

回転スプリッティングにおける材料流れの研究

横浜国立大学大学院 工学研究院

教授 川井謙一

(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009011)

キーワード：塑性加工，回転成形，回転スプリッティング

1. まえがき

回転スプリッティング (rotary splitting) は、**図 1** に示すように回転する円板状ブランクの側面 (円筒面) に頂角 α の算盤玉状のローラーを半径方向に押付けるとにより、円板の側面を裂開して頂角 α の V 溝を形成する回転成形 (rotary forming) である。この回転スプリッティングは、単溝プーリーの成形¹⁾⁻⁴⁾のほかに、1 ピースアルミホイールの予加工としての裂開^{3), 5)-7)}、T 形ブレーキシューの予加工⁷⁾、熱交換器用伝熱管のローフィン先端の Y 形および T 形加工⁸⁾、エレベーター用 3 条プーリーの初期工程⁹⁾などに利用されている。回転スプリッティングにおける加工力の解析¹⁰⁾や実験結果¹¹⁾との比較も試みられているが、あまり合わない結果となっている。支えローラーを援用した薄円板の回転スプリッティング装置の開発¹²⁾および軸対称モデルと 20 度円弧モデルによる FEM 解析の試み¹³⁾もある。最近では、Al 合金の冷間加工¹⁴⁾⁻¹⁶⁾、Mg 合金の熱間加工¹⁷⁾の FEM 解析も試みられているが、裂開という現象が再現できているとは言い難い。一方、円盤状ブランクではなく板材の端面のスプリッティングの加工条件と転造力の検討¹⁸⁾も試みられているが、最近では板材端面にフランジを形成するスプリッティング (linear flow splitting) においては結晶粒微細化による高強度化¹⁹⁾⁻²¹⁾なども検討されている。

本研究では、ローラーの先端丸み半径があまり大きくなく、確実に裂開を伴う回転スプリッティングにおける加工条件が加工中の材料流れに及ぼす影響などを実験的に検討する。

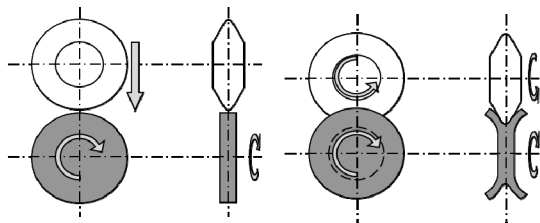


図 1 円板状ブランクの回転スプリッティング

2. 実験方法

図 1 のような円板状ブランクの回転スプリッティングを実現するために、**図 2** に示すような実験装置を試作した。無段変速機を介したモーターによって回転する軸に直径 $d_0 = 64$ mm、初期厚さ t_0 の円板状ブランク (試験片)

を取付ける。 $N = 72$ rpm で定速回転している試験片に、外径 $d_R = 80$ mm、先端丸み半径 $\rho_R = 0.2$ mm、頂角 α のローラーを**図 2** の Y 軸方向に押付ければ、試験片とローラーの間の摩擦によってローラーも回転し、**図 1** のような円板状ブランクの回転スプリッティングが実現される。ローラーは Y テーブル上のローラーホルダーに取付けられており、X テーブルは X 軸方向に、Y テーブルは Y 軸方向にそれぞれボールねじで駆動されるので、ローラーの位置は 2 台のモーターコントローラーによって制御可能である。ローラーホルダーに貼付したひずみゲージによって、回転スプリッティングにおける Y 軸方向の押付け力 (radial force) F_r 、X 軸方向の軸力 (axial force) F_a 、円周方向の接線力 (tangential force) F_t を測定することが可能である。

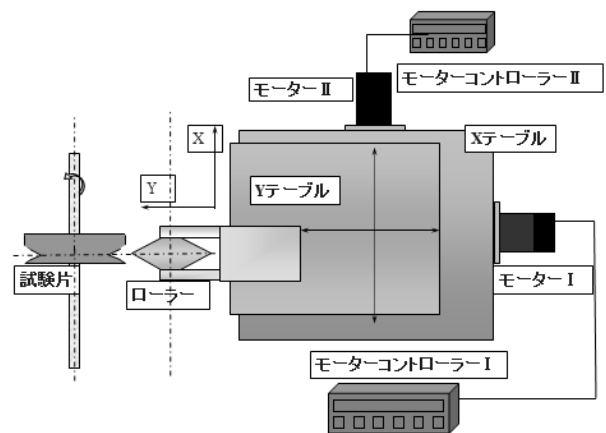


図 2 試作した回転スプリッティングの実験装置

実験においては、試験片の初期厚さ t_0 、ローラーの頂角 α 、送り速度 (押込み速度) v 、ローラーの押付け位置 (試験片側面の対称位置からのオフセット量) Δx などの加工条件を種々に変化させて回転スプリッティングを行い、加工中の加工力を測定するとともに、加工後の製品の形状を測定した。加工後の製品の断面形状を模式的に**図 3** に示す。回転スプリッティングにおいては、V 溝を成形するための成形ローラーのほかに種々の支えローラーを援用すれば所望の形状の断面を成形できるが、本研究では成形ローラーのみによる加工時の材料流れを調べるために支えローラーを使用していないので、成形され

た溝は図3に示すような直線部と曲線部で構成される。従って、工場顕微鏡によって製品の溝の直線部長さ l_s 、曲線部長さ l_c 、直線部の角度 α' 、溝底の丸み半径 ρ' 、直線部に垂直な壁厚 t_w 、 X 軸に平行な方向の厚さ t_a などを測定した。

試験片は市販の A1050 棒材から旋削して準備し、潤滑剤を塗布して室温で回転スプリッティングを行った。

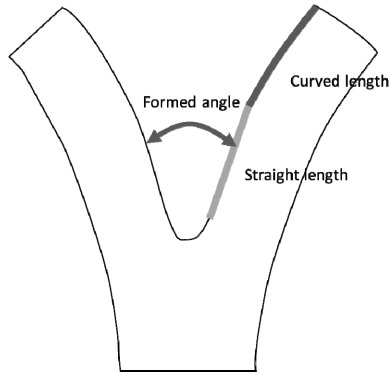


図3 加工後の製品の断面形状の模式図

3. 実験結果と考察

3・1 対称押込み

加工条件が材料流れに及ぼす影響を調べるために、試験片の初期厚さ t_0 に対して、その対称の位置にローラーを押込む対称押込みの実験を行った。加工条件としては、試験片の初期厚さを $t_0 = 3, 6, 9$ mm、ローラーの頂角を $\alpha = 30, 45, 60^\circ$ 、ローラー送り速度(押込み速度) $v = 0.1, 0.3, 0.5$ mm/rev の3水準で変化させて行ったが、この実験に使用した試験片材料の圧縮試験による応力ひずみ曲線は $\sigma = 156\epsilon^{0.184}$ MPa であった。また、ローラーの押込み量 s は次節の非対称の押込みの場合も含めて 6 mm とし、6 mm 押込んだ際の断面形状などを測定している。

図4にローラー頂角が $\alpha = 60^\circ$ の場合、図5にローラー送り速度が $v = 0.5$ mm/rev の場合に対する送り量 $s = 6$ mm における押込み力 F_r を規格化して示すが、試験片初期厚さ t_0 、送り速度 v およびローラー頂角 α の増加とともに、押込み力 F_r が増加する。全ての要因に対して等間隔3水準の実験を行っているので分散分析が可能であり、押付け力 F_r の増加に対する厚さ t_0 、送り速度 v 、頂角 α の寄与率がそれぞれ、47.2%、23.2%、17.7%であり、危険率1%で有意であった。

図6に試験片厚さが $t_0 = 6$ mm の場合、図7にローラー送り速度が $v = 0.1$ mm/rev の場合の製品の直線部長さ l_s を示す。初期厚さ t_0 とローラー頂角 α の増加に対して製品の直線部長さ l_s が増加しているが、送り速度 v については、図6からほとんど直線部長さに影響を及ぼさないようにみえる。分散分析を行うと直線部長さの変化に対する寄与率が、厚さ 77.6%、頂角 18.0%、送り速度 1.0% であり、ローラー送り速度 v の寄与率の値は小さいが、実際には危険率1%で有意である。

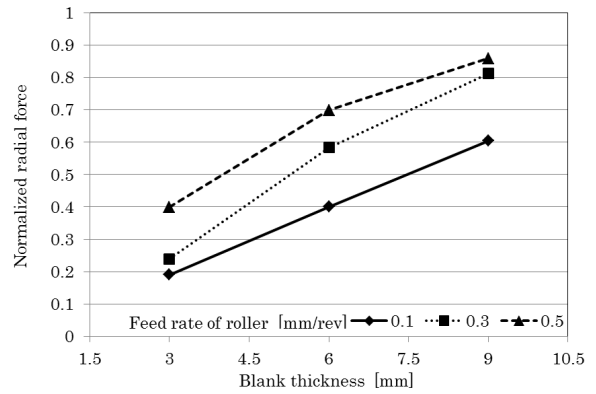


図4 ローラー頂角 $\alpha = 60^\circ$ に対する押込み力

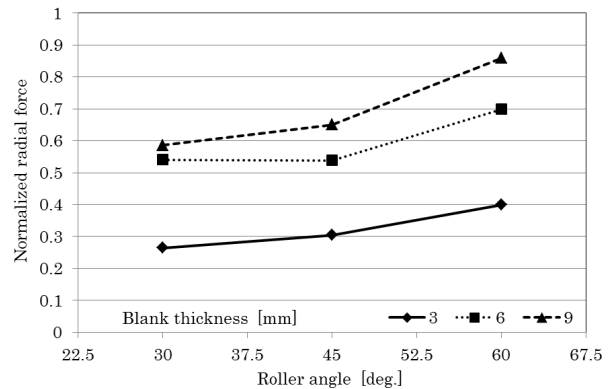


図5 送り速度 $v = 0.5$ mm/rev に対する押込み力

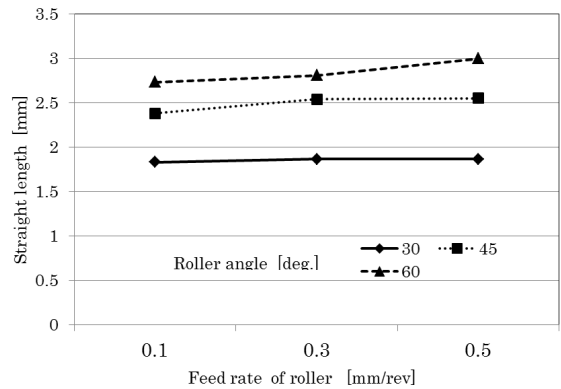


図6 試験片厚さ $t_0 = 6$ mm に対する直線部長さ

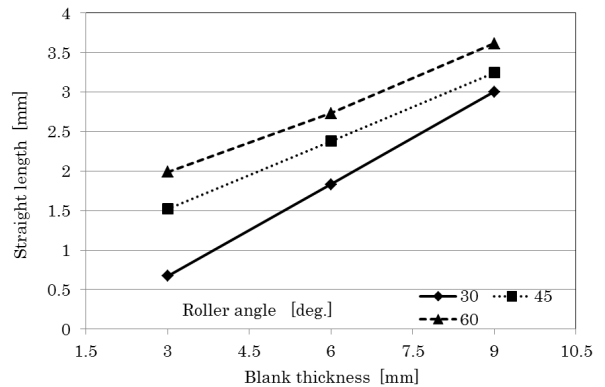


図7 送り速度 $v = 0.1$ mm/rev に対する直線部長さ

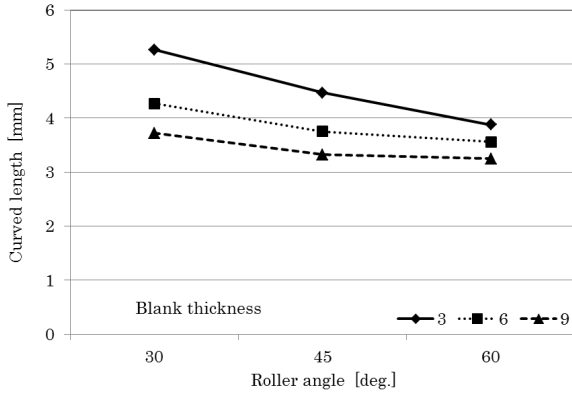


図 8 送り速度 $v = 0.3 \text{ mm/rev}$ に対する曲線部長さ

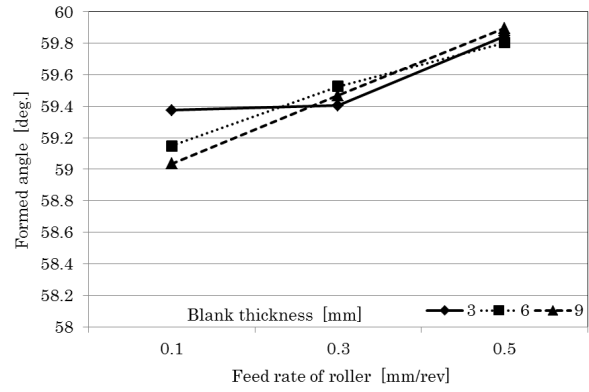


図 12 ローラー頂角 $\alpha = 60^\circ$ に対する成形後溝角度

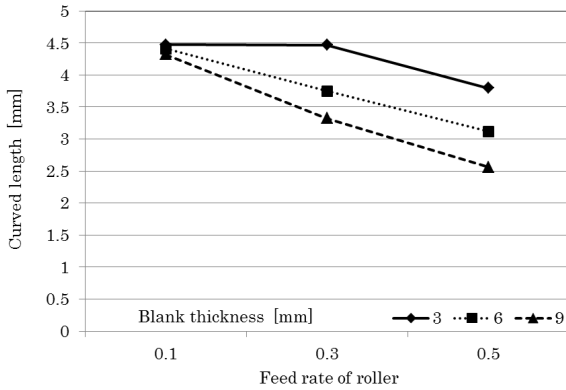


図 9 ローラー頂角 $\alpha = 45^\circ$ に対する曲線部長さ

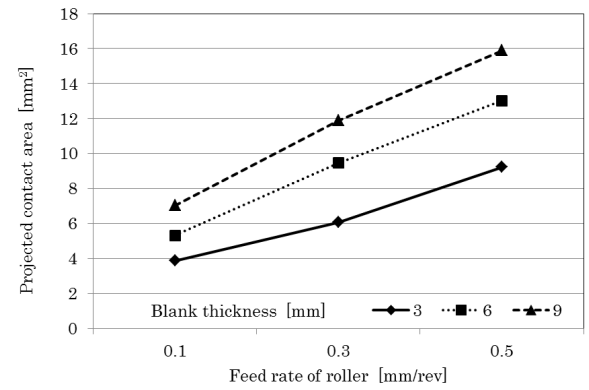


図 13 ローラー頂角 $\alpha = 60^\circ$ に対する投影接触面積

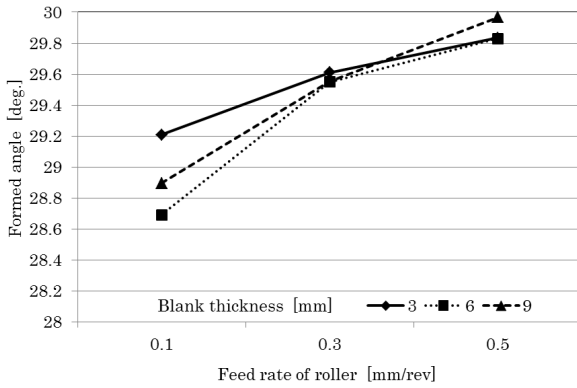


図 10 ローラー頂角 $\alpha = 30^\circ$ に対する成形後溝角度

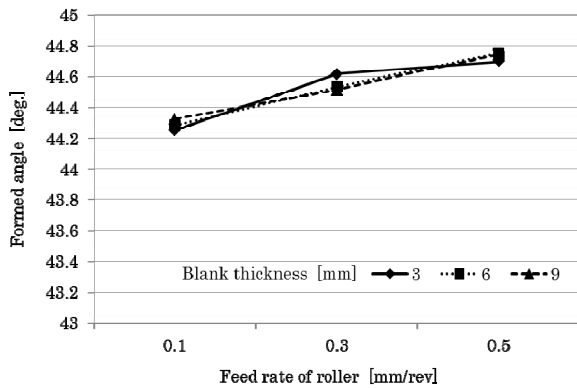


図 11 ローラー頂角 $\alpha = 45^\circ$ に対する成形後溝角度

図 8 にローラー送り速度 $v = 0.3 \text{ mm/rev}$ の場合、図 9 にローラー頂角 $\alpha = 45^\circ$ の場合の製品の曲線部長さ l_c を示すが、曲線部長さ l_c についてはローラー頂角 α 、初期厚さ t_0 、送り速度 v の増加に対して、逆に減少している。この減少に対する寄与率は、頂角 23.7%、速度 30.5%、厚さ 24.0%で、いずれも危険率 1%で有意となっている。

図 10 にローラー頂角が $\alpha = 30^\circ$ の場合、図 11 に $\alpha = 45^\circ$ の場合、図 12 に $\alpha = 60^\circ$ の場合の成形後の溝角度 α' の測定結果をそれぞれ示す。いずれの場合もローラー送り速度 v が大きいほど溝角度 α' が増加しているが、試験片の初期厚さ t_0 は溝角度 α' に殆ど影響を及ぼさない。また、成形後の溝の角度 α' は実測した成形ローラー頂角 α (30.03° , 45.03° , 60.03°) より小さな値となっているので、スプリングバックに相当する現象が生じていることになる。このスプリングバックに相当する角度変化 $\Delta\alpha$ はローラー送り速度 v が遅いほど大きくなる。

加工後の製品断面は図 3 の模式図のような形状をしているが、図 10、図 11、図 12 から成形後の直線部の溝角度 α' はローラー頂角 α より小さいので、送りを停止する瞬間の押込み量 $s = 6 \text{ mm}$ においては、図 3 の直線部が頂角 α のローラーと接触しており、除荷により α' の溝の角度になったものと思われる。図 4 では押込み力 F_r は送り速度 v に依存して増加しているが、図 6 では危険率 1% で有意ではあるものの、送り速度 v が直線部の長さ l_s に

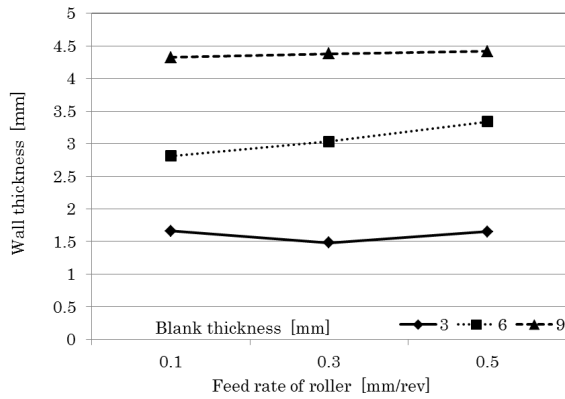


図 14 ローラー頂角 $\alpha = 30^\circ$ に対する垂直壁厚

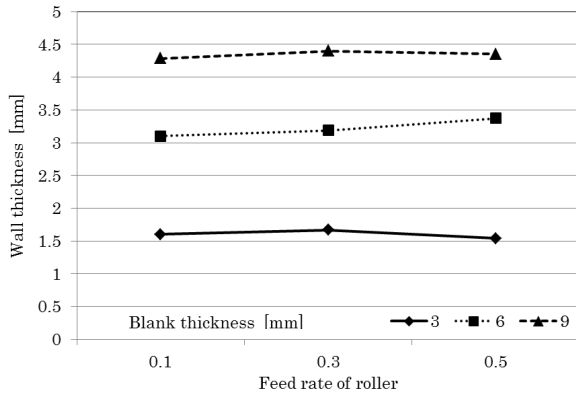


図 15 ローラー頂角 $\alpha = 60^\circ$ に対する垂直壁厚

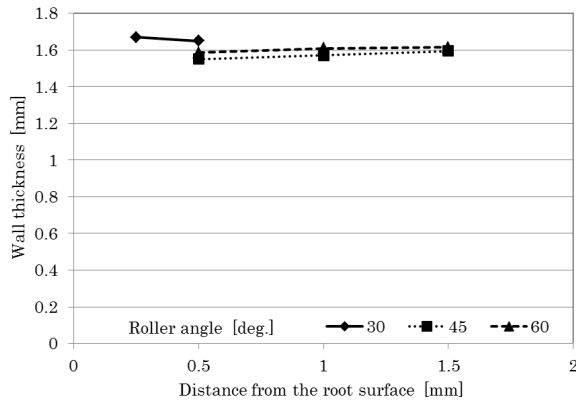


図 16 試験片厚さ $t_0 = 3$ mm に対する垂直厚さ分布

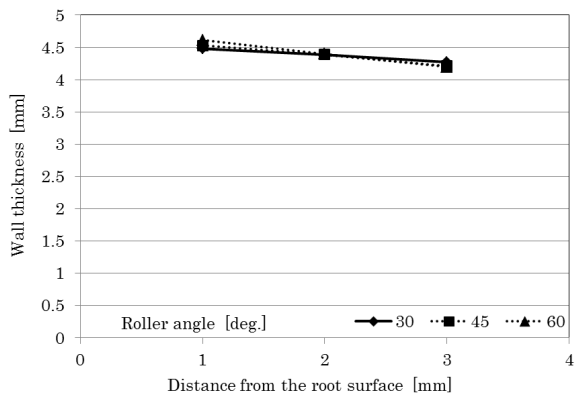


図 17 試験片厚さ $t_0 = 9$ mm に対する垂直厚さ分布

及ぼす影響は非常に小さい。回転成形における加工力はローラーと被加工物の間の接触面積の大きさによって決まるが、接触面積は図 3 の直線部の長さや円周方向の接触長さによって決まる。回転スプリッティングの場合の円周方向接触長さは押込み量 s と送り速度 v によって時々刻々変化するので、葉山によるねじ転造における円周方向接触長さの式²²⁾と実測した直線部長さから投影接触面積 A_p を求めると、ローラー頂角 $\alpha = 60^\circ$ に対して図 13 のような結果が得られて、送り速度 v の増加とともに投影接触面積 A_p が増加していることが確認できる。他のローラー頂角 α でも同様な関係が確認できるが、投影接触面積 A_p はローラー頂角 α 、送り速度 v 、初期厚さ t_0 の増加とともに増加し、それぞれの寄与率は 38.9%、28.1%、25.1% でいずれも危険率 1% で有意である。このようにして、ローラー送り速度 v は成形された溝の直線部の長さ l_s にはほとんど影響を及ぼさないが、押込み力 F_r には大きく影響を及ぼしていることの原因が説明できる。

図 14 にローラー頂角が $\alpha = 30^\circ$ の場合、図 15 に $\alpha = 60^\circ$ の場合の成形後の直線部に垂直な壁厚 t_w の平均値を示すが、ローラー頂角 α および送り速度 v に依存することなく、試験片の初期厚さ t_0 によって決まっており、その寄与率は 98.6% である。このような初期厚さ t_0 によってほぼ一意的に決まる直線部の垂直壁厚 t_w について、初期厚さが $t_0 = 3$ mm の場合、 $t_0 = 9$ mm の場合の垂直壁厚 t_w の分布を調べると図 16、図 17 のようになる。図 16 の $t_0 = 3$ mm の場合は直線部の長さ l_s が短いためにデータ数が少ないが、直線部に沿ってほぼ一定の厚さになっているようである。一方、図 17 の $t_0 = 9$ mm の場合は、測定結果から分散分析が可能であり、ローラー頂角 α や送り速度 v に依存せず、直線部の位置により先端に行くほど垂直壁厚 t_w が薄くなる傾向があり、この依存関係は危険率 1% で有意である。また、初期厚さが $t_0 = 6$ mm の場合も $t_0 = 9$ mm の場合と同様に直線部に沿って先端に向かって垂直壁厚 t_w が薄くなる傾向が認められ、 $t_0 = 3$ mm のような初期厚さが薄い場合とは材料流れが異なっているようである。

3・2 非対称押込み

図 2 には、ローラーの押込み位置が初期厚さ t_0 に対する対称位置ではなく非対称の場合を図示しているが、試験片の初期厚さを $t_0 = 9$ mm に固定し、押込み位置を対称位置から $\Delta x = 0.5, 1.5, 2.5$ mm だけオフセットさせた実験を行った。この場合、押込む部分の初期厚さが軸方向に非対称で、それぞれ 5 mm と 4 mm、6 mm と 3 mm、7 mm と 2 mm に対応している。ローラー頂角 α と送り速度 v は前節の対称押込みの実験の場合と同じ値を選んでいるが、この非対称押込みの実験に用いた試験片材料の圧縮試験による応力ひずみ曲線は $\sigma = 153e^{0.195}$ MPa であった。

ローラー送り速度 $v = 0.3$ mm/rev に対して、押込み位置のオフセット量 Δx を変化させた場合の押付け力 F_r を

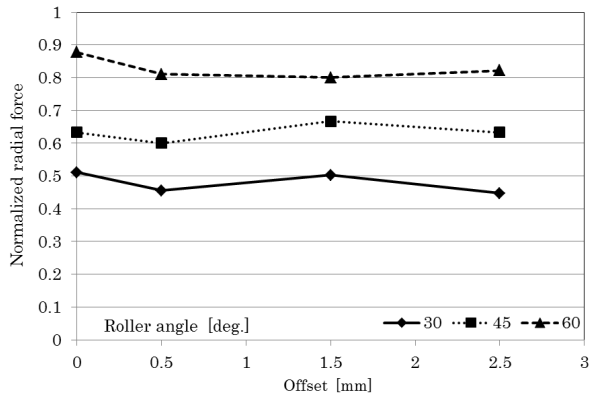


図 18 送り速度 $v = 0.3$ mm/rev に対する押付け力

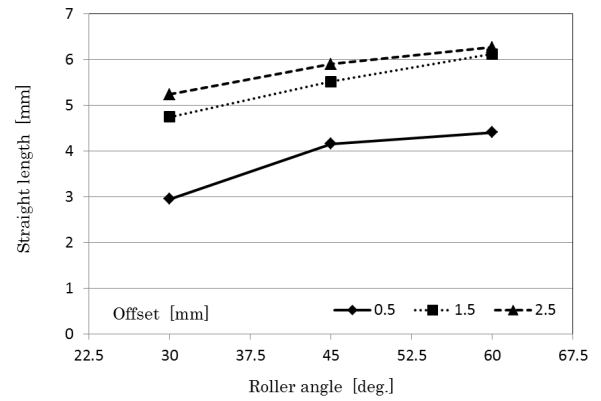


図 22 送り速度 $v = 0.1$ mm/rev に対する直線部長さ

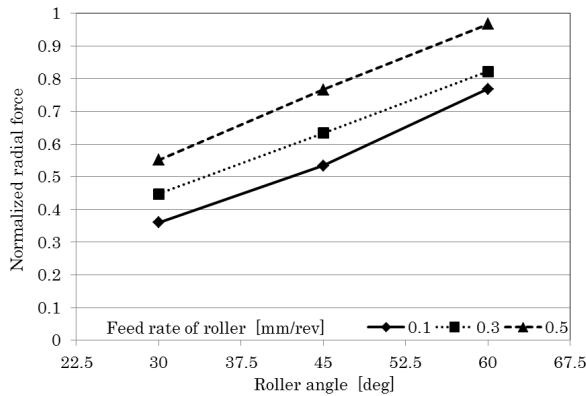


図 19 オフセット $\Delta x = 0.5$ mm に対する押付け力

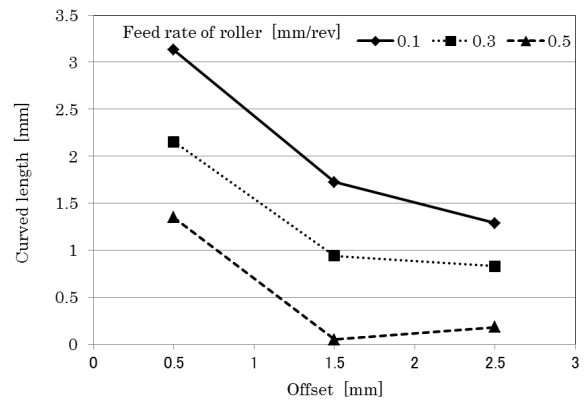


図 23 ローラー頂角 $\alpha = 45^\circ$ に対する曲線部長さ

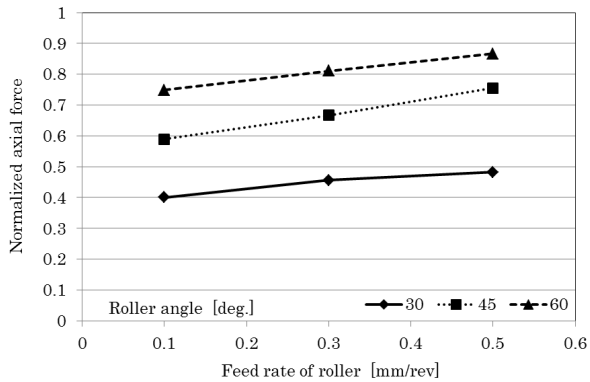


図 20 オフセット $\Delta x = 2.5$ mm に対する軸力

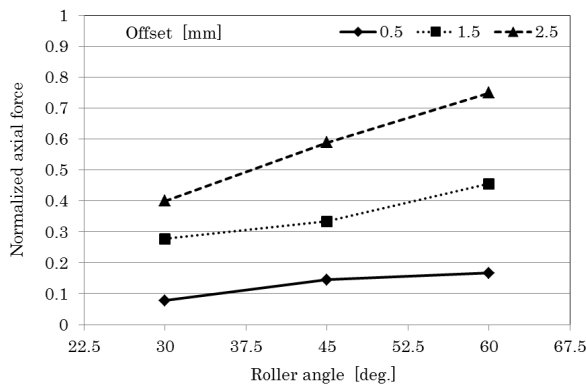


図 21 送り速度 $v = 0.1$ mm/rev に対する軸力

規格化して図 18 に示すが、押し込み位置による押付け力 F_r の変化はほとんど認められない。図 19 にオフセット量が $\Delta x = 0.5$ mm の場合の規格化押付け力 F_r を示すが、対称押し込みの場合と同様にローラー角度 α と送り速度 v の増加とともに押付け力 F_r が増加し、それらの寄与率はそれぞれ 60.0%と 36.8%であり、危険率 1%で有意である。

前節の対称押し込みの場合は軸方向（図 2 の X 軸方向）に加工力を生じないが、非対称押し込みにおいては軸方向の加工力（軸力、axial force） F_a を生じる。図 20 に押し込み位置のオフセット量が $\Delta x = 2.5$ mm の場合、図 21 にローラー送り速度が $v = 0.1$ mm/rev の場合の軸力 F_a を示す。これらの結果から、ローラー角度 α 、送り速度 v およびオフセット量 Δx が増加すると軸力 F_a が増加し、それぞれの寄与率は 16.1%、1.7%、77.1%でいずれも危険率 1%で有意であるが、押し込み位置のオフセット量 Δx の影響が最も大きい。

非対称押し込みの場合は、押し込み位置の両側で厚さが異なるので成形後の形状も厚肉側と薄肉側で異なっている。例えば、送り速度 $v = 0.1$ mm/rev の場合の厚肉側の直線部長さ l_s を図 22 に示すが、ローラー角度 α と押し込み位置のオフセット量 Δx の増加とともに厚肉側の直線部長さ l_s も増加し、その寄与率は 16.5%と 71.9%である。送り速度 v によっても影響を受け（寄与率 3.9%）、いずれも危険率 1%で有意である。一方、ローラー頂角が $\alpha = 45^\circ$ の

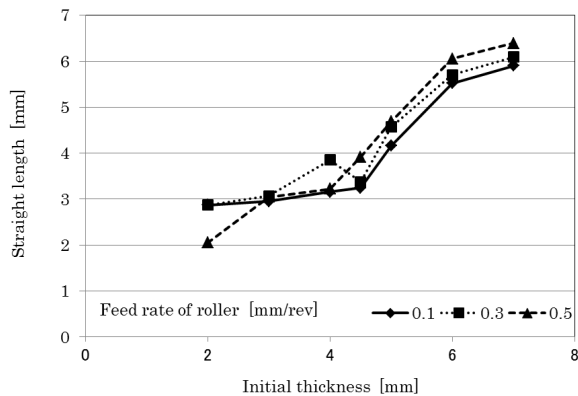


図 24 ローラー頂角 $\alpha = 45^\circ$ に対する直線部長さ

場合の厚肉側の曲線部長さ l_c の測定結果を示すと図 23 のようになり、ローラー送り速度 v とオフセット量 Δx の増加とともに厚肉側の曲線部長さ l_c は減少し、その寄与率は 36.4%と 51.9%であり、危険率 1%で有意である。

ローラー頂角 $\alpha = 45^\circ$ の場合に、オフセット量 Δx によって決まる薄肉側の厚さ 2, 3, 4 mm, 厚肉側の厚さ 5, 6, 7mm に対する直線部の長さ l_s の測定値を示すと図 24 のようになる。対称押込みの初期厚さ $t_0 = 9$ mm の場合は 4.5 mm に該当するので、その値も参考値として記入してある。図 24 の場合、横軸の厚さと縦軸の直線長さ l_s の間にほぼ線形関係が見出せる。ローラー頂角 $\alpha = 60^\circ$ の場合もほぼ同様な関係が見出せるが、 $\alpha = 30^\circ$ の場合には、厚さが薄い部分でそのような関係が見出せていない。

4. むすび

円板状ブランクに対する回転スプリッティングの実験を行い、ローラー頂角、ローラー送り速度、ブランク初期厚さの加工条件が押込み力、成形後の溝角度、直線部の長さなどに及ぼす影響を明らかにした。また、非対称の押込みの場合は軸方向にも加工力が必要となるが、押込み力や成形された直線部の長さに及ぼす加工条件の影響は対称押込みの場合の結果とほぼ同様になることを明らかにした。

このほかに、LS-DYNA による有限要素シミュレーションも行っており、本研究のようにローラーの先端丸み半径 ρ_R が小さな回転スプリッティングにおいて、実験と同様な製品形状と加工力を得るには単なるローラーの回転押込みだけでは不十分で、スプリッティング（裂開）に対応する節点の分離・開口を導入しなければならないことを確認している。その意味で、参考文献として引用した従来の数値シミュレーションは溝転造（groove rolling）^{23), 24)}の延長の回転押込みに過ぎず、回転スプリッティングにおける変形機構を調べているのではないことになる。

謝 辞

本研究は、公益財団法人 天田財団からの一般研究開発

助成（AF-2009011）によって遂行したことを付記するとともに、同財団に深謝致します。また、実験を担当した茶木智史君、高山喜博君、齊藤祐介君に感謝致します。

参考文献

- 1) C. Packham: *Sheet Metal Indust.*, **55-4** (1978), pp. 441-445.
- 2) D.H. Pollitt: Proc. 1st Int. Conf. Rotary Metal Working Processes (1st RoMP), (1979), pp. 19-32.
- 3) 芦澤嘉躬: 塑性と加工, **21-228** (1980), pp. 2-6.
- 4) E.E. Michaelis: *Sheet Metal Indust.*, **69-9** (1992), pp. 10-12.
- 5) 馬場惇: 塑性と加工, **29-324** (1988), pp. 13-20.
- 6) 馬場惇: 塑性と加工, **35-400** (1994), pp. 515-521.
- 7) D. Pollitt: *Sheet Metal Indust.*, **72-4** (1995), pp. 31-32.
- 8) 峰久允・野島和夫: 素形材, **30-6** (1989), pp. 11-16.
- 9) 田中命生・伊豫田洋海・上野恵尉・星野和志: 素形材, **36-5** (1995), pp. 14-19.
- 10) B. Kaftançlı, A. Nassirharand: *Advanced Technology of Plasticity 1987* (Edt. by K. Lange), (1987), pp. 1043-1049, Springer-Verlag.
- 11) D. Bauer: *J. Mater. Process. Technol.*, **24** (1990), pp. 225-233.
- 12) D. Schmoekkel, S. Hauk: *J. Mater. Process. Technol.*, **98** (2000), pp. 65-69.
- 13) S. Hauk, V.H. Vazquez, T. Altan: *J. Mater. Process. Technol.*, **98** (2000), pp. 70-80.
- 14) L. Huang, H. Yang, M. Zhan, L. Hu: *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **18** (2008), pp. 674-681.
- 15) L. Huang, H. Yang, M. Zhan: *Comput. Mater. Sci.*, **42** (2008), pp. 643-652.
- 16) L. Huang, H. Yang, M. Zhan, L. Hu: *Comput. Mater. Sci.*, **45** (2009), pp. 449-461.
- 17) H. Yang, L. Huang, M. Zhan: *Comput. Mater. Sci.*, **47** (2010), pp. 857-866.
- 18) 上野恵尉・上田雅信・谷口克己: 第 36 回塑加連講論, (1985), pp. 389-392.
- 19) C. Müller, T. Bohn, E. Bruder, N. Hirsch, H. Birkhofer: *Advanced Technology of Plasticity 2008*, (2008), pp. 774-779.
- 20) P. Goetz, P. Groche: *Advanced Technology of Plasticity 2008*, (2008), pp. 1513-1518.
- 21) C. Ludwig, D. Vucic, J. Ringler, P. Groche: *Advanced Technology of Plasticity 2008*, (2008), pp. 2026-2031.
- 22) 葉山益次郎: 塑性と加工, **9-86** (1968), pp. 190-197.
- 23) K. Kawai, K. Hattori, Y. Inomata: *Advanced Technology of Plasticity 1993* (Edt. by Z.R. Wang, Y. He), (1993), pp. 408-413, International Academic Publishers.
- 24) W. Kim, K. Kawai, H. Koyama, D. Miyazaki: *J. Mater. Process. Technol.*, **194** (2007), pp. 46-51.