

**焼嵌めで構成されたセラミックスリーブローラ稼動中におけるシャフトの
抜けに及ぼす接合部の形状・寸法の影響*****Effect of the Joint Shape on the Coming out of the Shaft from the Shrinkly Fitted
Ceramic Sleeve During Rotation**

高瀬 康*¹, デディ スルヤディ*², 野田 尚昭*³, 佐野 義一*⁴, 熊崎 誠一*⁵
 (Yasushi TAKASE) (Dedi SURYADI) (Nao-Aki NODA) (Yoshikazu SANO) (Seiichi KUMASAKI)

Abstract

In this paper, the loosening and coming out of a roller shaft is considered when a ceramics sleeve is shrinking fitted to two steel shafts. Under smaller shrink fitting ratio, the coming out behavior during rotation can be realized by the FEM simulation where the rotation of the roller is replaced by the load shift in the circumferential direction on the fixed roller. However, under larger shrink fitting ratio the shaft does not come out although care should be taken for the risk of sleeve fracture due to the larger thermal expansion of steel shaft. The effects of geometries such as the contact length, shaft thickness and tapered shaft on the coming out are discussed in order to design the contact portion of this system. The results indicate that the contact length is more effective than other parameters, such as friction coefficient and elastic modulus of the shaft.

Key words

contact problem, ceramics, fixing, finite element method, structural design, friction and wear, shrink fitting, coming out

* 1 正会員, 九州工業大学技術部(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1), takase@mech.kyutech.ac.jp

* 2 非会員, 九州工業大学大学院(同上), suryadi.dedi@gmail.com

* 3 非会員, 九州工業大学大学院工学研究院(同上), noda@jmech.kyutech.ac.jp

* 4 非会員, 九州工業大学大学院工学研究院(同上), sano.yoshikazu029@mail.kyutech.jp

* 5 非会員, 九州工業大学大学院(同上), n344119s@tobata.isc.kyutech.ac.jp

1 緒言

自動車用鋼板をはじめとする高級鋼材を生産するための熱処理炉（図1参照）では、ローラを用いて鋼材の移送が行われている。このローラには、ステンレス耐熱鋼にセラミックス溶射でコーティングされた胴部と、耐熱鋼の軸部を溶接、焼嵌め等で接合し、スリーブ内部を水冷する構造のローラ（ハースロールといわれる）が、主として用いられている。このローラは使用中に、コーティング固有の母材と異なる熱的特性や付着特性に起因して比較的早期に肌あれ、摩耗等の問題が生じるので、その改善が求められている¹⁾。また、ローラ内部を水冷するために熱損失が無視できない。

そこで、図2のように胴部材料全体をセラミックスとし、その両端に鋼製軸を嵌合させた、中空部を空冷するローラ構造を検討している。胴部材料を耐熱性・耐摩耗性²⁾・耐腐食性³⁾に優れたセラミックスにすることで、現状のコーティングに起因する欠陥を防止でき、ローラ寿命を飛躍的に延長させることができる。また、円筒状セラミックスの接合法として最も適している焼嵌め接合にすることで^{4), 5)}、ローラの交換やメンテナンスに要する時間を短縮することができる。一方で、軸部には線膨張係数がセラミックスに比べ約4倍大きい鋼を用い、焼嵌め接合部においてセラミックスは靱性が低いため^{6), 7)}、焼嵌め接合では胴部セラミックススリーブの張割れ（図3参照）が問題となる^{8), 9)}。

このような接合構造に関して、著者等はこれまでに高温環境下で使用されるセラミックス同士を組み立てた構造のメッキ用ロール¹⁰⁾、連続酸洗設備用セラミックス製ロール¹¹⁾、ならびに高温環境下で使用される加熱炉中セラミックローラ¹²⁾を取上げ、その強度解析を行ってきた。そして、軸スリーブの肉厚を薄くすることでセラミックスリーブ内側に生じる引張応力を低減できるなどの結論が得られた。しかし、セラミックスが脆性材料であるため、接合部には低い焼嵌め率を用いる必要があり、使用中にスリーブからシャフトが抜ける現象に対する検討が必要である。

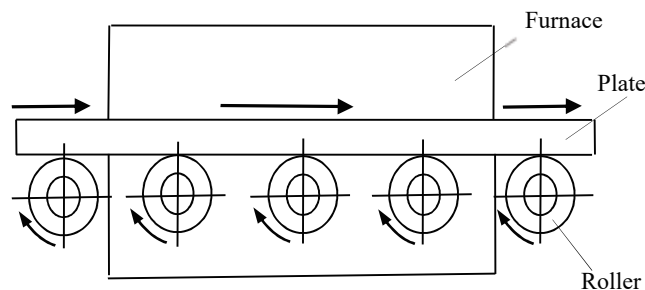


Fig.1 Layout of rollers in heating furnace

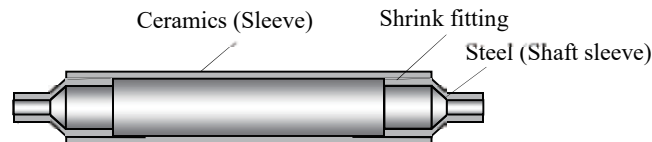


Fig.2 Roller structure

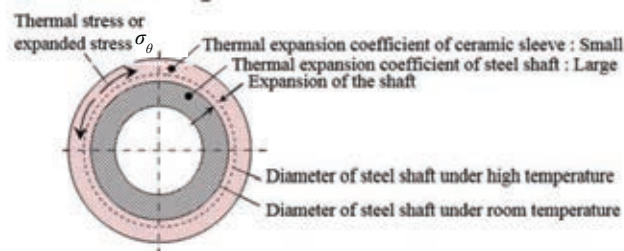


Fig.3 Thermal stress (or expanded stress due to shaft) σ_θ of ceramic sleeve at shrink fitting portion

例えば、本研究対象の加熱炉用とは異なるメッキ鋼板製造ラインにおいて、本研究と同じ構造のローラを試験的に使用した際に、セラミックスリブから軸が抜け出すトラブルが複数件生じている。セラミックローラの適用を考えている加熱炉中搬送ローラ等には、すべり軸受が用いられることが多いので、軸移動の拘束がないか又は軸移動範囲が大きい条件で用いられる。このため、このような軸の抜け出しが問題となる。たとえ、軸移動が小さな公差範囲内で拘束されている場合でも、軸の抜け出しが起きると、スラスト方向荷重が生じて軸受部の発熱や摩耗が生じ、軸の円滑な回転が阻害されることが予想される。ところで、加熱炉用ローラの設計に関して、長年の経験に伴う多くの技術的蓄積を有するにも拘わらず、本研究背景となる低焼嵌率と抜け防止の相反する課題の解決が求められる場面で、これまでの経験が有効な解決手段となりえず、焼嵌接合の合理的設計法の確立は停滞してきた。そこで著者等は、FEM（有限要素法）を用いて、セラミックスリブの両端で焼嵌めされた鋼製シャフトスリブからなるローラモデルを対象に、シャフトスリブの抜け現象の解明を試みた。そして、軸材の弾性係数やスリブとの摩擦係数を小さくすれば抜けが生じる^{1,2)}ことやそのメカニズムを考察した。

前報の焼嵌め部の抜けに関する評価手法の合理性を実証する目的も含めて、本研究では、接合部の焼嵌め条件の中で、設計上有用と考える、寸法・形状などの抜けに対する設計条件を明らかにしたい。

2 解析モデルと境界条件

研究対象ローラの基準モデルは図4に示すとおりで、抜けに関係する軸受は軸移動を拘束しないすべり軸受とする。解析に用いたモデルと負荷条件を図5に示す。モデルは図5に示すように、実体の1/2長、FEM要素分割には、六面体の一次要素を用い、要素数は約 1.5×10^5 である。要素サイズは、スリブとシャフトの接触部で最小 $1.25\text{mm} \times 1.25\text{mm} \times 6\text{mm}$ とした。解析コードはMarc、解析タイプは静的構造解析である。またステンレス耐熱鋼製シャフトの負荷が塑性変形に達しない範囲にあることや、セラミックスは破断に到るまでマクロ的な塑性変形を生じないことから、材料構成則は弾性体とする。接触部のねじり負荷の影響については、軸方向のせん断応力に比べて周方向のせん断応力が小さいため、ここでは無視する。なお、接合部の接触条件には摩擦モデルとして、stick-slipモデル、bilinearモデルの2種類がある。反復判定過程から摩擦力を決定するstick-slipモデルではデータが膨大となり、解析に長時間を要するので本解析では、変位に基づく単純な判定から摩擦力を決定するbilinearモデルを採用した。スリブとシャフト間の摩擦係数は $\mu=0.3$ とする。以上の条件を基準条件とする。

本研究では、シャフトの抜けが生じ易い常温を想定する。抜けに影響する焼嵌め部の形状・寸法的な要因として、焼嵌め率、接合長さ、シャフトスリブ厚さ、それにシャフトスリブ形状に注目する。図5に示すように焼嵌め代を $\delta=(d_1-d_2)$ 、 d_1 をシャフト外径、 d_2 をスリブ内径とすれば、焼嵌め率は、 δ/d と定義される。

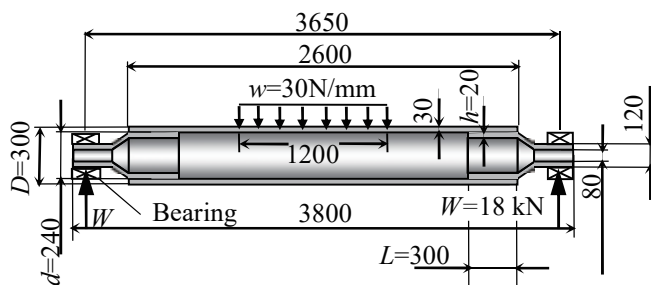


Fig.4 Dimensions of the basic model [mm]

ここで、嵌合部直径 $d=240\text{ mm}$ は $d \approx d_1 \approx d_2$ と近似できる．そこで、 $\delta/d = 0.01 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ (基準 0.2×10^{-3}) の範囲で変化させ考察する．接合長さは、焼嵌め径 d_1 の $0.5 \sim 2$ 倍、 $L=120 \sim 480\text{ mm}$ (基準 300 mm)、シャフトスリーブ厚さは $h=10 \sim 40\text{ mm}$ (基準 20 mm) で変化させ、シャフトスリーブ肉厚形状は均一厚とテーパ状、逆テーパ状の 3 種に変えてそれらの影響について考察する．なお、これらの要因は軸の強度および高温炉中のセラミックスリーブの割れにも影響するが、この要因についてはここでは考慮していない．これらの要因については著者等^{12),13)}の報告がある．そこで述べているように、抜けの挙動は、焼嵌め前のシャフト先端部(図 8, C 点)を起点として、その軸線上の変位で評価する．使用した FEM 解析ソフトでは、焼嵌め代 δ を設定することで、シャフトとスリーブに生じる変形や応力を求めることができる．

表 1 にローラ構成材料の物性値を示す．軸部は実用化を検討している中でも比較的安価で強靱な合金鋼とし、スリーブを窒化珪素セラミックスとする．また、解析には用いないが参考までに熱膨張係数も両材で比較するために示しておく．

3 解析方法

稼働中のローラを模擬するために用いた負荷条件は、実体の 1/2 モデルで、軸部を単純支持とし、搬送される最大級の鋼材による分布荷重 $w=30\text{ N/mm}$ をローラスリーブに負荷するものとする．図 6 に示す負荷と回転との関係において、軸端部外表面の点 A に対応する点に注目すると、初期に円周下端にある A 点は、 180° 回転後には円周上端に移る (図 6 (b))．このような回転挙動を模擬するにあたって、図 7 に示すようにローラを回転せずに点 A を初期位置に固定させたままで、スリーブ部への荷重と対応する軸荷重 W を、一定間隔で角度 θ_0 ずつ周方向に移行させることを繰り返すことによってモデル化する．すなわち、荷重負荷を受けた状態でのローラの回転を、回転しないローラに荷重が周方向に移動しながら作用する問題に置き換える．通常の離散化数値解析と同様に、ここでは荷重の連続的な移動を不連続な周方向の荷重移動でモデル化

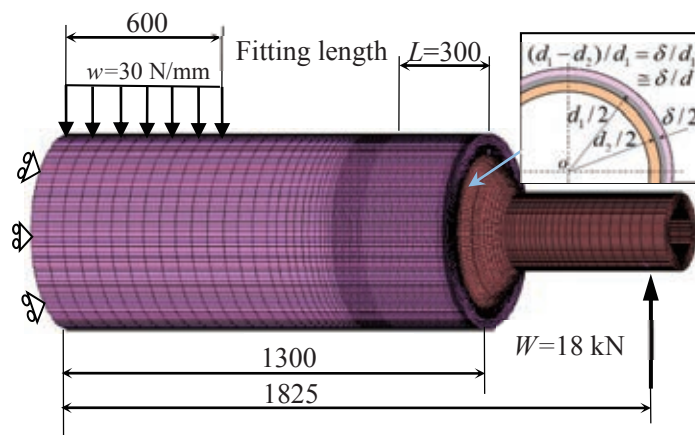


Fig.5 Analytical half basic model and FEM mesh diagram.

Table 1 Material properties

	Ceramics	Steel
Young's modulus [GPa]	300	210
Poisson's ratio	0.28	0.3
Tensile strength [MPa]	500	600
Mass density [kg/m ³]	3200	7800

する．ここで初期荷重位置 $\theta=0^\circ$ は繰返し数 $N=0$ に相当する．また， $\theta=360^\circ$ は繰返し数 $N=1$ に相当する．また，本解析では，解析時間を考慮して荷重移動角度 $\theta_0=12^\circ$ を用いる．ここで， $\theta=12^\circ$ ，解析法最小移動角 $\theta=6^\circ$ によって得られた変位に関して， $\theta_0=12^\circ$ による変位差は 1%程度で一致したことを著者等の研究¹²⁾で確認している．すなわち，本論文で用いる解析方法は，市販の FEM 解析コードを単純に利用するのではなく，ローラの回転を，固定した状態のローラに準静定な荷重を円周方向に連続的に作用させて模擬する問題として解析する．なお，回転による慣性力の焼嵌めに与える影響は十分小さいことを確認している．

4 接合部の設計条件と抜け

接合部の設計条件としての基本的な要因の抜けへの影響を，焼嵌め率，接合長さ，軸スリーブの肉厚および形状を変化させて考察する．なお，ここで扱う要因は，単に抜けへの影響をみるものであることを断っておく．仮に抜けに対して好影響が明らかになっても，セラミックスリーブおよび軸自体の強度の問題との両立が求められ，全ての課題を克服できる設計が別途必要である¹³⁾．

4.1 設計条件と抜け量

接合部の各設計要因毎に，軸端中心点 C のローラ回転に伴う z 方向変化をみる．

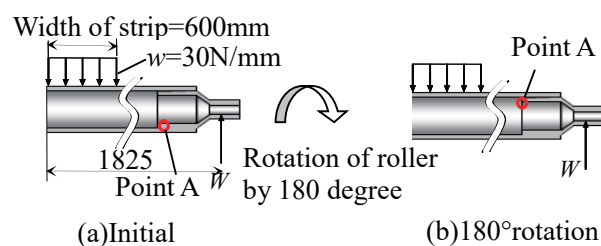


Fig.6 Dimensions and loading condition of real hearth roller

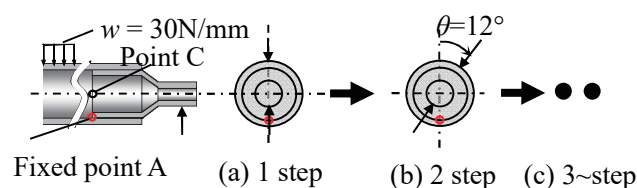


Fig.7 Simulation for the rotation by step changing loading point

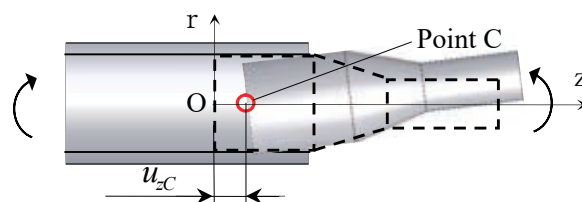


Fig.8 Modeling of coming out and displacement u_c

4.1.1 焼嵌め率の違いによる影響

焼嵌め率の違いによる抜けに対する影響としては、スリーブ、シャフト共にセラミックスで構成されたためつき浴中ロールにおいて、 0.01×10^{-3} は、初期に軸の抜けが生じたのに対して $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ に設計変更した後は、2例以上正常に使用された非公表結果がある。

図9に焼嵌め後の中心点Cを $N=0$ として、 z 方向変位 u_C (図8) を荷重回転サイクル N に対応させて示す。繰り返し数 $N=1$ では荷重が1周した状態である。図で、焼嵌め時 ($N=0$) で u_C が負になるのは焼嵌め率が大きくなると軸の半径方向圧縮変形が大きくなるので、その直交方向である軸方向には伸ばされて負の側に軸端部が入り込む量が大きくなるためである。焼嵌め率が小さい $\delta/d=0.01 \times 10^{-3}$ と 0.1×10^{-3} では、 u_C は単調増加し、サイクルを増やせば抜けていく可能性が高いといえる。また、焼嵌め率 $\delta/d=0.4 \times 10^{-3}$ でもサイクルの増加につれわずかに大きくなっているので、抜ける可能性があると判断される。しかし鉄鋼製ローラで用いられるような焼嵌め率の大きい $\delta/d=1.0 \times 10^{-3}$ に注目すると、サイクルの増加に対して u_C はわずかに減少し、サイクルを増やしても、抜ける可能性は低いとみられる。

4.1.2 接合長さの違いによる影響

図10は接合長さ L を変化させて、 N に対する z 方向変位 u_C をみたものである。基準にした長さ $L=300\text{mm}$ 、その半分の $L=150\text{mm}$ 、および嵌合部直径 d と同じ $L=240\text{mm}$ 、半分の $L=120\text{mm}$ 、2倍の $L=480\text{mm}$ と長さを変えて解析した。図10によると、接合長さ L が小さくなるとサイクル N に対する u_C の変化率は大きくなり、抜けやすくなり、直径の2倍 $L=480\text{mm}$ では u_C の増加はみられず、抜けにくいと判断される。このことは、経験的にとられている軸嵌合長さの考え方と合致する。

4.1.3 シャフトスリーブ厚さの違いによる影響

図11はシャフト肉厚の違いによるサイクル N に対する z 方向変位 u_C をみたものである。基準のシャフト

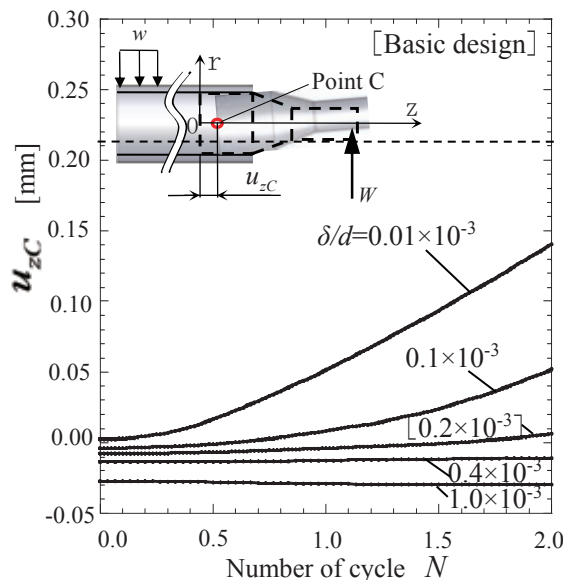


Fig.9 The displacement u_C vs. number of cycle for different shrink fitting ratio ($L=300\text{mm}$, $h=20\text{mm}$)

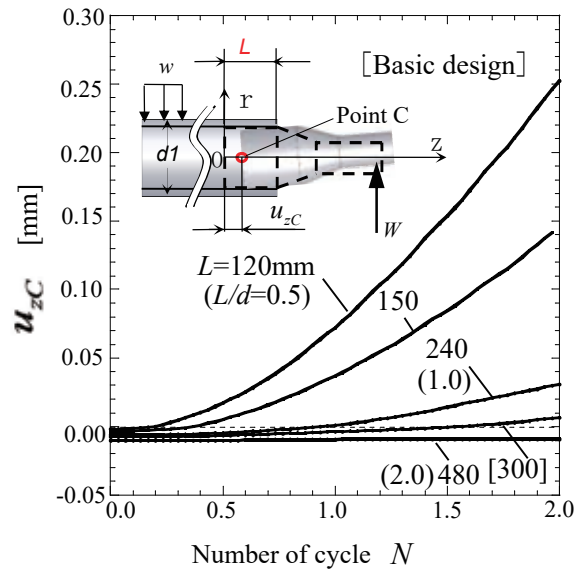


Fig.10 The displacement u_{zC} vs. number of cycle for different length ($\delta/d=0.2 \times 10^{-3}$, $h=20\text{mm}$)

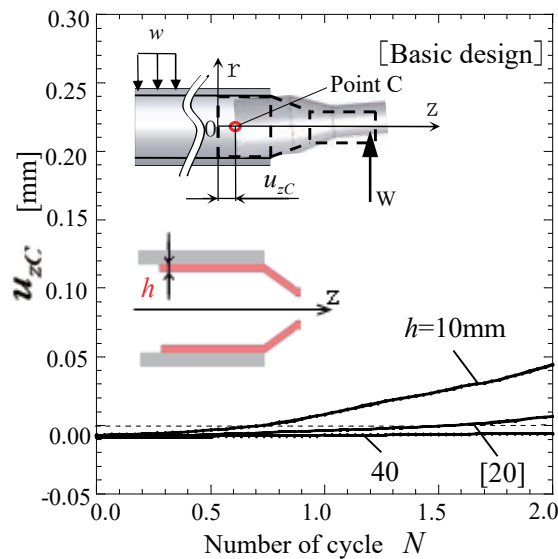


Fig.11 The displacement u_{zC} vs. number of cycle for different thickness ($\delta/d=0.2 \times 10^{-3}$, $L=300\text{mm}$)

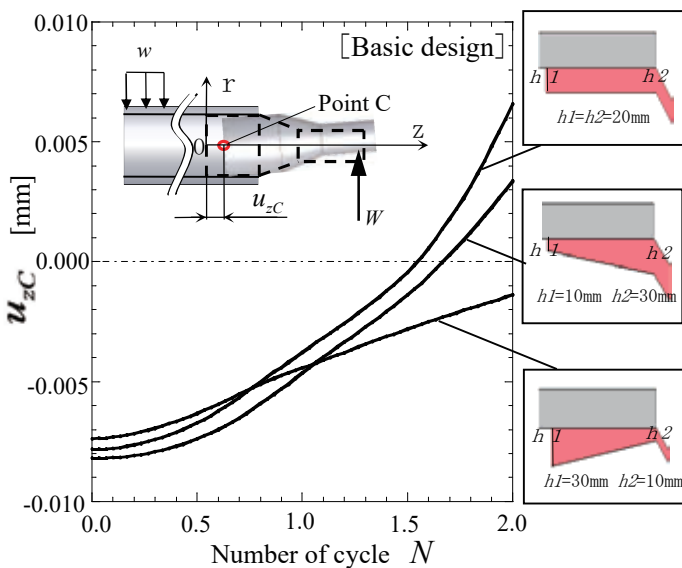


Fig.12(a) The displacement u_{zC} vs. number of cycle for different form of shaft ($\delta/d=0.2 \times 10^{-3}$, $L=300\text{mm}$)

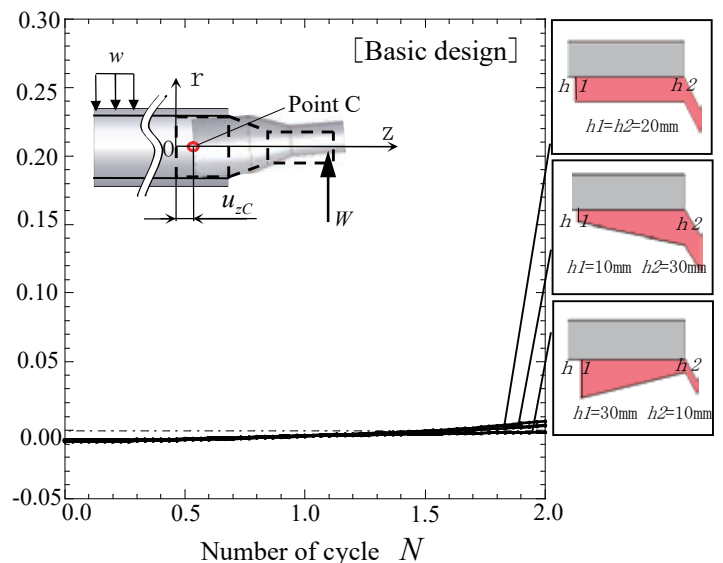


Fig.12 (b) The displacement u_{zC} vs. number of cycle for different form of shaft ($\delta/d=0.2 \times 10^{-3}$, $L=300\text{mm}$)

厚さ $h=20\text{mm}$ に対して、半分の厚さ $h=10\text{mm}$ 、倍の厚さ $h=40\text{mm}$ と厚さを変えて解析した。図 11 によると、シャフトの厚さ h が小さくなるとサイクルに対する u_c の変化は大きくなり、抜けやすくなると判断される。

4.1.4 シャフトスリーブの断面形状の違いによる影響

図 12(a) はシャフトの断面形状の違いによるサイクル N に対する z 方向変位 u_c をみたものである。基準のシャフトの形状に対して、シャフトの形状をテーパ状にしたものと逆テーパ状に変えて解析を行った。図 12(a) によると、 $N=0$ における u_c はシャフト端部の形状が薄くなるほど、負の側に大きくなるが、これは焼嵌め時の z 方向への変形が大きくなるためと考えられる。また、シャフトの形状をテーパ状にすると、サイクルに対する u_c の変化は小さくなり、シャフト先端が厚いテーパ ($h_l=30\text{mm}$) が最も抜けにくくなると判断できる。図 12(b) より、シャフトの断面形状の違いによる抜けへの影響は小さいと考えられる。

4.2 異なる接合条件における抜け易さの評価と比較

4.2.1 抜け易さの評価パラメータ

回転曲げモデルにおいては、軸直角方向負荷の回転に伴う円周方向変化に伴って生じるシャフトの抜け出し (u_c の時間変化) を評価し、抜け易さとして回転あたりの抜け量 du_c/dN で表し図 13 に示す。ここでは、回転曲げにおける、シャフトの抜け易さ du_c/dN として $N=1.5\sim 20$ における値 $du_c/dN \equiv (u_c|_{N=2} - u_c|_{N=1.5})/N$ を用いる。この理由は、図 9, 10, 11 において N が大きいほど抜け挙動 du_c/dN が大きくなっていき、傾きが一定となる傾向が認められるためである。

4.2.2 接合条件の違いにおける抜け易さの比較検討

接合条件の違いにおける抜け易さを du_c/dN として、図 14, 15, 16 に関係を示す。図 14 によると焼嵌め率 $\delta/d=0.5\times 10^{-3}$ あたりでシャフトが抜けないことがわかる。また、図 15 では接合長さ $L=450\text{mm}$ で、図 16 ではシャフトの肉厚 $h=40\text{mm}$ でシャフトが抜けないことがわかる。

4.2.3 形状・寸法の基準条件における抜け防止策

基準条件 ($\delta/d=0.2\times 10^{-3}$, $L=300\text{mm}$, $h=20\text{mm}$, テーパ) では、抜け速度 du_c/dN が 0 にならない。抜けを防ぐためには図 14~16 から、 $\delta/d>0.5\times 10^{-3}$, $L>500\text{mm}$, $h>45\text{mm}$ のいずれかで設計すればよい。その場合、セラミックススリーブの張割れに関する強度設計を合わせて行う必要がある。

5 形状・寸法以外の設計条件の影響

形状・寸法の実用上の変範囲内で所期の目標、すなわちセラミックススリーブの張割れとシャフト抜けの両立が困難な場合が想定される。そこで、その他の要因、ここでは接合部の摩擦係数とシャフト材の弾性係数の実用上可能な範囲における抜けへの影響を考察する。スリーブとシャフトとの焼嵌め接触部の摩擦係数を $\mu=0.2, 0.3$ (基準), 0.4 に変えて u_c に対する影響を図 17 に示す。また、シャフト部材として弾性係数 $E_{sh}=210\text{GPa}$ (鋼) に対して、弾性係数の大きな $E_{sh}=300\text{GPa}$ (窒化珪素セラミックス), 小さな $E_{sh}=100\text{GPa}$ (片状黒鉛銑鉄) を用いる場合の、 u_c に対する影響を図 18 に示す。図 17, 18 より摩擦係数、弾性係数共に小さくすると抜けやすくなる。そこで、図 19 にシャフトの抜け易さ du_c/dN で評価すると、摩擦係数、シャフトの弾性係数をそれぞれ最大 ($\mu=0.4$, $E_{sh}=300\text{GPa}$) にしても抜けの防止は困難なことが分かる。この結果をみても、シャフトの抜けの要因としては寸法の影響が大きいことがわかる。

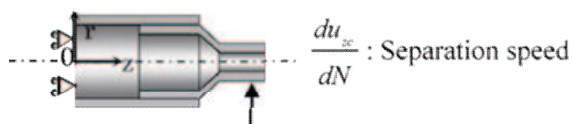
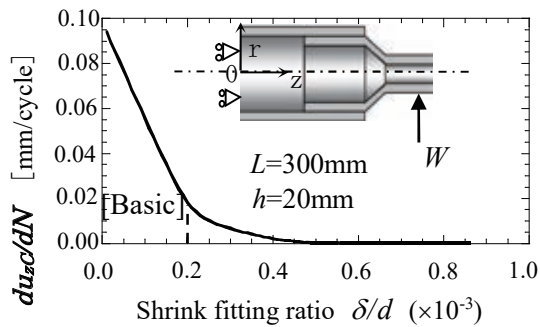
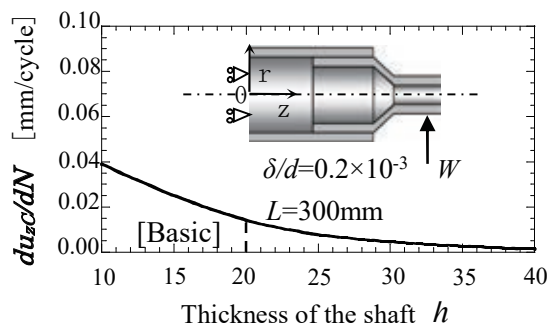
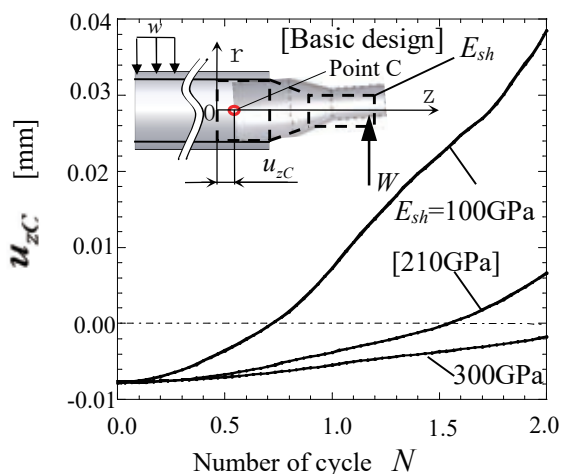
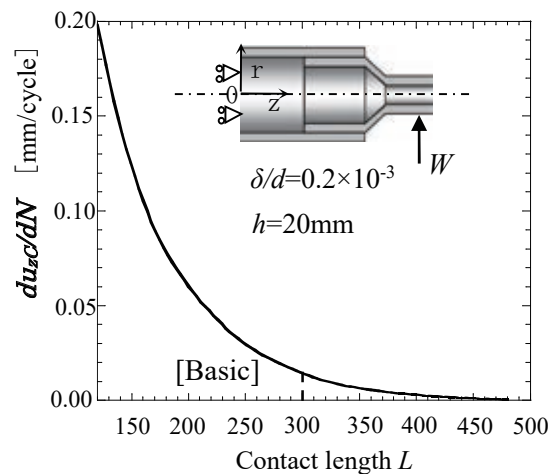
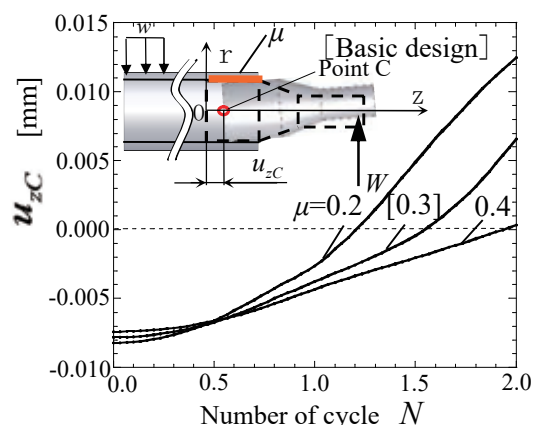
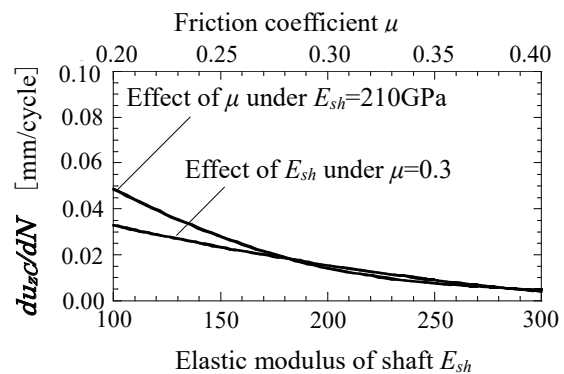


Fig.13 Rotating separation speed

Fig.14 Rotating separation speed (δ/d)Fig.16 Rotating separation speed (h)Fig.18 The displacement u_c vs. number of cycle for different Elastic modulus of shaft E_{sh} .Fig.15 Rotating separation speed (L)Fig.17 The displacement u_c vs. number of cycle for different friction coefficient μ . ($\delta/d=0.2 \times 10^{-3}$, $L=300\text{mm}$, $h=20\text{mm}$)Fig.19 Rotating separation speed (μ , E_{sh}) ($\delta/d=0.2 \times 10^{-3}$, $L=300\text{mm}$, $h=20\text{mm}$)

6 結言

本研究では、セラミックススリーブの両端に鋼製軸スリーブを焼嵌めで接合されたセラミックローラの特性上低焼嵌め率の条件で接合されるため、稼働中に懸念されるシャフト抜けの問題に着目した。曲げ荷重をうけるローラの回転を、荷重点を一定角度ずつ円周にそって移行していくことで模擬し、抜け現象についてFEM解析を用いてシミュレーションした。焼嵌めの主たる設計条件である接合部の焼嵌め率、接合長さ、シャフトの肉厚、シャフト断面形状等形状・寸法的要因が抜けに及ぼす影響をセラミックススリーブ外形 300mm、肉厚 30mm、長さ 2600mm、鋼製軸スリーブ肉厚 20mm、接合部直径 240mm、焼嵌め率 0.2×10^{-3} 、曲げ荷重 18kN を基本モデルとして解析を行い、抜けについて考察した。以下に焼嵌め接合条件の設計に関してえられた有用な結論を述べる。

(1) 焼嵌め率と形状・寸法的要因（接合長さとシャフトの肉厚軸断面形状）をそれぞれ大きくすると抜け防止効果が示された。シャフトの断面形状については、シャフト接合端で肉厚にした逆テーパ形状が抜けにくいとその効果は小さい。

(2) 形状・寸法的要因を、実用上可能と考えられる変動範囲で抜け防止の効果をみると、接合長さが最も大きく、基本モデルにおいて 500mm 以上、接合部直径のおよそ 2 倍で抜けが生じない。

(3) 形状・寸法以外で、接合部の摩擦係数 (0.2~0.4) とシャフトの弾性係数 (100~300GPa) の影響を調べた結果、いずれもその抜け防止に対する影響は小さかった。

なお、加熱炉用ローラの設計に関して、長年の経験に伴う多くの技術的蓄積を有するにも拘わらず、本研究背景となる低焼嵌率と抜け防止の相反する課題の解決が求められる場面での解決手法がなかった。すなわち、焼嵌接合に関して、直径や焼嵌率以外の接合部の設計要因の定量的な扱いなどの合理的設計法の確立は停滞していた。このような観点からみれば、本研究により得られた最大の成果は、焼嵌率の大小が抜けに連結する経験を合理的に説明できたことを含めて、抜け評価の定量的取扱いを可能にしたことにあると考えている。この抜け評価法は、本研究と異なる寸法、材質の組合せにも同様に適用できると考える。

参考文献

- 1) 藤井正浩, 吉田彰, 石丸純, 重村貞人, 谷和美: セラミックス溶射ローラの転がり疲れに及ぼす溶射皮膜厚さの影響, 日本機械学会論文集 C 編, 72, 716 (2006), 1354.
- 2) 小野拓郎: 高強度セラミックス開発の現状と将来への展望, 日本機械学会誌, 86, 774 (1983), 470.
- 3) 劉権栄, 森利之, 小林秀彦, 三田村孝: 鉄鋼スラグ及びその主成分に対する Si₃N₄ 焼結体の耐腐食性に及ぼす雰囲気の影響, 日本セラミックス協会学術論文誌, 98, 1136 (1990), 348.
- 4) Li, W. Noda, N.A. Sakai, H. and Takase, Y.: Analysis of Separation Conditions for Shrink Fitting System Used for Ceramics Conveying Rollers, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 5, 1 (2011), 14.
- 5) Li, W. Noda, N.A. Sakai, H. and Takase, Y.: Thermal Stress Analysis for Shrink fitting System used for Ceramics Conveying Rollers in the Process of Separation, Key Engineering Materials, 452-453(2011), 241.
- 6) 原田昭治, 野田尚昭, 上原修, 永野光芳: HIP 焼結窒化けい素の引張強度とその寸法効果, 日本機械学会論文集 A 編, 57, 539 (1991), 1637.
- 7) 小川衛介, 清水健一郎, 濱吉繁幸, 熊谷則雄, 大坪靖彦, 野田尚昭, 高瀬康, 岸和司, 菖蒲一久, 田原竜夫, 前田英司, 古賀慎一, 松田泰三: 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実用化評価, 日立金属技報, 28 (2012), 50.
- 8) 露成正一, 野田尚昭, HENDRA, 高瀬康: 搬送用ローラーにおけるセラミックス製スリーブの焼嵌め接合部に生じる最大応力について, 日本機械学会論文集 A 編, 74, 743 (2008), 919.

- 9) Noda, N.A. Hendra. Takase, Y. and Tsuyunaru, M.: Maximum Stress for Shrink Fitting System Used for Ceramics Conveying Rollers, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2, 11(2008), 1410.
- 10) Noda, N.A. Yamada, M. Sano, Y. Sugiyama, S. and Kobayashi, S.: Thermal Stress for All-Ceramics Rolls Used in Molten to Produce Stable High Quality Galvanized Steel Sheets, Engineering Failure Analysis, 15, 4(2008), 261.
- 11) Noda, N.A. Hendra. Oosato, M. Suzumoto, K. Takase, Y. and Li, W. : Strength Analysis for Shrink Fitting System Used for Ceramics Rolls in the Continuous Pickling Line, Key Engineering Materials, 462-463(2011), 1140.
- 12) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 原田正太, デデイスルヤディ, 熊崎誠一:高温炉中で使用されるセラミックスローラー稼動中におけるシャフトの抜け, 日本鉄鋼協会論文集, 鉄と鋼, 101, 5 (2015), 10.
- 13) 松田慎太郎, デデイスルヤディ, 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 原田正太:加熱炉中セラミックローラーの構造設計に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編, 79, 803 (2013), 989.