

矯正技術に関する基礎理論

Fundamental Theories on Technology of Leveling

荒 木 甚 一 郎*

Jin-ichiro ARAKI

矯正は、製品の真直度・平坦度の向上を主目的とした加工法である。とくにテンションレベラによる板幅方向形状修正は、最近の矯正における大きな問題の一つである。ここでは、このテンションレベラに主眼を置いて矯正技術に関する基礎理論について概説する。

1. ま え が き

矯正作業は生産量が日本だけで年間1億トンを越す鉄鋼・非鉄金属製品のほとんどが、一度は必ず径なければならない作業工程であり、しかも、最終製品の品質形状の改善に重要な役割を果している。しかし、圧延や引抜・押出などに比較して研究が少なく、残された問題も多い。本稿では矯正の問題を考える上で基本となる基礎理論を整理・概説し、さらに矯正技術上の諸問題について若干の考察を述べる。

2. 矯正の目的と方法

矯正作業は、一般に板であれば平坦度、棒であれば真直度の向上を目指して行なわれ、それを達成する手段として多くの場合繰返し曲げを取り入れた矯正法が採用されている。矯正材に要求される真直度(平坦度)や寸法精度は、その製品の用途に応じて異なるが、ここでは矯正直後に見かけ上平坦度や真直度がすぐれているだけでなく、品質の面からも、残留応力が均一化されてその後の加工に適した製品を得る目的から考察する。

矯正を受けるべき素材は、例えば円形断面の棒であれば、引抜や押出し加工中に生じた軸対称でない応力分布や歪分布がもとで曲がりを生じる。また板の場合には、圧延によって生じた板幅方向・板厚方向における不均一な応力分布・歪分布によって形状不良を生じる。すなわち、左右ロール間隙の設定不良や、ロールの曲がり、偏平変形・ロールクラウン(ヒートクラウンも含む)・板のクラウン、さらに幅方向に関する張力分布・材料特性分布などは板幅方向形状不良の要因となり得るし、板厚方向の材料特性に関する非対称・上下ロールの幾何学的非対称・ロールと材料間の潤滑条件・摩擦条件の非対称

等は長手方向曲率分布の要因となる。また熱間加工の場合には、冷却過程における不均一温度分布によって生じる曲がりも見逃がせない。

上記のように、曲がりの発生には種々の要因があり、しかも一般に矯正を受けるべき素材は、これら要因のうちの幾くつかが組合わさって曲がりを生じているのが普通である。したがって矯正を行なうには、その曲がりかどのような原因に基いて生じたかを明らかにし、それに対応する矯正法を採用することが極めて重要である。しかしいずれにしても、曲がりの原因となっている不均一な歪分布を均一化することが矯正の基本的考え方である。なお、ここで特に留意すべき点は、引抜・押出・圧延などによって生じた不均一な歪分布の除去を矯正にのみ頼らず、その不均一な歪の発生原因を明らかにして、引抜・押出・圧延作業の改善に努力すべきことである。

図2に、現在板や棒に対して行なわれている矯正方法

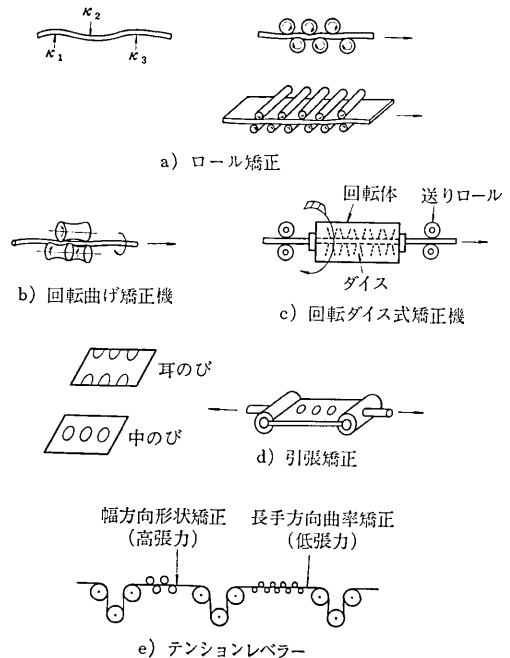


図2 板および棒の矯正方法概略図

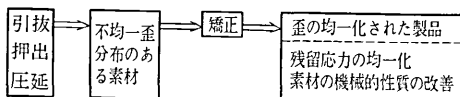


図1 矯正の目的

* 東京大学生産技術研究所 第2部

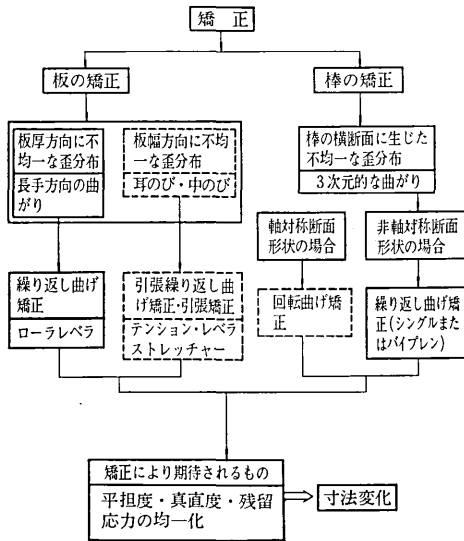


図3 矯正の目的と方法による分類

のうち代表的なものを1例として示す。またそれらを目的と方法により分類すると図3に示すようになる。なお矯正によって生じる寸法変化は重要な問題であるがここでは省略する。

3. 矯正技術の基礎となる変形機構

1. 長手方向曲率矯正に関する基礎理論

本節(3・1)に述べる基礎理論は林¹⁾・日比野²⁾・曾田³⁾等により研究され明確になった事項である。

a) 逆曲げによる矯正効果(基本原理1)

図4は、 κ_1 の曲率で一樣に曲がっている素材を逆曲げにより矯正する場合の機構を示す。図より初曲率を真直に矯正するには、 $\bar{\kappa}_2$ の矯正曲率で逆曲げを行ない除荷時における曲率をゼロとすればよい。

b) 初曲率のパラツキを均一化する効果(基本原理2)

図5は、長手方向曲率分布 κ_1, κ_2 のパラツキを矯正曲率 $\bar{\kappa}_3, \bar{\kappa}_4$ により均一化する機構を示している。すなわち、曲率分布幅 $(\kappa_2 - \kappa_1)$ は矯正曲率 $\bar{\kappa}_3$ によって $(\kappa_2' - \kappa_1')$ となり、さらに大きな矯正曲率 $\bar{\kappa}_4$ によれば $(\kappa_2'' - \kappa_1'')$ と減少する。したがって、この後基本原理1を適用して逆曲げを行なえば、図の点線で示すように初曲率分

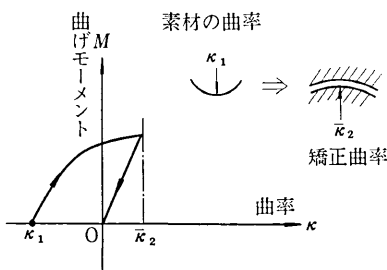


図4 逆曲げによる矯正

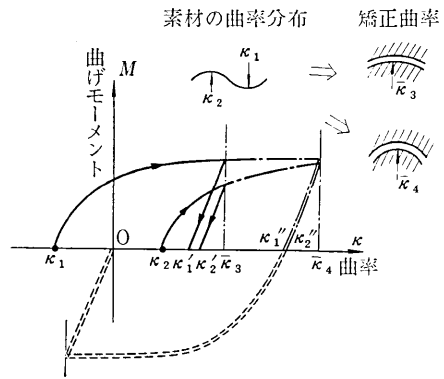


図5 初曲率のパラツキの均一化

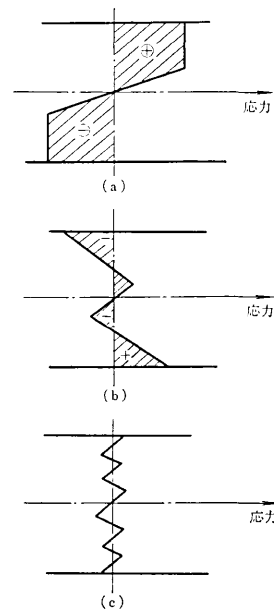


図6 板厚内残留応力の均一化

布はほとんど除去され、しかも真直な製品が得られる。

c) 繰り返し曲げ曲率漸減による残留応力均一化(基本原理3)

a) b)で述べた基本原理1, 2を組合せて用いることにより2次元な初期曲がりのある素材を真直(平坦)にすることが可能となった。しかし、図6のa)のような応力分布となる曲げを加えて初期曲がりを一度に除去しても、この場合b)のような大きな残留応力が残る。この残留応力は、曲率を漸減しながら繰り返し曲げを行なうことにより、c)のような均一化された残留応力分布とすることができる。

2. 曲げと引張(圧縮)力との組合せによる歪漸増(減)効果

図7は曲げと張力を組合せることにより、伸び歪を容

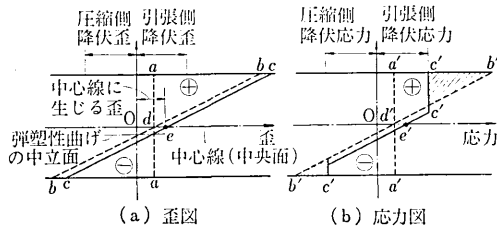


図 7 曲げと張力の組合せ効果

易に得ることができる機構を示す。横軸の一点鎖線は板の中央面位置に相当し、(a)図は歪、(b)図は応力を表す。縦軸は板厚方向位置を示し、水平な実線は板の上面对应于下面に対応する。さて張力による伸び歪 $a-a'$ は応力図において $a'-a'$ に相当する。これに曲げを組み合せると歪は $b-b'$ 、応力は $b'-b'$ となるはずであるが、応力は降伏応力を越えることはできない。しかも、板横断面に垂直方向の力の釣合を満たさねばならないので、結局 $c'-c'-c'$ の応力分布とならねばならない。これは歪図では $c-c'$ に対応し、この際の中央面に生じる歪 oe は単なる引張歪 od より大きくなる。この伸び歪 oe は、曲げ曲率・張力が大きいほど大となり、さらに曲げ・曲げ戻し過程において伸び歪は累積し漸増する。一方圧縮力が作用する場合には、同様の機構により圧縮歪を生じる。この機構を矯正に積極的に応用したものととしてテンションレベラがあるが、一方においてこれが矯正における寸法変化の一因ともなっている。

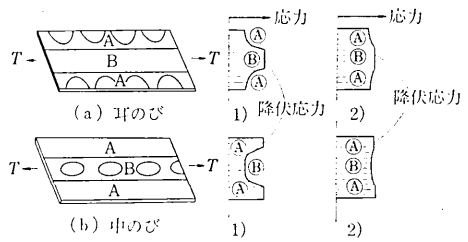
3. 板の幅方向形状不良矯正に関する基礎理論

板幅方向形状不良矯正に関する研究は未だ十分に行なわれていない。したがってここに述べる内容は定性的説明の段階にとどまる。

a) 引張矯正 (ストレッチャー)

引張矯正は、幅方向形状不良のある板を張力によって伸ばして矯正する方法である。したがって、張力を除荷した状態において幅方向の歪が均一であれば完全に平坦な板となる。

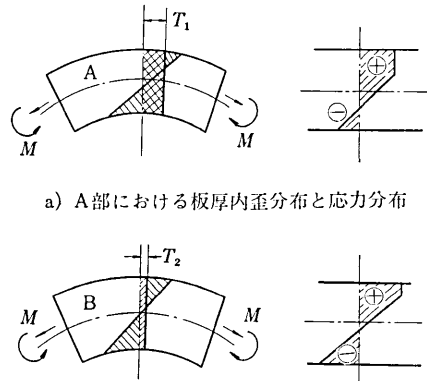
図 8 は耳伸びあるいは中伸びのある板に張力を加えて矯正する場合の機構を示すものである。ただし、この場合幅方向の材料特性 (降伏応力・ヤング率) は同じものとする。このように幅方向の歪の不均一によって波の生じた板に張力を加えると、張力の大部分はまず波の発生している部分で受け持つので、この部分がまず降伏し長手方向に伸ばされる。したがって幅方向の歪分布は均一化され、耳伸び、中伸びは次第に除去される。しかし、この矯正方法は板を幅方向に一樣に伸ばす点に技術的に困難があり、また板幅全体が降伏する張力を負荷するために材料の破断を生じやすい。また被矯正材の材料特性に幅方向分布がある場合には、張力を除荷した際に幅方向に不均一な歪分布を生じる。したがって、このような



c) 板幅方向張力分布

- 1) 幅方向に歪の不均一のある初期段階
- 2) 幅方向の歪が均一化された段階

図 8 ストレッチャーにおける矯正機構



a) A部における板厚内歪分布と応力分布

b) B部における板厚内歪分布と応力分布

図 9 テンションレベラにおける矯正機構

材料は幅方向に一樣に伸ばすだけでは完全に平坦にすることはできない。

b) 引強曲げ矯正 (テンションレベラ)

図 9 は、図 8 における中伸びの板をテンションレベラで矯正する場合の機構である。Aにおける張力がBにおける張力より大きいために、Aの伸び歪はBの伸び歪より大きい。したがって張力を加えて曲げを繰り返すことにより、A・Bにおける初期の長手方向伸び歪の差は次第に除去され、幅方向の歪が均一になる。この場合、曲げ曲率が大きく張力が大きき場合ほど大きな伸び歪を得ることができるが、矯正に必要な歪は材料の初期歪の大きさに応じて決まる。またテンションレベラはストレッチャーの場合ほど張力を高める必要がない (降伏応力の 40~50% 以下程度でよい) ので材料破断の心配は少ない。しかし幅方向そり (くらがたそり) を生じる恐れがあり、その対策を考えなければならない。なお幅方向における材料特性の分布の影響は、ロールクラウン・ロールベンディングによりある程度相殺できる可能性がある。

c) 板幅方向歪分布に対するローラレベラの矯正効果

一般にローラレベラは、長手方向曲率分布に対する矯正が主目的であり、板幅方向の歪分布を除去することは困難であるが、板厚の厚い場合にはある程度効果があ

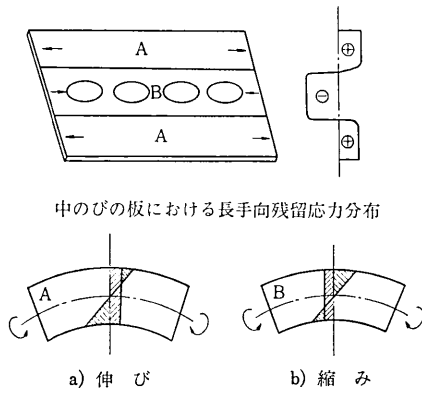


図 10 長手方向残留応力と曲げの組合せによる矯正効果

る。たとえば、中伸びの板は、図 10(a) のような残留応力分布を持つが、このような板を曲げると図 10(b) のように A は伸び B は縮み、A・B における歪の差を均一にするように働く。この効果は、曲げ曲率を大きくするほど効果があり、ロールクラウン・ロールベンディングにより矯正効果のある程度増すことが可能である。なお矯正機通過中に生じる軸力も、板幅方向の歪分布の除去に役立つ。

4. 矯正技術における問題点

1. 長手方向曲率矯正

長手方向曲率を真直にすることは最も基本的な矯正作業である。従来、矯正機の支点(ロールあるいはダイス)位置を如何に設定すべきかが矯正作業技術の一つの問題点であった。

矯正機構として具備すべきものとして、1) 初曲率分布の均一化、2) 残留応力分布の均一化、3) 最終製品の真直化があげられる。1) は最大矯正曲率を大きくすればするほどよく、2) は曲げ曲率を漸減することによって達せられ、3) は矯正機の支点位置調整を適切に行なうことにより得られる。最近の研究⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾により、これらの条件を満たす支点配置を総合的に決定することが可能となり、また矯正加工の力学的特性もかなり明確になった。図 11 は計算結果の一例であり、7 支点矯正機において、最終製品を真直にし、残留応力を均一化することの可能な支点配置を示す。図の①②③は最大矯正曲率 κ_2 の値が 8, 4, 2 (これらは降伏曲率にて無次元化した数値) の場合である。この最大矯正曲率の大きさは、初曲率のパラツキに応じて決めるべきである。下図は、上図の支点位置を固定して、材料の流出方向を変えた場合における出口角と最終曲率の関係を示す。これより、出口角により矯正作業の微調整が可能なこと、また最適の出口角の存在することがわかる。

2. 板の幅方向形状不良矯正

最近では、圧延における形状制御技術が進歩し、圧延

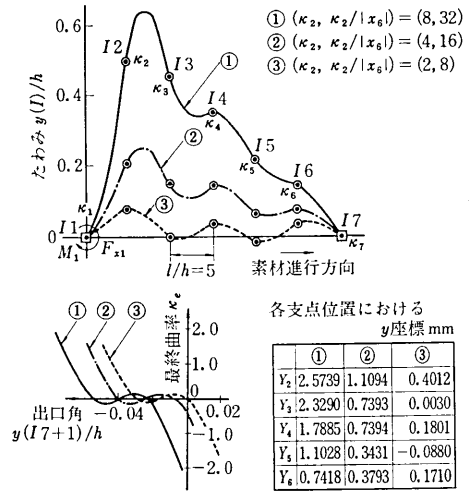


図 11 7 支点のモデル矯正機において最大矯正曲率 κ_2 が最終曲率—出口角曲線におよぼす影響

材の幅方向形状は非常によくなった。しかし、0.1 mm 程度の薄板となると、板幅方向の歪分布をかりに 0.1% 以下に保つには、幅方向の板厚分布を 0.1 μ の精度で制御しなければならない。しかも、0.1% 程度の弾性歪範囲の歪分布であっても、外観上は顕著な耳伸びや中伸びを呈する。したがって、平坦度に対する要求の厳しい薄板の場合にはテンションレバに頼らざるを得ず、板の形状不良矯正は、矯正技術上における最も重要な問題の一つとなっている。3 節で述べたストレッチャーやテンションレバを用いれば、理論上は矯正可能であるが、実際問題として、初期歪の不均一をある程度軽減することはできても完全に平坦にすることは非常に困難である。ここでは、その原因がどこにあるかを明確にするために 3・3 節と類似の考察をより具体的に行ない、幅方向形状不良矯正における技術上の問題を検討する。

図 12(a) は B 部が ϵ_0 だけ A 部より長い材料を引張矯正する場合である。B 部を弾性限度歪 ϵ_e だけ伸ばし、A 部を $(\epsilon_0 + \epsilon_e)$ だけ伸ばすと板幅全体が降伏応力に達し、張力を除荷すると幅方向に歪分布のない平坦な板(長さ $1 + \epsilon_0$) となることを示す。すなわち A 部の塑性伸びが B 部の塑性伸びより ϵ_0 だけ大きくなればよい(斜線部は塑性歪を示す)。この目的は、材料特性が幅方向に一樣であれば、A・B 各部の長さが同じで、しかも B 部の歪が ϵ_e より大きければ常に達せらるる。

b) は、板幅方向の材料特性の分布が引張矯正機構に及ぼす影響を検討したもので、A 部の弾性限度歪 ϵ_{eA} が B 部の弾性限度歪 ϵ_{eB} より小さい場合である。このような材料は最初平坦な板であっても幅方向に一樣に伸ばすと B 部が塑性変形を開始する段階で既に A 部は $(\epsilon_{eB} - \epsilon_{eA})$ の塑性歪を生じており、除荷後には幅方向に不均一歪のある材料となる。したがって、材料特性分布が幅方

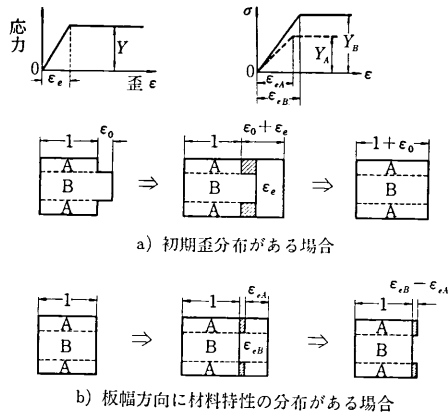


図 12 引張矯正における幅方向歪分布の変化

向歪分布に重畳している材料を引張矯正するには、B部をA部より $(\epsilon_{eB} - \epsilon_{eA})$ だけ長く伸ばす矯正方法を探らなければならない。

図 13 a) は図 12 a) と同じ材料を引張曲げ矯正により伸ばす場合である。幅方向の曲げ曲率が同じとすれば張力が大きい方が伸び歪が大きいから、B部の長さがA部の長さより長い間は常にA部の方が伸び易い。この場合も、A部の塑性歪 ϵ_{PA} がB部の塑性歪 ϵ_{PB} より ϵ_0 だけ大きくなれば、平坦な製品が得られる。ここで張力によって生じる歪 ϵ は一般に弾性限度歪の 50% 以下程度で十分である。

図 13 b) は板幅方向に材料特性の分布がある材料を引張曲げにより一様に伸ばす場合がある。この場合引張矯正の場合と異なりA部の塑性歪とB部の塑性歪が等しければ製品が平坦となる。このことはA・Bの降伏応力・ヤング率がともに異なる場合でも成り立つ。しかし、このような矯正条件は幅方向の曲げ曲率が同じ場合に実現不可能なことは明らかである。しかし、幅方向曲率分布を材料特性に応じて適切にすれば、b) のような状態は実現可能である。ここでそのような条件を満たす矯正曲率を κ_A, κ_B とする。引張曲げにおける塑性伸びは曲率および引張応力の関数なので、A・B両部における塑性伸び $\epsilon_{PA} \cdot \epsilon_{PB}$ は次の式(1)で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{PA} &= f(\kappa_A / \kappa_{YA}, \sigma_A / Y_A) \\ \epsilon_{PB} &= f(\kappa_B / \kappa_{YB}, \sigma_B / Y_B) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで Y_A, Y_B はA・B部の降伏応力、 κ_{YA}, κ_{YB} は降伏曲率、 $\sigma_A \cdot \sigma_B$ は各部における引張応力である。

なお $\sigma_A \cdot \sigma_B$ はA・B各部におけるヤング率を用いて次の式(2)のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_A &= E_A \epsilon \\ \sigma_B &= E_B \epsilon \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

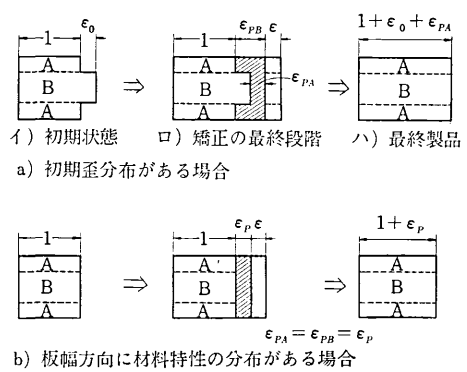


図 13 引張曲げ矯正における幅方向歪分布の変化

$\epsilon_{PA} = \epsilon_{PB}$ を満たすには、次の式(3)を満たす $\kappa_A \cdot \kappa_B$ としなければならない。

$$f(\kappa_A / \kappa_{YA}, \epsilon E_A / Y_A) = f(\kappa_B / \kappa_{YB}, \epsilon E_B / Y_B) \quad (3)$$

これは張力水準に応じて $\kappa_A \cdot \kappa_B$ を決めなければならないことを示す。しかし、このような曲率 $\kappa_A \cdot \kappa_B$ を用いて幅方向材料特性分布の影響を打消せば、たとえ、さらに幅方向歪分布が重畳している場合でも平坦矯正が可能である。

図 12・13 における考察は、材料の幅方向長さを一様にそろえながら矯正する立場から考え、テンションレベラの場合には、材料特性に分布があっても平坦矯正が可能であることを示した。

すなわち、“平坦な板を必要量だけ伸ばし平坦な板を得る作業条件を見い出せば、歪分布のある板であっても、また材料特性分布が重畳している板であっても平坦矯正が可能となる”。

2. ま と め

本稿は、矯正機構を極度に単純化して考察したが、実際の矯正の問題を考えるには、もっと広く深く総合的に検討すべき要素が多い。これらの問題については本格的な研究が行なわれることを期待する。

最後に本稿を書くに当り、平素御指導を賜った東京大学 鈴木弘教授に深く感謝する。(1973年8月3日受理)

文 献

- 1) 林：東京大学工学部紀要，24，2，45～61
- 2) 日比野：ローラレベラの矯正作用に関する研究，博士論文。
- 3) 曾田：機械試験所報，15-4 (1961)，194～232
- 4) 荒木：塑性と加工，Vol. 13, No. 138 (1972-7)
- 5) 曾田・山下・須藤：昭 46 年度塑性加工春季講演会，講演論文集。
- 6) 中島・松本：昭 48 年度塑性加工春季講演会，講演論文集。