

熔融金属にセラミックロールを浸漬させるときの熱伝達係数

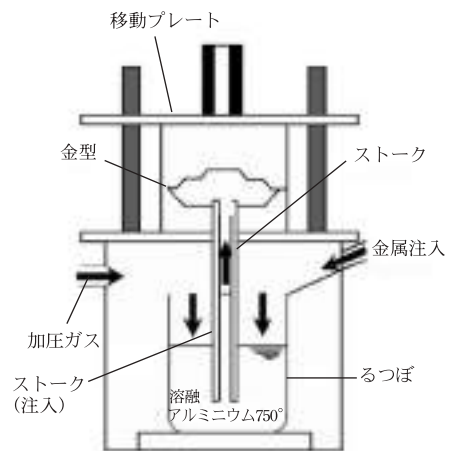
野田 尚昭・佐野 義一・高瀬 康・堀田 源治

はじめに

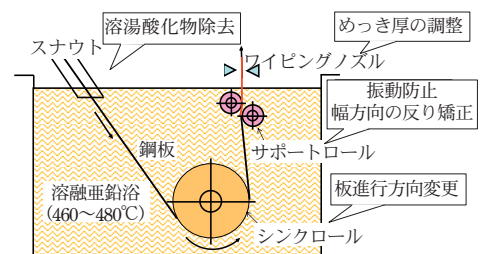
熔融金属中で用いられる比較的大型のセラミックスの用途として、低圧ダイカスト (Low Pressure Die Casting, LPDC) 装置¹⁾²⁾に用いられるストーク (給湯管) や、連続溶融めっき鋼板製造ライン (Continuous Galvanizing Line, CGL) のめっき浴用ロール³⁾が挙げられる。図1(a)の低圧ダイカストによって自動車のアルミホイール、シリンダヘッド、ピストン、歯車箱、プレーキドラムなどが製造されている。また、図1(b)のめっき用ロールは自動車用や建築用鋼板の製造に用いられる。ストークおよびロールには、ステンレス鋼などに耐食・耐摩耗性コーティングがなされて使用されているが、耐食性が不十分で短寿命である。もし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、铸造品およびめっき製品の概観、耐食性や機械的特性を低下させる要因となる。セラミックスを用いることができれば、浴中ロールに要求される耐食性、耐熱性、耐摩耗性を満足することによって、飛躍的な長寿命化と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のリスクがある。その対策として、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⁴⁾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。直径 540 mm の超大径セラミックロールを連続溶融金属めっき用シンクロールとして開発するに当たり、筆者らは前解説で解説したような



(a) 低圧ダイカスト (Low Pressure Die Casting, LPDC) 装置用のセラミック製ストーク (給湯管)



(b) 連続溶融めっき鋼板製造ライン (Continuous Galvanizing Line, CGL) 用のセラミック製ロール

図1 熔融金属中に円筒形大型セラミックスを用いた装置の概略図。

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および熱応力の解析を進めてきた^{5)~8)}。流体中の2次元熱伝達係数に関するこれまでの研究では、円柱や直方体に対する数値計算例があるが⁹⁾¹⁰⁾、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。熔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¹¹⁾、平行二平板間に対する鉛ビスマス¹²⁾、円管内における水銀¹³⁾など多数見られるが、図1に示すようなアルミニウム、亜鉛を対象としたものは見当たらなかった。

そこで、本解説ではセラミックロールを熔融金属中に浸漬する際の熱伝達(ヌセルト数 N_u および熱伝達係数 α)を、セラミック構造に要求されるいくつかの基本的な2次元および3次元形状を対象にして、流体解析を行って求めた研究¹⁴⁾を紹介する。また、比較のために、円柱や平面板の熱伝達係数も示す。

熱伝達係数の解析方法と解析条件

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

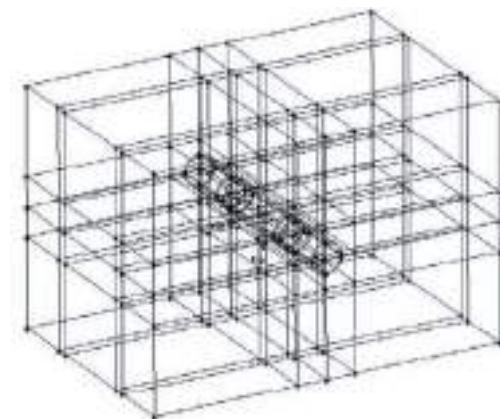


図2 熱伝達解析のための3次元モデルのメッシュ。

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方程式を有限要素法により離散化した定常解析を行った。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 $Re_c=2000\sim4000$ ¹⁵⁾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。

表1に、稼働温度420℃における熔融亜鉛と稼働温度750℃における熔融アルミニウム、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次元モデルで長方形、円形およびだ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

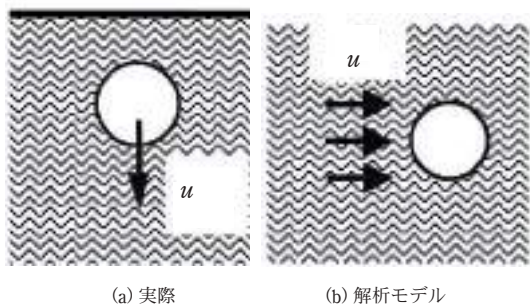


図3 最大熱応力のメカニズム。

表1 熔融亜鉛と熔融アルミニウムの物性値。

物性値		亜鉛 (420℃)	アルミニウム (750℃)
熱伝導率	λ (W/m・K)	58.8	112
動粘度	ν (mm ² /s)	0.489	0.96
比熱	C_P (kJ/kg・K)	0.505	1.10
粘度	η (mPa・s)	3.26	2.20
プラントル数	Pr	0.028	0.022

表2 セラミックスの機械的性質。

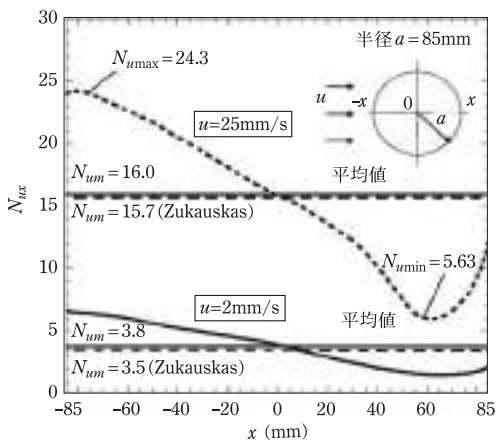
物性値		サイアロン
熱伝導率	(W/m・K)	17
比熱	(J/kg・K)	650
線膨張係数	(1/K)	3.0×10^{-6}
弾性係数	(GPa)	294
比重		3.26
ポアソン比		0.27
4点曲げ強さ	(MPa)	1050
破壊靱性	(MN/mm ^{3/2})	7.5

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熔融金属に浸漬される速度(流入速度)として作業性と安全性の面から、浸漬速度 $u = 2 \sim 25 \text{ mm/s}$ が用いられているので、本稿では、浸漬速度 $u = 25, 10, 2 \text{ mm/s}$ の解析を行う。特に、有限長さの水平円筒に対しては、2次元円柱と3次元円筒のモデルによる違い、すなわち、円筒の軸方向の位置に対して熱伝達係数がどのように変わるか?についても明らかにする。

2次元円柱モデルの熱伝達係数と得られる熱応力

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 N_u で表示する。はじめに、2次元円柱周りの流れによる熱伝達を取り上げる。この問題に関しては、その円柱まわりの平均的な熱伝達に関して、Zukauskas¹⁶⁾¹⁷⁾ の経験式が知られている。図4(a)は、直径170 mmの円柱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 N_{ux} 分布の円周方向変化を示す。ここで、 N_{ux} は式(1)で与えられる。

$$N_{ux} = \frac{\alpha_x D}{\lambda} \quad (1)$$

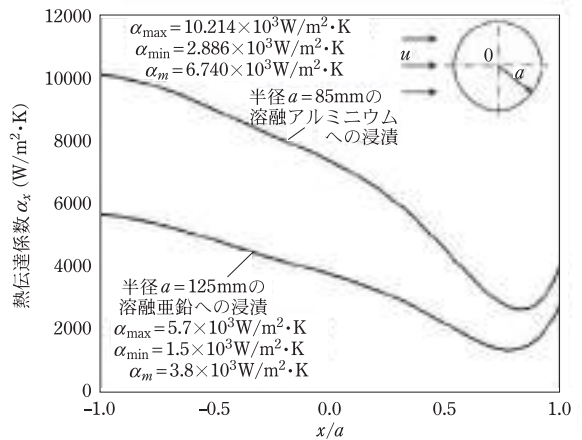


(a) 溶融亜鉛中の2次元円柱の位置 x の局所ヌセルト数 N_{ux} (浸漬速度 $u = 2 \text{ mm/s}$, $Re(u=2) = 695$ と $u = 25 \text{ mm/s}$, $Re(u=25) = 8691$ の比較, $Re = uD/\nu$)

ここで、 α_x は円柱表面の位置 x での局所熱伝達係数、 $D = 2a$ は円柱体の直径、 λ は熱伝導率である。

図4(b)は、図1(a)に示すセラミック製ストークを溶融アルミニウムに水平に浸漬するとき、図1(b)に示すセラミック製ロールを水平に浸漬するときの局所熱伝達係数の分布を x/a の関数として比較して示す。ここでは、速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ で半径 $a = 85 \text{ mm}$ のセラミック製円柱を溶融アルミニウムに浸漬する場合を、前解説⁸⁾で扱った半径 $a = 125 \text{ mm}$ の円柱を溶融亜鉛中に浸漬する場合と比較している。図4において、 $a = 85 \text{ mm}$ の熱伝達係数の平均値は $\alpha_m = 6.740 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ であり、それを Zukauskas¹⁶⁾¹⁷⁾ の経験式で求めると $\alpha_m = 6.348 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ となり、良く一致している。また、 $a = 125 \text{ mm}$ の平均値は $\alpha_m = 3.8 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ であり、それは Zukauskas の値 $\alpha_m = 3.7 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ と良く一致している。

図4(a)によれば流速が大きくなると N_{ux} 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、後面少し前でその最大値の1/4程度になる。 N_{ux} の全円周についての平均値 N_{um} は、Zukauskas¹⁶⁾¹⁷⁾ の式から求めた値とほぼ一致する。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



(b) 浸漬速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ の2次元円柱の位置 x の局所熱伝達係数 α_x (溶融亜鉛中の半径 $a = 125 \text{ mm}$ の円柱と溶融アルミニウム中の半径 $a = 85 \text{ mm}$ の円柱の比較)

図4 溶融金属中に2次元円柱を浸漬する際の位置 x の関数としての局所ヌセルト数 N_{ux} と局所熱伝達係数 α_x 。

(25 mm/s) の解析を中心に検討を行う。

図5に直径 D の影響を調べるため、直径を変えた2次元円柱モデルを用いて円柱外周の局所ヌセルト数 N_{ux} を求めて直径に対して平均化した平均ヌセルト数 N_{um} を示す。ここでは、各平均値を溶融アルミニウムと溶融亜鉛で比較した結果を横軸にペクレ数 P_e をとって整理した。図5に示すように平均ヌセルト数 N_{um} とペクレ数 P_e の関係は異なる直径 D ならびに異なる溶融金属に対して同一である。ここでペクレ数 P_e は式(2)で与えられる。ペクレ数は連続体の輸送現象に関連する無次元数で、流れによる物理量の移動速度の適切な勾配により駆動される同心量の拡散速度に対する比率(移流輸送速度/拡散輸送速度)と定義される¹⁸⁾。以下で $Re = uD/\nu$ はレイノルズ数、 $Pr = \eta C_P/\lambda$ はプラントル数、 ν は動粘度、 η は粘度、 C_P は比熱である。

$$P_e = Re Pr = \frac{uD}{\nu} \frac{\eta C_P}{\lambda} \quad (2)$$

図4や図5で与えられる局所ヌセルト数 N_{ux} と平均ヌセルト数 N_{um} 、すなわち局所熱伝達係数と平均熱伝達係数から、円柱の温度分布が求まり、温度分布から熱応力が求まる。一例として、図6は半径 $a = 85$ mmのセラミック製円柱を溶融アルミニウムに速度 $u = 25$ mm/sで浸漬する際に、引張

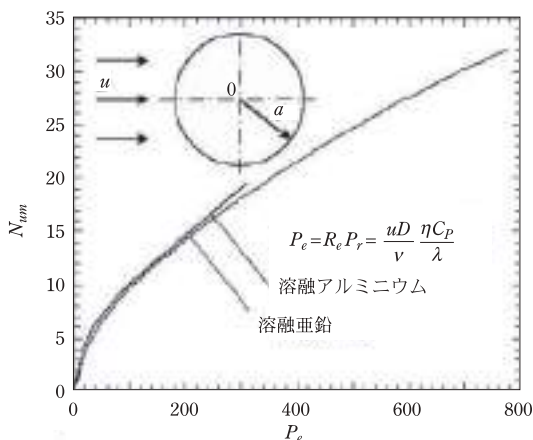
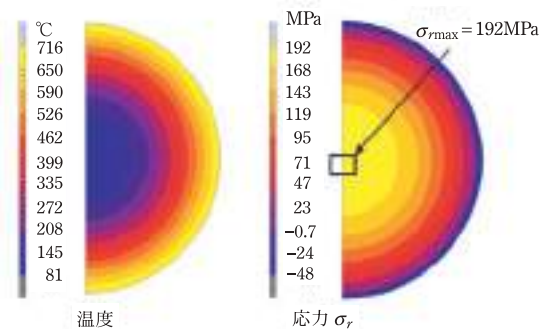
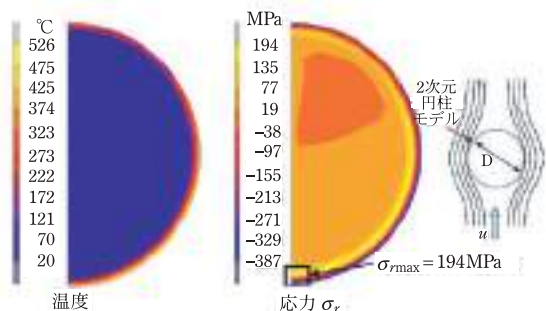


図5 浸漬速度 $u = 25$ mm/sの溶融金属中の2次元円柱モデルのヌセルト数の平均値 N_{um} とペクレ数 P_e の関係。

応力の最大値が生じる断面と時間における温度分布と熱応力を示したものである。ここで、図6(a)は円柱表面全体に図5の平均値を与えた場合である。図6(a)に示すように温度分布・応力分布は軸対称となり、引張応力の最大値は $\sigma_{\max} = 192$ MPaで、浸漬開始後 $t = 75$ 秒で中心に生じる。一方、図6(b)は、図4のヌセルト数 N_{ux} の分布、すなわち、 $x = -85$ mmで最大値をとり、 $x = 60$ mmで最小値をとる分布を円柱表面に与えたときの、温度分布と応力分布を示したものである。図6(b)の引張応力の最大値は $\sigma_{\max} = 194$ MPaは、図6(a)の $\sigma_{\max} = 192$ MPaとほとんど同じである。しかし、図6(b)の場合には、浸漬開始後0.98秒で最大引張応力 $\sigma_{r\max} = 194$ MPaが生じており、最大応力に



(a) 熱伝達係数の平均値 α を表面に与えたときの円柱の温度分布と応力分布(浸漬速度 $u = 25$ mm/s、 $t = 75$ 秒のとき、引張応力の最大値 $\sigma_{r\max} = 192$ MPa)



(b) 局所熱伝達係数の分布 α_x (図4(b))を与えたときの円柱の温度分布と応力分布(浸漬速度 $u = 25$ mm/s、 $t = 0.98$ 秒のとき、引張応力の最大値 $\sigma_{r\max} = 194$ MPa)

図6 (a) 熱伝達係数の平均値 α を表面に与えたときと、(b) 熱伝達係数の分布 α_x を与えたときの引張応力の最大値が生じる断面・時間での円柱の温度分布と応力分布。

到達するまでの時間は、図 6 (a) の $t = 75$ 秒よりもはるかに短い。その最大値は円柱のよどみ部 $x = -85$ mm の円柱の極く表面近傍に生じる温度差によって生じている。

細長い長方形モデルの熱伝達係数 (円筒の半径 $a \rightarrow \infty$ に相当)

図 7 は、2 次元長方形モデルを流速 $u = 25$ mm/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局所ヌセルト数 N_{ux} の長手方向分布を、長方形の幅を $t = 10, 20, 30$ mm と変えて示したものである。この 2 次元長方形モデルは、中空円筒モデル (ストーク) で円筒の半径 $a \rightarrow \infty$ に相当しており、長方形の幅は円筒の肉厚に相当する。図 7 に示すように、局所ヌセルト数 N_{ux} の最大値および最小値は板厚によってほとんど変わらないが、全体的には長方形の幅を増加させることにより N_{ux} は小さくなる。

図 8 は、2 次元長方形モデルを 45° 傾けて、速度 $u = 2 \sim 25$ mm/s で浸漬させた際の、モデル前面、ならびに後面の局所ヌセルト数 N_{ux} を示し

たものある。この場合も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、 N_{ux} は前面先端部 ($x = 0$ mm) で最小値、後面に進むにつれ単調増加、後面端 ($x = 650$ mm) 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 9 は、長方形モデルを流れに直交させて置いた場合の前面、後面における局所ヌセルト数 N_{ux} (x の関数) を示したものある。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、前面における局所ヌセルト数 N_{ux} 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る。この傾向は流速を変えても同様である。後面におけるヌセルト数 N_{ux} 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。

図 10 に板厚 $t = 20$ mm の 2 次元長方形モデルを流速 $u = 25$ mm/s の溶融アルミニウム中に置いた場合の局所ヌセルト数 N_{ux} をペクレ数 $P_{ex} = P_r R_{ex}$ で整理した解析結果を示す。文献¹⁹⁾に与えられる近似式 $N_{ux} = 0.564 P_r^{1/2} R_{ex}^{1/2}$ と比較して、解析の妥当性を検証した。ここで、 $P_{ex} = R_{ex} P_r = u \infty x (\mu/\rho) \cdot \eta$

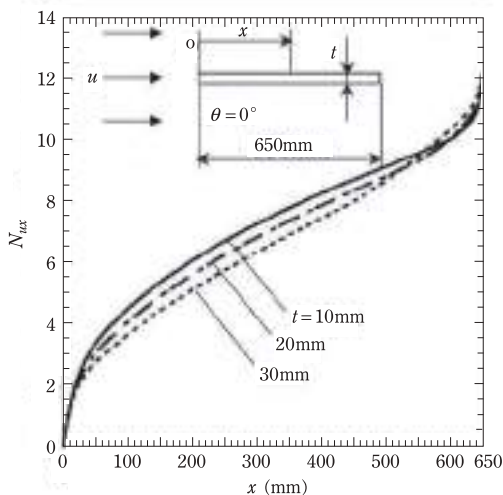


図 7 浸漬速度 $u = 25$ mm/s の溶融アルミニウム中で異なる厚さ $t = 10 \sim 30$ mm を持つ 2 次元長方形モデルの局所ヌセルト数 N_{ux} (x の関数), $R_e(u = 25) = 16927$ ($R_e = uL/\nu$, $L = 650$ mm)。

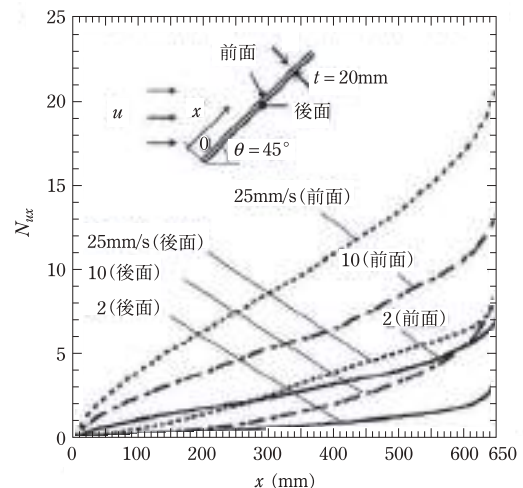


図 8 異なる速度で浸漬したときの溶融アルミニウム中の 45° 傾斜した 2 次元長方形モデルの局所ヌセルト数 N_{ux} (x の関数), $R_e(u = 2) = 958$, $R_e(u = 10) = 4788$, $R_e(u = 25) = 11969$ ($R_e = uL/\nu$, $L = 650$ mm $\times \cos 45^\circ$)。

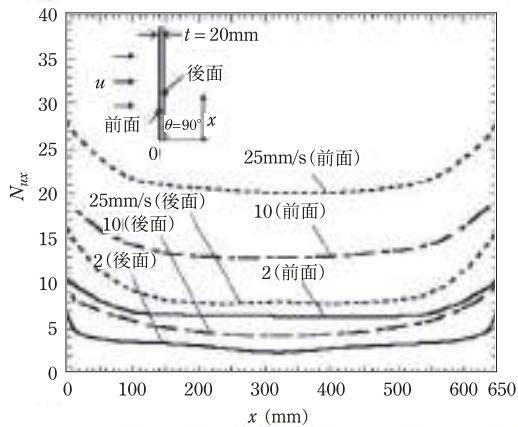


図9 異なる速度で浸漬したときの溶融アルミニウム中の90°傾斜した2次元長方形モデルの局所ヌセルト数 N_{ux} (x の関数), $Re(u=2) = 42$, $Re(u=10) = 208$, $Re(u=25) = 521$ ($Re = uL/\nu$, $L = t$).

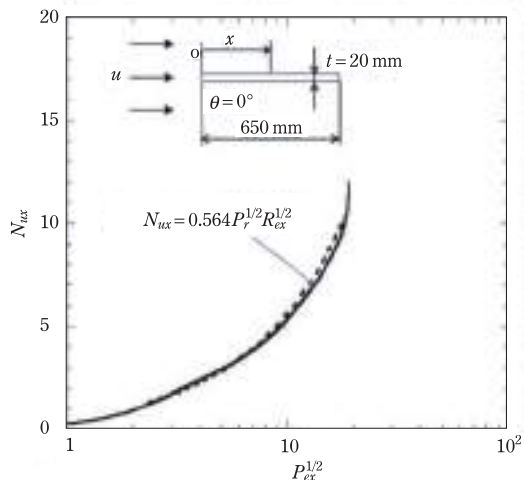


図10 浸漬速度 $u = 25$ mm/s の溶融金属中の厚さ 20 mm の2次元長方形モデルの局所ヌセルト数 (x の関数) とペクレ数 P_{ex} の関係. ここで, $P_{ex} = R_{ex} P_r = u_{\infty} x (\mu/\rho) \cdot \eta C_p / \lambda$, $Re(u=25) = 16927$ ($Re = uL/\nu$, $L = 650$ mm), 破線は, 近似式 $N_{ux} = 0.564 P_{ex}^{1/2} R_{ex}^{1/2}$ の値, $R_{ex} = u_{\infty} x / (\mu/\rho) = u_{\infty} x / \nu$ である (u_{∞} : 主流速度, x : 前縁からの距離, μ : 粘性係数, ρ : 流体密度, $\nu = \mu/\rho$: 動粘性係数, η : 粘度, C_p : 比熱, λ : 熱伝導率).

C_p/λ , $R_{ex} = u_{\infty} x (\mu/\rho) = u_{\infty} x / \nu$ である (u_{∞} : 主流速度, x : 前縁からの距離, μ : 粘性係数, ρ : 流体密度, $\nu = \mu/\rho$: 動粘性係数, η : 粘度, C_p : 比熱, λ : 熱伝導率). 図10に示すように, 両者はよく一致して

おり, 本解析の妥当性が示された.

中空円筒モデルの熱伝達係数について

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11は, 中空円筒を流速 $u = 25$ mm/s の溶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 N_{ux} を示したもので, 既報²⁰⁾で得られた熱伝達係数 α をヌセルト数 N_{ux} に換算した結果である. また図11には, 中空円筒モデル (半径 $a = 85$ mm) と比較のために2次元長方形モデル (半径 $a \rightarrow \infty$ の円筒に相当) の局所ヌセルト数 N_{ux} の流れ方向の分布を示す. 後述する図12に示すように, 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 N_{ux} も異なる. 一方, 円筒の半径 $a \rightarrow \infty$ に相当する2次元長方形モデルの側面C, Dにおけるヌセルト数 N_{ux} 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 N_{ux} 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 (半径 $a \rightarrow \infty$) に相当するので図11より, 半径 $a = 85$ mm $\sim \infty$ の範囲を推定可能である.

図12に, 連続溶融金属めっき用ロール (図1(b)) の3次元モデルの結果を, ストークと同じ寸法とした外半径 85 mm, 内半径 65 mm の場合として示す. 筆者らは, 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ールの熱伝達係数を解析した⁵⁾. ここでは, 3次元円筒モデルの局所ヌセルト数 N_{ux} を求め, 2次元円柱モデルと比較する. 図12は円筒モデルを流速 25 mm/s の溶融アルミニウムの流れに直交させて置いた時の円筒外表面のヌセルト数 N_{ux} 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12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, 流れの全面で最大, 後面の少し前で最小となり,

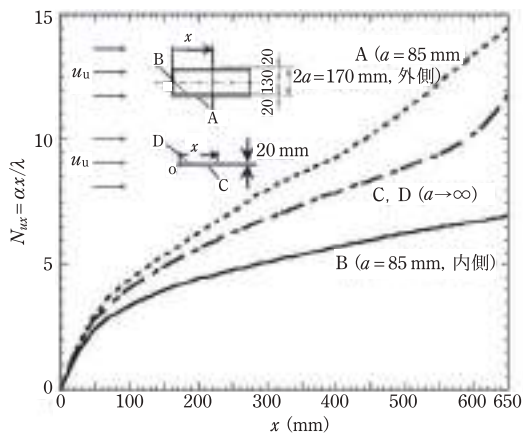


図11 浸漬速度 $u = 25$ mm/s, $Re(u=25) = 4427$ ($Re = uD/\nu$) の溶融アルミニウムの流れに平行に置いた時の円筒モデルにおける局所ヌセルト数 N_{ux} (x の関数)。

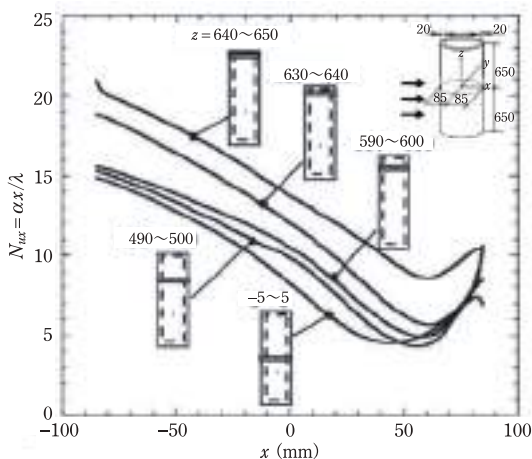


図12 浸漬速度 $u=25$ mm/s, $Re(u=25) = 4427$ ($Re = uD/\nu$) の溶融アルミニウムの流れに直交させて置いた時の円筒モデルにおける局所ヌセルト数 N_{ux} (x の関数)。

前面における最大の局所ヌセルト数 N_{ux} は、最小値の4倍ほどである。また、軸方向の変化をみると、 $z = -5 \sim 5$ mm の円柱中央部で最小となり、円柱端部では大きくなる。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 ($z = -5 \sim 5$ mm) の局所ヌセルト数 N_{ux} は、2次元円柱まわりの N_{ux} とほぼ一致することを確認した。3次元円筒部の N_{ux} の最大値は、2次元円柱における平均 N_{ux} 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 N_{ux} が大きい。

セラミック形状の熱伝達係数への影響のまとめ

表3に上述の円柱、長方形 ($\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) モデルの解析結果に加えて、だ円形 (形状比 $a/b = 1/2, 1/32.5$) と長方形モデル菱面側 ($\theta = 45^\circ, 90^\circ$) の熱伝達係数の最大値および最小値をまとめて示す。なお、表3では局所ヌセルト数 N_{ux} 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 $u = 25$ mm/s における熱伝達係数である。板厚20 mmで長さ650 mm長方形モデル (形状比32.5) との比較のために、だ円形モデルは、短軸を a 、長軸を b として、短軸を $(2a, 2b) = (20$ mm, 40 mm), $(2a, 2b) = (20$ mm, 650 mm) とした。このだ円形モデルは、溶融金属にセラミック工具を浸漬する場合には、だ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。

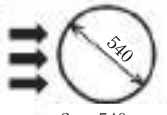
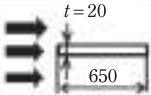
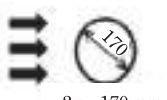
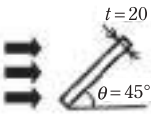
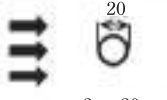
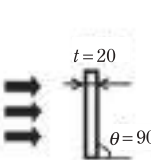
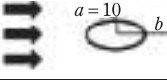
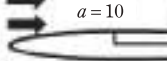
表3より、円形モデル、長方形、だ円形モデルのいずれの場合にも α の最大値は、モデルの前面先端で生じていることがわかる。また、流れに直交する円筒体において、熱伝達係数は前縁部の曲率半径が小さくなるほど、大きくなる。

3次元円筒中央部 ($z = -5 \sim 5$ mm) の局所ヌセルト数 N_{ux} は、2次元円柱まわりの N_{ux} と一致する。3次元円筒胴部の N_{ux} の最大値は、2次元円柱のその2倍ほど大きく (図12)、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 N_{ux} が大きい。

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、 $u = 2 \sim 25$ mm/s として、熱伝達の場合による変化が大きい25 mm/sを中心に解析した研究を紹介した。得られた結果を図4～図12と表

表 3 浸漬速度 $u = 25 \text{ mm/s}$ 熔融アルミニウムに浸漬するときのセラミック形状と局所熱伝達係数のまとめ ($\alpha : \text{W/m}^2 \cdot \text{K} \times 10^3$).

モデル	$\alpha_{\max}$, α_{mid} , $\alpha_{\min}$	モデル	$\alpha_{\max}$, α_{mid} , $\alpha_{\min}$
 $2a = 540 \text{ mm}$	5.21 (最大) 3.07 1.02 (最小)	 $t = 20$ 650	17.5 (最大) 2.45 1.88 (最小)
 $2a = 170 \text{ mm}$	8.38 (最大) 5.63 1.62 (最小)	 $t = 20$ $\theta = 45^\circ$ 650	3.05 (最小) 3.24 1.41 10.6 (最大) 0.84 (最小) 2.15 (最大)
 $2a = 20 \text{ mm}$	24.1 (最大) 14.6 0.49 (最小)	 $t = 20$ $\theta = 90^\circ$ 650	3.51 (最小) 3.52 1.36 3.51 (最小) 1.35 (最小) 4.85 (最大) 2.85 (最大)
 $a = 10$, $b = 20$	30.3 (最大) 9.55 4.53 (最小)		
 $a = 10$, $b = 325$	39.9 (最大) 2.08 1.61 (最小)		

3にまとめたほか、以下の知見が得られた。

(1) 全ての形状において、局所ヌセルト数 N_{ux} は流れの前面・前縁部で最大となり、一部の例外を除いて後面部付近で最小となる。

(2) 流れに直交する円柱体において、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次元円筒において、局所ヌセルト数 N_{ux} は端部前面で最大、中央部後面近くで最小となり、最大の N_{ux} は、最小の N_{ux} の4倍ほどである(図12)。

(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 N_{ux} が大きくなる(図12参照)。

参考文献

1) The A to Z of Materials : Aluminium casting techniques-sand casting and die casting processes. (online), available from <http://www.azom.com/detail.asp?ArticleID=1392>, (参照日 2008 年 4 月 23 日)。
2) F. Bonollo, J. Urban, B. Bonatto and M. Botter: Gravity and low pressure die casting of aluminum alloys: a

Technical and Economical Benchmark., Alluminio E Leghe, (2005).

3) 可児保宣, 飯田芳彦, 中川師夫, 大河内敬彦, 木村光男: 連続熔融亜鉛めっき設備の新技术, 日立評論, **72** (1990), 37。
4) 日本機械学会: 伝熱工学資料 改訂第5版, 丸善, (2009), 21。
5) 野田尚昭, 山田真裕, 佐野義一, 杉山茂禎, 小林正一: 連続熔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。
6) 濱吉繁幸, 小川衛介, 清水健一郎, 野田尚昭, 岸和司, 古賀慎一: 連続熔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>
7) 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。
8) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: (続)産業用ロール・ローラの技術的課題と解決(16)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,

- 金属, 94 6 (2024), 553.
- 9) 中部主敬, 長谷川寛, 松原幸治, 鈴木健次郎: 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.
 - 10) 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.
 - 11) 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.
 - 12) 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.
 - 13) 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.
 - 14) 高瀬康, 松田慎太郎, 野田尚昭, 佐野義一: 溶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, 設計工学, 49 12 (2014), 645.
 - 15) J. P. Holman: Heat Transfer, McGraw-Hill (2002), 207.
 - 16) A. Zukauskas: Heat transfer from tubes in cross flow, In: J.P. Hartnett, T.F. Irvine Jr., editors, Advances in Heat Transfer, 8, New York: Academic Press, (1972), 131.
 - 17) 日本機械学会: 日本機械学会編: 伝熱工学資料, 改訂第 4 版, 丸善, (1986), 61.
 - 18) 日本機械学会: 日本機械学会編: 伝熱工学資料, 改訂第 5 版, 丸善, (2009), 72.
 - 19) 甲藤好郎: 伝熱概論, 改訂第 22 版, 養賢堂, (1983), 65.
 - 20) 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.

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。