

# 省資源型二相ステンレス鋼 (NSSC 2120<sup>®</sup>) の 加工硬化挙動とスプリングバック

## Work-hardening Behavior and Springback Simulation of Lean Duplex Stainless Steel (NSSC 2120<sup>®</sup>)

石丸 詠一朗\* 柿原 豊彦 加賀 祐司  
Eiichiro ISHIMARU Toyohiko KAKIHARA Yuji KAGA

### 抄 録

省資源型二相ステンレス鋼 (NSSC 2120) は、優れた耐食性と強度を両立した製品であり市場における適用範囲は拡大している。本報では、NSSC 2120 の薄鋼板を用いた曲げ加工の際に課題となるスプリングバックに関して、加工硬化挙動に着目し成形シミュレーションによる解析と改善策の検討結果を報告する。NSSC 2120 は弾性変形による回復量が大きく、スプリングバックはステンレス鋼の代表鋼種である SUS304 に比べ大きくなる。そこで、材料モデルに吉田 - 上森モデルを用いた成形シミュレーションを実施し、実験と計算が精度良く一致することを確認した。シミュレーションを活用し、スプリングバックを改善する方法として、金型クリアランスの適正化を提案した。板厚と同じ金型クリアランスの実験を行い、スプリングバック改善を確認した。今後は、シミュレーションを活用した成形ソリューションにより適用拡大を推進する。

### Abstract

Lean duplex stainless steel (NSSC 2120) has excellent corrosion resistance and strength, and its applications in the market is expanding. This article investigated springback, which is problematic in the bending of thin sheets of NSSC 2120, by focusing on work-hardening behavior. An analysis of forming simulations and the results of improvement measures are reported. NSSC 2120 causes remarkable elastic recovery in the draw-bent forming and therefore the springback is larger than that of SUS304, a representative stainless steel. Springback simulations were conducted using the Yoshida-Uemori kinematic hardening rule, and the experimental and calculation results were in good agreement. The optimizing of die clearance was proposed as forming condition reducing springback. The result of experiment in draw-bent forming was conducted using the same clearance as the sheet thickness, and a reduction in springback was confirmed. We will implement processing solutions using simulations and will continue to increase the applications.

## 1. 緒 言

ステンレス鋼の主要構成元素である Cr, Ni および Mo はいずれも国家備蓄 7 鉱種<sup>1)</sup>に含まれている。特に、Ni や Mo は、その稀少性から価格変動が激しく、ステンレス鋼の価格安定性の弊害となる。ステンレス鋼で最も一般的な鋼種は、準安定オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 であり、約 8% の Ni を含有している。したがって、Ni 価格変動にともない SUS304 の鋼材価格も同調し、2007 年には大幅な価格上昇が問題となった。このような価格変動と主要元素の枯渇防止に対応するため、日鉄ステンレス(株)では Ni 含有量が少なく SUS304 代替が可能なフェライト系

ステンレス鋼やフェライト・オーステナイト二相ステンレス鋼(以下、二相ステンレス鋼)を開発し、市場拡大を目的に成形条件の提案に代表される成形ソリューション活動を実施している。

SUS304 代替を目的として開発した省資源二相ステンレス鋼 (NSSC 2120/UNS82122/SUS821L1)<sup>2)</sup>の成分は、既存の二相ステンレス鋼に比較し希少合金の含有量を低減している点の特徴である。また、SUS304 に対して高強度の特性を有し、薄肉軽量化の効果が期待されている。一方で、金型から解放した後に弾性回復現象(スプリングバック)により発生する形状精度の不良が深刻な課題として浮上してきた。この課題は、高強度鋼において共通の課題である

\* 日鉄ステンレス(株) 研究センター 加工技術研究室 室長(部長) 工博 山口県光市島田 3434 〒 743-8550

ことからこれまで多くの取り組み<sup>3)</sup>がなされている。本報では、NSSC 2120 のスプリングバック挙動とその改善策について、成形シミュレーションを用いて検討した結果を報告する。

## 2. 実験方法および実験結果

### 2.1 供試材

供試材である NSSC 2120 の代表成分を SUS304 と比較し表 1 に、マイクロ組織を図 1 に示す。成分の特徴は、Ni 量 2.1% と SUS304 比で約 6% 低減しているため、オーステナイト相の安定化を目的に 0.17% の N を添加している点である。マイクロ組織は、フェライト相とオーステナイト相が約 50% 存在する二相からなり、板厚方向に層状で、圧延方向に延伸した微細な結晶粒径を有する組織を呈している。

### 2.2 実験項目

今回用いた実験は、①引張試験、②スプリングバック評価 (ドローバンド成形試験) の 2 項目である。

#### 2.2.1 引張試験

引張試験に用いた試験機は、島津製作所製 AG-100kNX 型である。圧延方向と平行に JIS13 号 B 試験片を採取した。得られた引張試験片をクロスヘッド速度 20mm/min で破断まで一定速度の引張特性値を取得した。さらに変位と荷重の値より、公称応力 - 公称ひずみ線図を得た。

#### 2.2.2 スプリングバック評価 (ドローバンド成形試験)

スプリングバックの評価にはドローバンド成形試験を用

表 1 代表組成  
Chemical composition

	(mass%)					
	C	Mn	Ni	Cr	Cu	N
NSSC 2120	0.01	3.0	2.1	21.0	1.0	0.17
SUS304	0.05	1.0	8.1	18.1	0.2	0.04

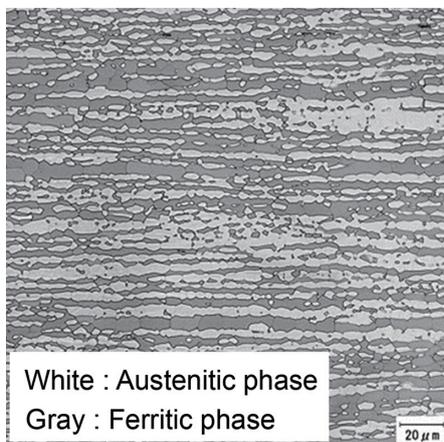


図 1 ミクロ組織  
Microstructure

いた。図 2 に示す金型をエリクセン試験機 (エリクセン社製 145-60 型) に設置し、幅 20mm×長さ 130mm (圧延方向) の短冊状試験片を用い実施した。試験片の Die 側にのみ Johnson-wax#122 を薄く塗布し金型とブランクシート間の摩擦影響を軽減した。クッション圧を 10kN、パンチの移動速度は 0.167mm/s とし、40mm の成形高さまで加工後、金型から解放した際に生じる材料の変形をスプリングバックとした。得られた成形試験品の板厚中心部の硬度を Die R 部から側壁方向に測定した。試験荷重 1kgf、測定間隔は 1mm である。

### 2.3 実験結果

#### 2.3.1 引張特性および加工硬化挙動

表 2 に引張特性を図 3 に公称応力 - 公称ひずみ線図を SUS304 と比較し示した。NSSC 2120 は、600MPa 超の 0.2% 耐力と約 30% の延性を有しており、SUS304 と比較し、高強度 - 低延性、かつ加工硬化が小さい特徴を有している。このような引張特性の差は、①高 N 量成分、②二相組織に起因した細粒、の 2 点が大きく寄与し発現したと考えられる。

#### 2.3.2 スプリングバック評価 (ドローバンド成形試験)

図 4 にドローバンド成形後の試験片を SUS304 と比較して示す。NSSC 2120 は、スプリングバックを示す側壁の曲がり角が SUS304 に比較して大きく、開口幅 ( $\Delta W$ ) も大きくなっている。図 5 はドローバンド成形試験片の硬度分布を測定した結果を示している。ドローバンド成形による側壁部の加工硬化が確認できるものの、NSSC 2120 の硬度上昇は SUS304 に比較して少なく、Die R 部における曲げ - 曲げ戻しによる加工硬化挙動に差が発生している。

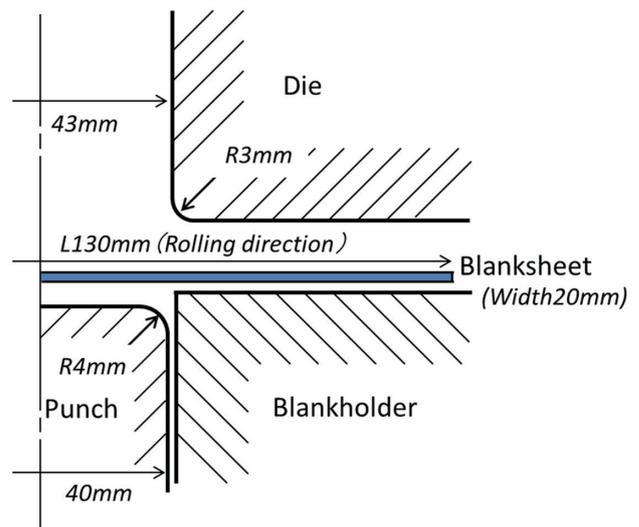


図 2 ドローバンド成形試験に用いた金型形状とサンプル位置  
Experimental set-up and specimen for draw-bending

表 2 引張特性調査結果 (試験片: JIS13号 B, RD)  
Results of tensile test (Specimen: JIS13B, RD)

	0.2%PS MPa	TS MPa	El %	U-El %	n-value
NSSC 2120	613	809	29	20	0.20
SUS304	300	678	51	48	0.46

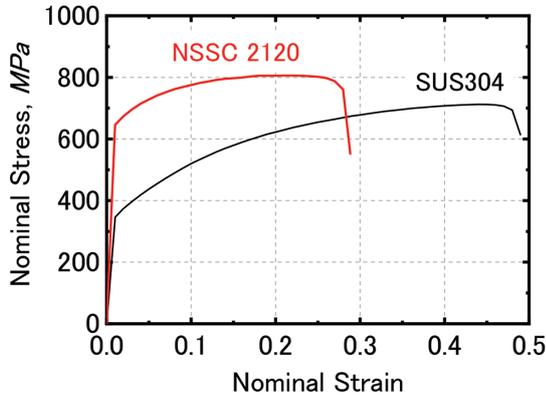


図 3 NSSC 2120 と SUS304 の公称応力 - 公称ひずみ線  
図比較  
Stress-strain curves of SUS304 and NSSC 2120

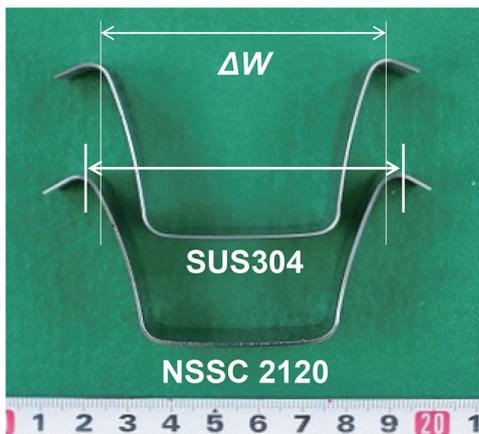


図 4 ドローベンド成形後のスプリングバック  
Springback behavior after draw-bending test

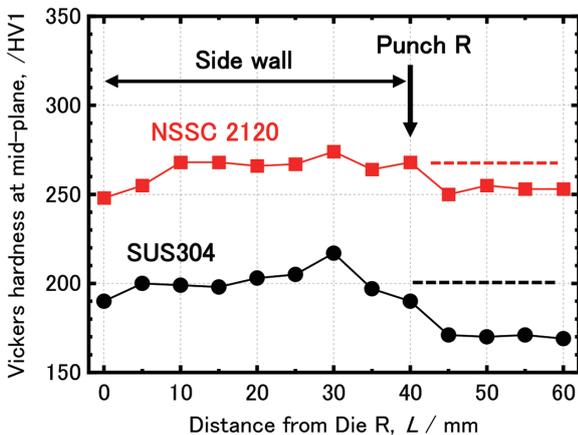


図 5 ドローベンド試験片の側壁における硬度分布  
Distribution of hardness after draw-bending at side wall

### 3. 考 察

#### 3.1 スプリングバックと加工硬化挙動

NSSC 2120 と SUS304 のスプリングバックの差は、引張特性を反映した妥当な結果と考えられる。つまり、高強度材では加工後の材料強度が高くなり、弾性回復量の増加を招きスプリングバック量が大きくなったためである。また、ドローベンド試験後の加工硬化差が生じた要因としては、NSSC 2120 は加工硬化係数 (n 値) が小さいことに加え、0.2%耐力が高いため Die R での曲げ半径が SUS304 よりも大きくなり、曲げ - 曲げ戻しで導入されるひずみ量に差が生じたと推定される。

#### 3.2 吉田 - 上森モデルを用いたスプリングバックシミュレーション

スプリングバック挙動をシミュレーションにより正確に再現するためには、引張と圧縮を繰り返し応力負荷した際の加工硬化挙動を精度良く再現する必要がある。高強度鋼のスプリングバック予測技術には多くの報告<sup>5)</sup>があり、シミュレーションを活用した高精度予測が可能となっている。本報では、吉田 - 上森モデル (以下 Y-U モデル)<sup>6)</sup>を適用した。用いたソルバーは PAM-STAMP 2G である。

図 6 に一軸引張および引張 - 圧縮繰り返し応力負荷を実施した際の真応力 - 真ひずみ線図と Y-U モデルのシミュレーション結果を比較して示す。Y-U モデルで得られた応力とひずみの関係は実験結果と良く一致しており、引張から圧縮へ応力負荷を反転した際のバウシング効果も精度良く再現されている。このシミュレーションで得られた材料パラメータを用いて本実験のスプリングバック計算を実施した。計算条件を表 3 に示す。図 2 に示される金型形状をシミュレーションへ適用した。Y-U モデルを用いた計算結果と実験結果を比較して図 7 に示す。Y-U モデルを用いた

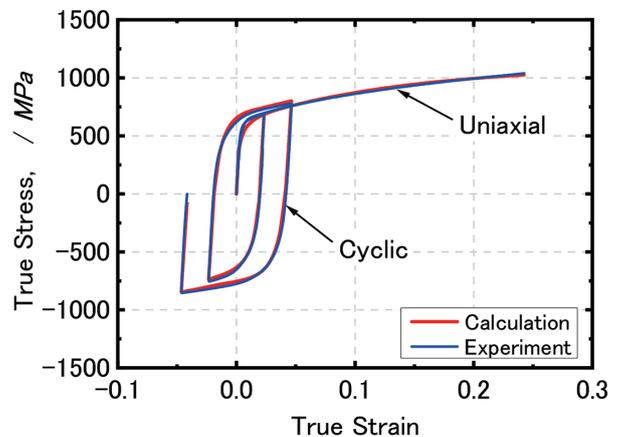


図 6 成形シミュレーションによる加工硬化挙動の正確な再現 (NSSC 2120)  
Accurate prediction of work-hardening behavior by FEM simulation

表3 シミュレーション条件  
Simulation conditions

Thickness mm	Mesh size mm	BHF kN	Friction coefficient	Forming height	Model
1.0	1.0	10	0.06	40	shell

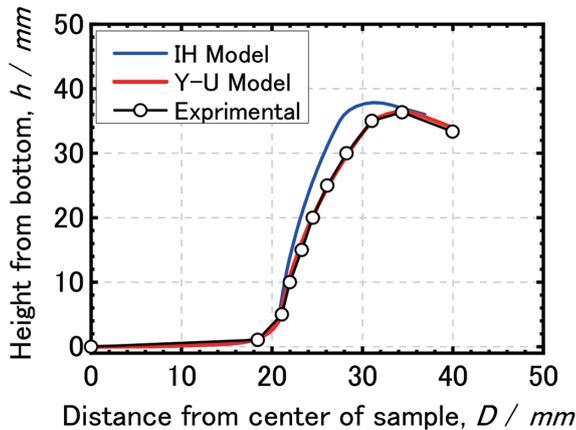


図7 吉田-上森モデルを用いたスプリングバック予測と実験結果 (NSSC 2120)  
Comparison of experimental and springback simulation using the Yoshida-Uemori model

計算結果は実験結果と精度高く一致しており、等方硬化 (IH) モデルとの差も明確となっている。以上より、シミュレーションによるスプリングバック挙動の再現が可能と判断できることから、スプリングバックが改善する成形条件の検討を実施した。

### 3.3 スプリングバックを低減する成形条件

板材の曲げ加工品に生じるスプリングバックは、寸法精度を損なうため対策<sup>7)</sup>が検討されている。今回対象としたドローバンド成形によって生じるスプリングバックは、Die R 部で曲げ-曲げ戻しひずみを受け、金型から外した後に外側に反る変形が一般的である。図4に示される実験結果も同様に变形している。このような壁反り変形によるスプリングバックを低減する対策としては、Die R と板厚の適正化 (rd/t)<sup>8)</sup>、段絞り<sup>9)</sup>、形状凍結ビード<sup>8)</sup>、等が挙げられる。これら対策によりスプリングバックの改善が期待されるが、成形性とスプリングバックの両立を狙い金型クリアランスの変更による改善を検討した。板厚未満の金型クリアランスは、しごきの効果が発生する可能性があるため、板厚と同じ 1.0mm とした。金型クリアランスを 1.0mm としたシミュレーション結果を図8に示す。金型クリアランスを 1.5mm→1.0mm へ小さくすることでスプリングバックが改善している。スプリングバックが改善した要因を図9に示しており、① Die R 部の曲げ半径が小さくなる、②側壁部と金型間での摩擦力、等により、材料が流れ込み難くなり、ダイフェイスとパンチ肩 R 間で張力が増加した影響が考えられる。図10はシミュレーションによって得られた成形高

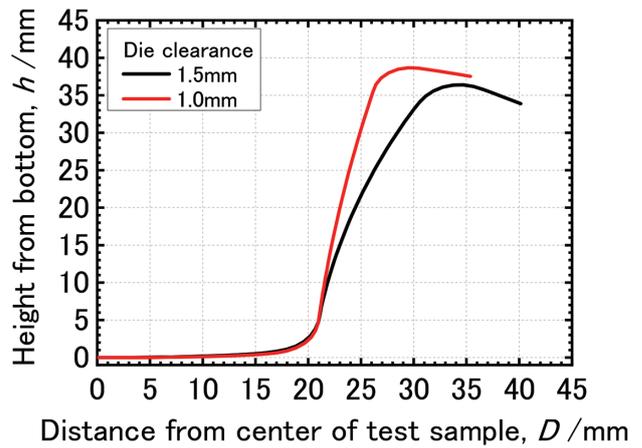


図8 スプリングバック挙動におよぼす金型クリアランスの影響 (NSSC 2120)  
Effect of die clearance on springback after draw-bending by FEM simulation

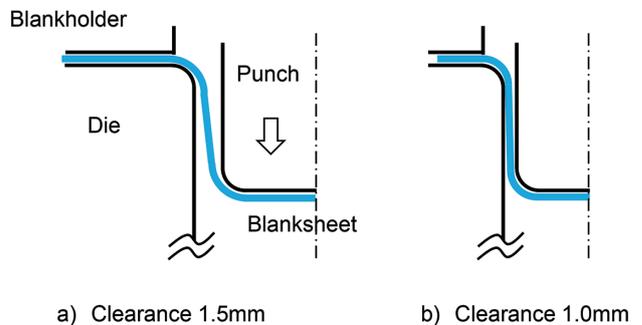


図9 金型クリアランスによるドローバンド成形時の曲げ半径変化の模式図  
Effect of die clearance bend radius at Die R on draw-bending

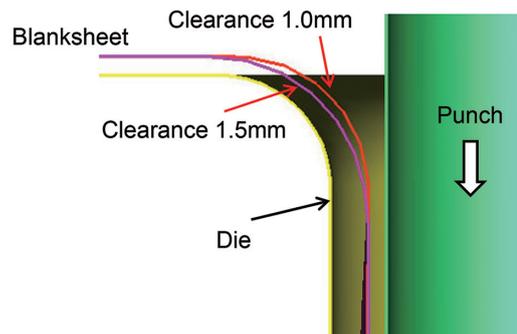


図10 成形シミュレーションによる金型クリアランス変更時の曲げ半径比較  
Effect of die clearance on bend radius at Die R by FEM simulation

さ 20mm 位置における Die R 部の材料の曲げ半径を比較している。曲げ半径は金型クリアランス 1.0mm の方が 1.5mm に比べ小さくなっており、曲げ-曲げ戻し変形時のひずみ量は増加していると考えられる。図11にシミュレーションで得られた下死点位置における側壁部の応力分布を示す。金型クリアランスを 1.0mm とすることで側壁部は均一で応力分布へ変化し、応力の増加も確認できる。以上の結果が

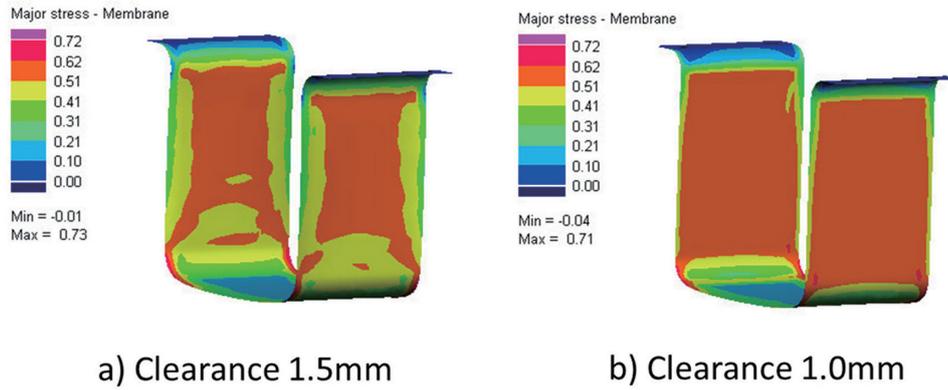


図 11 側壁の応力分布におよぼす金型クリアランスの影響 (NSSC 2120)  
Effect of die clearance on major stress at sidewall after draw-bending by FEM simulation

ら、スプリングバックの改善は、側壁部の引張応力の増加の効果と推定される。

### 3.4 検証実験

前項のシミュレーション結果を検証するため、金型クリアランスを試験材板厚と同じ 1.0mm に変更したドローバンド成形試験を実施した。結果を図 12 に示す。クリアランスを小さくすることで、スプリングバックは小さくなっている。シミュレーションによって得られた側壁部の引張応力が増加した効果と推定できる。

## 4. 結 言

省資源型二相ステンレス鋼 (NSSC 2120) のスプリングバックをシミュレーションによる加工硬化挙動の正確な再現により解析し、以下が明らかとなった。

- 1) NSSC 2120 は、SUS304 と比較し高強度 - 低延性の引張特性を示し、ドローバンド成形時のスプリングバックは大きくなる。
- 2) ドローバンド成形試験後の側壁部における加工硬化を比較すると、NSSC 2120 は SU304 よりも硬化代が小さい。
- 3) NSSC 2120 のスプリングバック挙動は、Y-U モデルを適用することで高精度に予測可能である。
- 4) NSSC 2120 のスプリングバックを改善する方法として金型クリアランスの変更を提案し、検証実験によりその効果を確認した。

### 参考文献

- 1) JOGMEC NEWS. Vol.14
- 2) 日鉄ステンレスホームページ, Duplex シリーズ鋼
- 3) 薄鋼板成型技術研究会編: プレス成形難易ハンドブック. 第 4 版. 日刊工業新聞社, 2017, p.311-409
- 4) 岩谷二郎: 第 257 回塑性加工シンポジウム, 2007, p.29-36
- 5) 例えば, 日本塑性加工学会: 第 257 回塑性加工シンポジウム, 2007
- 6) Yoshida, F., Uemori, T.: Int. J. Plasticity. 18, 661-686 (2002)

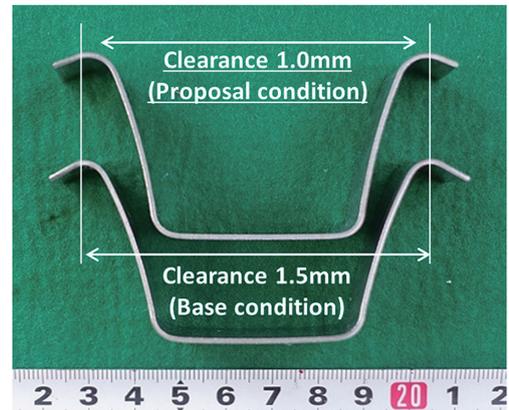


図 12 スプリングバックにおよぼす金型クリアランスの影響  
Effect of die clearance on springback after draw-bending

- 7) 日本塑性加工学会編: 塑性加工技術シリーズ 14 曲げ加工. 1995, p.51-52
- 8) 林豊, 高木美智雄: 鉄と鋼. 68 (9), 1236 (1892)
- 9) 小林敏郎, 佐藤定往: 塑性と加工. 717 (1962)



石丸詠一郎 Eiichiro ISHIMARU  
日鉄ステンレス(株)  
研究センター 加工技術研究室  
室長(部長) 工博  
山口県光市島田3434 〒743-8550



柿原豊彦 Toyohiko KAKIHARA  
日鉄ステンレス(株)  
商品開発部 二相鋼商品開発推進班  
班長(部長)



加賀祐司 Yuji KAGA  
日鉄ステンレス(株)  
商品開発部 薄板商品開発Gr  
首席主幹(部長)