高輝度赤外線の利用プログラムを進める。

参考文献

- [1] 山田廣成, 日本放射光学会誌. 11 (1998) 77.
- [2] H. Yamada, Jpn. J. Appl. Phys. 35 (1996) 182.
- [3] H. Yamada, Advances in Colloid and Interface Sci. 71-72 (1997) 371.
- [4] H. Yamada, Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A304 (1991) 700.
- [5] 山田廣成, さきがけ研究 21 研究報告書 (科学技術振興事業団). (1997) 1.
- [6] 山田廣成, 基盤研究 A 研究成果報告書. (1998) 1.
- [7] H. Yamada, Jpn. J. Appl. Phys. 28 (1989), 1665.
- [8] K. Mima, K. Shimoda, and H. Yamada, IEEE J. Quantum Electronics, 27 (1991) 2572.
- [9] 高山猛, 住友重機械技法. 39 (1991) 11.
- [10] Numerical Simulation Tech Co., Ltd., コマンド・リファレンス. 8.2 (2002).
- [11] Photon Co., Ltd., PHOTO-MAG ユーザーズマニュアル.