

# ダイレスしごきスピニングの実用化に関する研究

横浜国立大学 工学部 生産工学科  
教授 川井謙一  
(平成9年度研究開発助成 AF-97005)

キーワード：スピニング，フレキシブル加工，NCスピニング

## 1. まえがき

しごきスピニングにおける変形は、ブランク内の任意の点の半径が加工中に変化しないことによって特徴づけられるが、このことは、ブランクの初期板厚  $t_0$ 、製品板厚  $t_f$ 、円すい半角  $\alpha$  の製品を加工する際に正弦則  $t_f = t_0 \sin \alpha$  が成立することを意味する。

従来のしごきスピニングでは製品と同一形状のマンドレルを用いて加工しているのに対して、しごきスピニングのフレキシブル化をめざして、バックアップローラ<sup>1)</sup>やバックアッププレート<sup>2)</sup>を用いた加工の試みが行われているが、これらの加工法では被加工材が成形用ローラとバックアップローラまたはバックアッププレートの間にはさまれて成形されることになる。

一方、図1のようにブランクをブランク保持用のマンドレルで支持し、ローラをブランクに押付けながら移動させることによっても成形が可能となる<sup>3)</sup>。この場合、マンドレルはブランクを支持して主軸とともに回転するだけの機能しかもたず、まさにダイレスしごきスピニングと呼ぶべきものである。即ち、しごきスピニングにおいて、成形用ローラとマンドレルの間で被加工材をしごくという過程は、必ずしも成形のために本質的な要素ではなく、フランジ部の剛性が保障されている場合には、正弦則あるいは製品形状に応じて成形用ローラを正確に移動させることが重要な要素である<sup>4)</sup>。さらに、数値制御技術を援用すれば種々のパス経路が容易に実現できるので、多種少量生産を視野においた極めてフレキシビリティに富んだ加工法となる。

著者の研究室では種々の軸対称製品に本加工法の適用を試みているが、本報では市販のアルミニウム H 材と O 材を用いて円すい台状シェルを成形した結果について報告する。

## 2. 実験方法

図1にダイレスしごきスピニングの原理図を示すが、直径  $d_M$  の円筒状（一様円筒である必要もない）マンドレルの端面に直径  $D_0 = 120$  mm、厚さ  $t_0 = 1$  mm のブランクを固定し、 $N = 187.5$  rpm の一定回転数で主軸を回転させる。直径  $d_R = 74$  mm、先端丸み半径  $\rho_R = 2$  mm の成形用ローラは AC サーボモータ、ボールねじ駆動の XY テーブル上に取付けられており、Y 軸はマンドレル軸に対して  $50^\circ$  傾斜している。成形用ローラの軌跡、速度は市販の汎用 NC ユニットを利用して任意にプログラム制御できるが、製品の円すい半角  $\alpha$  に対して図1の 0→1→2→3→0 のように正弦則  $t_f = t_0 \sin \alpha$  を満たすようなパスを採用すれば、1パスのダイレスしごきスピニングが可能となる。

ブランクには市販のアルミニウム板（JIS A1050-H, A1050-O）を用いた。単軸引張りにおける応力-ひずみ曲線を  $\sigma = Fe^n$  と仮定するとき、A1050-H 材に対しては  $F = 154 \sim 159$  MPa、 $n = 0.050 \sim 0.057$ 、また A1050-O 材に対し

ては  $F = 183 \sim 189$  MPa、 $n = 0.23 \sim 0.26$  であった。

実験は、室温で被加工材に潤滑剤（Diamond RO10）を塗布した条件下で行った。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 予備実験と最小マンドレル直径

予備実験として、 $d_M = 30, 40, 50$  mm のマンドレルをそれぞれ使用して、円すい半角  $\alpha$ 、ローラ送り速度  $v$ 、残留フランジ幅  $W$  などが成形に及ぼす影響を調べた。ここで、残留フランジ幅  $W$  とは、しわや破断などの欠陥を生じることなく成形が行われた際に、成形後に残留するフランジの幅が図1に示す  $W$  となるようなパスで成形することを意味している。

A1050-H 材および A1050-O 材のいずれに対しても、マンドレル直径  $d_M$  が小さい場合には、マンドレル肩部近傍で壁厚の薄肉化が生じ、肩部近傍で円周方向に亀裂の入った破断が観察されることがあった。この破断は製品と同一形状のマンドレルを用いる通常のしごきスピニングにおいてはほとんど観察されない形式の破断であり、図1に示すダイレスしごきスピニングには、マンドレルとして適用可能な最小直径が存在することになる。

予備実験の結果に基づいて、以下の実験ではマンドレル直径を  $d_M = 50$  mm、マンドレル肩部丸み半径を  $\rho_R = 2.7$  mm とした。また、製品の円すい半角  $\alpha = 15 \sim 35^\circ$ （A1050-O 材の場合は  $\alpha = 10 \sim 35^\circ$ ）、円すい面に沿う方向の成形用ローラのローラ送り速度  $v = 0.001 \sim 3.0$  mm/rev（A1050-O 材の場合は  $v = 0.001 \sim 2.0$  mm/rev）、残留フランジ幅  $W = 4 \sim 18$  mm の条件下で実験を行った。

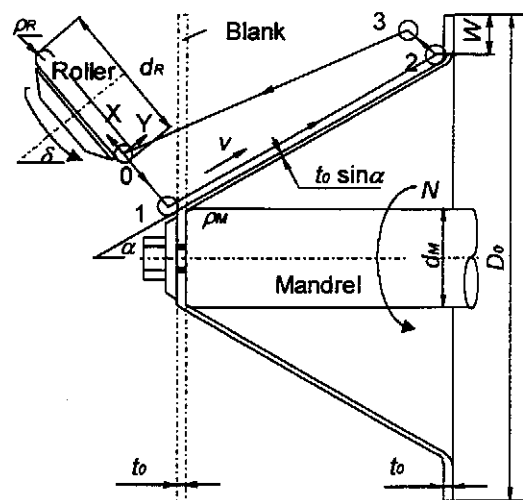


図1 製品と同一形状のマンドレルを使用しないダイレスしごきスピニング

### 3.2 成形限界

図2に、A1050-H材を用いた場合の円すい半角  $\alpha = 22.5^\circ$  の製品に対する実験結果の一例を示す。図の横軸の  $W$  はパスで設定した残留フランジ幅を示すが、図中の記号×は、当該のローラ送り速度  $v$  と残留フランジ幅  $W$  の組合せで成形している途中に壁部破断を生じたことを示している。残留フランジ幅  $W$  は成形前に図中の横軸に示した値に設定して成形するが、破断を生じた際の実際のフランジ幅は  $W = 27 \sim 27.5$  mm 程度であった。この破断の際の亀裂の入り方は、通常のごきスピニングの場合<sup>5)</sup>と同様であった。図中の記号△は、成形中にフランジ部でしわを発生したことを示している。一方、残留フランジ幅  $W$  の値が小さい場合には、加工の後期にフランジ剛性が不足するために、フランジがローラ進行方向の前方に倒れ、結果として製品外径がblank外径より小さくなる。この製品の外径減少は、図中では記号▽としてプロットされている。図中の記号○は、破断、しわ、外径減少のような欠陥を生ずること

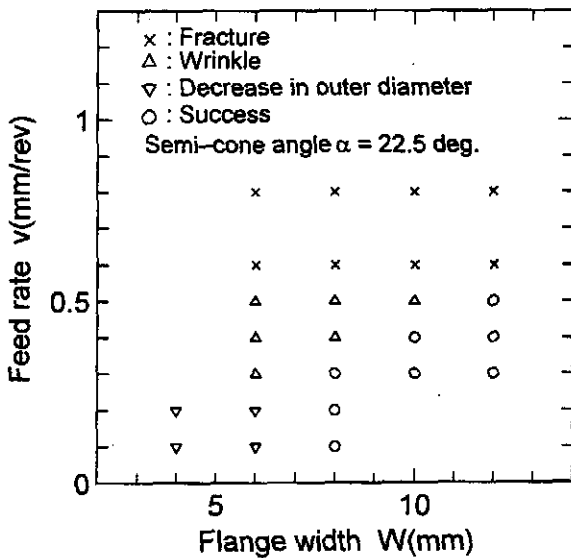


図2 円すい半角  $\alpha = 22.5^\circ$  に対する実験結果 (A1050-H材の場合)

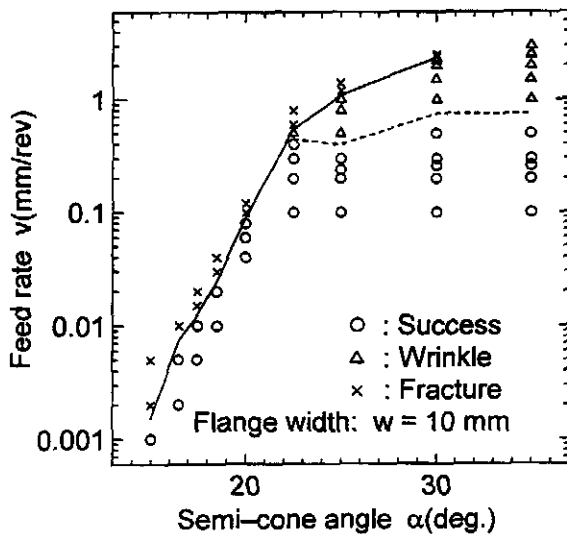


図3 残留フランジ幅  $W = 10$  mm に対する実験結果と成形限界 (A1050-H材の場合)

なく健全な製品が成形できる加工条件の組合せを示している。

A1050-H材を用いた場合の設定残留フランジ幅  $W = 10$  mm に対する実験結果を、図2と同じ記号を用いてまとめると図3のようになり、成形可能な加工条件の組合せを見出すことができる。図中の実線より速い送り速度では成形中に壁部破断を生じ、破線より速い送り速度ではフランジ部でしわを生じる。

残留フランジ幅  $W$  の設定値を変えると、しわ発生に対する成形限界が変化する。図4に示すように  $W = 16$  mm と残留フランジの幅を大きく設定すると剛性が高くなるので、しわによる成形阻害が少なくなる。一方、 $W = 6$  mm と残留フランジの幅を小さく設定すると、フランジ部におけるしわ発生の可能性が高くなるだけではなく、剛性の低下によってフランジが前方に倒れ、しわや破断を生じない製品でも製品外径がblank外径より小さくなる。さらに、円すい半角  $\alpha$  が小さい場合には、製品完成直前にローラ直下で破断を生じる(図4中の記号□)。このように、設定した残留フランジ幅  $W$  が小さくなると剛性の低下によって所望の製品を得ることができない。製品と同一形状のマンドレルを使用しないダイレスしごきスピニングの前提条件は、フランジ部に十分な剛性があることであるから、成形を可能にする最小フランジ幅が存在することになる。図3の  $W = 10$  mm の場合の実験結果においては、破線より遅い送り速度では健全な製品が得られているから、成形を可能にする残留フランジ幅は  $W = 10$  mm 程度とみなせる。即ち、A1050-H材の場合、 $W = 10$  mm 以上のフランジを残せるような形状の製品であれば、1パスのダイレスしごきスピニングが可能である。

円すい体のしごきスピニングにおいて、しわの発生のしやすさを表すしわ発生係数  $C$  と材料の加工硬化指数 ( $n$  値) の関係が調べられており、 $n$  値が小さな材料ほどしわ発生係数の値が大きく、しわが発生しにくい<sup>6)</sup>ことが明らかにされている。従って、 $n$  値が大きい A1050-O 材は A1050-H 材よりしわを発生し易いことが予想されるが、A1050-O 材を用いた場合の残留フランジ幅  $W = 10$  mm に対する実験結果を図5に示す。A1050-H 材に対する図3と比較すべきもので、図3と同じ記号○、△、×が使用されているが、通常のごきスピニングと同様の壁部破断

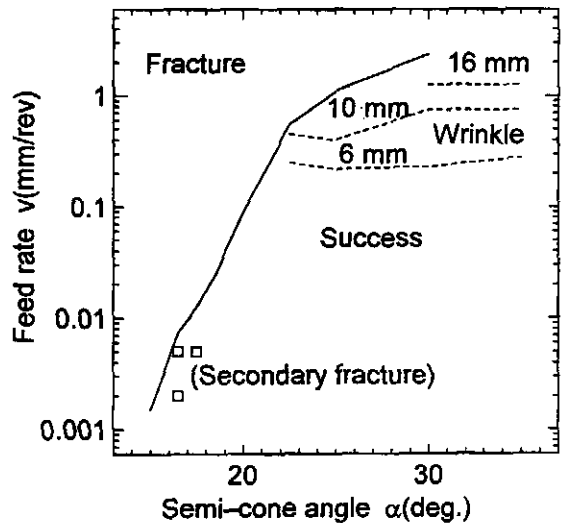


図4 残留フランジ幅  $W$  が成形限界に及ぼす影響 (A1050-H材の場合)

(記号×)を生じる際の実際のフランジ幅は  $W = 30 \sim 32$  mm 程度であった。前述の予想通り、図3と比較するとフランジ部におけるしわを発生(記号△)しやすくなっている。一方、円すい半角  $\alpha$  が  $12.5^\circ$  以下の場合には、ローラの回転速度がブランク回転速度(主軸回転速度)にほぼ等しくなった際に共振のような大きな振動を生じて破断に至る。通常の破断(記号×)の場合とは様相が異なるので、図5中では記号◇でプロットして区別しているが、本様式の破断についてはさらに検討を要する。いずれにしても、 $\alpha = 13^\circ$  未満の円すい半角の製品は1パスしごきスピニングできないという通常のしごきスピニング<sup>7)</sup>と同様な傾向がある。

A1050-O材についても、残留フランジ幅  $W$  の設定値がフランジ部におけるしわ発生に及ぼす影響を調べるために、 $W = 16$  mm および  $W = 6$  mm に対するしわ発生・破断の成形限界線を図5中に破線で示すが、A1050-H材に対する図4

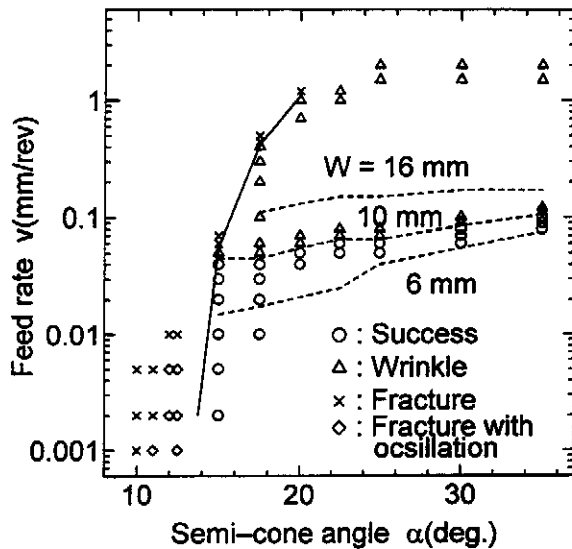


図5 残留フランジ幅  $W = 10$  mm に対する実験結果と成形限界 (A1050-O材の場合)

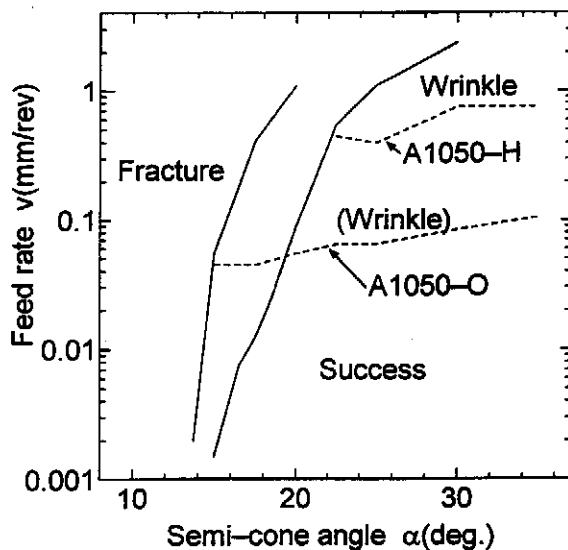


図6 残留フランジ幅  $W = 10$  mm に対する成形限界 (A1050-H材, A1050-O材)

と同様な傾向が確認できる。一方、図5から  $W = 10$  mm に対する破線より遅いローラ送り速度では健全な製品が得られることが確認でき、A1050-O材の場合もA1050-H材の場合と同様に、 $W = 10$  mm 以上のフランジを残せるような製品形状であれば、1パスのダイレスしごきスピニングが可能である。

A1050-H材およびA1050-O材に対して、残留フランジ幅の設定値を  $W = 10$  mm とした場合の成形限界を図6にまとめて示す。この図を比較すると、A1050-O材の場合はフランジ部にしわを発生しやすいが、A1050-H材の場合より、円すい半角  $\alpha$  が小さい製品を破断することなく成形できる。従って、円すい半角  $\alpha$  が小さな製品はA1050-O材、円すい半角  $\alpha$  が大きな製品はA1050-H材の方が適していることになる。

### 3.3 製品壁厚分布

A1050-H材の場合に、残留フランジ幅  $W = 10$  mm に対してしわや破断を生じることなく成形できた製品の壁厚分布を調べると図7のようになる。同図中の破線は、正弦則から計算される壁厚である。図の横軸は円すいの母線上のストローク  $S$  であるが、ストロークが  $S = 6 \sim 8$  mm の位置で壁厚の極小値が観察される。通常のしごきスピニングにおいても壁厚の薄肉化は観察される<sup>9)</sup>が、本加工では支えとなるマンドレルがないので、その現象はさらに助長されている。

A1050-O材についても、残留フランジ幅  $W = 10$  mm に対してしわや破断などの欠陥を生じることなく成形できた製品の壁厚分布を調べると図8のようになり、この場合もストロークが  $S = 6 \sim 9$  mm の位置で壁厚の極小値が観察される。一方、図7および図8のいずれにおいても、壁厚の極小化が観察される部分を除けば、通常のしごきスピニングと同様に正弦則  $t_f = t_0 \sin \alpha$  が成立していることが確認できる。

図1のパス1→2で示されるように、本研究では円すい半角に沿った直線パスで加工しているが、直線パスでは被加工材が加工初期に大きな曲げを受け、断面の急変部は製品強度を低下させ、マンドレル肩部に丸み半径を付けてもその効果は消失しない<sup>8)</sup>。そこで、元のブランク厚さ  $t_0$  から正弦則で規定される製品壁厚  $t_f$  まで徐々に壁厚が変化するような非線形ローラパスを加工初期に採用すれば、

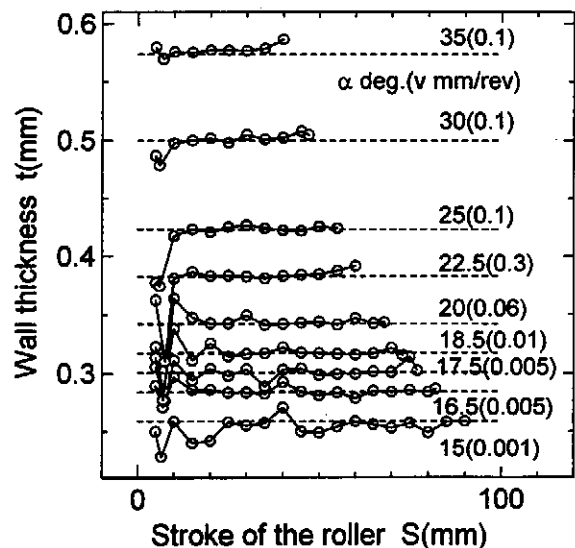


図7 A1050-H材の場合製品の壁厚分布

表 1 製品精度の比較

Semi-cone angle $\alpha_1$ (deg.)	Feed rate $v$ (mm/rev)	Material	Roundness (mm)			Semi-cone angle $\alpha_2$ (deg.)	
			A	B	C	RD	TD
20	0.04	A1050-H	0.04	0.20	0.10	20.18	20.30
20	0.04	A1050-O	0.03	0.08	0.03	20.10	20.13
35	0.1	A1050-H	0.03	0.04	0.04	35.38	35.33
35	0.1	A1050-O	0.01	0.02	0.02	35.28	35.28

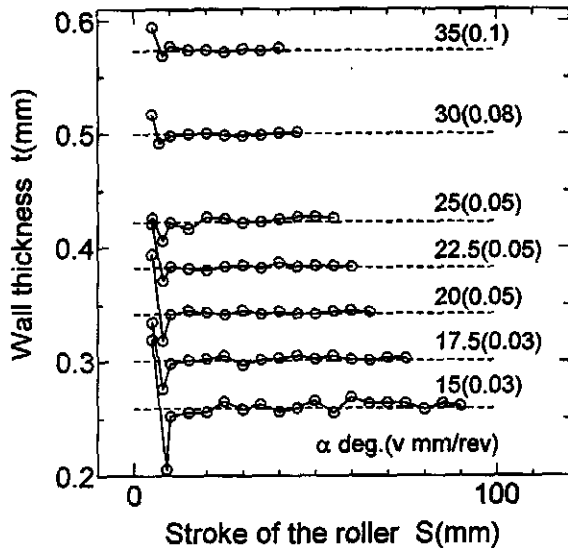


図 8 A1050-O 材の場合の製品壁厚分布

壁厚の薄肉化を小さくできると期待できる。事実、加工開始からストローク  $S=8$  mm の位置まで壁厚が徐々に変化するような成形用ローラの非線形パスを採用し、 $S=8$  mm 以降は直線パスで加工すれば、製品の壁厚分布は図 9 のようになり、図 7、図 8 に比較すると壁厚の薄肉化は著しく改善できることが確認できる。

### 3.4 製品精度

残留フランジ幅  $W=10$  mm の場合の製品精度の測定例を表 1 に示すが、真円度は製品の高さ方向を 4 等分してマンドレル端部に近い等分点 A、中央の等分点 B およびフランジに近い等分点 C の 3 点で測定した。また、製品の円すい半角は素板の圧延方向 RD とそれに直交する方向 TD の 2 箇所測定した。製品精度はしわや破断を生じることなく成形できた全ての製品に対して測定したが、製品の真円度については A1050-O 材の方が A1050-H 材の場合より良好であった。また、とくに円すい半角  $\alpha$  が小さい場合には、A1050-H 材の製品は真円度が悪化するだけでなく、円すい半角  $\alpha$  が円周方向で若干変化していることが確認できた。

### 4. むすび

製品と同一形状のマンドレルを使用しないダイレスしごきスピニングの技術的可能性を検討するために、A1050-H 材ならびに A1050-O 材を用いて広範な実験を行

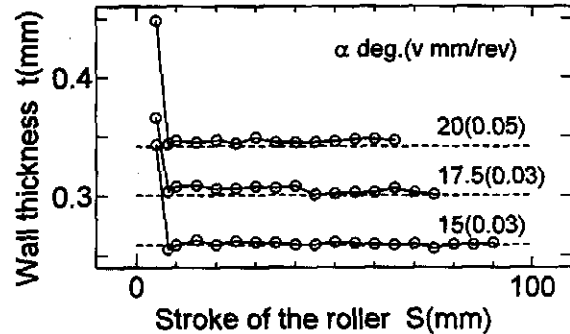


図 9 非線形パスによる製品壁厚分布の改善 (A1050-O 材の場合)

い、本加工法が技術的に可能であることを明らかにした。また、本研究によってダイレスしごきスピニングに関して以下の結論を得た。

- (1) 成形中の壁部破断およびフランジ部のしわ発生に対する成形限界が存在する。
- (2) 成形限界は製品の円すい半角  $\alpha$  と成形用ローラの送り速度  $v$  の組合せで記述できる。
- (3) 製品の外径減少を防止するために残留フランジ幅  $W$  の最小値が存在する。
- (4) ダイレスしごきスピニングにおいても通常のしごきスピニングと同一の正弦則が成立している。

最後に、本研究において実験を担当された横浜国立大学の工藤洋明助手、大学院生の楊立男君に感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 島進・小寺秀俊・村上浩隆・糸井豊：平成 6 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(1994)，579-582。
- 2) 松原茂夫：平成 6 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(1994)，387-390。
- 3) D.C. Kang, Z.R. Wang, S.D. Li and Q.M. Cheng: Proc. 3rd Int. Conf. RoMP (Ed. by M. Kobayashi), (1984), 165-173, IFS Ltd. and North Holland.
- 4) 川井謙一：塑性と加工，35-406(1994)，1286-1290。
- 5) 葉山益次郎・田子章男：塑性と加工，9-84(1968)，37-45。
- 6) 葉山益次郎：日本機械学会論文集 C，45-400(1979)，1415-1425。
- 7) C.L. Packham: Metallurg. Metal Forming, 43-8(1976), 250-252.
- 8) R.L. Kegg: J. Eng. Ind., Trans. ASME, 83-2(1961), 119-124.