

焼嵌め接合で構成された めっき鋼板用セラミックロールの開発

野田 尚昭

研究背景

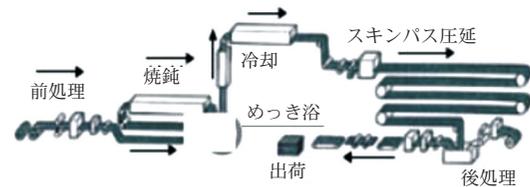
めっき鋼板は、防錆を目的として鋼板にめっきを施したものであり、自動車用や建築用の用途に幅広く使用されている。近年、自動車向けを中心とするめっき鋼板市場は、新興国での飛躍的な鋼板需要の増加に伴い、ますます拡大する傾向にある。こうした中、多くの鉄鋼メーカーでは、国際的な競争激化に対応すべく、生産性向上に対するニーズが高くなっている。とりわけ高級めっき鋼板の生産性向上や、地球温暖化対策として省エネ、省資源化志向が強まっている。

連続溶融めっき鋼板製造ラインの生産性向上策として、具体的には、連続操業日数延長、ラインスピード向上、品質安定化等が挙げられる。しかし、大きな阻害要因となっているのが浴中ロール(サポートロール、シンクロール)である。図1(a)、(b)に連続溶融めっき鋼板製造ラインおよびめっき浴中のレイアウトを示す。このような連続溶融めっき鋼板製造ラインは、世界全体で約550ライン(国内約55ライン)があり、新興国を中心にさらに増加傾向である¹⁾。

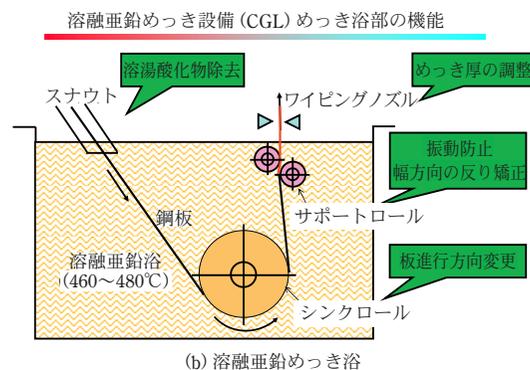
この研究は、経済産業省平成20年度地域イノベーション創出研究開発事業「高品質自動車めっき鋼板用、世界初大型セラミックスロールの開発」の援助を得て行った。このように、本件はイノベーションを起こす開発事業であるが、助成金を得て、開発を進め完成させるまでの道りは決して平坦ではなかった。例えば、最初の予算申請のヒアリングでは、セラミックスの専門家である審査委員は、「そのような製品開発は不可能」とまで言った。

このような開発開始から14年間の失敗と成功の経験を繰り返し、すこしずつ技術と知見が蓄積された。その結果、まず不採択となった小型のサポートロールの開発に成功した。この結果をベースに、さらに技術の蓄積を図り、より困難を伴う大型のシンクロールの開発に挑戦するため18年度の(財)九州産業技術センターの補助事業に申請した。公認会計士でもある審査委員長から、「夢がある、イノベーションを起こす事業だ」との一声があり、その結果、セラミックスの専門家の賛成も得られた。そして、翌年経済産業省の地域新生コンソーシアムにも採択され「夢のロール」が開発される契機となった。

表1に、技術開発のためのプロジェクトチーム



(a) めっき鋼板製造ライン



(b) 溶融亜鉛めっき浴

図1 連続溶融めっき鋼板製造ラインとメッキ用オールセラミックロール(サポートロールとシンクロール)。

表1 技術開発のためのプロジェクトチームと役割分担.

技術課題	項目	対応策	分担
強度, 設計	材料, 構造	疲労強度, 構造検討, FEM	九州工業大学 高瀬康氏ら 日立金属㈱ 小川衛介氏ら
製造	構造	製造技術, 構造検討	日立金属㈱ 小川衛介氏ら
耐食性	材料	サポートロールで検証中 長期評価要	産総研 岸和司氏ら
耐衝撃性	材料, 構造	サポートロールで検証中 構造検討, 熱解析	九州工業大学 高瀬康氏ら 日立金属㈱ 小川衛介氏ら
実機評価	材料, 構造	腐食環境, 構造検討	日新製鋼㈱ 古賀慎一氏ら

表2 外部資金採択状況.

	外部資金採択状況
平成14年度	経済産業省地域新生コンソーシアム【不採択】
平成18年度	(財)九州産業技術センター補助事業に採択(200万円/年)
平成19年度	経済産業省地域新生コンソーシアム採択(1億円/2年)

と役割分担を示す。また、表2に外部資金の採択状況を示す。

従来の浴中ロールの問題点

平成14年の予算申請の不採択の際にも、プロジェクト中心メンバーは、「日本の産学連携技術は専門家の智識の限界をこえて可能である」ことを確信していた。さかのぼること10年、圧延ロールのすべてを知りつくし「ロールの鉄人」と呼ばれている日立金属㈱の佐野義一博士から、セラミックロールの開発の提案と産学連携の相談を受けた。この相談が「夢のロール」開発のスタートとなった。表3にその相談時の要点をまとめて示す。

表3 日立金属㈱佐野義一博士から受けた産学連携の相談.

	相談内容
①	既存のステンレスロールでは、メッキ鋼板の品質が安定しないし、ロスも多い。
②	次世代ロールであるセラミックロールを開発したい。日本の圧延ロールのトップメーカーである日立金属㈱が開発しないとどこもできない。
③	社内で合意を得ていないので、外部資金を取ってやりたい。

図2にステンレス製の浴中ロールを示す。その表面には、WC・Co系材料を溶射したものが主に使用されている。このような従来製品には、以下の問題がある。

①めっき浴との反応により、ロール表面に溶損や合金化が発生する。その結果、浴中ロールの連続使用期間が長くなるにつれ、鋼板のキズ、振動模様、めっき厚みむら等の品質的問題が顕著になる。

②上記の理由で、通常2週間に1回程度でのロール交換や改削・再溶射を余儀なくされており、その都度ラインを長時間停止する必要がある。停止前後にダミー鋼板(スクラップにする鋼板)を通す

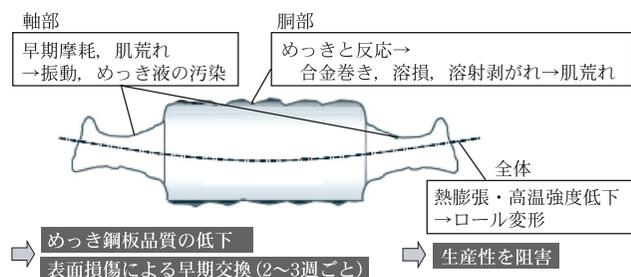


図2 従来の浴中ロールの問題点.

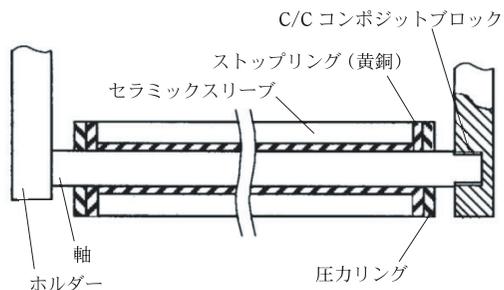


図3 軸に耐熱鋼 (SUH309) を用いたセラミックスリーブ。

必要があること等、むだが発生しており、コスト増加や生産性阻害の要因となっている。

③例えば胴部をセラミックス、軸に耐熱鋼を用いたロール (図3参照) も提案されているが、耐熱鋼の膨張によって張り割れの高リスクが高い。ロール全体をオールセラミック化することが望ましいことが、これまでの経験から知られるようになった。

課題解決

過去14年の開発経験に基づき高度な課題に挑戦したスーパーセラミックロールの開発のポイントは、以下の通りである。

(1) 日立金属㈱が開発され、特許を有する高靱性・高熱伝導窒化珪素を使用すること。従来品の2倍以上の熱伝導性を有するセラミックスの使用により、ロールを熔融金属中に浸漬する際の熱応力を半分以下にできる。

(2) 正確な熱応力・接合部応力解析を行うこと。上記(1)の熱応力解析や、接合部応力解析を大学が担当し、研究を行うことで、高温のメッキ浴中で熱応力が最小になるロールの浸漬方法を明らかにした。

(3) 構造解析に基づくセラミック接合技術に関して、14年の研究実績をベースに高度な接合技術を開発し、焼嵌め接合法に関する特許を取得した。

(4) 大型セラミックの超精密加工技術を習得

試作セラミックス製サポートロール破損の失敗を活用 (過去14年の経験に学ぶ)

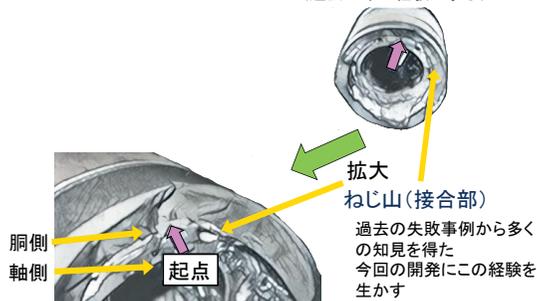


図4 セラミック製サポートロールの破損事例。

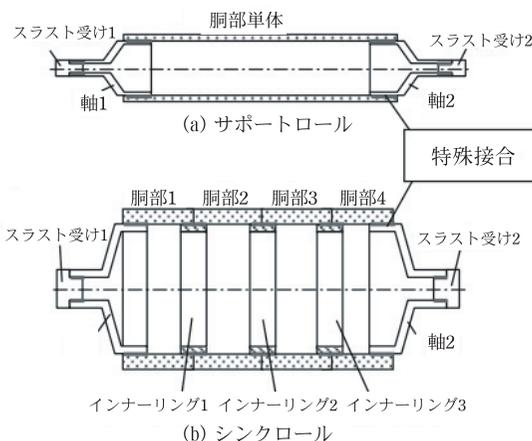


図5 メッキ用オールセラミックロール構造の概略。

した。接合技術が成功したのは、長径1メートルのシンクロールの加工精度において、真円度をプラス5 μm 以内におさえたことにある。

図4の写真は、試作したサポートロールの破損状態を示している。これらの破損の原因を解析することで対策を立て成功に導いた。

上記①、②の対策として、ロール全体をセラミックス化した。このようなオールセラミック化により、必要な耐食性、耐摩耗性が得られ、長寿命化が達成できる。まず、サポートロールに対して図5(a)に示す構造を提案した。サポートロールは、鋼板の表面品質に与える影響が大きいいため、胴部には継ぎ目を設けない単体構造とし、胴部と軸部を分割して製造後、胴部の両端に軸とスラスト受けを接合した構造とした。次に、シンクロールに

対して図 5 (b) に示す構造を提案した。シンクローリングは、胴部を分割し、分割した胴部同士を製作後、インナーリングで焼嵌め接合し、さらに両端に軸とスラスト受けを接合した構造とした。従って、前記のように各パーツに分割することにより、パーツごとの取替えを可能とした。

事業化への取り組み

このように、当研究グループ(日立金属株、九州工業大学、(株)日立金属若松、佐賀大学、九州産業技術センター)では、各方面からの研究開発を系統的に進め、世界に先駆けてサポートロールに次いで、シンクロールのオールセラミックス化を実現した。特に、オールセラミックスロールの利用範囲を拡大するため、上記の浴中ロールの熔融金属への浸漬時の熱応力^{3)~5)}や機械的応力⁶⁾⁷⁾、強度設計と解体⁸⁾、低焼嵌め率による軸抜け出し現象⁹⁾¹⁰⁾を博士論文としてまとめた。表 4 に本研究に関連する博士論文の題目と具体的内容をまとめて示す。これらの博士論文は「学生と留学生の混成チームによる産学連携研究とグローバル教育の実践」による主要な成果として日本塑性加工学会教育賞を受賞した²⁾。

総括

(1) 以下の企業側の要望から産学連携事業が始まった。既存のステンレスロールでは、メッキ鋼板の品質が安定しないし、ロスも多いので、次世代ロールであるセラミックロールを開発したい。社内で合意を得ていないので、外部資金を取ってやりたい。

(2) 従来のステンレス製浴中ロールは、通常 2 週間に 1 回程度でのロール交換や改削・再溶射を余儀なくされており、その都度ラインを長時間停止する必要がある。そのため、コスト増加や生産性阻害の要因となっている。

(3) ロール全体をセラミックス化した。このようなオールセラミックス化により、必要な耐食性、耐摩耗性が得られ、長寿命化が達成できた。例えば胴部をセラミックス、軸に耐熱鋼を用いたロールも提案されているが、耐熱鋼の膨張によって張り割れのリスクが高い。

(4) サポートロールは、鋼板の表面品質に与える影響が大きいため、胴部には継ぎ目を設けない単体構造とし、シンクロールは、各パーツに分割することにより、パーツごとの取替えを可能とした。

図 6 の写真は左より、開発の先駆者で開発の

表 4 セラミックロール開発に関連して行った博士論文の題目と具体的研究内容の例。

博士課程学生	年	博士論文の題目	具体的研究内容の例
Hendra	2010	大型円筒セラミック構造物における熱応力や機械的な応力の低減に関する研究	①中空円筒の熔融金属浸漬時の熱伝達係数と熱応力解析 ②低圧鑄造機におけるセラミック中空円筒浸漬時の熱応力 ③搬送用ロールに生じる最大応力と焼嵌め率の関係
栗文彬	2012	焼嵌め接合からなる大型円筒セラミックス構造物の強度設計及び解体に関する研究	①搬送用ロールの軸交換のための解体方法の検討 ②搬送用ロールの軸交換のための焼き外しによる熱応力 ③連続酸洗設備用ロールの静的強度と疲労強度
デディスルヤディ	2015	鋼製軸と焼嵌め接合された加熱炉用セラミックローラーにおける接合部の強度と軸の抜け外れに関する研究	①室温および高温でのセラミックスと鋼の接合法の検討 ②加熱炉用焼嵌め式ハースロールの熱応力 ③焼嵌め式セラミックロールの軸抜け出し現象
酒井悠正	2019	焼嵌め接合で構成されたスリーブ組立式ロールにおける技術課題の解明に関する研究	①スリーブ組立式圧延ロールの円周方向すべりのメカニズム ②スリーブ組立式搬送ロールの静的および疲労強度 ③スリーブ組立式シンクロールの熔融金属浸漬時の熱応力
張国偉	2019	抜け出し駆動力に注目した曲げ荷重を受けるセラミックスリーブ式焼嵌めローラーの軸抜け出しメカニズムの解明	① 2 次元モデルによる軸抜け出し現象の解明 ②軸抜け出し現象に及ぼす設計因子の影響 ③ 3 次元モデルによる軸抜け出し駆動力の同定



図6 スーパーセラミックロールの完成品(上の写真は左より、開発の先駆者で開発のリーダーである、元日立金属㈱技師長の佐野義一博士、九州工業大学野田尚昭教授、日立金属㈱の小川衛介氏、コーディネーターの田中洋征元客員教授)。

リーダーである、元日立金属㈱技師長の佐野博士、筆者、日立金属㈱の小川氏、コーディネーター客員教授の田中洋征博士である。このオールセラミックスロールの開発はロール業界から注目を集めるとともに学会からも高い評価を得て、財団法人素形材センターと公益社団法人日本設計工学会から以下の賞を授与された。

2010年素形材産業技術賞素形材センター会長賞
2020年日本設計工学会論文賞

研究開発当時、地域共同研究センターの田中洋征博士には本製品の重要性を高く評価していただき、外部資金獲得・プロジェクト推進ならびに本稿執筆に多大のご助言ご援助を賜った。心からお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 濱吉繁幸, 小川衛介, 清水健一郎, 野田尚昭, 岸和司, 古賀慎一: 連続溶融めっき鋼板製造ライン用大型セラ

- ミックスロールの開発, 素形材, **51-12** (2010), 54-58.
- 2) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康: 学生と留学生の混成チームの産学連携研究とグローバル教育の実践, ぶらすとす (日本塑性加工学会誌), **3-36** (2020) 746-748.
- 3) 酒井悠正: 焼嵌め接合で構成されたスリーブ組立式ロールにおける技術課題の解明に関する研究, 九州工業大学博士論文, (2019).
- 4) 高瀬康, 東佑亮, 栗文彬, 佐野義一, 野田尚昭: 焼嵌めで組立てられたセラミック製ロールを溶融金属に浸漬させる際の熱応力の解析, 設計工学, **49-3** (2014), 138-146.
- 5) Hendra: Study on How to Reduce Thermal and Mechanical Stresses for Cylindrical Large Ceramics Structures, 九州工業大学博士論文, (2010).
- 6) 高瀬康, 酒井悠正: デディスルヤディ, 野田尚昭, 佐野義一: 焼嵌めで構成された連続酸洗設備用セラミック製ローラーの強度解析, 機械の研究, **65-8**, (2013), 650-658.
- 7) Dedi Suryadi: Strength Analysis and Coming out of Steel Shaft for Ceramic Roller Used in the Furnace under Both Thermal and Distributed Loads, 九州工業大学博士論文, (2015).
- 8) 栗文彬: 焼嵌め接合からなる大型円筒セラミック構造物の強度設計及び解体に関する研究, 九州工業大学博士論文, (2012).
- 9) 野田尚昭, 張国偉, 佐野義一, 酒井悠正: 焼嵌め式ローラーにおける軸の抜け出し駆動力に及ぼす設計要因の影響, 設計工学, **54-11**, (2019), 745-756.
- 10) 張国偉: Mechanism Clarification of Coming out of the Shaft from Shrink-Fitted Ceramic Sleeve Roller under Bending Load Focusing on the Driving out Force, 九州工業大学博士論文, (2019).

のだ・なおあき NODA Nao-Aki

1984 九州大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了。九州工業大学工学部講師・助教授を経て、現在教授。焼嵌め式ローラーや特殊ボルト等の産学連携に関する研究に従事。日本設計工学会論文賞受賞。日本機械学会フェロー。自動車技術会フェロー。2019-2021 日本材料学会九州支部長。