
レベラーによる薄物形状厳格材製造技術の確立

Establishment of Process for Producing Dead-Flat Thin Gauge Strips by Leveler

小林 真(Makoto Kobayashi) 山下 道雄(Michio Yamashita) 竹沢 幸平(Kohei Takezawa)

要旨：

薄物冷延鋼板の形状に対する要求は年々厳しくなっている。優れた平坦度を得るためにはテンションレベラーによる矯正が有効であるが、一方で、反りの変動が大きい、残留応力が発生する等の問題があるため、適用範囲が限定されていた。これらの問題解決を検討した結果、高張力のテンションレベラーと低張力のローラーレベラーを組み合わせることにより、反りおよび残留応力が小さく、かつ平坦度の優れた鋼板の製造が可能であることがわかった。この結果の基づき、千葉製鉄所 No. 3 C P L のテンションレベラー下流にローラーレベラーを設置する改造工事を行い、高能率、高歩留りを保持しつつ形状厳格材を製造する技術を確立した。

Synopsis：

Flatness of strip is the major requirement stressed by the users of the thin gauge strip. It is widely known that a tension leveler is effective to produce a flat strip. However, bow and residual stress appear after the tension leveling process of thin gauge strip. In this study, it has been confirmed that the utilization of the roller leveler after tension leveling was effective to alleviate these problems. In September 1992, the roller leveler was installed at the delivery side of the tension leveler of the No.3 coil preparation line in No.1 Cold Rolling Plant at Chiba Works. This established the technology to produce "dead-flat" strips, simultaneously maintaining high-productivity and high-prime yield.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Establishment of Process for Producing Dead-Flat Thin Gauge Strips by Leveler



小林 真

Makoto Kobayashi
千葉製鉄所 第1冷間
圧延部冷延技術室 主
査(掛長)



山下 道雄

Michio Yamashita
技術研究所 加工制御
研究センター 主任研
究員(課長)



竹沢 幸平

Kohei Takezawa
千葉製鉄所 設備技術
部工事管理課 主任部
員(掛長)

要旨

薄物冷延鋼板の形状に対する要求は年々厳しくなっている。優れた平坦度を得るためにはテンションレベラーによる矯正が有効であるが、一方で、反りの変動が大きい、残留応力が発生する等の問題があるため、適用範囲が限定されていた。これらの問題解決を検討した結果、高張力のテンションレベラーと低張力のローラーレベラーを組み合わせることにより、反りおよび残留応力が小さく、かつ平坦度の優れた鋼板の製造が可能であることがわかった。この結果に基づき、千葉製鉄所 No.3 CPL のテンションレベラー下流にローラーレベラーを設置する改造工事を行い、高能率、高歩留りを保持しつつ形状厳格材を製造する技術を確立した。

Synopsis:

Flatness of strip is the major requirement stressed by the users of the thin gauge strip. It is widely known that a tension leveler is effective to produce a flat strip. However, bow and residual stress appear after the tension leveling process of thin gauge strip. In this study, it has been confirmed that the utilization of the roller leveler after tension leveling was effective to alleviate these problems. In September 1992, the roller leveler was installed at the delivery side of the tension leveler of the No.3 coil preparation line in No.1 Cold Rolling Plant at Chiba Works. This established the technology to produce "dead-flat" strips, simultaneously maintaining high-productivity and high-prime yield.

1 緒 言

近年、2次加工における製品品質の高度化、生産ラインの自動化に対応するため、冷延製品に対する顧客の要求は年々厳しくなっており、その要求項目は成形性、表面処理、外観、形状等、多岐にわたっている。特に、缶用鋼板を中心とする薄物材(平均板厚0.24mm)においては2次加工先でのハンドリングの自動化に伴う搬送時等のトラブル防止のために平坦度、反りといった形状の要求が高まっている。形状に対する要求項目の一覧をTable 1に示す。

一般に、缶用鋼板等の製造工程は1次冷間圧延、焼鈍および調質圧延からなる。最終製品としての平坦度、反りは最終工程の調質圧延工程にて決定される。特に、調質度DR8~DR10の硬質材については圧下率の大きい2次圧延を行うため、平坦度の変動が大きい。デッドフラットな平坦度を達成するためには、テンションレベラー等の矯正機により矯正する方法が用いられる。当社においても1979年に千葉製鉄所第1冷間圧延工場のNo.3コイル準備ライン(No.3 CPL)においてテンションレベラーを導入している¹⁾。しかしながら、薄物のテンションレベラー処理は、後述する残留応力に

起因する反り等の問題が発生するため、適用範囲が限定され形状厳格材の製造が非常に困難となっていた。

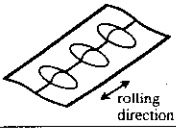
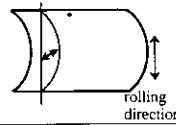
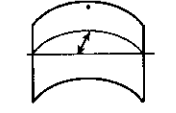
特に、電子機器部品のような打抜き材やエッチングして使用されるものは、出荷時に反りが発生していなくても2次加工先の製造工程で発生する反りが問題となる場合がある。エッチング加工の場合、板表裏面でのエッチング除去量の差により応力バランスが崩れるため、反りが発生する。また極薄硬質材ほど残留応力が大きいことが報告されている²⁾。

薄物材の形状矯正におけるこれらの問題点について検討した結果、高張力のテンションレベラーと低張力のローラーレベラーの組み合わせにより、反りと残留応力が小さく、かつ平坦度の優れた鋼板を製造できることが分かった。さらに、No.3 CPLのテンションレベラー下流にローラーレベラーを設置する改造工事を1992年9月に行い、高能率・高歩留りを保持しつつ薄物の形状厳格材を製造可能とする技術を確立した。

本稿では、この形状厳格材矯正技術の概要とNo.3 CPLにおける実機適用結果について報告する。

* 平成7年8月3日原稿受付

Table 1 Definition and standard range of flatness and bow

	Schematic figure	Normal specification sheet		Strict specification sheet	
		Height (mm)	Steepness (%)	Height (mm)	Steepness (%)
Center buckle		≤ 2.0	≤ 0.75	≤ 1.5	≤ 0.56
Wavy edge		≤ 2.0	≤ 0.75	≤ 1.5	≤ 0.56
L-bow		± 30mm	—	± 30mm	—
C-bow		± 5mm	—	± 5mm	—

2 極薄材形状矯正時の問題点

2.1 反りの発生

鋼板の形状不良は、幅方向の伸率差分布によって生じている。テンションレベラーによって平坦度矯正を行う場合、矯正前の鋼板における幅方向の伸率差分布以上の伸率を被矯正材全体に与える必要がある。所定伸率を付与するに必要なロール径は板厚が薄いほど小さく、これより薄物材用テンションレベラーでは、約 20 mm 以下という小径のワークロールが必要となる。

テンションレベラーの通板速度はワークロールのベアリングにより低速される場合が多く、小径ワークロールが必要となる薄物材では生産性の低下を引き起こす。板厚が薄いこと自体と合わせ、生産性の低下を抑止するため、通板速度の確保は必須の条件となる。

曲げ加工により、表裏の残留応力が異なると反りが発生するが、薄物材のテンションレベラー処理においては小径であること、処理速度が速く加減速の外乱が大きいため、反りが変動しやすいという問題がある。その一例として、通板速度と L 反りの関係を Fig. 1 に示す。通板速度により L 反りの値が変化し、低速部と高速部では 40 mm の反り差が生じることとなる。

残留応力および反りは、被矯正材と張力を固定すれば、曲げ加工時の曲率半径により決定される。美坂ら³⁾によれば曲率半径 ρ は次式で示される。

$$\rho = \frac{d}{2} + 2a \left(215.6 \frac{2\sigma_{x0}}{2\sigma_{x0} + \sigma_T} - \frac{1}{\Theta^{0.28}} - 243.2 \right) \quad (1)$$

ただし、

$$\Theta = \cos^{-1} \frac{P\sqrt{P^2 + I^2 - 2d(H+2a) - 4a^2} + (d+2a)(d-H)}{P^2 + (d-H)^2} \quad (2)$$

ここで、 σ_{x0} : 降伏応力 (MPa)

σ_T : 張力 (MPa)

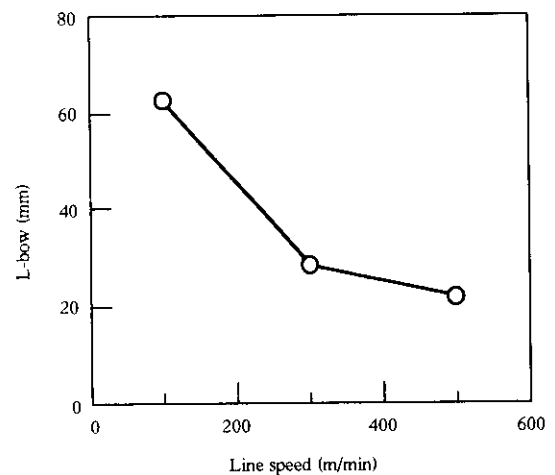


Fig. 1 Effect of line speed on L-bow at tension leveler

P : ロールピッチ (mm)

d : ワークロール径 (mm)

$2a$: 板厚 (mm)

H : インターメッシュ (mm)

これより張力、板厚、降伏応力等が変動すると曲率半径は変化し、その結果反りが変化してしまうことがわかる。通板速度の変化は、ひずみ速度による降伏応力の変化を引き起こすため反りが変化する。パッチラインでは、コイル先後端の加減速部に反り変動部が混入してしまうため、次工程でその反り変動部の切捨てが必要になり、歩留りの低下を誘発するという問題もある。

2.2 残留応力の増大

テンションレベラー処理前後の板厚方向残留応力分布を Fig. 2 に示す。対象材は板厚 0.17 mm の低炭素鋼 DR 圧延材を用い、テンションレベラーでの伸び率は 0.2% とした。テンションレベラー通板前でも調質圧延により板の表・裏面に圧縮の、板厚中央で引張りの残留応力が存在しているが、テンションレベラー通板によりさ

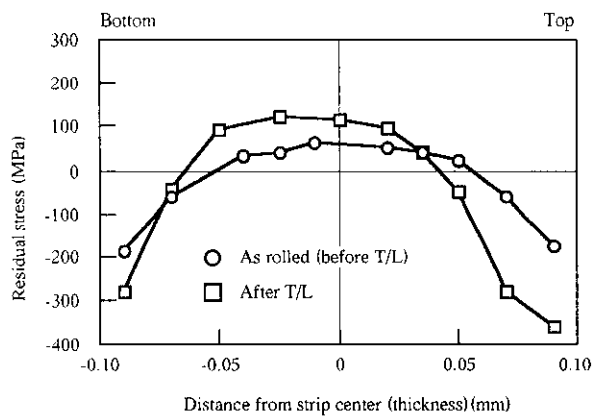


Fig. 2 Residual stress distribution in thickness direction at before and after leveling

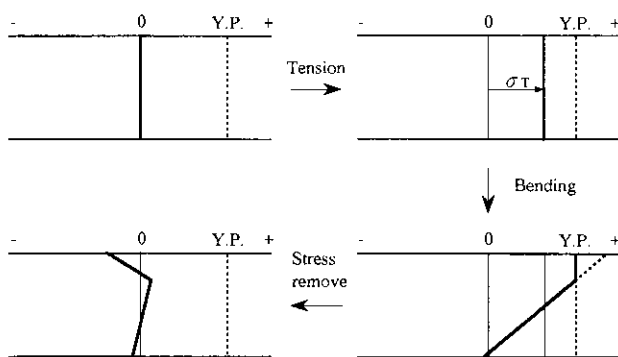


Fig. 3 Schematic illustration of increasing residual stress at tension leveler

らに残留応力が增大している。テンションレベラーにおける残留応力変化の概念図を Fig. 3 に示す。テンションレベラーにより残留応力が增大するのは、ワークロールとの非接触面が引張りひずみにより降伏するため張力除荷後は圧縮の残留応力になるためである。

3 反り, 残留応力低減設備の検討

3.1 反り矯正方法の検討

3.1.1 反り変動低減の考え方

テンションレベラーは少数のワークロールで構成され、インターメッシュを個々に設定できる機構となっている。これに対し、ローラーレベラーは、多数のワークロールを上下に千鳥配置し上部ロール群を下部ロール群に対して傾動可能な機構としたものが一般的である。

これら二つの方法における反り矯正の模式図を Fig. 4 に示す。テンションレベラーにおいては、少数のワークロールを用いて個々のロールで大きなひずみを与えるため、最終的に表裏のバランスが取られるようにインターメッシュの設定を行わなければならない。このため、速度変化等によるワークロールでの曲率の変化が生じると、そのまま最終製品の反り変動として現れてくる。

一方、ローラーレベラーにおいては、入側のインターメッシュを大きく、出側のインターメッシュを小さく設定することにより、曲率を入側から出側へ漸次減少させることが可能である。その結果、反りの大きさもゼロ近傍に収束することになるため、速度変化等に

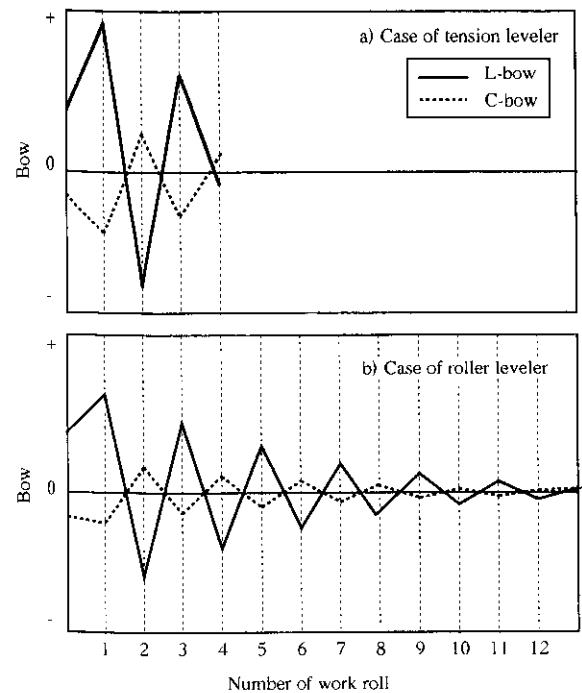


Fig. 4 Schematic diagram of changing bow in leveling

よりワークロールでの曲率が変化しても、最終製品としての反り変動は小さなものとなる。

3.1.2 反り変動要因に対する効果

レベラーにおいて曲げ加工時に発生する反りを定量的に解析するため、シミュレーションによる数値解析を行った。シミュレーションの方法はひずみ増分理論をモデル化したもの⁹⁾を用い、曲率半径の計算には美坂の式¹⁰⁾を使用した。なお、テンションレベラーは No.3 CPL と同一の条件とし、ローラーレベラーはロール径を 40 mm、ロール本数を 12 本(上 6 本、下 6 本)とした。

まず、速度変化時に生ずる降伏応力変化に対する反り変動のテンションレベラーとローラーレベラーの比較を Fig. 5 に示す。対象材は降伏応力 550 MPa の低炭素鋼 DR 圧延材である。降伏応力の変動代を $\pm 1\%$ としたとき、L 反りの変動量はテンションレベラーが 43 mm もあるのに対し、ローラーレベラーでは 10 mm 程度と 1/4 以下に低減できている。

次にローラーレベラーにおいて矯正前の L 反りを変動させたと

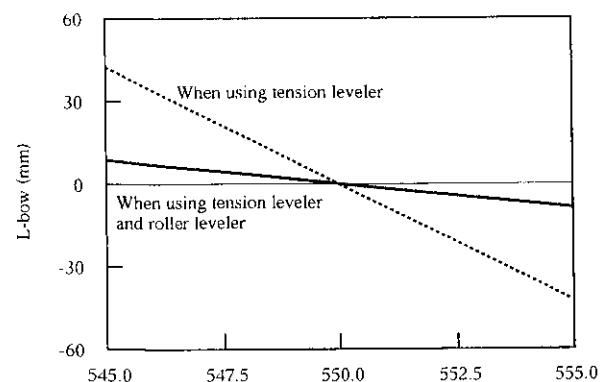


Fig. 5 Relationship between L-bow and yield point stress (calculated)

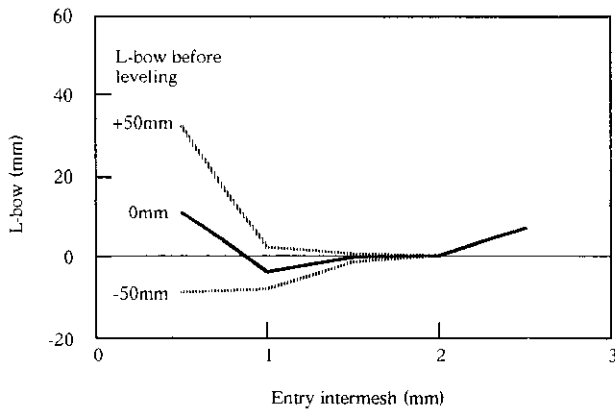


Fig. 6 Relationship between L-bow and entry intermesh of roller leveler (calculated)

きの入側インターメッシュとし反りの関係を Fig. 6 に示す。L 反りの変動量を ± 50 mm とした場合でも、入側のインターメッシュを大きくすると出側での反りは変動せず同一の値となっている。これはローラーレベラーが入側で矯正前よりも大きな一定のひずみを入れた後、漸次曲率を減少させている効果であり、入側の反りが変動しても、安定して反りを抑制できることを示している。

3.2 残留応力低減方法の検討

3.2.1 残留応力低減の考え方

テンションレベラーを用いた残留応力の低減方法としては、引張り変形による方法（引張り法）と繰り返しくりげによる方法（くりげ

戻し法）がある。

これら二つの方法の矯正原理の模式図を Fig. 7 に示す。引張り法では板厚全体に均一に引張応力がかかり板厚中央部で引張り側で降伏するため、主に板厚中央の引張りの残留応力が矯正されることにより全体として残留応力を低減できる。

一方、くりげ戻し法では、板表面より歪みが入るため、主に板表面の圧縮の残留応力を低減できる。

3.2.2 ラボ実験結果

降伏応力 550 MPa の低炭素鋼 DR 屈延材を用いて上記の二つの方法の効果を確かめた。

圧延方向に切り出した試験片を引張試験機で降伏応力 σ_y の 80%、100% (伸率 1%) で応力を負荷し、その後除荷したときの圧延方向の残留応力分布を Fig. 8 に示す。降伏応力の 80% の応力をかけても板中央で残留応力が $+200$ MPa から $+150$ MPa に減少するだけである。一方、降伏応力の 100% で応力を負荷すると、ほとんど残留応力は緩和できる。また、表裏面の残留応力もほぼ同じ値で対称な分布となっている。

圧延方向に切り出した試験片を曲率半径 30 mm、50 mm でくりげくりげ戻しを行った時の圧延方向の残留応力分布を Fig. 9 に示す。曲率半径 50 mm でも板の最表裏面の残留応力については -300 MPa から -100 MPa に減少させることができ、その結果板中央の残留応力もほぼ半減している。曲率半径 30 mm ではさらに内側まで矯正できるため、ほとんど残留応力は緩和できる。

二つの方法を比較すると、原理的には引張り法の方が残留応力を小さくできるが、上述のようにくりげ戻し法でもほぼ同等の低減効果が期待できる。

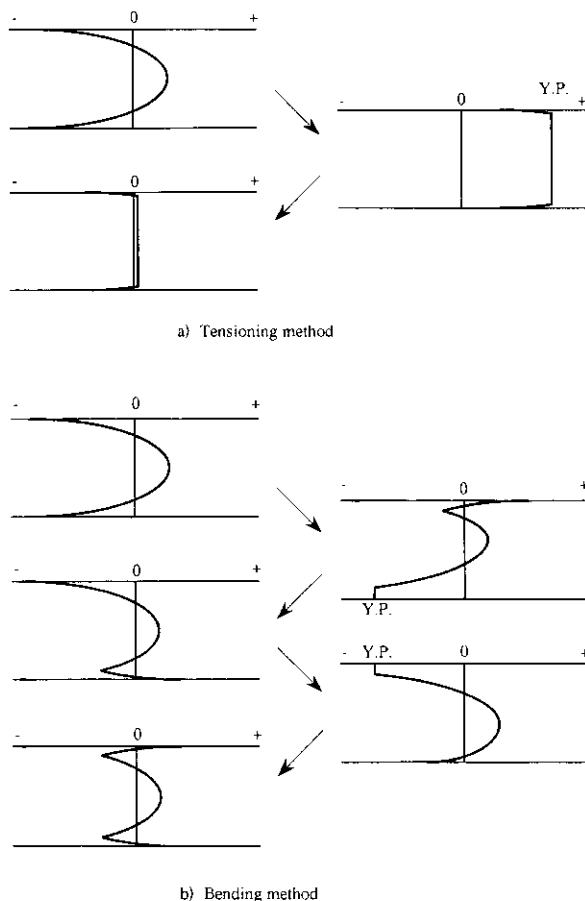


Fig. 7 Principle of decreasing residual stress by tension method and bending method

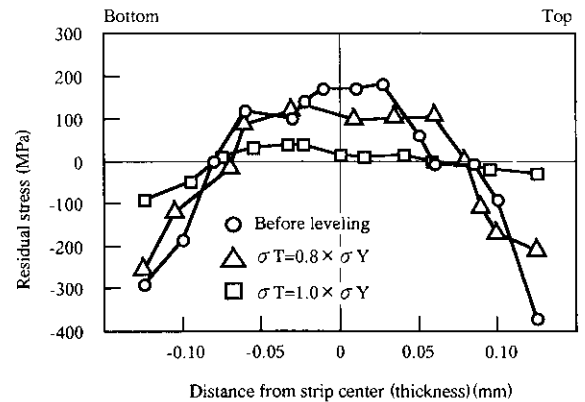


Fig. 8 Residual stress distribution by tensioning method

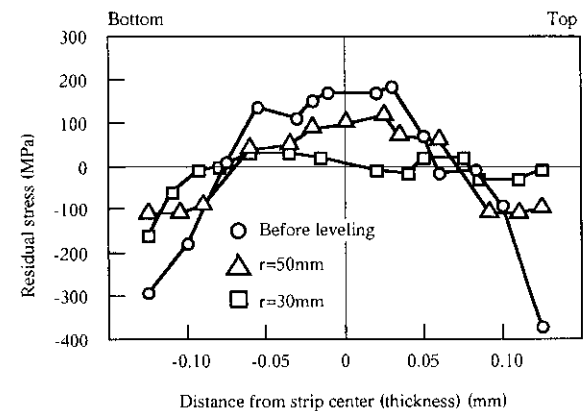


Fig. 9 Residual stress distribution by bending method

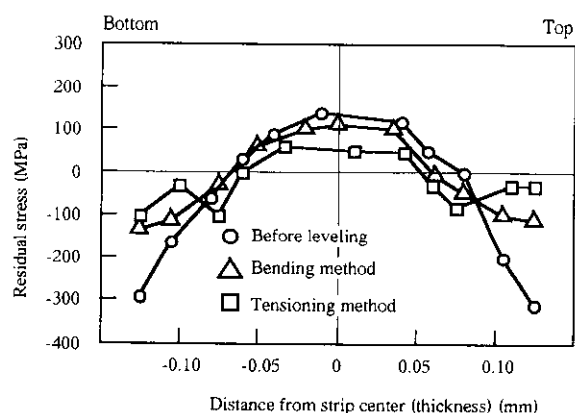


Fig. 10 Comparison of residual stress between bending method and tensioning method at No.3 CPL

3.2.3 実機における実験結果

ラボ実験結果を実証するため、No.3 CPLのテンションレベラーを用い、引張り法と曲げ曲げ戻し法により残留応力矯正実験を行った。引張り法では入出側のブライドルロールのみによる引張り、伸び率を1%とした。曲げ曲げ戻し法では5スタンド全てのロールを用いており、張力は約80 MPaまでしか低減できなかった。矯正前後の残留応力分布をFig. 10に示す。矯正効果は曲げ曲げ戻し法よりも引張り法の方が若干大きく、板中央部で矯正前に150 MPaであったものが50 MPaまで減少している。しかしながら曲げ曲げ戻し法では低張力ほど残留応力矯正効果が高く、張力さえ低減できれば同等の残留応力にすることができる。

3.3 薄物材形状矯正方法

以上の検討より、薄物形状厳格材の矯正におけるテンションレベラーとローラーレベラーの比較をTable 2に示す。

テンションレベラー単体では、高張力にて伸び率を付与するため平坦度の矯正効果は高いが、同時に発生するL反り、残留応力に問題がある。一方、ローラーレベラー単体ではL反りを安定して制御すること、残留応力を低減することが可能であるが、低張力にて操作することが必要であり、平坦度の矯正効果は非常に小さい。両者の利点を活かしたテンションレベラーとローラーレベラーの組み合わせであれば、テンションレベラーで平坦度を矯正し、同時に発生したL反り、残留応力をその下流のローラーレベラーで矯正することで薄物形状厳格材の矯正は可能となる。

Table 2 Effect of the leveling method on the quality of strip

	Tension	Flatness	Bow	Residual stress
Tension leveler	High	○	×	×
Roller leveler	Low	×	○	○
Combination of tension leveler and roller leveler	—	○	○	○

○: Effective ×: Not effective

4 実機における適用結果

上記の結果に基づいて、千葉製鉄所第1冷間圧延工場のNo.3コイル準備ライン (No.3 CPL) においてテンションレベラー下流にローラーレベラーを設置する改造工事を1992年9月に行った。

4.1 設備概要

4.1.1 ライン仕様

No.3 CPLの主仕様をTable 3に示す。本ラインは入側設備、テンションレベラー、ローラーレベラー、トリマーおよびオイラーを含む出側設備から構成されている。ライン全体のレイアウトをFig. 11に示す。

4.1.2 テンションレベラー

テンションレベラーのロールレイアウトをFig. 12に、主仕様をTable 4に示す。張力制御は、伸率制御および実張力制御の選択が

Table 3 Main specifications of No.3 coil preparation line

Strip	Thickness (mm)		0.1~1.0
	Width (mm)		457~1 067
Coil	Max. weight (t)		21
	Inner diameter	Entry (mm)	406, 419, 508
		Exit (mm)	406, 419, 508
Maximum speed (m/min)			1 342
Material			Mild steel (for tin plate, TFS, GI)
Annual production (t/month)			18 000

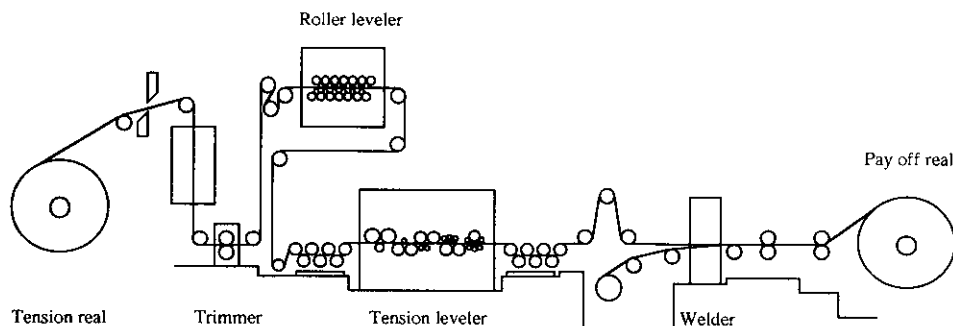


Fig. 11 Layout of No.3 coil preparation line

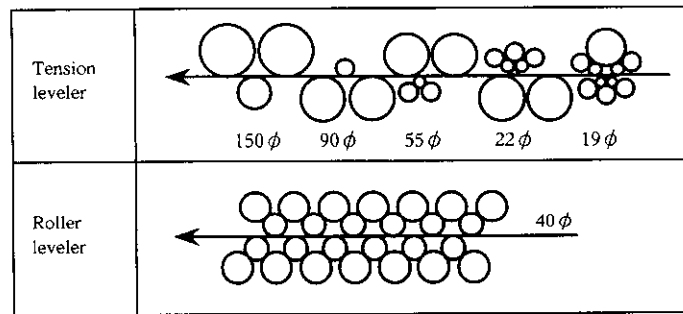


Fig. 12 Roll arrangement of tension leveler and roller leveler

Table 4 Main specifications of the tension leveler

Strip	Thickness (mm)	0.1~1.0
	Width (mm)	457~1 067
Work roll diameter	No.1 unit (mm)	19
	No.2 unit (mm)	22
	No.3 unit (mm)	55
	No.4 unit (mm)	90
	No.5 unit (mm)	150
Maximum speed	(m/min)	1 220
Maximum tension	(t)	13.0

Table 5 Main specifications of the roller leveler

Strip	Thickness (mm)	0.15~0.3
	Width (mm)	457~1 067
Work roll	Diameter (mm)	40
	Number	12 (Top : 6, Bottom : 6)
Maximum speed	(m/min)	500

できるようにした。

4.1.3 ローラーレベラー

ローラーレベラーのロールレイアウトを Fig. 12 に、主仕様を Table 5 に示す。テンションレベラー部およびテンションリール部の張力と独立に張力制御を行うため、前後にブライドルロールを設置し、実張力制御を採用した。

4.2 急峻度矯正効果

実機での効果確認は、矯正の困難な薄物硬質材として、板厚 0.17 mm の低炭素鋼（調質度 DR 8、降伏応力 550 MPa）を用いた。矯正前後の平坦度比較を Fig. 13 に示す。ここで、テンションレベラーの伸率は 0.2% とした。これより耳伸び、腹伸び共に大幅に軽減させることができることが分かる。

4.3 残留応力矯正効果

ローラーレベラーにおける L 反りの収束性を確認するために、ローラーレベラー前後での L 反りを調査した結果を Fig. 14 に示す。ローラーレベラー入側での L 反りは、テンションレベラー条

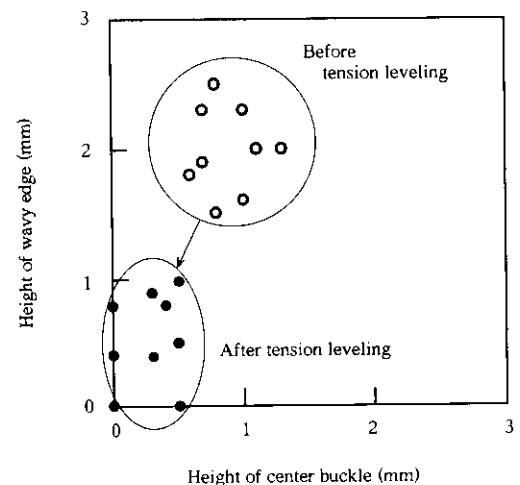


Fig. 13 Straightening effect of the tension leveler

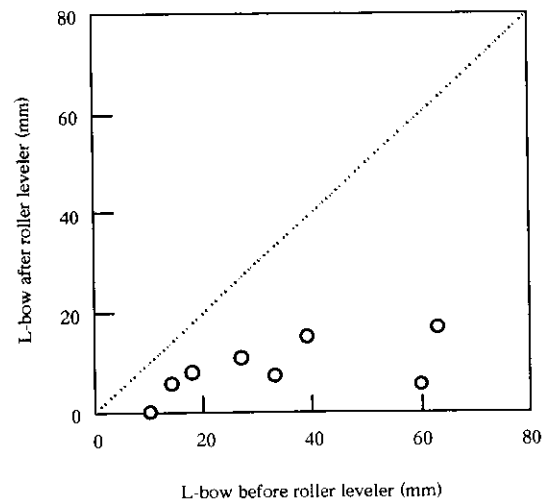


Fig. 14 Effect of roller leveler on L-bow

件を種々設定することにより変化させた。また、ローラーレベラーのインターメッシュ、張力条件は一定としてある。ローラーレベラー入側での L 反り範囲 0~70 mm に対して、ローラーレベラー後の L 反りは 0~20 mm と大幅に減少しており、テンションレベラーでの反り変動を十分に吸収していることがわかる。この結果、加減速時の反り変動も減少することができた。

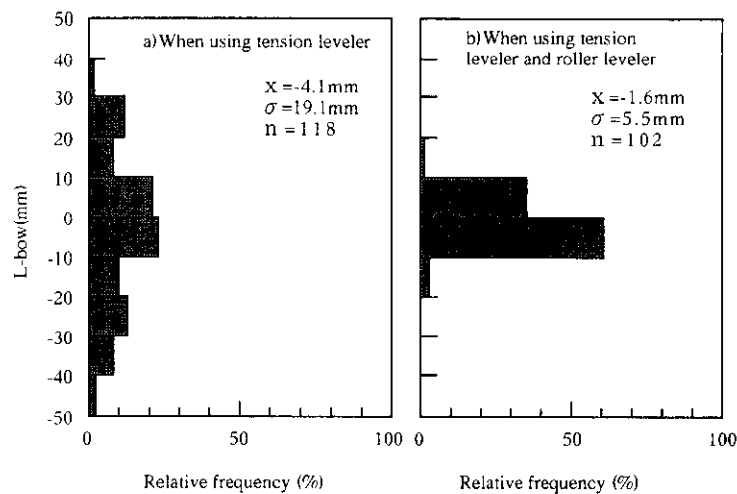


Fig. 15 Comparison of L-bow distribution produced by tension leveler with that produced by the combination of tension leveler and roller leveler

L 反り分布のテンションレベラー単体にて矯正した場合の結果と比較して Fig. 15 に示す。ローラーレベラーを使用することによ

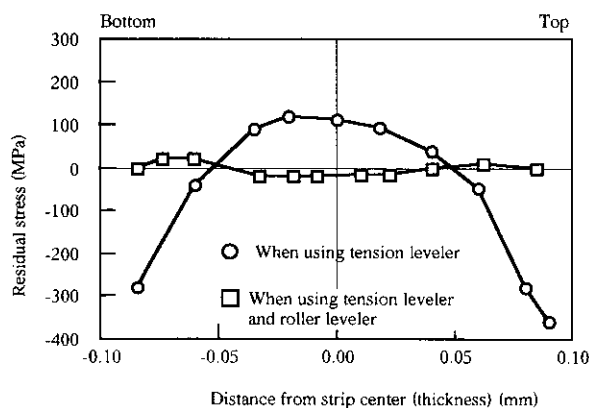


Fig. 16 Comparison of residual stress distribution produced by tension leveler with that produced by the combination of tension leveler and roller leveler at No.3 CPL

り、製品の L 反りのばらつきを大幅に低減することができた。

ローラーレベラー前後の残留応力分布を Fig. 16 に示す。ここで、ローラーレベラーでの張力は、50 MPa 以下まで低減させた。圧延方向の残留応力分布は ± 30 MPa の範囲に制御されている。

5 結 言

テンションレベラーによる薄物形状厳格材の製造方法について検討し、以下の結論を得た。

- (1) テンションレベラーにて高張力を付与することにより急峻度の矯正は可能であるが、薄物材では同時に発生する反り、残留応力を制御することは困難である。
- (2) 反り、残留応力の低減には低張力にて繰返し曲げを行うローラーレベラーが効果的である。
- (3) 千葉製鉄所第 1 冷間圧延工場 No.3 コイル準備ラインのテンションレベラー下流に、反り矯正ユニットとして低張力操業可能なローラーレベラーを設置した。実機での加減速時を含めた反り矯正能力は高く、薄物形状厳格材の製造体制を確立することができた。

参 考 文 献

- 1) 柳島章也, 菅沼七三雄, 藤原俊二, 角南秀夫, 井田幸男, 勝島剛二, 増野登彦: 川崎製鉄技報, **11**(1979)3, 134
- 2) 的場 哲, 阿高松男, 酒本義嗣, 瀧 文男: 鉄と鋼, **72**(1986)4, 381
- 3) 美坂佳助, 益居 健: 塑性と加工, **191**(1976)17, 988
- 4) A. Nadai and M. J. Manjoine: *J. Appl. Mech.*, **63**(1941)6, A-77
- 5) 比良隆明, 阿部英夫, 東 将: 川崎製鉄技報, **20**(1988)1, 7-13
- 6) 米谷 茂: 「残留応力の発生と対策」, (1981), 50, [養賢堂]
- 7) 山下道雄, 磯辺邦夫, 小林 良, 斎藤輝弘: 第 44 回塑性加工講演集, (1993), 461