

氏 名	佐 藤 有 一
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 2 月 10 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 59 年 6 月 ケンブリッジ大学大学院材料工学科金属 工学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	単ロール急冷凝固法による薄帯の広幅化に 関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 新山 英輔 東北大学教授 渡邊 龍三 東北大学教授 菊池 淳 東北大学教授 井上 明久

論 文 内 容 要 旨

非晶質合金は溶融状態から直接、製品が得られるという生産技術の大きな特徴と、さらに材料特性においても、これまでの工業材料に比べて優れた性質を示す。非晶合金材料は、これまでいろいろな分野で工業材料としての利用が検討されているが、非晶質合金の優れた磁氣的性質を応用する用途が有力のようである。その中でも、Feを主成分とするFe-半金属系非晶質合金の鉄損が、通常の珪素鋼板に比べて極めて低いことを利用する電力トランスの鉄心への用途が最も期待されている。これまで、Fe-半金属系非晶質合金を用いてトランスの試作、性能評価が試みられており、経時劣化の問題はほとんどなく、優れた性能を示すことが効果として得られている。

しかしながら、非晶質合金薄膜帯を用いるトランスの実用化は予想よりも大幅に遅れている。米国では1989年までに、累計約2万台の非晶質合金薄膜帯を用いたトランスが製造されているが、まだまだ商業ベースに乗ったとは言い難く、日本においては現在各電力会社でフィールドテストが行われている段階である。

この非晶質合金薄膜帯を用いた鉄心トランスの実用化が遅れている理由はいくつか考えられているが、材料コストが高いことが大きな要因のようである。また、製造技術的観点から見ると、例えば、非晶質合金薄膜帯の製造プロセスとして採用されている単ロール急冷凝固法において、得られる薄膜帯の板幅に制限が存在していることが挙げられる。この単ロールプロセスにより、工業的に製造できる薄膜帯の板幅はせいぜい200mm程度までのようである。板幅が300mmまでの薄膜帯の供給が可能になれば、巻鉄心の場合のほぼすべてのサイズに対応出来る。このことから、非晶質合金の本格的な実用

化を促進するために、これまで以上に広い板幅からなる薄帯を製造するための技術の開発が求められていた。

本研究は、以上述べたような現状の非晶質合金薄帯の製造技術における問題点を解決し、本格的な非晶質合金薄帯の実用化の一助とするためになされた研究で、非晶質合金薄帯の製造において存在していた板幅における制限を取り除くことを目的になされたものである。その結果、原理的には制限なく幅の広い薄帯を製造出来る新しい鑄造法を開発した。この新しい鑄造方法により、実際に広幅薄帯の製造を試み、これまでの最高板幅となる300mm幅箔の鑄造が可能であることを確認した。

本論文は、全編6章よりなっている。以下に各章についての概要を述べる。

第1章 緒 論

本章においては、本研究の背景、目的および本論文の構成を述べている。

第2章 矩形孔ノズルを用いる鑄造方式での薄帯形成機構

本章においては、単ロールプロセスにおける各種プロセスパラメーターの薄帯性状（特に板厚）に及ぼす影響を明らかにするための研究を行った。単ロールプロセスでは鑄造時、ノズルとロール表面間にパドルと呼ばれる湯溜りが形成されるが、このパドルのロール回転方向長さは得られる薄帯の板厚に影響を及ぼすので、より均一な板厚からなる薄帯を得るにはこのパドルの形状を鑄造中、一定に保つことが重要である。

このパドルのロール回転方向長さに最も大きな影響を及ぼすプロセスパラメーターはロール表面速度で、ロール表面速度の増加にともなってパドルのロール回転方向長さは減少し、薄帯の板厚は小さくなることを確認した。一方、熔融試料をノズルからロール表面に供給する際の噴出圧も薄帯の板厚に影響を及ぼし、この噴出圧の増加に伴って薄帯の板厚は大きくなることを明らかにした。この時、噴出圧の増加に伴う板厚の増加は、ノズルからの熔融試料の供給量の増加によるパドルのロール回転方向長さの増加だけによるのではなく、単位時間当りの薄帯の生成量の増加にもよることがわかった。

また、熔融試料の成分によってはロールの材質も良好な薄帯を得るのに重要なプロセスパラメーターで、例えば、Fe-6.5%Si合金の場合、ニッケルを表面に1mm程度メッキした銅ロールが最適であることがわかった。このような結晶質合金薄帯を製造する際、鑄造時の雰囲気の不活性ガスとする必要があるが、用いる雰囲気ガスとしては、ヘリウムガスのような1モル当りの質量と粘性係数の比が小さい値をとるガスが適していることを明らかにした。

さらに、第2章で得られた知見を基に、薄帯の形成機構について考察し、広幅薄帯を製造するための新しい鑄造法の開発における課題を整理した。単ロールプロセスにおける薄帯の形成機構としてこれまで2つの機構が提案されているが、そのうちの1つはパドル内で凝固が進行し、パドルの最下流点で凝固量が最大となり、ここで薄帯の板厚が決定されるという機構（熱輸送制御）である。もう1つはパドル内で流れの境界層が形成され、この境界層がパドルから引き出された後、下流で凝固するという機構（運動量輸送制御）である。第2章で得られたデータから、 $Fe_{80.5}Si_{6.5}B_{12}C_1$

の合金の鑄造において、板厚が定常状態に達した時点での薄帯の形成は熱輸送制御が支配的で、伝熱プロセスは理想冷却とニュートン冷却の中間の冷却であるということを示した。よって、良好な形状の薄帯を得るためには、パドルのロール回転方向長さを薄帯板幅方向で均一にすることだけでなく、パドル内での試料とロール表面間の伝熱抵抗を均一にすることも重要な課題であると考えられる。

第3章 多孔ノズル方式による薄帯製造の可能性

本章においては、薄帯板幅方向に複数の開口を配した多孔ノズルを用いて鑄造実験を行い、このような多孔ノズルを用いる鑄造での広幅薄帯の製造の可能性について検討した。その結果、個々の開口の形状を長方形とし、この長方形開口の長辺をロール回転方向に平行にして、薄帯板幅方向に一定の間隔を置いて開口を複数個並べた多孔ノズルを用いても、それぞれの形状パラメーターを最適化し、その他の鑄造条件も適切に選択すれば、目的の板幅からなる薄帯を得ることが可能であることを明らかにした。すなわち、多孔ノズルを用いてもノズルの開口を最適化すれば、個々の開口とロールとの間に形成するそれぞれのパドルを薄帯板幅方向で鑄造中安定して一体化出来ることがわかった。

最適なノズルの開口形状は、ロール回転方向長さが2～4mm、薄帯板幅方向長さが1mm程度以下の長方形であり、このようなノズル開口形状とすれば、開口の間隔を0.7mmとしても目的の板幅の薄帯が得られる。但し、この時のロール表面速度および噴出圧の最適条件範囲は、従来の矩形孔ノズルを用いるPFC法の場合に比べてやや狭い範囲となるようである。

このような多孔ノズルを用いることにより、目的の板幅からなる薄帯が得られることがわかったが、得られた薄帯は、そのフリー面で薄帯板幅方向に規則的な凹凸を示す異形断面薄帯で、目的とした平滑な薄帯ではなかった。この薄帯フリー面での起伏と用いたノズルとの位置関係について調べたところ、薄帯フリー面での凸部は鑄造時ノズルの開口部で発生し、一方、凹部はノズルの開口の間隔部で発生していたことがわかった。ここで、第2章での知見から、薄帯の板厚の分布はパドルのロール回転方向長さ、パドル内での試料とロール表面間の伝熱抵抗の2つの因子から決定される筈なので、薄帯の板厚がノズルの開口部で間隔部に比べて大きくなっていったことから、このような多孔ノズルを用いて鑄造した場合、ノズルの開口部で間隔部に比べてパドルのロール回転方向長さが長くなっており、伝熱抵抗もより小さくなっていったのではないかと推定される。

以上のことから、このような多孔ノズルを用いて従来同様平滑な薄帯とするには、つまり、薄帯の板厚を均一にするには、パドルのロール回転方向長さを薄帯板幅方向で均一にし、パドル内での試料とロール表面間の伝熱抵抗を均一にするようにノズルの開口形状を最適化することが重要な課題となることを確認した。

第4章 平滑な薄帯を得るための多孔ノズル開口形状の最適化

本章においては、第3章で明らかにした平滑な薄帯を得るための課題を克服することを目的に、多孔ノズルの開口形状の最適化を行った。その結果、多孔ノズルを用いる鑄造方式でも、ノズルの

開口形状および開口の配置を最適化すれば、平滑な薄帯の製造は可能であることを明らかにした。

この最適なノズルの開口を決定する指針は、開口のロール回転方向長さを薄帯板幅方向で一定とし、隣接する個々の開口のロール回転方向での前後の位置を、それぞれ薄帯板幅方向で同一線上に揃えて開口を薄帯板幅方向に配置することである。このようなノズルとすることにより、パドルのロール回転方向長さを薄帯板幅方向で均一にすることが可能となると考えられる。一方、パドル内での伝熱抵抗について見ると、ノズルの開口部と間隔部でもしこの伝熱抵抗に差異が生じたとしても、ノズル開口の開口部および間隔部のロール回転方向総長さをそれぞれ薄帯板幅で一定とすれば、パドル内で途中の履歴は異なるものの、パドル下部の試料がそれぞれ伝熱抵抗の異なる領域を通過する時間の総計は、パドルを出た時点で薄帯板幅方向でそれぞれ一定となる。よって、この試料とロール表面間の伝熱抵抗に差異が生じたとしても、この伝熱抵抗に起因する薄帯板厚における差異はほとんど発生しないと考えられる。

但し、このような最適化された開口形状からなる多孔ノズルを用いて得た薄帯について観察すると、薄帯のロール面の性状は従来の矩形孔ノズルを用いて得た薄帯と同等な性状を示し、 casting 時におけるノズルの開口部と間隔部でのこの伝熱抵抗にはほとんど差異は生じないと推定される。

最適化された多孔ノズルは、個々の開口の形状がロール回転方向長さおよび薄帯板幅方向長さがそれぞれ 1 mm 程度で、薄帯板幅方向に対して 27° 程度の傾きを持つ平行四辺形で、この開口を薄帯板幅方向に 1 mm 程度の間隔で配置した多孔ノズルである。このような多孔ノズルを用いることにより、従来の PFC 法同等の高い平滑性を有する薄帯が製造出来ることがわかった。このような多孔ノズルの場合、開口の個数を増加することは容易であり、また、開口の個数を増やすことにより得られる薄帯の板幅に制限がないと考えられるから、このような多孔ノズルによる casting 法によれば、原理的には任意に広い板幅からなる薄帯の製造が可能であると考えられる。

第 5 章 多孔ノズル方式による広幅薄帯の製造

本章においては、開発された多孔ノズルを用いる casting 法により、実際に 300 mm 幅の広幅薄帯の製造を試みた。その結果、良好な性状の 300 mm 幅薄帯が得られ、最適な開口形状からなる多孔ノズルを用いれば板幅を 300 mm まで広げても、これまで得られていた 1 インチ程度の狭い幅の薄帯と同様の性状からなる薄帯が得られることがわかった。

第 6 章 結 論

本研究で得られた結果を総括して述べている。

本研究の成果として、単ロール法による広幅薄帯のための新しい casting 法を開発することが出来た。この新しい casting 法は、これまで単ロール法に存在していた薄帯の板幅における制限を取り除くことを可能にしたと考えられることから、今後の非晶質合金薄帯の本格的な工業材料としての実用化の一助となるものと思われる。

審査結果の要旨

非晶質合金はその優れた磁氣的性質から電力トランスの鉄心などの磁性材料としての利用が有望視されているが、これまでのところ大型トランスに本格的に利用するまでに至っていない。その利用形態としては主に薄帯形状が検討されており、この非晶質合金薄帯の製造プロセスとして単ロール急冷凝固法が採用されている。これまでこの単ロール急冷凝固法により工業的規模での生産がほぼ可能になっているが、この方法では得られる薄帯の板幅に制限があり、このことが非晶質合金の工業材料としての本格的な利用の実現を妨げる一因となっていた。

本論文は、この単ロール急冷凝固法に存在していた薄帯板幅についての制限を取り除くことを目的に、本製造法に関してなされた研究の成果を取りまとめたものであり、全編6章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景、目的を述べている。

第2章では単ロール急冷凝固法における薄帯の形成機構を明らかにするために行った研究について述べている。本製造プロセスにおける各種プロセスパラメーターの薄帯板厚に及ぼす影響を明確にし、Fe-半金属系非晶質合金薄帯の形成機構は熱輸送制御が支配的であることを明らかにしている。

第3章では薄帯板幅方向に複数の開口を有する多孔ノズルを用いる鑄造法による広幅薄帯製造の可能性について研究し、平滑な薄帯とはならないまでも広幅薄帯製造の可能性を確認している。さらに、多孔ノズルによっても単孔ノズルと同等の平滑な薄帯を得るためのいくつかの技術的示唆を得ている。

第4章では第3章での知見に基づき、平滑な薄帯を得るための多孔ノズルの開口形状に関して研究し、平滑な広幅薄帯を製造するための開口の寸法、形状、配列の条件を確立するに至っている。このような多孔ノズルを用いても平滑な薄帯が得られることを示したのは初めてのことである。

第5章では第4章で確立した手法にしたがって多数の多孔ノズルを配列して実際に広幅薄帯の製造を試み、これまでの最高板幅である300mm幅の薄帯の製造に成功している。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は単ロール急冷凝固法での薄帯の形成機構の知見に基づいて原理的には任意の広い板幅からなる非晶質合金薄帯の製造を可能とする鑄造法を確立したもので、材料加工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。