

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*

野田尚昭^{*1}, 山田真裕^{*2}, 佐野義一^{*3}
杉山茂禎^{*4}, 小林正一^{*5}

Thermal Stress for Ceramics Roll Used in Molten Metal to Make Stable High Quality Galvanized Steel Sheet

Nao-Aki NODA^{*6}, Masahiro YAMADA, Yoshikazu SANO,
Shigetada SUGIYAMA and Shoichi KOBAYASHI

^{*6} Department of Mechanical Engineering, Kyushu Institute of Technology,
1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 804-8550 Japan

The zinc coated steel sheet has been often used for automobile and other industries because of its high corrosion resistance. This paper deals with the development of new ceramics support roll used for a continuous galvanizing pot to manufacture stable galvanized steel sheet. Usually stainless steel rolls are used to support and stabilize the strip in a continuous galvanizing pot, which is filled with molten zinc. However, corrosion and abrasion arise on the roll surface only in a few weeks, and causing the deterioration of quality of plating. Although developing ceramics rolls is most desirable, sometimes fracture occurs when the ceramic roll dips into molten metal. In this paper, therefore, how to reduce the thermal stress is considered when the ceramic rolls are installed in molten metal bath using finite volume method and finite element method. The usefulness of silicon nitride having extremely high conductivity is also discussed.

Key Words: Thermal Stress, Surface Treatment, Machine Element, Ceramics, Roll, Finite Element Method, Finite Volume Method, Galvanizing

1. 緒言

自動車等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⁽¹⁾⁽²⁾。また、近年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る⁽¹⁾。このため、図1に示すような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、軸受にセラミックスを用いること⁽¹⁾や、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⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾、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⁽¹⁾などの工夫が行なわれている。

図1に溶融亜鉛めっき浴の概略図を示す。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及び表面を洗浄化され、大気にふれることなく、スナウトを介して460~480°Cの溶融亜鉛に導か

れる。図1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、一対のロールからなり、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

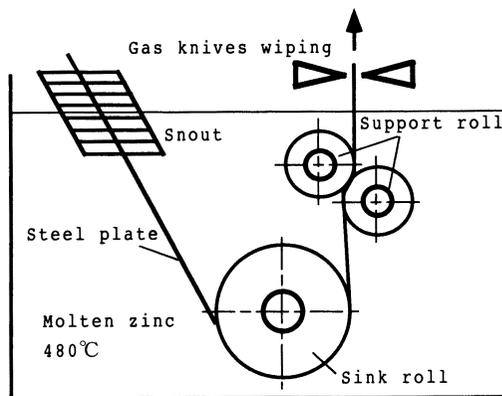


Fig.1 Layout of continuous galvanizing pot

* 原稿受付 2003年11月17日。

^{*1} 正員, 九州工業大学工学部(☎804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)。

^{*2} 学生員, 九州工業大学大学院。

^{*3} 正員, 日立金属(株)(☎808-0021 北九州市若松区北浜1-9-1)。

^{*4} 日立金属(株)。

^{*5} 日鐵プラント設計(株)(☎804-0002 北九州市戸畑区大字中原46-59)。

E-mail: noda@mech.kyutech.ac.jp

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)が行なわれる。

シンクロール(胴径500~800mm, 胴長1300~2200mm)およびサポートロール(胴径200~350mm, 胴長1300~2200mm)の材料として現在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。そこで本研究では、このようなステンレス鋼製ロールを、耐食性、耐熱性、耐摩耗性に優れたセラミックスに置換える方法⁽⁵⁾に注目する(図2参照)。そして、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)解析し、熱応力を緩和できる浸漬方法や、材料として高熱伝導窒化ケイ素を用いることの効果等を考察し、その実用化を可能とすることを目的とする。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。

2. 従来の対策と現状での課題

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た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⁽⁶⁾。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、円筒度を維持出来なくなり、ロールや鋼板に振動が起り、均一

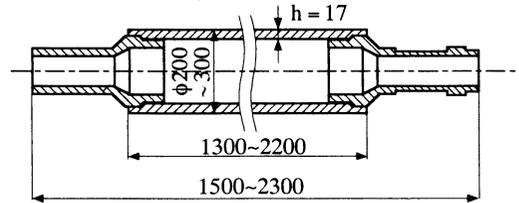


Fig.2 All ceramics support roll

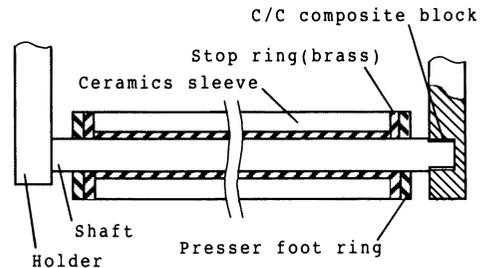


Fig.3 Ceramics sleeve with SUH309

なめっき特性の鋼板が得られなくなる。このため、現在は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。

また、鋼板が接触するロール胴部を耐食性、耐熱性、耐摩耗性に優れた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⁽⁷⁾(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いる。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)の使用のため溶融金属浴に対する耐食性、耐摩耗性は未だ十分でない。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これまでに見当たらない。ロール胴部とロール軸部を中空状に形成しているため、自重が軽いので回転しやすく、起動および鋼板の走行速度の変化に良好に追従する。このように構成したサポートロールはめっき

Table 1 The physical property of molten zinc at 693K(420°C)⁽¹¹⁾

Thermal conductivity	λ (W / m · K)	58.8
Roll diameter	D (m)	0.250
Constants in Eq.(1) when $Re=1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$	C_f	0.26
Constants in Eq.(1) when $Re=1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$	n	0.6
Kinematic viscosity	ν (mm ² / s)	0.489
Isobaric specific heat	C_p (kJ / kg · K)	0.505
Viscosity	η (mPa · s)	3.26

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が解決する⁽⁵⁾。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。

セラミックス製サポートロールは一旦溶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，溶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，本研究ではこの問題点を考察する。具体的には溶融亜鉛中にセラミックス製サポートロールを浸漬する際の熱伝達係数を有限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議論する。また，熱伝導率が極めて高い高熱伝導窒化ケイ素⁽⁸⁾を用いることの効果も検討する。

3. 熱伝達係数 α の計算

図1のように溶融亜鉛中にロールを設置する際に生じる熱応力をFEMで解析を行なうにあたり，溶融亜鉛とロール表面上における熱伝達係数 α を知る必要がある。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溶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。そこで本研究ではロール接合部の形状を無視し，2次元中実円筒で浸漬速度を変えたときの熱伝達係数を考察する。

Zukauskas⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾は流速 u の定常流れの中におかれた2次元円柱に関してその平均ヌセルト数 N_{um} として以下の式を推奨している。

$$N_{um} = \frac{\alpha_m D}{\lambda} = C_f Re^n Pr^{0.37} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \dots\dots\dots(1)$$

Table 2 Mechanical properties of ceramics

Physical property (Dimension)	SiAlON	Silicon nitride
Thermal conductivity {W/m·K}	17	65
Specific heat {J/kg·K}	650	680
Coefficient of linear expansion {1/K}	3.0×10^{-6}	3.0×10^{-6}
Young's modulus {GPa(kgf/mm ²)}	294 (29979)	300 (30591)
Specific weight	3.26	3.20
Poisson's ratio	0.27	0.30
4 point bending strength {MPa (kgf/mm ²)}	1050 (10296)	880 (8630)
Fracture toughness {MN/m ^{3/2} }	7.5	7.7

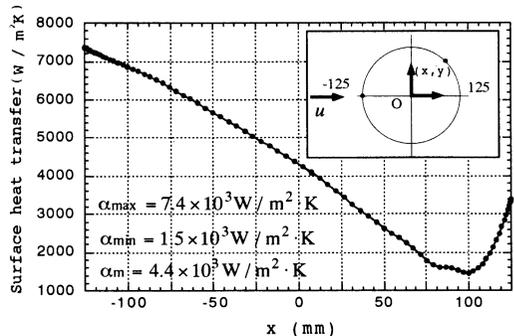


Fig.4 Surface heat transfer as a function of x ($u=25$ mm/s)

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_f ， n はレイノルズ数により異なる定数である⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。 Re はレイノルズ数， Pr はプラントル数である。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。

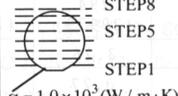
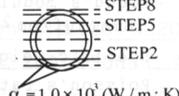
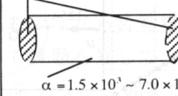
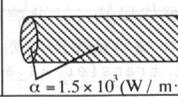
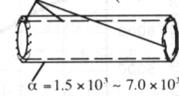
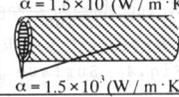
$$Re = \frac{uD}{\nu}, Pr = \frac{C_p \eta}{\lambda} \dots\dots\dots(2)$$

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。溶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 $u=25 \sim 2$ mm/s程度が考えられる。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⁽¹¹⁾より得た数値を示す。

式(1)に従って α_m を求めると以下のようにになる

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

Table 3 Assumption of heat transfer α

Model	(a) Solid cylinder	(b) Hollow cylinder
$u=0.002\text{m/s}$	$z = \pm 0.750(\text{m})$ $r = 0.125(\text{m})$ $\alpha = 1.0 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$  $\alpha = 1.0 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$ given	$z = \pm 0.750(\text{m})$ $r = 0.125(\text{m})$ $\alpha = 1.0 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$  $\alpha = 1.0 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$ given
$u=0.025\text{m/s}$	(1) $t=0-30\text{sec}$ $z = \pm 0.750(\text{m})$ $\alpha = 1.5 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$ $r = 0.125(\text{m})$ $\alpha = 1.5 \times 10^3 \sim 7.0 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$ (see Fig.3)  $\alpha = 1.5 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$ $\alpha = 1.5 \times 10^3 \sim 7.0 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$ (see Fig.3) (2) $t=30-120\text{sec}$ $z = \pm 0.750(\text{m})$ $r = 0.125(\text{m})$ $\alpha = 1.5 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$  $\alpha = 1.5 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$	(1) $t=0-30\text{sec}$ $z = \pm 0.750(\text{m})$ $\alpha = 1.5 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$ $r = 0.125(\text{m})$ $\alpha = 1.5 \times 10^3 \sim 7.0 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$ (see Fig.3) $r = 0.108(\text{m})$ $\alpha = 1.5 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$  $\alpha = 1.5 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$ $\alpha = 1.5 \times 10^3 \sim 7.0 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$ (see Fig.3) (2) $t=30-120\text{sec}$ $z = \pm 0.750(\text{m})$ $r = 0.125(\text{m})$ $r = 0.108(\text{m})$ $\alpha = 1.5 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$  $\alpha = 1.5 \times 10^3 (\text{W/m} \cdot \text{K})$

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

$$\dots\dots\dots(4)$$

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。その際ロールを固定し、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なう。メッシュはヘキサメッシュを用い、乱流モデルは RNG $\kappa - \epsilon$ モデル、移流項は1次 Up-Wind、速度-圧力の連成は SIMPLE法を使用する。その結果を図4に示す。図4では10秒間でロール全体を浸漬する場合に対応する $u = 25 \text{ mm/s}$ を用いた。ここで、 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。その平均値は $\alpha_m = 4.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ であり、Zukauskas⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾の値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る。

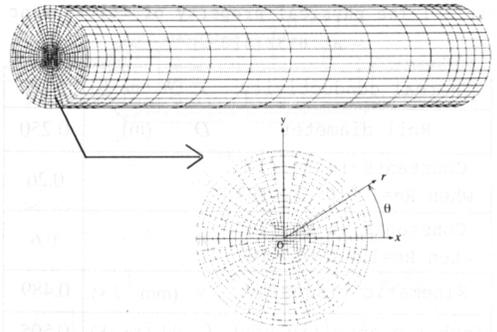


Fig.5 Finite element mesh (No. of elemnt=13200, No. of nodes=14301)

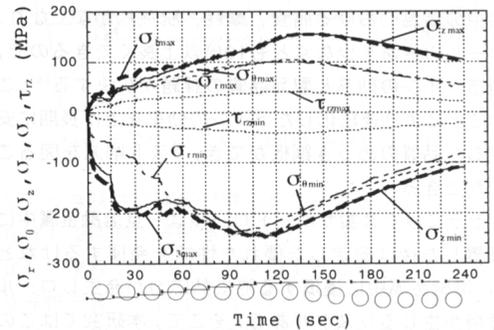


Fig.6 Maximum stresses $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \sigma_1, \sigma_3, \tau_{rz}$ vs. time relation for Silicon nitride ($u=2\text{mm/s}$)

4. モデル形状と熱応力解析結果

本研究では実際にロールの試作がなされたサイアロン⁽³⁾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⁽⁶⁾でロールを作製した場合に対しても、解析を行なう。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節点三次元直方体要素を用いて、有限要素法(FEM)で行う。なお、溶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。

4.1 中実円柱モデル解析結果 図2のセラミックス製サポートロールを溶融亜鉛中に浸漬する際には中空部にも溶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なとなる。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実質的に不可能である。また現在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が、形状が中実か中

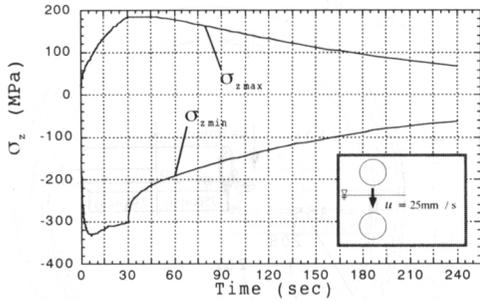


Fig. 7 σ_z vs. time relation for Silicon nitride ($u=25\text{mm/s}$)

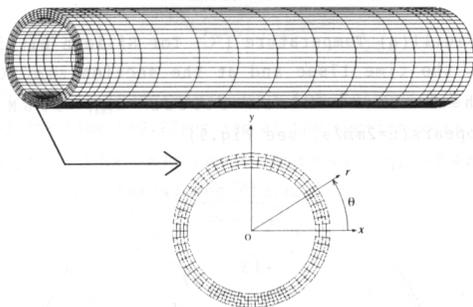


Fig. 8 Finite element mesh (No. of element=5680, No. of nodes=7455)

空かで浸漬する際の熱応力発生状況が変化することも考えられる。そこで本研究では、まずステンレス製サポートロールのように中実の円柱モデルを解析する。具体的にはロール形状を図5に示すような有限長さの中実円柱として速度 $u = 2 \text{ mm/s}$ (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う。ロール端部及び円周方向において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。その際表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。即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。

また、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) $t = 0 \sim 30$

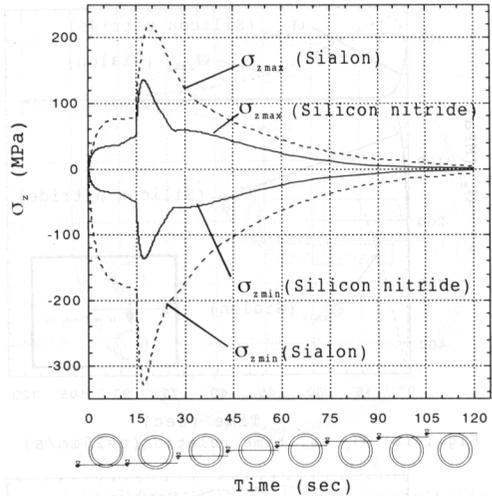
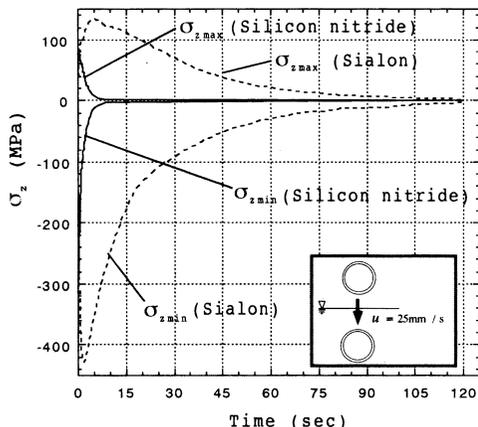
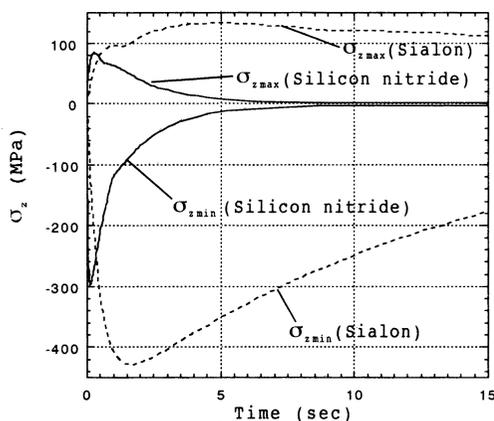


Fig. 9 σ_z vs. time relation ($u=2\text{mm/s}$)

sec では $r = 125 \text{ mm}$ で図4の結果、即ち $\alpha = (7.4 \sim 1.5) \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ を用いた。また、 $z = \pm 750 \text{ mm}$ では $\alpha = 1.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ と仮定した。同様に、(2) $t = 30 \text{ sec}$ 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では各時間における引張主応力 σ_1 の最大値、圧縮主応力 σ_3 の最大値と円柱座標における応力成分 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ の最大値を示す。なおせん断応力の最大値 $\tau_{rz}, \tau_{\theta z}, \tau_{r\theta}$ は $\sigma_{z,max}$ の27%以下程度であるので、その中で最大の τ_{rz} のみ図6に示す。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秒で引張垂直応力の最大値156MPaとなる。

図7に速くロールを浸漬する際 ($u = 25 \text{ mm/s}$) の各時間における $\sigma_{z,max}, \sigma_{z,min}$ について示す。ロール全体を浸漬後緩やかに $\sigma_{z,max}$ は上昇し、38秒で最大値185MPaとなる。すなわち図6に比べて高い応力185MPa ($> 156\text{MPa}$) が短い時間 $t=38 \text{ 秒}$ ($< 143 \text{ 秒}$) で生じることがわかる。このことから中実円柱の場合 $u = 2 \text{ mm/s}$ で120秒間で全体を浸漬する方が $u = 25 \text{ mm/s}$ で10秒間で浸漬する場合より、すなわち長時間かけてロールを浸漬する場合の方が、短時間で浸漬する場合より熱応力を緩和できると考えられる。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。実際に現場ではこれまで

Fig.10(a) σ_z vs. time relation ($u=25\text{mm/s}$)Fig.10(b) σ_z vs. time relation ($u=25\text{mm/s}$)

$u = 2 \text{ mm/s}$ 程度でロールを設置していることが多い。

4.2 中空円筒モデル解析結果

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解析を行った。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。即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 $\alpha = 1.0 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ 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)

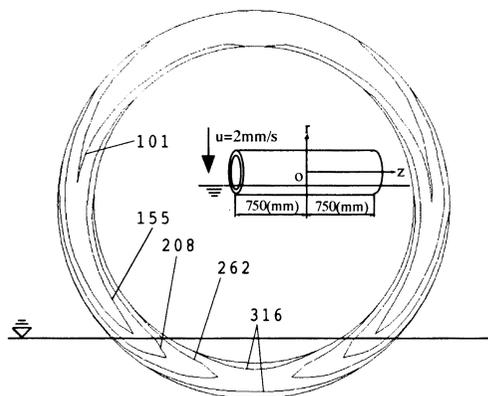


Fig.11(a) Temperature ($^{\circ}\text{C}$) for Silicon nitride at the time 17sec and at the section $z = \pm 720 \text{ mm}$ where the maximum stress $\sigma_{z,\text{max}} = 136 \text{ MPa}$ appears ($u = 2 \text{ mm/s}$, see Fig.9)

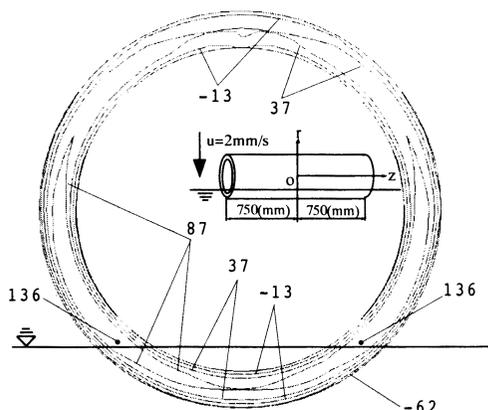


Fig.11(b) Stress σ_z (MPa) for Silicon nitride at the time 17sec and at the section $z = \pm 720 \text{ mm}$ where the maximum stress $\sigma_{z,\text{max}} = 136 \text{ MPa}$ appears ($u = 2 \text{ mm/s}$, see Fig.9)

であるので計算では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、 $\sigma_{z,\text{max}}$ は浸漬後緩やかに上昇し、約17秒で最大値136MPaとなる。図9の中空円筒と図6の中実円柱を比べると、最大引張応力は図9で136MPa、図6で156MPaであり差がない。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 $t = 17$ 秒であり、図6の $t = 143$ 秒と比べてごく短い。また図9では $t = 120$ 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

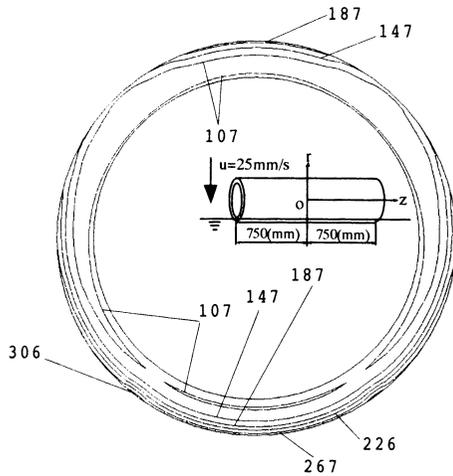


Fig.12(a) Temperature ($^{\circ}\text{C}$) for Silicon nitride at the time $t=0.27\text{sec}$ and at the section $z=\pm 630\text{mm}$ where the maximum stress $\sigma_{\text{max}}=84\text{MPa}$ appears ($u=25\text{mm/s}$, see Fig.10)

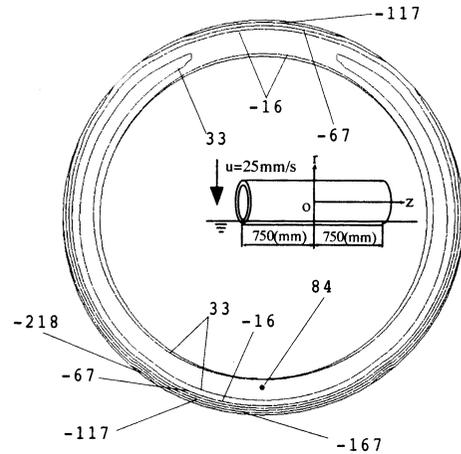


Fig.12(b) Stress σ_z (MPa) for Silicon nitride at the time $t=0.27\text{sec}$ and at the section $z=\pm 630\text{mm}$ where the maximum stress $\sigma_{\text{max}}=84\text{MPa}$ appears ($u=25\text{mm/s}$, see Fig.10)

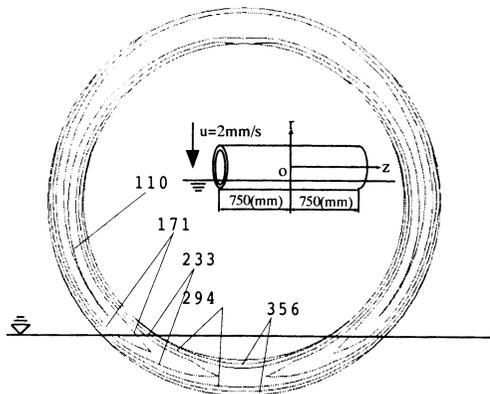


Fig.13(a) Temperature ($^{\circ}\text{C}$) for Sialon at the time $t=19\text{sec}$ and at the section $z=\pm 720\text{mm}$ where the maximum stress $\sigma_{\text{max}}=219\text{MPa}$ appears ($u=2\text{mm/s}$, see Fig.9)

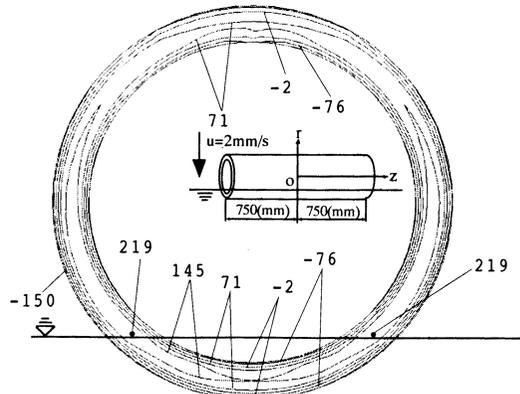


Fig.13(b) Stress σ_z (MPa) for Sialon at the time $t=19\text{sec}$ and at the section $z=\pm 720\text{mm}$ where the maximum stress $\sigma_{\text{max}}=219\text{MPa}$ appears ($u=2\text{mm/s}$, see Fig.9)

$t = 0 \sim 30$ 秒間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 $r = 125 \text{ mm}$ での 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における α の最小値である $\alpha = 1.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ を仮定する。この場合も実際に空気中から溶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溶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、 σ_{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、まず、図10では $t \geq 10$ 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 $t \geq 118$ 秒以上を要する。また、図10の σ_{max} は $t = 0.27$ 秒で最大値84MPaとなるのに対し、図9では $t = 17$ 秒で最大値136MPaとなり、図9の σ_{max} の最大値は図10の場合より約38%程度低い。このことから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

ると考えられる。この理由として、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事が考えられる(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ぜい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ようであるが中空円筒では異なる結果となる。

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 σ_{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な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。

4.3 サイアロンと高熱伝導窒化ケイ素の比較について 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遅く浸漬する場合(図9, $u = 2 \text{ mm/s}$, 約120秒)を高熱伝導窒化ケイ素と比較すると、サイアロンの場合も σ_{max} は浸漬開始後緩やかに上昇し、約19秒で最大値219MPaとなる。これは図9の高熱伝導窒化ケイ素の場合に比べて約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%程度減少する。図13(a)に σ_{max} の最大となる時間($t = 19 \text{ 秒}$)における、 σ_{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顕われる。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 σ_{max} が生じてい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, $u = 25 \text{ mm/s}$, 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133MPa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219Mpa

であり、表2に示す曲げ強度(1050Mpa, 880Mpa)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. 結 言

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る。そこで、本研究ではセラミックス製サポートロールを溶融亜鉛に浸漬時に生じる熱応力の時間変化やその熱応力を緩和できる浸漬方法について考察した。解析によって得られた結論を以下に示す。

(1)高熱伝導窒化ケイ素製およびサイアロン製の中空ロールを、遅く溶融亜鉛に浸漬した場合($u = 2 \text{ mm/s}$, 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($u = 25 \text{ mm/s}$, 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。この理由として、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事が考えられる(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ようであるが中空円筒では異なる結果となる。

(2)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。即ち、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。

(3)一方、比較のため検討した中実ロールにおいては、遅く浸漬する場合($u = 2 \text{ mm/s}$, 約120秒間)の最大引張応力156MPaに対して、速く浸漬した場合($u = 25 \text{ mm/s}$, 約10秒間)の最大引張応力185MPaであった。即ち、もしロールが中実ならば、一般に現場で行なわれているように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)解析で求めた熱応力は最大でも 219Mpa であり、表 2 に示す曲げ強度 (1050Mpa, 880Mpa) 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。

本研究を行なうに際し、九州工業大学地域共同センター長田中洋征教授には多大の御助言と御援助を賜った。深くお礼申し上げます。

文 献

- (1) 可見保宣・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** (1990-5), 37.
(2) 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 回春期公演大会 CAMP- ISIJ, **13** (2000), 339.
(3) 野上信悟, 大型構造用サイアロン, 日立金属技報, **15**, (1999), 120.
(4) 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** (1983-2), 31.
(5) 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).
(6) 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.
(7) 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.
(8) 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).
(9) Zukauskas, A., Advances in Heat Transfer, **8**, (1972), 131.
(10) 日本機械学会, 伝熱工学資料改訂第 4 版, (1986), 61.
(11) 文献 (10) の 323 ページ.