

解説

研究会成果報告-12

鋼材矯正後残留応力の予測および評価に関する研究

Prediction and Evaluation of Residual Stress of Steel Sheet After Leveling Process

静岡大学
大学院総合科学技術研究科
教授

早川邦夫
Kunio Hayakawa

岡山大学
大学院自然科学研究科
准教授

上森 武
Takeshi Uemori

静岡大学
大学院総合科学技術研究科
教授

坂井田喜久
Yoshihisa Sakaida

1 はじめに

圧延・熱処理による鋼材内の残留応力は、鋼材の平坦度不良を引き起し、平坦化のために必要な矯正工程にて再度付与される。この残留応力の製造部品形状精度への影響は、成形時の形状や部位によっては無視できない問題と考えられる。

平成17～20年度に実施された「矯正工程の高精度化・高能化」研究会では、主に数値解析による矯正メカニズムの解明に主眼をおいた取組みが実施され、大きな成果を残した¹⁾。しかし、その研究の多くが矯正後鋼材の平坦度に着目したものであり、残留応力に関しては定量的な把握・評価は十分には行われていない。また、操業現場では主に平坦度管理が行われているのみであり、顕在化しない残留応力の定量的な把握まではなされていない。

そこで、著者らは、鉄鋼メーカーの技術者とともに残留応力予測技術の構築に際して文献レビューにより既存の解析技術や実験技術に関する議論を重ねた。その結果、既存技術では矯正後の残留応力の定量的な予測精度が十分に検証できておらず、また、測定技術にも課題があることが分かった。一連の検討に基づき、著者らは平成24～26年度、日本鉄鋼協会の研究会Ⅱ「鋼材矯正後残留応力の予測・評価」(主査：静岡大 早川邦夫、副査：神戸製鋼所 前田恭志)による研究を開始した。

本研究では、下記の3つについて研究を進めた。

- 1) 残留応力を高精度に予測・再現できる弾塑性構成式の開発と、汎用有限要素ソフトウェアへの組み込み手法の開発
- 2) 矯正工程前後の残留応力の高精度非破壊測定技術の開発
- 3) 鋼板プレス成形解析における素材初期残留応力の影響の

評価

本稿では、本研究会で得られた主な成果を紹介したい。

2 鉄鋼材料の繰返し応力反転挙動のモデル化とその応用

一般的に、圧延板材の矯正工程ではローラーレベラーが用いられる。その工程における残留応力を適切に評価するためには、材料の反転負荷時のバウシinger効果を適切に表現できる移動硬化型あるいは複合硬化型構成式が必要である。近年、板材プレス加工では、Yoshida & Uemoriにより提案された移動硬化モデル(YUモデル)が、スプリングバックの予測に効果的であるとの報告がなされている。YUモデルについては、参考文献を参照されたい^{2,3)}。

現在、YUモデルの市販の有限要素解析ソフトウェアへの実装は、2、3の動的有限要素解析を用いたプレス成形専用ソフトウェアにとどまっている。その他の多くの汎用有限要素解析ソフトウェアには、通常ユーザーサブルーチン機能を用いて組み込むことが必要である。本研究では、YUモデルを、多くの研究機関や企業で用いられている静的陰解法有限要素ソフトウェアに、高速・高精度に計算可能とするアルゴリズムとして、安定かつ高精度に構成式の組み込みを実現可能とする複素数階偏微分法^{4,5)}の開発を行った。

静的陰解法有限要素ソフトウェアに応力一ひずみ関係を、ユーザーサブルーチンを介して組み込む場合、前ステップのひずみ増分を用いて次ステップの応力増分を求める。その際、接線係数マトリックス C^{ep} を求める必要がある。通常、 C^{ep} は4階のテンソルであり、その導出に際してはテンソル演

算による複雑な数式展開を必要とする。さらに、その数式に基づいた高精度な数値解析プログラムが求められ、ユーザーサブルーチンの作成を煩雑にしている。

それを克服する方法として、主に弾性・超弾性解析に適用されている複素数階偏微分法のYUモデルへの適用を試みた⁶⁾。複素数階微分は、任意の関数 $f(x)$ に複素数を導入し、それをTaylor展開することで、任意の関数の一階微分を数値丸め誤差なしに高精度に計算できる手法であり、複雑なテンソル演算を行わず、2次収束を満足した弾塑性接線係数マトリックスを数値的に計算する手法である。

すなわち、任意の複素数 $x+ih$ を引数とする関数 $f(x+ih)$ に対して、Taylor展開を施すと、以下のように表される。

$$f(x+ih) = f(x) + ihf'(x) - \frac{h^2}{2!} f''(x) + \frac{h^3i}{3!} f'''(x) + \dots \dots \dots (1)$$

ここで h は 10^{-8} オーダーの非常に小さい実数とする。式(1)の虚数部を抽出し、その高次微分項を無視すると、関数 $f(x)$ の1階微分は、式(2)のように得られる。

$$f'(x) = \frac{\text{Im}\{f(x+ih)\}}{h} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\text{Im}\{f(x+ih)\}$ は $f(x+ih)$ の虚数部を示す。

この手法を、YUモデルにおける C^{ep} の算出に用い⁷⁾、適用例として、本手法を用いてMSC.Marc2014を用い、ユーザーサブルーチンHypela2によりYUモデルを組み込み、ドロビード解析を行い、本手法の妥当性を確認した。

3 矯正工程前後の残留応力の高精度非破壊測定技術の開発

3.1 矯正工程の残留応力測定⁸⁾

X線を用いた非破壊応力測定により矯正工程における残留応力の変化の測定を行った。矯正工程として、図1に示すような繰返し4点曲げを行った。供試材は、厚さ1mmの440MPa級高張力鋼板である。圧延方向を長手方向として幅40mm、長さ140mmに仕上げた。なお、試験片の長手方向には初期曲率があり、試験片の初期凸面が最初の4点曲げで圧縮側(C面)になるように試験を行った。4点曲げの外スパンおよび内スパン寸法はそれぞれ100mmおよび50mmである。押し込み量について、まず6mm変位させた後除荷し、その

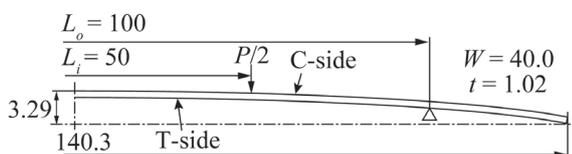


図1 試験片の初期形状と4点曲げによる矯正加工 (単位: mm)

後素材を反転させ、3mm変位させた。鋼板試験片の両面中央には、ゲージ長さ2mmの抵抗線ひずみゲージを貼り付け、引張側および圧縮側のひずみを計測した。

図2は、C面およびT面の応力-ひずみ関係を示す。弾性域の傾きから求めたヤング率は、C面の圧縮側で206GPa、T面の引張側で205GPaであった。一方、降伏応力は、C面約291MPa、T面で約310MPaであった。次に、素材を反転させた2回目の曲げ矯正加工では、C面、T面のどちらも、曲げの反転によるバウシinger効果で、降伏応力は1回目のそれよりも著しく低く、C面で約55MPa、T面で約50MPaとなった。一方、図中の実線はChabocheモデルによる解析結果を示す¹³⁾。実験および解析結果の良い一致が見られる。

図3は、一連の4点曲げ試験における表面の残留応力変化の測定値とChabocheモデルを用いた解析による板厚方向の曲げ応力分布の変化を示す¹³⁾。試験前の試験片には、C面およびT面でそれぞれ-82.5MPa、および-101MPaの残留応力が測定された。1回目の曲げ試験の結果、C面およびT面でそ

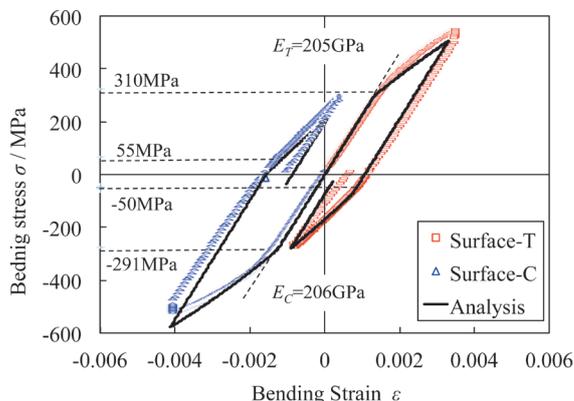


図2 4点曲げ矯正加工による圧延鋼板表面の曲げ応力-曲げひずみ関係

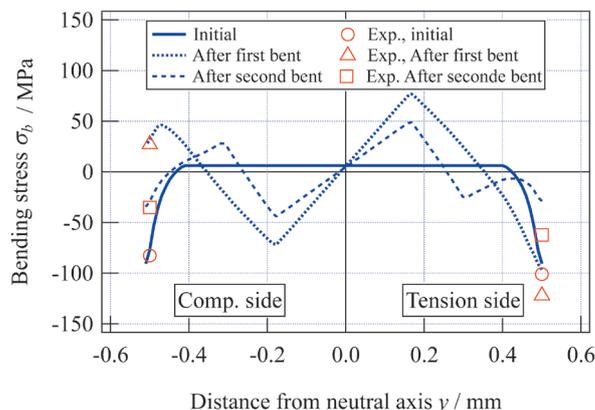


図3 繰返し4点曲げによる表面残留応力および曲げ応力分布

それぞれ27.2MPaおよび-121.7MPaとなった。試験片両面に圧縮の残留応力が存在すると、C面では、初期圧縮残留応力から圧縮の降伏応力に達した時点で塑性変形が生じるので、供試材の圧縮の降伏点に相当する曲げ応力に達する前に塑性変形が開始する。一方、T面では、初期圧縮残留応力から引張の降伏応力に達するまで塑性変形が起こらないため、供試材の引張の降伏点に相当する曲げ応力に達しても塑性変形が始まらず、T面側での塑性変形量は相対的に小さくなる。

2回目の曲げ試験の結果、C面およびT面でそれぞれ-35MPaおよび-62.2MPaと変化した。2回目の矯正加工時に引張応力が働くC面では、引張の降伏点に達する前に塑性変形するので、圧縮側に变化する残留応力の変化量も大きくなる。一方、2回目の矯正加工時に圧縮応力が働くT面では、圧縮の降伏点に達する前にやはり塑性変形するので、引張側に变化する残留応力の変化量も大きくなるが、1回目の矯正加工除荷後の残留応力が-121.7MPaと比較的高いので、圧縮応力が残留する結果となった。

素材のパウシンガー効果を表現できる移動硬化型あるいは複合硬化型構成式を用いた解析結果は、表面の残留応力値およびその変化を定量的に表現できる。また、初期残留応力の板厚方向分布を適切に仮定できれば、曲げ加工時の内部の残留応力変化も適切に予測することが可能であると考えられる。

3.2 $\cos \alpha$ 法による鋼板表面の高精度残留応力測定法の検討

矯正工程後の残留応力のその場測定可能にするには、装置が可搬性で、測定時間が短いことが望まれる。通常、残留応力測定には、 $\sin^2 \psi$ 法と呼ばれるX線応力測定が用いられる。 $\sin^2 \psi$ 法は、 2θ 軸と ψ 軸の2つのゴニオメータ制御が不可欠であり、生産現場の生産ライン上でのその場計測への適用は現実的でない。

そこで、本研究では、単一 ψ_0 でX線を入射し、測定対象の圧延鋼板から回折されたデバイ環情報を元に残留応力を非破壊評価する $\cos \alpha$ 法^{9,11)}に注目し、圧延鋼板の初期残留応力や矯正加工後の残留応力変化が高精度に測定できる手法となりうるかどうかを検討した¹²⁾。

$\cos \alpha$ 法によるX線応力測定は、ポータブル型X線応力測定装置(パルステック工業社製、 μ -X360n)を用いて行った。図4は $\cos \alpha$ 法による残留応力測定原理を示す。測定対象から回折されたデバイ環を図中のイメージングプレート(Imaging Plate; IP)で計測し、計測したデバイ環のデジタル情報を元に、 $-\eta$ 側の回折強度分布を基準に、時計方向に回転する α 角を定義し、 $0 \leq \alpha < 360^\circ$ の回折角 2θ (α)を求めることにより、鋼板表面の残留応力を算出することができる。

本研究では、特性X線としてCr-K α 線を用い、試験片長手方向($\phi = 0$)に対し、 $\psi_0 = 35^\circ$ の一定角で入射したX線から

回折されたデバイ環の回折角情報を元に、鋼板表面の初期残留応力を高精度に測定できる測定手法と測定条件を検討した。管電流および電圧は、それぞれ1mAおよび30kVである。また、回折面はFe-211面、回折角は 156.4° である。また、照射範囲は直径約1.9mm、照射時間は約30sである。

供試材は、厚さ1.20mmの590MPa級高張力鋼板である。試験片は、圧延幅方向を長手方向として幅8mm、長さ100mmである。

ここでは、 $\cos \alpha$ 法により矯正加工時の応力を測定するための基礎的研究として、塑性変形を伴わない弾性限度以下の弾性域で曲げ矯正を行い、鋼板表面に負荷した曲げ応力が $\cos \alpha$ 法で非破壊測定できるかを検討した。その結果、X線のコンプライアンス $(1 + \sigma_x) / E_x$ は $\sin^2 \psi$ 法で得られた値とほぼ一致した。

図5は、鋼板に負荷した曲げ応力による引張面の応力変化を $\sin^2 \psi$ 法と $\cos \alpha$ 法で測定し、両者の関係をプロットした結果を示す。図中の直線は、1次関数で最小二乗近似した結果を示す。 $\sin^2 \psi$ 法と $\cos \alpha$ 法による測定値は完全には一致しないものの、ほぼ原点を通る傾き1.00の直線関係を示しており、高い相関が示された。両者が完全に一致しない原因として、 $\sin^2 \psi$ 法が、ある方向の回折データのみを用いるのに対して、 $\cos \alpha$ 法はデバイ環のほぼ全周データを用いることによる差が考えられる。しかし $\cos \alpha$ 法でX線のコンプライアンスとその応力定数を実験的に求め、その値を用いて応力測定を行うことで、 $\sin^2 \psi$ 法と比較しても十分な精度で鋼板に負荷した矯正応力を測定出来ることがわかった。

4 鋼板プレス成形解析における素材の初期残留応力の影響の評価

本研究会では、鋼板が矯正工程での繰返し負荷による残留応力がプレス成形にどのような影響を及ぼすかを明らかにす

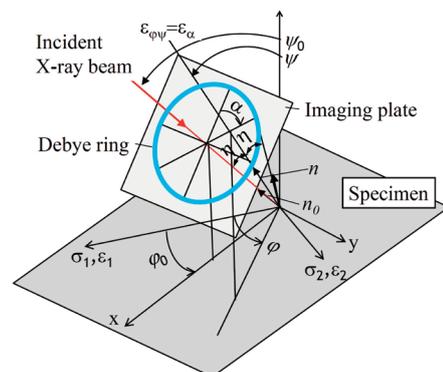


図4 $\cos \alpha$ 法によるX線応力測定の際の座標系の定義と表面残留応力との関係

ることを目標の一つとした。そのため、矯正工程を経た素材のハット曲げを実施し、その各工程での残留応力測定と、有限要素解析結果との比較を行った。

材料は、1180MPa級高張力鋼板を用いた。塑性曲線は次式で表される。

$$\sigma = 1620(\varepsilon + 0.0001)^{0.0956} \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (3)$$

有限要素解析には、動的陽解法ソフトウェアPAM-STAMP 2G (日本イーエスアイ) を用いた。材料モデルとしては、式(1)を変形抵抗曲線とする等方硬化則 (IHモデル)、ならびに繰返し塑性変形の実験結果を基にしたYUモデルを用いた。

材料寸法は、長さ150mm、幅20mm、厚さ1.2mmである。この材料に対して、初期残留応力を測定した。用いた装置は、 $\cos \alpha$ 法を基礎とする残留応力測定装置 μ -X360n (パルステック社製) である。測定結果は、両面ともに圧縮でそれぞれ約-125MPaおよび-150MPaであった。これらの値を初期残留応力として用いた。板厚方向内部の残留応力については、測定した残留応力値が表層0.1mmまでに線形に0MPaまで減少し、さらに板材の中心部ではほぼ等しい大きさの引張り応力が作用し、全体として平衡状態となるような分布を仮定した。

ローラーレベラーを通した素材を模擬するため、繰返し4点曲げを行った。外側スパンは124mm、内側スパンは84mmとした。ハット曲げ時のパンチおよびダイの肩部に接触する部分も矯正されるように、図1に比べ大きなスパンを採用した。4点曲げジグの支点および作用点の先端は半径5mmである。繰返し数は2回とし、始めに引張りを受ける面をT面、圧縮を受ける面をC面と定義する。T面側は、残留応力の絶対値が若干小さい-125MPaとした。

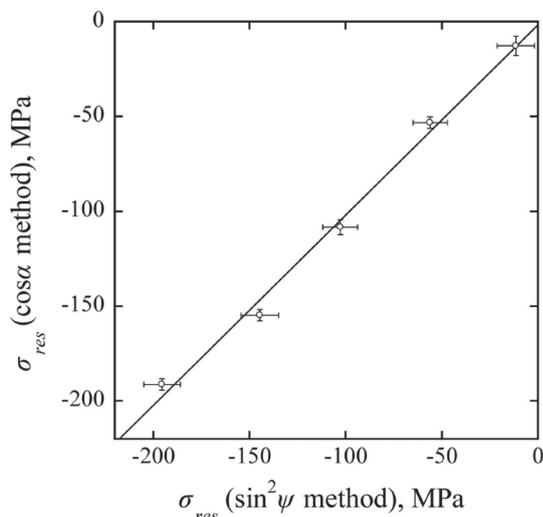


図5 $\cos \alpha$ 法と $\sin^2 \psi$ 法による測定値の比較

表1は、ローラー矯正模擬4点曲げの実験条件を示す。1回目に大きく曲げを入れた後、平坦になるように設定した条件Aおよび条件Aに比べ1回目の曲げを小さくした条件Bである。

続いて、繰返し4点曲げを施した素材に対して、ハット曲げを行った。パンチ幅は47.4mm、パンチ肩部半径は8mm、ダイ幅は50mm、ダイ肩部半径は8mmである。ストロークは30mmとした。しわ抑えについては、初期しわ抑え力4kN、ばね乗数 $k = 1.0\text{kN/mm}$ のばねを用いた。

繰返し4点曲げ条件 (2種類) と素材の設置方法 (T面あるいはC面を上にするのいずれか) の組合せによる、表2に示すような4種類の実験条件について加工を行った。実験後のハット曲げ加工後の試験片について、条件①~④によるスプリングバックによる形状差はほとんどなかった。また、実験後の表面には若干の擦過痕が見られたが、表面性状はおおむね良好であった。

図6は、2種類の矯正条件AおよびBによる繰返し4点曲げにおける板材中央表面の残留応力の変化、ならびに解析による各工程後の板材中央表面の残留応力の変化を示す。解析にはYUモデルおよび等方硬化モデル (以下IH) を用いた。実験結果を見ると、1回目後の残留応力の絶対値は初期残留応力のそれより大きくなっている。特にT側の1回目後の残留応力の絶対値は、C側のそれより大きい。素材のバウシinger効果の影響により、初期の圧縮の残留応力により早期に降伏したC側は、加工硬化が進み、除荷時においてはT側よりも早期に再降伏し、その結果、T側より小さい残留応力絶対値となる。

このことを解析結果から見ると、曲げの大きい条件Aにおいて、等方硬化モデルでは、バウシinger効果が考慮できないため、1回目後の残留応力の絶対値は、実験値とは逆にC側の方がかなり大きい。これは、初期残留応力は表面で圧縮であるため、C側の曲げ応力の絶対値の方がT側より大きくなり、その分加工硬化領域 (降伏面の拡大) がより進んだため

表1 矯正模擬4点曲げの実験条件

	Stroke (mm)	
	1st	2nd
Process A	12	7
Process B	8	4.5

表2 ハット曲げ実験条件

Condition	①	②	③	④
4-point bending	Process A	Process A	Process B	Process B
Punch side at U-hat bending	C-side	T-side	C-side	T-side

である。いっぽう、YUモデルでもC側の方がT側より1回目後の残留応力の絶対値が若干大きく表現され、実験結果と定性的に異なっている。これは、材料定数の同定の際に、等方硬化分と移動硬化分の程度の見積りの調整不足が原因である。曲げの小さい条件Bでは、IHおよびYUモデルともに、C側およびT側での残留応力の予測値は、実験値と定性的に一致した。さらに、IHおよびYUモデル間の差はほとんどない。

2回目後の残留応力については、曲げの大きな条件Aでは、残留応力が反転したが、曲げの小さな条件Bでは、T側の残留応力は反転せず圧縮のままであり、結果としてCおよびT側ともに圧縮応力が残留した。一方、解析結果では、YUモデルはこの表面残留応力挙動を定性的に予測できているが、IHモデルでは、条件AおよびBともにC側の残留応力を圧縮と見積もっており、繰返し変形の際の予測精度に限界があることが明らかになった。

図7は、ハット曲げ成形後のハット底部中央部における残留応力値の測定結果並びに解析結果との比較を示す。(a) はパンチの反対側の表面、(b) はパンチ側の表面の測定結果を示す。いずれの条件①~④においても、残留応力の大きさはほとんど同じである。また、内側と外側で絶対値が異なっているが、残留応力測定条件が異なっていることも考慮する

と、ほぼ同じと考えられる。本実験の程度の塑性加工がなされると、曲げモーメントによりハット底部および壁部には降伏応力以上の曲げ応力が作用し、初期残留応力の影響はほとんど見られないことがわかる。

その後、パンチストロークを10mmにした実験および残留応力計測も実施したが、条件①~④における成形後の残留応力はほぼ同一であった。

以上から、残留応力分布および形状予測の高精度化には、YUモデル等のパウシンガー効果を高精度に予測できる枠組みを持つ移動硬化型あるいは複合硬化型構成式の利用がのぞましいと考えられる。

5 終わりに

本研究では、主に矯正中に導入される残留応力の変化の高精度な計測と予測、ならびに矯正後の残留応力がプレス成形に及ぼす影響を明らかにすることを目的として活動を行った。高精度構成式の利用は、コンピュータやソフトウェアの性能向上と相俟って利用しやすい環境が整いつつある。また、本研究で使用したcos α法を皮切りに、短時間計測が可能でコンパクトなX線残留応力測定装置が開発されてきている

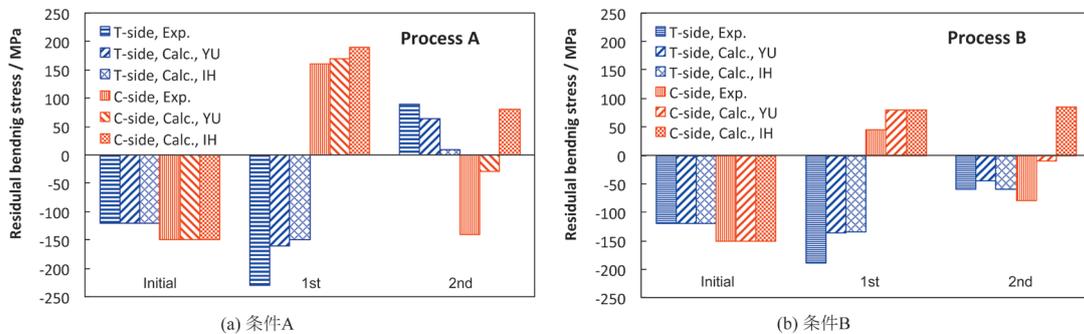


図6 繰返し4点曲げによる表面残留応力の測定結果および解析との比較

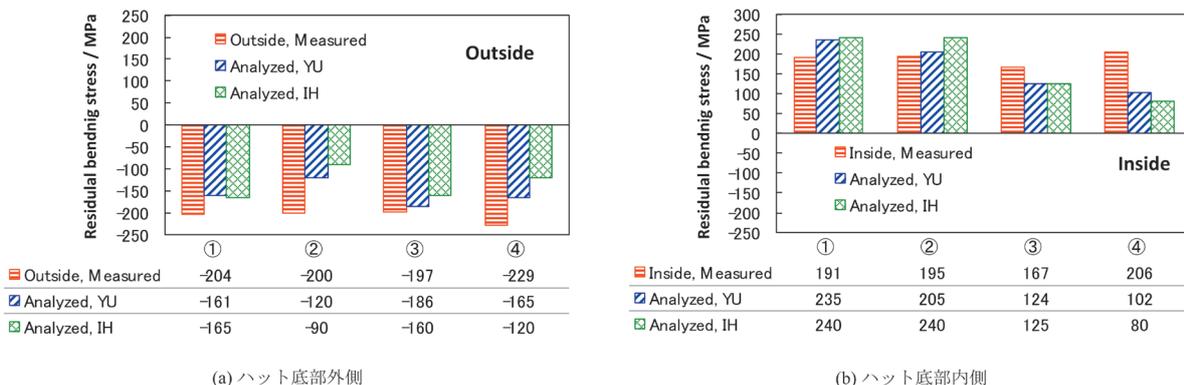


図7 ハット曲げ成形後のハット底部中央部における残留応力値

ようである。本研究では、そのような状況も鑑みて、その場測定手法開発にも着手しなかったところであるが、残念ながら実現はかなわなかった。本研究成果が、現場での残留応力測定とその管理への動機付けの端緒となれば幸いである。

最後に、本研究は、日本鉄鋼協会 研究会II「鋼材矯正後残留応力の予測・評価」による補助をうけて遂行したことを記して深甚なる謝意を表します。また、東京電機大学 阿高松男氏には、本研究会顧問として高所大所からご指導を頂いたことに感謝申し上げます。最後に、新日鐵住金 明石透氏、浜田龍次氏、JFE スチール 堀江正之氏から、鉄鋼メーカーの立場からの有益なご助言を多く頂いたことを付記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 特集号「矯正過程の数値解析技術の高度化と実機操業技術の最近の進歩」, 鉄と鋼, 95 (2009) 11, 731-806.
- 2) F.Yoshida and T.Uemori : Int.J.Plast., 18 (2002), 661.
- 3) 吉田総仁, 上森武: 日本機械学会論文集, A編, 68 (2002) 667, 415.
- 4) 田中真人, 藤川正毅: 日本機械学会論文集, A編, 77 (2011) 773, 27.
- 5) M.Tanaka, H.Noguchi and M.Fujikawa : CEMS, 62 (2010) 3, 265.
- 6) 上森武, 徳田太郎, 吉田哲哉, 瀧口三千弘, 吉田総仁: 日本機械学会中国四国支部第51期総会・講演会, (2012), 205.
- 7) 上森武, 瀧口三千弘: CAMP-ISIJ, 27 (2014), 373.
- 8) 坂井田喜久, 早川邦夫, 中村伸彰, 鈴木敬太: CAMP-ISIJ, 26 (2013), 251.
- 9) 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明: 残留応力のX線評価, 養賢堂, (2006)
- 10) 平修二, 田中啓介, 山崎利春: 材料, 27 (1978), 251
- 11) 佐々木敏彦, 林政, 広瀬幸雄: 日本機械学会論文集, A編, 62 (1996), 2741
- 12) 坂井田喜久, 林拓海, 早川邦夫: CAMP-ISIJ, 27 (2014), 374.
- 13) 早川邦夫, 坂井田喜久, 上森武: CAMP-ISIJ, 27 (2014), 375.

(2016年7月8日受付)