

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実用化評価

Practical Evaluation of Large Ceramic Rolls for Continuous Hot Dipping Steel Sheet Production Line

小川 衛介*
Eisuke Ogawa

清水 健一郎*
Kenichiro Shimizu

濱吉 繁幸*
Shigeyuki Hamayoshi

熊谷 則雄*
Norio Kumagai

大坪 靖彦*
Yasuhiko Ohtsubo

野田 尚昭**
Nao-Aki Noda

高瀬 康**
Yasushi Takase

岸 和司***
Kazushi Kishi

菖蒲 一久***
Kazuhisa Shobu

田原 竜夫***
Tatsuo Tabaru

前田 英司***
Eishi Maeda

古賀 慎一****
Shinichi Koga

松田 泰三****
Taizou Matsuda

本技術は、鋼板の連続溶融めっきラインにおけるセラミックス浴中ロール(サポートロール, シンクロール)に関するものである。多くの浴中ロールは、ステンレス鋼に超硬溶射を施したものが使用されているが、摩耗やめっき浴との反応による腐食などによって、連続生産設備を短期間で停止しロールを交換する必要があり、鋼板の生産性を阻害する要因となっている。

著者らは、腐食や摩耗を抑え長期安定操業ができるよう、浴中ロールのオールセラミック化に取り組み、実用化のための評価を行った。その結果、サポートロールでは10本以上を実機ラインに投入し、Zn-Al合金めっきラインの一例として使用日数延べ90週を超えても胴および軸外径摩耗量が ϕ 0.02 mm以内と微小にとどまっていることを確認した。さらに、 ϕ 530 シンクロールの実機評価を実施し、約4週間で鋼板の品質トラブルやロールの摩耗や肌荒れは確認されなかった。現在、 ϕ 700 シンクロールも実機投入し、長期性能評価中である。

This report concerns ceramic pot rolls (stabilizer roll and sink roll) used in continuous hot dip coating lines for steel sheet. Many pot rolls are made of tungsten carbide sprayed stainless steel and they are damaged within a relatively short period of time due to their insufficient corrosion and wear resistance; therefore, the rolls have to be replaced frequently and that impedes the productivity of continuous coating process. We developed all-ceramic pot rolls, which should have little reactivity to the coating bath and be highly wear resistant for a long term stable operation. As a result, we succeeded in making all-ceramic pot rolls and have installed more than 10 stabilizer rolls in an actual production line in Japan. We confirmed that the abrasion-loss for the outer surface of the body is much smaller than that of conventional pot rolls in an actual Zn-Al line. We have also installed all ceramic sink rolls with a 530 mm diameter in an actual production line. Wearing, chapping, or any other trouble have not been found after 4 weeks of operation. Moreover, we recently made 700 mm diameter sink rolls and they are in the testing stage in an actual line.

● Key Word : セラミックス, CGL, 浴中ロール

● R&D Stage : Development

1. 緒言

めっき鋼板は、防錆を目的として鋼板表面にめっきを施したものであり、建築、家電、自動車などの用途に幅広く使用されている。さらに、新興国での飛躍的な鋼板需要の

増加に伴い、自動車向けを中心とするめっき鋼板市場¹⁾は、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おり、とりわけ高級めっき鋼板の生産性向上に力を注いでいる。さらに、地球温暖化対策

* 日立金属株式会社
** 国立大学法人九州工業大学
*** 独立行政法人産業技術総合研究所
**** 日新製鋼株式会社

* Hitachi Metals, Ltd.
** Kyushu Institute of Technology
*** National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
**** Nisshin Steel Co., Ltd.

として省エネ、省資源化志向が強まっていることも、生産性向上のニーズを高めている。

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、品質安定化などが挙げられるが、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。そこで日立金属、九州工業大学、産業技術総合研究所、日新製鋼からなる研究グループは、浴中ロールの耐食性や耐摩耗性などを改善し、生産性向上に寄与するため、浴中ロールをオールセラミックス化する研究に着手した。

図1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。めっき浴種としては、亜鉛（Zn）-アルミニウム（Al）合金めっき、アルミニウム（Al）-シリコン（Si）合金めっきに大別される。なお、Zn-Al合金は、Znに質量で0.1~0.2%のAlを含有したものが最も生産量が多く、他に質量で55%のAlを含有しためっきなどがある。

本報では、構造用セラミックスとしては、超大型である浴中ロールを製造し、実機ラインで評価を行った結果について報告する。

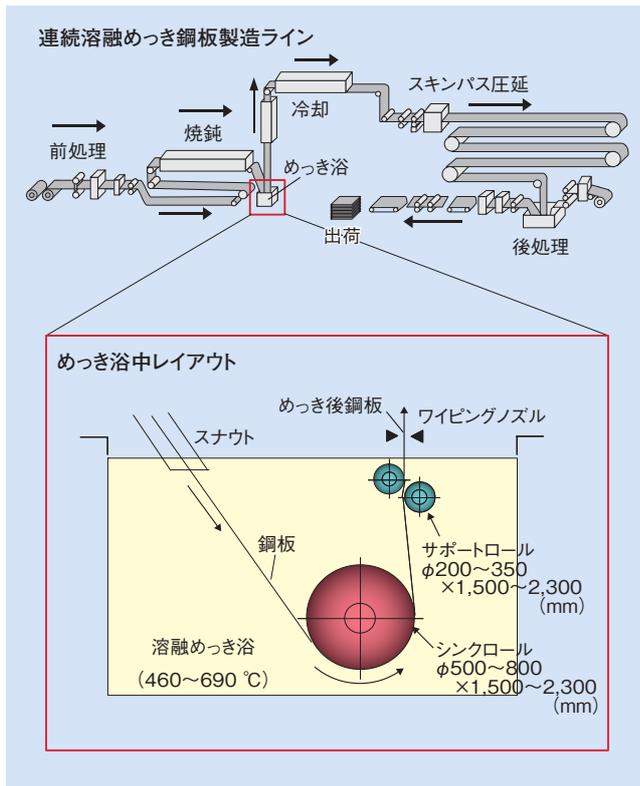


図1 連続溶融めっき鋼板製造ラインおよびめっき浴中レイアウト
Fig. 1 Continuous hot dipping steel sheet production line and layout in the bath

2. 従来ステンレスロールの課題

図2に示すように、従来の浴中ロールには、ステンレス鋼の表面にWC-Co系材料を溶射したものが主に使用されており、以下の課題がある。

- (1) めっき浴との反応により、溶損や合金化が発生し、ドロスも付着し、ロール表面が凸凹になる。

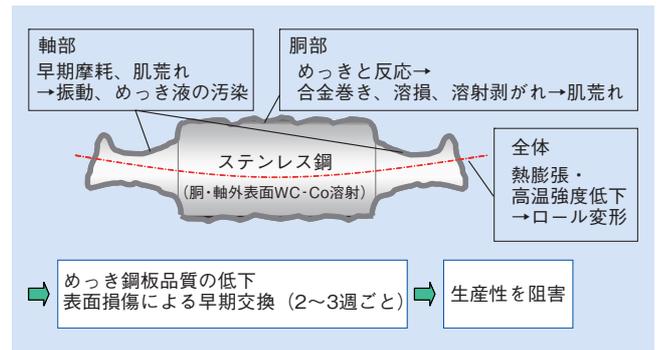


図2 従来ロールの問題点
Fig. 2 Issues with conventional pot rolls

- (2) 胴部や軸部の摺動部が早期に摩耗する。
- (3) 溶射層と母材であるステンレス鋼との熱膨張差に起因して溶射層の剥離が生じる。
- (4) 熱変形による曲がりが生じる。
- (5) 塩酸や硫酸などに弱いため、酸洗によるメンテナンス再使用が難しい。

以上のような課題により、浴中ロールの使用期間が長くなるにつれ、鋼板の傷、振動模様、めっき厚みむらなどの品質的問題が顕著になるため、短期間でロール交換や改削・再溶射を余儀なくされており、コスト増加や生産性阻害の要因となっている。

ロールの交換頻度は、通常2週間に1回程度であり、その都度ラインを長時間停止せねばならず、停止前後にダミー鋼板（スクラップにする鋼板）を通す必要があることなど、生産性の低下が生じている。

3. セラミックスロールの製造

本セラミックスロールは、鋼板が接する胴体部と軸受が接する軸部に分割して製造後、接合により一体化する構造としたものであり、セラミックス材質開発、構造解析による安全性の評価、大型品の焼結、加工技術とセラミックス同士を接合する組立技術を駆逐することにより実現できた。

3.1 適用材質

今回浴中ロール用に開発した高強度耐熱衝撃型セラミックス²⁾（以降、開発材と称す）および構造用セラミックス材として広く適用されているサイアロンの材料特性を表1、組織写真を図3に示す^{2)~4)}。また、種々のセラミッ

表1 開発材の特性
Table 1 Characteristics of development material

特性	開発材	サイロン	
曲げ強度	MPa	1,050	880
破壊靱性	MPa·m ^{1/2}	7.7	7.5
熱膨張係数	×10 ⁻⁶ /°C	3.0	3.0
熱伝導率	W/m·K	65	17
耐熱衝撃性	°C (ΔT)	1,000	710

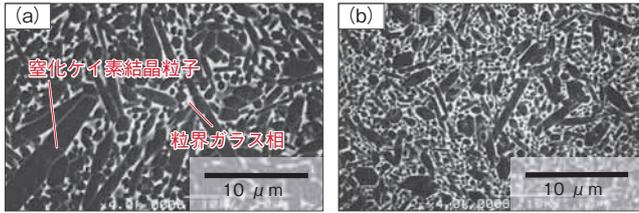


図3 開発材の組織写真 (a) 開発材 (b) サイアロン
 Fig. 3 Structure photograph of developed material
 (a) developed material (b) SIALON

クス材料の中で、耐熱衝撃性および強度面における開発材の位置づけを図4に示す。開発材は、強度、破壊靱性、耐熱衝撃性などの点で優れており、セラミックスの中では浴中ロールに適した材料と考えることができる。開発材は、図3に見られるように、サイアロンと比べてアスペクト比を高めた結晶粒とした点に特徴があり、これが熱伝導率を高め、耐熱衝撃性の向上に大きく寄与している。

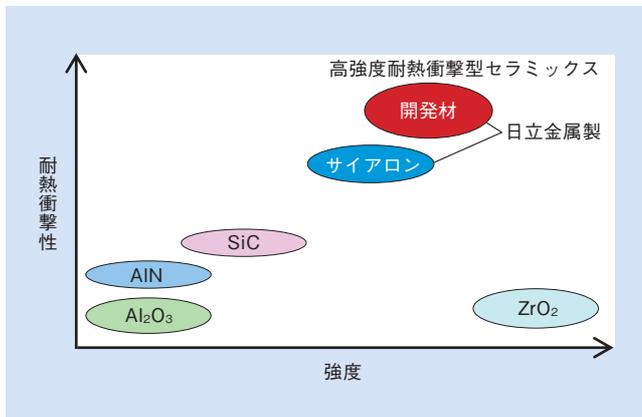


図4 開発材の位置づけ
 Fig. 4 Characteristic comparison with other ceramics

図5に開発材およびサイアロンの耐熱衝撃性試験結果を示す⁴⁾。800℃に加熱した試験片を水中急冷した場合、サイアロンには亀甲状の亀裂が発生したのに対し、開発材には亀裂の発生はなかった。

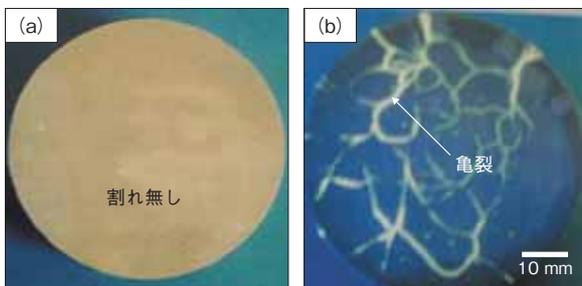


図5 耐熱衝撃性試験結果：蛍光探傷写真 (a) 開発材 (b) サイアロン
 (Δ T=800℃水中急冷試験、試験片寸法：φ60×20 t mm)
 Fig. 5 Thermal shock test results : Fluorescent penetrate inspection
 (a) developed material (b) SIALON (Δ T=800℃ water rapid cooling test : size of the test-piece φ60×20 mm)

3.2 構造設計

図6にセラミックスロールの構造例を示す。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ことから、胴部には継ぎ目を設けない単体構造とし、両端に軸とスラスト受けを接合した。シンクロールは、胴部を分割し、分割した胴部同士をインナーリングで接合し、さらに両端に軸とスラスト受けを接合した構造とした。

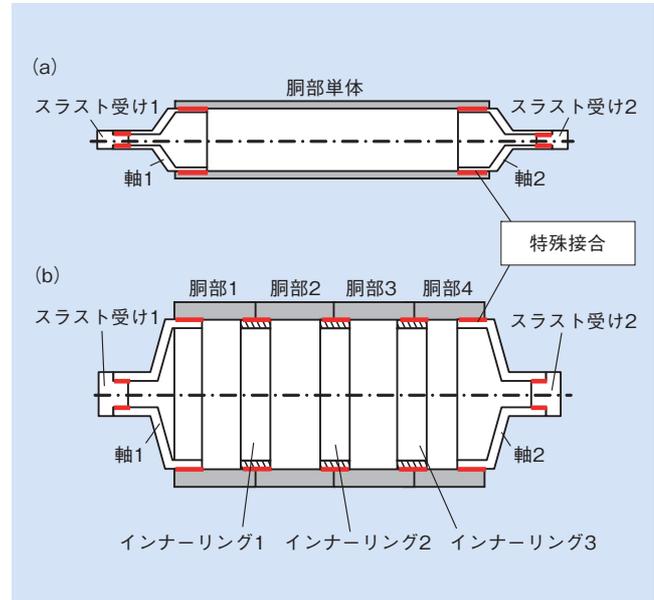


図6 構造の概略図 (a) サポートロール (b) シンクロール
 Fig. 6 Structure of pot rolls (a) Support roll (b) Sink roll

軸部およびスラスト受け部は、軸受などによる摺動摩擦のため、いずれ取り替えが必要となる。したがって、前記のように各パーツに分割することで、パーツごとの取り替えを可能とした。以下にその解析結果について述べる。

強度設計に関しては、めっき浴中に浸漬する際の熱衝撃や操業中に鋼板から受ける荷重を考慮し、耐用可否および構造上の問題点をFEM (Finite Element Method : 有限要素法) 解析による検討を行い、実機使用に耐用可能であることを確認した。

まず、浸漬時の熱衝撃について、図7にφ540の3次元円筒モデルを、熔融亜鉛中に速度25 mm/sで浸漬した時に生じる表面熱伝達係数の解析結果を示す。図中の線は各Z位置におけるX方向の表面熱伝達係数の変化を示している。熱伝達係数はXの増加に伴い減少していくが、途中から値が上向きに転じている。この原因は、円筒モデルの浸漬方向に対し、後尾側の流体に渦が発生しているためである。

図8に前記熱伝達係数を用いて解析した浸漬時間と最大熱応力の変化を示す。浸漬開始から25 s後に最大応力82 MPaが、図9に示す円筒の上端面内側に発生している。この値は、表1に示す開発材の材料強度と比較して、安全率3以上を確保できることが確認された。

次に操業中に受ける荷重解析の一例を以下に示す。

胴径φ530×胴長1,500 mmのシンクロールに関するFEM解析条件およびその結果を図10および図11に示す。解析は、分布荷重240 kNという過酷な荷重条件にて行った。引張応力が集中する部分は、胴部中央部および胴端の

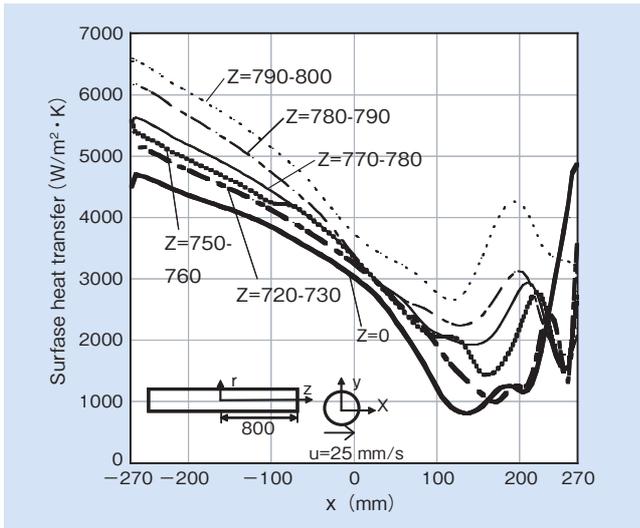


図7 外径φ540の3次元円筒モデルをu=25 mm/sで溶融亜鉛中に浸漬した時のX方向表面熱伝達係数
 Fig. 7 Surface heat transfer coefficient as a function of x for a three-dimensional cylinder in molten zinc with velocity u=25 mm/s and diameter D=540 mm

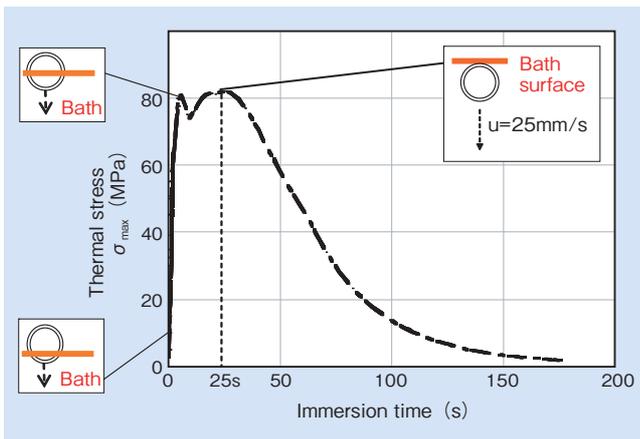


図8 3次元円筒モデルにおける浸漬時間と最大発生応力 (外径φ540、浸漬スピードu=25 mm/s)
 Fig. 8 Maximum stress vs. immersion time in molten zinc with velocity u=25 mm/s and diameter D=540 mm when using a heat transfer coefficient three-dimensional cylinder model

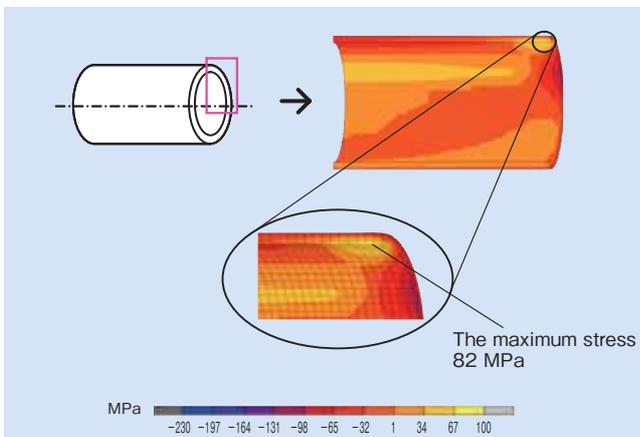


図9 浸漬から25 s後における82 MPaの最大応力発生部応力分布 (φ540、外径φ540、浸漬スピードu=25 mm/s)
 Fig. 9 Stress contour map at 25 s where the maximum stress =82 MPa appears (u=25 mm/s, D=540 mm)

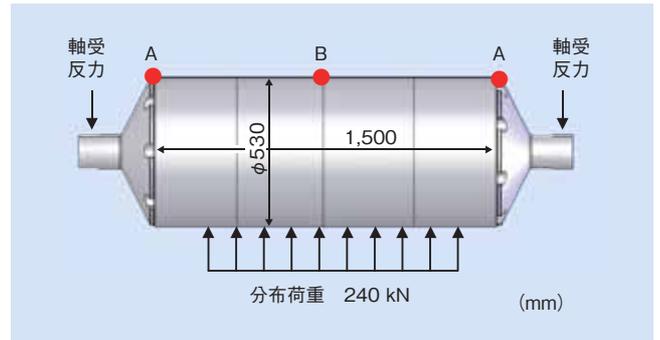


図10 強度計算条件
 Fig. 10 Boundary condition of sink roll

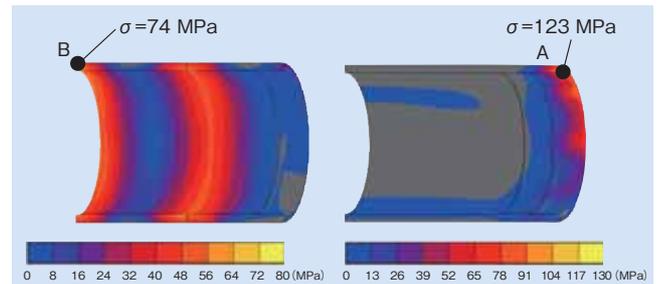


図11 FEM解析結果 (図10のA、B点における胴部内面側視野)
 Fig. 11 Tensile hoop stress distribution σ (the center (point B) and the end (point A) of barrel sleeve by Fig.10)

接合部であり、その値は、表1に示す開発材の材料強度より十分な安全率を有することを確認した。

4. 耐食性試験

セラミックスロールのめっき浴中における劣化挙動を確認するため、溶融Zn-Al合金および溶融Al-Si合金浴中での浸漬試験を実施した。

評価材には、従来ロール材であるステンレス鋼 (SUS316) にWC-Co溶射を施したもの (以降、従来材と称す)、開発材、さらに評価を早期に完了すべく、本開発材の製作に先立ち、耐食性に関しては開発材と同様の性質を有することが明白な市販の窒化ケイ素材を一部開発材の代わりに用いた。

試験方法としては、溶融したZn-Al合金およびAl-Si合金に、5×5×15 mmの棒状の試験片を約10 mmの深さまで浸漬した後、外観と断面を観察評価した。

まず、Zn-Al合金に対する評価を実施した。試験片を490℃のZn-質量で0.2% Al含有浴中へ45時間浸漬した後、溶湯中より取り出した開発材外観および従来材断面を図12に示す。開発材は、付着しためっきが簡単に除去でき、表面を観察した結果、全く反応していないことを確認した。一方、従来材は、溶射層のみならずステンレス鋼母材の部分まで大きく浸食されていることが観察された。そもそもステンレス鋼は溶融Znや溶融Alに腐食されやすい性質を持っているため、実機においても同様の現象により浸食が加速度的に進行することが考えられる。

次にAl-Si合金に対する浸漬試験を実施した。図13に700℃のAlに質量で9% Si含有の浴中へ25時間浸漬した後

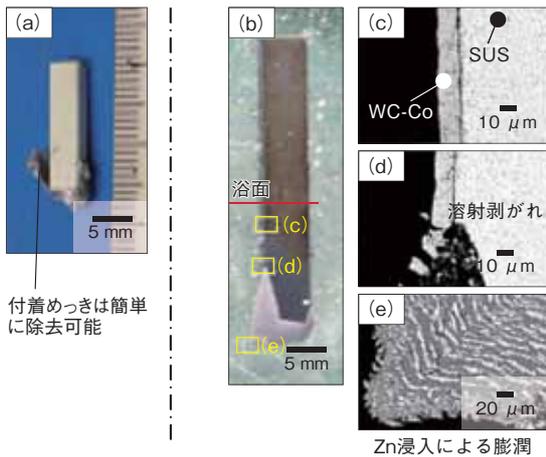


図 12 浸漬試験後の外観および断面観察 (Zn-0.2%Al, 490 °C 45 h 浸漬後) (a) 開発材外観 (b) 従来材全体断面 (c) WC-Co 溶射層断面拡大 (d) WC-Co 溶射層の剥がれ (e) ステンレス母材への Zn 浸入

Fig. 12 The appearances and cross section views after dipping in molten Zn-0.2%Al Alloy at 490 °C for 45 hrs. (a) appearances of developed material (b) cross section view of conventional material (c) enlarge view of WC-Co sprayed layer (d) peeling of WC-Co sprayed layer (e) penetration of Zn into stainless steel base material

の開発材表面および市販の窒化ケイ素材断面を示す。開発材は、溶湯中から取り出すとわずかにめっきの付着が見られるが、簡単に除去できた。さらに市販の窒化ケイ素材と共に合金との反応層も見られず、浸食は確認できなかった。一方、従来材は、溶射層に亀裂が生じて剥離しており、母材が大きく浸食された。前記のZn-Al合金より高温であるため、母材と溶射層との熱膨張差が影響しているものと考えられる。

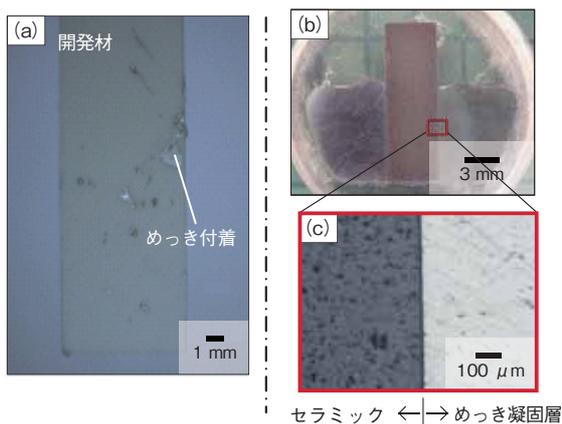


図 13 開発材 (左) と市販窒化ケイ素 (右) の浸漬試験後の表面および断面観察 (Al-9%Si, 700 °C 25 h 浸漬後)

(a) 開発材表面 (b) 市販の窒化ケイ素材断面 (c) 境界部断面拡大
Fig. 13 The appearances and cross section views of developed material (Left) and commercial silicon nitride material (Right) after dipping in molten Al-9%Si Alloy at 700 °C for 25 hrs. (a) appearances of developed material (b) cross section view of commercial silicon nitride material (c) boundary section enlarge view of (b)

5. 実機ライン評価

図14に完成したサポートロールとシンクロールの外観写真を示す。

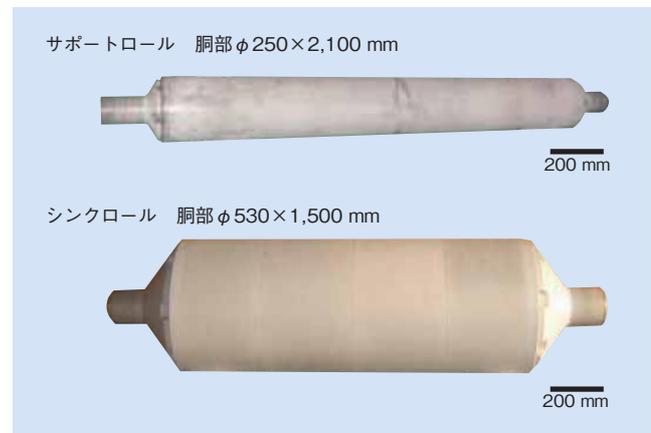


図 14 オールセラミックスロールの外観写真
Fig. 14 100% Ceramic Roll Appearance

サポートロールについては、これまでに10本以上を市場に投入しており、長期耐久性能を評価中である。初期にZn-Al合金めっきラインに投入したサポートロールは、使用日数が延べ90週を超えており、胴部および軸部の摩耗状況は、図15に示すように、長期にわたって溶損もなくほとんど摩耗していない。また、胴部の表面粗さについても投入初期の状態を保っていることを確認している。

シンクロールは、浴温が最も過酷なAl-Si合金めっきラインにて評価を開始した。ライン条件は、板厚0.3~1.6 mm, 板幅682~1,227 mm, ラインスピード最大120 m/min, 鋼板張力最大19 kNである。初期評価としては、浸漬時の熱衝撃割れ、ロールの回転不良などの操業トラブルはなく、ロールの異常摩耗や肌荒れも確認されていない。現在、長期性能を評価中である。

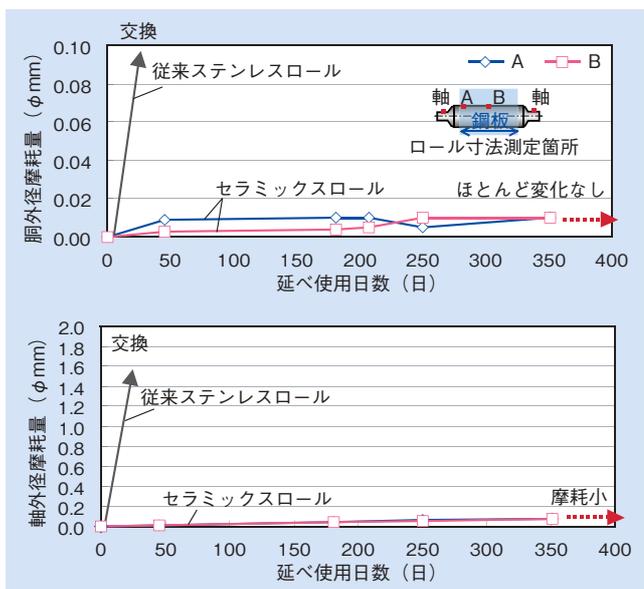


図 15 セラミックス製サポートロールの摩耗状況

Fig. 15 The wear measured after pickling versus the total days used at the indicated locations on the ceramic stabilizer roll body and shafts

6. 結 言

当研究グループでは、連続溶融めっき鋼板製造ラインにおける浴中ロールをセラミックス化するために、各方面からの研究開発を系統的に進め、サポートロールに次いで、シンクロロールの製造も可能とし、以下の実機評価の結果を得た。現在、シンクロロールは、 $\phi 530$ に加え $\phi 700$ も実機に投入し、長期性能評価を行っている。

- (1) サポートロールでは、Zn-Al 合金めっきラインの一例として、使用日数延べ90週を超えても胴外径および軸外径の摩耗量が $\phi 0.02$ mm以内と微小であることを確認した。
- (2) $\phi 530$ シンクロロールの製造に成功し、浴温が最も過酷なAl-Si合金めっきラインにて、延べ4週の初期実機評価を終え、割損や回転不良による操業トラブルはなく、ロールの異常摩耗や肌荒れも確認されていない。

7. 謝 辞

本研究の一部は、平成20年度、21年度の地域イノベーション創出研究開発事業の支援を受けて行われた。ご協力およびご指導いただいた経済産業省九州経済産業局および財団法人九州産業技術センター他の関係各位に謝意を示す。

引用文献

- 1) Review of Continuous Hot Dip Coat in the World. Metal Resources Report, (2005), p.117-122.
- 2) S. Hamayoshi, M. Sobue, etc, Improvement in Thermal Conductivity of Silicon Nitride Ceramics and Their Applications. Hitachi Metals Report, vol.17; (2001), p.77-80.
- 3) Roll Company, Super Sialon Products for Steel Manufacturing Industry. Hitachi Metals Report, vol.22 ; (2006), p.19.
- 4) Roll Company, Development of Super Sialon for Industrial Application. Hitachi Metals Report, vol.21 ; (2005), p.23.



小川 衛介
Eisuke Ogawa
日立金属株式会社
ロールカンパニー



清水 健一郎
Kenichiro Shimizu
日立金属株式会社
ロールカンパニー



濱吉 繁幸
Shigeyuki Hamayoshi
日立金属株式会社
ロールカンパニー



熊谷 則雄
Norio Kumagai
日立金属株式会社
ロールカンパニー



大坪 靖彦
Yasuhiko Ohtsubo
日立金属株式会社
特殊鋼カンパニー



野田 尚昭
Nao-Aki Noda
国立大学法人九州工業大学
教授 工学博士



高瀬 康
Yasushi Takase
国立大学法人九州工業大学
工学博士



岸 和司
Kazushi Kishi
独立行政法人産業技術総合研究所
工学博士



菖蒲 一久
Kazuhisa Shobu
独立行政法人産業技術総合研究所
理学博士



田原 竜夫
Tatsuo Tabaru
独立行政法人産業技術総合研究所
工学博士



前田 英司
Eishi Maeda
独立行政法人産業技術総合研究所



古賀 慎一
Shinichi Koga
日新製鋼株式会社
堺製造所



松田 泰三
Taizou Matsuda
日新製鋼株式会社
堺製造所