

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420737

研究課題名(和文)高精度な加工硬化特性評価に基づく高強度電縫鋼管の二次加工法の確立

研究課題名(英文) Prediction of formability of electric resistance welded high-strength steel tubes on basis of accurate evaluation of work-hardening behavior

研究代表者

宅田 裕彦 (Takuda, Hirohiko)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：20135528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電縫鋼管(筒状に丸めた鋼板を溶接することで製造されるパイプ)を対象として、加工硬化特性(強度の特性)をはじめとする機械的特性を詳細に明らかにするとともにそれらの特性を計算機上で簡易に評価する技術を構築することを目的とした。研究の結果、製造過程が鋼管の機械的特性に及ぼす影響を明らかにするとともに、機械的特性を簡易に評価できる実験的手法および数値解析技術を検討した。また、鋼管の二次利用を見据えて、機械的特性が二次加工性に及ぼす影響についても考察した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present study was to understand the deformation characteristics, including work-hardening behavior, of electric resistance welded steel tubes and to develop procedures to evaluate and to predict the characteristics. As a result of the study, the effect of the deformation history during manufacturing processes of tubes on the deformation behavior of tubes was revealed in detail. Experimental and numerical procedures to evaluate easily the deformation characteristics were also proposed. Moreover, in order to improve the formability of the tubes, the effect of the deformation characteristics of tubes on the formability was also discussed.

研究分野：塑性加工学

キーワード：ロール成形 高張力鋼板 電縫鋼管 加工硬化特性 環境材料 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

電縫鋼管は、自動車部品や油井管、ラインパイプなど、自動車分野やエネルギー分野で従来から広く使われている。近年自動車分野においては、燃費向上や衝突安全性向上のために高強度かつ薄肉な電縫鋼管への需要が高まっている。同様にエネルギー分野においても、深海の油田やガス田開発のために高強度管への需要が高まっている。電縫鋼管は、ロール成形（多段階のロールを通過させることでコイルに連続的な曲げ変形を与える加工法）により製造される。ロール成形は、高い生産性や高い寸法精度を実現できるなどの特長を持つ。

上述のように電縫鋼管を構造部材として利用するためには、鋼管が十分な引張・圧潰特性や二次加工に耐えうるだけの成形余裕度を有することが求められる。しかしながら、ロール成形中の複雑な塑性変形を経て製造される電縫鋼管の機械的特性は、当然素材の機械的特性とは大きく異なり、また管の周方向で大きな不均一性を持つ。したがって、電縫鋼管を構造部材として有効活用するためには、素材の機械的特性に基づいて鋼管の機械的特性を予め精度良く把握することが重要である。そのためには、ロール成形中に素材が受けるひずみ履歴を明らかにし、またそれに伴う材料特性の変化を的確に把握する必要がある。しかしながら、ロール成形における塑性変形プロセスの複雑さから、ロール成形過程が鋼管の機械的特性に及ぼす影響は十分明らかではなく、鋼管を利用する上で大きな障害となっている。

2. 研究の目的

以上の現状を踏まえて本研究では、ロール成形プロセスを踏まえて電縫鋼管の機械的特性を明らかにするとともに、その特性を計算機上で簡易に評価する技術を構築することを目的とした。またさらに、鋼管の二次利用を見据えて、機械的特性が二次加工性に及ぼす影響についても考察を行った。

3. 研究の方法

本課題では、主に次の3ステップに分けて研究を進めた。

(1) 単スタンドのロール成形

ロール成形中に素材が受けるひずみ履歴を明らかにすることを目的として、単スタンドのロール成形中に生じるひずみ推移を実験により測定した。用いたロール成形装置の模式図を図1に示す。上下ロールの双方を回転駆動させて、16mm/sの速度で成形を行った。成形中、ボトムロールは材料の端部のみを拘束する構造とした。ロールギャップは板厚に合わせて1.6mmとした。成形中は無潤滑とした。供試材は270MPa級および590MPa級鋼板であり、試験片の寸法を長さ600mm、幅50mm、厚さ1.6mmとした。表1に供試材の機械的特性を示す。試験片の両面にひずみゲージを貼

付することで、成形中のひずみ履歴を調査した。

実験条件に合わせて、弾塑性有限要素法による解析も行った。板材は、メッシュサイズが約2.5mm四方のシェル要素により離散化された。ロールは剛体とした。ロールと板材の接触にはクーロン摩擦則を仮定し、摩擦係数を $\mu=0.2$ とした。

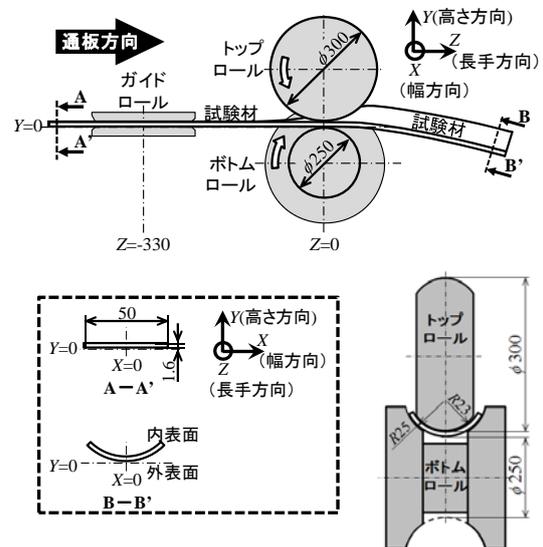


図1 ロール成形装置の模式図。[学会発表⑦]

表1 供試材の機械的特性。 σ_f は降伏応力を示す。その他のパラメータはSwift近似式による。[学会発表⑦]

鋼種	σ_f /MPa	F /MPa	ϵ_0	n
270MPa	162	639	0.025	0.383
590MPa	332	1178	0.0003	0.207

(2) 加工硬化特性の簡易評価手法

(1)の単スタンドロール成形の研究結果で詳述するように、ロール成形中に板材は複雑なひずみ経路変化を受けることが明らかとなった。そこで、このひずみ経路変化が機械的特性に及ぼす影響を簡易に評価することを目的として、有限要素法による評価手法を提案した。すなわち、ロール成形中に各部位で生じる変形履歴を一つのシェル要素を構成する4節点に対して境界条件として与えることで、1要素のモデルでロール成形を模擬する方法である。その後、この要素に対して引張変形を与えることで、ロール成形を受けた板材の任意の部位における機械的特性を簡便に評価できることが期待される。

(3) 二段階ひずみ経路実験

ロール成形中のひずみ経路変化が機械的特性に及ぼす影響を詳細に検討するために、二段階ひずみ経路実験を行った。本試験で用いた試験片形状を図2に示す。一次経路として、圧延方向 (RD)、圧延直角方向 (TD)、および圧延方向から45°傾いた方向 (45D) に切り出した大型試験片に対して6%の引張あ

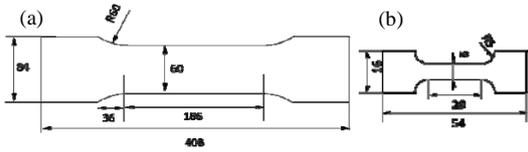


図 2 試験片形状. (a)大型試験片, (b)小型試験片.

るいは圧縮ひずみを与えた. 続いて二次経路として, 予ひずみを付与した大型試験片から小型試験片を切り出して, 破断まで引張変形を与えた. なお, 一次経路で圧縮変形を与える際は, 座屈の発生を抑制するため, 変形中にクシ歯型の治具を用いて板厚方向に側圧を与えた. 一次経路ではひずみゲージにより, また二次経路ではビデオ式非接触伸び計によりひずみの測定を行った. 供試材には, IF 鋼板および DP 鋼板を用いた.

4. 研究成果

(1) 単スタンドのロール成形

ロール成形中の幅方向および長手方向のひずみ推移を図 3 に示す. 実験結果から, 幅方向ひずみは長手方向ひずみより大きく, また幅方向ひずみは内表面に比べて外表面が大きい. それに対して, 長手方向では, 板材はひずみが繰り返し増減する複雑な挙動を示している. 以上の傾向は鋼種に依らず同様である. 一方, 解析結果は, ひずみの大きさには実験とずれが見られるものの, 全体的な推移は実験結果と良好に一致している. 解析結果から, 外表面では成形後に 5%程度相当塑性ひずみが生じていることがわかる.

成形中のひずみ経路変化を詳細に調査するために, 590MPa 級鋼板 (図 3(b)) を例にとって, 長手方向ひずみ-幅方向ひずみの関

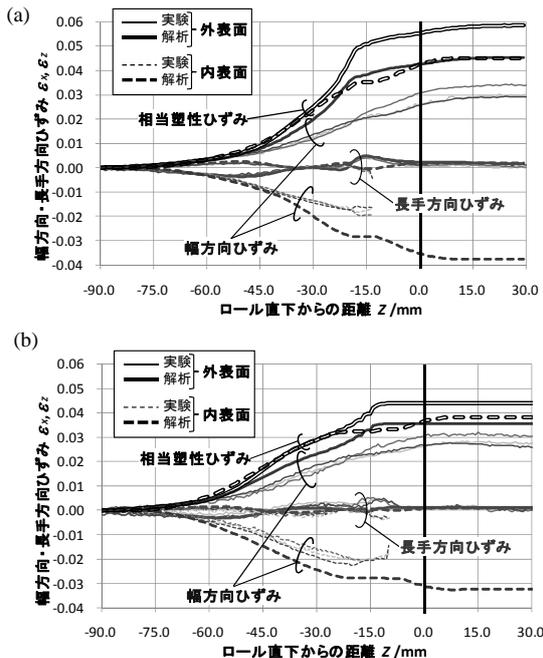


図 3 ロール成形中のひずみ履歴. (a)270MPa 級鋼板, (b)590MPa 級鋼板. [学会発表⑦]

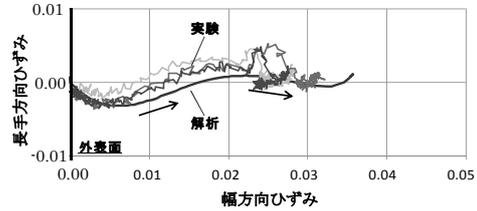
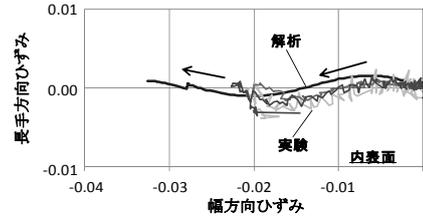


図 4 590MPa 級鋼板における長手方向ひずみ-幅方向ひずみの関係. [学会発表⑦]

係を図 4 に示す. この結果から, ロール成形中に板材は次のようなひずみ経路変化を受けることがわかる.

(a) ロール直下の約 80mm 手前から幅方向への曲げ変形が作用し, 外表面では引張の, 内表面では圧縮の幅方向ひずみが生じる.

(b) ロール直下の約 50mm 手前から長手方向に曲げ変形が作用し, 続いて約 30mm 手前付近から曲げ戻しが作用する.

(c) さらに, 約 20mm 手前から再び曲げ変形が作用し, そのままロール直下を通過する.

以上の傾向は解析でも定性的に再現できている. これらの結果から, 板材は幅方向および長手方向に複雑なひずみ経路変化を受けることが明らかとなった. 特に, 長手方向には曲げ曲げ戻しを伴うことから, ロール成形後の鋼管における機械的特性を適切に評価するためには, バウシinger 効果の影響を考慮する必要があることが示唆される.

(2) 加工硬化特性の簡易評価手法

前項の成果から, 長手方向には反転負荷を伴う複雑なひずみ経路変化が生じることが明らかとなったため, ここでは主として長手方向の変形に着目する. まず, 提案した解析手法の妥当性を検証するため, 上ロール径 150mm, 下ロール径 250mm の単スタンドロール成形中の長手方向ひずみ推移を 1 要素モデルで評価した結果を図 5 に示す. ただしここでは, $x=0$ (図 1) の中央部での変形を模擬している. 長手方向ひずみの推移は, 実験および前項で示した通常解析の結果と良く一致していることから, 1 要素に対して意図した変形が付与できていることが確認できる. またこの結果から, 板表面近傍では反転負荷が生じているのに対して, 板厚中央付近では引張方向へ単調増加していることがわかる. このことから, バウシinger 効果の影響は, 板厚方向で異なることが示唆される.

図 6 に, ロール成形中の相当塑性ひずみ発展を示す. 外表面では内表面に比べて大きな相当塑性ひずみが生じていることから, ロー

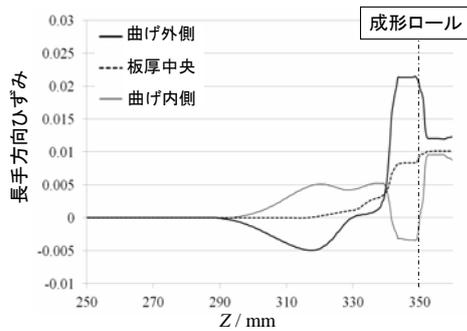


図5 ロール成形中の長手方向ひずみの推移.

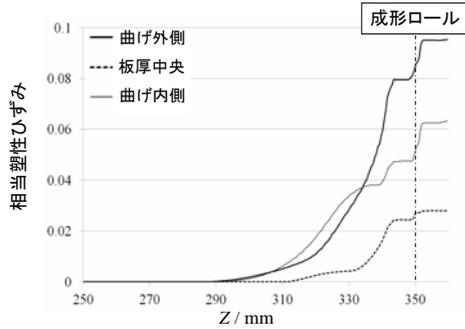


図6 ロール成形中の相当塑性ひずみの推移.

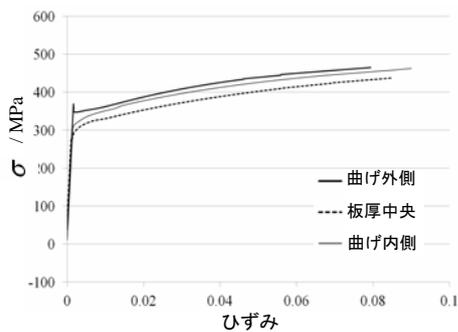


図7 ロール成形後の板材の引張時における応力-ひずみ関係.

ル成形後の板材では、外表面の方が内表面に比べて応力レベルが高いことが示唆される。

そこで、ロール成形時のひずみ経路を付与した後の1要素モデルを用いて一軸引張解析を行った結果を図7に示す。上記の仮説どおり、応力レベルは相当塑性ひずみの大小関係に準じる結果となり、ロール成形後の板材では板厚方向で機械的特性が大きく異なることが明らかとなった。

続いて、機械的特性の周方向部位での違いを調査するため、エッジ部近傍の $\lambda=16$ (図1)と $\lambda=0$ に位置する部位のロール成形後の応力-ひずみ関係を調査した。その結果を図8に示す。なおここでは、板厚方向の平均値を示している。明らかに、エッジ部の方が中央部に比べて応力レベルが高い。この結果を詳細に検討するため、 $\lambda=16$ の部位におけるロール成形中の長手方向ひずみおよび相当塑性ひずみの推移を図9に示す。エッジ部では、ロール成形中に生じる相当塑性ひずみが中央部に比べて大きい。そのため、図8に示したようにエッジ部では最終的な応力レベルが

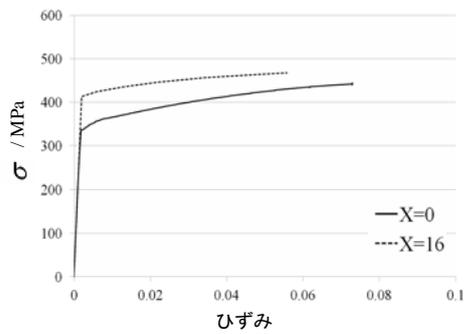


図8 ロール成形後の各部位における引張時の応力-ひずみ関係.

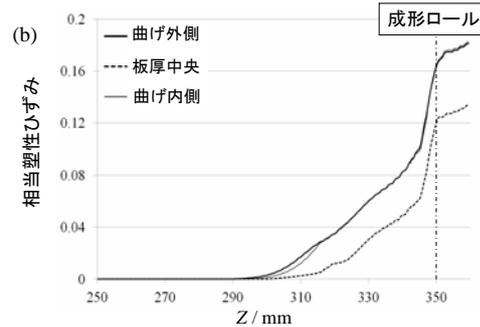
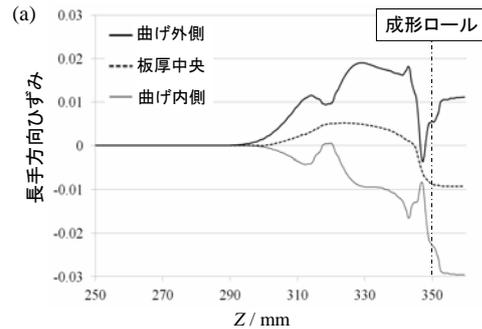


図9 ロール成形中の $\lambda=16$ の部位における変形挙動。(a)長手方向ひずみ、(b)相当塑性ひずみ.

高まったと推察される。これは、長手方向ひずみの推移から明らかのように、エッジ部では中央部に比べてロール成形中に生じるひずみが大きいためである。一方、板厚方向での分布を比較すると、エッジ部では中央部とは異なり、板の内外表面で相当塑性ひずみが同程度である。しかしながらその一方で、結果は省略するが、外表面に比べて内表面の降伏応力は小さい。これは、長手方向ひずみの推移から明らかのように、内表面ではロール成形終盤で圧縮側に反転負荷を受けることで、バウシinger効果の影響により降伏応力が低下したためと考えられる。以上より、ロール成形を受けた板材における最終的な機械的特性の評価には、バウシinger効果をはじめとするひずみ経路変化の影響の適切な考慮が重要なことが明らかとなった。

(3) 二段階ひずみ経路実験

図10に、IF鋼板に対して一次経路でRDおよび45D方向へ引張変形を与えた場合の、二

次経路における応力-ひずみ曲線を示す。RDへ予引張を与えると、二次経路で45DおよびTDへ負荷した場合に降伏応力の上昇が見られた。すなわち、顕著な交差効果が生じた。降伏後は、45Dの場合はひずみ10%以降でRDの結果(すなわち順負荷)とほぼ一致するが、TDの場合はその他よりも低く推移する。

一方、45Dへ予引張を与えた場合、RDとTDではほぼ同様の応力推移を示している。この結果は、一次経路と二次経路での角度差で二次経路における応力推移が統一的に整理できることを示す。そこで、次式で定義されるパラメータ $\cos\alpha$ を用いて、ひずみ経路の機械的特性に及ぼす影響を整理する。

$$\cos\alpha = \mathbf{A}^1 : \mathbf{A}^2 = A_{ij}^1 A_{ij}^2 \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{A}^1 および \mathbf{A}^2 は一次および二次経路の塑性ひずみ速度モードテンソルを表す。

図11(a)~(d)に、二次経路における降伏応力および引張強さと $\cos\alpha$ の関係を示す。前述のように、異なるひずみ経路であっても $\cos\alpha$ が同じであればほぼ同じ値が得られている。IF鋼板の降伏応力(図11(a))は、 $\cos\alpha$ が0に近づくにつれて上昇する。これは交差効果の影響と考えられる。また、バウシinger効果の影響により、 $\cos\alpha = -1$ において最小値をとる。一方、DP鋼板(図11(c))では傾向が大きく異なり、降伏応力は $\cos\alpha$ とともに単調に低下する。また $\cos\alpha = -1$ での降伏応力は著しく低いことから、DP鋼板ではバウシinger効果の影響が顕著であると言える。引張強さは、両鋼種ともに $\cos\alpha$ とともにわずかに低下するが、その変化は降伏応力に比べると小さい(図11(b), (d))。このことから、ひずみ経路変化は二次経路における変形初期には大きな影響を及ぼすが、後期には大きく影響しないことが明らかとなった。

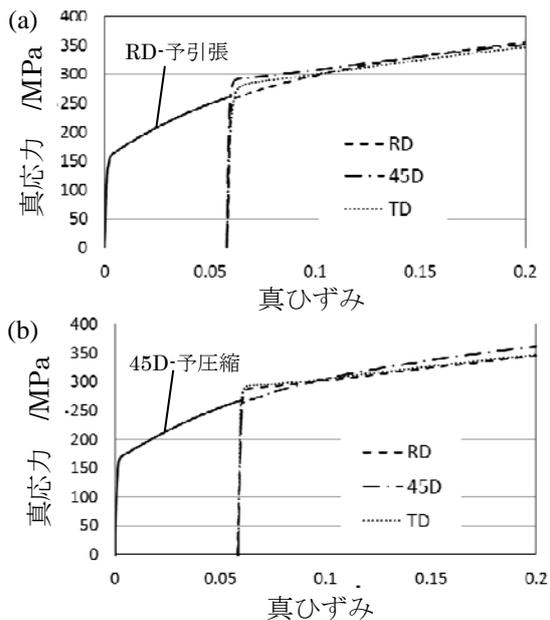


図10 IF鋼板における二次経路での応力-ひずみ曲線。[学会発表⑥]

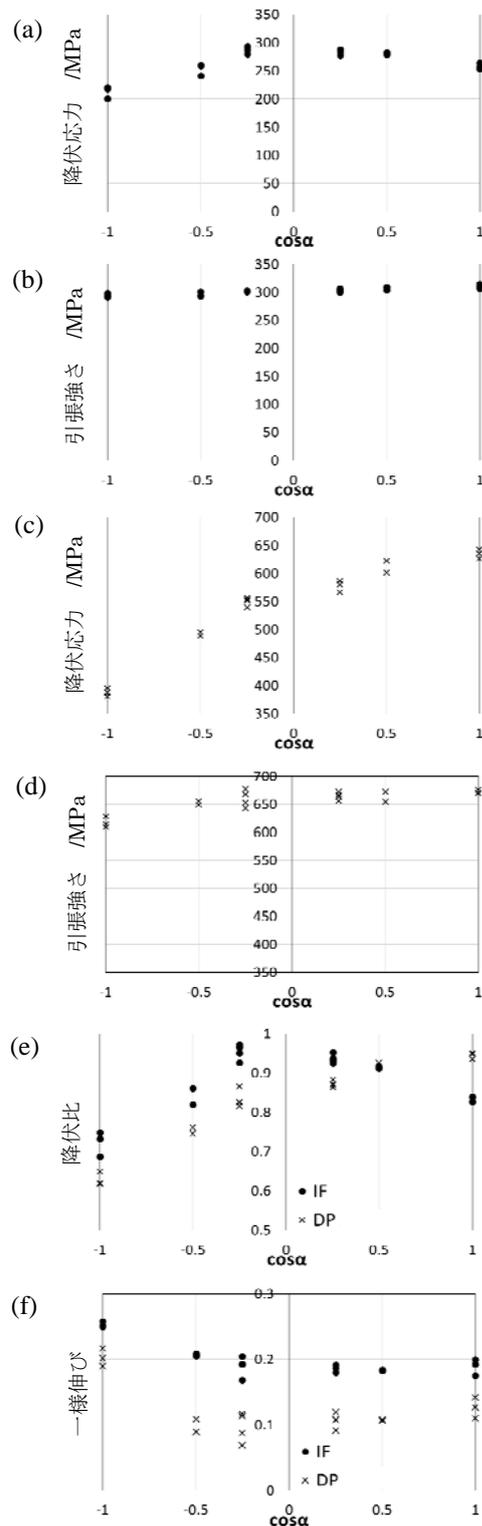


図11 引張特性と $\cos\alpha$ の関係。(a) IF鋼板の降伏応力、(b) IF鋼板の引張強さ、(c) DP鋼板の降伏応力、(d) DP鋼板の引張強さ、(e)降伏比 YR、(f) 一様伸び。[学会発表⑥]

鋼管の延性を評価する指標として、降伏比 YR (=降伏応力/引張強さ) がよく用いられる。そこで、図11(e)に YR と $\cos\alpha$ の関係を示す。YR は降伏応力と類似した変化を示している。これは、ひずみ経路変化は引張強さに比べて降伏応力に対して大きな影響を及ぼしたためである。 $\cos\alpha = 1$ の順負荷では、DP鋼板に

比べて IF 鋼板の方が YR は小さい。その一方で、IF 鋼板での交差経路における降伏応力の上昇、および DP 鋼板での反転負荷経路における降伏応力の低下によって、YR の大小関係は $\cos \alpha$ によって逆転する場合も見られる。このことから、YR を適切に評価するためには、ロール成形時のひずみ経路変化が及ぼす影響を慎重に考慮する必要があることが示唆された。例えば、本研究で対象としたロール成形過程では反転負荷が生じていたことから、最終的に製造される鋼管の YR は素材のそれに比べて低下している可能性があり、二次加工に際してはそれを考慮して設計指針を立てることが求められる。

図 11 (f) に一様伸びと $\cos \alpha$ の関係を示す。両鋼種ともに、 $\cos \alpha = -1$ においてのみ明らかな増大が確認できるが、その他の条件では大きな変化は見られない。続いて、一様伸びと YR の関係を図 12 に示す。IF 鋼板では YR と一様伸びに緩やかな線形関係がみられる一方で、DP 鋼板では明瞭な相関はみられない。一般に YR が低いほど一様伸びが大きいと考えられているが、図 12 から、ひずみ経路が変化する場合は YR だけでは変形能を整理できないことがあることが示唆される。以上の結果より、二次加工に際しては YR だけでなく直接的な機械的特性を考慮する必要があることが示唆される。

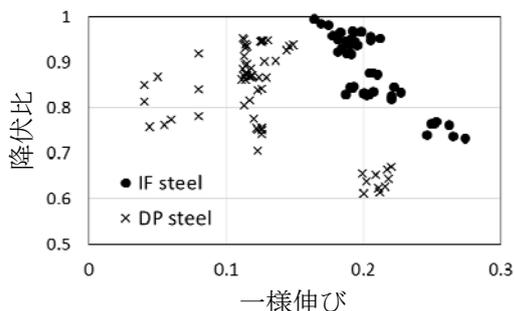


図 12 降伏比と一様伸びの関係。[学会発表⑥]

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

① Hama, T., Kojima, K., Kubo, M., Fujimoto, H., and Takuda, H., Crystal plasticity finite-element simulation on development of dislocation structures in BCC ferritic single crystals, ISIJ International, 57-5 (2017), 866-874.

<http://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-011>

② Kubo, M., Nakazawa, Y., Yoshida, H., Yonemura, S., Hama, T., and Takuda, H.: Effect of microstructure variation on differential hardening behavior of steel sheets under biaxial tensile state, ISIJ International, 56-12(2016), 2259-2266.

<http://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-387>

③ Kubo, M., Yoshida, H., Uenishi, A., Suzuki, S., Nakazawa, Y., Hama, T., and Takuda, H.: Development of biaxial tensile test system for in-situ scanning electron microscope and electron backscatter diffraction analysis, ISIJ International, 56-4(2016), 669-677.

<http://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-534>

[学会発表] (計 7 件)

① 浜孝之, 浦谷政翔, 藤本仁, 宅田裕彦, 鉄鋼反の応力緩和挙動に関する結晶塑性有限要素法解析, 平成 29 年度塑性加工春季講演会, 2017 年 6 月 8 日~2017 年 6 月 10 日, じゅうろくプラザ (岐阜県・岐阜市).

② 浜孝之, 畠山真一, 藤本仁, 宅田裕彦, 種々の結晶塑性モデルによる冷延鋼板の等塑性仕事面の予測, 日本鉄鋼協会第 173 回春季講演大会, 2017 年 3 月 15 日~2017 年 3 月 17 日, 首都大学東京 (東京都・八王子市).

③ 浜孝之, 金属板材の変形挙動予測のための結晶塑性モデリング, 日本塑性加工学会第 219 回塑性加工技術セミナー, 2016 年 12 月 16 日, 日本大学 (東京都・千代田区).

④ 浜孝之, 結晶塑性モデルの活用による塑性加工シミュレーションの新しいかたち, 第 2 回日本機械学会イノベーション講演会, 2016 年 11 月 25 日, 早稲田大学 (東京都・新宿区).

⑤ 浜孝之, 結晶塑性 FEM による非比例負荷時の弾塑性変形挙動解析, 日本鉄鋼協会鉄鋼インフォマティクス研究会, 小型中性子源による鉄鋼組織解析法研究会ジョイントシンポジウム, 2015 年 9 月 16 日~2015 年 9 月 18 日, 九州大学伊都キャンパス (福岡県・福岡市).

⑥ 割鞘美和, 生川遼太, 浜孝之, 宅田裕彦, 和田学, 樋渡俊二, 種々の方向へ引張・圧縮予変形を受けた IF・DP 鋼板の引張特性, 平成 28 年度塑性加工春季講演会, 2016 年 5 月 20 日~2016 年 5 月 22 日, 京都工芸繊維大学 (京都府・京都市).

⑦ 和田学, 割鞘美和, 浜孝之, 宅田裕彦, 栗山幸久, 樋渡俊二, 単スタンドのロール成形におけるひずみ経路, 第 65 回塑性加工連合講演会, 2014 年 10 月 11 日~2014 年 10 月 13 日, 岡山大学 (岡山県・岡山市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宅田 裕彦 (TAKUDA, Hirohiko)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授

研究者番号: 20135528

(2) 研究分担者

浜 孝之 (HAMA, Takayuki)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号: 10386633