

## セラミック製ストークを 溶融金属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

自動車のアルミ部品としてアルミホイール、シリンダヘッド、ピストン、歯車箱、ブレーキドラムなどが、低圧ダイカスト (Low Pressure Die Casting, LPDC)<sup>1)2)</sup> によって製造されている。低圧ダイカストは、溶融金属 (主にアルミニウム) を比較的低い過圧力で金型に注ぎ込む铸造技術である。ダイカストと低圧铸造は、ともに溶融金属を金型に流し込む铸造方法であるが、ダイカストは、圧力をかけて高速で充填するのに対し、低圧铸造では、空気圧を利用して低速で充填するという違いがある (ただし日本では低圧ダイカスト (LPDC) を「低圧铸造法」と呼ぶことがある)。低圧ダイカスト法は低価格で高精度な铸造技術として铸造産

業の中でますます重要な役割を担っている。

図 1 (a) に低圧ダイカスト装置 (LPDC 装置) を示す。LPDC 装置の金型と溶融金属を含む充填装置は加熱炉の上に位置しており、金型への溶融金属の充填は、加圧されたガスが溶融金属に圧力を加え、溶融金属がストーク上部に押し上げられることによって行われる。図 1 (a) に示すストーク (給湯管) は、ろつばから溶融金属を金型に注入させる湯道であり、低圧铸造機において重要な機能を果たす。ストークには、従来、铸铁などが使用されていたが、耐食性が不十分のため短寿命であった。すなわち、使用中に溶損が進み、溶湯内へ鉄成分が多く混入し、铸造品の機械的な特性を低下させる要因のひとつとなっていた。また、保温性が不十分で、注湯時に生じる温度降下により铸造欠陥を発生しやすいという課題があった。そこでストークにセラミックスが用いられるようになり、必要な、耐溶損性、高气密性や保温性が満足され、長寿命化が達成できるようになった。一方で、セ

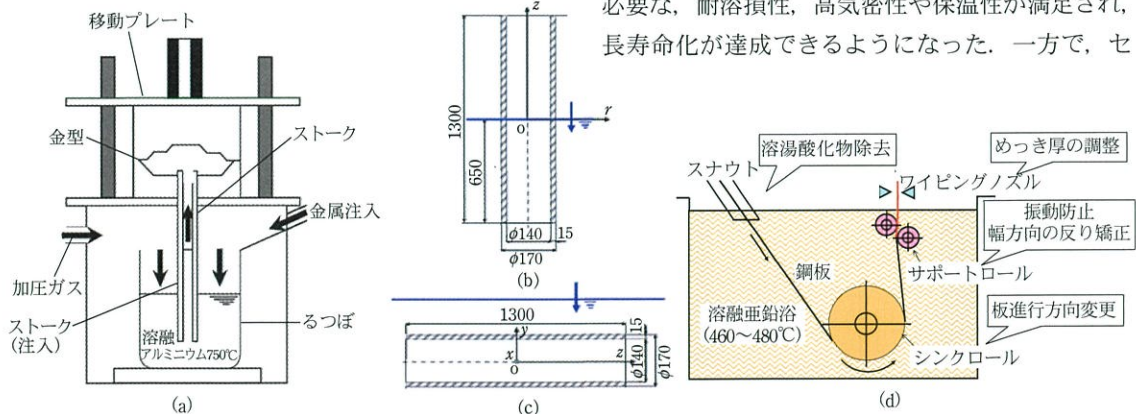


図 1 低圧ダイカスト (LPDC) 装置とめっき浴の説明図 (ダイカストは圧力をかけて高速で溶融金属を金型に流し込む铸造方法であり、低圧铸造は空気圧を利用して低速で充填する方法であるが、日本では LPDC 装置を「低圧铸造機」と呼ぶこともある)。 (a) セラミック製ストーク (給湯管) を有する低圧ダイカスト (LPDC) 装置、 (b) セラミック製円筒 (ストーク) の垂直浸漬、 (c) セラミック製円筒 (ロール) の水平浸漬、 (d) 溶融亜鉛めっき浴。

ラミックスは破壊靱性が小さいという欠点があり、特に熔融アルミニウムにセラミック製ストークを浸漬する際の熱応力には注意が必要である。

そこで本解説では、熔融アルミニウム (750°C) にセラミック製ストークを浸漬する場合の熱応力問題を取り上げる。具体的には、まず、図 1 (b) に示すように中空円筒を熔融金属に垂直に浸漬したときの熱応力を、浸漬速度を変えて解析する。そしてその結果を、図 1 (c) に示すような、中空円筒を熔融金属 (750°C) に水平に浸漬したときの熱応力と比較して説明する<sup>3)</sup>。さきの解説<sup>4)5)</sup>では、図 1 (d) に示すめっき浴中のサポートロール形状を中空円筒とした場合に、それを熔融亜鉛 (480°C) に水平に浸漬する場合の熱応力の解析を解説した。その結果、図 1 (d) のような中空円筒を水平に熔融亜鉛に浸漬する場合には、遅く浸漬するより、速く浸漬する方が最大応力を緩和できることを示した。

実際のストークでは、図 2 に示すように、熔融アルミの異物除去や流速をあげる目的で、下端部に突起部を設けることがある。このような突起は、熱応力が生じる際に応力集中部として作用する。本解説ではこのような応力集中の熱応力への影響も考慮する。具体的には、図 2 (b) の応力集中モデ

ルの解析結果を、図 2 (a) の単純円筒モデルの解析結果と比較して、セラミックをより安全に使用する際の指針を解説する。

## 円柱周りの流れにおける平均的・局所的熱伝達係数ならびにその熱応力への影響

熱応力を求めるには、ストークを熔融アルミニウムに浸漬する時の熱伝達係数  $\alpha$  を与えて、その際の温度分布を求め、その温度分布から生じる熱応力を解析する必要がある。実際に図 1 と図 2 に示す垂直円筒・水平円筒・突起部付きストークを浸漬する際には、下端および両端の開口部より熔融アルミニウムがストーク内部にも侵入し、その流れは極めて複雑である。そこで、本節では、図 3 (a) に示すような最も基本的な円柱周りの流れを考える。ここで、熔融アルミニウム (流体) の温度は 750°C (1023 K) であり、円柱の初期温度は 20°C である。表 1 に、750°C (1023 K) での熔融アルミニウムの物性値<sup>6)</sup>を示す。また、表 2 に、ストークに用いられているサイアロン<sup>7)8)</sup>の物性値を示す。

このような図 3 (a) の円柱周りの流れの問題

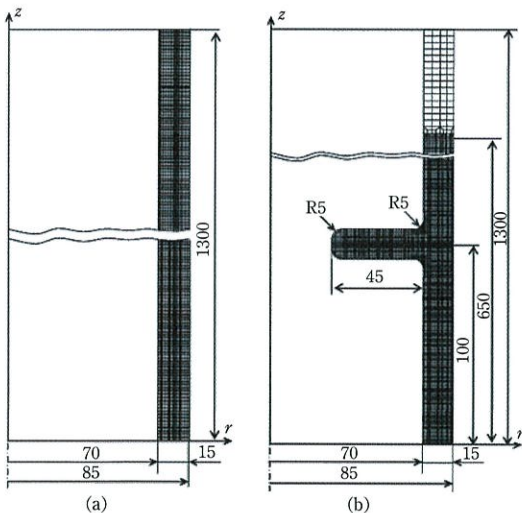


図 2 垂直ストークの突起部の形状寸法と FEM メッシュ。(a) 単純円筒 (要素数 = 19500, 節点数 = 20816), (b) 突起部付きストーク (要素数 = 14931, 節点数 = 16278)。

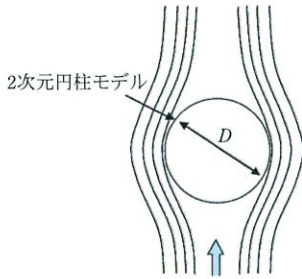
表 1 750°C (1023 K) における熔融アルミニウムの物性値。

熱伝導率 (W/mK)	112.2
ロール直径 (mm)	0.17
動粘度 ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	0.967
比熱 (kJ/kgK)	1.1
粘度 (mPa s)	2.2
$R_e = 1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$ 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

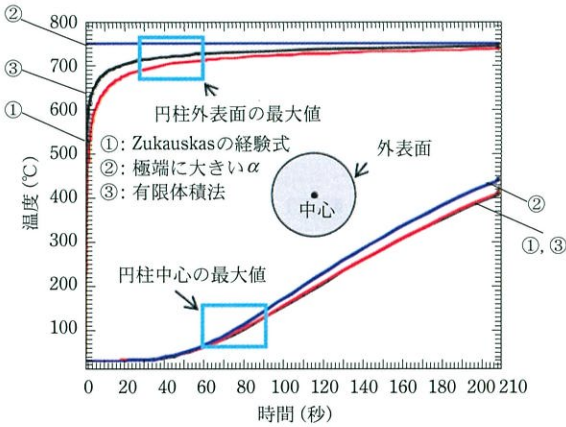
表 2 セラミックス (サイアロン) の機械的性質。

熱伝導率 (W/mK)	17
比熱 (kJ/kgK)	650
線膨張係数 (1/K)	$3.0 \times 10^{-6}$
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 ( $\text{MN}/\text{mm}^{3/2}$ )	7.5

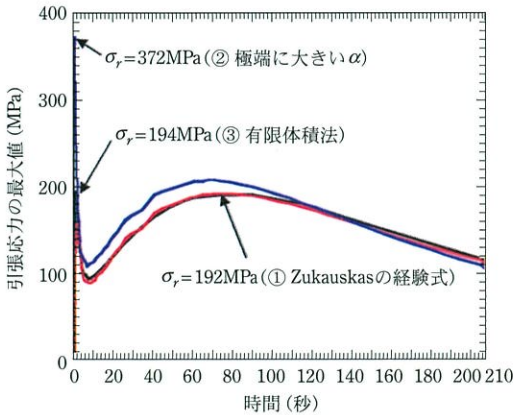




(a) 2次元円柱の溶融アルミニウムへの浸漬 (浸漬速度  $u = 25 \text{ mm/s}$ )



(b) 2次元円柱の浸漬における円柱表面の最大温度と中心温度の時間経過



(c) 2次元円柱の浸漬における円柱に生じる最大応力の時間経過 (引張応力の最大値は①では  $t = 75$  秒で  $\sigma_{\text{max}} = 192 \text{ MPa}$ 、②では  $t = 0.01$  秒で  $\sigma_{\text{max}} = 372 \text{ MPa}$ 、③では  $t = 0.98$  秒で  $\sigma_{\text{max}} = 194 \text{ MPa}$ )

図3 異なる熱伝達係数①～③を与えた場合の2次元円柱の浸漬における最高温度・最大応力の時間経過 (① Zukauskas<sup>6)9)</sup>の平均的熱伝達係数, ②極端に大きな熱伝達係数, ③局所的な熱伝達係数の分布を与えた場合, 浸漬速度  $u = 25 \text{ mm/s}$  のとき)。

に関して、3つの異なる方法、すなわち、① Zukauskas<sup>6)9)</sup>の経験式、②極端に大きな熱伝達、③有限体積法による解析結果、の3つで熱伝達係数を与える。ここで、① Zukauskas<sup>6)9)</sup>の経験式と②極端に大きな熱伝達では、円柱表面に均等に平均的な熱伝達係数を与える方法である。単なる熱伝達の観点からは、平均的な値と局所的な分布を与えることの差は小さいものと考えられる。しかし、熱応力に関しては局所的な熱伝達係数の変化の影響が大きく表れる可能性がある。

そこで、③局所的な熱伝達係数の分布を求める数値解析法(有限体積法)によって、熱伝達の局所性を考慮する。このように、本節では、方法①～③で熱伝達係数を与えた際の温度変化(図3(b))を調べるとともに、それから求まる熱応力の変化(図3(c))を考察し、熱伝達係数→温度分布→熱応力の関係を理解することを目的とする。

図3(b)に円柱表面の温度の最大値と円柱中心の温度の時間経過を①～③に対して示す。まず、円柱表面に生じる最大温度に注目すると、① Zukauskasの熱伝達係数 ( $\alpha_{\text{Zu}} = 6.348 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ )を与えた場合には、②、③の場合より、その時間経過による上昇は緩やかである。これは②では極端に大きい熱伝達係数 ( $\alpha_{\text{ext}} = 10 \times 10^7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ )を与えているためである。同様に、①と③の円柱表面の最大温度の違いは、③の熱伝達係数  $\alpha$ の平均値は①に近いけれども、その最大値(図3(a)の円柱表面のよどみ点)が大きい ( $10.214 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) ことによる。一方、円柱中心の応力は、図3(b)に示すように、①と③の違いはほとんど見られない。これは、円柱中心の応力は円柱表面の熱伝達係数の平均によって決まるためである。

図3(c)に円柱に生じる引張応力の最大値の時間経過を①～③に対して示す。まず、その最大値は②によって与えられるもの ( $\sigma_{\text{rmax}} = 372 \text{ MPa}$ )が他の①、③による最大値 ( $\sigma_{\text{max}} = 192 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{\text{max}} = 194 \text{ MPa}$ )より格段に大きい。これは極端に大きい熱伝達係数 ( $\alpha_{\text{ext}} = 10 \times 10^7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ )を与えることで円柱表面の温度が瞬間的に流体温度  $750^\circ\text{C}$  となるためである。よって、②によって与えられ

る最大値 (372 MPa) は  $t = 0.01$  秒で生じる。一方、①による最大値 ( $\sigma_{\max} = 192$  MPa) は  $t = 75$  秒で生じる。図 3 (c) に示すように①、③の最大応力の時間変化はよく似ているが、③では  $t = 0.98$  秒で最大値 (194 MPa) が生じ、 $t = 75$  秒で生じる応力 (372 MPa) よりわずかに大きい。

以下に①～③を詳述する。円柱周りの流れ (図 3 (a)) の熱伝達係数に関して、① Zukauskas<sup>6)9)</sup> 経験式はよく知られている。速度  $u$  の流体内にある 2 次元円柱表面の平均的なヌセルト数  $N_{um}$  (熱伝達係数の無次元値) に関して以下の式が提案されている。

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

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

ここで、 $\alpha_m$  は平均熱伝達係数、 $\lambda$  は熱伝導率、 $D$  は円柱の直径、 $C_1$ 、 $n$  はレイノルズ数  $R_e$ <sup>10)11)</sup> (流れの乱れやすさ) によって決まる定数である。また、 $P_r$  はプラントル数 (熱伝導に関する無次元値)、添字  $w$  はシリンダ壁温度特性を表す。速度  $u$  は、管の直径を熔融アルミニウムに浸す時間で割った値で計算でき、作業性と安全性の観点から浸漬速度は  $u = 2 \sim 25$  mm/s の範囲となる。等圧比熱  $C_p$ 、粘度  $\eta$ 、動粘性係数  $\nu$  の値は、参考文献<sup>12)</sup> から表 1 に示すように与えられる。

式 (1) と (2) の  $\alpha_m$  は  $N_{um}$  から与えられる。前解説<sup>4)</sup> で取り扱った直径 250 mm のセラミックロールを熔融亜鉛に浸漬する場合の  $\alpha_m$  と、本解説の半径  $a = 85$  mm の管 (ストーク) を熔融アルミニウムに浸漬する場合の  $\alpha_m$  は式 (3)、(4) のようになる。参考のため、熔融亜鉛に浸漬する半径  $a = 125$  mm のロールの場合を示すと式 (5)、(6) のようになる。

・ 熔融アルミニウム (半径  $a = 85$  mm)

$$\alpha_m = 1.523 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{流速 } u = 2 \text{ mm/s のとき}) \quad (3)$$

$$\alpha_m = 6.348 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{流速 } u = 25 \text{ mm/s のとき}) \quad (4)$$

・ 熔融亜鉛 (半径  $a = 125$  mm)

$$\alpha_m = 1.0 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{流速 } u = 2 \text{ mm/s のとき}) \quad (5)$$

$$\alpha_m = 3.7 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{流速 } u = 25 \text{ mm/s のとき}) \quad (6)$$

流速  $u = 25$  mm/s のとき、熔融アルミニウムの式 (4) の平均熱伝達係数  $\alpha_m$  は、熔融亜鉛の式 (6) の  $\alpha_m$  の 1.72 倍である。また、流速  $u = 2$  mm/s のとき、熔融アルミニウムの式 (3) の  $\alpha_m$  は、熔融亜鉛の式 (5) の  $\alpha_m$  の 1.52 倍である。

② 極端に大きな熱伝達係数  $\alpha$  を円柱表面に均等に与える場合は、もう一つの平均的な熱伝達係数を与える例である。ここでは熱伝達が極端に大きく雰囲気温度と表面温度が一致する場合を想定する。具体的には、大きな熱伝達係数  $\alpha_{\text{large}} = 10 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup>K を与えた場合に、円柱にどのような温度分布と熱応力となるかを理解する。

図 4 に③有限体積法 (各要素ごとに運動量保存則を解く解法)<sup>13)14)</sup> によって得られた、実際に近い局所的な熱伝達係数の分布を示す。図 4 では円柱表面の位置による変化を考慮した、局所的熱伝達係数を  $x/a$  関数として示している。ここでは、速度  $u = 25$  mm/s で半径  $a = 85$  mm のセラミック製円柱を熔融アルミニウムに浸漬する場合を、前々回の解説<sup>4)</sup> で取り上げた半径  $a = 125$  mm の円柱を熔融亜鉛中に浸漬する場合と比較している。図 4 において、 $a = 85$  mm の熱伝達係数の平均値は  $\alpha_m = 6.740 \times 10^3$  W/m<sup>2</sup>K であり、それは式 (4) の  $\alpha_m = 6.348 \times$

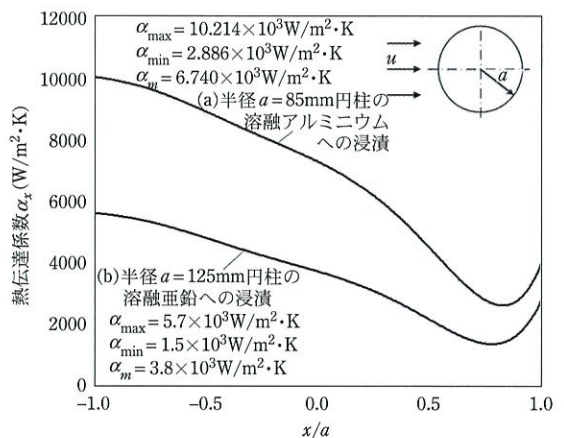


図 4 浸漬速度  $u = 25$  mm/s の熔融金属内の 2 次元円柱の  $x$  関数としての熱伝達係数 (有限体積法の解析結果) (a) 熔融亜鉛中の半径  $a = 125$  mm の円柱<sup>3)</sup>, (b) 熔融アルミニウム中の半径  $a = 85$  mm の円柱。



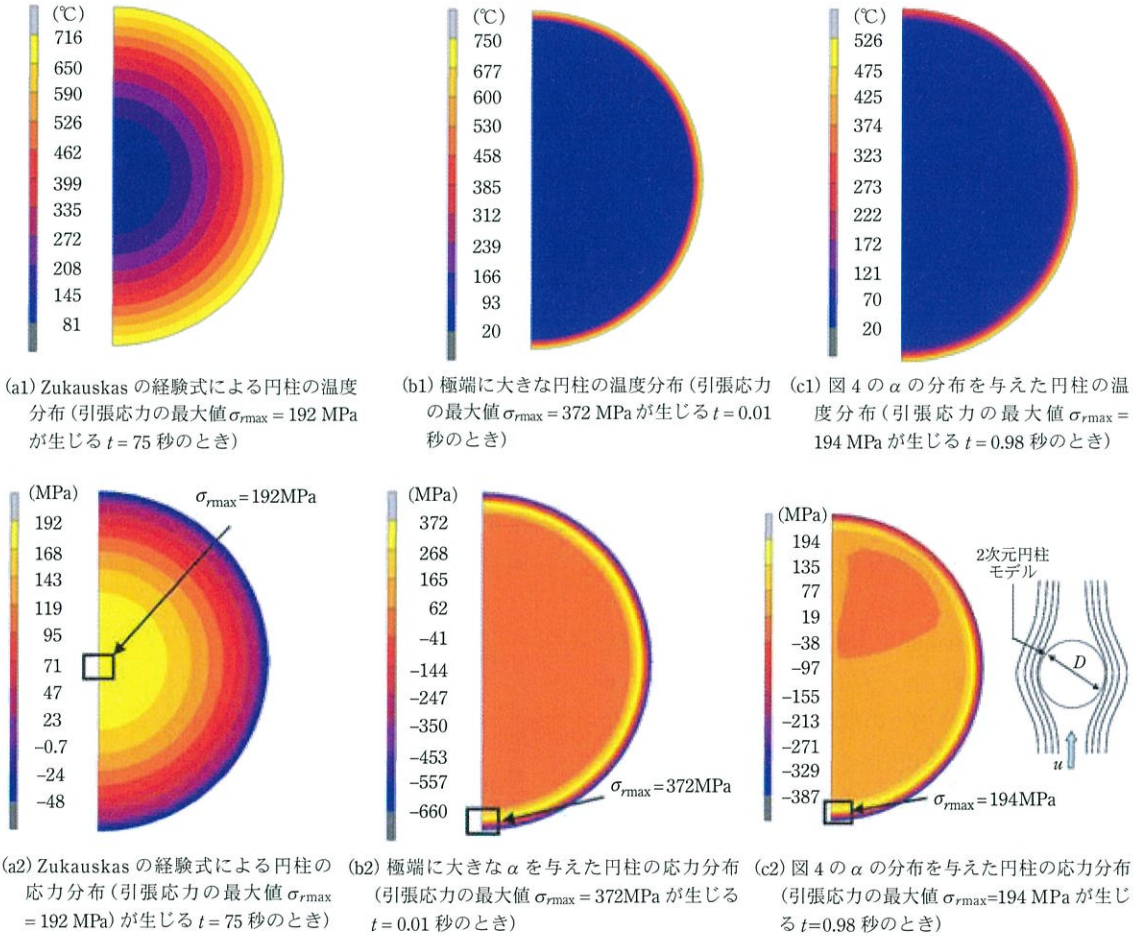


図5 ① Zukauskas の経験式 (図3 の①), ② 極端に大きな熱伝達係数 (図3 の②), ③ 有限体積法 (図3 の③) による解析結果の異なる  $\alpha$  ①~③ を与えた場合の引張応力の最大値が生じるときの円柱の温度分布と応力分布。

$10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  と良く一致している。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、それは式 (6) の  $\alpha_m = 3.7 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  と良く一致している。

図5に引張応力の最大値が生じる時間における温度分布と応力分布を示す。図5(a1)は、① Zukauskas の値を用いた場合の温度分布を、図5(a2)は、そのときの応力分布である。Zukauskas の熱伝達係数  $\alpha_{Zu}$  を用いる場合、円柱表面で一定の値を与えるので、円柱の温度分布と熱応力分布は軸対称となる。図5(a2)に示すように  $t = 75$  秒で、円柱の中心で最大応力  $\sigma_{r\max} = 192 \text{ MPa}$  が生じる。

② 極端に大きな熱伝達係数  $\alpha_{\max} = 10 \times 10^7 \text{ W/m}^2\text{K}$  を与えた場合、図3(b)に示すように、

円柱表面温度は極めて短時間で上昇し、その後一定となる。それに対応して、最大引張応力も極めて早く  $t = 0.01$  秒で  $\sigma_{r\max} = 372 \text{ MPa}$  が生じる。図5(b1), (b2)は、極端に大きな  $\alpha$  を用いた場合の温度分布と応力分布を示したものである。この場合にも円柱表面で一定の  $\alpha_{\max}$  を与えるので、円柱の温度分布と熱応力分布は軸対称となる。しかしこの場合は、表面近傍で、ごく初期の  $t = 0.01$  秒で極めて大きな温度差が生じ、その結果、図5(b2)に示すように、最大応力は表面のごく近傍で生じる。③有限体積法 (Finite volume method) によって求めた  $\alpha_{FVM} = (2.886 \sim 10.214) \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  を用いた場合 (図4参照)、図3(b), (c)より、0.98秒で

最大引張応力  $\sigma_{rmax} = 194 \text{ MPa}$  となる. この最大応力に到達するまでの時間は, Zukauskas の式を用いた場合よりもはるかに短い. しかし, その値は Zukauskas の式を用いた場合とほとんど同じである. 図 5 (c1), (c2) は, 有限体積法を用いて解析した場合の最大引張応力時の温度分布と応力分布を示したものである. 図 5 (c2) に示すように, 最大応力は二次元円柱の底部の表面近傍で生じている. これは, 短時間に生じる円柱よどみ部 ( $x/a = 0$ ) の表面近傍の温度差によって起きたものである.

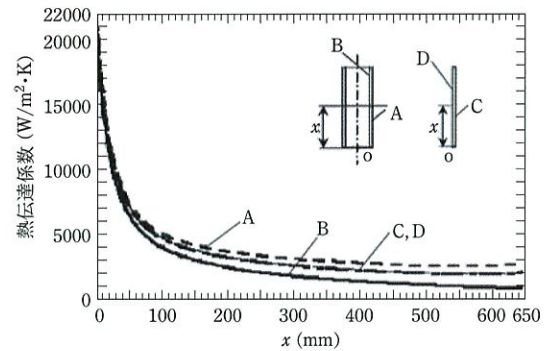
## セラミック製単純円筒と突起部付きストークを浸漬する際の熱伝達係数

図 1 (a), (b) に示す低圧鋳造機に使用される突起部の無い円筒形ストークと突起部付きストークの寸法は, 胴径が 170 mm で, 長さは 1300 mm である. 熱伝達係数の解析では, 有限体積法の laminar モデル<sup>13)14)</sup>を用い, 熱応力の解析では, 有限要素法の 4 辺形 4 接点要素を用いた. 熱応力の解析は, 図 2 に示すような解析モデルでは軸対称要素を用いて, 有限要素法で行った. この解析モデルは, 単純円筒モデル (図 2 (a)) の場合, 節点数 20816, 要素数 19500 であり, 突起部付きストーク (図 2 (b)) の場合, 節点数 16278, 要素数 14931 である. セラミックスはほとんど塑性変形を生じないことから, 解析は弾性解析とする. 溶融アルミニウムの温度は 750°C であり, ストークの初期温度は 20°C である.

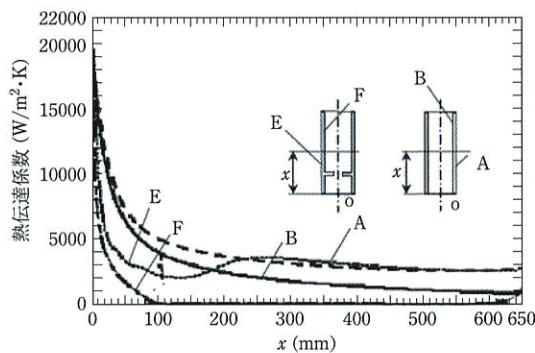
次に図 1 (a), (b) に示すストークを垂直に  $u = 25 \text{ mm/s}$  で浸漬させた場合の, ストーク内外表面の熱伝達係数  $\alpha$  について説明する. 2次元長方形モデルを用いた結果と軸対称モデルを用いた結果を図 6 (a) に示す. 2次元長方形モデルの結果は, 軸対称モデルでストークの径が無窮大となった場合に相当する. 軸対称モデルでは, 図 6 (a)

に示すように管の外側 A と内側 B の流れが異なる. 一方, 2次元モデルの両側 C, D では,  $\alpha$  の値はモデルの形状の対称性より一致している. また, 2次元モデルの C, D の値は, 軸対称モデルのストーク外側 A の  $\alpha$  と, 内側 B の  $\alpha$  の平均値と近い値となった. この理由は, 軸対称モデルのストーク内側の場合, 溶融アルミニウムが円筒内部に侵入する際に流速が少し減速され, その分外側の流速が大きくなるためであると考えられる.

次に, 図 2 (a), (b) に示す突起部の有無が, ストーク内外表面の熱伝達係数  $\alpha$  へ及ぼす影響を考察する. 図 6 (b) に, 突起部付きストークと突起部の無い単純円筒の熱伝達係数の分布を位置  $x$  の関数  $\alpha(x)$  として示す. 図 6 (b) より, ストーク内外面の最大値は下端部 ( $x = 0$ ) で生じ,  $x$  の増加とと



(a) 単純円筒の外側 A と内側 B ならびに 2次元直方形内外面 C, D の熱伝達係数の分布  $\alpha(x) = (16.090 \sim 0.831) \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  (浸漬速度  $u = 25 \text{ mm/s}$  のとき)



(b) 突起部付ストークの外側 E と内側 F の熱伝達係数と単純円筒の外側 A と内側 B の熱伝達係数の分布  $\alpha(x) = (15.09 \sim 0.034) \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  (浸漬速度  $u = 25 \text{ mm/s}$  のとき)



(c) 突起のあるストークの下端付近の流れ

図 6 セラミック構造体形状が 2次元直方形, 単純円筒, 突起部付ストークの場合の溶融アルミニウムへの浸漬における熱伝達係数の分布.



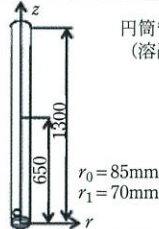
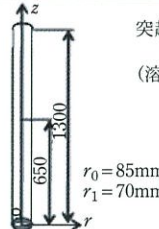
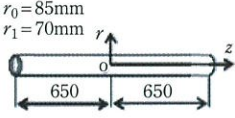
もにストーク上部で減少する。ここで、突起部の有無にかかわらず、ストークの外側は同一の円筒形状であるので、A、Eの $\alpha(x)$ は近い値となるようにも考えられる。しかし、実際には、図6(b)に示すように突起部付きストーク外側Eの $\alpha(x)$ は単純円筒モデル外側Aのその値よりも、入口から内面突起部の2倍くらいの位置( $x=0\sim 200$ (mm))まではかなり小さい値となる。この理由は、図6(c)に示すように応力集中モデルの突起部において熔融アルミニウムの内面側の流れが塞ぎ止められて、逆方向の流れが生じ、これが外面側の流れに影響して、流速を小さくするためである。

突起部のない単純円筒内側Bの $\alpha(x)$ より、突

起部付きストーク内側Fの $\alpha(x)$ は極端に小さい値となる。特に、ストーク下端部の最大値以外では、急激に減少してほとんど0となる。これは突起部によって熔融アルミニウムの流れが外表面でも妨げられるためである。このように有限体積法により、ストークの各部分に正確な $\alpha$ が与えられる。

表3に遅く浸漬する場合( $u=2$  mm/s)と速く浸漬する場合( $u=25$  mm/s)の $\alpha$ の値をまとめて示す。表3に示すように、突起部付きストークと突起部の無いストーク(単純円筒)を垂直に速度 $u=2$  mm/sで遅く浸漬する場合、ストークの全長の半分の位置まで円筒内側と外側表面( $r_1=70$  mm,  $r_0=85$  mm)に式(3)の熱伝達係数の

表3 ストーク・垂直円筒・水平円筒浸漬時の熱応力解析のための熱伝達係数 $\alpha$  ( $W/m^2K$ )

モデル	円筒管の垂直方向浸漬 (熔融アルミニウム, $T=750^\circ C$ )	突起部付きストークの 垂直方向浸漬 (熔融アルミニウム, $T=750^\circ C$ )	円筒管の水平方向浸漬 (熔融アルミニウム, $T=750^\circ C$ )
	 <p><math>r_0=85</math>mm <math>r_1=70</math>mm</p>	 <p><math>r_0=85</math>mm <math>r_1=70</math>mm</p>	 <p><math>r_0=85</math>mm <math>r_1=70</math>mm</p>
$u=2$ mm/s	<p>チューブの半分に達するまで段階的に浸す場合: <math>\alpha=1.523 \times 10^3</math></p> <p>Step 16 <math>\alpha=1.523 \times 10^3</math>を与えた Step 8 Step 2</p>	<p>チューブの半分に達するまで段階的に浸す場合: <math>\alpha=1.523 \times 10^3</math></p> <p>Step 16 <math>\alpha=1.523 \times 10^3</math>を与えた Step 8 Step 2</p>	<p>段階的に浸す場合: <math>\alpha=1.523 \times 10^3</math></p> <p>Step 6 Step 2 <math>\alpha=1.523 \times 10^3</math>を与えた</p>
$u=25$ mm/s	<p>(1) <math>t=0\sim 60</math>秒 外面に沿って <math>r_0=85</math>mm <math>z:0\sim 650</math>mm <math>\alpha=(2.534\sim 19.105) \times 10^3</math> 内面に沿って <math>r_1=85</math>mm <math>z:0\sim 650</math>mm <math>\alpha=(0.831\sim 19.516) \times 10^3</math> 下端面用 <math>z=0</math>mm <math>\alpha=16.090 \times 10^3</math> <math>\alpha=(0.831\sim 19.516) \times 10^3</math> <math>\alpha=(2.534\sim 19.105) \times 10^3</math> <math>\alpha=16.090 \times 10^3</math></p> <p>(2) <math>t=60</math>秒<math>\sim 600</math>秒 チューブの半分に達するまでの露出面用 <math>\alpha=0.831 \times 10^3</math></p> <p><math>\alpha=0.831 \times 10^3</math></p>	<p>(1) <math>t=0\sim 60</math>秒 内面と外面に沿って <math>r_1=70</math>mm <math>r_0=85</math>mm <math>z:0\sim 650</math>mm <math>\alpha=(0.035\sim 18.11) \times 10^3</math> 下端面用 <math>z=0</math>mm <math>\alpha=15.091 \times 10^3</math> <math>\alpha=(0.035\sim 15.281) \times 10^3</math> <math>\alpha=(2.527\sim 18.11) \times 10^3</math> <math>\alpha=0.25 \times 10^3</math> <math>\alpha=0.034 \times 10^3</math> <math>\alpha=0.25 \times 10^3</math> <math>\alpha=15.091 \times 10^3</math> <math>\alpha=(2.24\sim 3.64) \times 10^3</math> <math>\alpha=1.130 \times 10^3</math></p> <p>(2) <math>t=60</math>秒<math>\sim 600</math>秒 チューブの半分に達するまでの露出面用 <math>\alpha=0.034 \times 10^3</math></p> <p><math>\alpha=0.034 \times 10^3</math></p>	<p>(1) <math>t=0\sim 60</math>秒 外面に沿って <math>r_0=85</math>mm <math>\alpha=(2.886\sim 10.214) \times 10^3</math> 両端で <math>z=\pm 650</math>mm <math>\alpha=2.886 \times 10^3</math> 内面に沿って <math>r_1=70</math>mm <math>\alpha=2.886 \times 10^3</math> <math>\alpha=2.886 \times 10^3</math></p> <p><math>\alpha=(2.886\sim 10.214) \times 10^3</math></p> <p>(2) <math>t&gt;60</math>秒 すべての露出した表面について <math>\alpha=2.886 \times 10^3</math></p> <p><math>\alpha=2.886 \times 10^3</math></p>

一定値  $\alpha_m = 1.523 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  を段階的に与える。具体的には、ストークを溶融アルミニウム中に全長の半分の位置まで浸漬するのに  $t = 0$  秒 $\sim$ 328 秒要するので、表3に示すように16段階に分けた部分浸漬モデルを考え、 $\alpha_m = 1.523 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  の値を溶融アルミニウムに接する面に適用する。

突起部付きストークと単純円筒を  $u = 25 \text{ mm/s}$  で速く浸漬する場合、図6の有限体積法で求めた熱伝達係数を用いて熱応力を解析する。表3に示すようにその熱伝達係数は以下のように与える。

1. 浸漬時間  $t = 0 \sim 60$  秒の時、単純円筒モデルでは、ストーク内、外側表面において表3の値  $\alpha = (0.831 \sim 19.516) \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  を適用し、突起部付きストークでは、 $\alpha = (0.034 \sim 18.11) \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  を適用した。また、単純円筒モデルでは、ストーク底表面 ( $z = 0 \text{ mm}$ ) に図6(a)の最大値  $\alpha = 16.090 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  を適用し、突起部付きストークでは、図6(b)の最大値  $\alpha = 15.09 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  を適用した。

2. 浸漬時間  $t > 60$  秒の時、単純円筒モデルでは、ストーク全表面 ( $z = 0 \text{ mm}$ ) に図6(a)の最小値  $\alpha = 0.831 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  を適用し、突起部付きストークでは、図6(b)の最小値  $\alpha = 0.034 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  を適用する。

### 単純円筒と突起部付きストークを浸漬する場合の熱応力(遅い浸漬が望ましいこと)

図2(a), (b)に示す突起部無しストーク(単純円筒モデル)と突起部付きストーク(応力集中モデル)を、速度  $u = 2 \text{ mm/s}$  (遅い場合)と  $u = 25 \text{ mm/s}$  (速い場合)でストーク全長の半分(650 mm)の位置まで垂直に浸漬する場合の熱応力解析を行った。

遅く浸漬する場合の熱応力(突起部有り  $\sigma_{1\max} = 328 \text{ MPa}$ , 突起部無し  $\sigma_{1\max} = \sigma_{z\max} = 128 \text{ MPa}$ )

図7に遅く浸漬する場合 ( $u = 2 \text{ mm/s}$ ) の各時間における垂直応力の最大値と最小値  $\sigma_1, \sigma_3$  ならびに円柱座標応力成分  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \sigma_{rz}$  の最大値を示

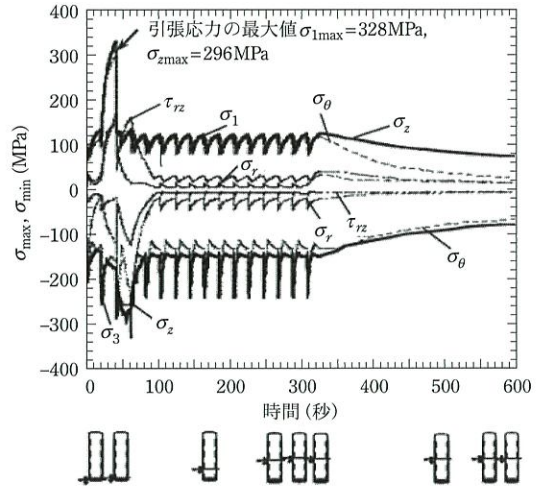


図7 突起部付きストークの最大熱応力の時間変化(浸漬速度  $u = 2 \text{ mm/s}$ ,  $t = 41$  秒のとき、引張応力の最大値、 $\sigma_{1\max} = 328 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{z\max} = 296 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{r\max} = 167 \text{ MPa}$ )。横軸の下の数字は溶融アルミニウムへの浸漬レベルを示す。

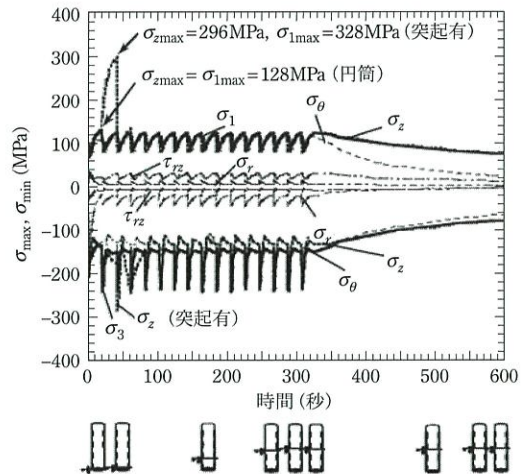


図8 単純円筒の最大熱応力の時間変化(浸漬速度  $u = 2 \text{ mm/s}$  のとき、引張応力の最大値  $\sigma_{1\max} = \sigma_{z\max} = 128 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{\theta\max} = 105 \text{ MPa}$ )。横軸の下の図は溶融アルミニウムへの浸漬レベルを示す。

す。また、比較のために単純円筒モデルの結果を図8に示す。最大引張応力  $\sigma_{1\max}$  に注目すると、ストークを浸漬後  $\sigma_{1\max}$  は上昇し、 $t = 41$  秒で最大値  $\sigma_{1\max} = 328 \text{ MPa}$  となり、その後急激に減少する。図7と図8を比べると、突起部の有無による違いは、突起部が浸漬する時間  $t = 20$  秒 $\sim$ 41 秒に限定



されており、他はほとんど一致している。突起部が無いと、浸漬初期に生じる引張応力の最大値ははるかに小さく  $\sigma_{1max} = \sigma_{zmax} = 128 \text{ MPa}$  となる。突起部付きストークと単純円筒の両者とも、浸漬レベルが突起部を過ぎてストークが所定の位置に浸漬するまでは、最大値はほとんど変化していないが、所定の位置に浸漬後、緩やかにその値は小さくなっている。なお、この応力の周期変動は、16段階に分けた部分浸漬モデルを用いて計算した影響である。

**早く浸漬する場合の熱応力(突起部有り)**  
 $\sigma_{1max} = 374 \text{ MPa}$ , 突起部無し  $\sigma_{1max} = \sigma_{zmax} = 246 \text{ MPa}$

図9にストークを速く浸漬する ( $u = 25 \text{ mm/s}$ ) 場合における各時間の  $\sigma_1, \sigma_3, \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \sigma_{rz}$  の最大値を示す。また、比較のために単純円筒モデルと応力集中モデルの  $\sigma_{zmax}$  の結果を図10に示す。図9より、 $\sigma_z$  の最大値  $\sigma_{zmax}$  と  $\sigma_1$  の最大値  $\sigma_{1max}$  はほぼ一致する。図9の最大引張応力  $\sigma_{1max}$  に注目すると、ストークを浸漬後速やかに  $\sigma_{1max}$  は上昇し、8.8秒で  $\sigma_{1max} = 374 \text{ MPa}$  となる。一方、単純円筒モデルでは、最大値  $\sigma_{1max} = 246 \text{ MPa}$  となり、応力集中モデルの最大値の方が大きな値となった。

**突起部の応力集中について**

単純円筒モデルの場合、速く浸漬した場合の最大引張応力の最大値  $\sigma_{\theta max} = 246 \text{ MPa}$  は、遅く浸漬した場合の最大値  $\sigma_{zmax} = 128 \text{ MPa}$  よりも大きい。また、突起部を有するストークの場合も、速く浸漬した場合の最大引張応力の最大値  $\sigma_{1max} = 374 \text{ MPa}$  は、遅く浸漬した場合の最大値  $\sigma_{1max} = 328 \text{ MPa}$  よりも大きい。また、表4に、突起部を有するストークの最大引張応力を単純円筒モデルの結果と比較して示す。

表4に示すように、浸漬速度  $u = 2 \text{ mm/s}$  で最大値の発生する時間  $t = 41 \text{ 秒}$  で比較すると、突起を有するモデルの最大値は、単純円筒モデルの最大値よりも2.7倍大きい。一方、浸漬速度  $u = 25 \text{ mm/s}$  でその時間  $t = 8.8 \text{ 秒}$  で比較すると、突起を有するモデルの最大値は、単純円筒モデルの最大値より

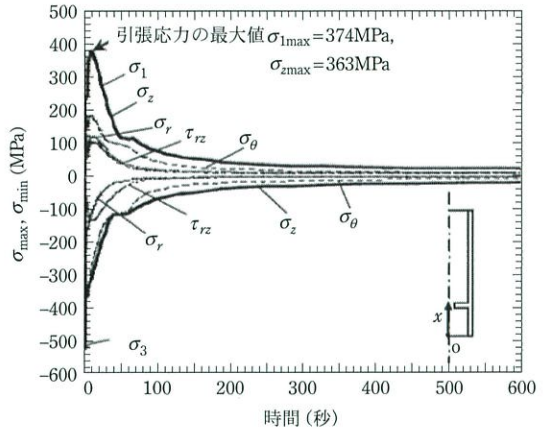


図9 突起部付きストークの各時間の最大熱応力の時間変化(浸漬速度  $u = 25 \text{ mm/s}$ ,  $t = 8.8 \text{ 秒}$  のとき、引張応力の最大値  $\sigma_{1max} = 374 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{zmax} = 363 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{\theta max} = 181 \text{ MPa}$ ).

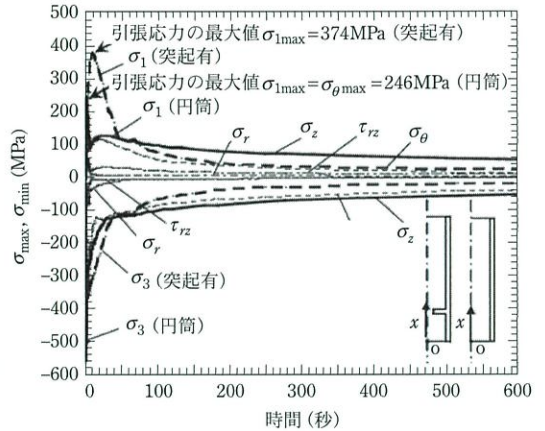


図10 単純円筒の各時間の最大熱応力の時間変化(浸漬速度  $u = 25 \text{ mm/s}$ ,  $t = 1.1 \text{ 秒}$  のとき、引張応力の最大値  $\sigma_{1max} = \sigma_{\theta max} = 246 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{zmax} = 209 \text{ MPa}$ ).

も3.7倍大きい。すなわちその応力集中係数は以下のように表される。

突起有無のそれぞれの最大応力に注目した応力集中係数:

$$K_t = (\sigma_{1max} = 328 \text{ MPa}) / (\sigma_{zmax} = 128 \text{ MPa}) = 2.56 \quad \text{浸漬速度 } u = 2 \text{ mm/s} \quad (7)$$

$$K_t = (\sigma_{1max} = 374 \text{ MPa}) / (\sigma_{zmax} = 246 \text{ MPa}) = 1.52 \quad \text{浸漬速度 } u = 25 \text{ mm/s} \quad (8)$$

突起ありの最大応力が発生する時間に注目した

表4 突起部付きストークの最大応力と単純円筒の最大応力の比較ならびに垂直円筒の最大応力と水平円筒の最大応力の比較.

	突起部付ストーク	単純円筒(垂直管)	水平管	
モデル				
$u=2\text{mm/s}$	<p><math>t=41</math>秒のとき★1 (引張応力の最大値発生)</p> <p><math>\sigma_1 = 328\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_z = 296\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_\theta = 162\text{MPa}</math> (B)  <math>\sigma_r = 167\text{MPa}</math> (A)  <math>\tau_{rz} = 150\text{MPa}</math> (A)</p>	<p><math>t=41</math>秒のとき (★1との比較)</p> <p><math>\sigma_1 = 120\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_z = 120\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_\theta = 110\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_r = 4\text{MPa}</math> (A)  <math>\tau_{rz} = 28\text{MPa}</math> (B)</p>	<p><math>t=20.5</math>秒のとき (引張応力の最大値発生)</p> <p><math>\sigma_1 = 128\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_z = 128\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_\theta = 105\text{MPa}</math> (B)  <math>\sigma_r = 4\text{MPa}</math> (A)  <math>\tau_{rz} = 21\text{MPa}</math> (C)</p>	<p><math>t=75</math>秒のとき (引張応力の最大値発生)</p> <p><math>\sigma_1 = 258\text{MPa}</math>  <math>\sigma_\theta = 258\text{MPa}</math>  <math>\sigma_z = 210\text{MPa}</math>  <math>\sigma_r = 11\text{MPa}</math>  <math>\tau_{rz} = 116\text{MPa}</math></p>
$u=25\text{mm/s}$	<p><math>t=8.8</math>秒のとき★2 (引張応力の最大値発生)</p> <p><math>\sigma_1 = 374\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_z = 363\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_\theta = 181\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_r = 116\text{MPa}</math> (A)  <math>\tau_{rz} = 98\text{MPa}</math> (B)</p>	<p><math>t=8.8</math>秒のとき (★2との比較)</p> <p><math>\sigma_1 = 101\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_z = 101\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_\theta = 97\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_r = 7\text{MPa}</math> (C)  <math>\tau_{rz} = 18\text{MPa}</math> (B)</p>	<p><math>t=1.1</math>秒のとき (引張応力の最大値発生)</p> <p><math>\sigma_1 = 246\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_\theta = 426\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_z = 209\text{MPa}</math> (A)  <math>\sigma_r = 89\text{MPa}</math> (A)  <math>\tau_{rz} = 98\text{MPa}</math> (C)</p>	<p><math>t=1.73</math>秒のとき (引張応力の最大値発生)</p> <p><math>\sigma_1 = 196\text{MPa}</math>  <math>\sigma_\theta = 196\text{MPa}</math>  <math>\sigma_z = 186\text{MPa}</math>  <math>\sigma_r = 112\text{MPa}</math>  <math>\tau_{rz} = 80\text{MPa}</math></p>

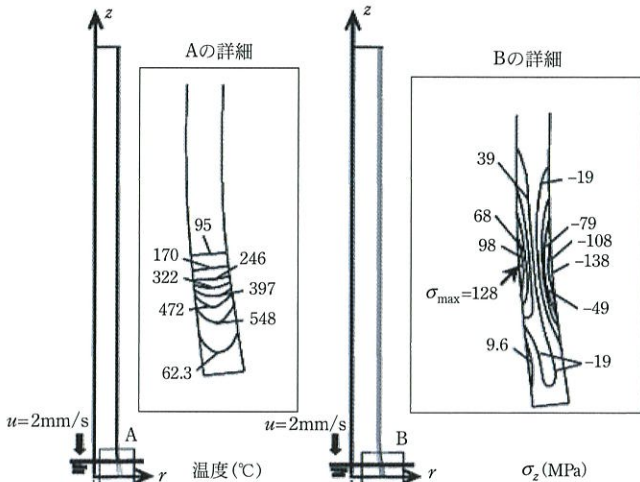


図11 単純円筒の温度分布と応力分布 $\sigma_z$ と変形図(浸漬速度 $u=2\text{mm/s}$ ,  $t=20.5$ 秒のとき, 引張応力の最大値 $\sigma_{1\text{max}}=\sigma_{z\text{max}}=128\text{MPa}$ ). 図の下半分は溶融アルミニウムへの浸漬レベルを示す(変位 $\times 50$ ).

応力集中係数:

$$K_t = (\sigma_{1\text{max}} = 328\text{MPa}) / (\sigma_{z\text{max}} = 120\text{MPa}) = 2.73 \quad \text{浸漬速度 } u = 2\text{mm/s} \quad (9)$$

$$K_t = (\sigma_{1\text{max}} = 374\text{MPa}) / (\sigma_{z\text{max}} = 101\text{MPa}) = 3.70 \quad \text{浸漬速度 } u = 25\text{mm/s} \quad (10)$$

### 熱応力発生メカニズム

図11に単純円筒モデルを遅く浸漬する場合( $u=2\text{mm/s}$ )の, 最大引張応力 $\sigma_{z\text{max}}=128\text{MPa}$ が生じる時間( $t=20.56$ 秒)での断面における温度分布, $\sigma_z$ の分布および変形図を示す. 図12に突起部付きストークを遅く浸漬する場合( $u=2\text{mm/s}$ )の最大引張応力( $\sigma_{1\text{max}}=328\text{MPa}$ ,  $\sigma_{z\text{max}}=296\text{MPa}$ )が生じる時間( $t=41$ 秒)での断面における温度分布, $\sigma_z$ の分布および変形図を示す. 図12に示すように, $\sigma_z$ の最大値 $\sigma_{z\text{max}}$ は浸漬部の少し上部の突起部下端根元付近内側の位置で $z$ 方向に生じている(その生じる位置と値 $\sigma_{z\text{max}}=296\text{MPa}$ は最大主応力の値 $\sigma_{1\text{max}}=328\text{MPa}$ に近い). したがって, $\sigma_{z\text{max}}$ の最大値はストーク下部が膨張しストーク断面が変形し, その段付き部下端根元付近内側の応力集中によって生じる.

図13に単純円筒モデルを速く浸漬する場合( $u=25\text{mm/s}$ )の, 最大引張応力 $\sigma_{\theta\text{max}}=246\text{MPa}$ が生じる時間( $t=1.1$ 秒)での断面における温度分布, 応力分布 $\sigma_\theta$ および変形図を示す. また, 図14に突起部付きストークを速く浸漬す



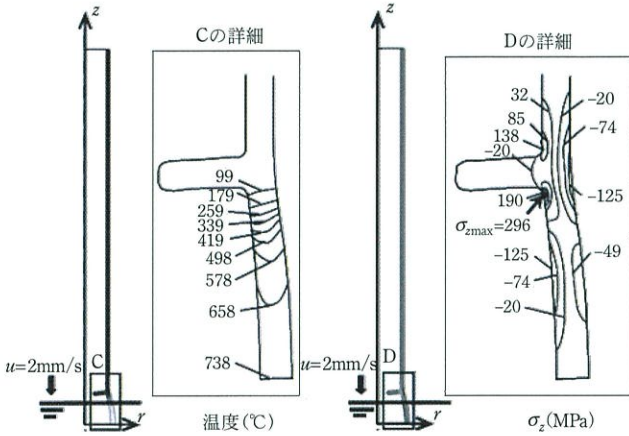


図 12 突起付きストックの温度分布と応力分布  $\sigma_z$  と変形図 (浸漬速度  $u = 2 \text{ mm/s}$ ,  $t = 41 \text{ 秒}$  のとき, 引張応力の最大値  $\sigma_{1\text{max}} = 328 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{z\text{max}} = 296 \text{ MPa}$ ). 図の下部は溶融アルミニウムへの浸漬レベルを示す (変位  $\times 50$ ).

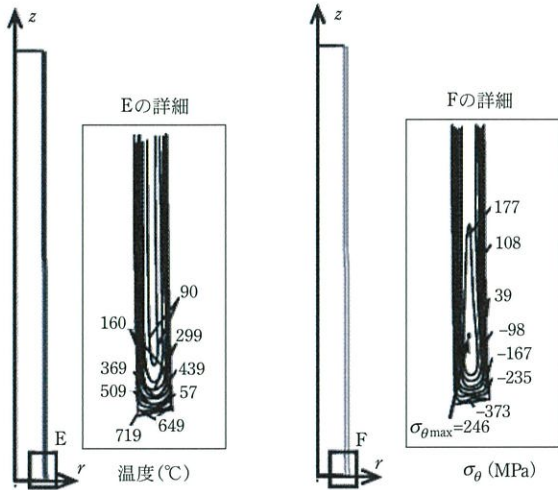


図 13 単純円筒の温度分布と応力分布  $\sigma_\theta$  と変形図 (浸漬速度  $u = 25 \text{ mm/s}$ ,  $t = 1.1 \text{ 秒}$  のとき, 引張応力の最大値  $\sigma_{1\text{max}} = \sigma_{\theta\text{max}} = 246 \text{ MPa}$ ) (変位  $\times 50$ ).

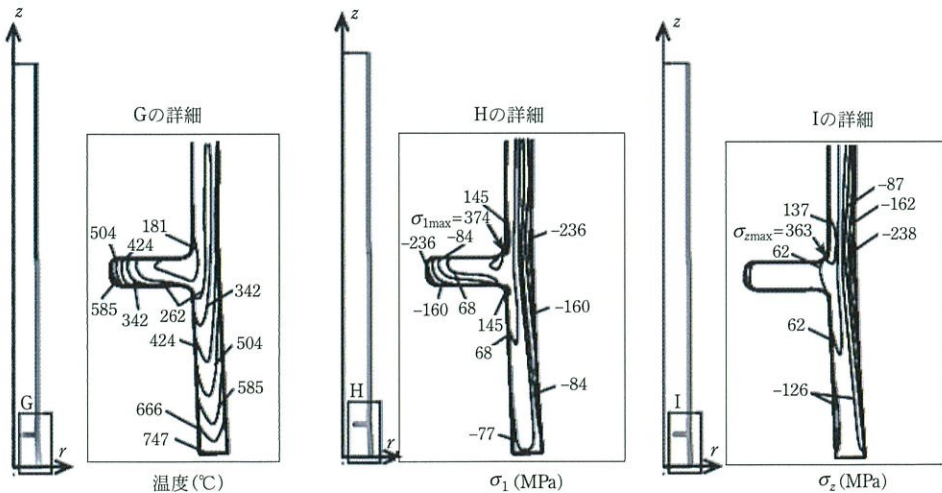


図 14 突起部付きストックの温度分布と応力分布  $\sigma_z$  と変形図 (浸漬速度  $u = 25 \text{ mm/s}$ ,  $t = 8.8 \text{ 秒}$  のとき, 引張応力の最大値  $\sigma_{1\text{max}} = 374 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{z\text{max}} = 363 \text{ MPa}$ ) (変位  $\times 50$ ).

る場合 ( $u = 25 \text{ mm/s}$ ) の、最大引張応力 ( $\sigma_{1\text{max}} = 374 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{z\text{max}} = 363 \text{ MPa}$ ) が生じる時間 ( $t = 8.8 \text{ 秒}$ ) での断面における温度分布、応力分布  $\sigma_z$  および変形図を示す。図示するように、 $\sigma_{1\text{max}}$  が生じているストーク突起付根部分と下端部では  $624^\circ\text{C}$  以上の温度差があり、加えて外表面との温度差、応力集中効果それぞれの相乗によって、そのため大きな熱応力  $\sigma_{1\text{max}} = 374 \text{ MPa} \approx \sigma_{z\text{max}}$  が生じる。以上のことから、遅く浸漬する場合 ( $u = 2 \text{ mm/s}$ ) と速く浸漬する場合 ( $u = 25 \text{ mm/s}$ ) では、 $\sigma_{\text{max}}$  の生じる要因が異なる。

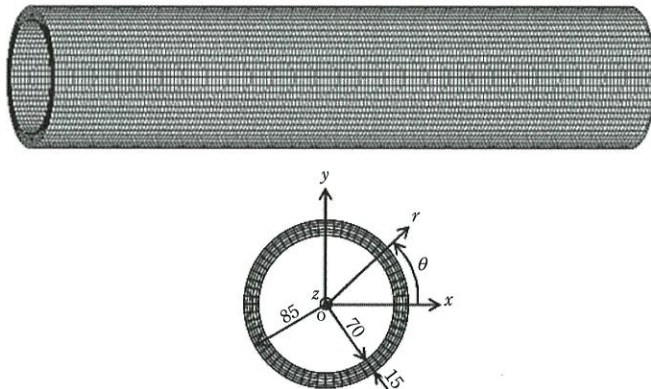


図 15 円筒を水平に浸漬するときの FEM メッシュ (要素数 = 45000, 節点数 = 55986)。

突起部の有無にかかわらず、円筒を垂直に浸漬する場合には、 $u = 2 \text{ mm/s}$  で浸漬する方が、 $u = 25 \text{ mm/s}$  で浸漬する場合より、熱応力を緩和できる。ただし、 $u = 25 \text{ mm/s}$  で浸漬する場合の最大応力が生じる時間はごく短い。垂直円筒に図 2 (a) のような突起部を設けることで応力集中が生じ、引張応力の最大値は突起部のない単純円筒の場合より 1.5~3.7 倍程度大きくなる。

## 円筒を水平に浸漬する場合の熱応力 (早い浸漬が望ましいこと)

ここでは、図 15 に示すようなセラミック製ストークを水平に浸漬する場合を取り上げる。具体的には、浸漬速度  $u = 2 \text{ mm/s}$  (遅い場合) と  $u = 25 \text{ mm/s}$  (速い場合) で、最深部が垂直モデルと同じ位置まで浸漬する場合の熱応力を解析し、円筒を垂直に浸漬する場合と比較する。

### 遅く浸漬する場合の熱応力

( $\sigma_{1\text{max}} = \sigma_{\theta\text{max}} = 258 \text{ MPa}$ )

水平円筒を速度  $u = 2 \text{ mm/s}$  で遅く溶融アルミニウムに浸漬するとき、式 (3) の  $\alpha_m = 1.523 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  を円筒内外面 ( $r_i = 70 \text{ mm}$ , 外半径  $r_o = 85 \text{ mm}$ ) に与える。具体的には、完全に浸漬するのに 210 秒要するので、表 3 に示す 6 種類の部分浸漬モデルを考え、 $\alpha_m = 1.523 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  の

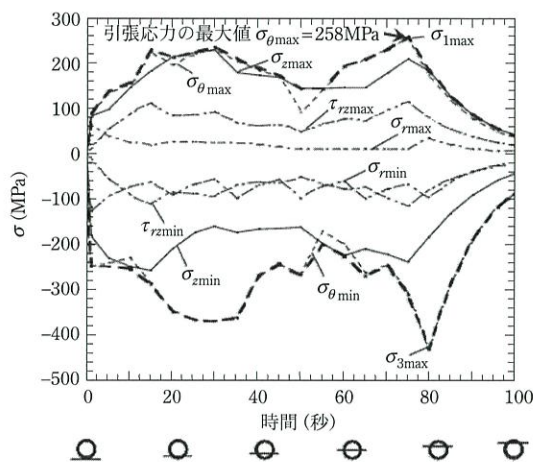


図 16 円筒を水平に浸漬するときの各時間の最大熱応力の時間変化 (浸漬速度  $u = 2 \text{ mm/s}$ ,  $t = 75 \text{ 秒}$  のとき、引張応力の最大値  $\sigma_{1\text{max}} = \sigma_{\theta\text{max}} = 258 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{z\text{max}} = 210 \text{ MPa}$ )。

値を溶融アルミニウムに接する面に適用した。

図 16 に遅く浸漬する場合 ( $u = 2 \text{ mm/s}$ ) の各時間における応力の最大値  $\sigma_1$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{rz}$  を示す。図 16 に示すように  $\sigma_{\theta\text{max}}$  は円筒を浸漬後緩やかに上昇し、 $t = 30 \text{ 秒}$  で  $\sigma_\theta = 230 \text{ MPa}$  となる。その後  $\sigma_\theta$  は徐々に減少していき、 $t = 50 \text{ 秒}$  から再び上昇に転じ、 $t = 75 \text{ 秒}$  で最大値  $\sigma_{\theta\text{max}} = 258 \text{ MPa}$  となり、その後は単調に減少する。

### 早く浸漬する場合の熱応力

( $\sigma_{1\text{max}} = \sigma_{\theta\text{max}} = 196 \text{ MPa}$ )

円筒を水平に速く浸漬する場合の  $\alpha$  は、次の値



を用いた。所定の位置に設置前 ( $t = 0 \leq 60$  秒) のとき、水平モデルの外側表面では図6の有限体積法の結果  $\alpha = 3.675 \times 10^3 \sim 18.13 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  を用いた。また、内側表面と円筒端部では図6の最小

値  $\alpha = 3.675 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  を用いた。また、所定の位置に設置後 ( $t > 60$  秒), 水平円筒の全表面で最小値  $\alpha = 3.675 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$  を与えた。

図17に速く浸漬する場合 ( $u = 25 \text{ mm/s}$ ) の各時間における応力の最大値  $\sigma_1, \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{rz}$  の時間経過を示す。速く浸漬する場合, 図17に示すように,  $\sigma_{\theta\max}$  は浸漬直後に急激に上昇するが,  $t = 1.73$  秒後には引張応力の最大値  $\sigma_{\theta\max} = 196 \text{ MPa}$  となる。すなわち遅く浸漬する場合 ( $u = 2 \text{ mm/s}$ ) の図16と速く浸漬する場合 ( $u = 25 \text{ mm/s}$ ) の図17を比べると, 図17の  $\sigma_{\theta\max}$  は1.73秒で最大値  $196 \text{ MPa}$  となるのに対し, 図16では75秒で最大値  $258 \text{ MPa}$  となり, 遅く浸漬するより, 速く浸漬する方が熱応力を緩和できる。このことは前解説で考察した結果と一致する<sup>4)15)</sup>。

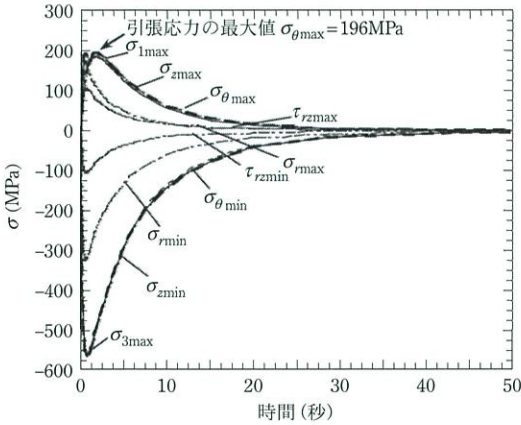
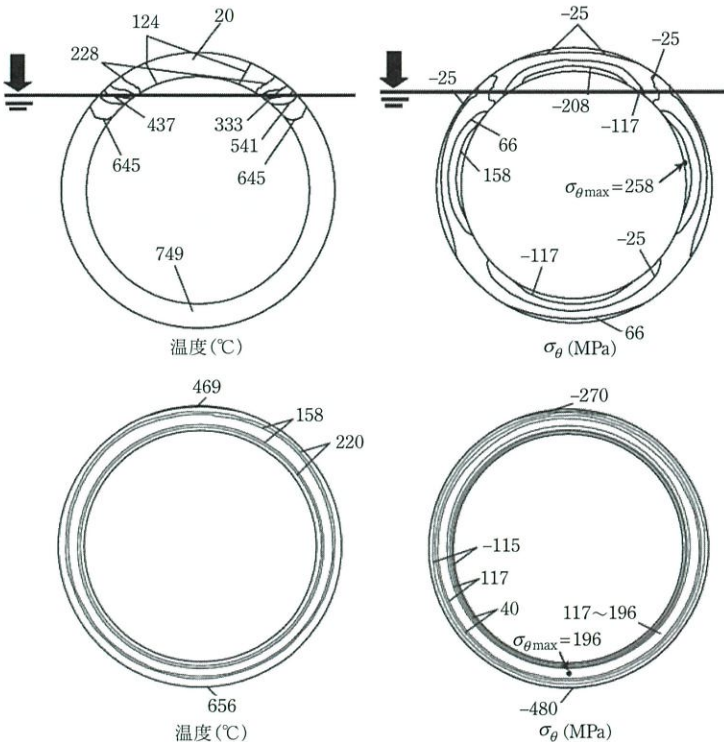


図17 円筒を水平に浸漬するときの各時間の最大熱応力と時間経過 (浸漬速度  $u = 25 \text{ mm/s}$ ,  $t = 1.73$  秒のとき, 引張応力の最大値  $\sigma_{1\max} = \sigma_{\theta\max} = 196 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{z\max} = 186 \text{ MPa}$ )。

**非軸対称変形によって引張応力の最大値  $\sigma_{1\max} = \sigma_{\theta\max} = 258 \text{ MPa}$  が発生すること**

図18(a)に遅く浸漬する場合 ( $u = 2 \text{ mm/s}$ ) の



(a) 円筒を水平に浸漬するときの両端  $z = \pm 650 \text{ mm}$  における温度分布と応力分布  $\sigma_\theta$  (浸漬速度  $u = 2 \text{ mm/s}$ ,  $t = 75$  秒のとき, 引張応力の最大値  $\sigma_{1\max} = \sigma_{\theta\max} = 258 \text{ MPa}$ )

(b) 円筒を水平に浸漬するときの両端  $z = \pm 650 \text{ mm}$  における温度分布と応力分布  $\sigma_\theta$  (浸漬速度  $u = 25 \text{ mm/s}$ ,  $t = 1.73$  秒のとき, 引張応力の最大値  $\sigma_{1\max} = \sigma_{\theta\max} = 196 \text{ MPa}$ )

図18 円筒を水平に浸漬するときの両端  $z = \pm 650 \text{ mm}$  における温度分布と応力分布  $\sigma_\theta$ 。

最大引張応力が生じる  $t=75$  秒の水平円筒の両端部  $z = \pm 650$  mm での温度分布と応力分布  $\sigma_\theta$  を示す。図示するように、 $t = 75$  秒で円筒中央部内面に  $\sigma_{\theta\max}$  が生じる。図 19 (a) に遅く浸漬する場合 ( $u = 2$  mm/s) の最大引張応力が生じる時間 ( $t = 75$  秒) の温度と  $\sigma_\theta$  の分布と変形図を示す。図 19 (a) より、最大応力が水平円筒端部の中心付近で生じた理由は以下のように考えられる。水平円筒下部が先に熱膨張することで、直径が大きくなろうとする。その際上下方向の温度差により円筒断面は円形ではなくだ円形状になる。このような変形は自由表面である円筒両端部で特に大きくなり、だ

円形の短径の内側で  $\sigma_{\theta\max}$  が生じる。

図 18 (b) に速く浸漬する場合 ( $u = 25$  mm/s) の最大引張応力が生じる  $t=1.73$  秒の水平円筒両端部  $z = \pm 650$  mm での温度分布と応力分布  $\sigma_\theta$  を示す。速く浸漬する場合 ( $u = 25$  mm/s) では、 $\sigma_{\theta\max}$  が生じている箇所では  $530^\circ\text{C}$  以上の温度差があり、熱応力  $\sigma_{\theta\max} = 196$  MPa が生じる原因となっている。図 19 (b) に速く浸漬する場合 ( $u = 25$  mm/s) の最大引張応力が生じる時間 ( $t = 1.73$  秒) の温度分布と応力分布  $\sigma_\theta$ 、ならびに変形図を示す。図 19 (b) より、速く浸漬する場合では大きな変形は生じていないことがわかる。以上のことから、遅く

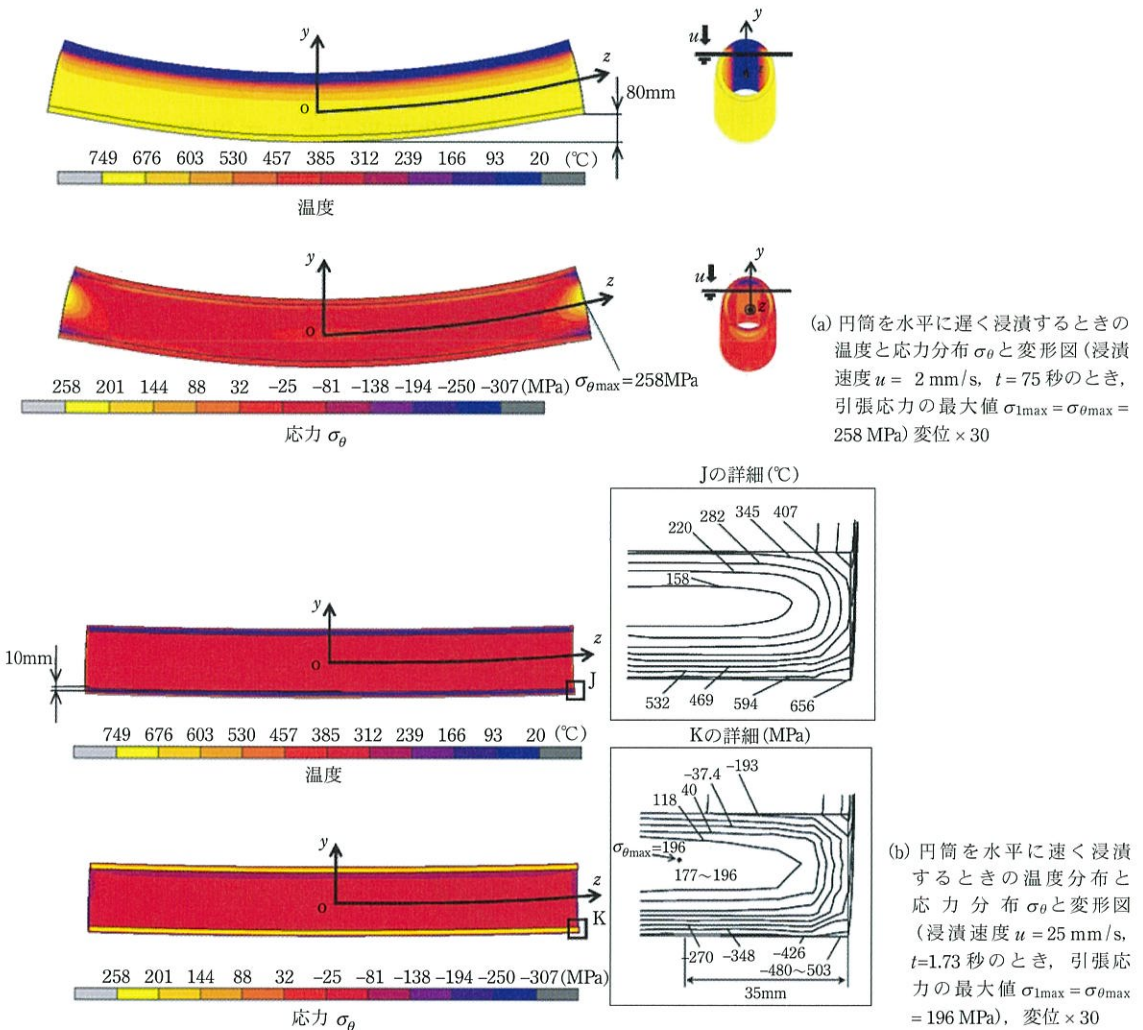


図 19 円筒を水平に浸漬するときの温度分布と応力分布  $\sigma_\theta$  と変形図 (変位  $\times 30$ )。



浸漬する場合 ( $u = 2 \text{ mm/s}$ ) と速く浸漬する場合 ( $u = 25 \text{ mm/s}$ ) では、 $\sigma_{\theta\max}$  の生じる要因が異なることがわかる。

## 単純円筒の垂直浸漬と水平浸漬の比較と考察

表4に円筒を垂直に浸漬するときと円筒を水平に浸漬するときの解析結果をまとめて示す。表4に示すように、円筒を垂直に浸漬するときは、遅く浸漬するときの最大応力①  $\sigma_{1\max} = \sigma_{z\max} = 128 \text{ MPa}$  より速く浸漬したときの最大応力  $\sigma_{1\max} = \sigma_{\theta\max} = 246 \text{ MPa}$  が大きい (①  $128 \text{ MPa} <$  ②  $246 \text{ MPa}$ )。その理由は、速く浸漬する場合には円筒肉厚内外の温度差が大となることと、円筒を垂直に遅く浸漬した場合の温度差による変形は軸対称変形のため比較的小さいことによるものと考えられる。従って、垂直モデルの場合では、遅く浸漬した方が速く浸漬した場合より、最大応力を緩和できる。

一方、円筒を水平に浸漬するときは、遅く浸漬するときの最大応力③  $\sigma_{1\max} = \sigma_{\theta\max} = 258 \text{ MPa}$  が、速く浸漬したときの最大応力④  $\sigma_{1\max} = \sigma_{\theta\max} = 196 \text{ MPa}$  より大きい (③  $258 \text{ MPa} >$  ④  $196 \text{ MPa}$ )。特に、水平に遅く浸漬する場合の③  $258 \text{ MPa}$  は、垂直に遅く浸漬する場合の①  $128 \text{ MPa}$  より格段におおきく、他の最大値②、④よりも大きい。一方、速く浸漬した場合の最大応力④  $196 \text{ MPa}$  は温度差による影響によるもので、垂直モデルの速く浸漬する場合の②  $246 \text{ MPa}$  と極端な違いはない。すなわち、水平浸漬で③  $258 \text{ MPa} >$  ④  $196 \text{ MPa}$  となる理由は、遅く浸漬した場合、円筒の水平浸漬の変形は非軸対称変形のため大きな値となることである。これを防ぐため、水平モデルの場合では、速く浸漬した方が遅く浸漬した場合より、最大応力を緩和できる。結局、遅く浸漬する場合の垂直モデルでは軸対称変形しか生じないが、水平モデルでは非軸対称の大きな変形が生じる。このため、垂直モデルと水平モデルの最大応力を緩和する浸漬条件が異なる結果となる。

## おわりに

低圧ダイカスト装置(図1(a))では、耐熱性及び耐溶損性の面からセラミック製ストークが用いられている。しかし、セラミックスは破壊靱性が小さいので、このストークを溶融アルミニウム中に浸漬する際の熱応力を注意する必要がある。そこで本解説では、ストークを溶融アルミニウム中 ( $750^\circ\text{C}$ ) に浸漬する際に、最大引張応力が最小となるような浸漬方法について考察した研究を解説した。また、応力集中部とみなしうる突起部を考慮し、単純円筒モデルとも比較検討して考察した。得られた結論を以下に示す。

(1) 2次元及び軸対称モデルを用いた有限体積法による正確な熱伝達係数  $\alpha$  を解析した結果、軸対称モデルでは、管の外側と内側の流れが異なること。一方、2次元モデルの両側では、 $\alpha$  の値はモデルの形状の対称性より一致していることを示した。この理由として、軸対称モデルのストーク内側の場合、溶融アルミニウムが円筒内部に侵入する際に流速が少し減速され、その分外側の流速が増えるためであると考えられる。

(2) 円筒を垂直に浸漬する場合、 $u = 2 \text{ mm/s}$  で遅く浸漬する方が  $u = 25 \text{ mm/s}$  で早く浸漬する場合より、最大応力を緩和できる。その理由として、速く浸漬する場合には肉厚内外の温度差により熱応力が大となることが挙げられる。また、垂直に浸漬した場合の熱膨張変形が軸対称となるため、その影響は比較的小さい。

(3) 垂直円筒に突起部(図2)を設けることで応力集中が生じ、引張応力の最大値は突起部の無い単純円筒より1.5~2.5倍程度大きくなる。突起部に最大応力が生じる時間における突起部なしの単純円筒と比較すると図2(b)の突起の応力集中係数は  $K_t = 2.7 \sim 3.7$  である。

(4) 円筒を水平に浸漬する場合、 $u = 2 \text{ mm/s}$  で遅く浸漬するより、 $u = 25 \text{ mm/s}$  で速く浸漬する方が最大応力を緩和できる。その理由は、水平に浸漬するときに生じる非軸対称変形が、速く浸漬

することで相対的に小さくなるためである。

(5) 円筒を水平に遅く浸漬した場合、水平モデルの端部で $\sigma_{\theta\max}$ が生じる原因は大きな非軸対称変形が生じるためである。一方、円筒を垂直に遅く浸漬した場合、変形は常に軸対称であるので、大きな $\sigma_{\theta\max}$ が生じない。このような理由で、円筒を垂直に浸漬する場合と水平に浸漬する場合の最大応力を緩和する条件は異なる。

#### 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) N.A. Noda, M. 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 sheet, Engineering Failure Analysis, **15** (2008), 261.
- 4) 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溶融亜鉛に浸漬する際の熱応力, 金属, 94 6 (2024), 63.
- 5) 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 (17) 溶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, 金属, 94 7 (2024), 83.
- 6) 日本機械学会編 : 伝熱工学資料, 改訂第 4 版, 日本機械学会, (1986), 61.
- 7) 野上信悟 : 大型構造用サイアロン, 日立金属技法, **15** (1999), 115.
- 8) 是永逸生 : サイアロンセラミックス製 Al 溶融関連部品の開発, 素形材, **32** (1991), 12.
- 9) A. Zukauskas: Heat transfer from tubes in cross flow, In: Hartnett JP, Irvine Jr TF, editors, Advances in Heat Transfer, 8, New York: Academic Press, (1972), 131.
- 10) T. Adachi, Y. Tamura and T. Yoshioka: Techniques of automatic operation in continuous galvanizing line, Kawasaki Steel Technical Report, **34** (1996), 18.
- 11) K. Nishimura, K. Katayama, T. Kimura, T. Yamaguchi and M. Ito: Newly develop techniques for improving the quality of continuous hot dip plating strips, Hitachi Technical Report, **65** 2 (1983), 121.
- 12) 日本機械学会編 : 伝熱工学資料, 改訂第 4 版, 日本機械学会, (1986), 323.
- 13) H. S. Li and C. Mei: Thermal stress in SiC element used in heat exchanger, Journal Cent. South Univ. Technol., **12** 6 (2005), 709.
- 14) I. T. Al-Zaharnah, B. S. Yilbas and M. S. J. Hashmi: Conjugate heat transfer in fully developed laminar pipe flow and thermally induced stresses", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, **190** (2000), 1091.
- 15) 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.

のだ・なおあき 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賞。