

(討11) ロール成形におけるそり変形と材料特性の関係

大阪大学工学部

加藤健三 ° 齊藤好弘

1: まえがき

板材が成形ロールを通過する際に生じる長手方向のそり変形は、それ自体製品の形状不良として問題になるが、更に上流スタンドで大きなそりを生じると後続スタンドで成形材に縁波や腰折れを生じ、製品品質を著しく損なうことがある。このそり変形はロールの圧下条件や外部拘束条件(特に送込角)等の成形条件のほかに成形材の材質に依存する。しかし、板のどのような材料特性がそり変形にどのように関与するかは未だ十分解明されていない。

従来の研究によると、そり変形はロール直前の変形域の形状と密接な関係にある。従って、変形域の形状に影響を及ぼす材料特性がそり変形に関係するものと考えられる。そのような材料特性としては、加工硬化指数(n 値)、弾性係数、降伏点、弾性限界などが指摘されているが¹⁾、著者²⁾らは最近、変形域に生じる長手方向の繰返し引張-圧縮変形と関連して、微小歪域での塑性ヒステリシス特性がこれに関与することを推測し、新たな材料特性としてB値を提案した。ここでは、この考えの適否を検討する目的で行なわれた幾つかの実験の結果をまとめて報告し、この問題についての著者の見解をまとめてみたい。

2: 材料特性

ロール成形の際、変形域に生じる歪は普通約1%以下であることが知られている。従って、そり変形に関与する材料特性はそれに対応した微小歪域で測定されるものでなくてはならない。試験方法としては、引張試験と特殊な繰返し曲げ試験²⁾を行ない、前者により降伏点 σ_y 、ヤング率 E 、弾性限界 ϵ_0 、 n 値を、後者によりB値を求めた。図1、図2及び表1にそれらの定義と測定方法をまとめて示す。

3: V形断面の成形

図3に用いたロールの形状を示す。ロールクリヤランスは0.5 mmに固定した。これに図4のように板厚0.4 mm、板幅20 mmの短冊状金属板を送入してV形断面に成形する。簡単のため、板は入口側のみを片持梁式ガイドにより拘束する方法をとった。ガイドの水平方向位置は固定し、

高さ h を種々変えて、成形材のそり曲率:

$$\kappa = 1/\rho \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

を測定した。

h の符号は凸ロールの先端を通る

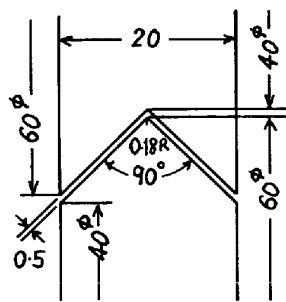


図3 V形成形ロール

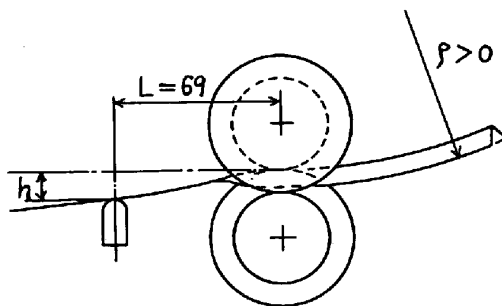
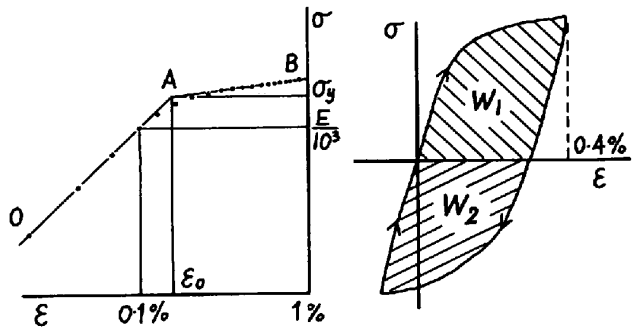
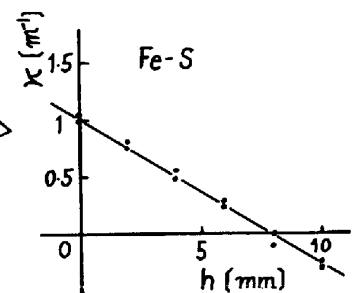


図4 V形成形実験の概略図

引張試験	降伏点 ヤング率 弾性限界 n 値	σ_y E ϵ_0 n	点Aの σ [Kg/mm ²] $\sigma_{\epsilon=0.1\%} \times 10^3$ [Kg/mm ²] 点Aの ϵ [%] $\epsilon=0.5\%$ 近傍での勾配
曲げ試験	B 値	B	$B = W_2/W_1$ (予歪0.4%)

図1 引張 σ - ϵ 曲線の両対数プロット 図2 塑性ヒステリシス図5 κ - h 関係の一例

水平線を基準にして、下(凸ロール側)から入る場合を正とする。Pは板縁の長手方向曲率半径で、その符号は鞍型にそる場合を正とする。

曲率κは、一般に図5のようにh=0からκ=0の範囲では、hに対してほぼ直線的に変化した。そこでそりの生じ易さを判定するためのそり特性値として、水平送入時のそり曲率κ₀とそりの送入角依存性κ'を求めた(表2)。

表3に各種金属板のそり特性と材料特性の測定結果を示す。一般にκ'の大きい材料はそりを生じ易いと考えられるが、本実験条件ではκの大きい材料はκ₀も大体大きいことが分る。

図6~8にκ'とB, ε₀, ηとの相関関係を図示した。明らかにそりはB値と最も良い相関を示し、B→大ほどκ'→大となる。η値はアルミのO材を除けば比較的良い相関があり、η→大ほどκ'→小の傾向となる。ε₀値は降伏現象を示す軟鋼焼鈍材を除けばある程度相関があり、ε₀→大ほどκ'→小の傾向となっている。

表4は炭素鋼焼鈍板のC%を種々変えた場合の同様の実験結果を示す。この場合のB値は測定の都合上同じ材料の3%スキンパス材について測定した値であり、しかも測定の際系統的な誤差が入った疑がある為、絶対値は信用できないがその大小関係は正しいと考え、参考の為に載せた。一般にC%が高いほどκ', κ₀は小さくなっているが、材料特性についてはB値のほかにσ_y, ε₀とも良い相関を示している。

図9と図10は、上記の炭素鋼に軽度の冷間圧延(スキンパス)により予歪を与えた場合の実験結果で、一般に予歪によってκ₀は単調に減少するが、σ_y, ε₀, η値は予歪に対して単調には変化していない。B値の測定結果は無いが、一般に金属のバウシニング効果は予歪により著しくなる³⁾ので、B値は予歪と共に単調に減少することが予想される。

表2 そり特性

水平送入時のそり	$\kappa_0 = \left(\frac{1}{P}\right)_{h=0}$ [m ⁻¹]
そりの送入角依存性	$\kappa' = \left \frac{\partial \kappa}{\partial h}\right _{\kappa=0}$ [m ⁻¹ /10mm]

表3 V形断面成形におけるそり特性と材料特性 (V-1)

材 料	記号	σ _y	E	ε ₀	η	B	κ'	κ ₀
軟鋼(焼鈍)	Fe-0	21.2	18500	0.11 ⁵	0.000 (>0.83)		1.67	1.35
2Sアルミ(焼鈍)	Al-0	1.2	6600	0.02	0.346	0.83	1.51	0.96
軟鋼(2%スキンパス)	Fe-S	17.5	17700	0.10	0.066	0.83	1.32	1.04
77ピッチ鋼()	Cu	14.7	9400	0.16	0.088	0.75	1.25	0.94
2Sアルミ(40%冷延)	Al-1/2H	12.0	6600	0.18	0.070	0.67	1.06	0.76
6-4黄銅(2%スキンパス)	6-4Br	16.9	9500	0.18	0.116	0.67	0.98	0.57
7-3黄銅()	7-3Br	17.5	10300	0.17	0.108	0.61	0.92	0.52

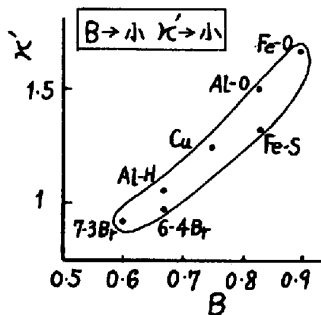


図6 κ'とB値の相関

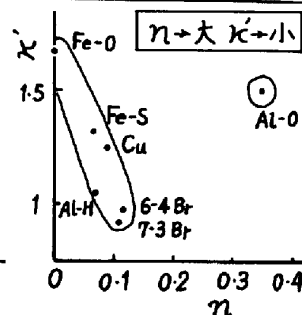


図7 κ'とη値の相関

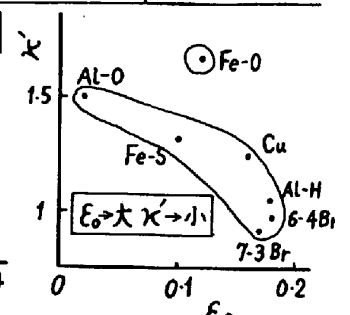


図8 κ'とε₀値の相関

表4 炭素鋼板のそり特性と材料特性 (V-2)

材 料	C%	σ _y	ε ₀	η	B	κ'	κ ₀
NKED	<0.005	19.9	0.09	0.0 (1.24)		1.97	1.62
SPCC-1	0.05	24.4	0.11 ⁵	0.0 (1.10)		1.84	1.47
S15CK	0.16	30.7	0.14 ⁵	0.0 (0.80)		1.60	1.03
SAE1035A	0.36	35.9	0.16 ⁵	0.0 (0.69)		1.36	0.88

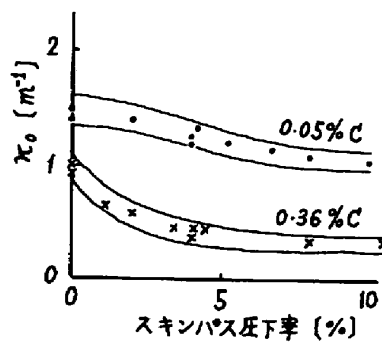


図9 κ₀に及ぼす予歪の影響

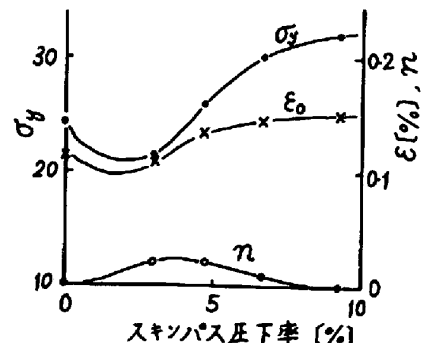


図10 予歪による材料特性の変化

4: 台形断面の成形

図11に用いたロールの形状を示す。ロールクリヤランス $C = 0.8 \text{ mm}$ に固定した。これに図12のような傾斜式のガイドにより、送入角を $\alpha = 0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ と変えて、板厚 0.8 mm 板幅 $b = 17.5 \sim 80 \text{ mm}$ の金属板(3種類)を送入し、ウェーブ部のそり曲率を測定した。用いた材料の材料特性を表5に、そり曲率と板幅及び送入角の関係を図13に示す。

図13より、板幅が大巾に変わってもそりの送入力依存性は常に軟鋼 > タフピッチ銅 > 黄銅 となっており、これは B, ϵ_0, η 値の大小関係と一致し、しかもV形断面成形の場合と同じ傾向を示している。

次にアルミニウム板の純度及び調質度がそり変形に及ぼす影響を見るために、板厚 0.6 mm 板幅 50 mm の板をクリヤランス $C = 0.7 \text{ mm}$ の同じ台形ロールで成形した。この場合ガイドの水平方向位置は $L = 79 \text{ mm}$ とし、送入力 $\alpha = 0^\circ \sim 8^\circ$ の範囲で実験を行なった。実験結果を表6及び図14に示す。但し κ' は κ の $\tan \alpha$ に対する変化率である。明らかに純度が低い方が、またO材よりH材の方がそりが生じにくく、これは B, ϵ_0, σ_y の変化と良く対応している。

5: 考察

上述の実験結果を整理すると、そり変形については次のようにその特徴を要約することができる。

- (1) そり変形の生じ易さは金属の種類によって異なり、焼鈍状態またはそれに近い状態で比較すると、概ね 鉄 > アルミニウム > 銅 > 黄銅 の関係になっている。
- (2) 炭素鋼の場合C%が高いほど、またアルミニウムの場合その純度が落ちるほどそり変形は生じにくくなる。

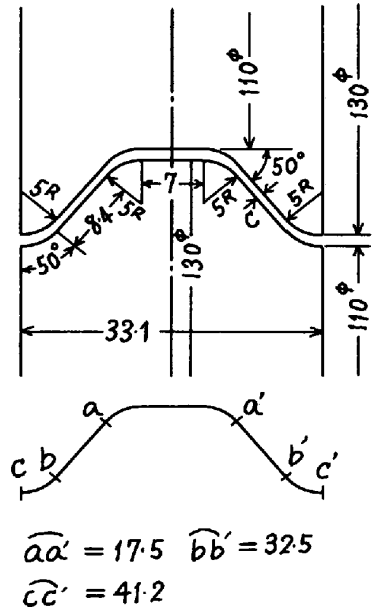


図11 台形成形ロール

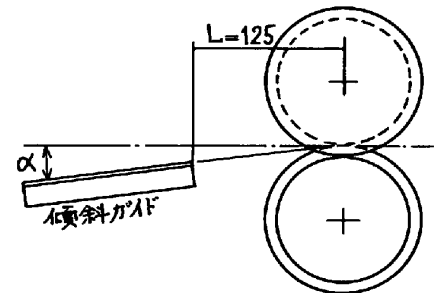


図12 台形成形実験の概略図

表5 台形成形に用いた材料の材料特性(台-1)

材料	σ_y	E	ϵ_0	η	B
軟鋼(SPCC)	22.4	21600	0.10 (0.000) (>0.83)		
タフピッチ銅	11.8	11000	0.11 0.075	0.77	
6-4黄銅	19.1	11000	0.17 0.103	0.64	

表6* アルミニウム板のそり特性と材料特性(台-2)

材料	Al %	調質	σ_y	ϵ_0	η	B	κ'	κ_0
A	99.99	O	1.3	0.02	0.225	1.01	8.51	0.925
B	99.41	O	2.4	0.04	0.284	0.92	6.88	0.609
C	99.99	H	12.1	0.25	0.070	0.82	4.72	0.377
D	99.41	H	17.1	0.28	0.090	0.72	1.88	0.095

*表6 H: 80%冷延 O: 80%冷延後350°C3hr焼鈍

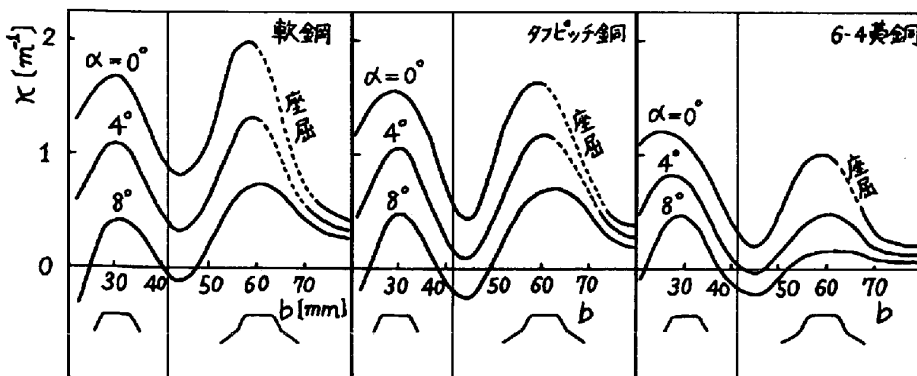


図13 κ と板幅b及び α の関係

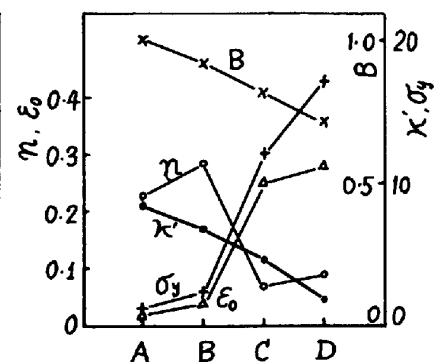


図14 κ' と材料諸特性の関係

(3) 調質圧延または冷間圧延によって予歪を受けると、予歪量の増加と共にそり変形は生じにくくなる。

これらの傾向は、実験範囲内では成形断面の形状、ロールクリアランス、ガイドの仕方などの成形条件には余り関係ないようである。したがってそり変形に關与する材料特性は、上記の3つの特徴を矛盾なく説明できるものでなければならない。

まず σ_y , E , ϵ_0 については、 σ_y が大きいほど、 E が小さいほど、したがって $\epsilon_0 = \sigma_y/E$ が大きいほどガイドによる拘束（曲げモーメント）の影響を受けにくく、従ってそりは生じにくいと推定される。事実前記のそりを生じにくくする条件は大抵の場合 $\epsilon_0 \rightarrow$ 大 の方向にある。しかし降伏現象のある軟鋼にスキンプラスをかけた時 ϵ_0 は小さくなるにも拘らずそりは却って生じにくくなる。

n 値については、 n が大きいほど変形域が長手方向に広がって曲げ変形が滑らかになり、従ってそりも生じにくくなる⁴⁾と推定出来る。事実そりを生じにくくする条件は可成り多くの場合 $n \rightarrow$ 大 の方向にある。しかし予歪を受けた場合 n 値は普通小さくなるにも拘らずそりは却って生じにくくなる。

これに対してバウシング効果は上記のそりの傾向と全く良く一致する。すなわち“バウシング効果の著しい金属ほどそりが生じにくい”との仮説を立てると、上記の3つの傾向は従来バウシング効果について知られている知識と全て合致する。何となれば、バウシング効果は転位が cross slip しにくい金属（黄銅>銅>アルミニウム>鉄）ほど、また転位の集積をもたらす不純物や析出物が多いほど、更に予歪によって転位密度が上昇するほど著しくなるからである³⁾。事実バウシング効果の程度を示すパラメータである B 値は全ての場合にそり特性と良い相関を示した。

然らばバウシング効果の著しい（ B 値の小さい）金属が何故にそりを生じにくいかにについては、今のところ単なる推測の域を出ないが、次の2つの原因が考えられる。

- (1) バウシング効果が著しいほど、変形域で発生した長手方向膜歪がロール直下（出口）で起る歪の逆転によって解消され易い。
- (2) 変形域を通過する際、金属要素は2~3回曲げ-曲げ戻し変形を受けるので、バウシング効果により曲げ戻しが容易になれば変形は滑らかになり、ロール直前の急激な変形が緩和されて長手方向膜歪が生じにくくなる。

この内(2)の原因は特に重要と考えられる。その根拠は、 B 値が小さくてそりの生じにくい材料ほど変形域が広く、主曲げ変形に伴う外縁部の立ち上りが緩やかとなっている事実があるからである²⁾。従って、一般に曲げ-曲げ戻し変形が主体となる変形過程では、変形域の広さと形状に影響する主たる材料特性は、一軸引張試験で求められる n 値ではなく、例えば B 値のように塑性ヒステリシス曲線の形状を決める特性値であると考えると、本研究の結果は全て納得できる。

6: むすび

V形及び台形ロール成形について、そりの生じ易さを決める主たる材料特性は、微小歪域の塑性ヒステリシス曲線において、バウシング効果の程度を表わす B 値であることを示した。しかし板材の塑性ヒステリシスを正確に求めることは現状では相当困難である。今後の一つの重要な課題としてこの方面の研究が期待される。終りに、本研究が大阪大学学生であった藤田米章・馬継俊夫・佐藤英夫・山本博の諸氏の協力によって遂行されたものであることを付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 木内: オ43回塑性加工シンポジウムテキスト, (1973), 11. 2) 斎藤・藤田・加藤: 塑性と加工, 13 (1972), 907. 3) 岸: 日本機械学会誌, 75-639 (1972), 547. 4) Mednikov, Yu, A.: Stal Engl., April (1963), 300.