

テーパリーフスプリング用テーパ圧延制御法の開発

綾田 倫彦*・佐藤 俊明*²・堺 義弘*²・河久保 光茂*²
宇都宮 裕*³・斎藤 好弘*³

Development of Controlled Tapered Rolling Method for Manufacturing Tapered Leaf Spring

Michihiko AYADA, Toshiaki SATO, Yoshihiro SAKAI, Mitzushige KAWAKUBO,
Hiroshi UTSUNOMIYA and Yoshihiro SAITO

Synopsis : In order to produce Tapered Leaf Spring (TLS), a new Controlled Taper Rolling (CTR) method is developed. This process is a combination of the edge rolling used grooved rolls and the flat rolling. It is very important in this method to predict the deformation properties such as spread precisely. For the first pass, quadratic equations which relate the reduction in width and the mean thickness increment, is obtained. For the second pass, it was clarified that Ekelund's equation was good agreement with the experimental values even if the rolling diameter changed from 125 mm to 720 mm and the rolling temperature changed from 1073K to 1223K. The actual pass schedule to produce TLS is designed by using the data obtained from these steady state rolling.

It is afraid that there is large difference in the deformation and loading properties between the steady state rolling and the non-steady state rolling such as tapered rolling. However, it was clarified that the spread is not effected and projected contact length is effected in tapered rolling. The pass schedule based on the steady state rolling can be applicable and the rolling load and the rolling torque might be predicted by concerning the change of the projected contact length.

Key words : tapered leaf spring; controlled tapered rolling; deformation properties; steady state; non-steady state; projected contact arc length; spread; rolling load; rolling torque.

1. はじめに

自動車の燃費向上を目的として、板ばねや巻きばねなどの懸架用ばねも軽量化が図られている^{1,2)}。テーパリーフスプリングは非線形特性効果による乗り心地性の改善と軽量化による燃費向上を目的として考案された板ばねである。最近では、加工熱処理、特にオースフォーミングを併用することにより、高強度・高靱性化の材質改善を図っている³⁻⁵⁾。著者らも、既にJIS SUP10を基本鋼種とした基礎実験により、オースフォーミングにおける結晶粒微細化とそれによる高耐久化について報告した⁶⁾。

一方、この製造方法に関してはこれまで詳細な報告はなされていない。過去には、偏芯ロールを用いた圧延、テンプレート制御による引出し圧延などが行われていたようであるが、最近では金型費の低減、生産性の向上等を目的として、NC制御による圧延法が開発されている³⁾。しかしながら、その加工方法は製造ノウハウとしてこれまで公表されていない。我々は各種形状のテーパリーフを高生産タクトで製造できる方法として、制御テーパ圧延法 (Controlled Tapered Rolling Method, 以下CTR法と呼ぶ。)を開発

した⁷⁾。この方法は幅方向圧延 (エッジローリング) と板厚方向圧延の組合せ圧延であり、板厚テーパ圧延時の幅広がりをおおむね予測し、板厚圧延後の板幅が一定となるように幅方向テーパ圧延を行う方法である。テーパリーフは車種により形状が異なるため多品種生産であり、かつ、板幅、板厚の公差が厳しく、CTRプロセスにおいて変形特性や負荷特性を予測することは製品精度の向上や機械設備の設計にとって非常に重要である。特に、最近ではモディファイドオースフォーミングの採用により1073K前後の低温域圧延が行われるようになり、従来の高温域圧延とは変形・負荷特性が異なる可能性がある。また、テーパ圧延ではロールギャップが常時変化する、いわゆる非定常圧延が行われるため、定常圧延と比べて変形・負荷特性が大きく異なることが懸念される。なお、造船用の差厚鋼板などでテーパ圧延が行われているが^{8,9)}、この場合は広幅・薄鋼板の圧延であり、かつテーパ勾配が小さく幅広がりほとんど無視し得るのに対して、CTR法の場合は、テーパ勾配が大きく非定常圧延による影響が大きいと考えられる。そこで本報では特にこのCTR法での変形・負荷特性に及ぼす加工条件の影響に注目しながら非定常圧延との差異に

平成10年11月12日受付 平成11年6月11日受理 (Received on Nov. 12, 1998; Accepted on June 11, 1999)

* 日本発条 (株) 精密ばね生産本部 (Precision Spring & Components Div., NHK Spring Co., Ltd., 4056 Aza-Sakuradai Nakatsu Aikawamachi Aikoh-gun Kanagawa-ken 243-0303)

* 2 日本発条 (株) 研究開発本部 (R & D Div., NHK Spring Co., Ltd.)

* 3 大阪大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Osaka University)

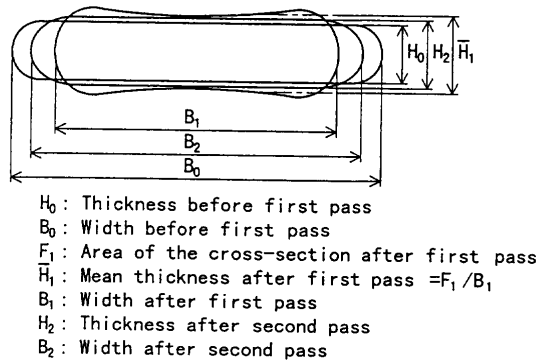


Fig. 1. Symbols used in this paper illustrated in the cross-section.

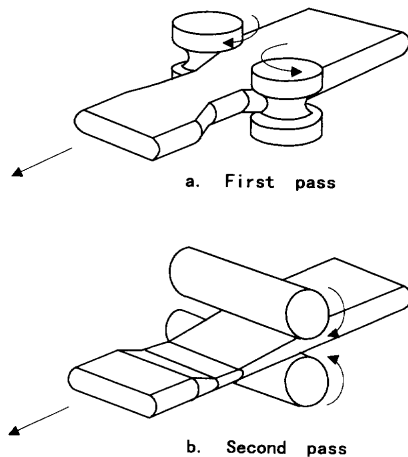


Fig. 2. Schematic illustrations showing the principle of CTR.

関して考察した。

2. 記号の説明

Fig. 1に、本論文で用いる記号を横断面形状で示す。素材は角材を熱延したものであり、両端の曲率半径が板厚の1/2の半円状となっている。 B は板幅、 H は板厚を示し、添字0は圧延前、添字1は第一パス圧延後および添字2は第二パス圧延後の形状を示す。第一パスは孔型ロールによるエッジング圧延のため圧延後は一般にはドッグボーン形状となるが、 \bar{H}_1 は圧延後の断面積 F_1 を板幅 B_1 で除した平均板厚である。

3. 実験方法

CTR法の加工概念をFig. 2に示す。第一パスでは、溝付きロールによる板幅方向のテーパ圧延（エッジング圧延）が行われ、第二パスでは平ロールによりロールギャップを変化させつつ板厚方向のテーパ圧延が行われる。この時、取付けスペース上の制約により第二パス圧延後の板幅が一定（＝素材板幅）となることが要求される。したがって、

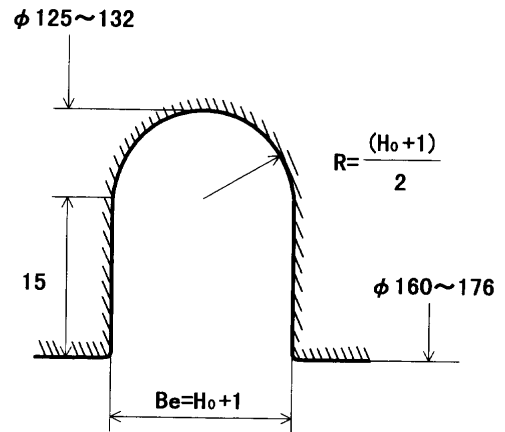


Fig. 3. Groove shape of the roll for the first pass.

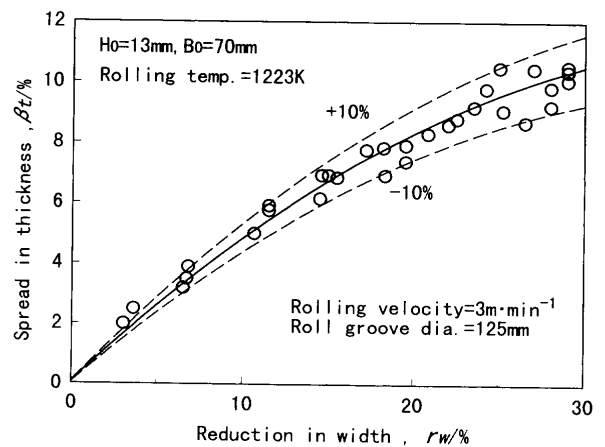


Fig. 4. Relation between the reduction in width and the spread in thickness in the first pass.

第二パス後の板幅が一定となるように、第一パスであらかじめ幅調整圧延を行う必要がある。

この加工方法が成り立つかどうかを確認するために、基礎実験として各種のロールを用いて変形・負荷特性を調べた。第一パス圧延ではFig. 3に示すカリバーロールを用いた。ロール溝幅は素材板厚+1mmとし、ロール溝底曲率半径はロール溝幅の半分とした。素材加熱は1243K、圧延温度は1223K、無潤滑でロール周速は $3\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ とした。第二パス圧延ではロール径が125 mm、250 mm、320 mm、710 mmの4種類のロールを用いた。素材加熱は1243K一定であるが圧延温度は1073Kから1223Kまで変化させた。圧延速度は $3\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ から $11.4\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ とした。なお、材料はJIS SUP9の熱延板ばねを素材として、最小板厚6 mm、板幅50 mmから最大板厚20 mm、板幅90 mm間での各種形状の板ばね素材を用いた。

4. 実験結果

Fig. 4に第一パス圧延における板幅方向の圧下率と平均板厚でみた板厚増加率（通常の幅広がり率に相当）との関

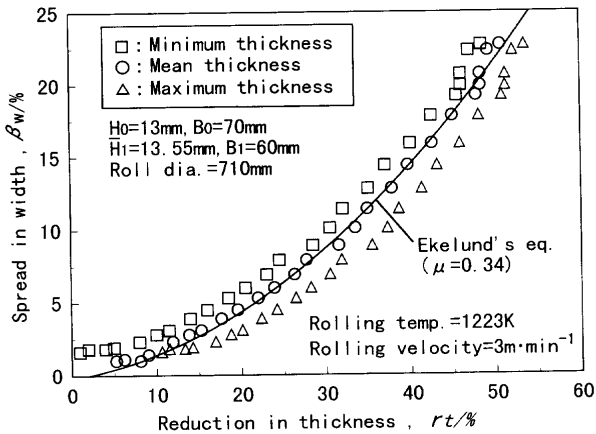


Fig. 5. Effect of the evaluation of the thickness after the first pass on the spread in the second pass.

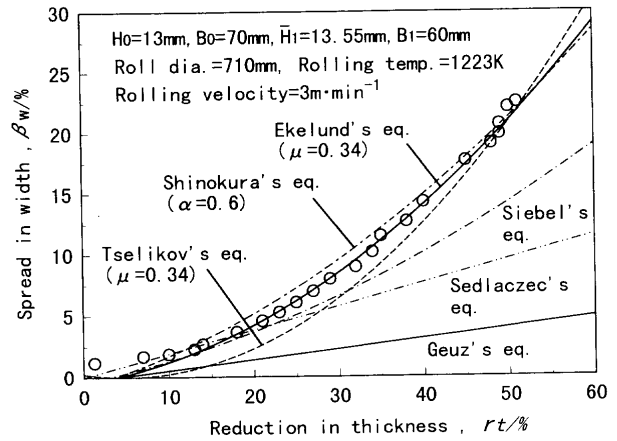


Fig. 6. Comparison of the calculated and the experimental values of the spread in the second pass.

係の一例を示す。通常の平圧延における幅広がり挙動とは異なり、圧下率に対して幅広がり量が指数関数的に増加する傾向はみられず、低圧下率では幅広がり量が大きく、圧下率の増加と共に幅広がり量が抑制される傾向がみられる。第一パスでの幅広がりに対して、これまで提案されている各種の幅広がり式を検討したが、精度の高い汎用式はなく、圧下率(r_w)と幅広がり(β)を以下の(1), (2)式で定義した場合、両者の関係は(3)式の二次回帰式で良く近似できることが判った。

$$r_w = \frac{\Delta B_1}{B_0} \dots\dots\dots (1)$$

$$\beta_t = \frac{\Delta \bar{H}_1}{H_0} \dots\dots\dots (2)$$

$$r_w = \alpha_1(\beta_t)^2 + \alpha_2(\beta_t) + \alpha_3 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ΔB は幅圧下量($=B_1 - B_0$)、 $\Delta \bar{H}_1$ は板厚増加量($=\bar{H}_1 - H_0$)、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ は素材形状、ロール径などによって決まる定数である。一般に、素材板厚、ロール径が大きいほど、同じ幅圧下率に対する板厚の増加量が大きくなる。(3)式による回帰精度はFig. 4の例に示すように、各種素材形状に対してほぼ $\pm 10\%$ であった。これは一見、誤差が大きいように思われるが、板厚の増加量そのものが小さく実用上問題のない精度である。なお、板厚増加量が素材板厚+1mmを越えた領域は過充満であり、圧延材の表面に段差傷がつくためこれ以下の圧下率に抑える必要がある。

Fig. 5に、第二パス圧延における圧下率(板厚圧下率)と幅広がり率の関係を示す。ここで、素材の第一パス圧延後の板厚の定義が問題となるが、ここではダブルバレルの最大、最小、平均の板厚を各々第一パス後の板厚として定義した場合の幅広がり率を比較した。図中、以下の(4)式に示すEkelundの式¹⁰⁾を実線で示した。

$$\Delta B = \left\{ 4m^2(\bar{H}_1 + H_2)^2 \left(\frac{H_2}{B_2} \right)^2 + 4mL(3\bar{H}_1 - H_2) \right\}^{1/2}$$

$$-2m(\bar{H}_1 + H_2) \frac{L}{B_1} - B_1 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ΔB は幅広がり量、 L は投影接触長を示す。また、 C をロール材質によって決まる材料定数、 T を圧延温度($^{\circ}C$)とすると m および摩擦係数 μ は、各々以下の式であらわされる。

$$m = \frac{16\mu L - 1.2\Delta H}{\bar{H}_1 + H_2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\mu = C(1.05 - 0.0005T) \dots\dots\dots (6)$$

ただし、Fig. 5において、実線のEkelundの式における摩擦係数 μ は0.34で一定とした。この理由については後述する。

Fig. 5より、Ekelundの式は最大板厚を採用した場合は幅広がりを通大評価し、最小板厚を採用した場合は過小評価することが判った。すなわち、第一パス後の平均板厚を採用することにより、低圧下率ではやや過小評価するものの、第二パスの幅広がり量を良く予測できることが判った。また、Fig. 6に、前述の定義にしたがって第二パスでの幅広がりの実験値とGeuz¹¹⁾、Sedlaczec¹²⁾、Siebel¹³⁾、Tselikov¹⁴⁾、篠倉¹⁵⁾らの幅広がり式とを比較した。図中の丸印が実験値であり、Geuz, Sedlaczec, Siebelらの式はいずれも幅広がりを通小評価し、篠倉の式はEkelundの式($\mu=0.34$)とほぼ同等の精度を有しているものの圧下率50%以下の領域で幅広がりをやや過大評価、Tselikovの式は逆に過小評価することが判った。この中では圧下率10%以下の領域でやや幅広がりを過小評価するものの、Ekelundの式が最も実験値と良く対応することが判明した。Fig. 7はロール径が125mmから710mmの広範囲において幅広がりに及ぼす比ロール径、板幅比の影響についてみたものである。図中の各実線は(4)式のEkelund式において $\mu=0.34$ として求めた計算値をあらわす。計算値と実験値は良い対応を示してしており、この比ロール径17~51、板幅比4.5~8.3の範囲内では

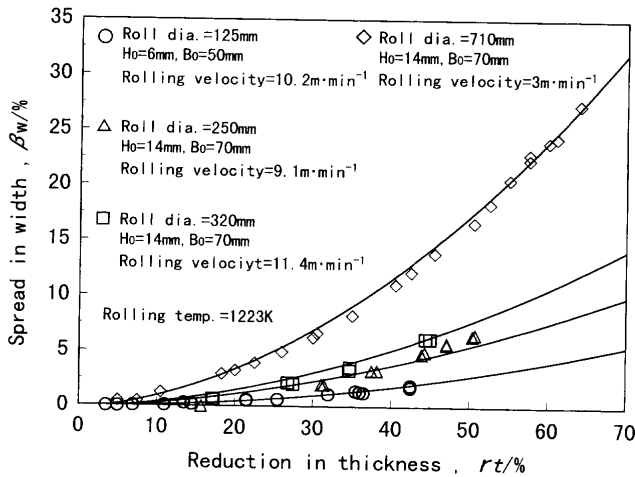


Fig. 7. Effect of the roll diameter on the spread in the second pass. Specimens were rolled without first pass. Real lines show the Ekelund's equations under the condition of $\mu=0.34$.

Ekelund式が適用可能であることが判明した。

5. CTRプロセスにおけるパススケジュールの設定

以上の定常圧延での実験結果をもとにして、幅方向の圧延である第一パスのエッジング圧延と板厚方向の圧延である第二パス圧延の2パスを組み合わせることにより制御テーパ圧延(CTR)プロセスにおけるパススケジュールを検討した。Fig. 8にパススケジュールを決定するためのフローチャートを示す。まず、第二パス圧延前の板ばねの長手方向(y方向)を最小10mm間隔までの微小要素に分割する。分割した一つの要素に関して第一パス圧延後の幅を仮定する。次にこの仮定した幅に対して、先に求めた第一パス圧延での幅圧下率と板厚増加率の関係式、(3)式を用いて第一パス圧延後の平均板厚を予測する。この仮定した第一パス圧延材を用いて第二パス圧延での幅広がりやをEkelundの式により計算して製品公差(± 0.8 mm)に入るかどうかを判定する。製品幅公差の上限を上回る場合は、第二パスでの板厚圧下率を下げる方向、すなわち第一パスでの幅圧下量を減じて平均板厚を下げる方向の修正を加える。製品幅公差の下限を下回る場合は逆の計算を行い、製品公差に入るまで計算を繰り返す。圧延後の長手方向の位置は微小要素当たりの長手方向の伸び量を圧延開始端から積分することにより求まる。

この考えに基づいて、第一パス形状を求めて実際に圧延した例をFig. 9に示す。図中、実線は第二パス圧延後の板厚の設計値、二点鎖線は実線の形状から求めた第一パス圧延後の板幅形状を示す。それらの設計値に対して、□は第一パス後の板幅の実測値、○は第二パス後の板厚の実測値を示す。一部、第一パス圧延での設計値に対して実際の圧延がややずれたため、第二パス圧延後の板幅が大きくなっ

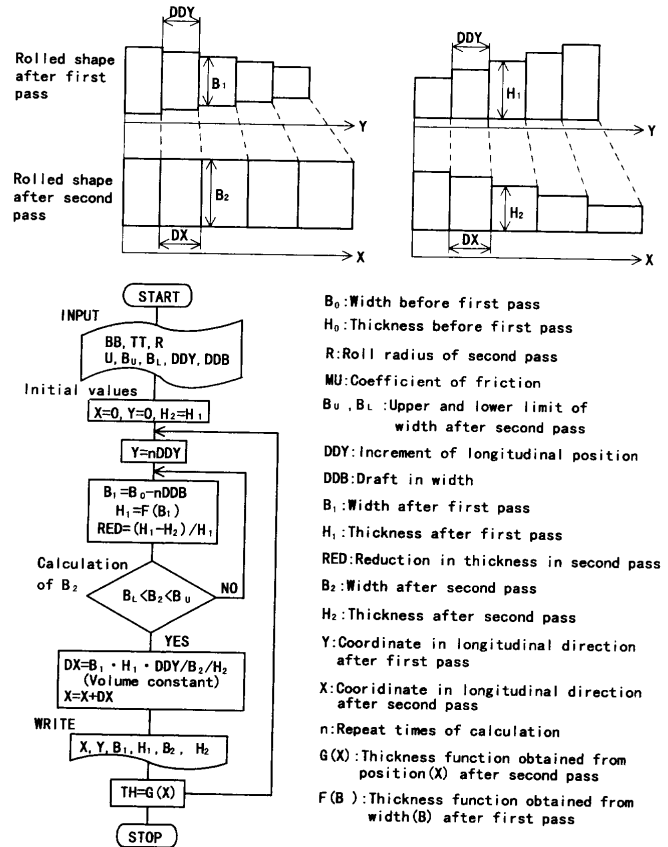


Fig. 8. Flow chart for the determination of the pass schedule.

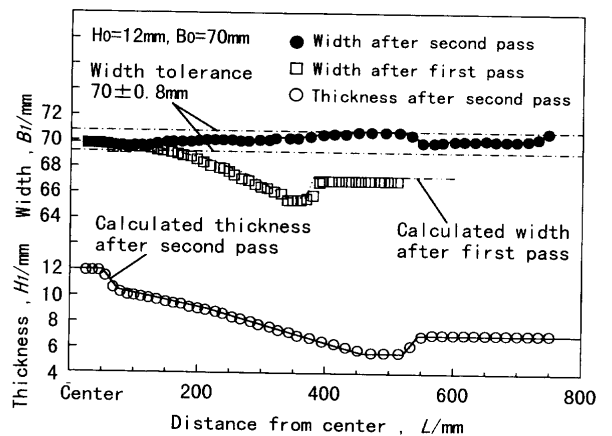


Fig. 9. Example of the rolled shape by CTR process.

ている部分がみられるものの、各パス共にほぼ設計値に近い圧延が行われており、第二パス後の板幅は公差(± 0.8 mm)を満足している。このことは、前述のパススケジュールの考えの妥当性を裏づけるものである。

以上の基礎実験から得られた結果を基に、CTRの量産設備を開発し、現在も稼働中である。量産設備においてはTable 1に示すように、第一パスロール溝底径は220 mm、最大テーパ勾配を0.35、また第二パスロール径は450 mm、最大テーパ勾配を0.12とし、圧延能力を高めている。圧下制御は油圧サーボを用い、圧延長さを測長しながらロール

Table 1. Specifications of CTR.

Maximum leaf size before rolling	90 ^w ×30 ^t ×1200 ^l	
Roll gap control system	NC system	
	First pass	Second pass
Roll dia.	220mm	450mm
Rolling force	Max. 353kN	Max. 3.14MN
Rolling speed	Max. 36.6m·min ⁻¹	Max. 30.1m·min ⁻¹
Gradient to be rolled	Max. 0.35	Max. 0.35

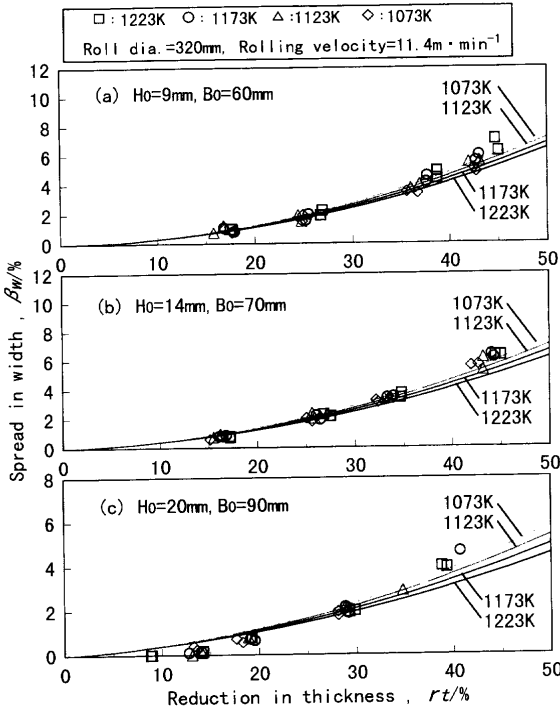


Fig. 10. Effect of the rolling temperature on the spread in the second pass. Specimens were rolled without first pass. Real lines show the calculations based on Ekelund's equation under the condition of $c=0.55$. (a) $H_0=9$ mm, $B_0=60$ mm. (b) $H_0=14$ mm, $B_0=70$ mm. (c) $H_0=20$ mm, $B_0=90$ mm.

ギャップを制御する機構を採用している。

6. 考察

6.1 Ekelund式における摩擦係数の評価

(6)式からも判るように、一般的には摩擦係数(μ)は圧延温度により変化し、低温ほど μ は大きくなるとされている。一方、Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7において、摩擦係数(μ)は0.34で一定としているが、まずこの理由について述べる。

Fig.10は(a)板厚9mm, 板幅60mm, (b)板厚14mm, 板幅70mmおよび(c)板厚20mm, 板幅90mmの素材について、圧延温度が1073Kから1223Kの範囲で幅広がり及び圧延温度の影響についてみたものである。図中の各実線は(6)式において $c=0.55$ (研磨鋼ロール)と仮定して、(4)式のEkelund式で計算した計算値をあらわす。同一圧下率における幅広がりを比較すると、計算値では低温圧延になるほど摩擦係数が増加し、幅広がりが大きくなる傾向があ

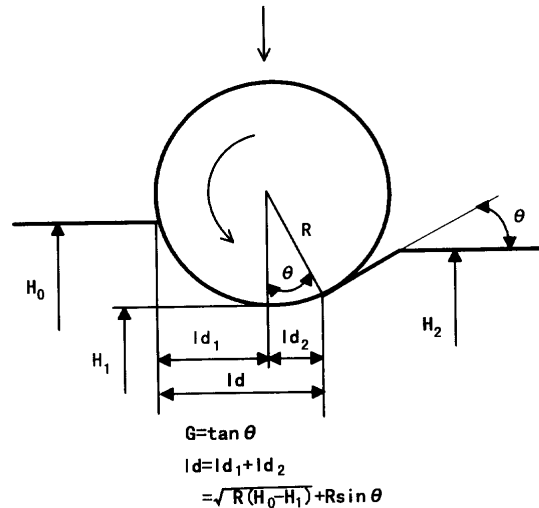


Fig. 11. Schematic illustration showing the increase of the projected contact length when the roll gap becomes narrow.

る。一方、実測値ではロールギャップを一定としているために、ミル剛性の影響を受けて、低温ほど圧下率の小さい方へシフトして幅広がりも小さくなっている。この理由について考察する。例えば、Fig.10(a)の圧延条件を取上げる。圧延温度が1223Kから1073Kへ変化した時の圧延荷重変化 $\Delta P=382$ kN, ミル剛性706 kN/mm, 出側板厚変化 $\Delta h=\Delta P/K=0.54$ mm, 圧下率変化 $\Delta r_t=-0.54/9 \times 100=-6.0\%$ となり、Fig.10(a)の圧下率変化と同じオーダーとなる。一方、圧下率35~40%での幅広がりの実測値 $\beta_w=4\%$ であるから、出側板厚変化 $\Delta h=-3.6$ mmに対し、幅広がり量 $\Delta b=0.04 \times 60=2.4$ mmである。したがって、出側板厚変化 $\Delta h=\Delta P/K=0.54$ mmに対して、幅広がり量変化 $\Delta b=-0.54 \times 2.4/3.6=-0.36$ mm, 幅広がり率変化 $\Delta \beta_w=-0.36/60 \times 100=-0.60\%$ になる。これはFig.10(a)の圧延温度が1223Kから1073Kへ変化した時の幅広がりの実測値変化 $\Delta \beta_w=-1 \sim -0.5\%$ とオーダーが一致する。このように、実測値をみる限り、幅広がり及び圧延温度の影響はミル剛性の影響より小さくほとんど無視できるといえる。すなわち、1073Kから1223Kまでの温度範囲においては幅広がり及び大きな差はなく、摩擦係数(μ)をこの温度範囲内での平均値である0.34としたEkelund式を用いることにより、実用上問題ない精度で幅広がりを予測できることが判明した。また、この結果は、モディファイドオースフォーミングのような低温域圧延においてもパススケジュールの変更を要しないという点で都合な結果となった。

6.2 テーパ圧延(非定常圧延)での変形・負荷特性

実際のテーパ圧延ではロールギャップが絶えず変化する非定常圧延であり、前述のような定常変形の圧延データを基礎としたパススケジュールが適用できるのは一見、奇異に思われる。そこで、Fig.11にロールギャップが狭くなる下り勾配のテーパ圧延での状況を示す。ここで、圧延勾配

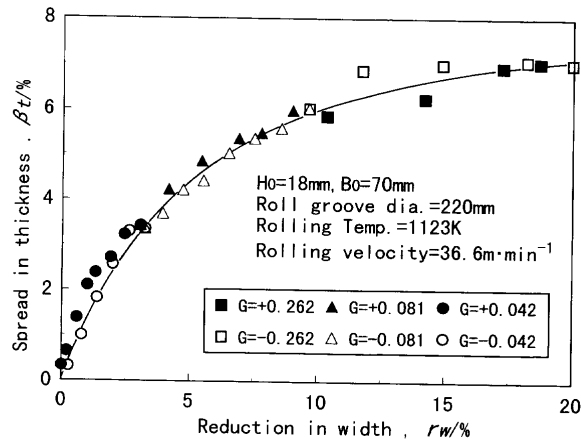


Fig. 12. Comparison of the spread between the upward and the downward gradient to be rolled in the first pass.

G はテーパ角を θ とすると $G=\tan\theta$ となり投影接触長は平圧延のそれよりテーパ角(θ)の寄与による ld_2 分だけ大きくなると考えられる¹⁶⁾。したがって、下り勾配では定常圧延よりも幅広がりや圧延荷重・圧延トルクが大きくなり、上り勾配では逆となることが予想される。

そこで、量産品の中で最もテーパ勾配の大きなテーパリーフについて、第一パス圧延、第二パス圧延を単独に行って圧延勾配の上り勾配と下り勾配とで幅広がり挙動を比較した。Fig.12に第一パスでの圧下率と幅広がりとの関係を示す。図中の G は圧延勾配を示し、+はロールギャップの広がる上り勾配、-は狭まる下り勾配を示す。Fig.12をみると、圧下率10%以上の高圧下率域において、下り勾配の方が幅広がりやや大きい傾向はみられるものの、それ以下の圧下率域ではその差は小さくほとんど無視し得ることが判った。これは、高圧下率では高い充填率により幅拘束されるためではないかと考えられる。低圧下率では幅拘束が小さく幅広がり大きく影響される筈であるが、現行のテーパリーフでは低圧下率域では圧延勾配も小さいために上り下りの勾配の影響が大きく現れなかったと考えられる。また、Fig.13に第二パスでの幅広がり及び上下り勾配の比較を示す。これより、第二パス圧延においても上りと下り勾配の幅広がり差はほとんどみられないことが判った。これは齊藤¹⁷⁾も指摘しているように、角棒の平圧延では板幅比が大きくなると延伸効率は圧下率に依存せずほぼ一定になるためではないかと考えられる。すなわち、第二パスでは板幅比が大きく（通常、板幅比は5から8程度）、接触長が変わっても延伸効率は変わらない、すなわち、幅広がり変わらないと考えられる。以上から、板厚6mm、板幅50mmから板厚20mm、板幅90mmのサイズの板ばねにおいて第一パスのテーパ勾配が0.26以下、第二パスのテーパ勾配が0.07以下のテーパ圧延においては定常変形での幅広がり特性との差はほとんどなく、パススケジュールを設定する場合に定常変形で得られた値を用いて

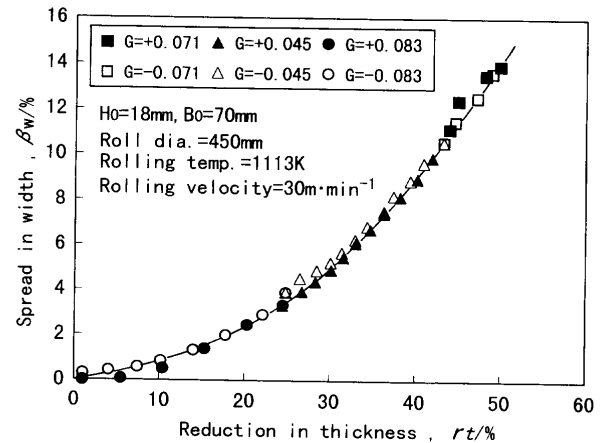


Fig. 13. Comparison of the spread between the upward and the downward gradient to be rolled in the second pass. Specimens were rolled without first pass.

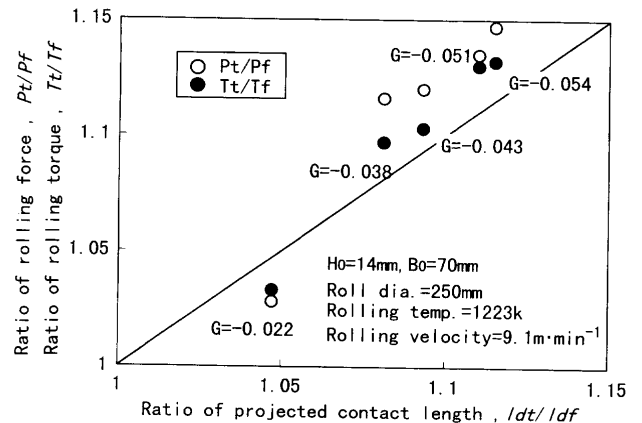


Fig. 14. Relation between the projected contact length and the rolling force and the rolling torque in the second pass. Rolling force and rolling torque were made non-dimensional by dividing with the corresponding values obtained from the flat rolling.

も差支えないということが判った。

次に、テーパ圧延での圧延荷重・圧延トルクに関して考察する。Fig.14は平圧延を基準としてテーパ圧延（下り勾配）における投影接触長の比(ld_t/ld_f)を横軸にとり、テーパ圧延における圧延荷重・圧延トルクと平圧延でのそれらの値との比(P_t/P_f , T_t/T_f)を縦軸にとって比較したものである。これより、圧下率が大きい領域では投影接触長の比に対する1:1の線を上回って圧延荷重・圧延トルクの比が大きくなる傾向がみられるものの、両者の関係は概ね良く対応しており、ほぼ投影接触長の増加に伴って圧延荷重・圧延トルクは大きくなることが判った。

7. まとめ

テーパリーフの製造方法として幅方向圧延と板厚方向の圧延の組合せである制御テーパ圧延法（CTR法）を開発した。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 第一パスの穴型を用いたエッジング圧延での幅広がり特性は圧下率を陰関数とする二次回帰式で回帰できた。

(2) 第二パスの平圧延での幅広がり特性は、摩擦係数(μ)を0.34としたEkelundの幅広がり式と良い対応を示した。この式は比ロール径17~51, 板幅比4.5~8.3, 圧延温度1073~1223Kの圧延範囲であれば適用可能である。

(3) 上記の定常圧延での幅広がり特性を基に、製品形状から第一パス圧延, 第二パス圧延のパススケジュールを求め、その精度が優れていることを確認した。

(4) 実際のテーパ圧延は非定常圧延であるが、定常圧延と幅広がり特性は大きな差がなく、定常圧延での結果が応用できることが判った。

(5) テーパ圧延での圧延荷重・圧延トルクは投影接触長の増減を考慮することにより、推定可能であることが判った。

文 献

- 1) S.Honma: *Spec. Steel*, **44** (1995), 14.
- 2) T.Tabe: *Spec. Steel*, **47** (1998), 37.
- 3) M.Ohmori, C.Tanaka, T.Saitoh and D.Tanaka: *J. Jpn. Soc. Heat Treat.*, **30** (1990), 99.
- 4) Radko Kaspar and Andreas Peters: Proc. of Australiasia-Pacific Forum on Intelligent Processing & Manufacturing of Materials, Watson Ferguson & Co., Brisbane, (1997), 975.
- 5) A.Sugimoto, T.Tanaka, T.Ohki and Y.Wakikado: *Trans. Jpn. Soc. Spring Res.*, **34** (1988), 38.
- 6) M.Ayada, M.Yuga, N.Tsuji, Y.Saito and A.Yoneguti: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 1022.
- 7) Y.Sakai, T.Sato, M.Ayada and S.Kuroda: *Annu. Rep. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **10** (1989), 45.
- 8) Japanese Patent Publicity No. 8-309415.
- 9) Japanese Patent Publicity No. 8-90031.
- 10) S.Ekelund: *Jernkontorets Ann.*, **1** (1927), 39.
- 11) A.Geleji 著, 五弓勇雄訳: 金属塑性加工の計算 (上), コロナ社, 東京, (1964), 196.
- 12) W.Tafel and H.Sedlaczek: *Stahl Eisen*, **45** (1925), 190.
- 13) E.Siebel: *Stahl Eisen*, **43** (1923), 1295.
- 14) A.I.Tselikov: *Stal'*, (1962), 874.
- 15) T.Shinokura and K.Takai: *Tetsu-to-Hagané*, **67** (1981), 221.
- 16) R.Kopp and A.Hauger: *Adv. Technol. Plast.*, **1** (1996), 7.
- 17) Y.Saito: Rolling of Long Products and Tubes, Jpn. Soc. Technol. Plast., Tokyo, (1991), 27.