

セラミック製スリーブロール稼動中のシャフトの抜け出しを生じさせる駆動力

野田 尚昭・佐野 義一・高瀬 康・堀田 源治

はじめに

これまでにセラミック製ロールを製鉄機械分野に応用するため、必要となる種々の問題を解説してきた^{1)~10)}。例えば、自動車用鋼板などの高品質の鋼板を搬送するための熱処理炉（図1）には、鉄鋼搬送用ロールが使用されている、この場合、外側にセラミック溶射コーティングを施した鋼製スリーブが用いられているが、ロールの温度を低下させるために、ロールの内部を水冷する必要がある。しかし、鋼の線膨張係数はセラミックスに比べ約4倍大きいため、生じる熱応力がセラミック層の密着強度を上回り、クラック、剥離、摩耗等のロール表面の破損を引き起こす。これにより、ロールの寿命はかなり短くなる。その構造をセラミック製スリーブロールとすることにより、寿命を大幅に延長することができる¹¹⁾¹²⁾。

図2は、両端に鋼の軸と耐熱性、耐食性、耐摩耗性の高いセラミックスリーブからなる新しいセラミックロールを示しており、寿命を大幅に延

長することができる¹¹⁾¹²⁾。しかし、セラミックスの脆性のために小さな焼嵌め率のみ使用される^{13)~15)}ため、動作中にスリーブからシャフトが抜け出す新しい問題が生じ、その対策が必要となる。

そこで前々回の解説では、現象をシミュレーションするため、荷重負荷状態でのロールの回転を、回転しないロール上の円周方向の荷重移動に置き換える「荷重移動法」によって、この現象を数値解析で再現した^{16)~18)}。膨大な計算時間を要するため、繰返し数5回程度の制約があったが、焼嵌め率、摩擦係数などが、軸抜け出しに影響することを明らかにした。さらに、前解説では、FEM解析における要素分割数が少なくてすむ2次元交番荷重モデル（図3）を用いた研究を解説し、交番荷重を40回以上繰り返す際の、内プレートの抜け出し挙動のシミュレーションが可能であることを示した。これらの解説によって、シャフトの抜け出し挙動が数値的にも実現できることを明らかにした。

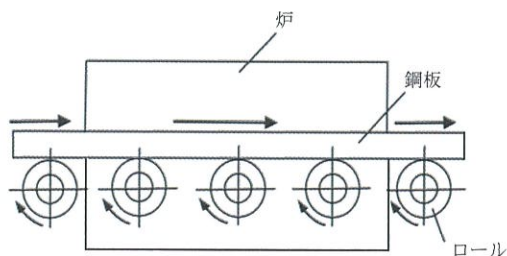


図1 加熱炉用ロールの模式図。

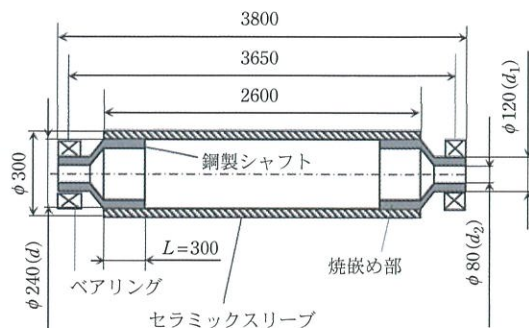


図2 実際のセラミックロールの構造と寸法 (mm)。

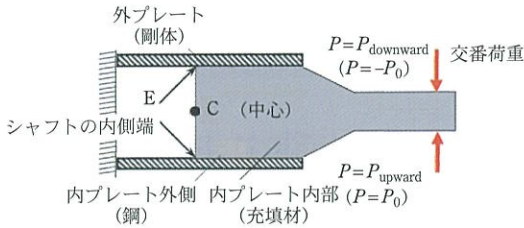
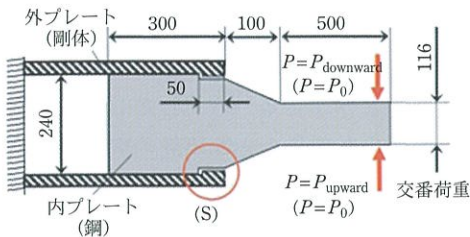
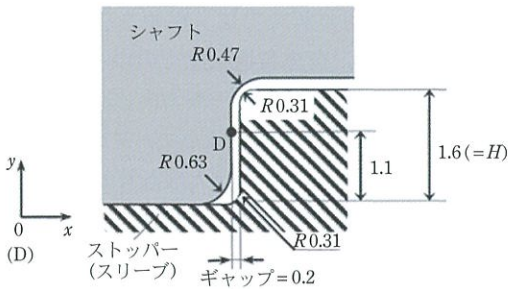


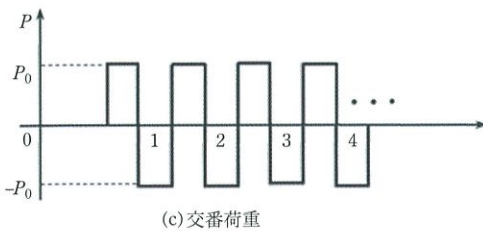
図3 前解説で説明した2次元モデル²¹⁾



(a) ストッパー付きの2次元交番荷重モデル



(b) ストッパー部の詳細 (S) (mm)



(c) 交番荷重

図4 ストッパー付きの新しい交番荷重2次元モデル。

このシャフトの抜け出し現象では、抜け出し方向に外力が存在しないにもかかわらず、抜け出しが生じることが重要なポイントである。よって、もし抜け出し駆動力の大きさを明確にできれば、現象の解明に大きく前進する。そこで本解説では、シャフトの抜け出し駆動力を初めて明らかにした研究¹⁹⁾を紹介する。具体的には、まず、前解説²⁰⁾

で用いた2次元交番荷重モデル(図3)を改良し、駆動力を同定するために、外プレート(スリーブ)に、抜け出し防止ストッパーを設ける。図4に、内プレート(シャフト)の抜け出しを防止するため、ストッパーを設けた新たに提案したモデルを示す。このようなストッパーは、実ロールのシャフト抜け出しの防止にも当然有用である。しかし、その設計に当たっては、ストッパーと内プレートとの接触により生じる荷重の大きさ、すなわち、抜け出し駆動力を求める必要がある。このように、抜け出し駆動力の大きさを同定することは、シャフトの抜け出しのメカニズムを解明する、学術的側面から重要であるだけでなく、抜け出しを防止する実用上の観点からも重要である。

2次元交番荷重モデルによる内プレートの抜け出し解析について

ここでは、まず、有限要素法を用いた弾性解析により内プレートの抜け挙動をシミュレーションする。次に、内プレートが外プレートのストッパーへ接触した際の接触荷重、すなわち内プレートの抜け出し駆動力を考察する。図3に先の解説で取り扱った2次元交番荷重モデルを示す。多数回の荷重繰り返しをシミュレーションするため、焼嵌めしたシャフトを内プレート(図3の内プレート)とし、スリーブは外プレート(図3の外プレート)としてモデル化している。抜け出し現象は点Cの変位に着目して解析する。

図4(a)に本研究に用いるストッパー(高さ $H = 1.6 \text{ mm}$)を有する2次元交番荷重モデルを示す。また、図4(b)にストッパー部の詳細を示す。内プレートの嵌合端部の点D(図4(b)参照)を内プレートの抜け出し変位の基準点とする。図3と同様に、解析を簡略化し、解析時間を短くするため外プレートは剛体とする。また、内プレートには中空構造を適用できないため、軸方向弾性係数を等価させた充填材を用いる¹⁷⁾²¹⁾。

表1にこれら図3と図4のモデルの材料特性を示す。外プレートと内プレートは焼嵌め接合とし、

表 1 2次元交番荷重モデル(図3・図4)における内プレートと外プレートの材料特性.

	外プレート		内プレート	
	剛体	鋼	鋼	内プレート充填材
弾性係数 (GPa)	∞	210	52	
ポアソン比	—	0.3	0.3	
引張強さ (MPa)	∞	600	—	
密度 (kg/m^3)	—	7800	7800	

焼嵌め率は、焼嵌め代 δ を外プレート嵌め込み部の厚み、 $d=240\text{ mm}$ で除したものと定義する。ここでは焼嵌め率は、 $\delta/d=0\sim 1.0\times 10^{-3}$ の範囲とした。基本的な抜けメカニズムを解明するために焼嵌め率 $\delta/d=0\sim 0.2\times 10^{-3}$ 、摩擦係数 $\mu=0.3$ 、嵌合長さ $=250\text{ mm}$ 、ストッパー高さ $H=1.6\text{ mm}$ をそれぞれ基準値として用いた。荷重の大きさと境界条件は前解説²⁰⁾で取り上げた先行研究²¹⁾と同様とした。

本解説では、慣性力を無視できるので¹⁸⁾、有限要素法による弾性解析を、MSC社の汎用有限要素解析ソフト Marc/Mentat 2012を用い、解析タイプとして静的構造解析を使用した。解析ソフト Marcでは完全ニュートン・ラプソン法を使用している²²⁾。モデルの長さ方向の対称性を考慮し、1/2のモデルに上下方向の交番荷重を加え(図4(a))、四角形4接点要素を用い、要素数は24546で解析した。MSC Marc/Mentat 2012の接触解析では、クーロン摩擦モデルは、鍛造過程中的のバルク成形などを除いてほとんどの用途に使用できる。クーロン摩擦モデルに基づく3つの近似摩擦モデルが利用可能であり²³⁾、その3つは逆正接モデル、スティックスリップモデル、双線形モデルである。逆正接モデルは解析中にすべり速度が強く変化する場合の典型的な相対すべり速度を推定することが難しく、スティックスリップモデルに基づく摩擦力は、反復計算過程で決定される大量のデータを必要とするため、本研究では、単純に変位から摩擦力を決定する双線形モデルを適用し解析を行う。図5にストッパー周辺の解析モデルを示す。ストッパーと接触する箇所の周りは最小要素サイズを $0.15625\times 0.15625\text{ mm}$ として、解析精度に配慮した。

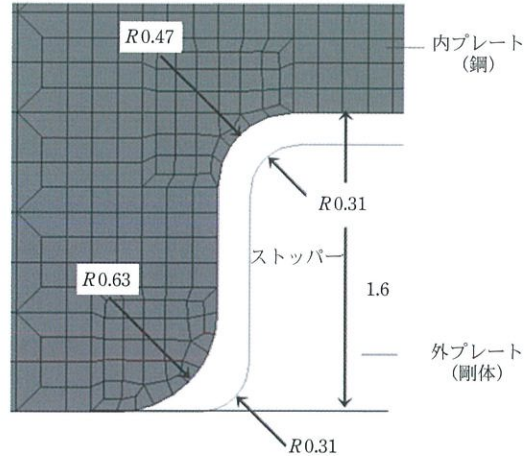


図5 内プレートのストッパー周辺の FEM メッシュの詳細(図4(b)参照)(単位: mm).

抜け出し駆動力の発生の条件

図3と図4に示すように、内プレートに曲げモーメントを生じさせる交番荷重 P (荷重繰返し数を N)を繰り返して与えると、内プレートに抜け出しを生じさせる何らかの駆動力が発生し、この駆動力により内プレートが抜けていくものと考えられる。しかし、本解説では抜け防止のストッパーを外プレートに設けているため、内プレートは抜けることなく、内プレート端部がストッパーと接触した所で内プレートの軸方向移動は止まる。そこで、ここでは内プレート端部(接合面から 1.1 mm の点Dで接触点を代表させる)が外プレートのストッパーと初めて接触する繰返し数を N_c とみなす。

接触条件を調べるに当たって、内プレートの抜け出しを点Dの x 方向変位 u_{xD} で表す。図6は繰返し数 N に対する点Dの変位 u_{xD} を、交番荷重 P を変えて示した結果である。図6では、変位速度 u_{xD}/N に対する荷重以外の主な影響因子とみなされる、焼嵌め率 δ/d や摩擦係数 μ 、それにストッパー高さ H は、それぞれ基準値である $\delta/d=0.2\times 10^{-3}$ 、 $\mu=0.3$ 、 $H=1.6\text{ mm}$ とした。

図6で荷重前 $N<1$ においては、焼嵌めによって生じる小さな変位 $u_{xD}=0.000537\text{ mm}$ が生じる

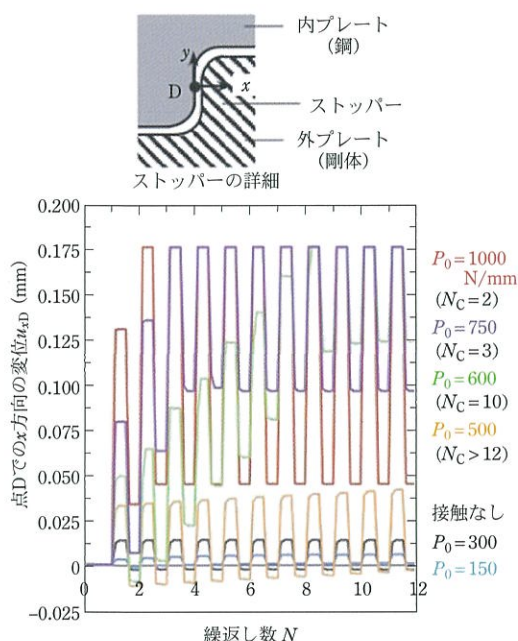


図6 焼嵌め率 $\delta/d = 0.2 \times 10^{-3}$ と摩擦係数 $\mu = 0.3$ を固定した場合の異なる荷重での抜け出し変位 u_{xD} と繰返し数 N の関係。

(嵌合前は $u_{xD} = 0$ mm)ものの、ここでは無視する。荷重が大きい場合には、抜け出し変位 u_{xD} は、繰返し数とともに荷重の向きに対応して周期的に変動しながら増加していくが、変位が飽和する繰返し数 N が存在する。例えば $P = 1000$ N/mmでは、変位 u_{xD} は2回目で一定値 0.176 mmに達し、それ以降は変化しない。すなわち、 $u_{xD} = 0.176$ mmに達した時点で内プレートは点Dはストッパーに接触すると判断される。

交番荷重 P の減少とともにストッパーとの接触開始繰返し数 N_c は大きくなり、さらに荷重 P が低下すると接触が生じなくなる。すなわち、内プレートの抜け出しを生じさせる、荷重のしきい値が存在することがわかる。図6に示す条件では、荷重のしきい値は $P_{th} = 50$ N/mm ~ 300 N/mmの間にあるとみられる。しきい値以下の荷重 $P < P_{th}$ では、変位 u_{xD} は増加せず、内プレートはストッパーに接触しない。すなわち、内プレートの抜け出しはストッパーがなくても生じない。一方、しきい値 P_{th} を越える荷重 $P = 300$ N/mmでは繰返し数

とともに変位 u_{xD} は増加している。従って、図6より焼嵌め率、摩擦係数が基準値の場合、抜け駆動力の発生条件は $P \geq 300$ N/mmといえる。

ここで、内プレートのストッパーへの接触が $u_{xD} = 0.176$ mmで生じ、ギャップ量の 0.2 mmより小さくなる理由は以下と考えられる。このような接触問題を取り扱う場合は、計算上、接触判定量として焼嵌め代の $1/2$ 以上をとる必要があり、 $\delta/d = 0.2 \times 10^{-3}$ 、内径 $d = 240$ mmで、 $\delta/d = 0.2 \times 10^{-3} \times 240 = 0.048$ であるため、 $0.048 \times 1/2 = 0.024$ mmを接触判定量としている。そのため、ギャップ 0.2 mmよりも 0.024 mm小さい $u_{xD} = 0.176$ mmで接触したとみなされる²⁴⁾。

抜け出し駆動力の発生メカニズム

本解説で考察するストッパー付き交番荷重モデルを示す図4、図5では、内プレートの抜け出しはストッパーで止められる。よって抜け出し駆動力の大小はストッパーからの反力である接触力 F_s の大小で評価できる。図7は交番荷重 P と接触力 F_s との関係を種々の摩擦係数 μ に対して示す。ここでは繰返し数 $N = 100$ を上限として繰返し数 N を増加させ、接触力が生じて一定値を示す際の値 F_s を求めた。

接触と非接触の代表例として、 μ の最も大きな $\mu = 0.5$ の場合に注目すると、荷重 $P \leq 750$ N/mmでは抜けが生じず、接触力 $F_s = 0$ であるが、図7(a)では、およそ $P \geq 875$ N/mmから接触力が生じており、荷重の増加に伴い接触力も増加している。 $\mu = 0.3$ の場合、 600 N/mm以上では、交番荷重 P が大きくなると、 F_s も比例的に増加する。なお、図6で示した抜け出し駆動力発生条件の $P \geq 300$ N/mmを満足する。接触力と荷重の関係から摩擦係数 μ が小さくなると、接触力 F_s は減少し、 $\mu = 0$ すなわち摩擦がないとき、接触力 F_s つまり抜け出し駆動力は発生しない。このように、接触力 F_s は嵌合面の摩擦の大きさに直接左右されることが明らかとなった。

内プレートに加わる外力は内プレート嵌合面の

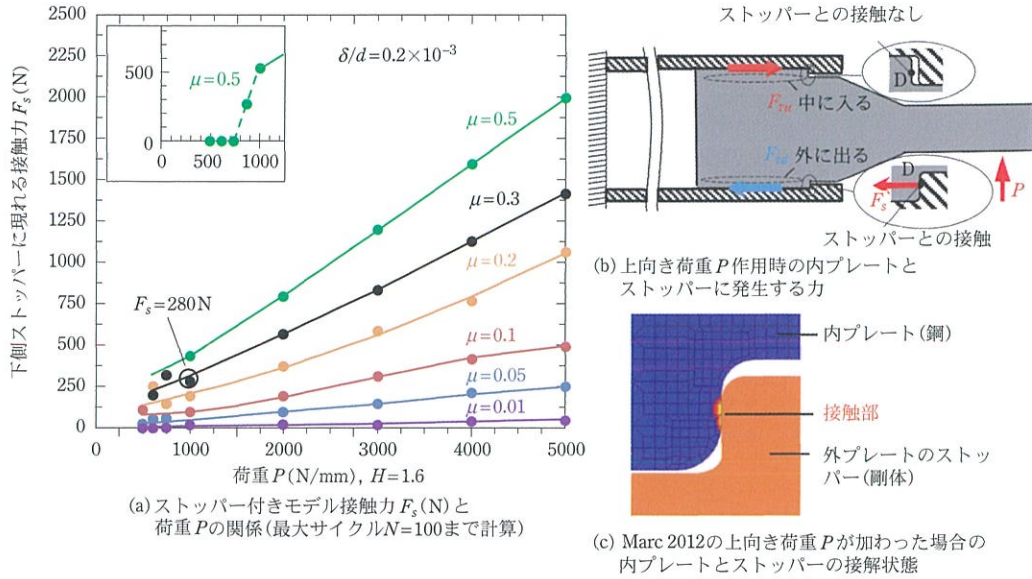


図7 焼嵌め率 $\delta/d = 0.2 \times 10^{-3}$ で上向き荷重 P が作用したときの異なる摩擦係数 μ での荷重 P と接触力 F_s の関係。

せん断力(摩擦力)とプレート端部に生じる接触力からなる。内プレートが交番荷重を受けると、内プレート嵌合面にせん断力(摩擦力)が生じ、この力は接触力 F_s と釣り合っている。図7(b)で、上面のせん断力 $F_{\tau u}$ を正方向とすると、上面のせん断力、下面のせん断力 $F_{\tau d}$ と接触力 F_s の間には次の関係が成り立つ。

$$F_s = F_{\tau u} + F_{\tau d} \quad (1)$$

例えば、図7(a)において、 $P = 1000$ N/mm、摩擦係数 $\mu = 0.3$ のときに点Dがストッパーに接触するときの上下側内プレート嵌合面に作用するそれぞれの力は、 $F_{\tau u} = 1272$ N、 $F_{\tau d} = -992$ Nである。式(1)に代入すると、接触力は280 Nと求まる。このようにして求まる内プレートとストッパーの接触力 F_s は、抜け出しを生じされる駆動力 F_d と見なすことができる。

$$F_d = F_s \quad (2)$$

抜け出し変位と抜け出し駆動力(=接触力)に及ぼす交番荷重の無荷重区間の影響

前節では交番荷重 P の大きさの抜けへの影響を

抜け出し変位 u_{xD} に注目して考察した。本章では、交番荷重の下で、抜け出し変位 u_{xD} および抜け出し駆動力 F_d (= ストッパーの接触抵抗力 F_s) がどのような形で発生し、進行していくのかを考察する。

図8の最初に示すように、ここでは交番荷重の最大と最小を固定した、図8(a-1)と図8(b-1)のような交番荷重のパターンを考える。そして、これらの交番荷重で現れる、内プレート端の点Dの抜け出し変位 u_{xD} と抜け出し駆動力 F_d (= 接触力 F_s) を比較して考察する。解析条件は、交番荷重の大きさを $P = 1000$ N/mmとし、摩擦係数 $\mu = 0.3$ 、焼嵌め率 $\delta/d = 0.2 \times 10^{-3}$ とする。図8(a-1)は、これまでの交番荷重として用いてきた荷重パターンであり、ここでは、上方向荷重(ステップI)と、その後の下方向荷重(ステップIII)を合わせて第1サイクルとしている。その条件下の抜け出し変位 u_{xD} を図8(a-2)に、その条件下の抜け出し駆動力 F_d (= 接触力 F_s) を図8(a-3)に示す。

一方、新規に考察する交番荷重のパターン図8(b-1)では、荷重と変位との関係や荷重と駆動力との関係を詳細に考察するために、交番荷重の間に無荷重区間を加えており、この点が図8(a-1)とは異なる。すなわち、図8(b-1)の交番荷重のパター

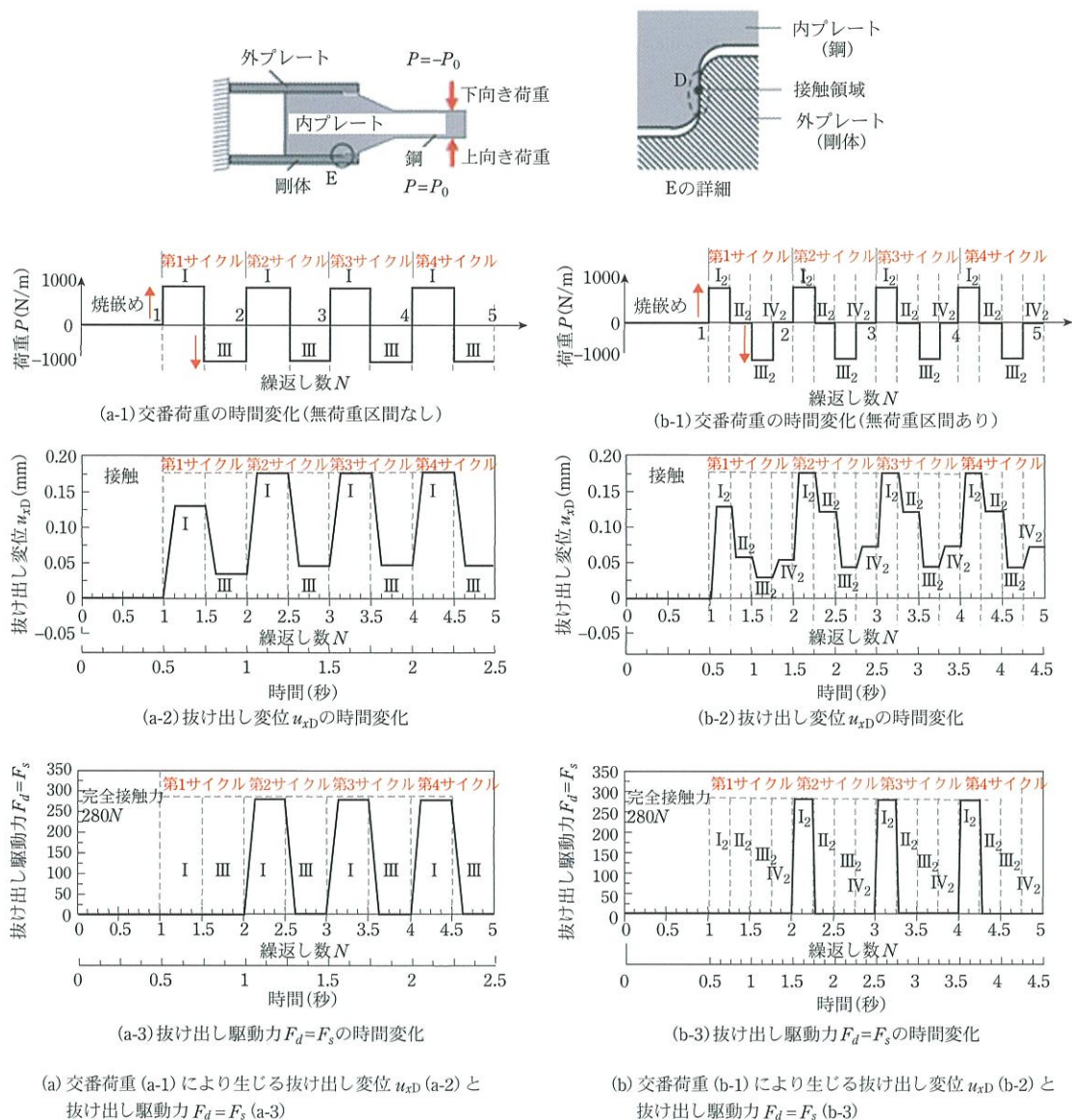


図8 点Dの抜け出し変位 u_{xD} と抜け出し駆動力 $F_d = F_s$ (交番荷重 $P = 1000 \text{ N/mm}$, $\mu = 0.3$, $\delta/d = 0.2 \times 10^{-3}$ のとき).

ンでは、上方向荷重(ステップ I_2)と、その後の下方向荷重(ステップ III_2)の間に、無荷重区間(ステップ II_2)を加えている。その条件下の抜け出し変位 u_{xD} を図8(b-2)に、その条件下の抜け出し駆動力 $F_d (= \text{接触力 } F_s)$ を図8(b-3)に示す。

まず、図8(a-3)と図8(b-3)の抜け出し駆動力 F_d を比較すると、接触力の大きさや発生状況には大きな違いはない。一方、図8(a-2)と図8(b-2)

の抜け出し変位 u_{xD} を比較すると、顕著な違いが認められる。すなわち、最大変位、最小変位は等しいけれども、交番荷重に無荷重区間(ステップ II_2)を与えたことで、負荷方向に対応して新たな変位ステップ II_2 , IV_2 が現れている。接触力が安定する第2サイクルでみると、下方向荷重における変位ステップ II_2 は、上方向荷重での IV_2 よりも大きい。このように、荷重を加える方向により、無

荷重下でも異なる変位を示すことは注目に値する。このような考察から、荷重除荷と荷重増加では挙動が異なるような不可逆的な挙動が、シャフトの抜け出し挙動と密接な関連があるものと考えられる。このような不可逆的な挙動によって、無荷重状態でも変位が生じる(変位の残留)。この変位残

留現象をここでは「残留変位」と呼ぶことにする。

残留変位に基づく抜け出し過程の考察

本節では、シャフトの抜け出し挙動を支配する

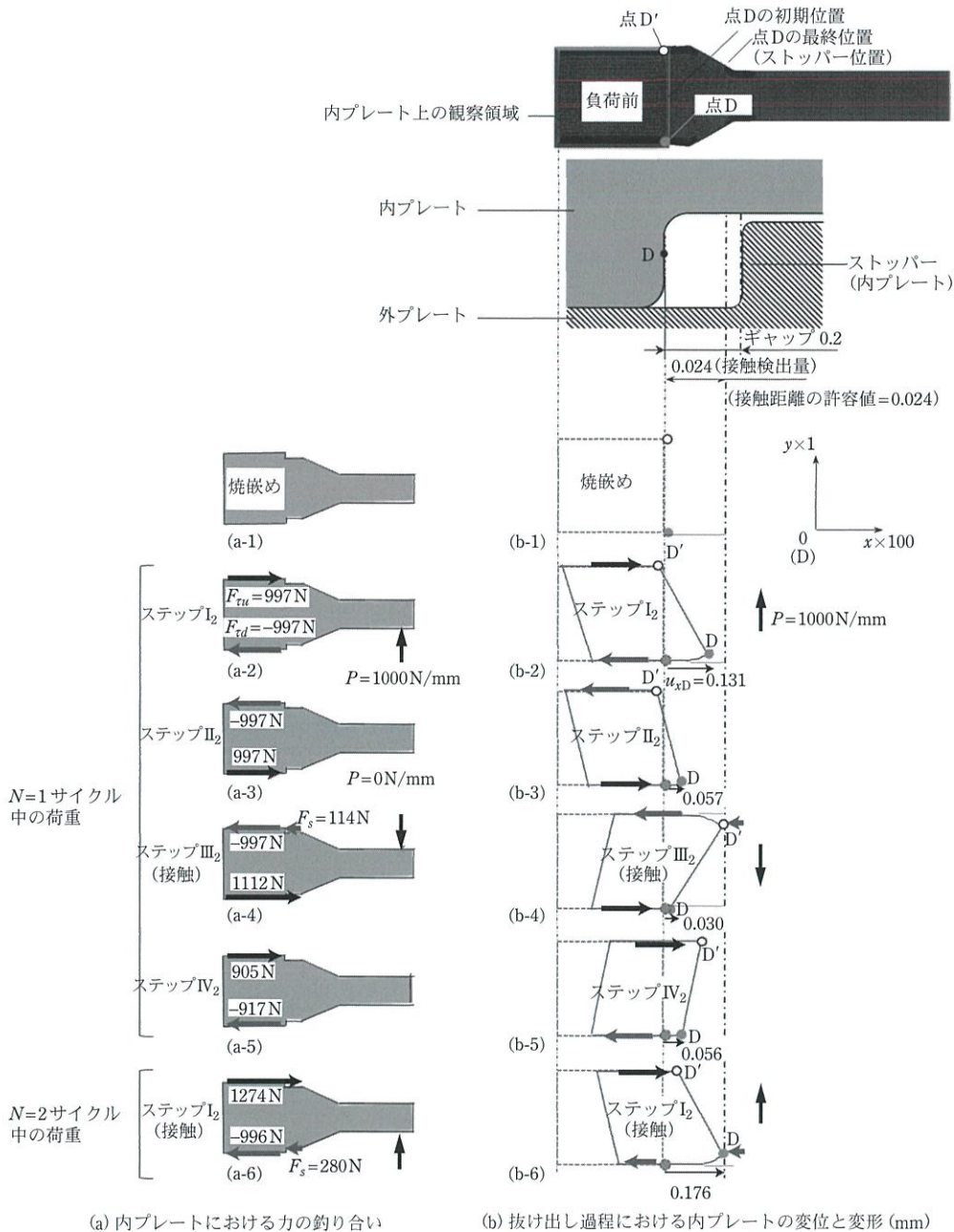


図9 内プレートの抜け出し過程(荷重繰返し数 $N=1, 2$ で荷重 $P=1000 \text{ N/mm}$)。

ものと考えられる、残留変位をストッパーと接触する点Dに着目して考察する。また、点Dを含む内プレート嵌合領域全体の変位と変形にも着目して、抜け出し過程と関連させて考察する。具体的には、交番荷重に無荷重区間が含まれる図8(b)の条件下での、抜け出し挙動を示す図9を用いて荷重ステップと抜け出し変位との関係を考察する。

図9(a)は交番荷重によって内プレートに作用するせん断力、ストッパーとの接触力、上向き交番荷重の釣り合い状態を示す。また、図9(b)に、内プレート嵌合部の変形・変位挙動を示している。ここで、図9(b)の実線は、嵌合後のそれぞれの荷重過程における変形・変位の状態を x 方向に拡大して示したものであり、破線は、嵌合後の無荷重状態を示している。最初の上向き荷重(ステップI₂)で、点Dが抜ける方向に向かうが、ストッパーと接触せず、内プレート上下面のせん断力が釣り合う。無荷重インターバル(ステップII₂)では、点Dは入り込む方向へ向かうが完全には戻らない状態、すなわち残留変位状態となる。なお、ここでせん断力は逆方向に変化し釣り合う。次いで、下向き荷重を加えるステップIII₂では、点Dは抜け出し方向の微小変位が残ったままで、上面側の点D'はストッパーに接触する。点D'側の接触力は114 Nと、完全接触力280 N(第2サイクル、ステップI₂)には達していない。このステップIII₂では、内プレート上下ともに残留変位が抜け出し方向に生じており、抜け出し過程を解析的に実証するものである。第1サイクルの終わり、ステップIV₂(無荷重)で点D、点D'ともに抜け出し方向への残留変位状態が続き、内プレート全体の抜け出し挙動は明らかである。この後の第2サイクルの終わりにおける点Dの残留変位は増加するが、その後のサイクルで安定する(図8(b-2))。

残留変位が生じるメカニズム

次に残留変位が生じる理由について述べる。シャフトの抜け出し挙動には、この残留変位が不可欠である。図10は、内プレート嵌合部の変形・

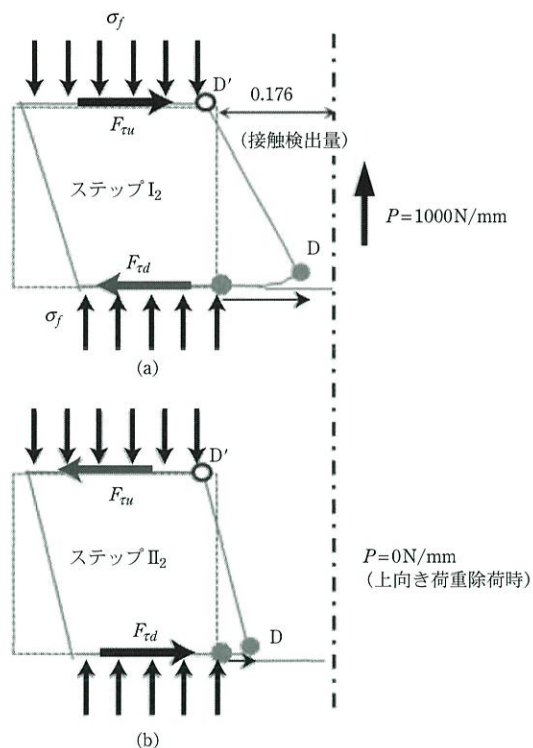


図10 上向き荷重除荷時の内プレートの残留変位発生メカニズム (mm)。

変位を、(a) 上方向荷重 P が作用した状態と、(b) その上方向荷重 P を除いた状態とを、比較して示したものであり、(a)、(b)とも嵌合圧力 σ_f が嵌合部に常時作用している。

上方向荷重 P 負荷時には、その荷重 P によって生じるモーメントに釣り合うべく、嵌合面にはせん断力 $F_{\tau u}$ 、 $F_{\tau d}$ が作用する。このため、嵌合部はひし形に変形し、点Dは抜け方向、点D'はその反対方向にずれる。

曲げ荷重 P を除くと、外力によるモーメントがなくなるため嵌合部のひし形が元の形状に戻ろうとして、点Dの変形は減少するが、嵌合圧力と摩擦によって生じる逆向きのせん断力に変形が阻止されて、点Dは元には戻らない(残留変位)。

このような残留変位が蓄積することで内プレートの抜けが生じる。このように、嵌合に伴う圧力 σ_f と摩擦の存在が変形や変位、さらには残留変位をも支配していることが分かる。以上より、シャ

フト抜け出し過程は、残留変位から説明ができることが明らかとなった。

本解説では、2次元交番荷重モデル(図4)によって抜け出し駆動力を考察した。一方、前々回の解説¹⁶⁾では、図2に示す実際の3次元形状を有するロール(図2)のシャフトの抜け出し解析¹⁸⁾を解説した(実際のロール形状を考慮しストッパーはない)。また、前回の解説²⁰⁾では、実ロールを2次元交番荷重モデルで置き換えて考察した研究²¹⁾(図3)を解説し、2次元モデルの考察は、3次元実ロールモデルにも有用であることを示した。そして、本解説では、2次元交番荷重モデルにストッパーを付与した新モデルの考案と解析結果を説明した。このように、本解説で取り扱った2次元交番荷重モデルの抜け出し駆動力の解析手法と抜け出しメカニズムの考察は、3次元ロールモデルの抜け出しにも適用できるものと考えられる。

おわりに

(1) これまでに行ってきたシャフトの抜け出しに関する解析手法を発展させて、抜け出し防止の観点から、設計上必要とされる抜け出し駆動力を明らかにした。3次元形状を有する実ロールに代わって、抜けの解析が容易な2次元交番荷重モデルを用いて、その抜け出し駆動力を考察した。

(2) 抜け出し駆動力を求めるため、内プレートを挟み込む外プレートには、抜け出し駆動力を受け止めるストッパーを設けた。抜け出し駆動力や抜け出し過程を解明するため、内プレートに交番荷重を与えたときの、内プレートの釣り合いと、変位・変形を調べた。

(3) 交番荷重を負荷すると、内プレート上下嵌合部に、曲げモーメントに釣り合うためのせん断力が生じる。抜け出し方向のせん断力が反対向きのせん断力を上回る条件で、抜け出しが生じる。

(4) 抜け出し条件を満足する交番荷重が繰り返されると、内プレートとストッパーが接触する。ストッパーに生じる接触力の大きさは、抜け出し

駆動力そのものとみなすことができる。

(5) 抜け出し変位と抜け出し駆動力の発生メカニズムを明らかにするために、交番荷重サイクルの中に、無荷重区間を導入した。その結果、無荷重時に残留変位が存在することが明らかになった。

(6) すなわち抜け出し挙動は、(5)で明確となった残留変位が蓄積されることによって合理的に説明できる。

参考文献

- 1) 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(15) 連続溶融めっき鋼板製造ライン用大型セラミックロールの開発, 金属, **94** 5 (2024), 75.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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(18) 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, 金属, **94** 8 (2024), 55.
- 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(19) セラミック製シンクロールを溶融金属に浸漬させる際の熱応力, 金属, **94** 9 (2024), 89.
- 6) 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(20) 加熱炉用セラミックロールの張割れ回避のための構造設計, 金属, **94** 10 (2024), 74.
- 7) 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(21) 搬送用セラミック製ロールにおける焼嵌め接合部の曲げ荷重に対する強度設計, 金属, **94** 11 (2024), 93.
- 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(22) 連続酸洗用セラミック製ロールにおける焼嵌め接合部の曲げ荷重に対する強度設計, 金属, **94** 12 (2024), 81.
- 9) 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(23) 焼嵌めで構成されたセラミック製ロールのメンテナンスのための

- スリーブの焼外しを可能とする条件, 金属, **95** 1 (2025), 69.
- 10) 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 (24) 焼嵌めで構成されたセラミック製ロールのメンテナンスのためのスリーブの焼外し過程で生じる熱応力, 金属, **95** 2 (2025), 69.
 - 11) 小野孝: 高性能セラミックス開発の現状と将来展望, 機械工学会誌, **86** (774) (1983), 470.
 - 12) C. R. Liou, T. Mori, H. Kobayashi and T. Mitamura: Influence of various atmosphere on the corrosion resistance of Si_3N_4 sintered bodies against steel making slag and its main components, J. Ceram. Soc. Jpn., **98** 4 (1990), 348.
 - 13) W. Li, N.A. Noda, H. Sakai and Y. Takase: Analysis of separation conditions for shrink fitting system used for ceramics conveying rollers, J. Solid Mech. Mater. Eng., **5** 1 (2011), 14.
 - 14) W. Li, N.A. Noda, H. Sakai and Y. Takase: Thermal stress analysis for shrink fitting system used for ceramics conveying rollers in the process of separation, Key Eng. Mater., **452-453** (2011), 241.
 - 15) A. Rusin, G. Nowak and W. Piecha: Shrink connection modelling of the steam turbine rotor, Eng. Fail. Anal., **34** (2013), 217.
 - 16) 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 (25) 焼嵌め式セラミック製スリーブロールに生じるシャフトの抜け出し現象の荷重移動法による考察, 金属, **95** 3 (2025), 72.
 - 17) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 原田正太, スルヤディデディ, 熊崎誠一: 高温炉中で使われるセラミックローラー稼動中におけるシャフトの抜け, 鉄と鋼, **101** 5 (2015), 10.
 - 18) N.A. Noda, D. Suryadi, S. Kumasaki, Y. Sano and Y. Takase: Failure analysis for coming out of shaft from shrink-fitted ceramic sleeve, Engineering Failure Analysis, **57** (2015), 219.
 - 19) 張国偉, 酒井悠正, 野田尚昭, 佐野義一, 大城竣: ストップバーを設けた焼嵌めローラーの軸抜け駆動力発生メカニズムと抜けプロセスの解明, 鉄と鋼, **104** 11 (2018), 620. https://www.jstage.jst.go.jp/article/tetsutohagane/104/11/104_TETSU-2018-091/_article/-char/ja/.
 - 20) 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 (26) 焼嵌め式スリーブロールにおけるシャフトの抜け出し現象解明のための2次元解析 (多数回の荷重繰返しに対する考察), 金属, **95** 4 (2025), 65.
 - 21) N.A. Noda, X.U. Yuanming, D. Suryadi, Y. Sano and Y. Takase: Coming out mechanism of steel shaft from ceramic sleeve, ISIJ International, **56** 2 (2016), 303.
 - 22) Marc Mentat team, Theory and User Information, Vol.A, MSC. Software, Tokyo, (2012), 713.
 - 23) Marc Mentat team, Theory and User Information, Vol.A, MSC. Software, Tokyo, (2012), 545.
 - 24) Marc Mentat team, Theory and User Information, Vol.A, MSC. Software, Tokyo, (2012), 572.
- 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。焼嵌め式ロールや特殊ボルト等の産学連携に関する研究に従事。日本設計学会論文賞受賞。日本機械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。2024.07 インド工科大学名誉教授 (グワハティ校)。
- さの・よしかず SANO Yoshikazu
1967 九州大学大学院機械修了。日立金属株式会社。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(株)ボーシン技術顧問。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。(株)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。