

Transport Phenomena in a Hot Dip Plating Bath

(溶融めっき浴内における移動現象)

学位論文内容の要旨

鉄鋼製品は、優れた強度と加工性を有していることから我々の身の回りの至る所で使用されている。特に表面処理鋼板は、冷延鋼板や熱延鋼板の欠点である低耐食性を種々の表面被覆で補っていることから、自動車、家電、建材などの多くの分野で採用されている。また、生産量は約 1500 万 ton/年であり、そのうち溶融めっき法で製造された溶融亜鉛および溶融亜鉛合金めっき鋼板、所謂、溶融亜鉛系めっき鋼板の生産量が最も多くなっている。

溶融亜鉛系めっき鋼帯を連続して亜鉛あるいは亜鉛合金をめっきする方法は 1931 年にポーランドの T.Sendzimir によって発明された Armco-Sendzimir 方式が主流となっている。その方式は還元ガス雰囲気中で表面を活性化させた鋼帯をその状態のまま溶融めっき浴中に浸漬する方法であり、めっき浴内には鋼帯を表面活性化させたまま溶融めっき浴中に浸漬させるためのスワトと鋼帯の移動方向を変更させるシクロール、鋼帯の形状修正を行うサポートロールが設置されている。また、亜鉛系めっき浴内では鋼帯とめっき浴成分との反応によりドロスと呼ばれる金属間化合物が生成され、溶融亜鉛系めっき鋼板の表面欠陥の一因となっている。そのため、溶融めっき浴内のドロス低減やドロスを鋼帯に近付けないなどの表面欠陥の防止方法が課題となっている。

溶融亜鉛系めっき鋼板のドロスによる表面欠陥の発生はドロスが鋼帯に接触する、つまりドロスが移動して鋼帯に近付くことが原因であるし、ドロスの生成量はめっき成分の濃度分布、つまり地金の溶解、拡散状態が影響している。したがって、それら表面欠陥の発生と生成量は溶融めっき浴内の流動状態に左右され、その流動状態は鋼帯の移動、シクロールやサポートロールの回転、スワトの存在に大きく影響されると考えられる。溶融めっき浴内の流動状態を詳細に調査するには、めっき浴内での流動発生の原因が主に鋼帯の移動とシクロールの回転であると考えられることから、サポートロールとスワトが存在しない場合での基本的な移動現象を先ず把握することが必要であると考えられる。次にサポートロールとスワトを設置した場合での特性を調査して、それらが移動現象に対してどのように影響するかを把握して最適なドロス対策を提案すべきであると考えられる。しかし、これまでの報告では詳細に検討した例がほとんどなく、未解明な部分が多く残っている。そのため、本研究では、溶融めっき浴の流動特性、ドロスの挙動特性、地金の溶解特性、拡散特性といった溶融めっき浴内の移動現象をレイノルズ

数相似則を採用した水モデル装置にて検討した。

第 1 章は、緒言であり溶融亜鉛系めっき鋼板の生産量推移やめっき技術と設備の変遷、本研究の背景、目的について示した。

第 2 章では、溶融めっき浴内の基本的な流動特性を検討した。浴内の流れは 3 次元的な循環流であり、ベルト(鋼帯)とシクロールの隙間領域に侵入、排出する流れが存在することが特徴的であった。

第 3 章では、溶融めっき浴内の基本的なドロスの挙動特性として鋼帯の移動速度の影響を検討した。全体的なドロスの **streak line** は浴内の **stream line** とほとんど同じであり、トップドロスは浴表面に、ボトムドロスは浴底面近傍に多く滞留することが判明した。また、両ドロスともベルト(鋼帯)が相対向する領域に多く集まり、ベルト(鋼帯)移動速度が低いほど浮遊ドロスが少なくなる傾向であった。

第 4 章では、溶融めっき浴内の基本的なドロス挙動特性に対するドロス直径の影響を検討した。何れの直径のドロスでも **streak line** は浴内の **stream line** とほとんど同じであり、ベルト(鋼帯)とシクロールとの隙間領域に侵入するドロスの存在が明らかになった。これにより、その領域で鋼帯にドロスが付着する可能性があることが考えられた。

第 5 章では、溶融めっき浴の基本的な地金の拡散特性について、**dispersion pattern** の観察と **mixing time** の測定によって明らかにした。**dispersion pattern** は浴内の **flow pattern** とほとんど同じであり、**mixing time** は浴内で分布を持つことが判明した。**mixing time** の不均一性はベルト(鋼帯)が浴内から排出する **exit** 領域やベルト(鋼帯)が相対向する領域にトレーサ(地金)を投入すると小さくなり、それによって地金を迅速に拡散させることが可能であると考えられた。

第 6 章では、溶融めっき浴の地金の溶解特性を地金のモデルである氷塊を用いて検討し、地金全体の平均熱伝達率の実験式化を試みた。レイノルズ数が 500 以下の場合、氷塊全体の平均熱伝達率は Whitaker の実験式でほぼ整理できることが分かった。また、レイノルズ数が 500 を超えるような場合は、乱れ強さを考慮した実験式で整理できると考えられた。

第 7 章では、スワトとサポートロールを設置して溶融めっき浴の流動特性、ドロスの挙動特性、地金の拡散特性について検討し、各々の基本的な特性と比較した。何れの特性もスワトとサポートロールを設置しない基本的な特性とほとんど同じであった。全体的に溶融めっき浴内の移動現象に対するスワトとサポートロールの影響は小さく、スワトとサポートロールを設置しない基本的な特性から定性的な溶融めっき浴内の移動現象が把握できると考えられた。

第 8 章では、本研究結果の総括を示すとともに、本研究の結果より考案した特許の概要について説明した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 井 口 学

副 査 教 授 石 井 邦 宜

副 査 教 授 工 藤 昌 行

副 査 教 授 高 橋 英 明

学 位 論 文 題 名

Transport Phenomena in a Hot Dip Plating Bath

(溶融めっき浴内における移動現象)

表面処理鋼板は、冷延鋼板や熱延鋼板の欠点である低耐食性を種々の表面被覆で補っていることから自動車、家電、建材などの多くの分野で採用されており、溶融亜鉛系めっき鋼板の生産量が最も多くなっている。溶融亜鉛系めっき鋼帯の連続生産には還元ガス雰囲気中で表面を活性化させた鋼帯をその状態のまま溶融亜鉛系めっき浴中に浸漬する方法が用いられており、溶融亜鉛系めっき浴内では鋼帯とめっき浴成分との反応によりドロースと呼ばれる金属間化合物が生成され、溶融亜鉛系めっき鋼板の表面欠陥の一因となっている。そのため、溶融亜鉛系めっき浴内のドロース低減やドロースを鋼帯に近付けないなどの表面欠陥の防止方法が課題となっている。本研究は、ドロース付着による溶融亜鉛系めっき鋼板の表面欠陥の防止を目的に実施したものである。溶融亜鉛系めっき鋼板のドロースによる表面欠陥の発生はドロースが移動して鋼帯に付着することが原因であるし、ドロースの生成量は地金の溶解、拡散状態が寄与するめっき成分の濃度分布が影響している。したがって、それら表面欠陥の発生と生成量には溶融亜鉛系めっき浴内の流動状態が影響しているが、溶融亜鉛系めっき浴は 600℃以上の高温下にあり流動状態の可視化が非常に困難であることから水モデル実験に頼らざるを得ない。本研究でも水モデル装置を用いて、溶融亜鉛系めっき浴内の流動特性、ドロース移動特性、地金の溶解特性、拡散特性について多くの有用な知見を得ている。

本論文は 8 章から構成されており、その概略は以下の通りである。

第 1 章は緒言であり、溶融亜鉛系めっき鋼板の生産量推移やめっき技術と設備の変遷、本研究の背景、目的を明らかにした。

第 2 章では、溶融亜鉛系めっき浴内の流動特性のうち、スラット、ポットロールを設置しない基本的な流動特性を検討しており、浴内の流れは 3 次元的な循環流でありベルト(鋼帯)とシクロールの隙間領域に侵入、排出する流れが存在することが特徴的であることを明らかにしている。

第 3 章では、溶融亜鉛系めっき浴内の基本的なドロースの挙動特性として鋼帯の移動速度の影響を検討している。全体的なドロースの streak line は浴内の stream line とほとんど同じ

であり、トップドロスは浴表面に、ボトムドロスは浴底面近傍に多く滞留することを見出している。また、両ドロスともベルト(鋼帯)が相対向する領域に多く集まり、ベルト(鋼帯)移動速度が低いほど浮遊ドロスが少なくなる傾向となることを把握している。

第 4 章では、溶融亜鉛系めっき浴内の基本的なドロス挙動特性に対するドロス直径の影響を検討している。ここでのドロスのモデル化は、ドロスのモデルである粒子の寸法や密度を変更するのではなく、流体側の密度を変更する手法で行っている。その手法は本検討の特徴であり、様々なモデル実験に応用することができる。ドロスの挙動特性としては、何れの直径のドロスでも streak line は浴内の stream line とほとんど同じであり、ベルト(鋼帯)とシンロールとの隙間領域に侵入するドロスの存在が認められる。これにより、その領域で鋼帯にドロスが付着する可能性があること示唆している。

第 5 章では、溶融亜鉛系めっき浴の基本的な地金の拡散特性について、dispersion pattern の観察と mixing time の測定によって明らかにしている。dispersion pattern は浴内の flow pattern とほとんど同じであり、mixing time は浴内で分布を持つことが判明している。mixing time の不均一性はベルト(鋼帯)が浴内から排出する exit 領域やベルト(鋼帯)が相対向する領域にトレーサ(地金)を投入すると小さくなるため、投入位置変更による地金拡散の迅速化方法を提案している。

第 6 章では、溶融亜鉛系めっき浴の地金の溶解特性を地金のモデルである氷塊を用いて検討し、地金全体の平均熱伝達率の実験式化を試みている。レイノルズ数が 500 以下の場合、氷塊全体の平均熱伝達率は Whitaker の実験式でほぼ整理できることを明らかにしている。また、レイノルズ数が 500 を超えるような場合は、乱れ強さを考慮した実験式で整理できることを示唆している。

第 7 章では、スウトとホートロールを設置して溶融亜鉛系めっき浴の流動特性、ドロスの挙動特性、地金の拡散特性について検討し、各々の基本的な特性と比較している。何れの特性もスウトとホートロールを設置しない基本的な特性とほとんど同じであることを把握している。全体的に溶融亜鉛系めっき浴内の移動現象に対するスウトとホートロールの影響は小さく、スウトとホートロールを設置しない基本的な特性から定性的な溶融亜鉛系めっき浴内の移動現象が把握できるという指針を与えている。

第 8 章では、結言として本研究結果の総括を示すとともに、本研究の結果より考案した特許の概要について説明している。

これを要するに著者は、溶融亜鉛系めっき浴内のドロス欠陥防止に対して有効な対策を提案するとともに、移動現象について有用な知見を得ており、溶融めっき分野に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。

以上