

別 刷

設計工学

公益社団法人 日本設計工学会誌

2014年 第49巻 第12号

(P. 645 ~ P. 650)

熔融金属にセラミックスを浸漬させるときの熱伝達係数について

高瀬 康, 松田 慎太郎, 野田 尚昭, 佐野 義一

Heat Transfer Coefficient for Several Ceramic Structures

Dipping into Molten Metal

Yasushi TAKASE, Shintaro MATSUDA,

Naoaki NODA and Yoshikazu SANNO

jsde

公益社団法人 日本設計工学会

熔融金属にセラミックスを浸漬させるときの熱伝達係数について*

Heat Transfer Coefficient for Several Ceramic Structures Dipping into Molten Metal

高瀬 康*¹ 松田 慎太郎*²
 (Yasushi TAKASE) (Shintaro MATSUDA)
 野田 尚昭*³ 佐野 義一*³
 (Nao-Aki NODA) (Yoshikazu SANNO)

Recently ceramic stalk is used in molten aluminum for low pressure die casting, and ceramic roll is used in molten zinc bath for continuous galvanizing line. However, it is important to reduce the risk of fracture because of low toughness of ceramics, and therefore attention should be paid to the thermal stress when ceramic structures are dipped into molten metal. In order to calculate thermal stress accurately, heat transfer coefficient is necessary for the analysis. In this paper, therefore, the finite volume method is applied to calculate the heat transfer coefficient when ceramic structures are dipped into molten metal by varying the geometries and dipping directions. The maximum Nusselt number always appears at the front end for all geometries, and the value is about four times larger than the minimum value for cylindrical structures.

Key Words : finite volume method, numerical simulation, heat transfer coefficient, molten metal, galvanizing

1. はじめに

熔融金属中における比較的大型のセラミックスの用途として、低圧鋳造法に用いられるストックや、連続熔融金属めっき用ロールなどがある。低圧鋳造は、熔融金属を高速・高圧で金型に注入する鋳造技術であり、めっき用ロールは自動車用等に使用される鋼板の熔融金属めっきで用いられる。それぞれの概略図を図 1 (a), (b) に示す。ストック及びロールには、ステンレス鋼などが耐食・耐摩耗性コーティングされて使用されているが、耐食性が不十分のため短寿命である。使用中にコーティングにき裂や微小なはく離が生じると溶損が進み、鋳造品及びめっき製品の外観、耐食性や機械的特性を低下させる要因のひとつとなる。セラミックスを用いることができれば、浴中ロールに期待される耐食性、耐熱性、耐摩耗性を満足することが可能となり、飛躍的な長寿命化が達成できる上に、高品質製品の製造が可能となる。一方で、セラミックスは靱性が鉄鋼材料に

対して小さく、高荷重や熱衝撃によって破壊を生じるリスクがある。そこで、使用中の負荷に対する強度設計に加えてセラミックスを熔融金属中に浸漬する際の非定常な熱応力を正確に求める必要がある。この種の問題に対する一般的な評価尺度として熱衝撃係数¹⁾が使われてきたが、構造体に対して非定常熱流に基づく一般的な強度評価は見当たらない。そこで著者らは、直径 540mm の超大径セラミックロールを連続熔融金属めっき用シンクロールとして開発するに当たり、単純な円筒モデルを用いて円筒シリンダーが水平な場合に生じる浸漬時の熱伝達係数 (α と略す) および熱応力の解析を進めてきた^{2)~4)}。流れの中の 2 次元熱伝達係数に関するこれまでの研

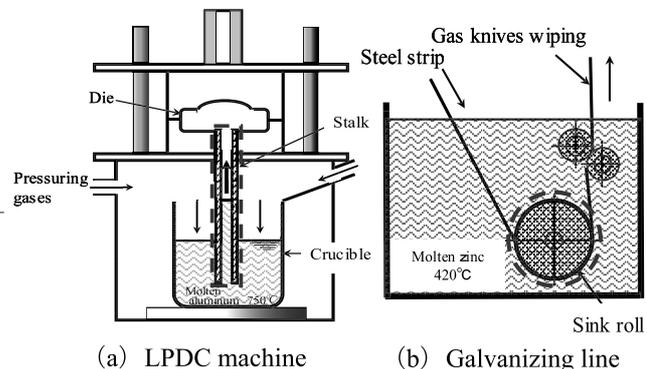


Fig.1 Schema of the apparatus using molten metal

* 原稿受付 2013年11月10日
 *1 正会員, 九州工業大学工学部技術部
 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)
 *2 非会員, 九州工業大学大学院
 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)
 *3 非会員, 九州工業大学大学院工学研究院
 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

究では、円柱や直方体に対する数値計算例があるが^{5), 6)}、これらは主として空気や水などを対象としたものである。溶融金属を対象としたものとしては円筒外周における液体ナトリウム⁷⁾、平行二平板間に対する鉛ビスマス⁸⁾、円管内における水銀⁹⁾など多数見られるが、アルミニウム、亜鉛を対象としたものは見当たらない。

そこで、本研究ではセラミックロールを溶融金属中に浸漬する際の熱伝達(ヌセルト数 Nu 及び熱伝達係数 α) を、2次元、及び3次元モデルを用いて、流体解析を行って求める。また、比較のために楕円柱や平板面の熱伝達係数も求める。

2. 解析方法および解析条件

2.1 熱伝達係数 α の解析方法

図2に示す解析モデルの解析メッシュは作成ソフトGAMBIT2.4.6により作成し、四角形六面体要素を用いた。要素数は、約300万メッシュでモデルの境界領域は、遠方部の1/10程度に細くなるように工夫した。物体の浸漬(図3(a))は流れ中の物体と等価な力学的境界条件にあるので、ここでは、図3(b)を考える。一様な流れ場を持った非圧縮性粘性流体において、Navier-Stokes方程式を有限体積法により離散化した定常解析を行なった。レイノルズ数 Re から、管内流以外では層流であることを確認した。管内流に関しては、限界レイノルズ数 $Re_{2000} \sim 4000$ ¹⁰⁾ に対して、4427であるが、ここでは層流として扱っている。解析ソフトにはANSYS Fluent 6.3.26(Fluent Inc.)を用いた。

2.2 解析条件

表1に、稼動温度420℃における溶融亜鉛と稼動温度750℃における溶融アルミニウム、表2にセラミックスの物性値を示す。断面形状の影響を2次元モ

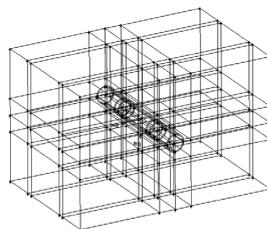


Fig.2 Mesh for 3D model

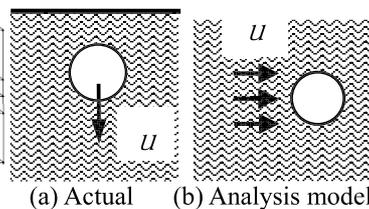


Fig.3 Modeling

Table 1 Material properties of molten zinc and molten aluminum

Physical property	Zinc (420℃)	Aluminum (750℃)
Thermal conductivity, λ (W/m·K)	58.8	112
Kinematic viscosity, ν (mm ² /s)	0.489	0.96
Isobaric specific heat, C_p (kJ/kg·K)	0.505	1.10
Viscosity, η (mPa·s)	3.26	2.20
Prandtl number, P_r	0.028	0.022

デルで長方形、円形及び楕円形を対象にして調べる。それらの一部においては、流速の影響、流れに対する角度の影響についても調べる。ここで速度はメッキ用ロールが溶融金属に浸漬される速度(流入速度)として生産性及び安全性の面から、2~25mm/sが用いられているので、本研究では25, 10, 2mm/sの解析を行う。また、有限長円筒モデルに対してのみ2次元モデルに加えて3次元モデルを用い、軸方向の変化についても明らかにした。

3. 2次元モデルの熱伝達

以下では、解析により得られた熱伝達係数 α を無次元化したヌセルト数 Nu で評価する。

図4は、直径170mmの円筒体を溶融亜鉛流に直交させて置いた場合の局所ヌセルト数 Nu_x 分布の円周方向変化を示す。ここで、 Nu_x は式(1)で与えられる。

$$Nu_x = \frac{\alpha_x D}{\lambda} \tag{1}$$

図4によれば流速が大きくなると Nu_x が増加し、円周上の分布はいずれの流速でも、前面先端部 ($x = -85\text{mm}$) でほぼ最大となり、後面少し前でその1/4程になる。全円周の平均 Nu_m は、Zukauskas¹¹⁾ の式から求めた Nu_m とほぼ一致する。

Table 2 Mechanical properties of ceramics

Mechanical property	Sialon
Thermal conductivity, (W/m·K)	17
Specific heat, (J/kg·K)	650
Coefficient of linear expansion, (1/K)	3.0×10^{-6}
Young's modulus, (GPa)	294
Specific weight	3.26
Poisson's ratio	0.27
4 Point bending strength, (MPa)	1050
Fracture toughness, (MN/mm ^{3/2})	7.5

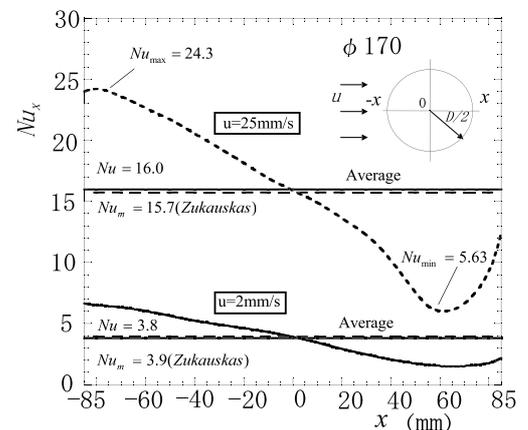


Fig.4 Nusselt number as a function of x for 2D circular model in the molten zinc with the velocity 2, 25mm/s, $Re(u=2)=695$, $Re(u=25)=8691$ ($Re=uD/\nu$)

なお、以下では最大値と平均値の差が大きい、速く浸漬させる場合(25mm/s)の解析を中心に検討を行う。

図5は、直径Dの影響を調べるため、直径を変えた2次元円形モデルを用いて円筒外周のヌセルト数Nuを求めて平均化し、各直径に対応した平均値を溶融アルミニウムと溶融亜鉛と比較した結果を横軸にペクレ数Peをとって整理したものである。ここでペクレ数Peは式(2)で与えられる。

$$Pe = RePr = \frac{uD \eta Cp}{\nu \lambda} \quad (2)$$

図6は2次元長方形モデルを流速u=25mm/sの溶融アルミニウム中に長辺を流れに沿って置いた場合のヌセルト数Nu_xの軸方向分布を示したものである。この2次元長方形モデルは、中空円筒モデル(ストーク)で直径無限大の場合に相当すると見なすことができ、図10でもこの点に触れている。図6より、ヌセルト数Nu_xの最大値及び最小値は板厚によってほとんど変わらないが、全体的には厚さ増によりNu_xは小さくなる。

図7は、2次元長方形モデルを45°傾け、2~25mm/sで浸漬させた際のモデル前面、後面のヌセルト数Nu_xを示したもので、直径無限大の中空円筒を45°傾斜させて浸漬する場合に相当する。図7より、Nu_xは前面先端部(x=0mm)で最小値、後面に進むにつれ単調増加し、後面端(x=650mm)付近で急に大きくなり、端部で最大値をとる。後面では前面と同様の動きをとるが、全体的に1/2以下の水準である。

図8は、長方形モデルを流れに直交させて置いた場合の前面、後面におけるヌセルト数Nu_xを示したもので直径無限大の中空円筒を水平に浸漬する場合に相当する。図8より、前面におけるヌセルト数Nu_xは板中央付近から端部に向かって大きくなって

両端で最大となり、流速を変えても同様な傾向を示す。後面におけるヌセルト数Nu_xも、前面と同様な傾向を示し、前面の1/2かやや小さいレベルである。

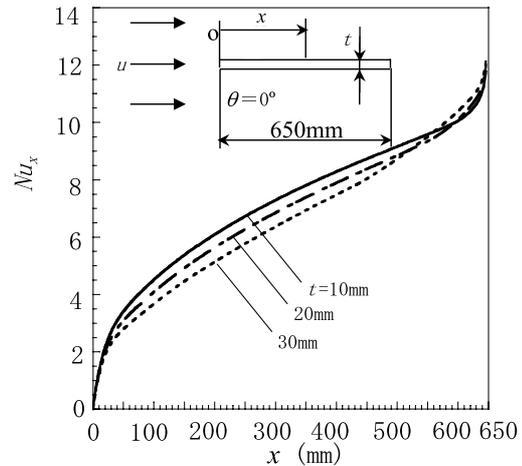


Fig.6 Nusselt number for 2D models with different thicknesses as a function of x in the molten aluminum with the velocity 25mm/s, $Re(u=25)=16927$ ($Re=uL/\nu$, $L=650\text{mm}$)

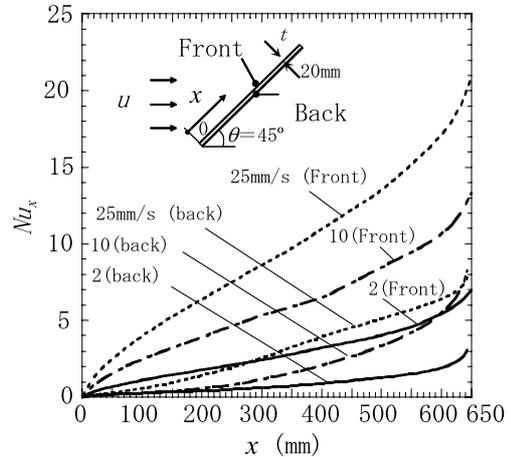


Fig.7 Nusselt number of 2D rectangular model inclined by 45° with different velocities of molten aluminum, $Re(u=2)=958, Re(u=10)=4788, Re(u=25)=11969$ ($Re=uL/\nu$, $L=650\text{mm} \times \cos 45^\circ$)

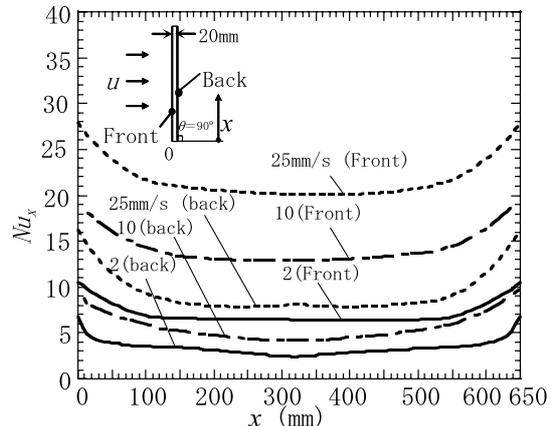


Fig.8 Nusselt number of 2D rectangular model inclined by 90° with different velocities of molten aluminum, $Re(u=2)=42, Re(u=10)=208, Re(u=25)=521$ ($Re=uL/\nu$, $L=t$)

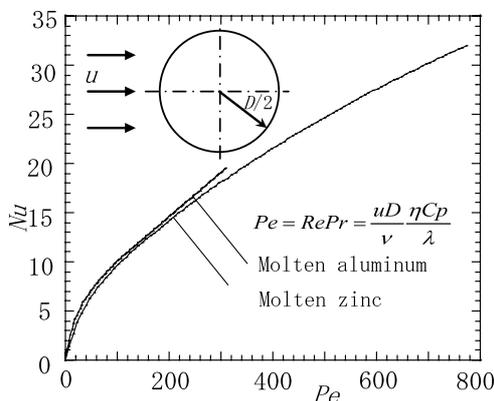


Fig.5 Nusselt number vs. Peclet number for 2D circular model in the molten metal with the velocity 25mm/s

解析の妥当性を検討するため、図 9 で、板厚 $t = 20\text{mm}$ の 2 次元長方形モデルを流速 $u = 25\text{mm/s}$ の熔融アルミニウム中に置いた場合のペクレ数 Pe_x とヌセルト数 Nu_x で整理した解析結果と近似式¹²⁾とを比較した。図より、両者はよく一致しており、本解析の妥当性が示された。

4. 3次元円筒モデルの熱伝達について

前章では、2次元円柱、長方形モデルの熱伝達係数 α を考察した。ここでは、実際のストーク (図 1(a)) やロール (図 1(b)) に近い 3次元円筒モデルを解析し、2次元モデルとの比較を行う。

図 10 は、中空円筒を流速 $u = 25\text{mm/s}$ の熔融アルミニウムの流れに平行に置いたとき (図 1(a) のストークに対応する) の局所ヌセルト数 Nu_x を示したもので、既報¹³⁾で得られた熱伝達係数 α をヌセルト数 Nu_x に換算した結果である。また図 10 には、中空円筒モデル (軸対称 $\phi = 170\text{mm}$) と比較のために 2次元長方形モデル (直径 $\phi \rightarrow \infty$) の局所ヌセルト数 Nu_x の流れ方向の分布を示す。図 10 より、円筒モデルでは、管の外側 A と内側 B の流れが異なるため、ヌセルト数 Nu_x も異なる。一方、2次元長方形モデルの側面 C, D におけるヌセルト数 Nu_x は形状の対称性より等しく、軸対称モデルのストーク外側 A と内側 B それぞれのヌセルト数 Nu_x の平均値に近い値をとる。このように、2次元長方形モデルは、中空円筒モデルで直径無限大の場合 ($\phi = \infty$) に相当するので図 10 より、 $\phi = 170\text{mm}$ から $\phi \rightarrow \infty$ の範囲を推定可能である。

次に、連続熔融金属めっき用ロール (図 1(b)) の 3次元モデルの検討を行う。著者らは、その熱応力を求めるため、先に 2次元円柱モデルを用いてロ

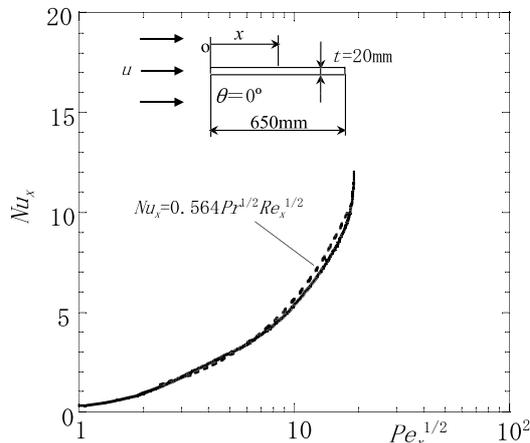


Fig.9 Nusselt number vs. Peclet number for 2D models with thicknesses of 20mm as a function of x in the molten aluminum with the velocity 25mm/s, $Re(u=25)=16927$ ($Re=uL/\nu$, $L=650\text{mm}$)

ールの熱伝達係数を解析した²⁾。ここでは、3次元円筒モデルの局所ヌセルト数 Nu_x を求め、2次元円柱モデルと比較する。図 11 は円筒モデルを流速 25mm/s の熔融アルミニウム流に直交させて置いた時の円筒外表面のヌセルト数 Nu_x を示す。各曲線は、 z 軸方向位置をパラメータにしている。図 11 の結果は、図 4 の 2次元円柱モデルの結果と類似しており、流れの前面で最大、後面の少し前で最小となり、前面における最大の局所ヌセルト数 Nu_x は、最小の 4 倍ほどである。また、軸方向の変化をみると、 $z = -5 \sim 5\text{mm}$ の中央部で最小で、端部にいくにつれ大きくなる。この傾向は平板 ($\theta = 90^\circ$) における中央部・端部の関係に類似している。なお、円筒中央部 ($z = -5 \sim 5\text{mm}$) の局所ヌセルト数 Nu_x は、2次元円柱まわりの Nu_x とほぼ一致することを確認した。3次元円筒端部の Nu_x の最大値は、2次元円柱における平均 Nu_x の 2 倍ほど大きい。また、円筒端面では中央部の 1.5~2 倍ほど Nu_x が大きい。

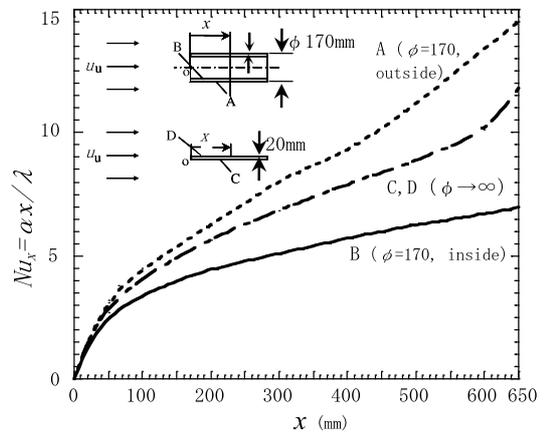


Fig.10 Nusselt number for 2D and axi-symmetry model as a function of x in the molten aluminum with the velocity 25mm/s, $Re(u=25)=16927$ ($Re=uL/\nu$, $L=650\text{mm}$)

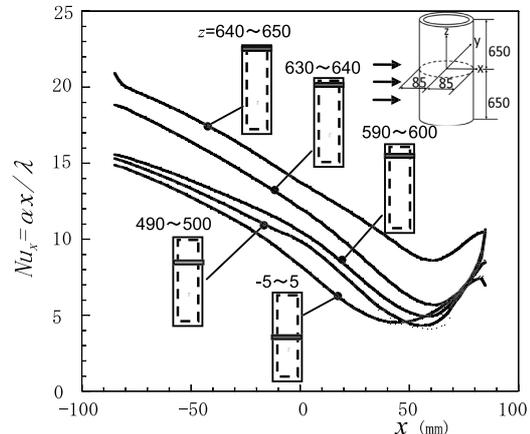


Fig.11 Nusselt number as a function of x for cylindrical model in the molten aluminum with the velocity 25mm/s, $Re(u=25)=4427$ ($Re=uD/\nu$)

5. 形状による影響のまとめ

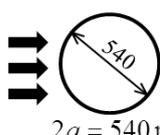
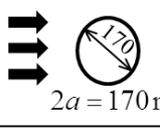
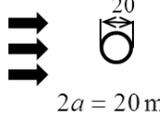
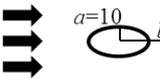
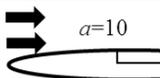
5.1 形状による影響（2次元）

上述の円柱，長方形 ($\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) モデルの解析結果に加えて楕円形 ($a/b=1/2, 1/32.5$) と長方形 ($\theta=45^\circ, 90^\circ$ 後面側) モデルの熱伝達係数の最大値及び最小値をまとめて表3に示す. なお, 表3では局所ヌセルト数 Nu_x にかえて, 熱伝達をイメージしやすい熱伝達係数 α を用いて整理している. いずれも溶融アルミニウム, 流速 25mm/s における熱伝達係数である. 楕円形モデルは, 短軸を a , 長軸を b として, 板厚 20mm の長方形モデルとの比較のために, $a:b$ を 10:325 とした. この楕円形モデルは, 溶融金属にセラミック工具を浸漬する場合, 楕円形円筒も検討されるので, 広く一般化する意味で本解析に含めた. 表3より, 円形モデル, 長方形, 楕円形モデルのいずれの場合にも α の最大値は, モデルの前面先端で生じていることがわかる. また, 流れに直交する円筒体において, 熱伝達係数は前縁部の曲率半径が小さくなるほど, 大きくなる.

5.2 2次元と3次元との差異

3次元円筒中央部 ($z=-5 \sim 5$ mm) の局所ヌセルト数 Nu_x は, 2次元円柱まわりの Nu_x と一致する. 3次元円筒端部の Nu_x の最大値は, 2次元円柱のその2倍ほど大きく (図11), 2次元と3次元との差異は小さくない. また, 円筒端面では中央部の1.5~2倍ほど Nu_x が大きい.

Table 3 Results of heat transfer coefficient for different models with the velocity 25mm/s of molten aluminum ($\alpha : W/m^2 \cdot K \times 10^3$)

Model	$\alpha_{max}, \alpha_{mid}, \alpha_{min}$
 $2a = 540$ mm	3.07 5.21 (max) 1.02 (min)
 $2a = 170$ mm	5.63 8.38 (max) 1.62 (min)
 $2a = 20$ mm	14.6 24.1 (max) 0.49 (min)
 $a=10, b=20$	9.55 30.3 (max) 4.53 (min)
 $a=10, b=325$	2.08 39.9 (max) 1.61 (min)

6. おわりに

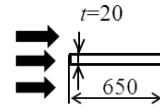
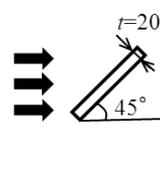
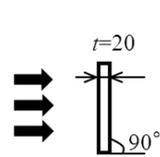
本研究では, 溶融金属流中の2次元モデルを中心に熱伝達の解析を行った. 金属はアルミニウムと亜鉛, 流速は鋼板の連続溶融めっきにおいて実用上有用な, 2~25mm/s として, 熱伝達の場所による変化が大きい 25mm/s を中心に解析した.

- (1) 全ての形状において, 局所ヌセルト数 Nu_x は流れの後面・後縁部で最大となり, 一部の例外を除いて前面部付近で最小となる.
- (2) 流れに直交する円筒体において, 熱伝達係数は前縁部の曲率半径が小さくなるほど, 大きくなる (表3).
- (3) 流れに直交する3次元円柱において, 局所ヌセルト数 Nu_x は端部前面で最大, 中央部後面近くで最小となり, 最大の Nu_x は, 最小の Nu_x の4倍ほどである (図11).
- (4) 3次元円筒端面では中央部の 1.5~2.0 倍ほど局所ヌセルト数 Nu_x が大きくなる.

本研究の一部は, 大学院生東佑亮君 (現: 山九株式会社) の助力を得た. 記してお礼を申し上げる.

参考文献

- 1) 日本機械学会: 伝熱工学資料 改訂第5版, 丸善株式会社 (2009) 21.
- 2) 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), 1755-1763.

Model	$\alpha_{max}, \alpha_{mid}, \alpha_{min}$
 $t=20, 650$	17.5 (max) 2.45 1.88 (min)
 $t=20, 45^\circ$	3.05 (min) 3.24 1.41 10.6 (max) 0.84 (min) 2.15 (max)
 $t=20, 90^\circ$	3.51 (min) 1.35 (min) 3.52 1.36 3.51 (min) 1.35 (min) 4.85 (max) 2.85 (max)

- 3) 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.
- 4) Noda, N.-A., Hendra, Li, W., Takase, Y., Ogura, H. and Higashi, Y.: 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), 1198-1213.
- 5) 中部主敬, 長谷川 寛, 松原幸治, 鈴木健二郎: 平行平板間流れに挿入した円柱の共存対流熱伝達に関する数値解析, 日本機械学会論文集 B 編, 62, 597 (1996), 1937-1944.
- 6) 中村 元, 亀本喬司: 渦および熱要素法による円柱まわりの非定常熱伝達解析, 日本機械学会論文集 B 編, 67, 662 (2001), 2525-2532.
- 7) 杉山憲一郎, 石黒亮二: 単一円筒をよぎる液体金属の熱伝達に関する解析, 日本機械学会論文集 B 編, 51, 464 (1985), 1269-1276.
- 8) 清水元英, 中川亨, 菊池義弘: 液体金属層流熱伝達に及ぼすプラントル数の影響, 日本機械学会講演論文集, 035-1(2003), 203-204.
- 9) 川北啓輔, 竹中信幸, 秋江大樹: 水銀の強制対流熱伝達に及ぼす濡れの影響, 日本機械学会講演論文集, 02-1(2002), 253-254.
- 10) Holman, J.P.: Heat Transfer, McGraw-Hill (2002), 207.
- 11) Zukauskas, A.: Heat Transfer from Tubes in Cross Flow, Hartnett J.P. and Irvine, Jr., T.F., editors, Advances in Heat Transfer, Academic Press, 8(1972), 131.
- 12) 甲藤好郎: 伝熱概論, 改訂第 22 版, 養賢堂 (1983), 65.
- 13) 野田尚昭, Hendra, 栗 文彬, 高瀬 康, 小倉弘樹, 東 佑亮: 応力集中部を有するセラミック製ストークの溶融金属浸漬時の熱応力と熱伝達係数について, 日本機械学会論文集 A 編, 79, 802 (2013), 905-920.