

氏名・(本籍)	かとうりゅうこう 加藤龍好
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第1295号
学位授与年月日	平成5年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)原子核理学専攻
学位論文題目	導体境界によるコヒーレント放射光発生 の抑止効果
論文審査委員	(主査) 教授 菅原真澄 教授 山川達也 教授 池沢幹彦

論 文 目 次

- 第1章 序 論
- 第2章 実験装置と方法
- 第3章 測定結果
- 第4章 抑止効果の理論計算
- 第5章 考 察
- 第6章 本研究のまとめと加速器への応用

論文内容要旨

第1章 序論

抑止効果¹⁾とは真空ダクト等の導体境界の存在により、その内部で発生する放射光の長波長領域の強度が抑えられることである。バンチ長よりも長い波長領域では、電子はコヒーレントな輻射によりエネルギーを失うことが考えられる。バンチ長が十分短い場合には、この輻射損失は無視し得ない値になるはずである。ところが、1940年代のシンクロトン放射光発見当初には、実際にはそのような輻射損失の存在を示す実験結果は得られていない。これを説明するために、加速器の真空ダクト内で発生する輻射場は、自由空間で発生する場と異なり、長波長領域での強度が強く抑止されるという効果が考えられた。

本研究ではこの効果に着目し、コヒーレント放射光²⁾の発生領域のダクト形状を可変にして、境界条件の変化に対するコヒーレント放射光発生を抑止効果の検証を行った。実験の概念図を第1図に示す。

第2章 実験装置と方法

実験装置の配置図を第2図に示す。実験条件はビーム・エネルギー50MeV, エネルギー幅0.2%, パルス幅2 μ sec, パルス繰り返し300pps, 加速周波数は2856MHzで、電子は位相角で5.5°にバンチしていると考えられている。

電子ビームは図中左側から入射し、放射光発生用偏向電磁石で曲率半径2.44mの円軌道を描き、その軌道を18.42°曲げられた後、ダンプ用偏向電磁石に入射する。電子ビームはダンプ用偏向電磁石で軌道を入射ラインと平行に戻されたあと、ビーム電流モニターを通過し、ビームダンプに捨てられる。

偏向電磁石上で電子により放出された放射光はM1, M2の2つの平面鏡, 集光角70mrad 口径 ϕ 150mmの球面鏡M3, 平面鏡M4を経て、分光器に導かれる。分光器は偏光子型干渉計と回折格子型分光器を用いた。これにより分光された放射光は、液体ヘリウム温度に冷却されたシリコン・ボロメーターにより検出される。

放射光の発光点近傍には上下2枚のシールド板(平行アルミ板・厚さ1mm)がビームの軌道面に対し平行・等間隔にセットされており、その間隔は全幅14.8~81mmの間で可変である。シールド板の形状は180×200×300mm(上流辺×下流辺×長さ)の台形であり、下流側から50mmまではシールド板間隔を狭めたときに放射光の立体角を制限しないように約100mradの角度を付けている。

また、集光系をでた光が最初に焦点を結ぶ位置の近傍に、迷光カットのためのスリットを設けた。これは分光器に対し、設計された光路外からの光の進入を防ぐためである。このスリット幅は全幅で6mmである。ただし、このスリットを用いた場合には、測定の結果に回折による影響が現れると考えられるので、測定はスリットを用いた場合と用いない場合の両方で行った。

第3章 測定結果

測定は偏光子型干渉計と回折格子型分光器で行った。

シールド板間隔を81, 36, 24, 18, 14.8mm (全幅) で固定し, 偏光子型干渉計を用いてコヒーレント放射光のスペクトルを測定したときの, スペクトル強度の変化を第3図に示す。図中のデータはシールド板間隔81mmのときのスペクトル強度でそれ以外の間隔のときのスペクトルを割った相対的なスペクトルの変化である。図中の実線は迷光カット用のスリットが無い場合の測定値を, 一点鎖線はスリットを取り付けた場合の測定値を示している。

また, 波長を1.6, 3.0, 4.0, 4.5, 5.0mmで固定し, シールド板間隔を連続的に変化させたとき, 回折格子型分光器を用いて測定したコヒーレント放射光の強度変化を第4図に示す。図中のデータはシールド板間隔全幅80mmのときのそれぞれの波長の強度で規格化してある。図中の実線は迷光カット用のスリットが無い場合の測定値を, 一点鎖線はスリットを取り付けた場合の測定値を示している。図に示されているように, 放射光強度はシールド板間隔を狭めるにつれて一旦増加したのちに減少する。

第4章 抑止効果の理論計算

3次元空間 (xyz 軸) 内の $z = \pm a/2$ に無限に大きな平行金属板が置かれていると仮定する。このとき $z=0$ の平面上を軌道半径 R , 角速度 ω_0 で回転する電子バンチから放射されるコヒーレント放射光の全強度は次式で与えられる。

$$P_{\text{coh}} = N^2 \sum P_n f_n \quad (1)$$

ここで, N はバンチ内電子数, f_n はバンチ形状因子 (規格化されたバンチ内電子密度分布を Fourier 変換し 2 乗したもの), P_n は上記の条件で 1 個の電子が回転するときに放射する放射光の n 次高調波成分 (角周波数 ω が基本角周波数 ω_0 の n 倍) の強度であり, 以下のように与えられる。

$$P_n = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{n\omega_0 e^2}{R} \frac{4\pi R}{a} \operatorname{Re} \left\{ \sum_{j=1,3,\dots} \left[-H_n^{(j)} J_n + \frac{\beta^2}{2} (H_{n-1}^{(j)} J_{n-1} + H_{n+1}^{(j)} J_{n+1}) \right] \right\} \quad [J/\text{electron}/\text{sec}/\Delta n] \quad (2)$$

これが J.S.Nodvick と D.S.Saxon により導かれた式¹⁾である。ここで, J_n は第 1 種 Bessel 関数, $H_n^{(j)}$ は Hankel 関数であり, その引数は J_n , $H_n^{(j)}$ とともに,

$$r_{nj} R = [(n\beta)^2 - (j\pi R/a)^2]^{1/2} \quad (3)$$

で与えられる。また $\beta = \omega_0 R/c$ である。

ここで, $\xi_j = j\pi R/a$ とおいて, J_n と $H_n^{(j)}$ を変形 Bessel 関数で近似すると,

$$P_n^{(\infty)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{n\omega_0 e^2}{R} \frac{4\pi R}{a} \frac{1}{3\pi^2} \sum_{j=1,3,\dots}^{j < na/\pi R} (\xi_j/n)^4 \times [K_{1/3}^2(\xi_j^3/3n^2) + K_{2/3}^2(\xi_j^3/3n^2)]$$

[J/electron/sec/Δn] (4)

となる。この式を 1mrad, 1%BandWidth 当たりの Photon 数に変換すると,

$$P(\omega)^{(\infty)} = \frac{4 \times 10^{-6}}{3\pi} \alpha \frac{nR}{a} \sum_{j=1,3,\dots}^{j < na/\pi R} (\xi_j/n)^4 \times [K_{1/3}^2(\xi_j^3/3n^2) + K_{2/3}^2(\xi_j^3/3n^2)]$$

[Photons/electron/mrad/1%BandWidth] (5)

となる。ここで α は微細構造定数である。

この理論式を用いて計算された放射光強度の変化を第 3 図, 第 4 図中に点線で示す。

第 5 章 考 察

仮に、導体境界によるコヒーレント放射光発生の抑止効果が存在しないとすると、第 3 図, 第 4 図に示される相対強度は常に 1 になるはずである。測定結果は明らかに抑止効果の存在を示している。またこの結果は、Nodvick と Saxon の理論により予測される強度変化と傾向的にはほぼ一致している。しかし、シールド板間隔を狭めていったときの放射光強度の落ち方は、理論的に予測されるものよりも小さい。この原因としては、シールド板端を電子が通過するときの Wake Fields が考えられる。

また、(5)式から得られる抑止された放射光のスペクトルと J.Schwinger³⁾ により導かれた自由空間での放射光の理論スペクトルの差をとり、数値積分すると零になることが解った。これは電子がインコヒーレントな放射光として失う全エネルギーは境界条件の有無によって変化しないということを示している。しかし、(1)式に示すように、角周波数 $\omega(=n\omega_0)$ のコヒーレント放射光強度はバンチ形状因子 f_n に依存するため、 $f_n \sim 1$ となる角周波数領域全体にわたって、インコヒーレントな放射光強度が抑止されている場合には、電子がコヒーレント放射光として失う全エネルギーは大きく減じられることになる。

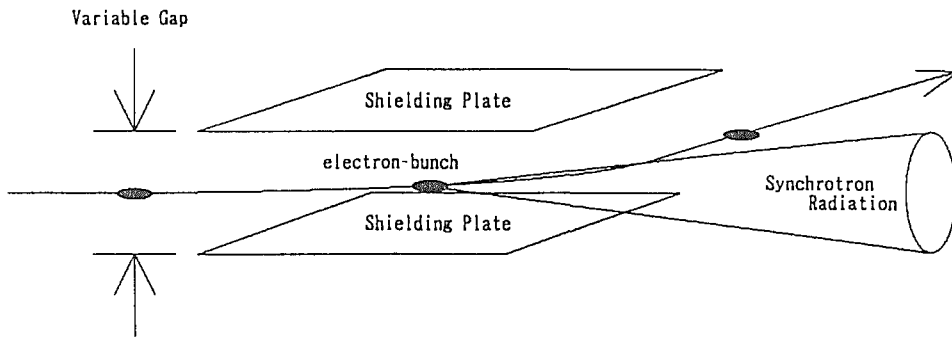
第 6 章 本研究のまとめと加速器への応用

導体境界の変化によりコヒーレント放射光の強度は増減することが確認された。またこの強度変化は理論的に導かれる結果と定性的に一致している。

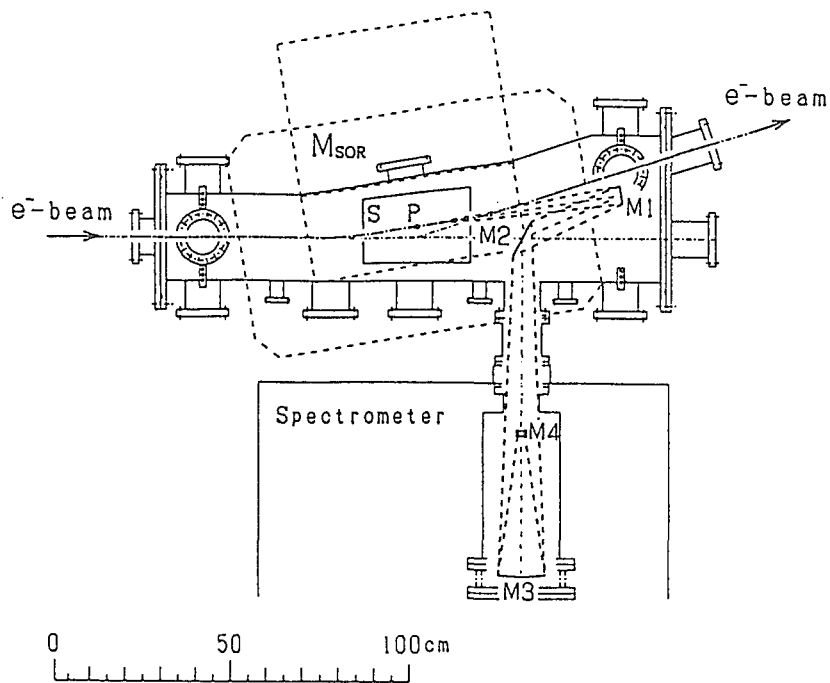
この放射光の抑止効果の研究はリニア・コライダのバンチ圧縮アーク部や大型の円形加速器の偏向部などコヒーレントな放射光損失が無視し得ない加速器のダクト形状の決定に有益であると考えられる。

参考文献

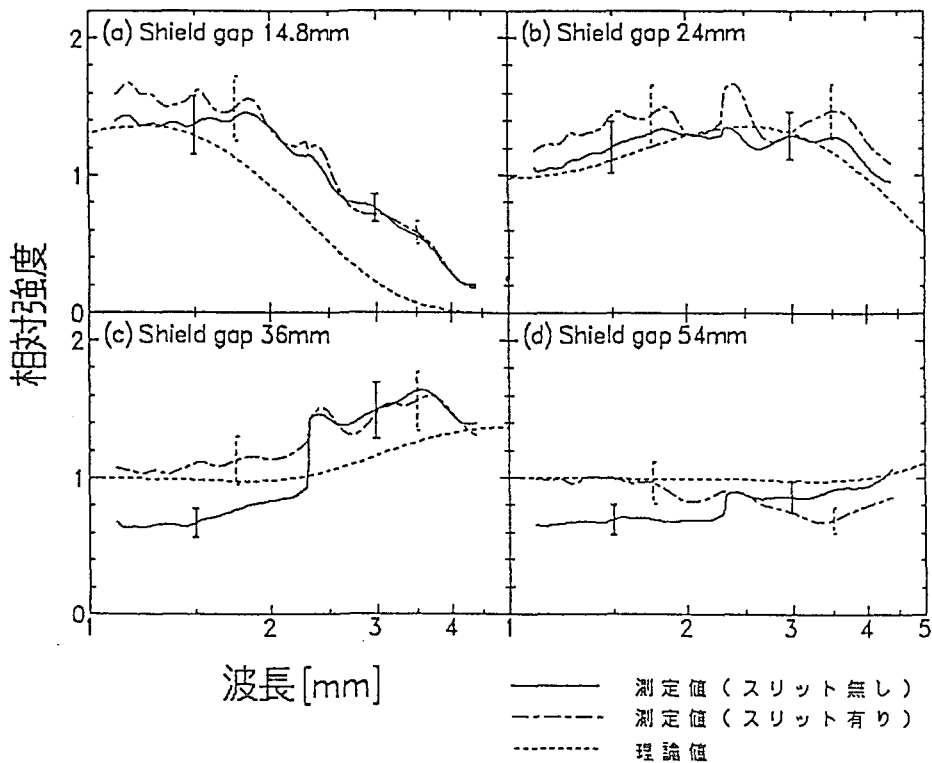
- 1) J. S. Nodvick and D. S. Saxon, Phys. Rev. **96**, 180 (1954).
- 2) T. Nakazato et al., Phys. Rev. Lett. **63**, 1245 (1989).
- 3) J. Schwinger, Phys. Rev. **75**, 1912 (1949).



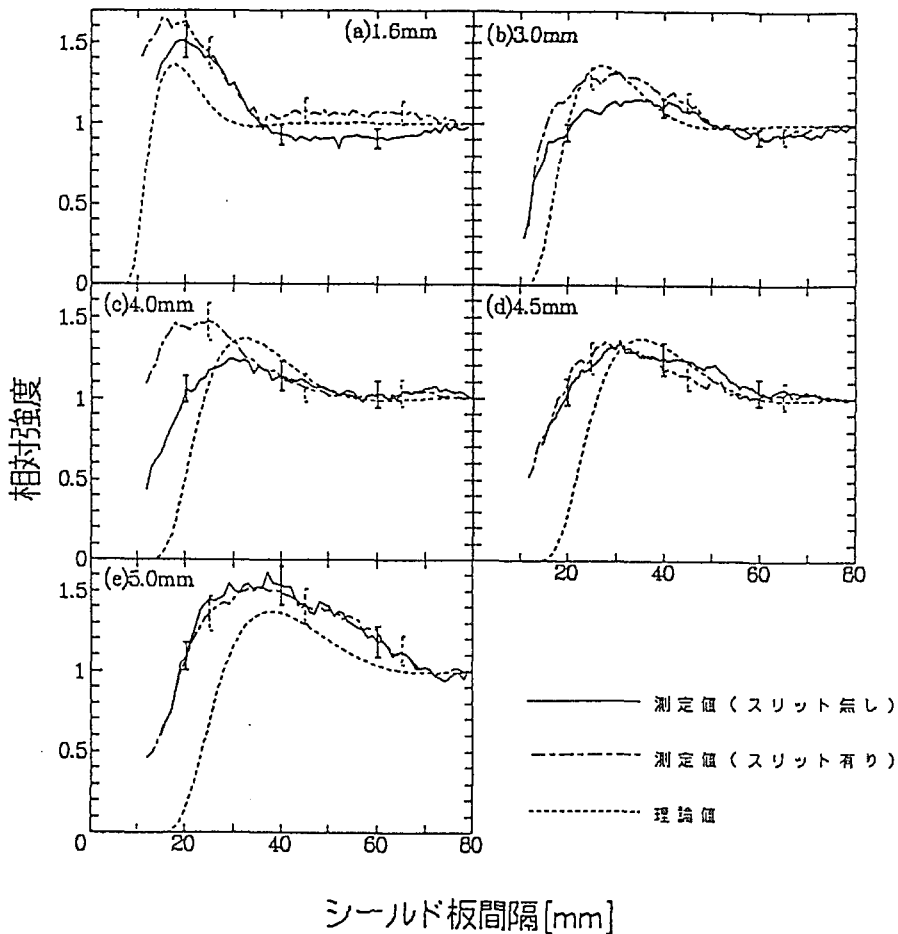
第1図 実験の概念図。放射光の発光点の近傍には上下に2枚のシールド板が、軌道面に対し平行・等間隔に配置されており、その間隔は遠隔操作により可変である。



第2図 実験装置の配置図。鏡M1, M2, M3は軌道平面上にあり、M3で集光された放射光は軌道面よりも80mm下に設置された鏡M4で分光器に対し上から入射される。M_{sor}：放射光発光用偏向電磁石、S：シールド板（平行アルミ板）、P：放射光発光点、M1, M2, M4：平面鏡、M3：集光鏡。



第3図 境界条件の違いによるコヒーレント放射光スペクトルの変化（偏光子型干渉計による測定）。横軸は波長 [mm]，縦軸はシールド板間隔 81mmのときのスペクトル強度で、それ以外のシールド板間隔のスペクトル強度を割った、相対的な強度である。シールド板間隔は(a)14.8 mm, (b)24mm, (c)36mm, (d)54mmである。図中の実線は干渉分光計により得られたスペクトル，一点鎖線は全幅 6 mmのスリットで軌道面から垂直方向に±75mrad以上の角度で広がった迷光を遮ったときに得られたスペクトル，点線は Nodvick と Saxon の理論による理論スペクトルである。波長 1.1mm～2.3mm までは波長 1.0mm の短波長カットフィルターでの測定，波長 2.3mm 以上は波長 2.0mm の短波長カットフィルターでの測定である。



第4図 波長固定で境界条件を変化させたときのコヒーレント放射光の強度変化 (回折格子型分光器による測定), 横軸はシールド板間隔 (全幅) [mm], 縦軸はシールド板間隔 80mm のときのコヒーレント放射光強度で, それ以外のシールド板間隔のときの強度を割った, 相対的な値である。波長は(a)1.6mm, (b)3.0mm, (c)4.0mm, (d)4.5mm, (e)5.0mm である。図中の実線は回折格子型分光器を用いた通常の測定により得られた強度変化, 1点鎖線は全幅 6mm のスリットを回折格子型分光器内の焦点位置に設置し, 軌道面から垂直方向に異なる光路を通して検出器に入射する迷光を遮ったときに得られた強度変化, 点線は Nodvick と Saxon の理論に基づいて計算した強度変化である。

論文審査の結果の要旨

本論文は導体境界によるコヒーレント放射光発生を抑止効果の存在を実験的に立証し、抑止効果の特性を解明するために行った実験を解析した結果について論じたものである。本論文はコヒーレント放射光の基礎理論と諸特性について解説し本研究で解明しようとする問題の背景を明らかにする部分、これを解明するために構築した実験装置と測定器の較正に関する部分、実験で得られた結果を解析する部分、抑止効果の理論を展開し、この効果が放射光のスペクトルに与える影響を理論的に示す部分、実験結果と理論を比較し考察する部分および抑止効果の存在を結論し実際の大型円形加速器に適用してコヒーレント放射光が無視し得ない加速器のダクト形状の決定に応用する部分からなる。

本研究は東北大学原子核理学研究施設で観測されたコヒーレント放射光のスペクトルが波長1～2 mmの付近にピークを持ちその両側で急激に強度が減少してコヒーレント放射の理論から特に長波長側で大きく離れることを問題とし、1940年代に加速器での放射損失が自由空間におけるコヒーレント放射の理論に従わないことを説明するために提案された導体境界による抑止効果の理論を適用することを試みた。この理論は重要なヒントにはなっているが提案されただけで検証は試みられないままであった。本論文では導体境界のない空間でのシンクロトン放射光の発生を理論的に考察しSchwingerによって導かれた理論式と一致することを確認、更に無限平行導体による効果を導入しNodvickとSaxonによって導かれた抑止効果の理論式と一致することを確認して実験データの解析を行い理論と比較している。抑止理論に関する参考文献は殆ど無く理論式の真偽の程も定かでない状況の下で実験データと比較出来る理論式を導出し結果としてNodvick, Saxonの理論の正当性を実証し、抑止効果の存在を実験的に証明している。

本審査委員会は以上の研究がコヒーレント放射光の発生技術とコヒーレント放射光の定量的な測定技術に裏付けされた研究成果であり、放射光科学と加速器物理学に与える寄与は極めて顕著なものがあるとし博士論文として適当であると評価する。又、本論文は自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、加藤龍好提出の論文は博士(理学)の学位論文として合格と認める。