

セラミック製サポートロールを
熔融亜鉛に浸漬する際の熱応力

野田 尚昭・佐野 義一・高瀬 康・堀田 源治

はじめに

本解説では、2000年頃、日立金属(株)(現 株)プロテリアル)から相談を受けて行った、オールセラミック製サポートロール(図1(b))を熔融金属中に浸漬する際に生じる熱応力を把握するとともに、引張応力を低減する目的で行われた研究を紹介する¹⁾²⁾。図1に、(a)連続溶融めっき鋼板製造ラインと(b)溶融亜鉛めっき浴中の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)を示す。図1(a)はCGL(Continuous Galvanizing Line)と呼ばれ、鋼板の表面に亜鉛の被膜を作ることで、鋼板の耐食性を高めることを目的とした製造ラインである。CGLを通じて作られた亜鉛めっき鋼板は、建材や自動車、電気製品など幅広い用途に使用されている。また、CGLは品質向上、品種拡大、生産量拡大などの機能を持ち、高品質の自動車用亜鉛めっき鋼板の製造が可能

である。

自動車に使用される亜鉛めっき鋼板は、強度、耐食性が向上し、自動車の軽量化や耐久寿命の向上に大きな役割をはたしている³⁾⁴⁾。開発当時は表面処理鋼板の需要の増加に伴い、亜鉛めっき設備の増設が相次いでなされ、品質向上に対する要求も厳しくなっていた³⁾。そこで、めっき厚さの均一化を図るため、めっき厚み制御部での鋼板の変形と振動を減少させる技術の開発³⁾⁵⁾⁶⁾、ならびにめっき後の鋼板をスキンパス圧延によって、所定の機械的性質を確保する³⁾などの工夫が行われていた。また、溶融亜鉛めっき浴の浴中ロールの軸受部の損耗を減少させるため(図1参照)、軸受用セラミックスがすでに開発されており、サポートロールの開発が検討されていた³⁾。その後、シンクロールの開発も実現した。

図1(b)に溶融亜鉛めっき浴の機能を示す。冷延コイルから送りだされた鋼板は、焼鈍炉において機械的性質の調整および表面を洗浄化され、大気

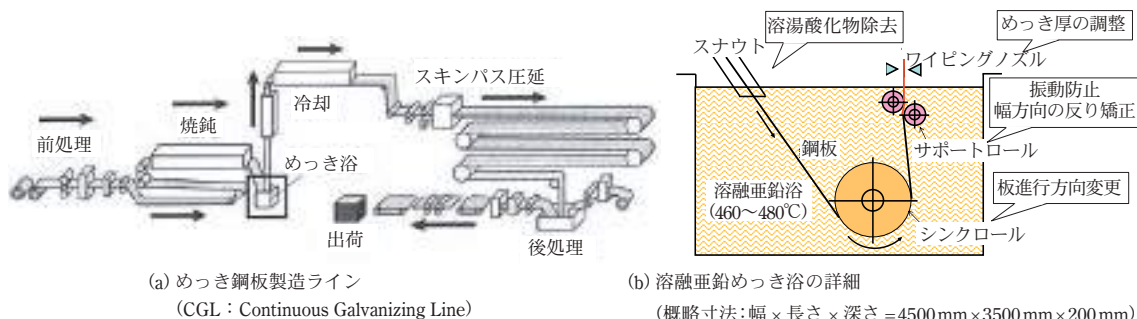


図1 連続溶融めっき鋼板製造ラインとめっき浴中のオールセラミックロールの説明図。

にふれることなく、スナウトを介し 460~480℃の溶融亜鉛に導かれる。図 1 (b) 中のシンクロールは、溶融亜鉛金属浴中の底部に配置され、浴中に送られてきた鋼板の進行方向を上方の浴面側に変えるものである。通常シンクロールは、鋼板の走行移動によって駆動トルクが付与される。一方、サポートロールは、一對のロールからなり、シンクロールを通過した後の浴面に近い位置に設けられ、外部のモーターによりスピンドルを介して駆動されるものが多い。これらは鋼板を挟み込み、鋼板のパスラインを保ち、シンクロールを通過した際に生じる鋼板の反りを矯正する。その後垂直方向に引き上げられた鋼板は、浴表面近傍に配置されたワイピングノズルによって所定のめっき付着量に仕上げられ、合金化炉や冷却塔等を経て所定の化成処理(塗装の接着性を良くするための、めっき表面を化学的に反応させて、その凹凸や、生成物に期待する下地の処理)が行われる。

シンクロール(胴径 500~800 mm, 胴長 1300~2200 mm) およびサポートロール(胴径 200~350 mm, 胴長 1300~2200 mm) の材料としてステンレス鋼を主とする鉄鋼材料が用いられている。このため、溶融金属中で摺動軸部の摩耗、鋼板接触部の肌荒れが短時間に発生し、めっきの品質を劣化させている。従ってラインを止めて、ロールの交換や整備をする必要があり、メンテナンスに多くの時間を要し、めっき工程の連続化を阻害する要因になっている。また、めっき製品の品質にも少なからぬ影響を与え、製造ラインの連続化において課題を残している。

本解説の対象は、このようなステンレス鋼製ロールを、耐食性、耐熱性、耐摩耗性に優れるセラミックスに置換える方法⁷⁾に関するものである(図 2 参照)。その開発に際し問題となる、溶融亜鉛浸漬時に生じる熱応力を有限要素法(FEM)で解析し、熱応力を緩和できる浸漬方法や、材料として高热伝導窒化ケイ素を用いることの効果等を考察した研究を紹介する。なお、浸漬時の温度勾配によって、従来の鉄鋼材料からなるロールにも同様に熱応力が発生する。しかし、セラミックスロールでは破

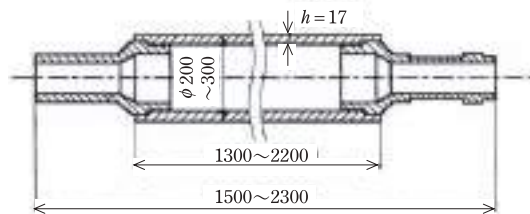


図2 オールセラミック製サポートロール。

壊じん性が金属材料に対して極めて小さいので、構造物中の小さな欠陥からも破壊が生じる。よって、熱応力解析が重要となる。

共同研究開始当時に実施された対策と課題

従来の連続溶融金属めっき用ロールには、金属材料の中で耐食性に優れるステンレス鋼やクロム系耐熱鋼等の鉄鋼材料が用いられている。しかしながら、このロールは長時間、溶融金属浴中に浸漬されると、表面が侵食されて摩耗しやすい。そこで、さらに耐食性、耐摩耗性を向上させるため、鉄鋼材料からなるロール表面に、耐食性 CO 基合金を肉盛り溶接したり、WC CO 系超硬合金や Al_2O_3 等のセラミックスを溶射する試みもなされた⁸⁾。しかし、母材と溶射被膜との熱膨張率の差により薄い被膜にき裂が生じ、そこからの侵食による摩耗を避けられなかった。摩耗が著しくなると、ロールの真円度、円筒度を維持できなくなり、ロールや鋼板に振動が起り、均一なめっき特性の鋼板が得られなくなる。このため、現状としては 1~2 週間の連続使用の後に、一旦めっき作業を中止して摩耗したロールを交換する必要がある。これは生産性を著しく低下させ、ロール交換費用がかさむことにより製品のコスト高を招く問題がある。そこで、別の対策として、鋼板が接触するロール胴部を耐食性、耐熱性、耐摩耗性に優れるセラミックスにより構成した連続溶融金属めっき用サポートロールも提案されている⁹⁾(図 3 参照)。このロールでは、軸に耐熱鋼(SUH309)を用い、胴部のサイアロン製のセラミックススリー

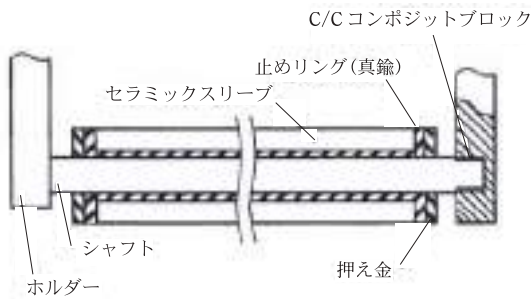


図3 耐熱鋼シャフトを使用したセラミックスリーブ。

ブを保持するため、黄銅製の止めリングを挿入後、軸の両端から耐熱鋼製の押さえリングを使用して、しかしながら、耐熱鋼製の中軸を有するのでセラミックスより熱膨張が大きく張り割れのリスクが高い。また、ロール重量が重く、走行する鋼板に追従して回転し難いなどの問題がある。さらに、耐熱鋼（ロール軸と押えリング）と黄銅（止めリング）の使用のため熔融金属浴に対する耐食性、耐摩耗性はいまだ十分でない。これら従来の対策と経験から、ロール全体をセラミックスで構成することが望ましいことが明らかとなってきた。

図2に本研究で考察するセラミックス製サポートロールの形状・寸法を示す。このような大型のセラミックス単体からなり、しかも過酷な条件で用いられる構造物は開発当時に見当たらなかった。ロール胴部とロール軸部を中空状に形成しているので、自重が軽いため回転しやすく、起動および鋼板の走行速度の変化に良好に追従する。このようなサポートロールではめっき浴中の高温における腐食、摩耗、肌荒れがなくなり、ロールの寿命を少なくとも10倍以上長くできるので、製造ラインの効率と製品品質の課題を解決できる⁷⁾。このことにより連続化したラインの効率を上げ長期に安定した品質のめっき鋼板ができ、コスト削減を図ることができる。

セラミック製サポートロールは一旦熔融金属中に設置した後は安定した優れた性能を発揮するけれども、熔融金属中に浸漬する際に熱応力が発生しロール破損が生じるリスクがある。そこで、本稿ではこの問題点を解説する。具体的には熔融亜

鉛中にセラミック製サポートロールを浸漬する際の熱伝達係数を有限体積法によって算出し、その結果を有限要素法による熱応力解析に応用する。そして、熱応力が時間とともにどのように変化するかを特に熱応力の最大値や、危険となる応力の種類に注目して考察するとともに、熱応力を緩和できるような浸漬方法を紹介する。また、熱伝導率が極めて高い高熱伝導窒化ケイ素¹⁰⁾を用いることの効果も説明する。

熔融亜鉛からセラミックロール表面への熱伝達係数について

図1(b)のように熔融亜鉛中にロールを設置する際の熱応力をFEMで解析するには、熔融亜鉛とロール表面間の熱伝達係数 α を知る必要がある。ここで熱伝達係数 α とは物質間での熱エネルギーの伝えやすさを表す値で、単位面積、単位時間、単位温度差あたりの伝熱量である（すなわち単位温度差あたりの熱流速密度で、その単位は $W/(m^2K)$ ）。実際に図2のセラミックロールを浸漬する際には両端の開口部より熔融亜鉛はロール内部にも侵入し、その流れは極めて複雑である。ここでは、現象を単純化した場合、すなわちロール接合部の形状を無視し、ロール形状を中実円筒として、その熔融亜鉛への浸漬速度を変えたときの熱伝達係数を解説する。

このような円柱周りの流れでは、流速 u の定常流れの中におかれた2次元円柱に関して、Zukauskas¹¹⁾¹²⁾が以下の式を平均ヌセルト数 N_{um} として与えている。ここでヌセルト数 N_u とは熱伝達係数 α の無次元数($N_{um} = \alpha_m D / \lambda$)である。式(1)は、よどみ点近傍の層流から乱流を経てはく離に至る、円柱周りの流れによって、流体から円柱に与えられる伝熱量を、円周で平均した平均熱伝達率 α_m として与えるものである。

$$N_{um} = \frac{\alpha_m D}{\lambda} = C_1 R_e^n P_r^{0.37} \left(\frac{P_r}{P_{rw}} \right)^{0.25} \quad (1)$$

ここで α_m は平均熱伝達係数、 λ は熱伝導率、 D はロール胴径、 C_1 、 n はレイノルズ数 R_e により異なる。

る定数である¹¹⁾¹²⁾。 R_e はレイノルズ数 (流れの乱れやすさを示す数値), P_r はプラントル数 (速度境界層と温度境界層の厚みの比を表す熱伝導に関する無次元数で, 流れに依存しない) であり, 式 (2) で定義される。添字 w は円柱壁温における物性値を用いることを意味する。

$$R_e = \frac{uD}{\nu}, \quad P_r = \frac{C_P \cdot \eta}{\lambda} \quad (2)$$

ここで流速 u はロール胴径を浸漬に要する時間 t で除した値を用いる。熔融亜鉛にロールを浸漬する際の速度としては作業性を考慮して $u = 2 \sim 25 \text{ mm/s}$ 程度が考えられる。つまり $u < 2 \text{ mm/s}$ では作業能率が極端に悪く, $u > 25 \text{ mm/s}$ では危険であるため使用できない。また, ν は動粘性係数, C_P は定圧比熱, η は粘性係数であり, ν, C_P, η, λ の値は文献¹¹⁾ より与えられる。これらを式 (1), (2) に代入すれば, N_{um} が得られ, これより円柱形状における α_m を知ることができる。表 1 に ν, C_P, η, λ の文献¹³⁾ より得た数値を示す。

式 (1) に従って α_m を求めると以下ようになる。

$$\alpha_m = 1.0 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{流速 } u = 2 \text{ mm/s のとき}) \quad (3)$$

$$\alpha_m = 4.6 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{流速 } u = 25 \text{ mm/s のとき}) \quad (4)$$

次に, ロールを比較的速い速度で浸漬する際の熱伝達係数をより正確に求めるため, 有限体積法を用いて解析し, その結果を式 (4) と比較する。ここで有限体積法は, 流体解析に使用される一般的な離散化の数値解析手法であり, 構造解析で用いる有限要素法が構造全体を分割した各要素の剛性から, まず変位・応力・ひずみを求めるのに対して, 有限体積法の場合は, 要素ごとに運動量保存

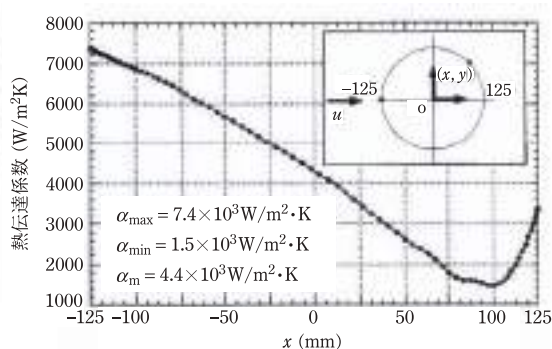


図 4 有限体積法による解析で求めた熱伝達係数の x の関数としての表示 ($u = 25 \text{ mm/s}$)。

則を解くものである。ここでは, ロールを固定し, 浸漬速度を流入速度とした定常, 2次元の熱流動計算を行った (メッシュはヘキサメッシュを用い, 乱流モデルは RNG κ - ε モデル, 移流項は 1 次 Up-Wind, 速度-圧力の連成は SIMPLE 法を使用した)。その結果を図 4 に示す。図 4 で対象とした流体速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ は, 10 秒間でロール全体を浸漬する浸漬速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ に対応する。図 4 で, x は円柱中心を原点とする鉛直上向き座標である。この場合 α の値は図 4 の $x = -125 \text{ mm}$ で最大値 $\alpha = 7.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ となり $x = 100 \text{ mm}$ 付近で最小値 $\alpha = 1.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ となる。このような α の変化は, よどみ点近傍の層流から乱流を経てはく離に至る, 円柱周りの流れに対応している。その平均値は $\alpha_m = 4.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ であり, Zukauskas¹¹⁾¹²⁾ の値 (式 (4)) と大体においてよく一致している。以上のような検討で得られた熱伝達係数の値 (式 (3) ならびに図 4 の結果) を以下の FEM による熱応力解析に用いた。

中実円柱を熔融亜鉛に浸漬する際の熱応力(遅い浸漬が望ましいこと)

開発に際して, まず実際にロールの試作がなされたサイアロン⁵⁾に加えて, 熱負荷に対して優れた性能を有すると考えられる高熱伝導窒化ケイ素¹⁰⁾の使用が検討された。よって熱応力解析では高熱伝導窒化ケイ素でロールを作製した場合の有

表 1 693 K (420°C) における熔融亜鉛の物性¹³⁾。

熱伝導率 $\lambda (\text{W/m} \cdot \text{K})$	58.8
ロール直径 $D (\text{m})$	0.250
$R_e = 1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$ のときの式 (1) の定数 C_1	0.26
$R_e = 1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$ のときの式 (1) の定数 n	0.6
動粘度 $\nu (\text{mm}^2/\text{s})$	0.489
比熱 $C_P (\text{kJ/kg} \cdot \text{K})$	0.505
粘度 $\eta (\text{mPa} \cdot \text{s})$	3.26

表2 セラミックスの機械的性質.

物性	サイアロン	高熱伝導 窒化ケイ素
熱伝導率 (W/m・K)	17	65
比熱 (J/kg・K)	650	680
線膨張係数 (1/K)	3.0×10^{-6}	3.0×10^{-6}
弾性係数 (GPa (kgf/mm ²))	294 (29979)	300 (30591)
比重	3.26	3.20
ポアソン比	0.27	0.30
4点曲げ強度 (MPa (kgf/mm ²))	1050 (10296)	880 (8630)
破壊靱性 (MN/m ^{3/2})	7.5	7.7

用性を、サイアロンで作成した場合と比較して考察した。表2にサイアロンと高熱伝導窒化ケイ素の材料特性を示す。表2に示すように、両者の機械的性質はよく似ているが熱伝導率は大きく異なり、高熱伝導窒化ケイ素はサイアロンの3.8倍である。熱応力解析は8節点三次元立方体要素を用いて、有限要素法(FEM)で行う。なお、熔融亜鉛金属浴中の温度は480℃、ロールの初期温度は20℃とした。

図2に示すセラミック製サポートロールを熔融亜鉛中に浸漬する際には、中空部にも熔融亜鉛が侵入するので、中空円筒内壁においても熱伝達係数 α を知ることが熱応力解析に必要となる。しかし、そのような3次元熱伝達係数解析は膨大な計算を必要とするので、開発当時は極めて困難であった。また従来用いられているステンレス製サポートロールは、中実の円柱形状であるので、形状が中実か中空かで浸漬する際の熱応力発生状況

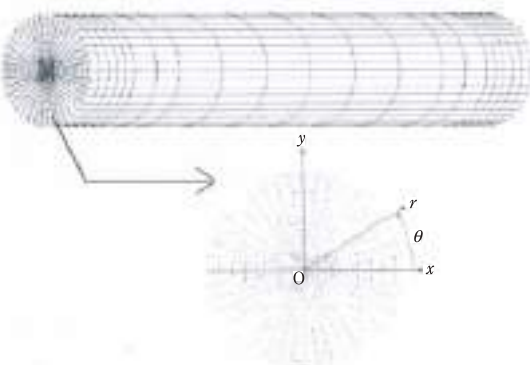


図5 中実円柱の有限要素法メッシュ(要素数13200, 節点数14301).

の変化をあきらかにすることも重要と考えられる、そこで、まずステンレス製サポートロールのような従前の中実円柱を解析し、中空円筒と比較して考察した。

図5に中実円柱のFEMメッシュを示す。要素数13200, 節点数14301である。図5に示す有限長さの中実円柱としてロールをモデル化し、速度 $u = 2 \text{ mm/s}$ (遅い場合)と $u = 25 \text{ mm/s}$ (速い場合)で浸漬する場合の熱応力解析を行った、ロール端部および円周方向で温度勾配が生じる影響で、応力およびひずみに大きな勾配が生じるので、隣接する節点間においての応力、ひずみの値の変化が小さくなるように(最大でも20%程度)要素の大きさに配慮した。

表3に中実円柱と中空円筒に与える熱伝達係数

表3 中実円柱と中空円筒に与える熱伝達係数.

モデル	 (a) 中実円柱	 (b) 中空円筒
$u=2\text{mm/s}$	$z=\pm 0.750 \text{ (m)}$ $r=0.125 \text{ (m)}$ $\alpha=1.0 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ STEP8 STEP5 STEP1 $\alpha=1.0 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ given	$z=\pm 0.750 \text{ (m)}$ $r=0.125 \text{ (m)}$ $\alpha=1.0 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ STEP8 STEP5 STEP2 $\alpha=1.0 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ given
$u=25\text{mm/s}$	(1) $t=0 \sim 30 \text{ sec}$ $z=\pm 0.750 \text{ (m)}$ $\alpha=1.5 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ $r=0.125 \text{ (m)}$ $\alpha=1.5 \times 10^3 \sim 7.0 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ (図3参照) $\alpha=1.5 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ $\alpha=1.5 \times 10^3 \sim 7.0 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ (図3参照) (2) $t=30 \sim 120 \text{ sec}$ $z=\pm 0.750 \text{ (m)}$ $r=0.125 \text{ (m)}$ $\alpha=1.5 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ $\alpha=1.5 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$	(1) $t=0 \sim 30 \text{ sec}$ $z=\pm 0.750 \text{ (m)}$ $\alpha=1.5 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ $r=0.125 \text{ (m)}$ $\alpha=1.5 \times 10^3 \sim 7.0 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ (図3参照) $r=0.108 \text{ (m)}$ $\alpha=1.5 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ $\alpha=1.5 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ (2) $t=30 \sim 120 \text{ sec}$ $z=\pm 0.750 \text{ (m)}$ $r=0.125 \text{ (m)}$ $r=0.108 \text{ (m)}$ $\alpha=1.5 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ $\alpha=1.5 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$

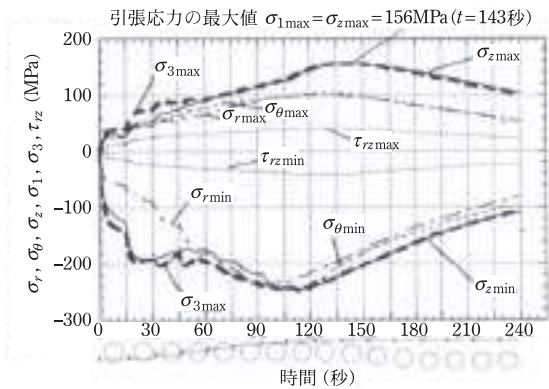


図6 窒化ケイ素製中実円柱を熔融亜鉛に浸漬する際にロールに生じる各応力成分の最大応力 σ_r , σ_θ , σ_z , σ_1 , σ_3 , τ_{rz} の時間変化 (浸漬速度 $u = 2 \text{ mm/s}$ のとき, $t = 143$ 秒で引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 156 \text{ MPa}$).

α をまとめて示す. 表3に示すように遅く浸漬する場合 ($u = 2 \text{ mm/s}$) には, 2次元円柱モデルに対して提案された Zukauskas の式より求めた式 (3) を $r = 125 \text{ mm}$ と $z = \pm 750 \text{ mm}$ の全表面に用いる. このとき, 円柱を空気中から熔融亜鉛中へと浸漬するまで120秒要するのでその間を8段階に分けてモデル化する. すなわち円柱が部分的に熔融亜鉛に浸された状態を考えて, その浸された部分にのみ $\alpha = 1.0 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ を与える. その結果を図6に示す.

一方, 速く浸漬する場合 ($u = 25 \text{ mm/s}$) では熔融亜鉛浴のサポートロールを設置する所定の位置に達するまで約16秒を要し, その後ロールは静止するが熔融亜鉛にある程度の動きがある. よって, (1) $t = 0 \sim 30$ 秒では $r = 125 \text{ mm}$ で図4の結果, すなわち, $\alpha = (7.4 \sim 1.5) \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ を用いた. また, $z = \pm 750 \text{ mm}$ では最小値 $\alpha = 1.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ と仮定した. 同様に, (2) $t = 30$ 秒以降では表面全体で $\alpha = 1.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ と仮定した. なお全体が熔融亜鉛中に完全に浸漬するまで実際は10秒要するが, 解析では最初から全体が熔融亜鉛中にあるとする. その結果を図7に示す.

図6に浸漬速度 $u = 2 \text{ mm/s}$ で窒化ケイ素製中実円柱を熔融亜鉛に浸漬する際にロールに生じる各応力成分の引張応力最大値 $\sigma_{1\max} \cong \sigma_{z\max} > \sigma_{\theta\max} >$

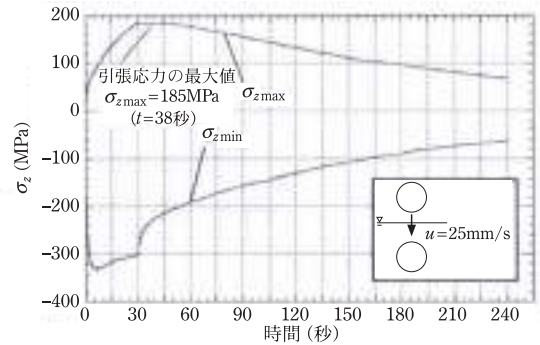


図7 窒化ケイ素製中実円柱を熔融亜鉛に浸漬する際にロールに生じる最大熱応力 σ_z の時間変化 (浸漬速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ のとき, $t = 38$ 秒で引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 185 \text{ MPa} > 156 \text{ MPa}$).

$\sigma_{r\max} > \tau_{rz\max}$ と圧縮応力の最大値 $\sigma_{3\max} \cong \sigma_{z\min} > \sigma_{\theta\min} > \sigma_{r\min} > \tau_{rz\min}$ の時間変化を示す. ここで, せん断応力の最大値 $\tau_{rz\max}$, $\tau_{\theta z\max}$, $\tau_{r\theta\max}$ は $\sigma_{z\max}$ の27%以下程度であるので, その中で最大の $\tau_{rz\max}$ のみ図6に示した. 図6より $\sigma_{z\max}$ の最大値は75秒後に引張応力の最大値 σ_1 に一致する. また, $\sigma_{z\min}$ は114秒後に圧縮応力の最大値 σ_3 に一致する, よって以下では物理的に明確な $\sigma_{z\max}$, $\sigma_{z\min}$ について議論する. ロールを浸漬後, 緩やかに $\sigma_{z\max}$ は上昇し, 143秒で引張応力の最大値 156 MPa となる. 図7に浸漬速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ で窒化ケイ素製中実円柱を早くロールを浸漬する場合の各時間における応力 σ_z の引張応力の最大値 $\sigma_{z\max}$, 圧縮応力の最大値 $\sigma_{z\min}$ の時間変化を示す. この場合も緩やかに $\sigma_{z\max}$ は上昇し, 38秒で最大値 185 MPa となる.

図7と図6の引張応力の最大値 $\sigma_{z\max}$ を比較すると, まず, 図7のロールを速く浸漬する場合, 図6のロールを遅く浸漬する場合に比べて, 初期の $t = 38$ 秒 (< 143 秒) で生じることがわかる. また, その応力は浸漬速度が遅い場合 (156 MPa) に対して, 浸漬速度が速い場合 (185 MPa) の方が大きい. このことから中実円柱の浸漬では, 浸漬速度 $u = 2 \text{ mm/s}$ で120秒間かけて全体をゆっくり浸漬する方が浸漬速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ で10秒間の短時間で浸漬する場合より, 熱応力を緩和できる. 長時間かけてロールを浸漬する場合の方が, 短時

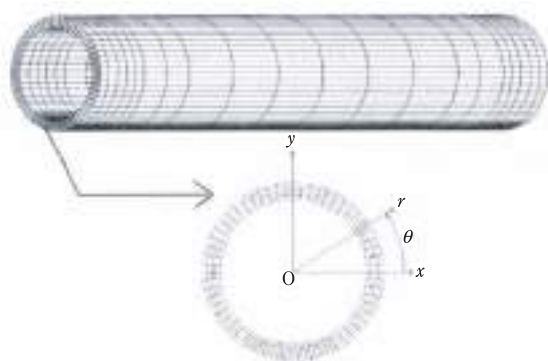


図8 中空円筒の有限要素法メッシュ (要素数 5680, 節点数 7455)。

間で浸漬する場合より熱応力を緩和できる理由は、中実の場合に、浸漬速度が遅い方が外表面と内部の温度勾配が緩和され、応力の最大値が小さくなるためと考えられる。実際に現場では、これまで $u = 2 \text{ mm/s}$ 程度でゆっくりロールを設置していることが多いが、図6と図7の結果はその作業の妥当性を示すものである。

中空円筒を溶融亜鉛に浸漬する際の熱応力(早い浸漬が望ましいこと)

次に、図2のロール形状を図8のように単純化してロールを溶融亜鉛に浸漬した状況における熱応力を調べた。実際の図2のロールでは胴部と軸部の接合部の応力集中も考慮する必要があるが、この点は今後検討する予定である。

表3に示すように遅く浸漬する場合 ($u = 2 \text{ mm/s}$) には、2次元円柱モデルに対して提案された Zukauskas の式より求めた式 (3) を $r = 125 \text{ mm}$, $r = 108 \text{ mm}$ と $z = \pm 750 \text{ mm}$ の全表面に用いる。この場合も、中空円筒を空気中から溶融亜鉛中へと浸漬するまで 120 秒要するので、その間を8段階に分けてモデル化する。すなわち中空円筒が部分的に溶融亜鉛に浸された状態を考えて、各段階で浸された部分にのみ $\alpha = 1.0 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ を与える。なお、実際に図2のようなロールを浸漬する時、ロールの開口部から溶融亜鉛が内部に侵入するまでの遅れはわずか (数秒程度) であるので計算では

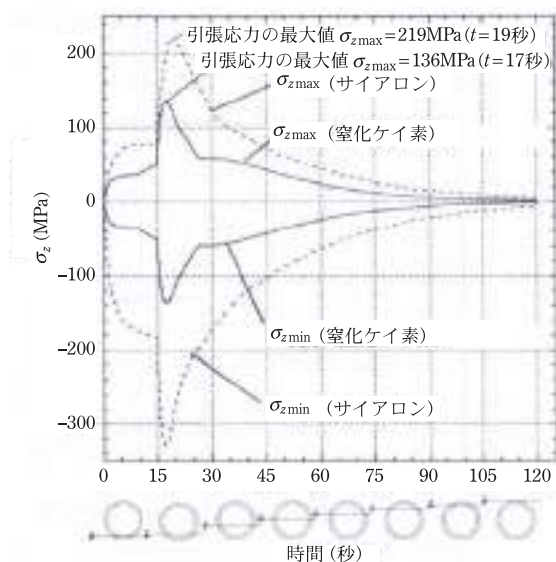


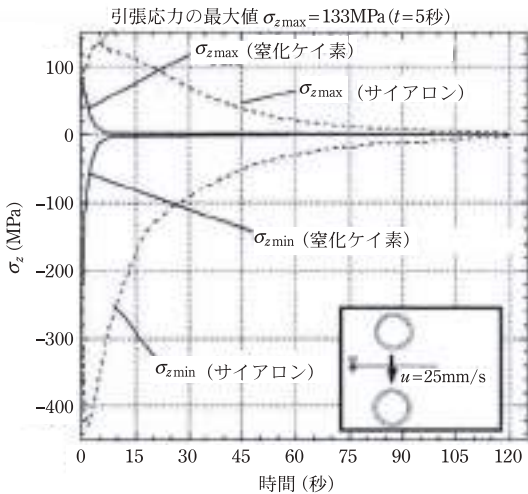
図9 中空円筒を溶融亜鉛に浸漬する際のロールに生じる最大熱応力 σ_z の時間変化 (浸漬速度 $u = 2 \text{ mm/s}$ のとき、窒化ケイ素で引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 136 \text{ MPa}$ ($t = 17 \text{ 秒}$)、サイアロンで引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 219 \text{ MPa}$ ($t = 19 \text{ 秒}$)。)

内部にも同時に熱伝達が生じるとする。その結果を図9に後述するサイアロン製ロールの結果と比較して示す。

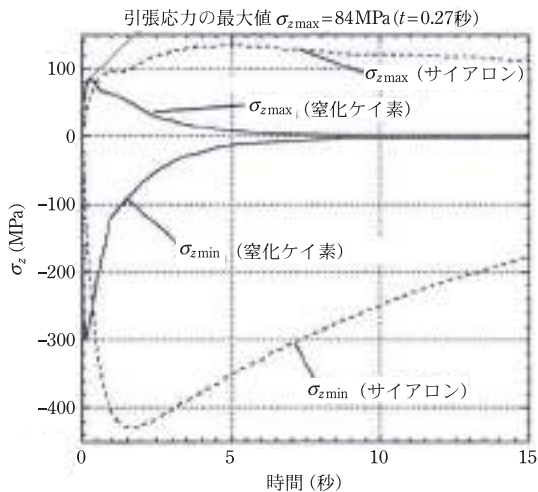
図9に示すように、 $\sigma_{z\max}$ は浸漬後緩やかに上昇し、約 17 秒で、引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 136 \text{ MPa}$ となる。図9の中空円筒と図6の中実円柱を比べると、図9の $\sigma_{z\max} = 136 \text{ MPa}$ に対して、図6の $\sigma_{z\max} = 156 \text{ MPa}$ であり、あまり差がない。しかし、その最大引張応力が生じるときの時間は図9では $t = 17 \text{ 秒}$ であり、図6の $t = 143 \text{ 秒}$ と比べてごく短い。特に、図9では $t = 120 \text{ 秒}$ ですべての応力は最大引張応力の 0.1% 以下となる。すなわち中空円筒を遅く浸漬する場合 ($u = 2 \text{ mm/s}$, 約 120 秒)、浸漬開始直後の $t = 0 \sim 30 \text{ 秒}$ に生じる初期の熱応力が問題となる。

一方、速く浸漬する場合 ($u = 25 \text{ mm/s}$) の中空円筒側面 $r = 125 \text{ mm}$ で、 α の値は図4の結果を用いる。また、中空円筒の端面 $z = \pm 750 \text{ mm}$ および中空円筒内面 $r = 108 \text{ mm}$ では、図4の α の最小値 $\alpha = 1.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ を仮定する。この場合も実際に

空気中から熔融亜鉛中に浸漬するまで 10 秒要するが、解析ではそれを無視し最初から全体が熔融亜鉛中にあるとする。その結果を図 10 に示す。図 10 に示すように、 $\sigma_{z\max}$ は浸漬直後急激に上昇するが、わずか 10 秒後に最大値の 1.2% 以下となる。すなわち速く浸漬する場合 ($u = 25 \text{ mm/s}$) の図 10 と遅く浸漬する場合 ($u = 2 \text{ mm/s}$) の図 9 を比べると、



(a) ロールに生じる最大熱応力 σ_z の時間変化 (浸漬速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ のとき)

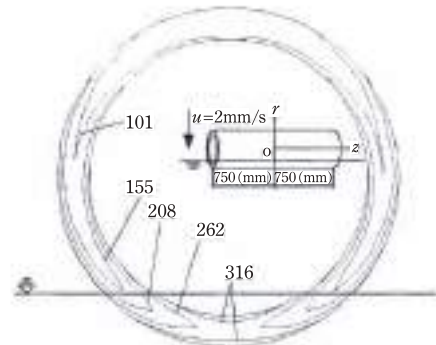


(b) 浸漬初期にロールに生じる最大熱応力 σ_z の時間変化 (浸漬速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ のとき)

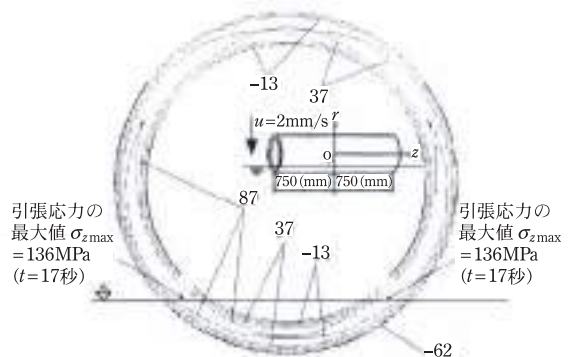
図 10 窒化ケイ素製中空円筒を熔融亜鉛に浸漬する際のロールに生じる最大熱応力 σ_z の時間変化 (浸漬速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ のとき、窒化ケイ素で引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 84 \text{ MPa}$ ($t = 0.27 \text{ 秒}$)、サイアロンで引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 133 \text{ MPa}$ ($t = 5 \text{ 秒}$))。

まず、図 10 では $t = 10 \text{ 秒}$ で応力がほとんど無視できる程度となるのに対し、図 9 では $t = 118 \text{ 秒}$ 以上を要する。また、図 10 の $\sigma_{z\max}$ は $t = 0.27 \text{ 秒}$ で引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 84 \text{ MPa}$ となるのに対し、図 9 では $t = 17 \text{ 秒}$ で引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 136 \text{ MPa}$ となり、図 10 における $\sigma_{z\max}$ の最大値は、図 9 の場合より約 38% 程度低い。すなわち、中空ロールの場合は約 120 秒間で浸漬するより、約 10 秒間で浸漬する方が熱応力を緩和できる。

早く浸漬する方が熱応力を緩和できる理由として、中空円筒を熔融亜鉛中に時間をかけて浸漬する場合には、亜鉛中に浸した部分とまだ浸してい



(a) 窒化ケイ素製中空円筒に引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 136 \text{ MPa}$ (図 9 参照) が現れる断面、時間における温度分布 (浸漬速度 $u = 2 \text{ mm/s}$ のとき)



(b) 窒化ケイ素製中空円筒に引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 136 \text{ MPa}$ (図 9 参照) が現れる $z = 720 \text{ mm}$ 断面、 $t = 17 \text{ 秒}$ における温度分布と応力分布 σ_z (MPa) (浸漬速度 $u = 2 \text{ mm/s}$ のとき)

図 11 窒化ケイ素製中空円筒に引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 136 \text{ MPa}$ (図 9 参照) が現れる $z = 720 \text{ mm}$ 断面、 $t = 17 \text{ 秒}$ における温度分布と応力分布 σ_z (MPa) (浸漬速度 $u = 2 \text{ mm/s}$ のとき)。

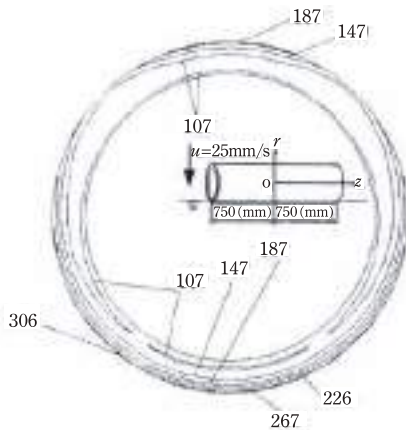
ない部分に大きな温度差が生じることが考えられる(図 11 (a)). 一方, 短時間で浸漬する場合には, 円筒の厚さ方向の温度差のみが主として問題になる. 一般にセラミックスのような, ぜい性材料を高温中に浸漬する場合には, 時間をかけて熱応力を避ける方法がとられている. しかし, 中空円筒形状ではそれは逆効果となる.

図 11 に遅く浸漬する場合 ($u = 2 \text{ mm/s}$) の最大引張応力が生じる時間と断面における温度分布と σ_z の分布を示す. 図 12 は速く浸漬する場合

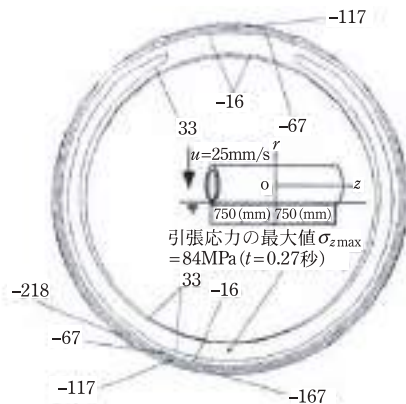
($u = 25 \text{ mm/s}$) であり, 図示するように $\sigma_{z\max}$ の生じる位置がやや内側面にずれる. これは外側面から大きな熱伝達が行われるため外側面の温度が高くなり, 温度の低い内側面より最大引張応力が生じるためである.

高熱伝導窒化ケイ素の使用とロールを予熱することによる熱応力の低減効果

本節では, サポートロールの試作がなされたサイアロン製ロールを, 高熱伝導窒化ケイ素で製作することによる熱応力の低減効果をまとめる. 図

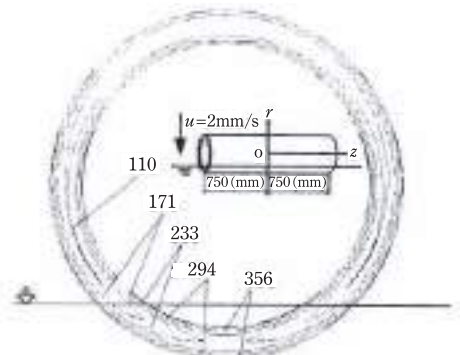


(a) 窒化ケイ素製中空円筒に引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 84 \text{ MPa}$ (図 10 参照) が現れる断面, 時間における温度分布 (浸漬速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ のとき)

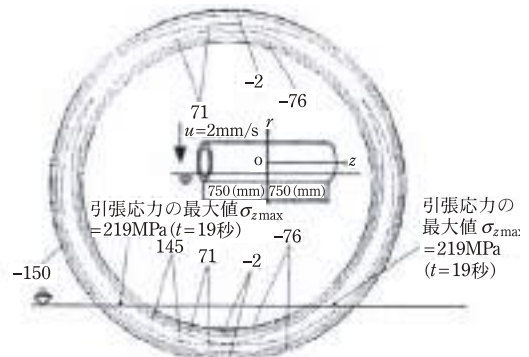


(b) サイアロン製中空円筒に引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 84 \text{ MPa}$ (図 10 参照) が現れる断面, 時間における応力分布 $\sigma_z (\text{MPa})$ (浸漬速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ のとき)

図 12 サイアロン製中空円筒に引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 84 \text{ MPa}$ (図 10 参照) が現れる $z = 630 \text{ mm}$ 断面, 時間 $t = 0.27$ 秒における温度分布と応力分布 (浸漬速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ のとき).



(a) サイアロン製中空円筒に引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 219 \text{ MPa}$ (図 9 参照) が現れる断面, 時間における温度分布 (浸漬速度 $u = 2 \text{ mm/s}$ のとき)



(b) サイアロン製中空円筒に引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 219 \text{ MPa}$ (図 9 参照) が現れる断面, 時間における応力分布 (浸漬速度 $u = 2 \text{ mm/s}$ のとき)

図 13 サイアロン製中空円筒に引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 219 \text{ MPa}$ (図 9 参照) が現れる $z = 720 \text{ mm}$ 断面, 時間 $t = 19$ 秒における温度分布と応力分布 (浸漬速度 $u = 2 \text{ mm/s}$ のとき).

9の遅く浸漬する場合($u = 2 \text{ mm/s}$, 約120秒), 高熱伝導窒化ケイ素とサイアロンを比較すると, サイアロンの場合 $\sigma_{z\max}$ は浸漬開始後緩やかに上昇し, 約19秒で最大値 $\sigma_{z\max} = 219 \text{ MPa}$ となる. これは図9の高熱伝導窒化ケイ素の $\sigma_{z\max} = 136 \text{ MPa}$ に比べて約61%程度高い値である. すなわち, 材料としてサイアロンを高熱伝導窒化ケイ素に変更し熱伝導率が3.8倍になることによって, 生じる最大引張応力が約40%程度減少する.

図13(a)に引張応力の最大値 $\sigma_{z\max} = 219 \text{ MPa}$ が生じる時間($t = 19 \text{ 秒}$)における, $\sigma_{z\max}$ を含む横断面 $z = \pm 720 \text{ mm}$ での温度分布を示す. また, 図13(b)に同じ時間と断面における, σ_z の分布も示す. 図13(a)より高熱伝導窒化ケイ素に比べてサイアロンでは熱伝導が低いため半径方向に顕著な温度差が生じており, これが大きい熱応力となって現れる. 図13(b)よりサイアロンの方が高熱伝導窒化ケイ素より大きな $\sigma_{z\max}$ が生じることが確認できる.

サイアロン製ロールを速く浸漬する場合(図10, $u = 2 \text{ mm/s}$, 約10秒)を高熱伝導窒化ケイ素と比較すると, 熱伝導率の違いによって高熱伝導窒化ケイ素では15秒で熱応力がほとんど0になるのに対し, サイアロンでは熱応力0となるのに2分以上要する. また, 最大引張応力はサイア

ロンが $\sigma_{z\max} = 133 \text{ MPa}$ で高熱伝導窒化ケイ素より58%高い. 図9と図10を比較するとサイアロンについても最大引張応力に関しては速く浸漬する場合($u = 25 \text{ mm/s}$, 約10秒)の方が遅く浸漬する場合($u = 2 \text{ mm/s}$, 約120秒)よりも小さい. なお, 図11~図13で議論した熱応力は最大でも

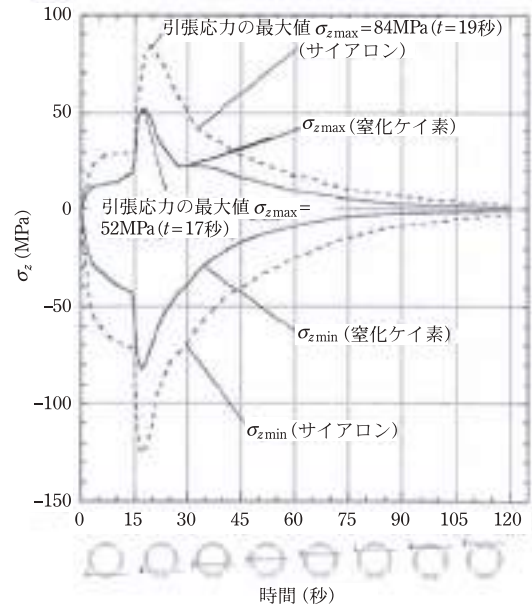
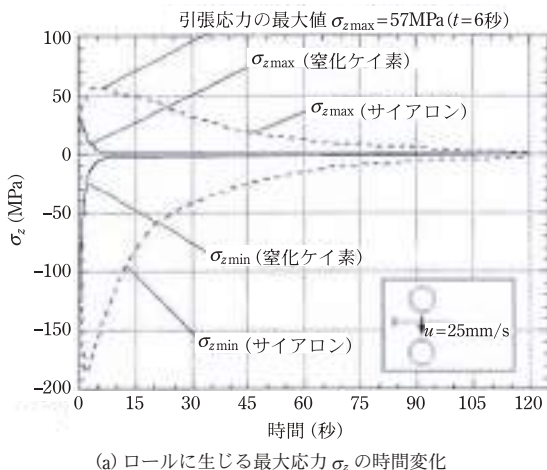
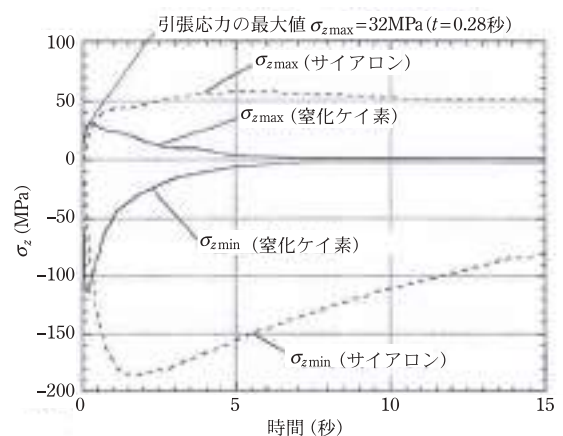


図14 ロールを300℃に予熱した高熱伝導窒化ケイ素製中空円筒を熔融亜鉛に浸漬するときの最大応力 σ_z の時間変化(浸漬速度 $u = 2 \text{ mm/s}$ のとき).



(a) ロールに生じる最大応力 σ_z の時間変化



(b) 浸漬初期にロールに生じる最大応力 σ_z の時間変化

図15 ロールを300℃に予熱した高熱伝導窒化ケイ素製中空円筒を熔融亜鉛に浸漬するときの最大応力 σ_z の時間変化(浸漬速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ のとき).

219 MPa であり、表 2 に示す曲げ強度 (1050 MPa, 880 MPa) よりもかなり小さい。しかし、実際のセラミック製ロールは大型であるため、図 2 に示すように接合部を設ける必要がある。よってこの部分に生じる応力集中の影響を今後の研究で考察する必要がある。

熱応力は、めっき浴に浸漬する前に、セラミックロールを炉内で非常にゆっくりと加熱する (5℃/min で) ことによっても軽減することができる。図 14 および図 15 に、初期温度が 300℃の中実円筒を浸漬するときの最大熱応力 σ_{zmax} を示す。ロールをゆっくりと浸漬すると、 $t = 17$ 秒で現れる高熱伝導窒化ケイ素の引張応力の最大値 $\sigma_{zmax} = 52$ MPa は、図 9 の $\sigma_{zmax} = 136$ MPa の 38% まで低くなる (図 14 および図 9 を参照)。また、 $t = 19$ 秒で現れるサイアロンの引張応力の最大値 $\sigma_{zmax} = 84$ MPa は、図 10 の $\sigma_{zmax} = 219$ MPa の 38% まで低くなる。ロールを急速に浸漬すると、 $t = 0.28$ 秒で現れる高熱伝導窒化ケイ素の引張応力の最大値 $\sigma_{zmax} = 32$ MPa は、図 10 の $\sigma_{zmax} = 84$ MPa の 38% まで低くなる (図 15 および図 10 を参照)。予熱した中空円筒における熱応力を軽減するには、図 14 および図 15 より、速く浸漬することが有用であることが分かる。

おわりに

連続溶融金属めっき用ロールには、ステンレス鋼等の鉄鋼材料が用いられているが、1~2 週間で交換の必要がある。このため、溶融金属浴中で安定した優れた性能を有するセラミックス製ロールの開発が強く期待されていた。そこで、本解説では、2000 年頃、日立金属(株) (現 株)プロテリアル) から相談を受けて行った、オールセラミックス製サポートロール (図 1 (b)) を溶融金属中に浸漬する際に生じる熱応力解析に関する¹⁾²⁾ 研究を紹介した。得られた結論をまとめると以下ようになる。

(1) 高熱伝導窒化ケイ素製およびサイアロン製の中実ロールを、遅く溶融亜鉛に浸漬した場合 ($u = 2$ mm/s, 約 120 秒) に生じる熱応力を FEM 解析で求め、速く浸漬する場合 ($u = 25$ mm/s, 約

10 秒間) と比較した。その結果、高熱伝導窒化ケイ素とサイアロンのいずれの場合も 10 秒程度の短時間で浸漬する方が 120 秒程度の長時間で浸漬する場合より発生する熱応力を低減できることが明らかとなった。なお、遅くロールを浸漬する方が、最大応力が大きいだけでなく、高い応力が生じる時間も長い。セラミックスのような脆性材料を高温中に浸漬する場合に時間をかけて熱応力を避ける方法がとられているが、ロールのような中空円筒形状では逆効果となる。

(2) 上記 (1) の理由として、中空円筒を溶融亜鉛中に時間をかけて浸漬する場合には、亜鉛中に浸した部分とまだ浸していない部分に大きな温度差が生じることが考えられる (図 11 (a))。短時間で浸漬する場合には円筒の厚さ方向の温度差のみが主として問題になる。一般にセラミックスのような脆性材料を高温中に浸漬する場合に時間をかけて熱応力を避ける方法がとられているが、それは中実円柱の浸漬では妥当である。一方セラミックロールのような中空円筒では異なる結果となる。

(3) 比較のため中実円柱形状ロールを高温中に浸漬する場合を解析し、時間をかけて浸漬させ熱応力を避ける方法の妥当性を検証した。その結果、遅く浸漬する場合の方が最大引張応力は小さいことを確認した。すなわち、従前のステンレス製ロールのような中実形状においては、一般に現場で行われているように 120 秒程度の比較的ゆっくりした速度で浸漬する方が熱応力の発生を緩和できる。これは中実円筒の場合に、浸漬速度が遅い方が外表面と内部の温度勾配が緩和され、応力の最大値が小さくなるためと考えられる。

(4) 中空円筒の浸漬の解析で求めた熱応力は最大でも 219 MPa であり、表 2 に示す曲げ強度 (1050 MPa, 880 MPa) よりもかなり小さい。しかし、実際のセラミックス製ロールは大型であるため、図 2 に示すように接合部を設ける必要がある。よってこの部分に生じる応力集中の影響を今後の研究で考察する必要がある。

(5) ロール材料としてサイアロンを高熱伝導窒化ケイ素に変更すると、熱伝導率が 3.8 倍になる

ことによって、生じる最大引張応力が約 40%も減少する。すなわち、浸漬速度と材料を適切に選ぶことによって、溶融亜鉛浸漬時の破損のリスクを低減できる。

(6) めっき浴に浸す前にセラミックロールを炉内で 300℃まで非常にゆっくり (5℃ /min で) と加熱することによって、予熱ロールの最大熱応力を予熱なしの最大熱応力の 40%程度まで小さくすることができる。

参考文献

- 1) 野田尚昭, 山田真裕, 佐野義一, 杉山茂禎, 小林正一: 連続溶融金属めっき用セラミックス製ロールの熱応力に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編, **70** 700 (2004), 1755.
- 2) N.A. Noda, Y. Yamada, Y. Sano, S. Sugiyama, 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.
- 3) 可児保宣, 飯田芳彦, 中川師夫, 大河内敬彦, 木村光男: 連続溶融亜鉛めっき設備の新技术, 日立評論, **72** (1990), 37.
- 4) 高杉努, 野上信悟, 是永逸生: サイアロンセラミックスの連続溶融亜鉛めっきライン用浴中ロール軸受への適用, 日本鉄鋼協会論文集 材料とプロセス第 139 回春期講演大会 CAMP-ISIJ, **13** (2000), 339.
- 5) 野上信悟: 大型構造用サイアロン, 日立金属技報, **15** (199), 120.
- 6) 西村和美, 片山喜一郎, 木村智明, 山口輝雄, 伊藤雅彦: 連続溶融めっき製品の品質向上に関する新技术, 日立評論, **65** (1983), 31.
- 7) 高杉努, 野上信悟: 連続溶融金属めっき用ロール, 特開 2002 161347 (P2002-161347A).
- 8) 原田良夫, 小松和正, 野村記生: 溶融金属浴ロール, 実開平 3 63565.
- 9) 酒井淳次, 祖父江昌久, 中川師夫: 連続溶融金属めっき用ロール及び該ロールを用いためっき装置, 特開平 5-271887.
- 10) 今村寿之, 祖父江昌久, 濱吉繁幸: 高熱伝導窒化ケイ素質焼結体およびその製造方法と回路基板, 特開 2002-293642 (P2002 293642A).
- 11) A. Zukauskas: *Advances in Heat Transfer*, **8** (1972), 131.
- 12) 日本機械学会: 伝熱工学資料改訂第 4 版, (1986), 61.
- 13) 前掲 12) の 323 ページ.

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。