

ねじ転造加工の三次元有限要素解析*
(第2報, ねじ山成形に及ぼす加工条件の影響)丸山 智史*¹, 山口 克彦*²
高倉 章雄*², 飯塚 高志*²3D FEM Simulation of Thread Rolling
(2nd Report, Effect of Working Conditions on Thread Rolling)Satoshi MARUYAMA*³, Katsuhiko YAMAGUCHI,
Norio TAKAKURA and Takashi IIZUKA^{*3} Graduate School Division of Information and Production Science, Kyoto Institute of Technology,
Gosho kaido-cho, Sakyo-ku, Kyoto shi, Kyoto, 606-8585 Japan

A thread rolling process is simulated using the three dimensional finite element method (3D FEM) to investigate the effects of the roller displacement speed, friction coefficient and the roller rotation speed on the deformation behavior of the material. In the simulation, a nickel based heat resistant alloy rod is worked on a 2 roller dies thread rolling machine. Since the plastic deformation of the material in the thread rolling occurs mainly on the material surface, especially at the root of the thread, fine meshes should be used for these portions. The three dimensional deformation of the thread generation could be simulated well by using the presented model. The simulation results that a distorted thread form is due to higher roller displacement speed, and a imperfect thread form is due to lower friction coefficient and a roundish ridge line of threads are due to lower roller rotation speed, show the similar deformation behavior observed in the practical thread rolling.

Key Words: Finite Element Method, Thread Rolling, Nickel Based Heat Resistant Alloy, Displacement Speed of Roller, Friction Coefficient, Rotation Speed of Rollers

1. 緒 言

近年ねじの転造加工では、NC化された転造盤が多く使用されているが、ねじ転造加工条件は、転造素材の機械的性質、ならびにねじのサイズやピッチの違いによって、転造圧力や転造時間などが異なる。転造加工条件が不適切であると、ねじとしての機能を果たすことができなくなる。NC化されたとはいっても、転造加工条件の設定には、熟練作業者の経験や勘に頼る部分が多い。たとえば、転造圧力が高すぎると、軸方向への大きな伸びが発生し、十分なねじ山高さが得られない。また、ねじの断面が円から楕円になるなどねじ形状がいびつになるなどの問題が発生する。

ねじ転造における半径力については、被転造材の変形抵抗と被転造材とダイス間の接触面積を考慮した理論式が山本ら^①によって提案されている。また、油圧インフィード式2ロール転造盤では、ワークレストの高さについて、おおよその推奨値があるが、実際に

は転造加工時に微調整が行われている。

著者らは三次元弾塑性有限要素法解析を行い、油圧インフィード式2ロール転造盤によるねじ転造加工を対象にして、転造加工シミュレーションを行うための解析モデルの検討を行った。検討した解析モデルを用いて、加工中ならびに加工完了後の軸方向応力および相当塑性ひずみ分布、さらにねじ山の成形過程を示した。また、ねじの転造では、ローラの押込み速度や回転速度、ローラと素材間の摩擦係数などが重要な加工条件として挙げられる。

そこで本報では、著者らが検討した解析モデル^②を用いて、これらの加工条件を種々変化させてシミュレーションを行い、ねじ山の成長過程や加工完了後の形状に及ぼす影響について考察を行った。その結果、実際のねじ転造加工における諸現象をうまく説明することができた。

2. シミュレーションモデルと解析条件

2.1 シミュレーションモデル 図1に解析モデルの初期状態を示す。図に示すように、ワークレスト上に素材が置かれている。ローラBの山頂部がねじ

* 原稿受付 2005年8月15日。

^{*1} 正員, 京都工芸繊維大学大学院工学科学研究科(〒606-8585
京都市左京区御所海道町)。^{*2} 正員, 京都工芸繊維大学工学学部。

E-mail: s_maru@jp.netlaputa.ne.jp

の谷径に相当する距離まで変位させた。ただし、ローラ A の X-X' 方向の変位は固定した。

有限要素解析には、LS-DYNA を使用した。なお、解析を簡略化するために、ねじのリードを省略し、転造される凸部は9個とした。転造ローラの形状は、ねじの形状が 60° の山形形状となるようにし、航空機用のファスナー類で多く使用されているねじ規格 MIL-S-8879 で規定されている 0.2500-20UNJC-3A の外径と谷径が得られるようにローラのねじ山高さを設定した。ねじ寸法の規格値を表1に示す。転造ローラおよびワークレストは、4 節点シェル要素剛体とし、転造ローラの直径は $\phi 150\text{mm}$ とした。素材の直糸は $\phi 5.5\text{mm}$ とし、8 節点ソリッド要素多直線近似等方弾塑性体とした。素材はニッケル基耐熱合金 (NCF718) とし、図2で示す単軸圧縮試験により得られた応力-ひずみ線図の塑性域を多直線近似した。積分は8 節点完全積分とし、接点拘束法を用いた。

2・2 解析条件 本研究では、ローラの B 押し込み速度ならびにローラの回転速度および摩擦係数を種々変化させ、シミュレーションを行った。表2に解析条件を示す。なお、ローラの押し込み量は $l=0.76\text{mm}$ 一定とし、転造加工時間は $t=1.2\text{s}$ とした。また、ワークレストの位置はローラ中心から 3.375mm 下方とし、ワークレストと素材の間の摩擦は無視した。

3. シミュレーション結果と考察

3・1 押し込み速度の影響

3・1・1 ねじ山の成長過程 図3に加工時間 t に伴うねじ山の成長過程を示す。ローラの回転速度は $r=0.4\text{rev/s}$ 、摩擦係数は $\mu=0.15$ である。(a) は $t=0.2\text{s}$ 、(b) は $t=0.5\text{s}$ 、(c) は $t=1.0\text{s}$ 、(d) は加工完了後である。図に示すように、当然のことながら押し込み速度 V が大きいほどねじ山の成長が早くなる。図において、ローラ B の押し込み量が $l=0.76\text{mm}$ に達した時点でのねじ山の成形状態を比較すると、それぞれの場合において、それほど大きな違いは見られない。また、押し込み量が $l=0.76\text{mm}$ に達した時点では、ねじ山の稜線にふくらみを生じているが、その後の加工において、稜線が直線に加工されていることがわかる。一方、加工完了後の (d) において、ねじ山頂部の形状を比較すると、ローラ押し込み速度 $V=3.80\text{mm/s}$ の場合は、ねじ山頂部が丸みを帯びているのに対して、その他の場合は、山頂部にくぼみが残存している。

図4に加工完了後のねじ山頂部および谷底部の断面を示す。 $V=3.80\text{mm/s}$ では、谷底部断面も山頂部断面もともにおむすび型のようないびつな形状となってい

ることがわかる。一方 $V=1.52\text{mm/s}$ および 0.76mm/s では、ほぼ円形の断面となっている。なお、 $V=1.52\text{mm/s}$ の場合に谷部断面において若干のいびつが確認できる。このことから、ローラの押し込み速度が速すぎる場合には、加工が局所的に行われ、円周上で均一な加工が行われていないことがわかる。

Table 1 Dimensions of 0.2500-20UNJC-3A thread used for simulation

Major diameter (mm)	6.350~6.145
Pitch diameter (mm)	5.524~5.454
Minor diameter (mm)	4.881~4.735
Root radius (mm)	0.228~0.191

Table 2 Simulation condition of thread rolling

Displacement speed of roller B $V(\text{mm/s})$	0.76, 1.52, 3.80
Rotation speed of roller A and B $r(\text{rev/s})$	0.10, 0.40, 1.00
Friction coefficient μ	0.10, 0.15, 0.20
Working time $t(\text{s})$	1.2
Amount of displacement roller B $l(\text{mm})$	0.76

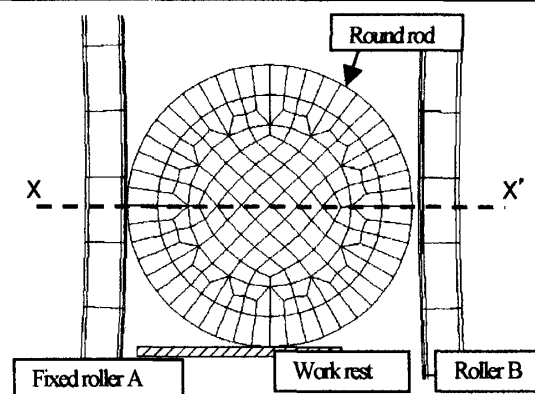


Fig. 1 Initial setup of thread rolling of round rod

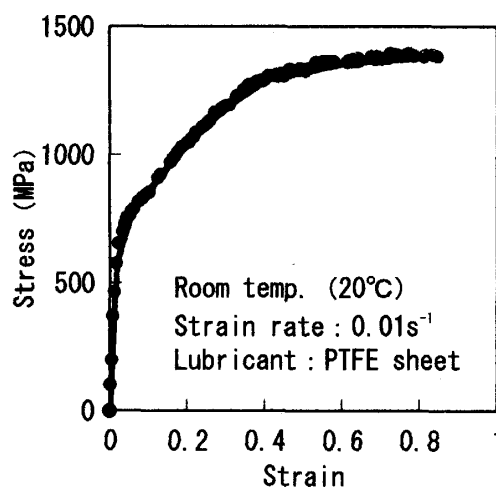


Fig. 2 Stress-strain curve of NCF718

この解析結果は、ねじの転造加工において、従来から過度なローラの押し込み速度が、ねじ山のいびつな原因であると言われていることと同様の傾向を示している。

3・1・2 外径の変化 図5に加工時間に伴うねじ外径の変化を示す。ローラの回転速度は $r = 0.4 \text{ rev/s}$ 、摩擦係数は $\mu = 0.15$ である。外径は図1の初期状態において、素材がローラの山頂部と接触しているX-X間の径である。図に示すように、いずれの押し込み速度においても、加工時間が進むにつれ、ねじ山が盛り

上がり始めるために外径が急激に増加する。そして、ローラBの押し込みを停止しその値に保持すると、外径の増加はなだらかになり、加工が完了する。このローラB押し込み停止後の外径の増加傾向は、押し込み速度 V によって異なったものになる。すなわち、押し込み速度が大きい $V = 3.80 \text{ mm/s}$ の場合には、押し込み完了後においても外径が増大するが、 $V = 0.76 \text{ mm/s}$ の場合には、ほとんど外径は増加しない。これは、図4に示したようにいびつな形状が修正されているためであると考えられる。

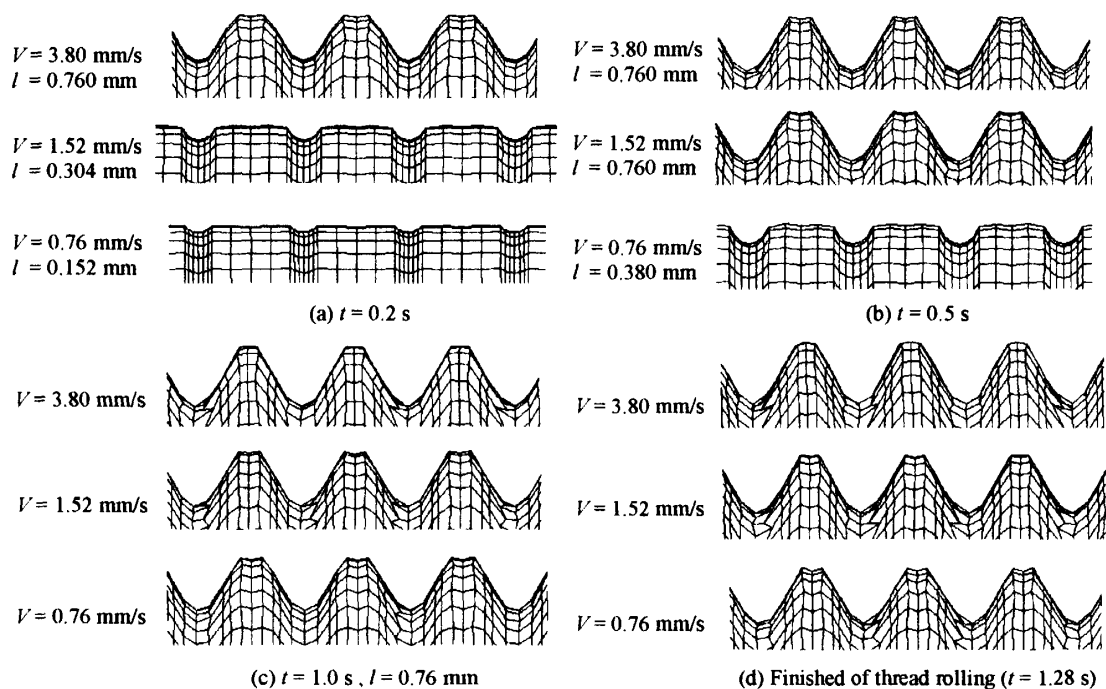


Fig.3 Deformation aspect in thread rolling with indentation of roller B

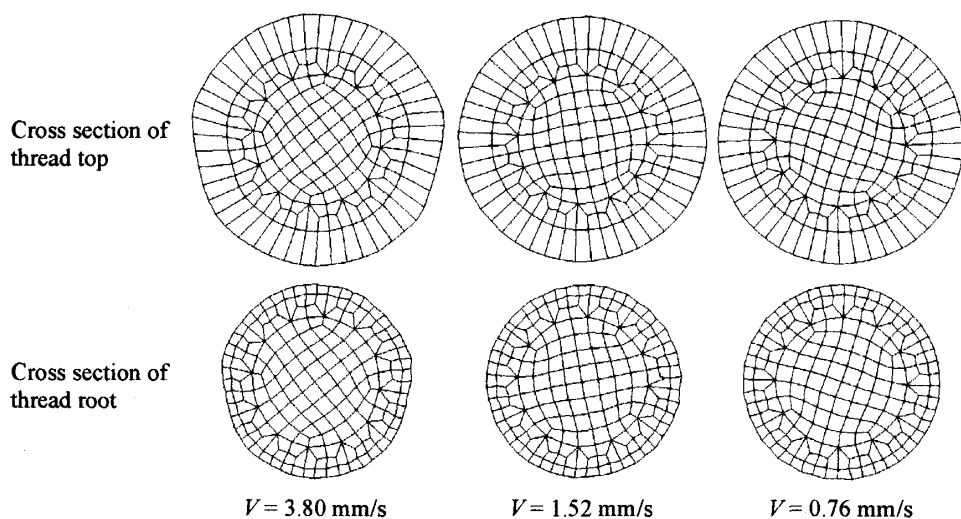


Fig.4 Cross section of thread top and root after thread rolling

図6に加工中の素材回転速度の変化を示す。図に示すように、すべての押込み速度において、約0.1秒までに素材の回転速度は増加し、その後ほぼ一定の回転速度になっていることがわかる。なお、 $V=3.80$ mm/sにおいて、加工の後期に回転速度が振動するのは、図4で示した断面面形状のいびつが原因であると考えられる。

3・2 摩擦の影響 摩擦係数 μ を変化させた場合のねじ山の成長過程および外形の変化を図7, 8に示す。また、加工完了後の山頂断面と谷底断面を図9に示す。ローラ押込み速度は $V=1.52$ mm/s, ローラ回転速度 $r=0.40$ rev/sの場合である。図に示すように、 $\mu=0.10$ の場合では、ほとんどねじ山の盛り上がりが生じず、外縁の一部がローラの押込みによる変形を受け

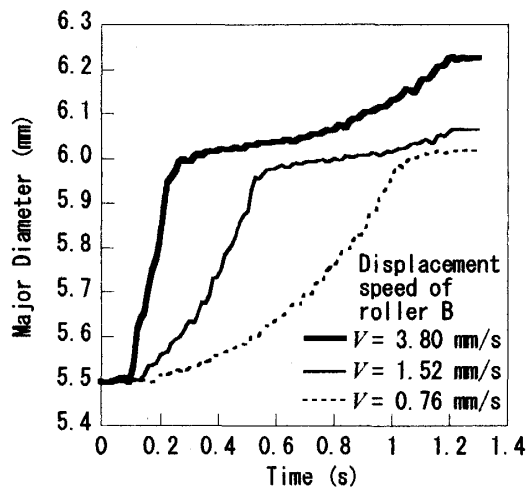


Fig.5 Variation of major diameter with displacement of roller B

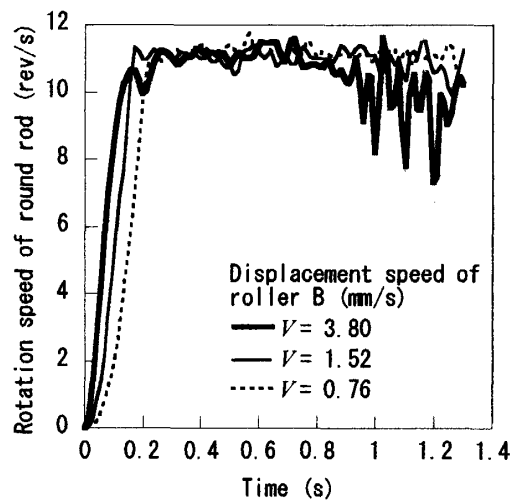


Fig.6 Variation of rotation speed of round rod with displacement of roller B

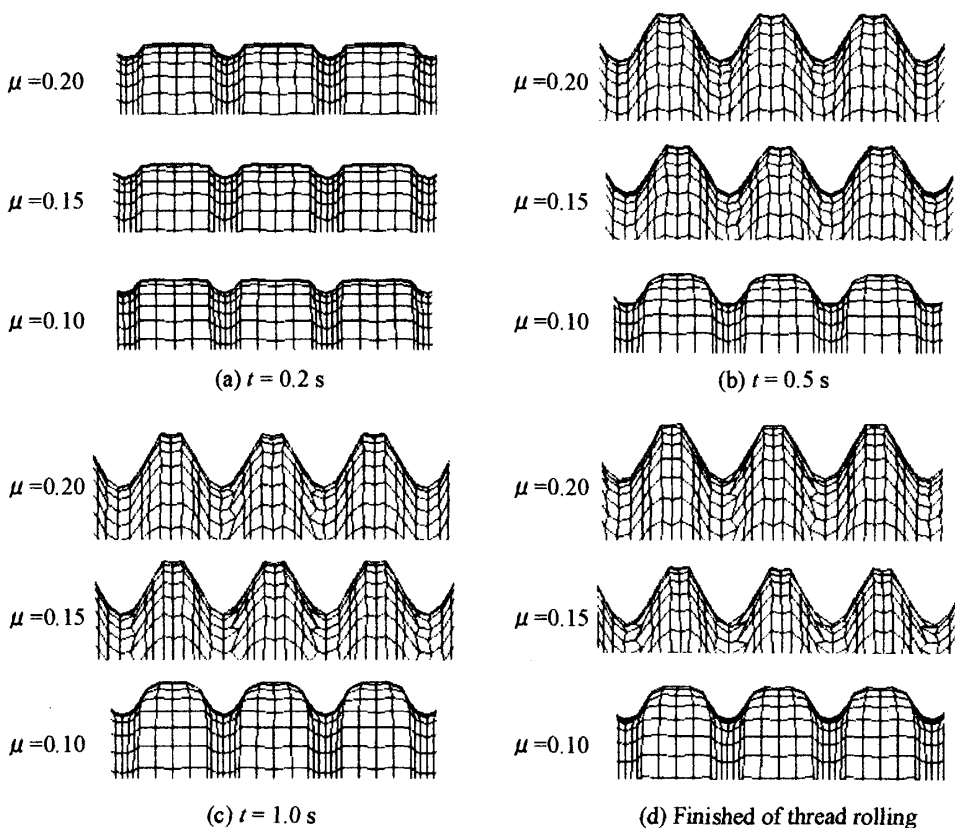


Fig.7 Deformation aspect in thread rolling with indentation of roller B

るのみであり、ほとんど外径の変化が生じていないことがわかる。これは、素材とローラ間ですべりが生じているためであると考えられる。一方 $\mu=0.15$ および 0.20 においては、十分なねじ山の盛り上がみられ、両者とも断面はほぼ円形に加工されていることがわかる。両者を比較すると、押し込み量が $l=0.76$ mmに達するまでは、加工中のねじ山の成形状態および外形変化には大きな差異はないといえる。しかし、加工完了後のねじ山を詳細に観察すると、 $\mu=0.15$ では、ねじ山山頂に若干のくぼみが存在するが、 $\mu=0.20$ のときはくぼみがないことがわかる。また、谷底部断面の外縁部に着目すると、 $\mu=0.20$ の場合には、外縁部の要素に若干円周方向にせん断変形が生じていることがわかる。以上のことから、ねじ山の形成に対しては、摩擦が大きな影響を与えていることがわかる。

図 10 に加工時間に対する素材の回転速度の変化を示す。図より、 $\mu=0.20$ と 0.15 は、約 0.1 秒後に約 11.0 rev/s で一定の回転をしているが、 $\mu=0.10$ は、ローラの押し込み初期には若干の回転が生じるが、その後はほとんど素材が回転しない。

3・3 ローラ回転速度の影響 ローラの回転速度を変化させた場合のねじ山の成長過程および外径の変化を図 11, 12 に示す。また加工完了後の山頂断面と谷底断面を図 13 に示す。ローラの押し込み速度は $V=1.52$ mm/s、摩擦係数は $\mu=0.15$ の場合である。図に示すように、ローラの回転速度の違いによりねじ山の成長の早さが異なる。しかし、加工完了後の外径寸法に対しては、ローラの回転速度の影響は見られない。図 11 に着目すると、ねじ山成長過程において $r=0.1$ rev/s のほうが稜線の丸みが大きい。また、図 13 よりロー

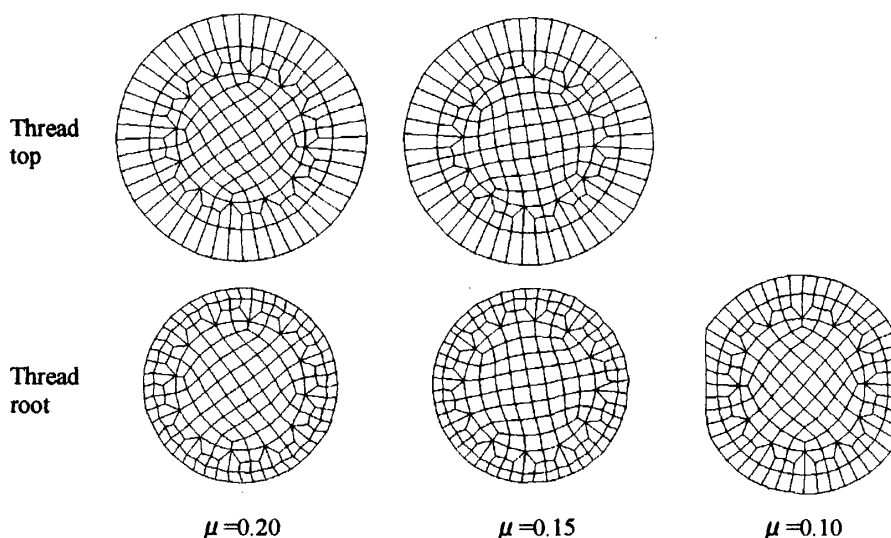


Fig.9 Cross section of thread top and root after thread rolling

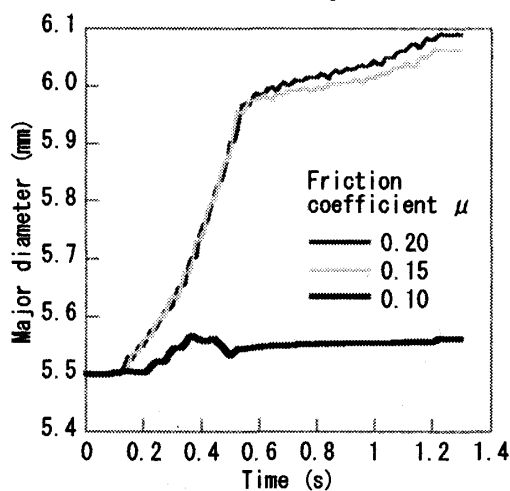


Fig.8 Variation of major diameters for friction coefficients

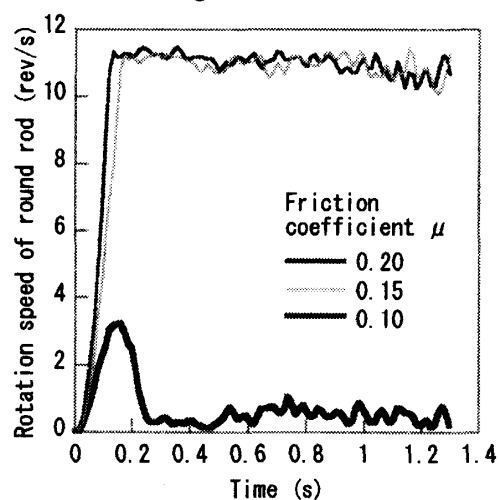


Fig.10 Variation of rotation speed of round rod with friction coefficients

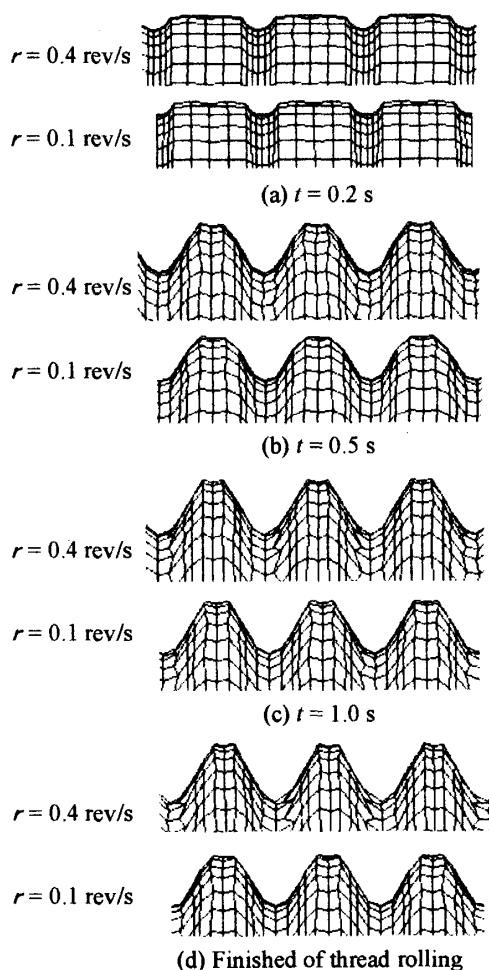


Fig. 11 Deformation aspects in thread rolling with indentation of roller B

ラの回転速度が遅い $r = 0.1 \text{ rev/s}$ のほうが、谷部の外縁部要素のせん断変形が大きい。以上のことから、ローラの回転速度が、ねじ山の成形過程および谷部近傍の変形に影響を及ぼすことがわかる。

4. 結 言

ねじ転造加工解析モデルを検討し、三次元有限要素解析を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) ローラの押し込み速度が、過度に速い場合は、断面形状にいびつが生じる。
- (2) 摩擦係数が小さいと、すべりにより、ローラの回転が素材に伝わらず、ねじを転造することができない。また、摩擦係数が大きくなると、谷部の外縁部には円周方向にせん断変形を生じる。
- (3) ローラの回転速度の違いによる、ねじ外径の差はほとんどない。しかし、回転速度が遅くなると、ねじ山の稜線が丸みを持って変形し、ねじ山の成長が遅くなり、谷部の外縁部のせん断変形が大きくなる。

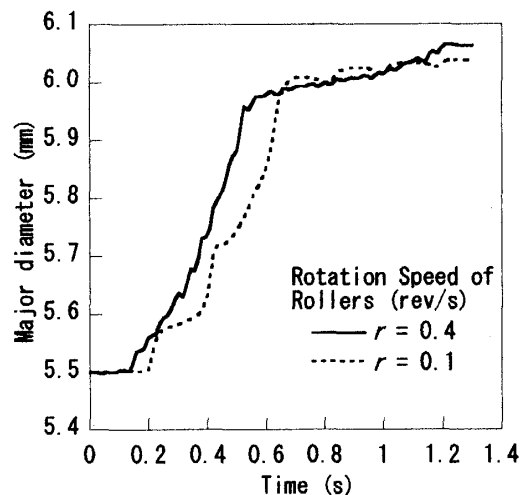


Fig. 12 Variation of major diameters with rotation speed of rollers

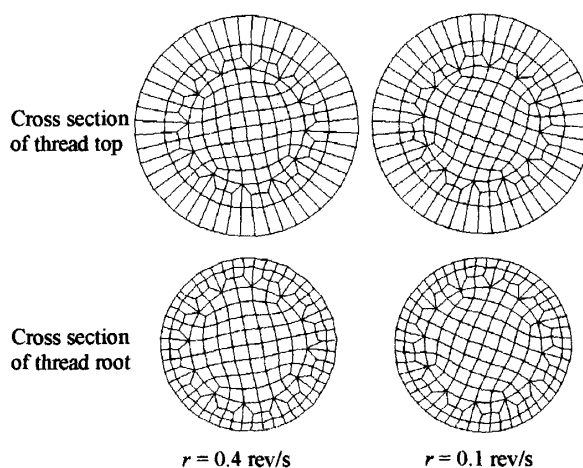


Fig. 13 Cross section of thread top and root after thread rolling

文 献

- (1) Yamamoto, A., Kase, S., An Examination on the Radial Force in Tread Rolling Considering an Elastic Contract Force, *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol. 12, No.121 (1971), pp95-100
- (2) Maruyama, S., Ymaguchi, K., Takakura, N., Iizuka, T., 3D FEM Simulation of Thread Rolling, *The proceedings of the 80th ordinary general meeting for JSME Kansai*, (2005), pp7-15 -7-16
- (3) Maruyama, S. et al., Tread Rolling Analysis of Inconel718 by FEM, *The Proceedings of the 2002 Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity*, (2002), pp337-338
- (4) Maruyama, S. et al., 3D-FEM Analysis of Thread Rolling, *The Proceedings of the 2003 Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity*, (2003), pp295-296