

氏名・(本籍)	伴 悦 夫 (東京都)
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工博乙第 25 号
学位授与の日付	平成 2 年 2 月 1 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
学位論文題目	ローズシム法による電磁石磁界均一度の向上に関する研究

	(委員長)		
論文審査委員	教授 水 品 静 夫		
	教授 染 谷 太 郎	教授 萩 野 實	
	教授 大 月 卓 郎	教授 野 田 直 剛	

## 論 文 内 容 の 要 旨

研究用電磁石は一般に円筒或いは円錐筒形の強磁性体の磁極片を同軸上に相対向して配置し、空隙に発生する 0.3～2 T の磁界を試料に加えるための装置である。多くの実験で、磁界の均一度が正確さを決める要因の一つである。このため研究用磁石では、できるだけ大きな空間内に均一な磁界を発生させようとしている。本論文は、その方法の一つである磁極片の縁端部にリム状の突起を設け磁極片が有限なために生ずる径方向の磁界低下を補い、通常 0.1～1cc の試料容積内において局所的に不均一を除去する、いわゆるローズシム法による磁界均一度の向上法を理論的・実験的に研究した結果をまとめたものである。

第 1 章は緒論で、研究の歴史、概要と意義、第 2 章は等角写像法による低磁界での設計理論、第 3 章は一樣磁化仮定に基づく高磁界での設計理論、第 4 章は偏極標的実験用磁石におけるローズシムによる磁界均一化の実施例、第 5 章は結論と残された課題を、それぞれ述べた。なお、本論文では空隙の中心における磁束密度を  $B_0$ 、中心付近の一定容積内での最大(あるいは最小)の磁束密度を  $B$  として  $\Delta B = B - B_0$ 、 $\epsilon = |\Delta B| / B_0$  で均一度を定義する。磁極片の形状寸法、或いは距離  $L$  等は空隙長  $G$  (或は半空隙長) によって正規化し  $\ell = L / G$  等の無次元量で表す。本要旨でも単位を示さない値は同様の表記のものである。

### 第 1 章 緒 論

第 2 次大戦の前後にかけて、核磁気共鳴実験の技術が確立し、高性能、高均一度磁石に対する要求が飛躍的に高まった。又、この頃より急速に発展した半導体等の物性物理の分野でも高性能の磁石に対する要求が高まった。研究用磁石は通常、低磁界用には円筒形の、高磁界用には円錐筒形の磁極片

を用い、長方柱体のヨークを四角形に組み立て、これを基準として磁極片を同軸上に対向して配置している。この一見簡単な構造はすべて最も高い機械的正確さを得る為のものである。

ローズシムは1938年にM. E. Roseがサイクロトロン用電磁石の性能向上のために提案し、等角写像法を用いて、その形状を決める図表を与えたものである。本研究は低磁界では、等角写像法によって解析解を得て、ローズシムの設計理論を拡張した。又、磁極片の縁端部の局所的な磁気飽和により、磁極片表面が等磁位面でなくなる為、この理論は中心磁界が強くなると適用できなくなることを指摘した。高磁界では、等角写像法の代わりに表面磁荷による磁界の計算法に基づく設計理論を展開した。更に実施例により、これらの設計理論の妥当性を確認した。

## 第2章 等角写像法による磁界計算と円筒磁極への適用

本章では最初に、長方形磁極片によって作られる磁界の解析解を、ヤコビの楕円関数の形で与えた。これにより、磁極片の2つの代表的な不斉として両極の幅が異なる場合と、両片が偏心している場合の分布の変化を明らかにした。例えば（空隙長を単位として）磁極片の幅が3.18の場合幅だけで決まるこの系に固有な分布を損なわずに $10^{-5}$ オーダの均一度を得るには、幅の差と偏心をそれぞれ $3 \times 10^{-3}$ 、 $10^{-3}$ 以下にする必要がある。これらは微細な分布の変化を扱うローズシム法を発展させる上で重要である。つぎにローズシムの原形について解析解をヤコビの楕円関数の形で与えた。これにより、過補正の時、空隙の中心面内の径方向分布に生ずる磁界のピーク値 $h_m$ をパラメータとして含む設計図表をローズの図表の拡張として得た。例えば $h_m$ が $10^{-3}$ の場合（半空隙長を単位とした）シムの幅0.4に対し厚さ約0.07となる。又解析解により磁極片表面の磁界の分布を計算した。磁極片の外周の縁端点の両側では（半空隙長を単位として）0.02の範囲で、中心値の約3倍以上になる。このため空隙の中心の磁束密度が約0.8 T以上では縁端点が磁気飽和しシムの効果が失われてくる。

## 第3章 一様磁化モデルによる磁界計算と円錐磁極への適用

Bjorkenらは円筒形の磁極片に対して一様磁化を仮定してシムの形状を計算したが、妥当な結果が得られなかった。これは円筒形磁極片では、空隙より離れた根元の方が先に飽和するので通常1 T程度の磁界しか発生せず、上記仮定が成り立たないためである。これに対し、円錐筒形の磁極片では、空隙に面する先端部分から先に飽和が始まるので上記の仮定が現実的になる。本章ではこの仮定に基づいて、磁極片表面に発生する一様な磁荷によって作られる磁界を空隙の中心付近において級数展開式で表す解析解を導出した。これにより、高磁界に於いて妥当なローズシムの設計理論を展開した。円錐筒のテーパ角度が $60^\circ$ 、 $55^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $45^\circ$ の場合のシムの形状および磁界分布を与える設計図表が得られた。例えばテーパ角度 $60^\circ$ 、磁極片の先端径と厚さが、それぞれ2の場合のシムの形状は幅0.88、厚さ0.06である。又補正を行ったとき中心磁界の強さは約3%しか低下せず現実性のある方法であることを示した。

## 第4章 高磁界用ローズシムの実験結果と考察

本章では、偏極標的実験用に製作した電磁石において、上記の設計理論を実証した結果について述べた。磁界の安定性、励磁特性を説明した。磁界分布の測定値を見ながら、磁極片の先端にリング状にして装着されているシムの形状を逐次整形して、均一度を向上させていくシミングの過程を詳しく

記述した。中心面内の径方向の 50 mm の範囲に亙って  $10^{-4}$  の所要の均一度を実現した。シムの形状は幅 0.932, 厚さ 0.055 であり実測された磁界分布に近い分布を与える計算された形状, 幅 0.877, 厚さ 0.077 とほぼ一致した。

## 第 5 章 結論と考察

低磁界と高磁界において, それぞれシムを製作するのに有用な設計理論を展開し, 解析解に基づく図表を得た。又, 2.5 T を発生する円錐筒磁極片の電磁石において, 高磁界におけるローズシムの設計理論の妥当性を実証した。今後に残された課題として, シムによる補正が有効であるような, 空隙中心の磁界の強さの可変範囲を拡大することと, 計算の正確さを高めることを挙げた。