

テンション レベラの矯正特性

Levelling Properties of Tension Leveller

テンション レベラによるストリップ形状不良の矯正精度に対する要求は、最近ますます厳しいものとなってきている。従来のテンション レベラは、通常のローラ本数の多いローラ レベラとテンション付加装置を組み合わせで構成されていた。しかし、ローラ本数の多いテンション レベラは、曲げロスが大きく、またローラの取付精度が出ないなどのいろいろな欠点を有することが分かってきた。この点より、最近ローラ本数の少ないテンション レベラが実用化されてきている。本稿は、この方式のテンション レベラで基本的な問題となるストリップの塑性伸び計算法及び形状矯正を最善とするローラ配置について述べる。

木村智明* Tomoaki Kimura

芳村泰嗣* Yasutsugu Yoshimura

1 緒 言

最近、鉄鋼業においては最終成品となるストリップの形状精度に対する要求が、用途の多様化に伴ってますます厳しいものとなってきている。ストリップの形状不良は不均一な圧延、焼鈍あるいはめっきなどのいろいろな処理工程で生ずる。これらの形状不良は通常、曲げとテンションの複合応力により、ストリップに塑性伸びを与えるテンション レベラによって矯正される。このテンション レベラは、従来シート材などの矯正に使用されていた多本数形ローラ レベラとテンション付加装置とを組み合わせで構成されていた⁽¹⁾。しかるにこのような通常のレベラをテンション レベラとして使用することは、テンションを付加している特性を十分に生かしているものでなく、いろいろな欠点を有するものであることが分かってきた。すなわち、ローラ本数が多いとテンション ドロップが大きく、ローラの駆動が必要となる。一方、ストリップには各ロール位置で塑性伸びが発生していることより、ローラ周速とストリップ速度の完全な同調が得られず、従ってテンション レベラ内で緩みを生じ、有効な矯正効果が望めないなどである⁽²⁾。

このような理由で、ローラ本数の少ない非駆動のテンション レベラが最近取り上げられ実用化されてきた⁽²⁾⁽³⁾。

筆者らはこのローラ本数の少ないテンション レベラでの基本的な問題点、すなわち、塑性伸びの計算法及び矯正効果を最善とするローラ配置について、基礎的な解析及び実験を進めてきた。特にローラ配置については、従来発表されている例⁽²⁾などと比較し、最適のローラ配置を得ることができた。更にこの結果を実機に適用したところ、所期の目標を達成する順調な稼動結果が得られたので、これらの内容について報告する。

2 テンション レベラにおける問題点

ストリップの形状不良とは、図1に示すような各種のものがある。これらの形状不良のうち、カーリング及びクロスボーイングは、ストリップにテンションを付加しない通常のローラ レベラで容易に矯正可能である。一方、中伸び及び端伸びなどの形状不良は、ストリップ内の局部伸びにより生ずるもので、単なる繰返し曲げでは修正できず、ストリップの長手方向に塑性伸びを与えるテンション レベラによって矯

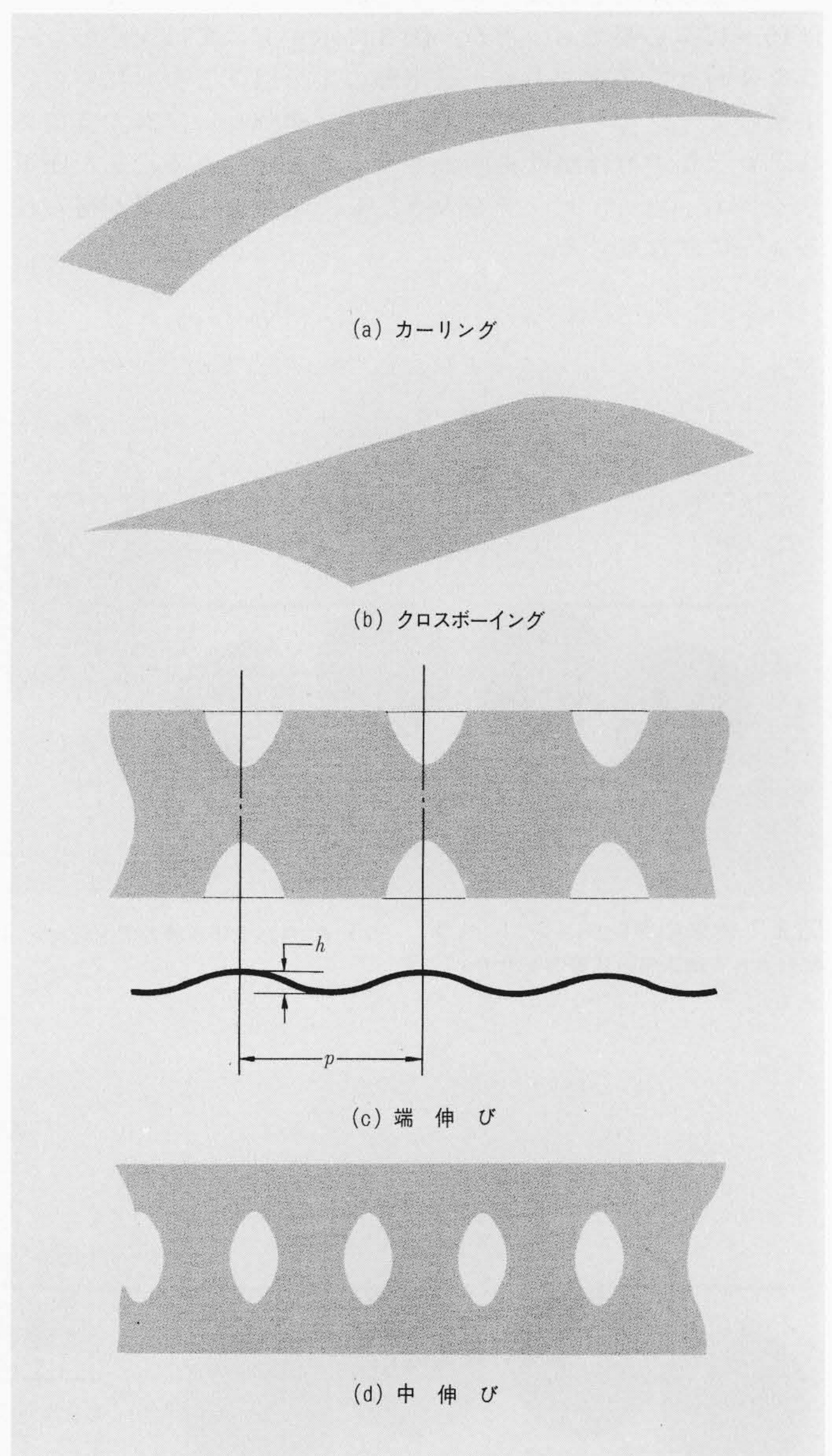


図1 ストリップの形状不良 ストリップの各種形状不良を模式的に説明したもので、実際にはこれらのものが組み合わさって発生することが多い。

* 日立製作所日立工場

正される。このような目的で従来使用されていたテンションレベラは、**図2**に示すような通常の多本数形ローラレベラの前後に、ブライドルなどを設け、テンションを付加するものであった。多本数形ローラレベラを使用する場合の基本的な問題点については前述したが、これ以外にもワークローラを支持する補強ローラが、**図2**に示すように千鳥状に配列する必要があることより次のような問題が生ずる。すなわち、この配置では隣接するワークローラが、これを支持する補強ローラを介して相互に関係するので、ワークローラの取付精度を単独に調整することができない。このため十分な取付精度が得られず、高度な形状矯正の要求に応ずることが困難である。**図3**は、以上のような問題点を解決するローラ本数の少ないテンションレベラとして、実用化されている一例を示すものである。このテンションレベラのローラ配置は、ストリップに塑性伸びを与える伸張部と、この部分で生じた残留曲率を修正する形状修正部より構成される。ストリップに曲げ作用を行なうローラ本数は、**図2**に示す従来形では15~17本必要であったが、**図3**に示すものでは大小のローラを合わせて7本であり、従来形の半分以下となっている。小径のワークローラは各調整可能な補強ローラ群で支持され、ローラの取付精度を向上させることができる。また圧下ローラは、ローラピッチを大きくし、十分な圧下量が得られるようにされている。

塑性伸びを発生するために必要な曲げ曲率は、テンションによりストリップを曲げ、ローラ半径との関係で得られる。一方、従来形ではローラピッチを小さくしてあり、ローラの圧下のみでもある程度の曲げ曲率は得られるが、ピッチが小さいことが逆効果となり、圧下量を大きくとれず、テンションを加えても多数のローラがないと十分な塑性伸びを得ることができなかった。この点が**図3**のローラ本数の少ないテンションレベラと従来形のもので大きく相違するところである。

しかし、ローラ本数が少ないテンションレベラでは塑性伸びを発生させるために、大きな加工曲率を与えるので、これにより発生する残留曲率をいかに除去するかが大きな問題となる。この残留曲率の除去が不十分であると、**図1**に示すカーリングやクロスボーイングが残り、製品価値を下げるからである。

この点に関しては、**図2**に示す従来形のものでは、多本数のローラを漸開的に傾斜圧下するので、加工曲率をスムーズに減少させることができ、従って残留曲率の収束性が良く、比較的問題にならなかった項目である。

以上より本稿ではローラ本数の少ないテンションレベラ（以下、単にテンションレベラという）について、矯正の基礎となる塑性伸びの計算法及び最適ローラ配置について述べる。

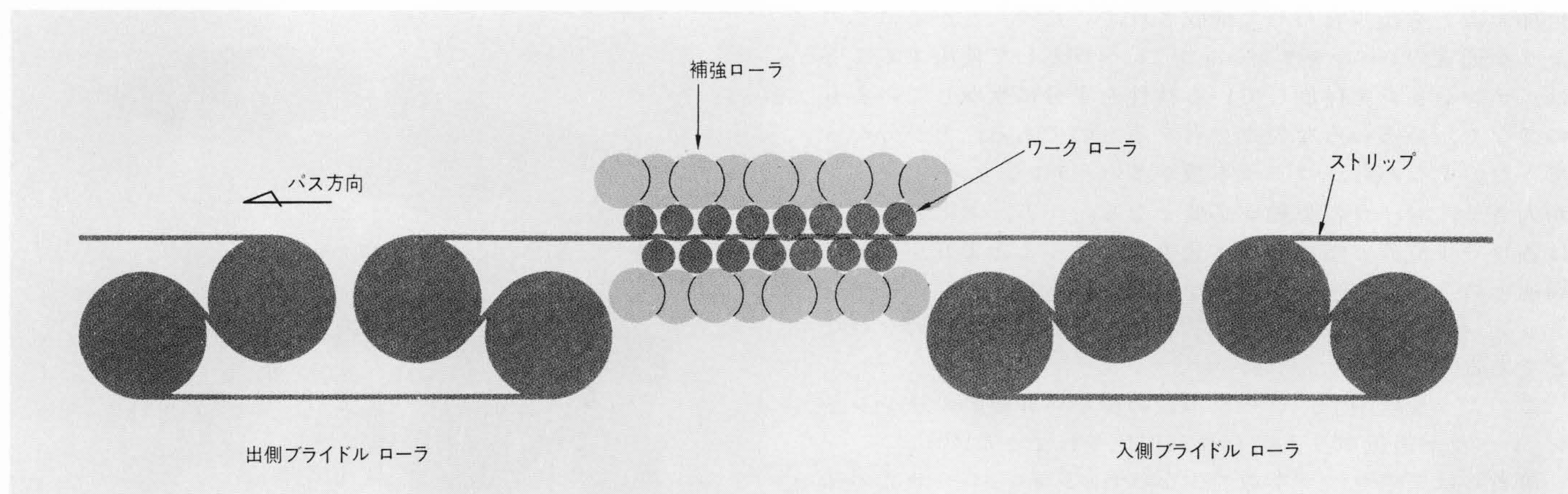


図2 従来のテンションレベラ ワークローラ15本時のテンションレベラで、補強ローラは千鳥状に配列される従来形の代表例を示す。

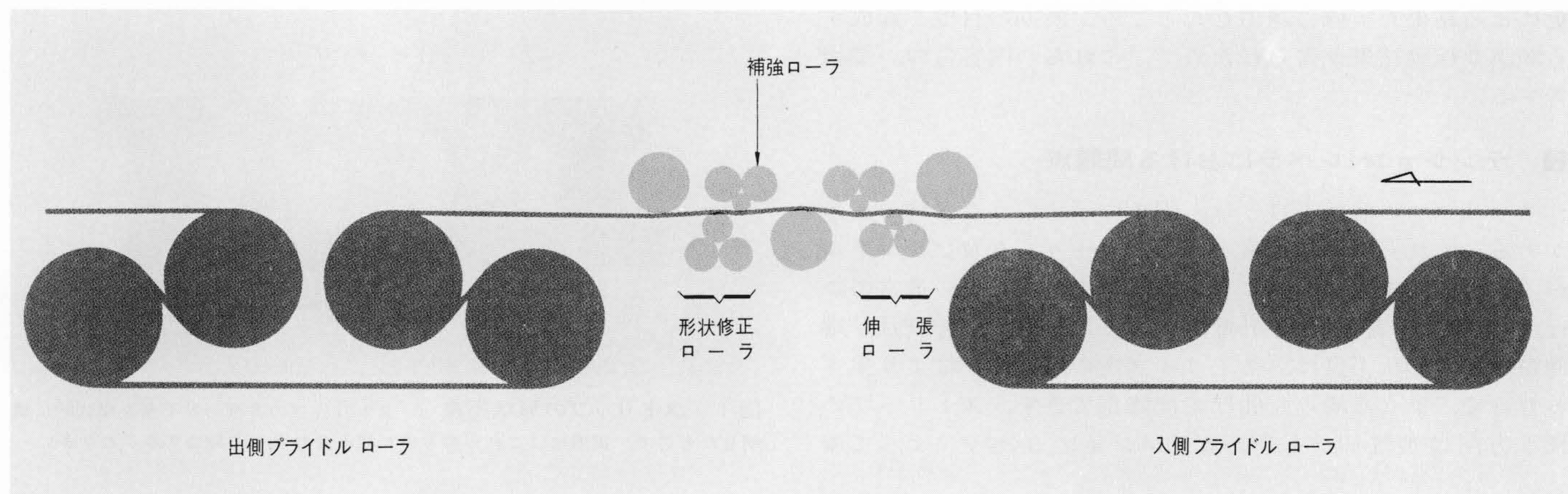


図3 ローラ本数の少ないテンションレベラ ワークローラは4本で、伸張及び形状修正を行なう部分に分けられている。ワークローラは独立した補強ローラ群により支持される。

3 ストリップの塑性伸び計算法

一般のストリップにおける、図1に示すような中伸び、端伸びなどの局部伸びによる形状不良を矯正するため必要な塑性伸びは、0.5～1.0%である。図3に示すテンション レベラでは、この塑性伸びを、主に小径の2本のローラで構成される伸張部で得る。しかし、このように少ないローラ本数で十分な塑性伸びが得られるかどうかの検討が必要である。テンション レベラの塑性伸び計算法については、各種の報告⁽⁴⁾⁽⁵⁾が見られるが、いずれも加工曲率が明確な場合を対象としている。実際には、ローラ位置での加工曲率は必ずしもローラ半径と等しくなく、压下量及び板厚などにより変化するものと考えられる。

本稿では加工硬化のない材料に対し、単一ローラで得られている理論解⁽⁶⁾を一般化し、加工曲率については実験式を求め、一般のロール配置での塑性伸び計算を可能にした。

すなわち、単一ローラでの解を、 N 本のローラによる繰返し曲げ過程に適用すれば、全塑性伸び ϵ_c は下式で計算できる。

$$\epsilon_c = \sum_{i=1}^n \{ h / (Y_{Ni} \cdot \epsilon_s) (\sigma_T / \sigma_s) - 1 \} \epsilon_s - (\sigma_T / \sigma_s) \epsilon_s \cdots \cdots (1)$$

ここに、 h : ストリップの厚み(mm)
 σ_s : ストリップの降伏応力(kg/mm²)
 ϵ_s : ストリップの降伏ひずみ
 σ_T : ストリップのユニット テンション(kg/mm²)
 Y_{Ni} : i 番目のローラ位置での曲げ加工半径(1/mm)

(1)式中、加工半径 Y_{Ni} が未知の量となるが、これはストリップの板厚、ユニット テンション、ローラ径及びローラの压下量などにより変化する。この Y_{Ni} を各ローラ半径 R_i (mm)に対する偏差 ξ_i を用いて次式で表わす。

$$Y_{Ni} = R_i (1 + \xi_i) \cdots \cdots (2)$$

この偏差 ξ_i が分かれば、(1)式により塑性伸びの計算ができる。但し、計算により ξ_i を求めることは、ひずみ増分理論による膨大な計算が必要で簡単には求められない。このため本稿では、ストリップのローラに対する次式に示す巻付角 θ_i を導入し実験により ξ_i を求めた。

$$\theta_i = \{ (\delta_{i-1} / P_{i-1}) + (\delta_i / P_i) \} / \{ 1 - (\delta_{i-1} \cdot \delta_i) / (P_{i-1} \cdot P_i) \} \cdots \cdots (3)$$

(3)式中 δ は压下量、 P はローラ ピッチを示すが図4は、これに付けた添字と実際のローラ配置の関係を示すものである。

ξ_i は3本曲げローラで、一般にテンション レベラで取り扱われるストリップを対象に板厚0.3～1.2mm、ローラ径30～200

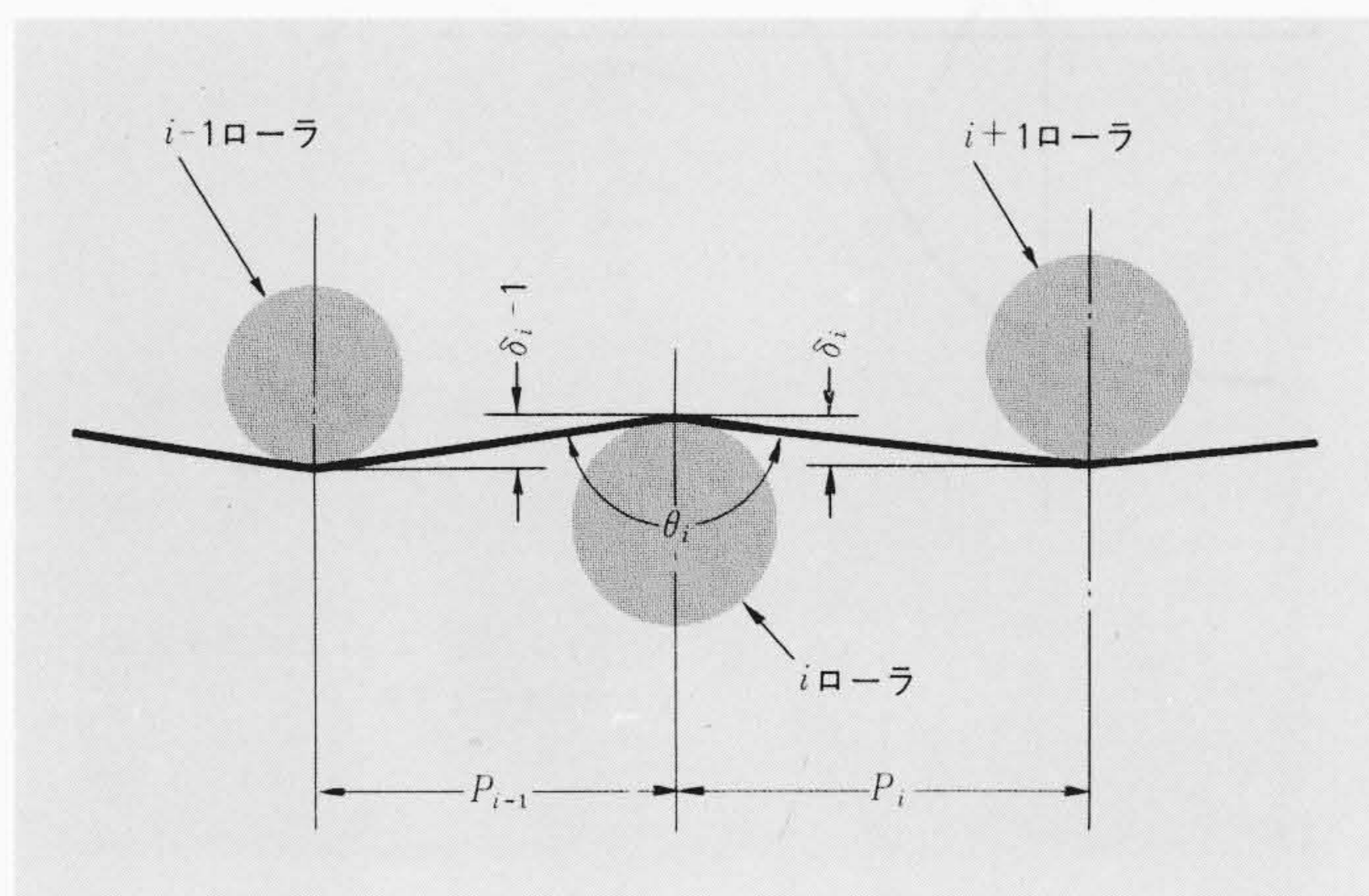


図4 ストリップのローラに対する巻付角度 θ_i がローラに対する巻付角度で前後のローラ位置及びローラピッチで決まる。

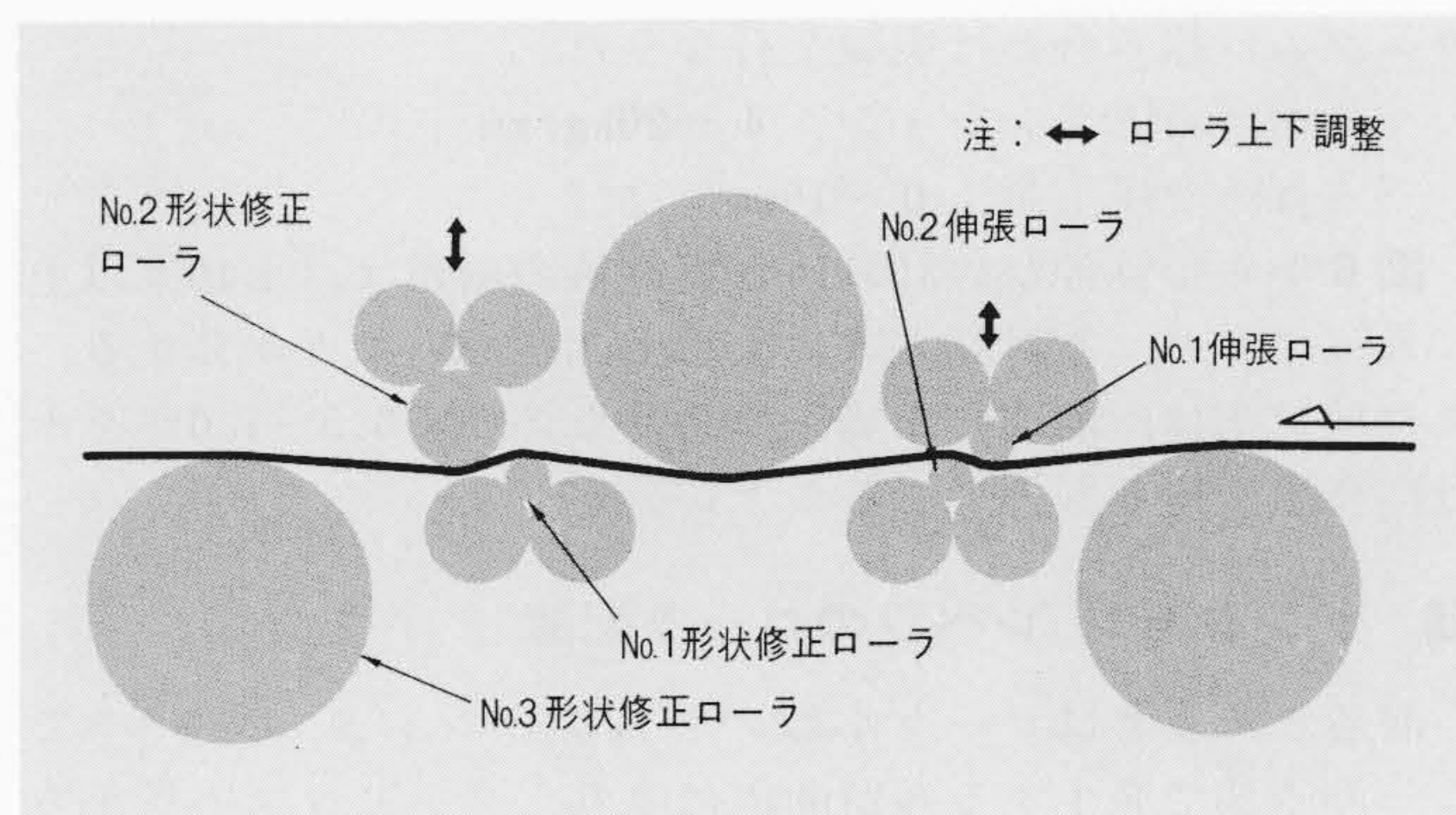


図5 レベラのローラ配置 実験に使用したレベラのローラ配置でこの前後に巻取り及びテンション付加装置が設けられている。

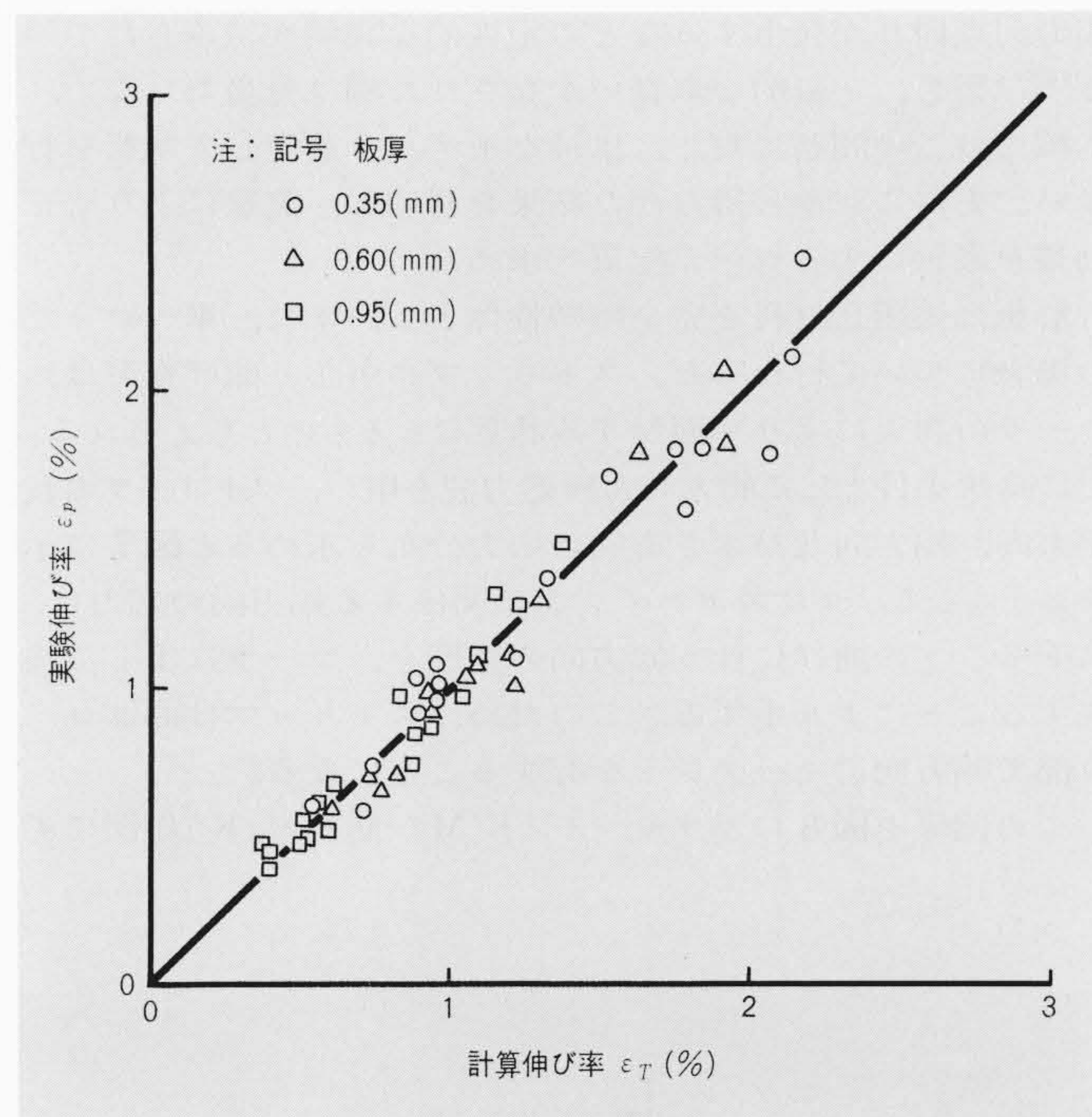


図6 計算伸び率と実際伸び率との比較 計算値と実験値は、約10%内のばらつきでほぼ合っている。

mmφの範囲でユニット テンション 4～20kg/mm²を与え、曲げ曲率 Y_{Ni} を測定し、(2)式より逆算して次式のように求めることができた。

$$\xi_i = 15 \times (0.785 h^{0.782} \cdot \theta_i^{-1} - 1) R_i^{-1} \cdots \cdots (4)$$

但し、 $\xi_i \leq 0$ のとき $\xi_i = 0$

なお、(4)式にはユニット テンションの項が含まれていないが、これは前記したようにユニット テンションが4 kg/mm²以上と大きいため、これによる変化分は飽和状態になり、無視できるからである。(1)～(4)式を使用してストリップの塑性伸び率を計算した結果と、図5に示す実機ローラ配置でのテンション レベラで得られた塑性伸び率との比較は図6に示すとおりである。このテンション レベラの実験に使用した材料は、一般の低炭素鋼ストリップ(降伏応力約33kg/mm²)で板厚は0.35mm、0.6mm、0.95mmの3種類である。またローラは非駆動で、テンション レベラの前後に設けられたテンション付加装置によりテンションを与え、レベリングを行なった。実験時のレベリング速度は4～5 m/minであり、ストリップのユニット テンション及び、ローラの压下量を、次の範囲で

ランダムに組み合わせ実験を行なった。

ユニットテンション：4～20kg/mm²

ローラ圧下量：0～10mm

図6から塑性伸びの計算値と実測値の偏差は、±10%以上に入っており、本計算方式は実用上問題ないことが分かる。また伸び率は、前述した矯正に必要な伸び率0.5～1.0%を十分に発生し得るものであることが分かった。

4 テンション レベラのローラ配置

前述したようにローラ本数の少ないテンション レベラでは、伸張部で発生する残留曲率により、ストリップの長手方向の曲り(カーリング)、あるいは幅方向の曲り(クロスボーイング)が生じ問題となる。これらの曲り発生機構に関しては、小径ローラでテンションを付加してストリップを曲げる際、平面ひずみの拘束状態が生じ、長手方向の曲りを修正しても幅方向に曲りが発生するなどの定性的な説明が試みられている⁽⁶⁾。但し、定量的な取扱いがなされた例は見当たらない。本稿ではこの問題に対し、単純なモデルを想定して解析を行ない、更にこれから得られた結果を基にし、実験により矯正効果を最善にするローラ配置を求めた。

解析は被矯正材料を完全剛塑性体とし、また、単一ローラの場合について行なった。ストリップの引張り曲げ変形は、ローラの拘束により平面ひずみ状態になるものと考えられる。更に降伏条件として最大せん断応力説を用い、ストリップの長手方向、幅方向及び厚さ方向の応力分布を求めると図7に示すようになる。クロスボーイングに関係する幅方向の応力は、ストリップの曲げに伴う幅方向の変形を、ローラによって拘束することにより生ずる。このため、ストリップは曲げローラ部で幅方向にモーメントを有することになる。

この関係を図8に示すモーメント(M)-曲り率(K)線図で考

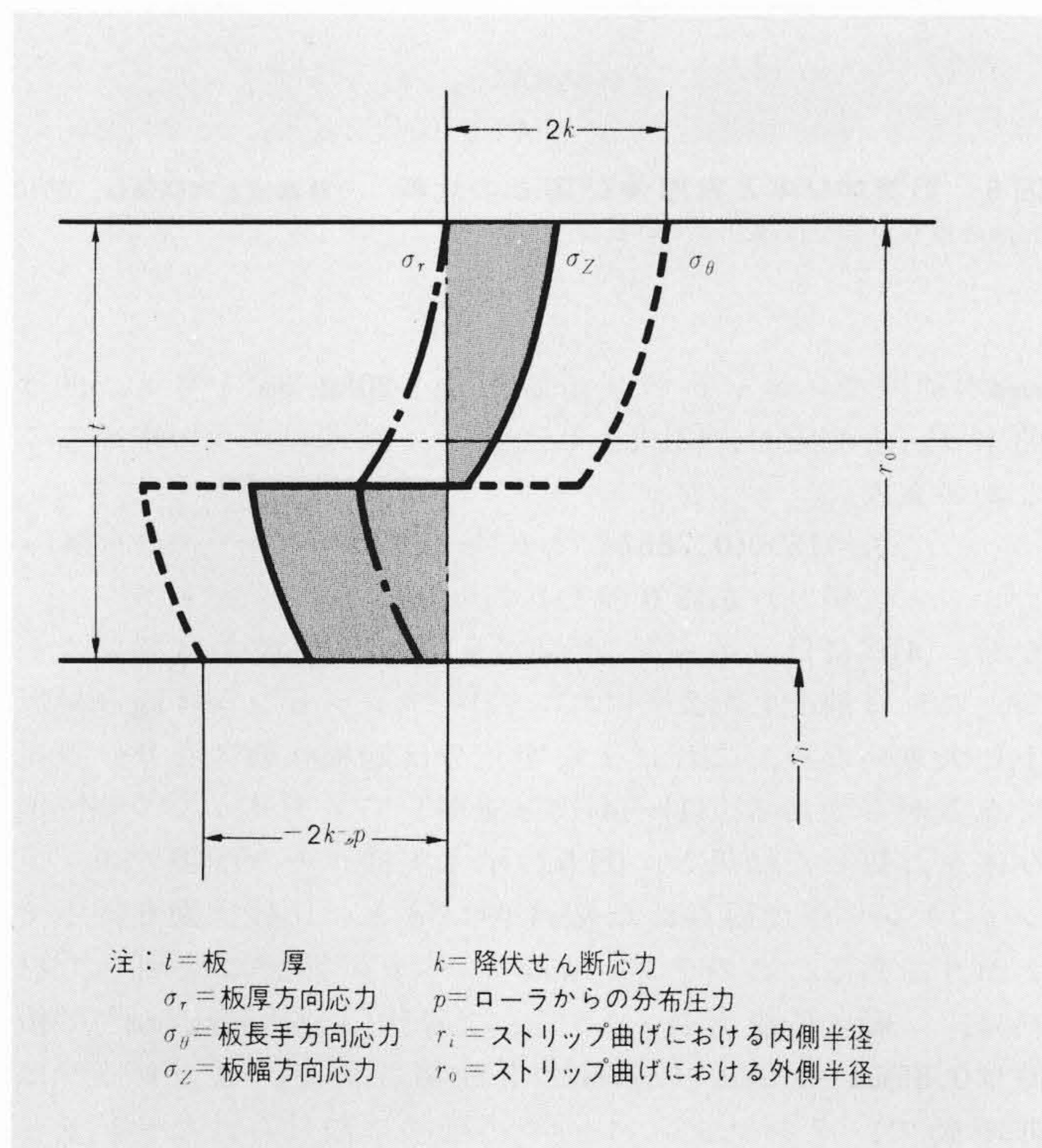


図7 ストリップ断面内各方向の応力分布 ストリップをレベラローラで曲げた際の理論計算による断面内各方向の応力分布を示す。

察すれば、以下のように説明できる。同図においてストリップを一定テンション下で長手方向に曲率 $K\theta_w$ 、すなわちA点に示す状態まで曲げたものとする。この場合、幅方向にはローラにより拘束されるため、曲げ変形は生じないが内部モーメントを有し、A'の状態となる。この状態からストリップをローラによる曲げ、及びテンションより解放すれば、ストリップの長手方向ではA→Bに、幅方向ではA'→B'の状態に移動する。長手方向の曲率をこの状態でゼロにしても、幅方向ではB'のような状態にあり曲率はゼロとならず幅方向の変形、すなわち、クロスボーイングを生ずる。このように長手方向の変形(カーリング)を修正しても、幅方向にクロスボーイングが生じ、両者の変形を同時に修正することが困難である。

以上のようにカーリングとクロスボーイングは相互に関係していることから、これらを同時に修正するには、長手方向の加工曲率を漸減してゆくことが有利と考えられる。これらの関係を各種ローラ配置を用いて実験を行ない明らかにすることにした。実験は3で述べた塑性伸び率の実験と関連して行なったものである。ローラ配置については各種のものについて行なったが、その代表的な例は図9に示すとおりである。

A形：図9(a)に示す配置は、従来発表⁽²⁾されている例であるが、カーリング及びクロスボーイングの一方だけしか修正できないと考えられる場合である。

B形：同図(b)に示す配置は形状修正部に小径ローラを用いたもので、ローラの圧下量漸減によりカーリング及びクロスボーイングの変形を同時に修正可能かどうかを検討するものである。

C形：同図(c)に示す配置は前述の解析結果に基づいて、ローラ径を漸増し、すなわち、加工曲率の漸減を図り、カーリング及びクロスボーイングの変形を同時に修正しようとするものである。

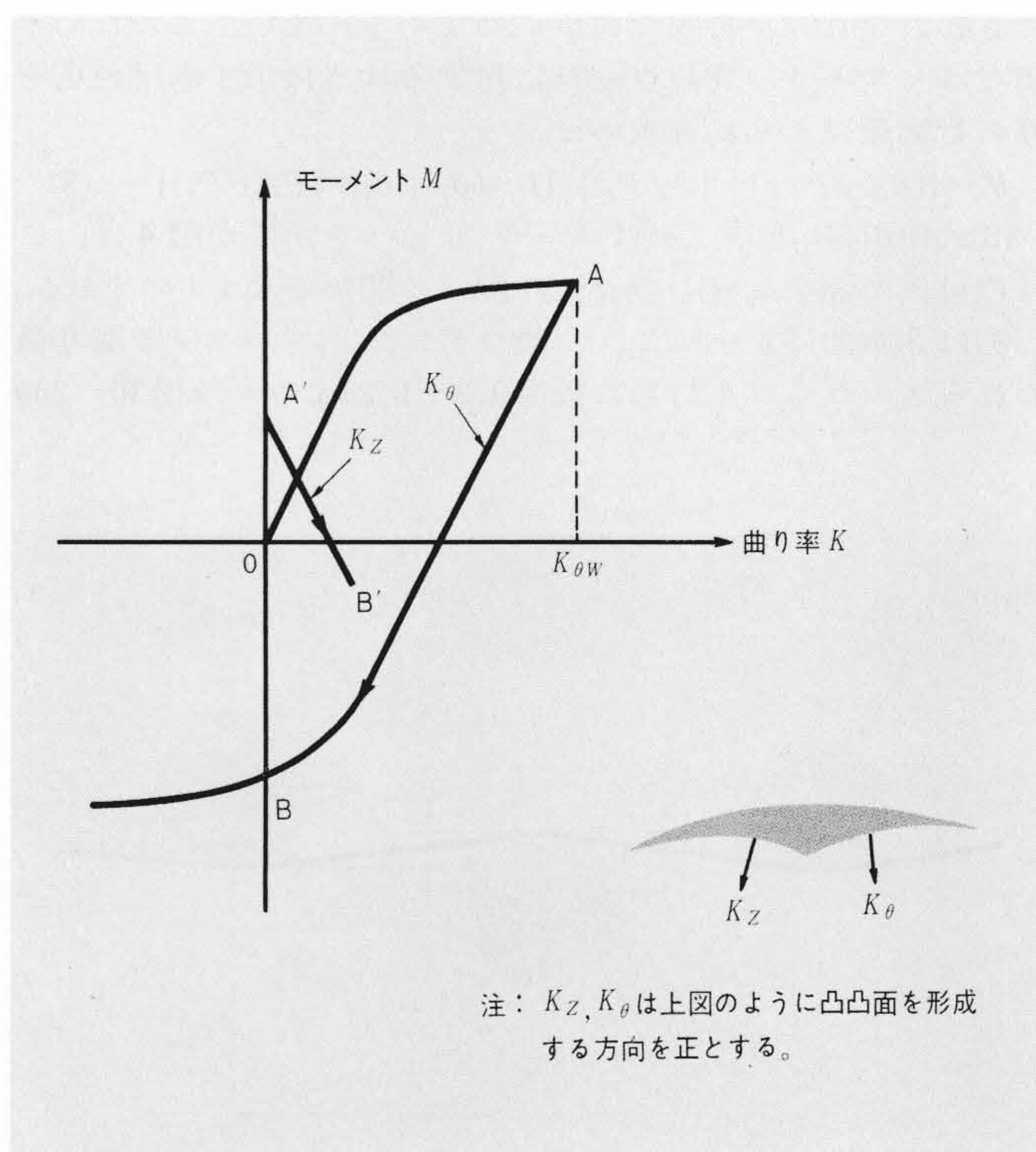


図8 引張り曲げにおけるモーメントと曲り率の関係 ローラによりストリップを曲げた状態から解放する場合の、ストリップ長手及び幅方向のモーメントと曲り率の関係を示す。

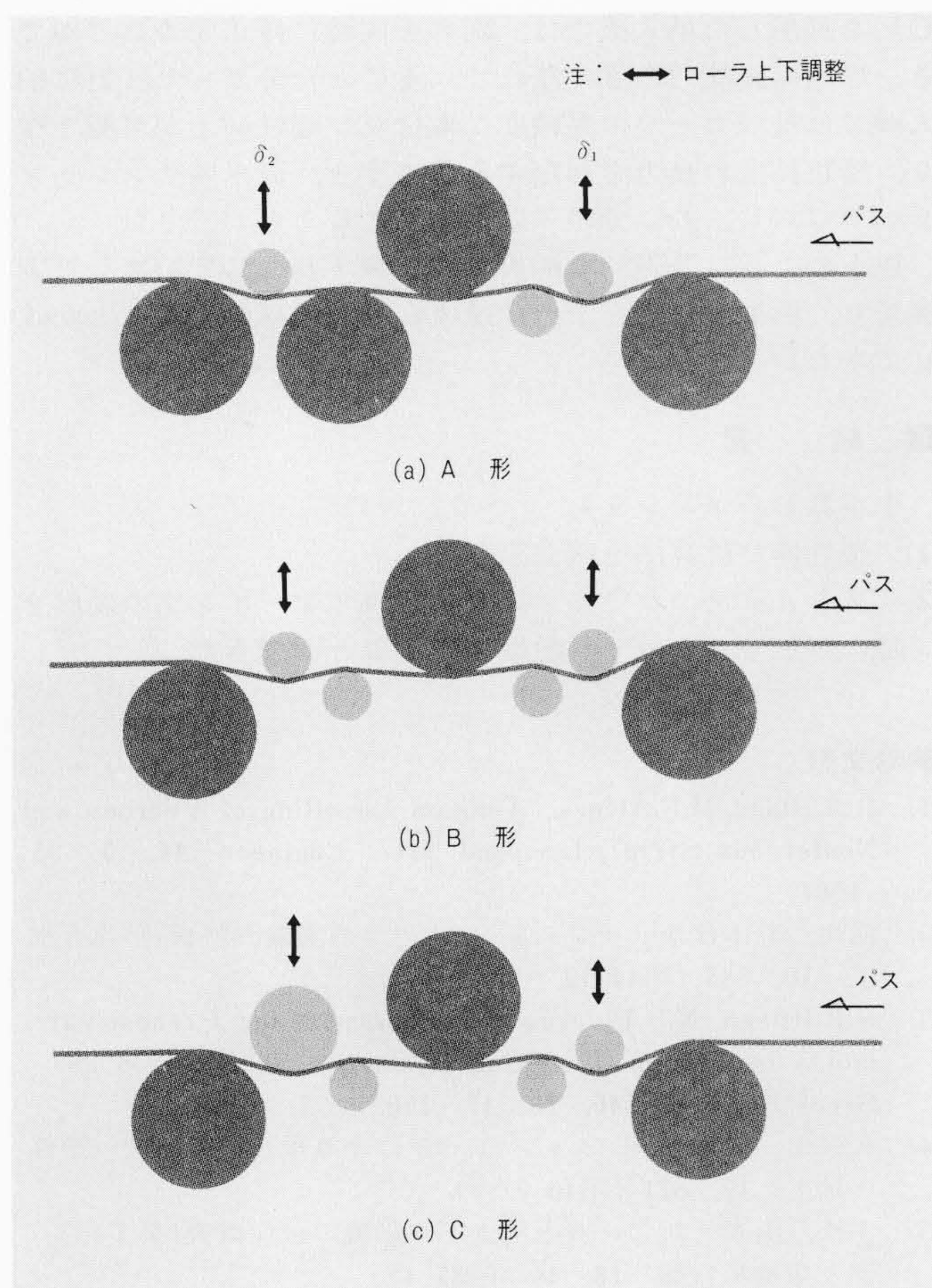


図9 実験に使用したローラ配置 テンションレベラ出口側の形状修正効果を検討するために使用した3種類のローラ配置を示す。 δ_1 は伸張、 δ_2 は形状修正部ローラの圧下量を示す。

図10は、各ローラ配置での矯正特性実験を示すものである。横軸に形状修正ローラの圧下量 δ_2 、縦軸に矯正後残留したカーリング量 C_1 及びクロスボーイング量 C_2 を取った。なお、図10(a)、(b)、(c)は、図9ローラ配置(a)、(b)、(c)に対応している。図10(a)及び(b)から分かるように、図9(a)及び(b)のローラ配置では平坦化に対する曲げ加工曲率の収束性が悪く、カーリングとクロスボーイングを同時に修正することは難しい。一方、図9(c)のローラ配置は加工曲率を漸減することが容易であり、図10(c)に示すように、カーリング及びクロスボーイングの修正特性がなだらかで、両者を同時に修正できる圧下量 δ_2 の調整範囲を有することが分かる。

以上のように少ないロール本数でストリップの形状矯正を行なう場合は、形状修正部のローラ径を漸増することが極めて有効である。

5 実機への適用及び稼動状況

日立製作所では以上の基礎解析及び実験結果を基にしたテンション レベラを、昭和49年8月現在まで3プラント納入した。

実機ローラ配置は、いずれも基礎実験結果で、最も形状修正特性効果の良かった図9 C形を採用したものである。なお、この場合の前後ブライドル ローラ及びテンション レベラの配置は図3に、テンション レベラのローラ配置は図4に示す方式を取り、その主仕様は表1に示すとおりである。実機によるストリップの形状修正は、形状修正ローラを板厚に応じて一度設定すれば、連続通板中において更に調整する必要はなく、一様に平坦なストリップが得られた。これはストリップの局部伸びによる形状不良矯正に必要な塑性伸び0.5～1.0%を、安定して与えることができたためである。すなわち、このように安定した塑性伸びが得られると、テンションレベラ入側での形状不良の状態が変化しても、伸張ローラ部

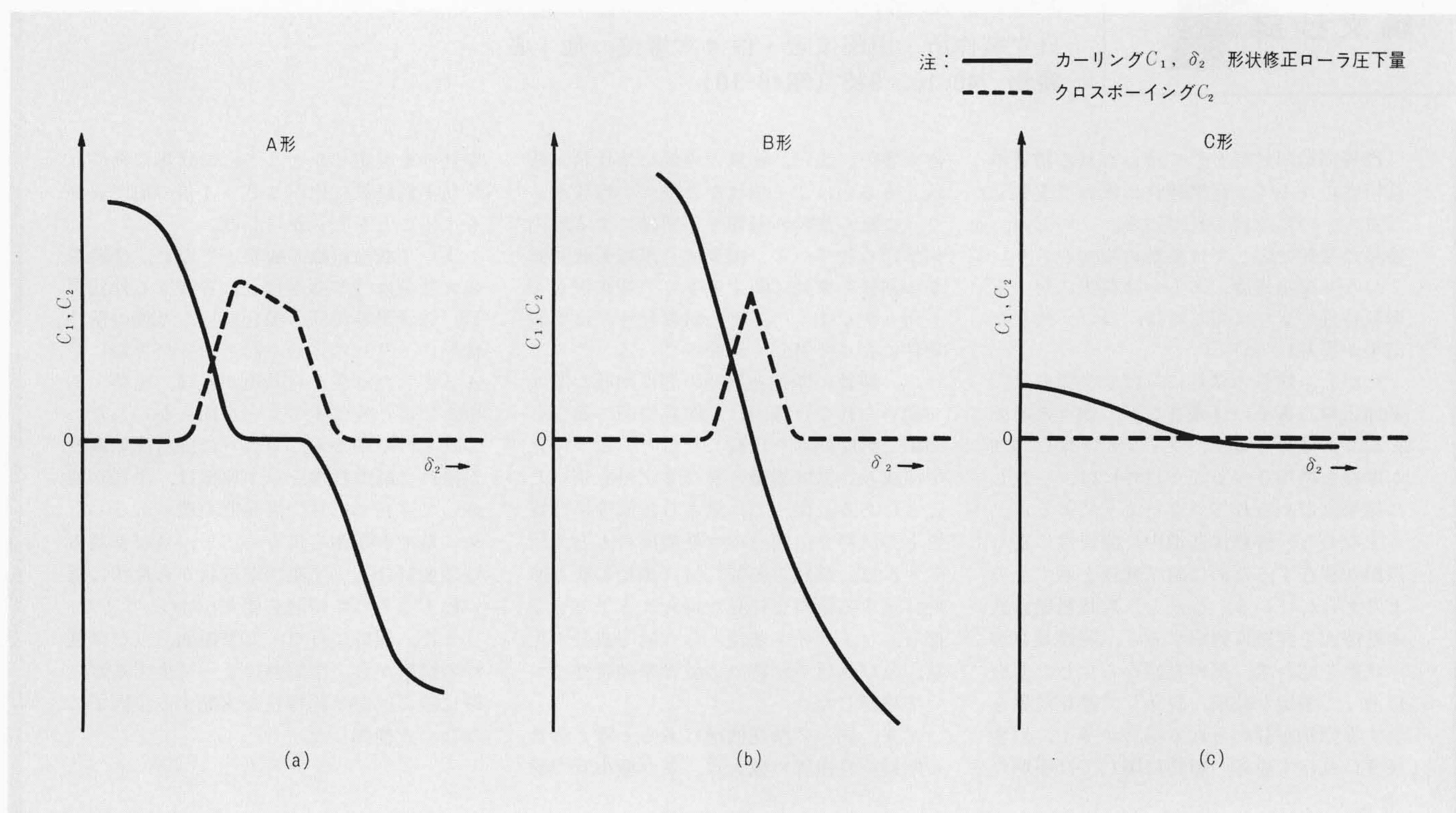


図10 各種ローラ配置による矯正特性実験結果 A形及びB形はカーリングとクロスボーイングを同時に修正できないが、C形では同時修正が可能で、また矯正特性も良好である。

表1 実機に適用したテンション レベラの主仕様 本仕様は、最も用途の多い板厚及び板幅範囲に適用した代表的な例である。

項 目	単 位	仕 様
用 途	—	連続亜鉛めっき設備
矯 正 材 板 厚	mm	0.25～1.2
同 板 幅	mm	600～1,240
矯 正 速 度	m/min	最大180
No.1 伸 張 ロ ー ラ	mmφ	30
No.2 " "	"	"
No.1 形状修正ローラ	"	"
No.2 " "	"	70
No.3 " "	"	150
ブライドル ローラ	"	900

で大きな加工曲率を受け、ストリップは一様変形状態となる。このように一様な変形状態で形状修正ローラ部に入ると図8 C形のローラ配置ではカーリング及びクロスボーイングの変形を同時に修正し、平たんなストリップを得ることができるためである。このように従来の多本数形テンション レベラでは、入側のストリップ形状不良状態が変化すると、ローラベントなどの調整を必要としたが、納入機では特別の場合を除いて調整は不要であり、著しい操作性の向上が可能となった。更に従来発表されているローラ本数の少ないテンション レベラの例では、ローラの配置⁽²⁾は図9 A形のものが採用されているが、基礎実験ではクロスボーイングは修正できてもカーリングは残った。これは一般的に両者を同時に修正することは難しいと報告されているものである。これに対し図9

C形を採用した納入機では、両者を同時に修正することができ、形状修正能力の点で優れていることが分かった。更に納入機では補強ローラの高精度な取付及び剛性向上が可能となり、矯正精度の良否を判定する急峻度を、従来のテンション レベラに対し、約二分の一以下に抑えることができた。

以上のように基礎的な解析及び実験を基にして製作した実機でも、所期の目標を十分に達成し好調に稼動することが確認できた。

6 結 言

- 小本数形のテンション レベラについて、
- (1) 塑性伸び計算法を確立した。
 - (2) ストリップのカーリング及びクロスボーイングの変形を同時に修正できるローラ配置を得ることができた。

参考文献

- (1) R.A.Bland, M.F.Alters "Tension Levelling of Ferrous and Nonferrous Strip", Iron and Steel Engineer 44, 6, 95 (1967)
- (2) 西川, 鈴木ほか「テンション レベラの実験と解析」塑性と加工 10, 885 (昭44-12)
- (3) R.R.Hilsen, N.H.Polakowski "Equipment and Process Variables In Tension Levelling of Carbon Strip", Iron and Steel Engineer 46, 10, 47 (1969)
- (4) 久保田, 鈴木「テンション レベラによる矯正法の研究」塑性と加工 12, 671 (昭46-9)
- (5) 平松, 山本「新しい薄板用きょう正機の試作研究(第1報)」住友重機械技報 18, 49 (昭45-4)
- (6) 曾田:「最近の帯板矯正法」塑性と加工 10, 853 (昭44-12)



鑄鉄の摩耗挙動に関する片状及び球状黒鉛の差異

日立製作所 山田俊宏・佐々木敏美, 他1名
鑄物 46-10, 913 (昭49-10)

機械構造用材料として用いられる鑄鉄の諸特性のうちで、耐摩耗性は極めて重要な性質の一つに挙げられている。このため、鑄鉄の摩耗に関しては多数の報告があり、このうち摩擦速度、あるいは荷重に対する摩耗特性の変化に関しては、ほぼ一致した結果が得られている。

しかし、鑄鉄の摩耗に及ぼす黒鉛形状、基地組織、あるいは硬さなど、個々の要因を取りあげてみると、フェライト量の増加が摩耗を増加させること以外には、一致した結果は認められていないようである。

すなわち、鑄鉄は基地中に潤滑性に富む黒鉛が存在するために耐摩耗性を示すものと考えられている。しかし、片状黒鉛鑄鉄の摩擦面を詳細に観察すると、乾燥及び潤滑状態を問わず、黒鉛先端から生じたき裂に沿って基地が破壊、脱落して摩耗現象を呈する様相が認められる場合が多く、耐摩耗性に及ぼす黒鉛の影響に関しては不明の

点が多い。また、鑄鉄の黒鉛には片状、球状、あるいはイモ虫状など種々の形状があり、これも黒鉛の影響を不明確にする理由に挙げられている。例えば、黒鉛形状の異なる鑄鉄の摩耗に関する多くの報告例からも明らかなように、その耐摩耗性には実験条件によって著しく異なっている。このように、鑄鉄の摩耗と黒鉛の間に明確な関係が認められない理由は、摩耗機構の異なる領域で耐摩耗性を比較したこと、並びに化学組成及び基地組織の異なる試料を用いたことにある。従って、筆者らは同等の性質をもつ試料で、同一の摩耗機構のもとで検討すれば、黒鉛の影響、特に黒鉛形状と摩耗に関する新たな知見が得られることを予想し、フェライト基地とした同等成分の片状、及び球状黒鉛鑄鉄の乾燥摩耗特性について検討した。

まず、同一の摩耗機構にあると考えられる摩耗特性曲線の極大点、及び極小点で耐

摩耗性を判定したところ、球状黒鉛鑄鉄は片状黒鉛鑄鉄に比べて2～4倍の耐摩耗性を示すことを明らかにした。

次いで断面組織の観察を行ない、摩耗粉の大部分は、摩擦面付近に存在する片状黒鉛、球状黒鉛鑄鉄の場合には、基地の塑性変形により片状に近い形となった黒鉛に沿って生じたき裂から基地が破壊、脱落することにより生成することを明らかにした。これらの結果から、筆者らは球状黒鉛鑄鉄が優れた耐摩耗性を示す原因は、黒鉛が独立して存在し、且つ黒鉛間距離が大きいために基地が脱落しにくいこと、及び基地の塑性変形によって黒鉛が球状から片状に近い形となるのに時間を要するためと考えた。

また、同時に行なった摩擦面、及び摩耗粉の観察から、摩擦熱によって生ずる厚い酸化膜だけが摩耗特性を支配する主因子ではないと推測した。