

# 引拔圧延における変形機構について

Mechanism of Deformation in Combination of Drawing and Rolling

荒木 甚一郎\*

Jin-ichiro ARAKI

引拔・押出・圧延は、連続塑性加工における主流を占め、板・線・棒・管・型材の加工に優れた特性を発揮している。しかし、より高い見知からこれらを眺めると、各々の加工技術の長所を組合せることにより、さらに大幅に技術的改善が期待される余地がある。ここでは、組合せ加工の一例である引拔圧延における変形機構について解説する。

## 1. ま え が き

板・線・棒・管・型材などは、断面形状に差はあっても、いずれも連続塑性加工に適した製品であり、各々独自の加工法が採用されている。これらの加工法のうち板圧延の分野においては、すでに高度の加工技術体系が確立されており、また研究の方向づけもなされている。一方、線・棒・管・型材の成形に関しては、現場の作業技術水準に比して研究がかなり遅れており、今後の研究から新しい加工技術の開発が期待される。これらの製品は、押出・引拔・圧延のいずれによっても成形可能であり、さらにこれらの加工法の組合せによって、一層有利な加工を行ないうる可能性もある。また同一の断面形状の製品を加工する場合であっても、寸法の大小により加工法相互の間における優劣の評価が変わる場合もあり得るし、同一の加工法であっても、境界条件の如何によって材料の変形機構は影響を受ける。したがって、これらの製品に最も適した加工法を考えることは、圧延に重点の置かれた板の場合より至難であり、現状では、基礎研究の積重ねから得られた成果を総合して、新しい加工技術を生み出す以外に道はない。

著者は第一着手として、引拔と圧延の組合せ加工の性

格をもつ Turks Head に着目して研究を行なった。すなわち、図 1 に示すように、2 個の平ロールによる帯板の引拔圧延・丸線から平線の引拔圧延、4 個の平ロールによる角線から角線・丸線から角線の引拔圧延に関して解析と実験の両面から研究を行ない、その力学的特性を明らかにした。従来、このような組合せ加工を応用した現場技術として、板におけるステッセル圧延、丸線におけるローラーダイス引拔などがあり、これらは今回の自由ロールによる引拔の場合に相当する。また押出と圧延の組合せ加工の例として、管におけるピルガ圧延がある。しかしこれらは限定された境界条件のもとでの加工法であり、その力学的特性も明確に把握されていないこともあって、それらのもつ利点に比して利用範囲が狭い。したがって今回の研究では、Turks Head のロールを駆動可能にした引拔圧延装置を用い、後方張力・後方押込力やロールトルクなどの境界条件を、大幅に変えた場合に関する変形機構を、総合的に明らかにした。ここに述べる研究成果は、従来の加工技術を再検討するうえに役立つだけでなく、型材の圧延や、他の複雑な断面形状材の加工にも応用可能な基礎技術となり得るし、さらに積極的に、今後の課題である押出・引拔・圧延などの組合せによる最適加工問題を考えるうえにも参考となる点が多い。

## 2. 力学的特性を解明するための基礎理論

### (1) 記号

- $A$ :  $\theta$  の位置角における材料横断面積 (mm<sup>2</sup>)
- $A_{in}$ : 入口側の材料横断面積 (mm<sup>2</sup>)
- $D$ : ロール径 (mm)
- $N$ : 中立位置
- $b$ :  $\theta$  の位置角における変形中の材料幅 (mm)
- $d\bar{\epsilon}_x$ :  $x$  方向の平均ひずみ増分 (mm/mm)
- $d\bar{\epsilon}_y$ :  $y$  方向の平均ひずみ増分 (mm/mm)
- $d\bar{\epsilon}_z$ :  $z$  方向の平均ひずみ増分 (mm/mm)
- $f$ : 水平力 (kg)
- $h$ :  $\theta$  の位置角における材料の厚さ (mm)
- $hout$ : 出口における材料の厚さ (mm)
- $k$ : 降状せん断応力 (kg/mm<sup>2</sup>)
- $l$ :  $\theta$  の位置角におけるロールと材料の接触幅 (mm)
- $q$ : ロール面圧力 (kg/mm<sup>2</sup>)

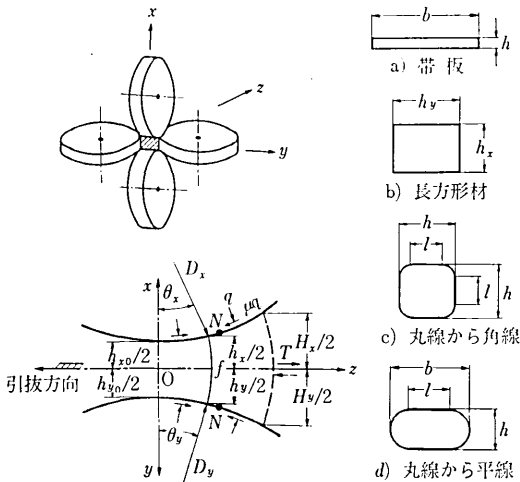


図 1 4 個のロールによる長方形断面材の引拔圧延における力の釣合および研究の対象とした材料の断面形状

\* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

- r: ロール径比  $D_x/D_y$  [無次元]
- $\theta$ : 接触弧に沿う任意の位置でのロールと材料の接触位置角 [radian]
- $\mu$ : ロールと材料間の摩擦係数
- $k$ : ロール軸受のころがり摩擦係数

(2) 2個のロールによる帯板の引抜圧延, および4個のロールによる丸線の引抜圧延の場合

帯板の引抜圧延の場合は, 板幅方向の変形が拘束された2次元変形と見なされるので, Karman<sup>1)</sup>, Orowan<sup>2)</sup>の導いた圧延理論を応用することができる。

4個のロールによる角線の引抜圧延の場合は, 2軸圧縮による3次元変形となり, 従来の圧延理論をそのまま適用することはできないが, Orowanの圧延理論における考え方を発展させて, 実際の変形機構を比較的良好に表わす基礎式<sup>3)</sup>を導くことができる。

式(1)・式(2)に帯板の引抜圧延の場合, および角線の引抜圧延の場合における, ロール間隙中における材料の応力状態を解くために必要な微分方程式を示す。

$$\frac{df}{d\theta} = D \left( \frac{f}{h} + 2kw \right) (\sin \theta \pm \mu \cos \theta) \quad (1)$$

$$\frac{df}{d\theta} = \frac{D_x}{P_1} \left( \frac{f}{h_x h_y} + \sqrt{3} kw \right) \left[ \sin \theta_x \left( h_y + \frac{\gamma \cos \theta_x}{\sqrt{1-\gamma^2 \sin^2 \theta_x}} h_x \right) \pm \mu (h_x + h_y) \cos \theta_x \right] \quad (2)$$

ここで  $P_1 = 1 \pm \mu \left[ \frac{1}{\theta_x} + \frac{1}{\tan^{-1} \left( \frac{\gamma \sin \theta_x}{\sqrt{1-\gamma^2 \sin^2 \theta_x}} \right)} - \frac{\cos \theta_x}{\sin \theta_x} - \frac{\sqrt{1-\gamma^2 \sin^2 \theta_x}}{\gamma \sin \theta_x} \right]$

これらの式は, ロールと材料間の幾何学的関係式・材料の降伏条件式・力の釣合式を基にして導かれる。式(1)(2)とも, ロールと材料間の摩擦状態がすべり摩擦の場合であり, 付着摩擦の場合には, 式(1)では  $\mu q = k$ , 式(2)では  $\mu q = k/\sqrt{2}$  として取り扱う。なお式(1)(2)における複号は, (+)が中立位置より出側, (-)は入側に対応する。

(3) 4個のロールによる丸線から角線, および2個のロールによる丸線から平線の引抜圧延の場合

この場合, ロール間隙中の材料は, ロールと接触しない自由表面が存在する状態で引抜圧延される。したがって解析を行なう場合には, 降伏条件式と力の釣合式だけでなく, 引抜圧延過程におけるひずみと応力の関係式を導入して, 自由表面の変形挙動を追跡しなければならない。そこで, 引抜方向に垂直な横断面内の応力とひずみをそれぞれ平均化した, 平均応力・平均ひずみを定義し, これらに Reuss の導いた応力とひずみの関係式と同じ対応関係を与える方法を用いて解析した<sup>4)5)</sup>。すなわち

ロール間隙中の材料を, 入側から中立位置, および中立位置から出側までに分け, 各々の領域をさらに  $n$  個に細分して, 入側から順に, 各要素ごとに, 平均応力・平均ひずみを求めながら計算を進めた。

—解析の基本となる諸関係式—

丸線から角線・丸線から平線の引抜圧延における基本式は, 比較的類似しているのので, 両者を対比しながら示す。なお右側のかっこ内に示す式が, 丸線から平線の場合に対応する。

a) 幾何学的条件式

$$h = h_{out} + D(1 - \cos \theta) : [\text{左に同じ}] \quad (3)$$

b) 力の釣合式

$$\frac{df}{d\theta} = -2Dlq(\sin \theta \pm \mu \cos \theta) :$$

$$\left[ \frac{df}{d\theta} = -Dlq(\sin \theta \pm \mu \cos \theta) \right] \quad (4)$$

c) 降伏条件式

$$\frac{f}{A} + \frac{l}{h} q = 2k : \left[ \frac{f}{A} + \frac{l}{b} q = 2k \right] \quad (5)$$

d) 平均応力と平均ひずみ増分との間の関係式

$$d\bar{\epsilon}_x = -\frac{lD}{h^2} \sin \theta d\theta :$$

$$\left[ d\bar{\epsilon}_x = \frac{\left( \frac{ql}{b} + \alpha \frac{\mu ql^2}{bh} - \frac{f}{A} \right) lD}{\left( \frac{2ql}{b} + \alpha \frac{\mu ql^2}{2bh} + \frac{f}{A} \right) bh} \sin \theta d\theta \right] \quad (6)$$

$$d\bar{\epsilon}_y = d\bar{\epsilon}_x : \left[ d\bar{\epsilon}_y = -\frac{lD}{bh} \sin \theta d\theta \right] \quad (7)$$

$$d\bar{\epsilon}_z = \frac{2lD}{h^2} \sin \theta d\theta :$$

$$\left[ d\bar{\epsilon}_z = \frac{\left( \frac{ql}{b} - \alpha \frac{\mu ql^2}{2bh} + \frac{2f}{A} \right) lD}{\left( \frac{2ql}{b} + \alpha \frac{\mu ql^2}{2bh} + \frac{f}{A} \right) bh} \sin \theta d\theta \right] \quad (8)$$

ここで  $\alpha$  はロールと材料との相対すべりの方向によって決まる係数で,  $|\alpha| < 1$  であり,  $d\bar{\epsilon}_x > 0$  に対して(-),  $d\bar{\epsilon}_x < 0$  に対して(+ )となる。

e) 任意の位置角  $\theta$  における材料の横断面積  $A$

$$A = A_{in} e^{-\int_0^\theta d\bar{\epsilon}_z} : [\text{左に同じ}] \quad (9)$$

f) ロールと材料の接触幅  $l$ , および材料幅  $b$  の求め方  
図2において,  $i$  番目の断面の自由表面上における任意の点  $P_i(X_i, Y_i)$  が  $(i+1)$  番目の断面の位置において  $P_{i+1}(X_{i+1}, Y_{i+1})$  となったとすると次の関係式が成立つ。

$$X_{i+1} = X_i + X_i d\bar{\epsilon}_{xi} : [\text{左に同じ}] \quad (10)$$

$$Y_{i+1} = Y_i + Y_i d\bar{\epsilon}_{yi}$$

式(10)により,  $(i+1)$  番目の自由表面  $P_{i+1}$  の  $x-y$  平面上における軌跡が求まるので,  $(i+1)$  番目の断面の接触幅  $l_{i+1}$  は, これとロール表面を表わす直線  $y = h/2$  と

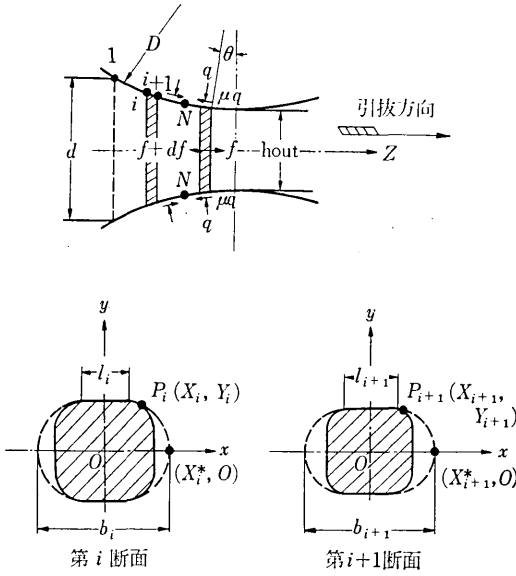


図 2 ロールと材料の接触幅および材料幅の求め方

の交点から求める。すなわち、 $x-y$  平面上で点  $P_{i+1}$  の描く軌跡と  $y=l/2$  との交点の  $x$  座標を  $\bar{X}_{i+1}$  とすると、

$$l_{i+1} = 2\bar{X}_{i+1} \quad [左に同じ] \quad (11)$$

また、平線の引抜圧延における材料幅  $b$  は

$$b_{i+1} = 2X_{i+1}^* \quad (12)$$

図 3 に、これらの諸関係式を用いて数値計算を行なうさいの計算の流れを示す。

(4) 数値計算結果の一例

引抜圧延に影響を及ぼす諸因子を、幾何学的形状・物性定数・ロールに対する束縛条件・引抜の境界条件に分けて数値計算を行ない、各要因の効果を明らかにした<sup>6)</sup>、その結果は、実験結果と比較検討のうえ、5 節のまとめに要約して示すが、ここではその一例を示す。

図 4・図 5 は角線から角線の引抜圧延において、圧延トルク・後方張力などの境界条件を大幅に変えた場合である。これらの図から駆動トルクにより引抜応力は下がり、また後方張力により正味の引抜応力の値が下がる効果を明瞭に知ることができる。

3. 基礎理論に関する実験的検証

帯板・角線・丸線から角線・丸線から平線の各場合について、ロールトルク・後方張力等の境界条件を、幅広く変えて実験を行ない、基礎理論の検証を行なった。すべての実験条件のもとで、理論と実験結果はよい一致をみたが、ここではそれらの結果の一部を示す。

図 6・図 7 は、ロール駆動機構のない Turks Head によって行なった実験結果である<sup>7)</sup>。図 6 は、2 個のロールによる帯板の引抜圧延の場合で、ロール固定の効果および板厚とロール径の比  $H/D$  が引抜応力に及ぼす影響に関して検討したもので、図から明らかなように、理論と実験とはよく一致している。図 7 は、4 個のロールによる長

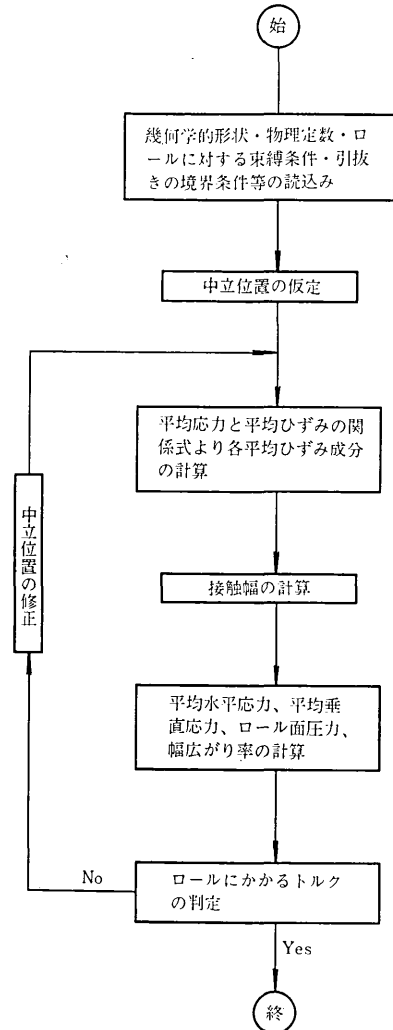


図 3 計算の流れ図

方形断面形状材料の引抜圧延において、材料の長辺と短辺の比を 1 から 4 に変化させた場合における、引抜応力を示したものであるが、断面減少率と引抜応力の関係に関するかぎり、断面形状の影響は少ないことがわかる。

図 8 は、ロールトルク・張力などの境界条件を、大幅に変化させて実験することが可能な、引抜圧延装置の概略図である。この装置を用いて、4 個のロールによる角線から角線・丸線から角線、さらに 2 個のロールに組変えて、丸線から平線の引抜圧延に関する実験を行なった。

図 9～図 12 に、図 8 の実験装置を用いて行なった実験のうち、自由表面の変形の大きい丸線から平線の引抜圧延の場合について示す。図 9・図 10 は、後方張力・ロールトルクが引抜応力に及ぼす影響を検討したもので、2 節に示した計算手法を用いることにより、幅広い境界条件のもとで、引抜応力を正しく評価できることがわかる。図 11・図 12 は、幅広がり率に関する検討結果である。幅広がり率に関しては、理論と実験との間に開きがある

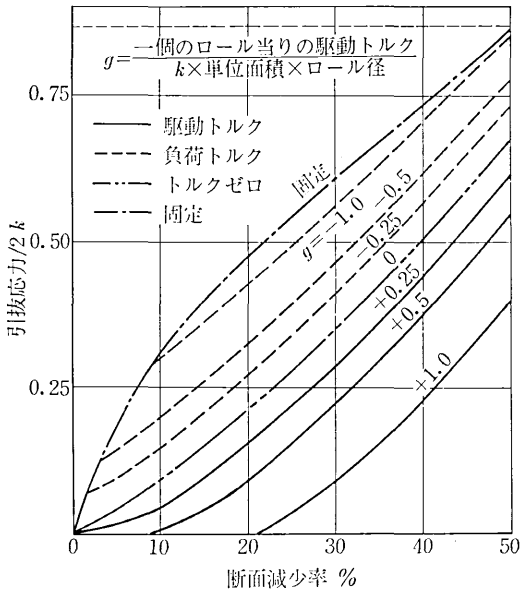


図 4 ロール駆動トルクが引抜応力に及ぼす影響  
ロール径 100φ, 入口断面形状 4・

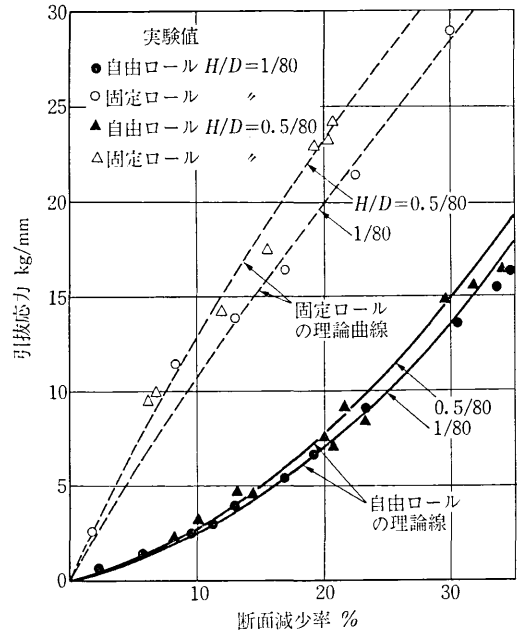


図 6 2 個のロールによる帯板の引抜圧延において、  
H/D が引抜応力に及ぼす影響 材質: 銅

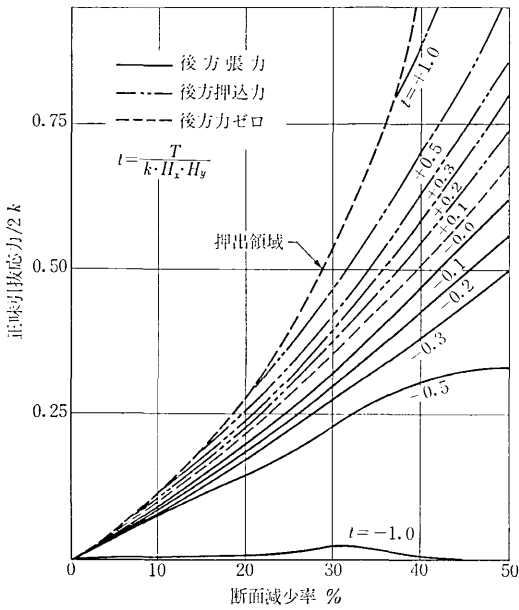


図 5 後方張力・後方押込力が正味引抜応力に  
及ぼす影響 (自由ロール)

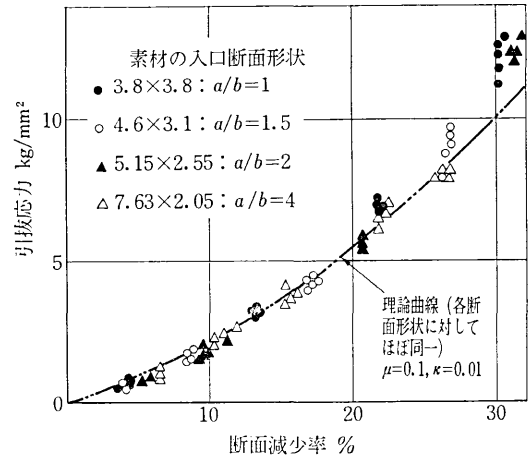


図 7 4 個のロールによる長方形断面材の引抜圧延において、長辺と短辺の比が、引抜応力と断面減少率の  
関係におよぼす影響 材質: 銅, ロール径: 80φ × 90φ

が、定性的傾向に関してはよく一致しており、この点は注目に値する。図 13 は、同一の変形抵抗を有する銅の試験片を用いて、4 個のロールによる角線から角線・丸線から角線・丸線から平線の引抜圧延を行ない、引抜応力と断面減少率の関係について整理した図である。この図において、同じ断面減少率に対する引抜応力の値が小さい場合ほど、加工効率が低いといえる。

4. 引抜圧延における最適化に関する考察

3 節において、2 節で示した解析法を用いることにより、引抜圧延における変形機構をシミュレートできるこ

とを示したが、図 14 に引抜圧延における最適化の問題を考えるうえで重要な力学的特性を、模式的に示す。すなわち、引抜圧延におけるロールに対する束縛条件・入側での張力・押込力などの境界条件が、引抜応力・ロール面圧力に及ぼす影響を整理して表わしたもので、これらの関係は、定性的には帯板・角線・丸線から角線・丸線から平線など、すべての引抜圧延の場合に共通して成り立つ。また形圧延の場合のように、ロールによって断面形状を成形する加工法の場合には、今回の検討結果は応用価値が高い。すなわち、複雑な横断面形状を、今回示した 4 種類の引抜圧延の、いずれかの場合にあてはめ

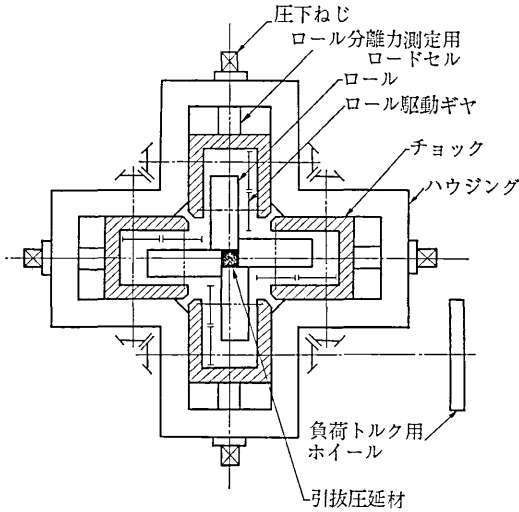


図 8 実験用 Turks Head 概略図  
ロール径 100 mm, パレル長 10 mm

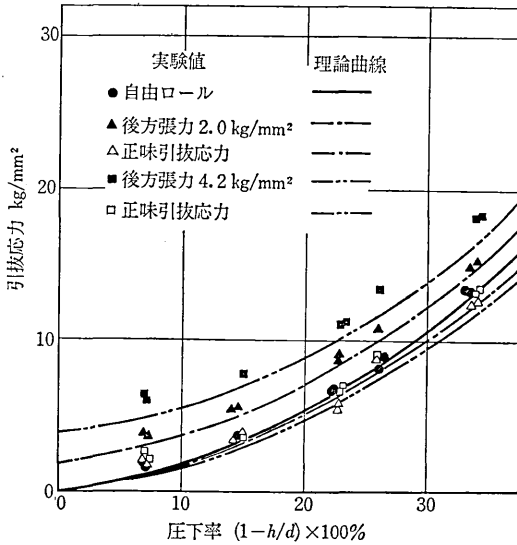


図 9 丸線から平線への引抜圧延において、後方張力が引抜応力に及ぼす影響 材質：黄銅

ることの可能な簡単な形状に分割し、各々の分割領域に対して今回の考察結果を適用し、さらに各分割領域相互の適合条件を用いてそれらを総合することにより、全体の複雑な変形機構を解明することができるであろう。したがって、素材の材質や形状、および製品の品質・形状・寸法精度等の要求が決まれば、数値計算によるシミュレーションを行なうことにより、その場合に適した加工法を見出すことも可能である。

### 5. ま と め

2個または4個のロールを用いた引抜圧延に関する解析と実験を行ない、帯板・角線・丸線から角線・丸線から平線の場合における力学的特性を明らかにした。これらの結果は、引抜加工を前提として求めたものが多いが、ロールトルクを加えるなど、圧延を組合せた検討結

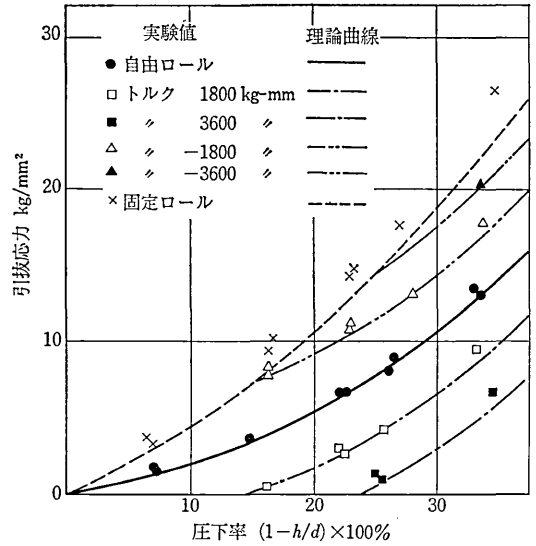


図 10 丸線から平線への引抜圧延において、ロール駆動トルクが引抜応力に及ぼす影響 材質：黄銅

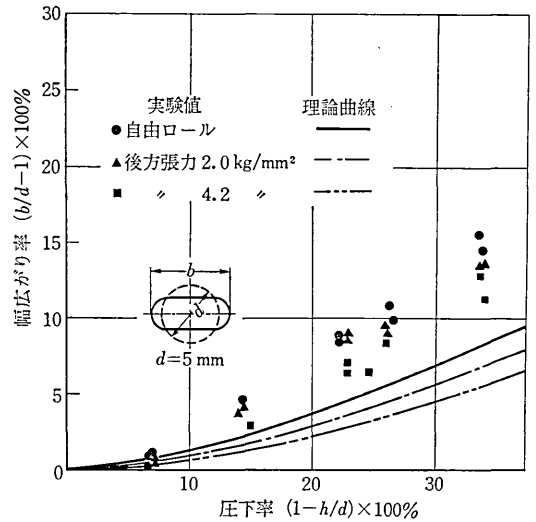


図 11 丸線から平線への引抜圧延において、後方張力が幅広がり率に及ぼす影響 材質：黄銅

果をも含むので、応用範囲が広い。それらの内容を要約すると次のとおりである。

- 1) 4個の自由ロールを用いて、長方形断面材を引抜圧延する場合、引抜応力に最も支配的な影響を及ぼす要素は断面減少率であって、断面の縦横比はほとんど影響しない。
- 2) 上下あるいは左右の一軸方向圧縮より、2軸圧縮のほうが同一断面減少率に対する引抜応力は小さい。
- 3) H/D が引抜応力に及ぼす影響は、自由ロールの場合は固定ロールに比して小さい。
- 4) ロールと材料間の摩擦係数が高くなると、引抜応力は増すが、自由ロールでは、固定ロールに比し影響は小さく、特に断面減少率の少ない場合には摩擦

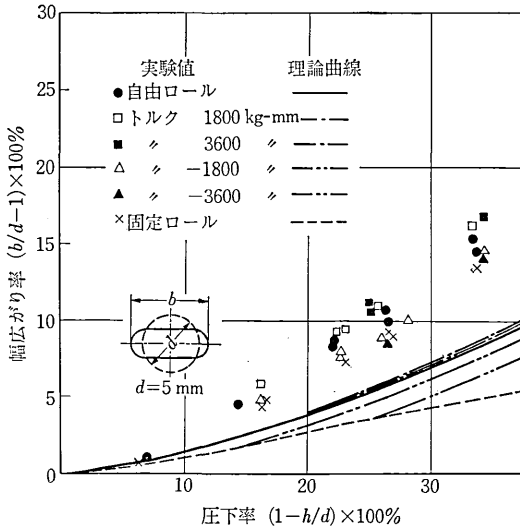


図 12 丸線から平線への引抜圧延において、駆動トルクが幅広がり率に及ぼす影響 材質：黄銅

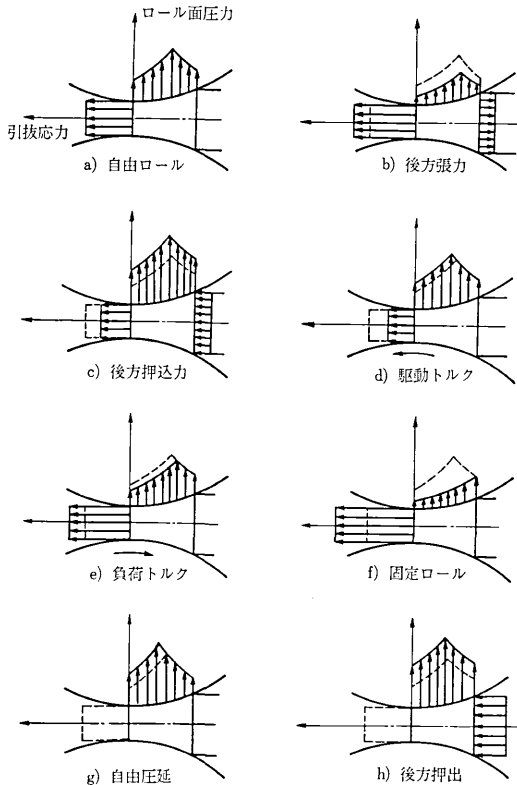


図 14 引抜圧延における、ロールの束縛条件・入側での張力・押込力などの境界条件が、引抜応力・ロール面圧力に及ぼす影響 (点線は自由ロールによる引抜圧延の場合を示す)

の影響は少ない。

- 5) 一般にロール面圧力は、加工硬化を考えなければ固定ロールでは入口、自由ロールでは中立位置で最大となる。
- 6) ロール軸受の摩擦係数はかなり引抜応力に影響

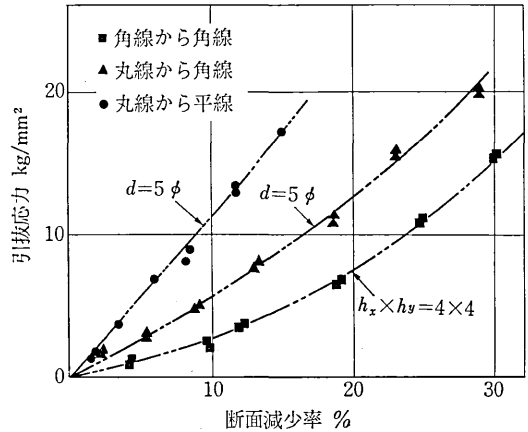


図 14 4 個の自由ロールによる角線から角線・丸線から角線・丸線から平線の引抜圧延における引抜応力 材質：銅、ロール径 100φ、素材径 5φ

し、ほぼ摩擦係数 0.2 で固定ロールの場合に匹敵する。

- 7) 固定ロールによる引抜では、断面減少率に対する引抜応力の増加の割合は、自由ロールより小さい。これは引抜応力が高くなるにつれて、ロール面圧力が低くなる結果である。
  - 8) 駆動トルクを加えながら引抜くと引抜応力は低くなり、逆に負荷トルクを加えながら引抜くと高くなる。
  - 9) 後方張力を加えると、自由ロール・固定ロールとも引抜応力は増すが、ロール面圧力は下がり、正味の引抜応力は低下する。
  - 10) 平均応力・平均ひずみを用いることにより、丸線から角線・丸線から平線の引抜圧延における変形機構を近似的にシミュレートできる。
  - 11) 平線引抜における幅広がり率は、後方張力・固定ロール・負荷トルクのいずれの場合にも、自由ロールの場合より小さいが、駆動トルクの場合には大きくなる。
  - 12) 引抜条件が引抜応力・ロール分離力に及ぼす影響は、丸線から平線の引抜きにおいても、定性的には角線から角線・丸線から角線の場合と同じである。
- なお本研究は東京大学 鈴木弘教授のご指導を受けて行ない、また試験装置と試験材料に関して、第二吉田記念鉄工所・紀長伸銅所・古河電気工業・住友軽金属工業から協力を得た。感謝する次第である。

(1972年5月27日受理)

参考文献

- 1) Th. Von Karman, Zeits. ang. Math, Mech. 5 (1925), 139
- 2) E. Orowan, Proc. Inst. Mech. Eng. 150 (1943), 140
- 3) 荒木・鈴木, 塑性と加工, Vol. 11, No. 112, 1970
- 4) 荒木・鈴木, 塑性と加工, Vol. 12, No. 127, 1971
- 5) 荒木・鈴木, 塑性と加工, Vol. 12, No. 128, 1971
- 6) 荒木・鈴木, 塑性と加工, Vol. 11 No. 114, 1970
- 7) 荒木・鈴木, 塑性と加工, Vol. 12, No. 126, 1971