S.P.M. によるテーパリーフの製造*

Production of Taper Leaf Spring by S.P.M.

高橋 淳**・佐藤 俊明**・堺 義宏**・綾田 倫彦**

Jun TAKAHASHI・Toshiaki SATO・

Yoshihiro SAKAI・Michihiko AYADA

1. ま え が き

近年、自動車の軽量化のニーズを反映して、テーパリーフが数多く使用されるようになってきた。

テーパリーフは、板の長手方向の応力を均一化する目的で、中央で板厚が厚く、両端で薄くなっているが、板幅は、組付上のスペースより、一定であることが望ましい。

この製造方法としては、切削、鍛造、圧延などの各種の加工法が考えられるが、生産性、コストの面から圧延が最も有利と考えられる。

ところが、通常の2段ないし、4段圧延機の場合、幅広がりが大きいために、板幅一定材をテーパ圧延すると、板厚の厚い（圧下量の小さい）中央部と板厚の薄い（圧下量の大きい）両端部で大きく幅が異なり、圧延前に、予め圧下量に応じて板幅を狭くしておく（幅寄せ）か、圧延後に、板幅が一定となるように削り取る（幅切り）工程が必要になる。

また、幅広がりを小さくするために小径ロールを用いると、高圧下量の噛込みができないことや、ロール剛性が低下するために、圧延パス回数を増さなければなくなり、いずれにしても、通常の圧延では、工程、コストの増大といった問題は避けられない。

そこで、本報では、これらの問題を解決すべく、1パスにて高圧下圧延が可能で、しかも、幅広がりが小さいことなどを特徴とした遊星圧延機の中でも、特に圧延操作が容易で、かつ、剛性が高いという利点を有した単軸遊星圧延機を用いて、ばね鋼の熱間圧延を行ない、成形性（変形・負荷特性）及び、性能（疲労寿命）などの観点から、テーパリーフ製造法としての可能性を検討したものである。

2. 単軸遊星圧延機の概要と特徴

単軸遊星圧延機（Single Planetary Mill：以下S.P.M.と略す。）は、大同特殊鋼（株）と石川島播磨重工業（株）との間で協同開発されたものであるが¹⁾、S.P.M.

本体は、大径の上ロールと、下ロールとしてドライブロールの周囲に配された小径のワークロール群からなる1組の遊星ロール、及び、ワークロール群を保持するバックアップブロックとから構成された独特の圧延設備である。（図2参照）

上ロールは、圧延反力を受けるもので、通常のロールのような噛込み力を発揮しないため、固定盤にても可能であるが、熱間での焼付きを防ぐため円柱ロールとし、回転を与えている。

図1に、圧延機構を示すが^{2),3)}、個々のワークロールはドライブロールとバックアップブロックとの回転摩擦により、高速自転するとともに公転している。（ワークロールの仮想公転外径を公転径という。）

1個のワークロールが材料を離れて、次のワークロールが到達する瞬間に材料が前進させられ、個々のワークロールは、各々、ごく僅かの圧下を繰り返す。

見かけの圧下量（=S.P.M. 入口と出口での板厚差）に対して、図2に示した真の圧下量は、ワークロールと材料の仮想接触弧上で刻々と変化している。

以上の圧延原理により、S.P.M. によるテーパリーフの製造を考える場合、主な長所としては、

- (1) ワークロール径が小さいわりに、圧下量（見かけの圧下量）を大きくとることができ、同一圧下量に対し、通常の圧延機より、圧下力が少なくて済む。
- (2) ワークロール1本当りの圧下量（真の圧下量）

図1 圧延機構

* ばね技術研究会昭和54年度秋季講演会で発表

** 日本発条株式会社

図2 実験装置概略図

- が少ないために、幅広がり小さい。
- (3) 他のプラネタリミル（ゼンジマ式，ブラツァ式^{3),4),5)}のような回転同期機構が不要で，これに伴う設備費，ロール費などが安価である。
- などがあり，短所としては，
- (1) ワークロール径が小さく，変形の大部分が遊星ロール側で生じるために，コバがシャープエッジになり易い。
- (2) ワークロールが材料上をころがりながら圧延するため，材料を進める力が非常に小さく，送りみ，または，引出しにて，材料を進めなければならない。
- (3) ワークロールが材料を叩くことによる振動，騒音が大きい。
- (4) 材料の後端圧延の不安定，即ち，材料が送りみロールを通過した後の後端圧延では，ブレーキ力が働かなくて材料が自走し，公転急停止の恐れがある。
- などが上げられる。
- 従って，テーバリーフ製造の基礎実験装置としては，
- (1) シャープエッジ修正用として，S.P.M. 本体出側にエッチャーロールを設ける。
- (2) 圧下制御の容易なことから，材料の長手方向の曲がり，そりを考慮し，引出し機にて材料を進める。
- (3) 振動による影響の少ない制御装置を用いる。
- (4) 後端圧延を安定化するため，上ロール回転数，引出し力を調整可能な装置とする。

表 1 実験装置仕様

送 込 み ロ ー ル	外 径	205φ	
	周 速	4~10 m/min	
上ロール昇降用 シ リ ン ダ ー	圧 下 力	最大 35 tonf	
	許 容 荷 重	最大 50 tonf/1本	
	最 高 速 度	23 mm/sec	
	最大 テ ー バ	1/10	
S.P.M. 本 体	上 ロ ー ル 外 径	430 φ	
	周 速	最大 18 m/min	
	ド ラ イ ブ ロ ー ル 外 径	280 φ	330 φ
	回 転 数	875 R.P.M.	
	ワ ー ク ロ ー ル 外 径	60 φ	35 φ
	本 数	8本	22本
	公 転 数	360 R.P.M.	396 R.P.M.
	ビ ー ト 数	48 Hz	145 Hz
	公 転 径	400 φ	
引 出 し 装 置	引 出 し 速 度	7~14 m/min	
	ク ラ ンプ 力	最大 5 tonf	
	引 張 力	最大 3.5 tonf	
測長パルス発生器	出 力 単 位	40 μm/パルス	
	出 力 パルス数	6,000 ppr	

ことなどの対策をとり、以下に示す実験装置構成とした。

3. 圧延実験

3.1 実験装置概略、及び、実験方法

図2に、本実験に使用した公転径 400ϕ の S.P.M. 装置概略図、また、表1に、これらの装置の主な仕様を示すが、装置は大別して、送込みロール、S.P.M. 本体、圧下制御装置、引出し機より構成され、測長パルス発生器のパルス信号に応じて、ロールギャップが制御されるようになっている。

ここで、遊星ロールの径と本数は、表2の $60\phi \times 8$ 本、 $35\phi \times 22$ 本の一般的な比較にみられるように、パススケジュール、あるいは、装置の寸法・剛性の許す限りにおいて選べば良いが、本実験においては、主と

して、 $60\phi \times 8$ 本、比較として、一部、 $35\phi \times 22$ 本を使用した。

表3に、圧延条件、図3に、本実験の対象とするテーパリーフの形状（最も複雑な形状）を示すが、他の任意の形状についても、テーパ長、テーパ勾配、及び、圧延枚数がセットされるようになっている。なお、ロール熱膨張などによる設定値の誤差の補正機能も有する。

表 3 圧延条件

供 試 材	Sup 6, 9
供試材寸法	$H_0=11\sim18, B_0=70$ コバ $R=H_0/2$
加熱温度	950°C
圧 下 量	最大 13 mm

表 2 8本組と22本組の比較

	8 本 組 $60\phi \times 330 l \times 8$ 本	22 本 組 $35\phi \times 330 l \times 22$ 本
コバ形状	丸コバに近い	シャープエッジが顕著
コバ付近上面肌あれ	有 利	不利（圧延速度を約5倍にして、8本組と同等になる。）
圧 延 圧 力	大 き い	小 さ い （8本組の約1/2.2である。）
振 動	大 き い	小 さ い （8本組の約1/2である。）
騒 音	大 き い	小 さ い
圧 延 速 度	出口速度約 10 m/min が上限	出口速度約 15 m/min まで可能
送込み反撥力 と引出し力（ピーク値）	約 3 tonf 平均約 1 tonf	約 1.5 tonf 平均約 500 kgf
後端引出し圧延	多少振動が強い	安 定
最適パススケジュール	$H_0=16, H_1=15\sim5$ で 引出し速度=7~10 m/min	$H_0=10, H_1=8\sim2$ で 引出し速度=10~15 m/min

図3 テーパリーフ形状

そこで、テーバ圧延の手順としては、

- (1) 遊星ロール、上ロール、送込みロールを回転させる。
- (2) 材料を炉出後、送込みロールに挿入し、S.P.M. 先端圧延を行なう。
- (3) 材料が出口ガイドに進入後、材料位置検出器 (H.M.D.) からの信号により、引出し機が作動すると共に、材料をクランプし、引出しが開始される。
- (4) 送込みロールは、従動回転に切換えられ、測長パルス信号に応じて、上ロールを昇降させ、テーバ圧延を行なう。
- (5) 同時に、引出し機通過後、エッチャーロールを作動させ、圧延材のコバを修正する。
- (6) 数枚連続圧延後、クランプが開放され、圧延が終了する。

の順序で行なった。

3.2 実験結果

(1) 変形特性

図4に、S.P.M.での試片断面記号、図5に、自由表面形状の変化例を示すが、圧下率の増加に伴い、最大

- H_0 : 素材厚さ B_0 : 素材幅
 H_1 : 圧材材厚さ B_1 : 圧延材幅
 R : コバ曲率半径
 ΔH : $(=H_0 - H_1)$ 見かけの圧下量
 r : $(=\Delta H / H_0 \times 100\%)$ 圧下率
 β : $(=B_1 / B_0)$ 幅広がり係数
 $\Delta \beta$: $(=(B_1 - B_0) / B_0 \times 100\%)$ 幅広がり率
 Z / H_1 : 圧延材の高さ方向無次元化位置

図4 試片断面記号

図5 S.P.M.における自由出面形状の変化例

図6 幅広がり率と圧下率の関係

幅広がり位置が遊星ロール側に移行し、シャープエッジが顕著になる。

また、 $60\phi \times 8$ 本と $35\phi \times 22$ 本を比べると、 $35\phi \times 22$ 本の方がシャープエッジになり易いことがわかる。

図6に、S.P.M.での幅広がりと圧下率の関係を示す。

図中に、比較として、ロール径 250ϕ の2段ロール圧延での実測値も示すが、S.P.M.での幅広がり、送込み、引出し、いずれの方式でも、2段ロール圧延に比べると、幅広がりが極めて小さい。

また、S.P.M.において、送込み、引出し方式を比べると、引出し方式の方が幅広がりが小さいが、これは、送込みロール抵抗 (送込みロール反撥力) との相互作用で、引出し力が前方張力、送込みロール抵抗が後方張力として働いているためと思われる。

なお、 $60\phi \times 8$ 本と $35\phi \times 22$ 本でも幅広がりが異なるが、本実験条件下では、同一圧下率に対して、 $60\phi \times 8$ 本の方が、最大幅広がりが小さいという結果である。

(2) 負荷特性

図7に、S.P.M.での圧延荷重測定例を示すが、 $60\phi \times 8$ 本では、ワークロールが材料と接触していない瞬間 (この時間をアイドルタイムという。) があり、この時圧延荷重は0となる。(但し、図7では、ロール吊上げ荷重: 5 tonf (片側) を含む。)

S.P.M.での圧延荷重としては、図に示す最大値をとった。

図8に、S.P.M.での圧延荷重と圧下率の関係を示す。

図中に、比較として、ロール径 250ϕ の2段ロール

図7 S.P.M.における圧延荷重測定例

図8 圧延荷重と圧下率の関係

圧延での実測値も示すが、S.P.M.での特徴としては、高圧下率での圧延荷重、あるいは、圧下率に対する圧延荷重の増加率の小さいことである。

ここで、圧延荷重に関しては、材料自身の変形抵抗と、ロールと材料の接触面積の相乗効果を考えなければならないが、図8において、低圧下率側で、S.P.M.の圧延荷重の方が、2段ロールより大きいのは、変形抵抗が大きい(S.P.M.でのひずみ速度は、100~300/sec)で、高圧下率側で、S.P.M.の圧延荷重の方が小さいのは、後述の真の圧下量、即ち、接触面積が小さいためと思われる。

そこで、図9に、S.P.M.での真の圧下量の解析結果^{2),6),7)}を示すが、引出し方式(引出し速度一定)の場合、

図9 S.P.M.における真の圧下量の変化

- (1) 見かけの圧下量(ΔH)と真の圧下量($\Delta H'$)の間には、比例関係がない。
- (2) 通常の2段ロール圧延と逆に、 $\Delta H'$ は、製品板厚が薄いほど小さい。
- (3) 仮想接触弧中において、 $\Delta H'$ は極大値を示すという特徴がある。

従って、素材厚さ一定材をテーバ圧延した場合、 $\Delta H'$ は、ある圧下率で極大値をとる筈であるが、図8の結果では、圧下率に対して、圧延荷重は最大値をとらず、漸増している。

これは、前方盛り上りによるワークロール接触面積の増加、あるいは、引出し方式では、圧下率の増加と共にワークロールパス回数が増加し、それに伴って、変形抵抗が増加したためではないかと考えられる。

いずれにせよ、S.P.M.では、最大圧延荷重は2段ロール圧延より小さいため、軸受、カムワルツなどの機械的損失が少なく、動力の消費効率が良いと思われる。

(3) テーバ圧延精度

図10に、小リーフ数枚連続圧延における圧延材寸法測定例を示す。再現性は良好で、一部、設定値と実測値に誤差が見られるが、これは、設定値を修正すれば解消されるものである。

$H_0=13$, $B_0=70$, $60\phi\times 8$ 本
 送り込みロール圧下量=0.5 mm
 引出し速度=10.7 m/min
 送込みロール周速=4.4 m/min, 後, 従動に切換え
 素材長=3000 mm

図10 テーパ圧延材寸法測定例(小リーフ連続圧延)

(a) エッチャー圧延前

(b) エッチャー圧延後

写真1 エッチャー圧延前後の断面形状
 ($60\phi\times 8$ 本, $H_0=13$, $H_1=5$)

前述の如く, S.P.M. での幅広がり小さいものの, それでも, 先端押込み圧延部や品種によっては, 高圧下部で製品幅公差 (70 ± 0.8 mm) を越えるため, また, シャープエッジ修正の目的で, エッチャー圧延を施しているが, エッチャー作動後は, 板幅公差内に抑えることができた.

なお, 写真1に, エッチャー圧延前後の断面形状を示すが, 概ね, シャープエッジが修正されている.

他方, 製品として満足し得るかどうかの判断基準の1つとして, 連続圧延材の荷重試験を行なったが, その荷重誤差は $\pm 3\%$ 以内で, 十分実用に供しうるものであった.

4. 疲労試験

一般に, S.P.M. にて圧延したリーフは, 遊星ロール側で, 結晶粒が細くなるために, 母材そのものの寿命は向上すると言われているが^{(5),(8)}, 図11に示すように, 機械加工でコバをシャープエッジにしたものは, 寿命低下をきたしており, また, $60\phi\times 8$ 本, $35\phi\times 22$ 本の違いによっても, 寿命への影響度が異なることが考えられるため, 確認として, S.P.M. 圧延材の疲労試験を行なった.

表4に, 疲労試験条件, 図12に, 疲労試験結果(いずれも, エッチャー圧延未施行)を示すが, 遊星圧延の条件内では, $35\phi\times 22$ 本の遊星ロール側は, 上ロール側より寿命が劣り, シャープエッジが原因で, コバ

が疲労起点となっているものが多いものの、現行のフラット材に比べて、特に寿命が劣ることはない。しかし、更に寿命向上を計るには、エッチャー圧延が必要

と思われる。

5. S.P.M. における問題点

S.P.M. における成形上の問題点としては、

- (1) 後端圧延の不安定（特に、アイドルタイムを有した $60\phi \times 8$ 本に生じ易い。）
- (2) 製品板厚が低下するに従って、材料の波打ち現象が現われ易い。
- (3) 胴曲がり、そり

などが上げられるが、後端圧延に対しては、

- (a) S.P.M. 出口に、ブレーキを設ける。
- (b) 上ロール周速を、圧延速度（引出し速度）より、若干遅くする。（図 13 参照）
- (c) 中間ガイドを下げて、パスラインをずらし、いかなる場合にも、材料の前進力が働かないようにする。

ことで、安定化対策となりうることを確認した。

材料の波打ち現象に対しては、本実験条件下では、最大で、表面粗さ 50μ 、ピッチ 30 mm 程度の波打ちが見られたが、中間ガイド部に振動押えを設けることで、かなり改善されるものと思われる。

胴曲がり、そりに対しては、引出し方式とした場合、実用上殆んど問題がなく、胴曲がりについては、製品長 1 m に対して、最大 2 mm であった。

一方、S.P.M. における設備環境上の問題点として、振動・騒音がある。

表 5 に、振動加速度測定結果を示す。測定は、上下、前後、左右の 3 方向であるが、方向による大きな差は、引出しチャックの約 3 g を除けば少なく、また、 $60\phi \times 8$ 本と $35\phi \times 22$ 本の違いは、チョックで大きいもの

注) 疲労起点は全て、スカーフした稜線からである

図 11 平鋼のコバ角度と耐久性

表 4 疲労試験条件

試験機	協会型リーフ疲労試験機
応力設定	たわみ基準、圧縮応力側にストレンゲージを貼付（テーパーリーフに関しては計算応力のピーク位置にゲージ貼付）
セッチング	120 kgf/mm^2
ピーニング	フラット材は、片面、両面の 2 種 テーパーリーフ材は、片面（引張側）のみ アークハイト 0.54 mmA_2

図 12 疲労試験結果

- 注 (1) 計算の前提条件
(i) $60\phi\times 8$ 本, $H_0=15, H_1=5\sim 15$
(ii) 引出し速度 $=7\text{ m/min}$
(iii) 変形抵抗 $=50\text{ kgf/mm}^2$
(iv) 上ロールの摩擦係数 $\mu=0.08$
(2) $F<0$ は、材料の前進力が働くことを意味する。

図13 引出し方式における送込み反撥力とワークロール位置角との関係

の、他は同等である。
また、表6に、騒音測定結果を示すが、空転時は、 $60\phi\times 8$ 本の方が、音圧レベルが若干高いものの、圧延時は、音圧レベルは同等である。ただし、 $60\phi\times 8$ 本の方が、遊星ロールのビート数 48 Hz の関係で低音であ

る。
いずれにせよ、通常の2段ロール圧延に比べ、振動・騒音はかなり大きく、量産化にあたっては、防振・防音設備が不可欠である。

6. ま と め

S.P.M. によるテーバリーフ製造の可能性の確認を目的とした基礎実験結果より、以下のことが確認された。

- (1) 通常の2段ロール圧延に比べ、幅広がり少ないために、軽度のエッチングを施せば、所定の寸法公差内で、テーバリーフを製造することが可能である。
- (2) 圧延荷重が小さく、動力的にみて有利である。
- (3) 製品性能試験としての疲労試験結果より、現行フラット材と比べて、特に寿命が劣ることはない。

従って、S.P.M. によれば、所定形状のテーバリーフを効率的に製造可能で、従来の2段ロール圧延に比べ、製品歩留りの改善・生産効率の向上に寄与するところが大きいと考えられる。

ただし、量産化に対しては、防振、防音対策を行わなければならない。

なお、本研究の遂行にあたっては、大同特殊鋼(株)殿

表 5 S.P.M. 振動加速度測定結果 (圧延時)

測定箇所		ロール本数	上下 (g)	前後 (g)	左右 (g)
S.P.M. 本体		22	1.3	1.0	1.0
		8	1.2	1.0	0.9
上ロール軸受 (チョック)		22	2.1	2.8	1.5
		8	3.4	3.0	3.9
引出し装置	チャック部	8	1.3	3.2	0.9
	本体	8	0.9	0.7	1.1

注) 周波数は、22本で約 150 Hz
8本で約 50 Hz
上下加速度は垂直方向
前後加速度は、圧延方向に垂直な水平方向
左右加速度は、圧延方向に平行な水平方向の加速度を示す。

表 6 S.P.M. 騒音測定結果 [dB]

測定箇所	ロール本数	本体正面	本体上部	本体裏面
ワークロール 空 転 時	22	95	89~90	90
	8	100~101	94	94
$H_0=11$ $H_1=6$ 圧 延 時	22	108~110	106~114	104
	8	107~109	102~104	102

注) 測定位置は、床上 1.2 m 但し本体上部は、床上 3.6 m

より、庄延機の借用に御協力いただき、また、当時、同社、広瀬調査役殿からは、多大なる御助言、御援助をいただいた。これらの方々に対し、ここに厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 広瀬輝夫ほか：石川島播磨技報，**3** (1963), 13, 492.
- 2) 広瀬輝夫ほか：石川島播磨技報，**8** (1968), 42, 432.
- 3) 広瀬輝夫：塑性と加工，**10** (1969), 97, 91.
- 4) 広瀬輝夫：電気製鋼，**34** (1963), 1, 23.
- 5) 田頭 扶，城田 透：塑性と加工，**19** (1978), 208, 329.
- 6) 広瀬輝夫：電気製鋼，**34** (1963), 3, 19.
- 7) 広瀬輝夫，本田義彦：塑性と加工，**4** (1963), 27, 238.
- 8) 広瀬輝夫：電気製鋼，**37** (1966), 5, 15.