

連続溶融めっき鋼板製造ライン用 大型セラミックロールの開発

野田 尚昭・佐野 義一・高瀬 康・堀田 源治

製鉄所に用いられるロールについて¹⁾

製鉄所において圧延、めっき、酸洗などの多くの用途にロール・ローラが用いられている。その呼称は、主として圧延に用いられるものをロール、それ以外の用途ではローラと呼ばれることも多いが、明確には区別されていない。製鉄所で最も多く用いられているのは、中間製品や製品移送に用いられる搬送用ロールで、これは他の多くの産業でも使用されている。鉄鋼に用いられる多くのロールは、使用条件や使用環境などにより比較的早期に胴部表面に摩耗を生じ、許容範囲を越える

と、装置から組外されて、平滑な面に修正加工されて、繰り返し使用される。繰り返し使用されて廃却径に達するとロール全体を交換する必要がある。一方、軸部はほとんどの場合使用できる状態にある。したがって、多くの場合、胴部を中空スリーブ状にして、これに軸部を焼嵌め等で組立てるスリーブ組立構造が採用されてきた。こういった背景からスリーブ組立式ロールに関する研究が活発に進められてきた^{2)~29)}。これらのロールはその使用中に受ける荷重に注目すると、ロール胴部に加わる荷重が大きいものと、比較的小さいものに分けられる。

図1(a)に示す熱間鋼板圧延ロールの場合、そ

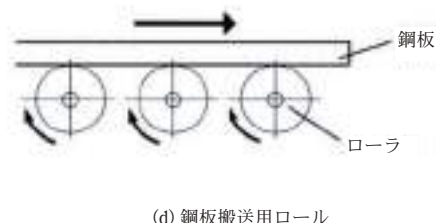
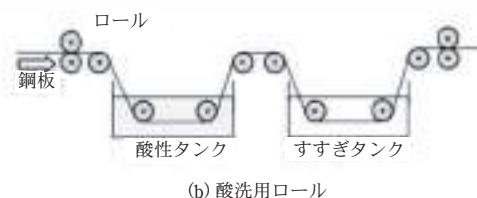
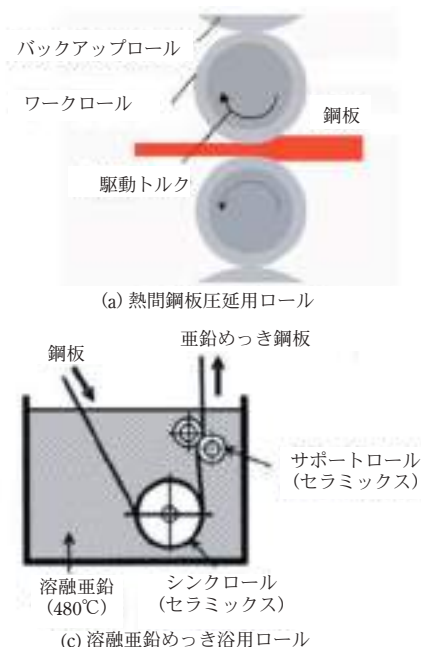


図1 製鉄所の代表的なロールとローラ。

の最大圧延荷重は数百～数千トンと非常に大きい³⁰⁾。このため圧延設備には被圧延材に直接接するワークロールを補助するためのバックアップロールが組込まれており、ワークロール・バックアップロールを含めたロール数により、2段、4段や6段(または、6重)などに区別される。図1(a)の圧延用ロールは一部焼嵌め接合型が適用されているものの、焼嵌め固有の問題、大型径による強度低下や使用環境による破損などの可能性が残されており、それらの問題解決が必須である。圧延荷重が大きいので、多くの場合に中実式の圧延用ロールが用いられているが、さきの解説では、一部で実用化されている圧延用スリーブロールに関して、そのスリーブすべりのメカニズムを説明した³¹⁾³²⁾。

図1(b), (c), (d)に使用時の荷重が比較的小さいロール・ローラの例を示す。図1(b)は鋼板の表面スケールを除去する連続酸洗設備用ロールの例であり、図1(c)に鋼板表面にめっきを施す連続溶融金属めっき浴のシンクロールを示す。また、図1(d)に鋼板移送用の搬送用ローラの例を示す。これらの使用荷重は比較的小さいため、ロール胴部、もしくはロール全体に、耐磨耗性、耐食性や耐熱性に優れるセラミックス³³⁾を導入することが行われている。メンテナンスや交換サイクルの大幅な延長が期待できるため、すでに一部で実用化がなされている²⁸⁾。図2にセラミックロールの寸法を、図1(b)の酸洗用ロールと、図1(c)のめっき浴用シンクロールに対して示す。図2に示すように、このようなセラミックロールの構造には焼嵌め接合によるスリーブ組立式構造の適用が不可欠である。

今後の解説では、これらの圧延ロール以外で実用化が進められているセラミックロールを解説する。図2(a)の酸洗ロールでは、瞬時破壊、疲労破壊特に、スリーブ厚みが薄い場合に最大応力がスリーブ外側に発生するメカニズムを説明する。また、図2(b)の溶融亜鉛めっき浴用セラミックロールの解説では、溶融金属にロールを浸漬する際の、焼嵌め接合面の接触状態の変化や、その際に生じる熱応力に及ぼす浸漬速度の影響等について説明する。本解説では、まず、セラミックスの特徴や

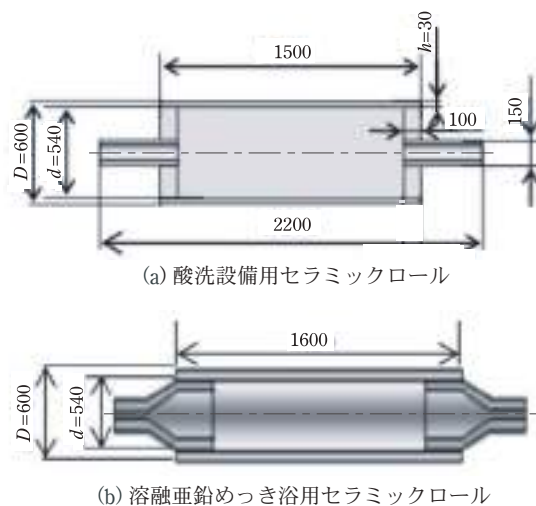


図2 セラミック製スリーブロールの寸法 (mm)。

その開発に必要なセラミックスと金属の接合等の基本的事項を説明したのち、図2(b)のめっき浴用セラミックロールの開発に至った研究背景や、従来のロールの問題点とセラミック使用による解決策、ならびに産学連携による実用化への取り組みなどを解説する。

セラミックスの機械的性質と熱的性質¹⁾¹⁸⁾³⁴⁾³⁵⁾

表1に、代表的なファインセラミックスの物性を示す³⁶⁾。また、図3には、セラミックスの特性を、金属、高分子材料と比較して示す³⁷⁾。高分子³⁸⁾は力をかけると変形しやすく、鉄や銅なども力をかけると伸びるのに対して、セラミックスはほとんど変形せず破断に至るが、金属より強度の高いものもある。ヤング率と比重の関係より、セラミックスは軽くて変形しにくい特徴を持つことがわかる。また、耐熱性も大きな特徴である。ステンレス鋼は数百度で強度が低下するが、セラミックスは様々な酸化物、炭化物、窒化物を含めて1000℃くらいまでほとんど強度が落ちない。熱を加えても膨張しにくく、線膨張係数は炭素鋼やステンレスに比べて1/4ほどであり、高温でも寸法精度が高い。例えば、窒化ケイ素をベースと

表 1 構造用セラミックスの機械的特性と物理的特性³⁶⁾

材料	密度 (g/cm ³)	曲げ強度 (MPa)	破壊靱性 (MPa・m ^{1/2})	弾性定数 (GPa)	ポアソン比	硬さ (GPa)	線膨張係数 (K ⁻¹)	熱伝導率 (W/(m・K))
窒化ケイ素 (Si ₃ N ₄)	焼結 (一般)	3.2	600	4.5	276	0.24	14	28
	ホットプレス	3.2	800	5.0	317	0.28	20	30
	反応焼結	2.5	210	3.6	165	0.22	10	6
	ポスト焼結	3.3	825	—	297	0.28	19	30
	HIP 焼結	3.2	1000	6.0	310	0.28	20	32
サイアロン		3.2	650	5.0	297	0.28	18	22
炭化ケイ素 (SiC)	ホットプレス	3.2	550	3.9	449	0.19	25	70
	焼結 (一般)	3.1	400	3.0	427	0.19	27	80
	反応焼結	3.0	350	3.5	385	0.19	17	90
	CVD	3.2	500	2.6	450	—	30	150
アルミナ (%) (Al ₂ O ₃)	85%	3.4	296	3.5	221	0.22	10	15
	90%	3.6	338	3.5	276	0.22	11	17
	96%	3.7	352	4.5	303	0.21	12	23
	99.8%	3.9	552	4.5	386	0.22	15	30
ジルコニア (ZrO ₂)	Cubic	5.9	245	2.4	150	0.25	11	1.7
	TZP	6.1	1020	11.0	210	0.24	13	0.4
	PSZ	6.0	750	8.1	205	0.23	12	2.1

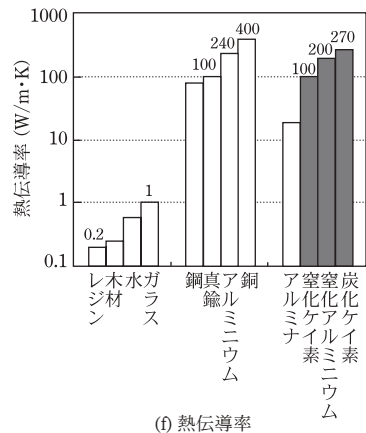
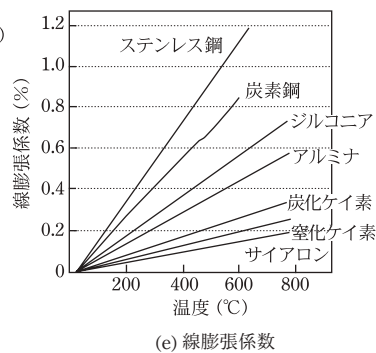
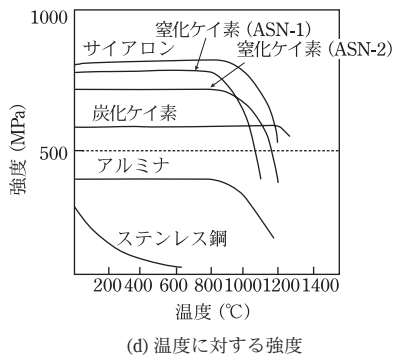
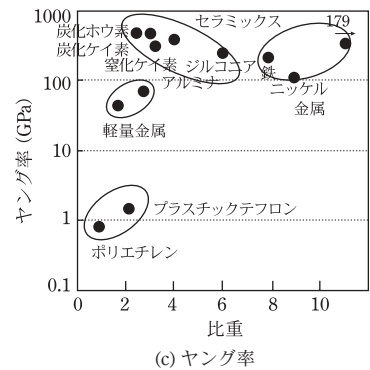
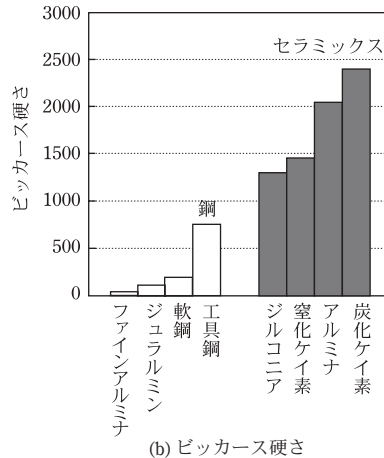
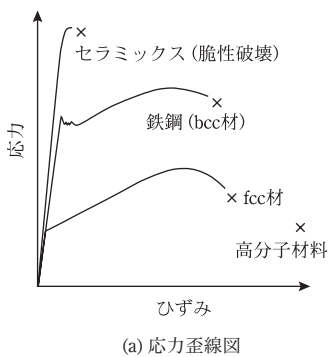


図 3 セラミックスと高分子材料の比較.

したセラミックベアリングは、強度が高く、熱膨張係数が低いため、ひずみや熱応力が最小限に抑えられるため広く使用されており^{39)~42)}、従来のベアリング⁴³⁾よりも、回転時の外輪の遠心力を低減できるため、耐用年数を大幅に延長可能である。表1に示すように、構造用セラミックスの強度は400~800 MPaである。実際の強度は、材料内部の欠陥寸法に依存して低下する。欠陥寸法の影響は統計的に評価される(ワイブル分布)。強度は曲げ強度、引張強度、圧縮強度に分類され、それぞれ異なる方法で測定される。

表1に示す窒化ケイ素(Si_3N_4)は強度や靱性の高い構造用セラミックスである。熱膨張係数が低く、強度が高いため、優れた耐酸化性と耐熱衝撃性を備えている。常圧焼結、ホットプレス、反応焼結、熱間静水圧プレスなどの製造方法によって分類される。非酸化物セラミックの中で、窒化ケイ素は、その耐用温度1500℃の可能性があるため最も広く研究されている⁴⁴⁾。窒化ケイ素は、耐磨耗要素に多く使用されているが、今後の解説では、熱間圧延機の搬送ローラや垂鉛めつきラインのシンクロールなどへの使用を説明する。サイアロンは、窒化ケイ素(Si_3N_4)の難焼結性を解決するために、ケイ素(Si)、アルミニウム(Al)、酸素(O)、窒素(N)という元素(Si-Al-O-N)をベースにしたセラミック合金である。サイアロンは窒化ケイ素に比べてコストが低く、機械的特性はアルミナよりも優れているので、耐熱管や低圧ダイカストマシン等に使用されている。炭化ケイ素(SiC)は、最も高い耐食性と1400℃の高温でも強度を維持するため、低靱性の用途に使用される。アルミナセラミックは電気絶縁性や耐薬品性など、優れた機械的特性と電気的特性の組み合わせを提供するため最も広く使用される。ジルコニア(ZrO_2)は、室温では最高の強度と靱性を備えている。

構造用セラミックスによる製品開発の歴史¹⁾¹⁸⁾³⁵⁾

セラミックスを利用した工業の歴史は古く、耐

火物は数百年以上、断熱材や発熱体は数十年の歴史をもつ工業材料となっている。しかし、より厳しい荷重条件下で使用される熱機関等の用途に関しては現在も開発段階のものも多く、その歴史も本格的には50年前後にすぎない。窒化ケイ素等の非酸化物焼結体が将来のガスタービン部品材料として注目されたのは1950年代後半、欧米において国家レベルの本格的研究が開始されたのが1970年代初頭である。表2に、1982年にまとめられたファインセラミックスの歴史を示す⁴⁵⁾。米国では陸軍材料機械研究所(AMMRC)が中心となり、1971年からエンジン用セラミックスの研究が開始され、1979年にはエネルギー省(DOE)の自動車用ガスタービン開発計画(AGT)がスタートした。また、ドイツでは1973年秋のオイルショックの翌年の1974年に研究技術者(BMFT)およびドイツ航空宇宙研究所(DVLR)が中心となって自動車メーカー、セラミックメーカー、大学、研究所の協力のもとに自動車ガスタービン計画がスタートした。自動車用セラミックエンジンの開発を進めてきたが、1979年国際エネルギー機構(IEA)のプロジェクトとして政府間協力の下で進められるようになった。このようにファインセラミックスの製品開発に関して、国家的・世界的な取り組みが

表2 ファインセラミックス開発の歴史⁴⁵⁾。

年代	研究開発および工業化の歴史
1944~1947	SiC 発熱体の工業化(日本)
1958	AlN 煉瓦の耐熱・耐食性が認められた
1959	Si_3N_4 を将来のガスタービン材料として注目(英国)
1961	Si_3N_4 を MgO 添加ホットプレス(英国)
1971	AlN*および各種窒化物の高強度焼結体の開発(日本)
1974	日・米・欧で各種高強度非酸化物材料の開発活発化
1975	SiC 長繊維の開発(日本)
1978	高効率ガスタービン開発プロジェクト発足(日本)
1981	ファインセラミックス開発プロジェクト発足(日本)
	Si_3N_4 , SiC, ZrO_2 等の実用化進展

* AlN: 高機能窒化アルミニウム

なされてきた。その用途は自動車エンジン部材や高温熱交換器等耐熱高強度材料への利用を目途としてきたが、現在に至るまで本格的な市場までは形成されるまでには至っていないようである。

一方、比較的最近になって、熱的および機械的負荷を受ける部材へのファインセラミックスの応用が研究されており、低圧ダイカスト機における溶融金属用セラミックダイカストスリーブ、およびセラミックストークの処理に関する研究は成功裡に実施されている²⁵⁾²⁶⁾⁴⁶⁾⁴⁷⁾。また、後述するような連続溶融めっき鋼板製造ラインとめっき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)が開発されている²⁴⁾²⁸⁾⁴⁸⁾。また、連続酸洗ライン⁴⁹⁾、および加熱炉⁵⁰⁾における高温環境下での同様のセラミック構造も検討されている。従来の加熱炉用ローラは、セラミックコーティングされた鋼製スリーブとシャフトが焼嵌めによって接続されたり、そのローラ内部は水循環により冷却される。しかし、セラミックスとスチールの熱膨張差によりローラのコーティングは短期間で劣化する。また、従来のローラは、高温で搬送されるストリップによって引き起こされる摩耗のため、非常に頻繁に交換される。その対策として、セラミックススリーブとその両端に嵌合するシャフトからなる新しいローラを導入することで、セラミックコーティングで観察される欠陥のほとんどを防止し、ローラの寿命を延ばすことができる。

自動車や建材、電気製品に用いる連続溶融めっき鋼板の製造ラインでは、めっき浴中でシンクロールやサポートロールが使用されている。亜鉛めっきラインではめっき浴は、500℃を越える溶融亜鉛で満たされ、腐食性が強いいため用いられる鋼製のシンクロールは早期の交換が必要である。このため、耐熱・耐食性に優れかつ強靱性に富む窒化ケイ素系セラミックスを用いたシンクロールの開発が2000年代から始まり、軸を含むオールセラミックロールとして実用段階に到達し²⁸⁾、さらに実用化研究が継続されている(図2(b))^{25)~27)}。搬送用ローラは、製鉄所の上工程から下工程までの、あらゆる所で使用されている。特に、上工程では

ローラ当たりの被搬送物重量が大きいため胴部表面に比較的早期に摩耗や肌荒れが生じる。このような背景から搬送用ローラに対しても耐摩耗性や耐熱性に優れたセラミックスを適用するための研究が進められてきた¹¹⁾¹²⁾¹⁸⁾²⁰⁾²⁵⁾⁵¹⁾。搬送用ローラは他のロール・ローラに比べ圧倒的に個数が多いため、メンテナンス面の改善により大幅なコストダウンが期待され、実用化が進んでいる⁵²⁾。

大型セラミック構造物に要求される接合方法¹⁸⁾

セラミックスは単独で構造部材として使用するにはまだ信頼性に乏しく、複雑形状の部品製造や加工に際してはコスト高となる。また高温機械部品を対象とする場合には、中低温部では金属材料を、高温部ではセラミックスを使うことにより有利な設計を行うことができる。

このような背景から金属とセラミックスを共存させて利用しようとする考え方が古くからあった。金属とセラミックス接合技術の開発において重要な課題は、①どのようにして金属とセラミックスを接合するか、②金属とセラミックスの熱膨張係数差によって接合後の冷却中や使用中に生じる熱応力をどのように緩和できるかである⁵³⁾。セラミックスと金属の接合においては、両素材が異なる物理的・化学的性質をもつことから、強度や信頼性を左右する多くの因子を考えねばならない。中でも、素材間の化学反応性、界面における結晶学的関係、熱膨張差に起因する熱応力(あるいは残留応力)、界面の密着性、接合面研削状態、および環境との両立性、等が重要なものと考えられる⁵⁴⁾⁵⁵⁾。

製鉄所の製造工程で用いられる溶融亜鉛めっきライン用ロールや搬送用ローラ等は大型円筒体セラミック構造物である。ここで、セラミックスの製造可能寸法やコスト的な面から、ロール胴部と軸とを別々に製造して、それらを焼嵌め法によって接合し、組立てることが必要である。セラミックスの接合法として焼嵌め法がなぜ本研究のロールに用いられるのかについて、文献調査を通じて

表 3 セラミックスと金属の接合.

機械的接合	ボルト締結 焼嵌め法
有機, 無機接着剤接合	
助剤接合	金属助剤接合 酸化物助剤接合 化合物助剤接合 (銅の硫化物)
拡散反応接合	

整理した結果を紹介する¹⁸⁾.

接合方法はおおまかには機械的な方法と化学的な方法がある. 表 3 にセラミックスと金属の接合分類を示す⁵⁶⁾.

機械的な接合方法として, 金属の場合でも日常的に行われているボルト締結と焼嵌めがあげられる. ボルト締結は単純な機械的接合であり, 焼嵌めは両部材が使用温度で強く抱きしめるように焼嵌め代を与えて接合する方法で, 主に円筒体の接合に利用されている. 化学的な方法は接合界面での化学的反応を利用するもので, 広く実用的に利用されている. 大まかには, 接着剤のような化学反応を利用する方法や, 金属や酸化物あるいは化合物を接合助剤として用いる化学反応接合がある.

(1) ボルト締結: 作業が非常に簡単で特殊な装置を必要としないが, 応力集中を伴う欠点がある. セラミック製ボルト, ナットを用いる場合, セラミックスの引張強さが低いこと, 応力集中により脆性破壊しやすいことなどのために, 締結力は金属製に比べて低い. 金属製ボルト, ナットを用いる場合には熱膨張の違いによる緩みのために高温では使用できないことが多い.

(2) 焼嵌め法: 焼嵌め, 冷し嵌めによる部材締結は金属同士では古くから行われ多用されている⁵⁷⁾. セラミックスは, 引張強さが低いが圧縮強さはその約 10 倍も高いものがあり, 焼嵌めによりセラミックスに圧縮応力が生じるような接合条件では, 熱膨張係数の違いからみて, セラミックスと金属の締結接合に有効である.

焼嵌め接合は円筒体の軸方向の接合に多く用いられるが, 接合部の締結力を保ち, 過大な焼嵌め応力を発生させないための適切な焼嵌め率

の算定は容易ではない. そのため, 詳細な解析が必要となる. しかし, ローラ, ロールにおいては耐用期間に達すると交換する必要があるので, スリーブと軸とを比較的分離しやすいという利点がある.

(3) 有機, 無機接着剤接合: 接着剤層の厚みと接着強さとは相関関係がある. 一般に, せん断や引張応力が支配的な場合は, 接着剤層が薄い方がよく, 割れやはく離が支配的な場合は, 厚い方がよいとの報告があるものの一概には言えない. 有機接着剤の室温接合強度は, ゴム系, エポキシ系, シアノアクリル系 (瞬間接着) などが代表的な機械構造用部材接合で, それらの接合強度はゴム系が 1~5 MPa, エポキシ系で 20~30 MPa, シアノアクリル系で 20~25 MPa である. 無機接着剤は, 有機系に比べて耐熱性に優れ, 使用可能温度が 1700 K を超えているものの, 硬くて脆いのが特徴である. 室温接合強度は有機系接着剤と同等かそれよりも低い (300 MPa 以下) ものが多い.

(4) 助剤接合: MO-Mn (モリブデン-マンガン) 混合物が古くから金属との封着などに用いられている. 接合強度はアルミナに対して 10 MPa 程度であり, 母材強度 (400 MPa 程度) に比べると著しく低いので, 構造用部材の接合には適さない. Au (金) はアルミナと固相反応接合が可能で, 約 60 μm 厚みの Au 薄膜を高純度焼結アルミナ棒間にはさんで接合したところ, 20~50 MPa のせん断強度を得られた. 同様に, アルミナに対して Pt (白金) 薄膜を用いる方法もある. 200~250 MPa の曲げ強度が得られ, 引張換算すると 100~125 MPa である. 構造用材の高強度接合法として強度が十分でなく, 高価なので, 生産に利用しにくい.

(5) 化合物助剤接合: ここで, 硫化銅を例として化合物助剤を用いた処理プロセスを図 4¹⁸⁾ に示す. 硫化銅とカオリンのペースト状混合物をセラミックス上に塗布し, 空気中で 1300~1500 K に加熱すると, 硫化銅が分解し, セラミックス中に Cu 成分が浸透してメタライズされる. カ

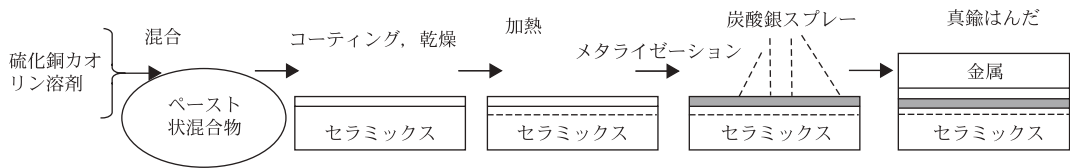


図 4 硫化銅による接合工程¹⁸⁾.

表 4 セラミックスと金属の接合のまとめ.

セラミックスと金属の接合(ロール・ローラー用)			寸法 >300 mm	接合強度 >200 MPa	耐熱性 >500℃	結論
機械的接合	焼嵌め		◎	◎	◎	適切
	ボルト		○	×	×	
助剤	金属助剤	Mo-Mn	×	×	×	不適切
		Au	×	×	×	
		Pt	×	×	×	
		SiC	×	×	×	
	複合助剤		×	×	×	
接着剤	有機接着剤		×	×	×	不適切
	無機接着剤		×	×	○	
拡散反応	ホットプレス		×	×	○	
	HIP		×	×	○	

注) ◎：大変良い，○：平均，×：不適切

オリンが存在するため、接合強度が低下し、最大接合強度は 500 MPa である。

(6) 拡散反応接合：この方法は、接合体を高温で圧力を付加することにより、両者の間に元素拡散を起こされるものであり、広く溶接の分野にて展開されてきた。現在この方法として、ホットプレスによると熱間静水圧プレス (Hot Isostatic Pressing, HIP) による方法がある。ホットプレス法は原理的に母材と同一の接合強度を有し、高温雰囲気における接合部の強さもまた母材と同じ程度である。このような利点が多い反面、大きい寸法の構造物について高温でのホットプレスのため作業性や生産性が著しく悪く、接合強度も低下する。また、設備費が高く、コスト高の欠点がある。

接着法と焼嵌め法との接合強度の比較^{18) 58) ~60)}

表 4 は大型セラミック構造物であるロールにおいて、寸法、接合強度、耐熱性の面からセラミッ

クスと金属の接合方法を検討した結果である。以下のようにまとめられる^{18) 59) 60)}。

- (1) 機械的方法について、ボルト締結は応力集中を伴う欠点があるので、ロール・ローラの接合には不適切である。
- (2) 有機、無機接着剤は接合強度が低いので、ロール・ローラの接合には不適切である。
- (3) 助剤接合は一般に接合強度が低い。また、高い場合でも大型になると強度が低くなるので、ロール・ローラの接合には不適切である。
- (4) 拡散反応接合法について、高い接合強度が得られるが、1500 K 以上で操作するため、大きな熱残留応力が生じ、大きい寸法では実質強度が大幅に低下する。よってロール・ローラの接合には不適切である。

図 5 に、接着接合、金属接合、焼嵌め接合の 3 種類の接合構造の例を示す^{18) 58) ~60)}。接着接合と金属の接合として、セラミックスリブとスチールシャフトを考えると、接着するための層間材を考慮する必要がある。接着の中間層材質はエポキシ、金属の中間材は BA03/WC とする。焼嵌めは

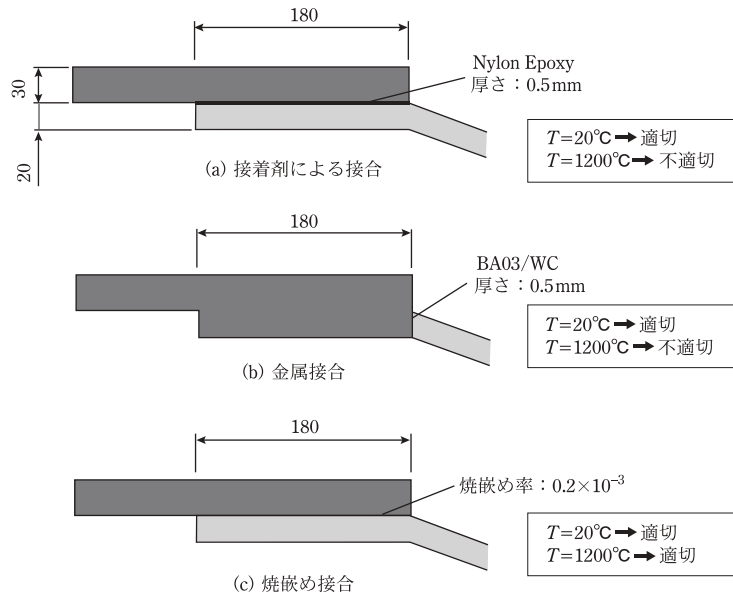


図5 セラミックロールにおける
3種類の接合法の検討。

セラミックスリブとスチールシャフトを焼嵌め率(焼嵌め率) $\delta/d = 2.0 \times 10^{-3}$ で結合するものとする。また、セラミックローラには、1200℃の高温環境下の加熱炉で使用される場合もあることから、室温(20℃)と高温(1200℃)の2つの温度条件で、3種類の接合法の適用可否について検討を行った。その結果、室温では3つのモデル(図5(a), (b), (c))は、いずれも安全であることが確認された。一方、高温下では、焼嵌め接合(図5(c))のみ安全であることが確認された。

このように焼嵌めは、円筒状セラミックの接合法として最適であり、メンテナンスコストやシャフトの交換時間の短縮にもつながる可能性があることが示唆される¹¹⁾¹²⁾⁶¹⁾。ただし、セラミックスは脆いため、これらの構造には低い焼嵌め率しか適用できないことに注意が必要である。一方、特に高温下で使用される細長いローラ構造の場合、両端を固定すると、軸方向の大きな熱変形が許容されず、容易に破損する可能性がある。シャフトの軸方向の動きは、ローラのベアリングの自由端によって拘束できないため、抜けが問題になる可能性がある。実際に、小型試作ローラでは軸の抜け現象が観察されている¹²⁾。たとえ軸の動きを狭

い許容範囲内に抑えたとしても、軸の抜けにより摩擦発熱、局所的なスラスト荷重、摩耗が発生し、ローラの不確実な作動不良につながる可能性がある¹¹⁾。例えば、Truman-Bookerは、焼嵌めによって接続されたギアハブとシャフト間の微小滑りを調査している⁶²⁾。また、Antoniは、回転熱弾塑性焼嵌め構造の接触分離を解析している⁶³⁾。しかし、焼嵌めされたセラミックスリブからシャフトが抜けることに関する破損研究はほとんど見当たらなかった。そこで今後の解説では、有限要素法を適用してこのような軸抜け出し挙動をシミュレーションした筆者らの研究結果も解説する。

焼嵌め接合によるめっき鋼板用セラミックロールの開発時の状況⁶⁴⁾

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

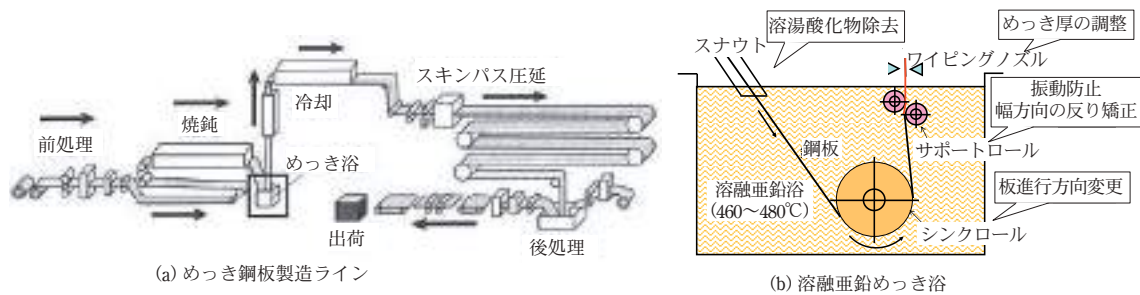


図 6 連続溶融めっき鋼板製造ラインとめっき用オールセラミックロール(サポートロールとシンクロール)。

表 5 産学連携による技術開発のためのプロジェクトチームと役割分担 (平成 19 年度経済産業局地域新生コンソーシアム)⁶⁴⁾。

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

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 6 (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²⁸⁾。

本解説では、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産学連携研究の要点を紹介する⁶⁴⁾。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のりは決して平坦ではなかった。例えば、

表 6 外部資金採択状況⁶⁴⁾。

	外部資金
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)

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。

表 5 に、平成 19 年度に採択された地域申請コンソーシアムにおけるプロジェクトチームと役割分担を示す。また、表 6 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とその解決策⁶⁴⁾

表 7 に、産学連携を始める前に、日立金属㈱(現 ㈱プロテリアル)から九州工業大学が相談を受け

た際の、内容をまとめたものを示す。また、図7に従来の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削削・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。

過去14年の開発経験に基づき、高度な課題解決に挑戦したオールセラミックロールの開発のポイントは、以下のようにまとめられる。

- (1) 日立金属㈱で開発され、特許を有する高靱性・高熱伝導窒化ケイ素を使用すること。従来品の

2倍以上の高い熱伝導性を有するセラミックスの使用により、ロールを溶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、高温のめっき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ス接合技術に関して、14年の研究実績をベースに高度な接合技術を開発し、焼詰め接合法に関する特許を取得した。
 - (4) 大型セラミックスの超精密加工技術を習得した。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5μm以内におさえたことにある。
- 従来製品の問題点①、②の対策として、ロール

表7 日立金属㈱から九州工業大学が受けた産学連携の相談内容(平成14年以前の外部資金申請前)⁶⁴⁾。

	相談内容
①	既存のステンレスロールでは、めっき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。

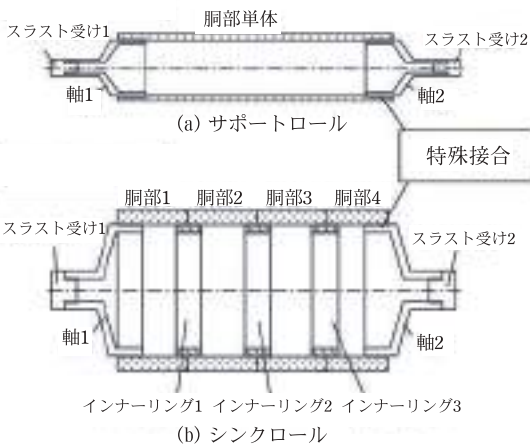


図8 めっき浴用オールセラミックロール構造の概略図。

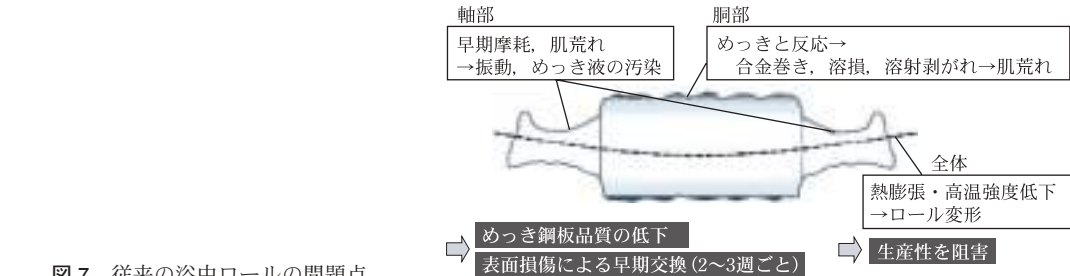


図7 従来の浴中ロールの問題点。

表 8 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⁶⁴⁾.

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およ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
Suryadi Dedi	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	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スリーブ式焼嵌めローラの軸受け抜け出しメカニズムの解明	①2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 ③3次元モデルによる軸抜け出し駆動力の同定

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る。まず、サポートロールに対して図 8 (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、シンクロロールに対して図 8 (b) に示す構造を提案した。シンクロロールは、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。

産学連携による事業化への取り組み⁶⁴⁾

このように、開発当時の研究グループ(平成 19 年度経済産業局地域新生コンソーシアム：日立金属㈱、九州工業大学、㈱日立金属若松、産総研、日新製鋼㈱)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、シンクロロールのオールセラミックス化を実現した。特に、セラミックスロールの利用範囲を拡大するため、浴中ロールの熔融金属への浸漬時の熱応

図 9 オールセラミックシンクロロールの完成品⁶⁴⁾.

力¹⁾³⁵⁾⁶⁵⁾や機械的応力³⁴⁾⁶⁶⁾、強度設計と解体¹⁸⁾、低焼嵌め率に起因する軸抜け出し現象⁵⁸⁾⁶⁷⁾を博士論文としてまとめた。表 8 にセラミックスロール開発に関連する博士論文の題目と具体的研究内容をまとめて示す。これらの博士論文の内容は「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」により得られた主要な成果である。このような取り組みとその成果に関して、日本塑性加工学会教育賞が贈賞された⁶⁸⁾。

図 9 に、オールセラミックシンクロロールの完成品を示す。このシンクロ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、2010 年に、素形材産業技術賞素形材セン

ター会長賞を、2020年には、日本設計工学会論文賞を受賞した。次の解説では、セラミック製ロールの具体的な研究事例として、最初に取り組んだ「連続溶融金属めっき用セラミック製サポートロールを溶融金属に浸漬させる際の熱応力」の研究をまず解説する。

参考文献

- 1) 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，博士学位論文，九州工業大学，(2019)。
- 2) K. Hori: 70th Grand Lecture Meeting of the Iron and Steel Institute of Japan: Tokyo, Japan, (1965), 200.
- 3) 下田秀夫，小野寺真作，堀清，土肥修：焼嵌めした圧延用大型補強ロールの残留曲りに関する研究 (第1報，曲り発生の機構)，日本機械学会論文集，**32** 233 (1966), 1.
- 4) 下田秀夫，小野寺真作，堀清，土肥修：焼嵌めした圧延用大型補強ロールの残留曲りに関する研究 (第3報，曲りにおよぼす焼嵌め面条件および端部溶接などの影響)，日本機械学会論文集，**32** 235 (1966), 440.
- 5) 下田秀夫，小野寺真作，堀清，土肥修：焼嵌めした圧延用大型補強ロールの残留曲りに関する研究 (第4報，スリーブロールの残留応力)，日本機械学会論文集，**32** 237 (1966), 689. <https://doi.org/10.1299/kikai1938.32.689>
- 6) 下田秀夫，小野寺真作，堀清：焼嵌めした圧延用大型補強ロールの残留曲りに関する研究 (第5報，曲り発生機構の解析ならびに実機ロールの曲り対策の効果)，日本機械学会論文集，**33** 245 (1967), 11.
- 7) M. Kawai, K. Kitsuki, Y. Nozaki, H. Takeuchi and K. Miura: 66th Grand Lecture Meeting of the Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, Japan, **1** (1963), 1613.
- 8) 堤三郎，原千里，吉井省三：組立式補強ロールの残留曲がりについて，鉄と鋼，**5** (1971), 818. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.57.5_818
- 9) N.A. Noda, Y. Sano, X. Wang, Y. Nakagawa, W. H. Guan, K. Ono and K. Hu: J. Automot. Eng., **46** (2015), 831.
- 10) Z. Zhua and D. Sunb: Appl. Mech. Mater., **1** (2012), 139.
- 11) N.A. Noda, D. Suryadi, S. Kumasaki, Y. Sano and Y. Takase: Failure analysis for coming out of shaft from shrink-fitted ceramics sleeve, Eng. Fail. Anal., **57** 19 (2015), 219.
- 12) N.A. Noda, Y. Xu, D. Suryadi, Y. Sano and Y. Takase: Coming out mechanism of steel shaft from ceramic sleeve, J. ISIJ Int., **56** (2016), 303.
- 13) 野田尚昭，佐野義一，高瀬康，下田祐太郎，張国偉：焼嵌めで構成された圧延用補強ロールに生じる残留曲がり生成メカニズムの解明，塑性と加工，**58** 672 (2017), 66.
- 14) N.A. Noda, H. Sakai, Y. Sano, Y. Takase and Y. Shimoda: Quasi-equilibrium stress zone with residual displacement causing permanent slippage in shrink-fitted sleeve rolls, Metals, **8** 12 (2018), 998. <https://doi.org/10.3390/met8120998>
- 15) 松永榮八郎，佐野義一，西田新一：複合スリーブロール内層材の疲労特性 (熱間圧延用スリーブロールの強度設計-1)，日本鉄鋼協会講演論文集 (Camp-ISIJ)，**10** (1997), 1078.
- 16) 松永榮八郎，津行武信，佐野義一：スリーブロールの適正焼嵌率の検討 (熱間圧延用スリーブロールの強度設計-2)，日本鉄鋼協会講演論文集 (Camp-ISIJ)，**11** (1998), 362. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10002551803>
- 17) 酒井悠正，野田尚昭，佐野義一，張国偉，高瀬康：スリーブ組立式圧延ロールの焼嵌め面に生じる界面クリープの数値シミュレーション，鉄と鋼，**105** 4 (2019), 411.
- 18) 栗文彬：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，博士学位論文，九州工業大学，(2012)。
- 19) 露成正一，野田尚昭，Hendra，高瀬康：搬送用ローラにおけるセラミックス製スリーブの焼嵌め接合部に生じる最大応力について，日本機械学会論文集 A 編，**74** 743 (2008), 919.
- 20) 原田昭治，野田尚昭，上原修，永野光芳：HIP 焼結窒化ケイ素の引張強度とその寸法効果，日本機械学会論文集，**57** 539 (1991), 1637.
- 21) N.A. Noda, Hendra, Y. Takase and M. Tsuyunaru: Maximum stress for shrink fitting system used for ceramics conveying rollers, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, **2** 11 (2008), 1410.
- 22) Hendra, M. Tsuyunaru, N.A. Noda and Y. Takase: Stress analysis for shrink fitting system used for ceramic conveying rollers, Key Engineering Materials, **385-387** (2008), 513.
- 23) W. Li, N.A. Noda, H. Sakai and Y. Higashi: Thermal stress analysis for shrink fitting system used for ceramics conveying rollers in the process of separation, Key Engineering Materials, **452-453** (2011), 241.
- 24) N.A. Noda, Y. Yamada, Y. Sano, S. Sugiyama and S. Kobayashi: Thermal stress for all-ceramics rolls used in

- molten metal to produce stable high quality galvanized steel sheets, *Engineering Failure Analysis*, **15** 4 (2008), 261.
- 25) N.A. Noda, Hendra, Y. Takase and W. Li: Thermal stress analysis for ceramics stalk in the low pressure die casting machine, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, **3** 10 (2009), 1090.
- 26) N.A. Noda, Hendra, Y. Takase, H. Ogura and Y. Higashi: Thermal stress and heat transfer coefficient for ceramics stalk having protuberance dipping into molten metal, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, **4** 8 (2010), 1198.
- 27) Y. Takase, W. Li, Hendra, H. Ogura, Y. Higashi and N.A. Noda: Three-dimensional surface heat transfer coefficient and thermal stress analysis for ceramics tube dipping into molten metal, *Key Engineering Materials*, **452-453** (2011), 233.
- 28) 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** (2010), 54. <http://hdl.handle.net/10228/00006066>
- 29) N.A. Noda, Y. Sano, Y. Takase, W. Li and H. Sakai: Application of large ceramics structures to steel manufacturing machinery, *International Journal of Engineering Innovation and Management*, **1** (2011), 77.
- 30) わが国における最近のホットストリップ製技術鋼板部会ホットストリップ分科会報告, 日本鉄鋼協会共同研究会鋼板部会ホットストリップ分科会編, いばらき印刷, 茨城, (1987), 255.
- 31) 酒井悠正, 野田尚昭, 佐野義一, 張国偉, 高瀬康: スリーブ組立式圧延ロールの焼嵌め面に生じる界面クリープの数値シミュレーション, *鉄と鋼*, **105** 4 (2019), 66.
- 32) 酒井悠正, 野田尚昭, 佐野義一, 張国偉, 高瀬康: シャフトの弾性変形を考慮したスリーブ組立式複合圧延ロールに生じる界面すべりの数値シミュレーション, *鉄と鋼*, **56** 7 (2021), 343.
- 33) T. Imamura, M. Sobue and S. Hamayoshi: How to produce silicon nitride having high thermal conductivity and circuit board, Japan Patent 2002-293642 (2002).
- 34) D. Suryadi: Strength analysis and coming out of steel shaft for ceramic roller used in the furnace under both thermal and distributed loads, 博士学位論文, 九州工業大学, (2015).
- 35) Hendra: Study on how to reduce thermal and mechanical stresses for cylindrical large ceramics structure, 博士学位論文, 九州工業大学, (2010).
- 36) S. Jahanmir: Friction and wear of ceramics, Marcel Dekker, New York, (1994), 3.
- 37) 神崎修三: 見えないところで大活躍するファインセラミックス, ナノテク講演会シリーズ第5弾, (2008).
- 38) 彦坂正道, 瀬戸恒夫: 伸びきり鎖の結晶成長 (高分子のダイナミクスー基礎から応用へ (特集)), 分子学会 (編), **34** 6 (1985), 440.
- 39) E. V. Zaretsky: Ceramic bearings for use in gas turbine engines, ASME Paper, No.88-GT-138, American Society of Mechanical Engineers, New York, (1988).
- 40) R. N. Katz and J. G. Hannoosh: Ceramics for high performance rolling element bearing: A review and assessment, *Int. J. High Technol. Ceram.*, **1** (1985), 69.
- 41) J. F. Dill: Rolling element bearing technology: Sizing up the Japanese, *Mech. Eng.* (1987), 37.
- 42) S. Jahanmir: Ceramic bearing technology, NIST Special Publication No.824, U.S. Department of commerce, National Institute of Standards and Technology, Washington, DC: Government Printing Office, (1991).
- 43) S. Jahanmir: Tribological application for advanced ceramics, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **140** (1992), 285.
- 44) D. V. Miller and R. J. Echlin: Advances in tunnel furnace rolls, *Steel Technology*, (2003), 71.
- 45) 三好泰克: 工業レアメタル, **73** (1982), 1.
- 46) F. Bonollo, J. R. Urban, B. Bonatto and M. Botter: Gravity and low pressure die casting of aluminum alloys: a technical and economical benchmark, *Alluminio E Leghe*, **6** (2005), 23.
- 47) M. J. Ryan, et al.: Prestressed sialon aluminum-casting riser tubes. *JACS*, **49** (2013), 44.
- 48) 小川衛介, 他: 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, *日立金属技報*, **28** (2012), 50.
- 49) N.A. Noda, Y. Sano, Y. Takase, W. Li and H. Sakai: Application of large ceramics structures to steel manufacturing machinery, *International Journal of Engineering Innovation and Management*, **1** (2011), 77.
- 50) 松田慎太郎, デディ スルヤディ, 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 原田正大: 加熱炉中セラミックローラーの構造設計に関する研究, *日本機械学会論文集 A 編*, **79** 803 (2013), 989.
- 51) W. Li, N.A. Noda, H. Sakai and Y. Takase: Thermal stress analysis for shrink fitting system used for ceramics conveying rollers in the process of separation, *Key Engineering Materials*, **452-453**, (2011), 241.

- 52) 日立金属㈱：鉄鋼用セラミックス，日立金属技報，**22** (2006)，19.
 - 53) 岩本信也，宗宮重行編：金属とセラミックスの接合－日本における接合研究の現状，内田老鷄圃，(1990)．
 - 54) 岩本信也，須賀唯知編：セラミックス接合工学，日刊工業新聞社，(1990)．
 - 55) 日本学術振興会将来加工技術第136委員会編：ファインセラミックス技術ハンドブック，内田老鷄圃，(1998)．
 - 56) 杉田忠彰編：セラミックスの機械加工，養賢堂，(1985)．
 - 57) 木下実：ファインセラミックスの接合技術，Journal of the Japan Society of Precision Engineering，**54** 7 (1988)，1231.
 - 58) 張国偉：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ブ式焼嵌めローラの軸抜け出しメカニズムの解明，博士学位論文，九州工業大学，(2019)．
 - 59) デディ スルヤディ：セラミックスと鋼の接合方法の検討と製鉄機械用ローラの応用について，明専会報，(一社)明専会，(2014)．
 - 60) D. Suryadi, N.A. Noda, Y. Sano and Y. Takase: Ceramics/Steel joint selection for the ceramics roller used at high temperature, Proceedings of the 4th asian conference on engineering education, (2014).
 - 61) N.A. Noda, D. Suryadi, et al.: Proposal for new hearth roller consisting of ceramic sleeve and steel shafts used in the heat treat furnace, ISIJ Int., **55** 11 (2015), 2416.
 - 62) C. E. Truman and J. D. Booker: Analysis of a shrink-fit failure on a gear hub/shaft assembly, Engineering Failure Analysis, **14** (2007), 557.
 - 63) N. Antoni: Contact separation and failure analysis of a rotating thermo-elastoplastic shrink-fit assembly, Applied Mathematical Modelling, **37** (2003), 2352.
 - 64) 西田新一，田中洋征，野田尚昭：産学連携によるものづくりイノベーション事例から学ぶ成功のカギー，アグネ技術センター，(2023)，177.
 - 65) 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熔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.
 - 66) 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の強度解析，機械の研究，**65** 8 (2013)，650.
 - 67) 野田尚昭，張国偉，佐野義一，酒井悠正：焼嵌め式ローラ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.
 - 68) 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.
- のだ・なおき 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，教授。焼嵌め式ローラ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。日本機学会材料力学部門賞業績賞/貢献賞，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。2022.04 九州工業大学名誉教授。
- さの・よしかず SANO Yoshikazu
1967 九州大学大学院機械修了。日立金属㈱入社。1992 技師長。1996 九州大学より博士 (工学) 授与。学術研究員，九州工業大学支援研究員を経て㈱ホーシン技術顧問。焼嵌め式ロールの構造設計に関する研究に従事。(公社)日本設計工学会 2019 年度論文賞受賞。
- たかせ・やすし TAKASE Yasushi
1985 九州工業大学技術職員。1993 同工学部設計生産工学科夜間主コース卒業。2002 技術専門職員。2007 「任意寸法の試験片に対して正確な応力集中係数を与える計算式に関する研究」で博士 (工学)。2020 年度日本塑性加工学会教育賞受賞。
- ほった・げんじ HOTTA Genji
1979 九州工業大学卒業。㈱日鉄エレクトックスを経て2008 有明工業高等専門学校機械工学科教授。2012 熊本大学より博士 (工学) 授与。2019 より九州工業大学客員教授，2021 西日本工業大学客員教授。日本技術士会ものづくり部会長。2021 年度技術士功労章受章。