

氏 名	小 原 健 司
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 60 年 12 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 49 年 3 月 千葉大学大学院工学研究科電気工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	非晶質磁性合金リボンを用いた高磁界高勾配磁気分離に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 穴山 武 東北大学教授 村上 孝一 東北大学教授 脇山 徳雄

## 論 文 内 容 要 旨

磁気分離は磁性鉄鉱石のような強磁性物質を捕集する目的で古くから使われてきた技術である。しかし、近年開発された高勾配磁気分離 (High Gradient Magnetic Separation, 略して以下 HGMS) により、磁気分離の適用範囲が磁性の弱い弱磁性粒子や粒径の小さなコロイド粒子にまで拡大した。しかも直接的かつ選択的な強い磁気力を被分離粒子に及ぼすことができるので、従来の濾過装置に比較して二桁から三桁も高速の分離が可能になった。米国、英国では製紙業に用いるカオリン中の鉄分の除去、弱磁性鉄鉱石の品位向上等に应用されている。日本でも、製鉄排水の再利用を目的とした高勾配磁気分離装置 (HGMS 装置) が稼動を始めた。また、HGMS 技術は海水中のウランの採取、石炭の精製など、新エネルギー技術や資源技術、公害防止技術などへ広範囲な応用も考えられており、産業基盤技術として重要な技術である。

線径数 100  $\mu\text{m}$  程度の“磁性線”の詰っている部分へ懸濁液を導き、磁界を印加して、懸濁液中の微粒子をこの“磁性線”に吸着させて固液または個々分離を行なう。これが HGMS の原理である。“磁性線”の詰っている部分を“磁気フィルタ”と呼ぶと、“磁気フィルタ”に要求される特性は、(1)磁性線の飽和磁化が大きい、(2)高耐蝕性、(3)フィルタ製作時の機械力や、磁界印加時に働く磁気力、水圧などに耐え、磁気特性が変化しない、(4)全体のシステムを小形にできるような高能率の吸着性能を持つ、などである。

従来の磁性線材料は主にステンレスである。しかしこれに大きな磁性を持たせるためには Cr の

含有比を小さくする必要があり、耐蝕性が犠牲になるので、HGMSに最適な材料とはいえない。これに対して、組成を適当に選択して製造された非晶質磁性合金リボンは、耐蝕性対磁気特性および強度の面でステンレス細線より優れた特性を有し、上記(1)~(3)の条件をよく満たす。

液体急冷法（片ロール法）によって製造された非晶質磁性合金リボンは、長軸短軸比の大きな楕円に近い形状である。いま非晶質磁性合金リボンの厚み方向に磁界を印加すれば、リボン表面のほとんどすべての部分が磁性粒子を吸着できる。しかも非晶質磁性合金リボンの吸着面積が大きいので粒子の堆積に起因する粒子捕獲能率の低減が小さいと考えられる。したがって上記(4)の条件をも満足するフィルタを実現できる可能性がある。

ステンレス極細線の加工工程が複雑であるのに対して、非晶質磁性合金リボンは液体急冷法により簡単に製造できる。したがって、製造工程を簡略化できるので将来の本格的な大量生産時代には製造コストが下がると予想される。さらに磁界発生装置を含むHGMSシステム全体のコストからみれば磁気フィルタの占める割合は小さく、また耐久性が向上するので現在でも価格はあまり問題にならない。一方、磁界発生手段としての超電導電磁石は大空間に高磁界を電力損失ゼロで発生可能である。従来の永久磁石や水冷電磁石では消費電力が大きすぎて経済的に実現不可能な大空間磁界も超電導電磁石の利用により比較的容易に実現できる。したがって、この方式による高磁界高勾配磁気分離は工業的にも実現の可能性の高いものである。

従来のHGMSの理論解析においてはステンレス細線を想定した円柱磁性線モデルを採用しているものが大部分を占めている。楕円柱磁性線に対する理論的検討は非常に少なく、非晶質磁性合金リボンを磁気分離用のフィルタ材料として用いる利点に着目して行なわれたフィルタ性能に関する実験の報告も、現在のところ一、二件の文献しか見当たらない。しかもこれらの研究は円柱と楕円柱の断面形状の違いとそれに起因する粒子の捕獲プロセスに関する実験および理論的考察を行っていない。その結果、非晶質リボンを用いたフィルタに関して、磁性線の断面形状や流速、被捕獲粒子の粒径、印加磁界の大きさなどのパラメータに対する一般のおよび基礎的なフィルタ特性が不明であり、はじめに紹介した円柱磁性線モデルの理論解析の結果から類推せざるをえない現状である。

以上の観点から、本研究は従来のステンレス磁性線に比べて耐蝕性対磁気特性および強度に優れた特性をもつ非晶質磁性合金リボンを用いた高勾配磁気分離フィルタを提案する。しかし、我々の提案する磁気分離フィルタの性能に関する理論的および実験的検討は現在ほとんど行われていないので、基本的な事項の理論的数式的解明と整理および実験による理論の定量的検討を行なうことは非常に重要である。したがって比較的計算の容易な並流形フィルタを検討対象として、非晶質磁性合金リボンのフィルタ内部の被捕獲粒子の動きはどうなるのか、捕獲性能の計算はいかにすべきか、その計算法は超電導電磁石による高磁界中および水冷電磁石による低磁界中での実験とどの程度合うのか、について検討することが本研究の目的である。

本研究は大きく次の三段階に分かれている。第一段階では、計算モデルを比較的単純化して、フィルタ内における粒子の捕獲プロセスを理論解析した。すなわちフィルタ内の流体はポテンシャル流、粒子の粒径は均一としたモデルを用いて、単一磁性線システムに対する常磁性および反磁性粒

子の捕獲過程が計算される。計算手順は、まず磁位に関するラプラスの方程式を楕円座標を用いて解くことによって単一楕円柱磁性線近傍の磁界を導出している。次に被捕獲粒子の運動方程式を解いて被捕獲粒子の運動軌跡を計算する。最後に単一楕円柱磁性線の周囲に存在する粒子の捕獲領域を求めて、フィルタの性能の計算を行なった。若干の計算例についても検討し、楕円柱磁性線と円柱磁性線によるフィルタの性能を比較した。

第二段階では、並流形フィルタの性能に及ぼす、複数の隣接楕円柱磁性線の効果と、流体・フィルタエレメント間の摩擦により生じる流体の流速分布の効果を定量的に検討した。第一段階より複雑なモデルを設定して計算する必要があったので、ここでは計算機を用いる数値解析の手法が採用されている。解析手順は、まず粒子の運動方程式を連立微分方程式として定式化する。次にRunge-Kutta-Gill法を用いた計算プログラムを作成して、この式を数値解析的に解き、粒子の軌跡と捕獲領域を求める。最後に磁気フィルタの性能を求めて、第一段階の単一磁性線・ポテンシャル流近似の計算結果と比較した。

第三段階では、非晶質リボンフィルタ二種類と、水冷電磁石と超電導電磁石によるそれぞれ  $8.75 \times 10^5$  A/m および  $4.77 \times 10^6$  A/m の磁界を用いて、三種類の懸濁液の分離実験を行なった。懸濁粒子の粒径分布、フィルタの端効果や段効果などの実験条件を検討し、上述の理論のモデルと実験条件との不適合性に対する補正方法を検討した。この補正式と実験結果との比較がなされている。さらにこれらの議論を総合してフィルタ性能の計算方法を検討した。

本研究のうち、単一磁性線・ポテンシャル流近似の理論解析から得られた主な結論は次のとおりである：

(1) 有限の長さの楕円柱磁性線の周囲には粒子の捕獲領域が存在し、この形状と大きさは磁性線の断面形状と“実効長さ”の二つの量で決まる。ただし“実効長さ”  $l_e$  は  $l_e = LV_m/V_0$  で定義し、 $L$ 、 $V_m$ 、 $V_0$  はそれぞれ磁性線の長さ、磁気速度、流体の流速である。(2) 従来の円柱磁性線と比較すると、楕円柱磁性線の作る捕獲領域は粒子に対する死角が小さいので、磁性線の配列のずれによる回収率の低下がきわめて小さい高能率の磁気フィルタを実現できる。(3) 常磁性粒子および反磁性粒子を効率よく捕獲するには非晶質磁性合金リボンの曲率の小さい面に吸着させるように、それぞれリボンの厚み方向および幅方向に磁界を印加すべきである。

次に流体・フィラメント間の摩擦の効果と隣接磁性線効果を考慮した理論解析の結果より得られた主な結論は次のようである：

(1) 隣接効果は実効長さ  $l_e$  (または粒子の回収率  $R_{TH}^n$ ) の比較的大きい領域で、また摩擦効果は  $l_e$  (または  $R_{TH}^n$ ) の比較的大きい領域と小さい領域でそれぞれ顕著である。(2) 隣接磁性線を考慮した場合の最大磁界勾配は単一磁性線のときより小さいので、回収率も小さいと予想された。しかし、本研究の理論解析によって、隣接効果を考慮した回収率の理論値は、考慮しない場合より大きいことがわかった。これは隣接磁性線による粒子捕獲領域の形状変化が磁気力の低減効果より大きな影響をフィルタ性能に及ぼすためである。(3) 円柱磁性線の直交形フィルタの場合には、隣接効果はきわめて大きく、50%以上も回収率が増加することが知られている。本研究で扱ったタイプのフィルタでは高々 8.4% の増加であり、非晶質リボンフィルタの隣接効果は小さいといえる。

非晶質合金リボンを用いた超電導高勾配磁気分離フィルタの微粒子捕獲実験の結果，およびこれと理論解析の結果との比較より得られた主な結論は次のようである：

(1) 単一磁性線・ポテンシャル流近似の理論による計算値は，回収率の小さい領域で実験結果とへだたりを生じることがある。(2) 隣接磁性線を考慮し，流体とフィルタエレメント間の摩擦および懸濁粒子の粒度分布の両方に実験条件に近い計算モデルを設定した精密な計算モデルによる理論値は，実験結果とよく一致する。(3) この場合，もし片方しか精密化しないとすると，もっと粗い計算モデルの(1)の理論計算より悪い結果をまねく場合がある。したがって非晶質磁性合金リボンの並流形磁気フィルタの性能を回収率の全領域にわたって理論的に精度よく求めるには，隣接磁性線はもちろん，懸濁粒子の粒度分布と流体の流速分布の両方にも実験条件に近い計算モデルを設定すべきである。

非晶質リボンフィルタあるいは超電導電磁石を用いた懸濁液の分離に関する研究はまだ初期の段階であるが，大量のコロイド粒子を能率良く処理する方法として極めて有望な方法である。本研究はこの分野における重要かつ基本的な事項の理論的数式的解明と整理および実験による理論の確証を行ない，実用機設計の際の計算手法を確立した。

## 審査結果の要旨

磁気分離は強磁性物質を捕集する目的で古くから利用されている技術であるが、細い磁性線を磁気フィルタとして使用し、磁性線周辺に生ずる高い磁界勾配を利用して磁性の弱い粒子をも捕集する高勾配磁気分離が提案されて以来、その用途は急速に拡大し、エネルギー・資源・公害防止等の分野での新しい基盤技術として注目されている。高勾配磁気分離フィルタ材料には、磁気特性の他、耐蝕性と機械的強度が優れている事が要求されているが、著者は、従来用いられていたステンレス細線より非晶質磁性合金リボンが磁気フィルタ材料として適していることに着目し、これを用いた高磁界高勾配磁気分離についてフィルタ設計の基礎となる理論解析や超電導磁石を用いた実験的検討など、理論と実験の両面から研究を進めてきた。本論文は、その成果をまとめたもので全編5章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、非晶質磁性合金リボンを用いた磁気フィルタの特徴を明らかにするため、磁性合金リボン1本による粒子の捕獲過程を理論的に検討している。まず、リボン断面を楕円で近似し、単一の楕円柱磁性線を磁界中に置いた場合の磁界分布と捕獲粒子の運動軌跡を求め、磁性線による粒子の捕獲領域および回収率を算出している。更に、著者の提案した楕円柱磁性線と従来の円柱磁性線についてフィルタ性能を比較検討し、楕円柱磁性線では印加磁界の方向制御により、常磁性または反磁性粒子のいずれでも吸着させ得る事など本方式の特徴を表わす興味ある成果を得ている。

第3章では、非晶質磁性合金リボンが多数本配置された場合について、磁性線の隣接効果やチャンネル内の流体の速度分布が捕獲領域・回収率等のフィルタ性能に及ぼす影響を計算機による詳細な数値解析結果を基に検討している。特に隣接効果については、隣接磁性線の存在により磁界勾配が低下するが、捕獲領域に対する形状効果が回収率を増加させるように働らくため、全体としては回収率を増加させることになるなどフィルタ設計の基礎となる有用な成果を得ている。

第4章では、非晶質磁性合金リボンを用いて高勾配磁気分離フィルタを試作し、これを超電導磁石中心部に固定し、3種類の懸濁液について分離実験を行った結果を述べ、理論と実験との比較検討を行っている。この結果、第2、第3章の理論結果は実験結果と良く対応しており、高勾配磁気分離フィルタの設計法として有用であることを確かめている。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、超電導磁石と非晶質磁性合金リボンを用いた高磁界高勾配磁気分離について理論的および実験的に検討し、設計の基礎となる有用な知見を得たもので、磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。