

技術報告

# 日鉄ステンレス(株)光棒線工場における粗圧延改善

## Rough Rolling Improvement at Wire Rod and Bar Mill at Hikari Area of Nippon Steel Stainless Steel Corporation

森田 博樹\*  
Hiroki MORITA

吉澤 明展  
Akinori YOSHIKAWA

藤井 孝樹  
Takaki FUJII

高野 光司  
Kohji TAKANO

### 抄 録

日鉄ステンレス(株)光棒線工場では品質改善に継続的に取り組んでいる。従来からの課題としてしわ疵の発生、製造可能範囲制約、及びインライン分塊プロセスの最適化などがあった。しわ疵に関しては鋼材の周方向圧縮歪を、製造可能範囲の拡大に関しては圧延温度を、インライン分塊プロセスでは傾斜圧延による相当塑性歪を指標とし、数値解析による現状と改善案の比較を基に最適化を実施した。この最適条件を達成するために設備改造を伴う改善を実施し、特にしわ疵に関しては従来の製品に比べ個数、深さとも大幅に抑制することができた。

### Abstract

Wire rod and bar mill at Hikari Area of Nippon Steel Stainless Steel Corporation is continuously working to improve the quality. Problems that have been encountered so far include wrinkle defects, restrictions on the manufacturable range, and optimization of the in-line breakdown process. Comparing the current situation and improvement plans by numerical analysis, using the circumferential compressive strain for wrinkles, the temperature of rolling for expanding the manufacturable range, and the equivalent plastic strain of the surface for the in-line breakdown process as an index. Optimization was carried out based on. In order to achieve this optimum condition, improvements were carried out with equipment modification, and especially wrinkle defects were able to be greatly suppressed in both number and depth compared to conventional products.

### 1. はじめに

日鉄ステンレス(株)光棒線工場は社内唯一の棒線工場であり、圧延工場は1962年の操業開始から58年が経過している。この間、インライン熱処理、複合加熱及びインライ

ン分塊、フリーサイズ圧延など様々な技術の導入を図ってきた。圧延ラインは途中から分岐するレイアウトで線材、バーインコイル、棒鋼を1つのラインで製造している(図1)。

ステンレス棒線は二次、三次加工の後、ねじなどの締結部材、ピン、シャフト、ばね、溶接用材料として自動車や

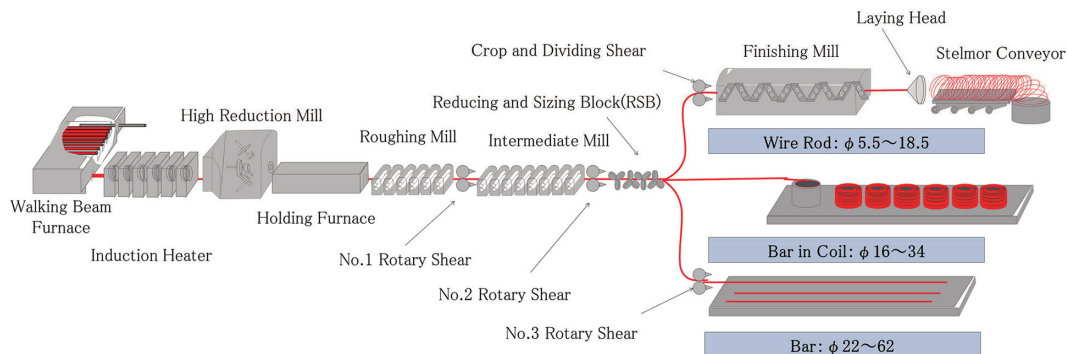


図1 圧延ラインレイアウト  
Layout of wire rod and bar mill

\* 日鉄ステンレス(株) 製造本部 山口製造所 光エリア 棒線工場 棒線技術室 山口県光市大字島田 3434 〒743-8550

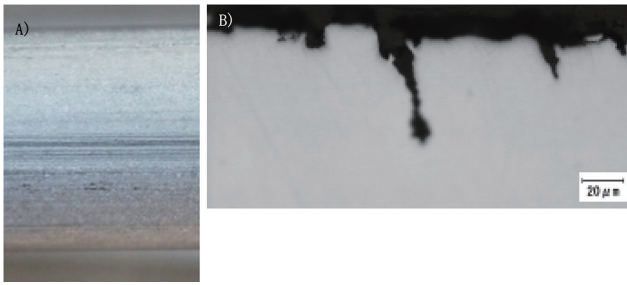


図2 A) しわ疵外観, B) しわ疵断面写真  
A) Appearance and B) cross section view of wrinkle defect

OA 機器用途で幅広く使用されている。その素材には加工中、使用中に不具合の出ない品質が求められ、特に不具合の起点となる表面疵については要求レベルが高いため、常に改善が求められている。光棒線工場は表面疵が発生しやすいステンレス鋼に特化しており、その対策に取り組んできた。

本報では、最近の事例として粗圧延の改善事例について紹介する。

## 2. 従来の課題

### 2.1 しわ疵

しわ疵は圧延における減面の過程で、鋼材周方向の圧縮歪により鋼材表面に発生する疵であり鋼材全長に連続的に発生する(図2)。圧延孔型の形状や減面率などに支配される疵であり、圧延の基本条件の変更には当たっては、その影響を十分に考慮すべきものである。

光棒線工場でも特定の鋼種でしわ疵が出荷前の検査で発見され慢性的に救済工程付与や切捨てが生じており、安定製造ができていなかった。

### 2.2 圧延中の鋼材温度低下による製造可能範囲制約

光棒線工場の特徴である連続圧延は、各圧延スタンドで鋼材の体積速度が一定であるため、鋼材断面積の大きな前段では速度が遅く、小さな後段では速度が速い。熱間加工性が低い鋼種については粗圧延中に加工限界疵が発生することがあった。また、一定温度以下で加工に有害な金属相であるシグマ相(以下、 $\sigma$ 相)が析出する二相系ステンレス鋼については圧延中の鋼材温度低下により安定製造が困難であった。このように、圧延中の温度履歴は製造可能範囲に大きく影響を及ぼしている。

### 2.3 インライン分塊プロセスの最適化

一般に棒線圧延に用いるビレットは、大断面で出鋼後、分塊圧延を経て製造される。光棒線工場は傾斜圧延機(図3)と保熟炉によるインライン分塊プロセスを採用しており、デリバリー優位性に寄与している。

傾斜圧延機は通常の2ロールや3ロール圧延機で付与される圧縮変形のみでなく、せん断変形を付与することが可

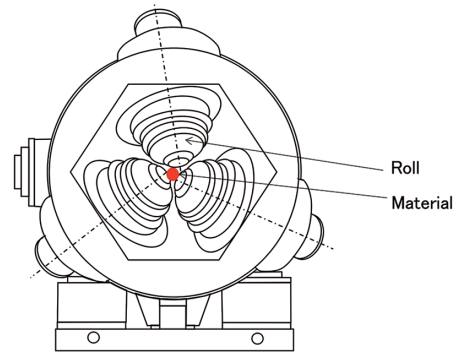


図3 傾斜圧延機概観(圧延下流方向から)  
Overview of high reduction mill (from downstream)

能である。一般に圧縮による加工限界に比べせん断の加工限界は大きいので、1つの圧延機で大きな加工を行うことが可能である。このせん断変形導入効果をより積極的に活用できれば品質向上が期待できるが、三次元の大変形を伴う圧延であることから定量的解析は困難であり課題となっていた。

## 3. 各課題の概要と原因推定

### 3.1 しわ疵

しわ疵改善について、圧延孔型形状や減面率に関する指標を得るために、現状の孔型条件における周方向圧縮歪りを数値解析した(図4A))。この指標を基に孔型形状と減面率の条件を検討した結果、図4B)に示す通り、周方向圧縮歪りを大幅に低減できる条件を見出した。

特にフェライト系ステンレス鋼においては粗大粒起因でのしわ疵発生の懸念がある。傾斜圧延の高減面化と直後に配置された保熟炉での保定により、粗大粒の細粒化によるしわ疵改善の可能性がある。この傾斜圧延の高減面化については3.3節にて後述する。

### 3.2 圧延中の鋼材温度低下による製造可能範囲制約

圧延中の鋼材温度は加工発熱と放冷、ロール等による抜熱により決まる。圧延速度が遅い場合には抜熱が加工発熱を上回り、鋼材温度は低下する。粗圧延でこの傾向が見られるが、おおむね中間圧延以降ではその関係が逆転し圧延温度は上昇する(図5)。つまり、粗圧延時の温度降下抑制により圧延温度域を上昇させることが可能になる。

光棒線工場の粗圧延機は鋼材の捻転が必要な水平式圧延機を採用しており、鋼材を捻転させるために圧延機間距離が長く、このレイアウト上の制約は水平-垂直式の採用により改善できる可能性がある。

### 3.3 インライン分塊プロセスの最適化

S(硫黄)添加鋼種は硫化物の析出により熱間加工性が低い。そのため圧延中に割れを生じる恐れがあるが、傾斜圧延での表層せん断強加工により品質改善の可能性がある。

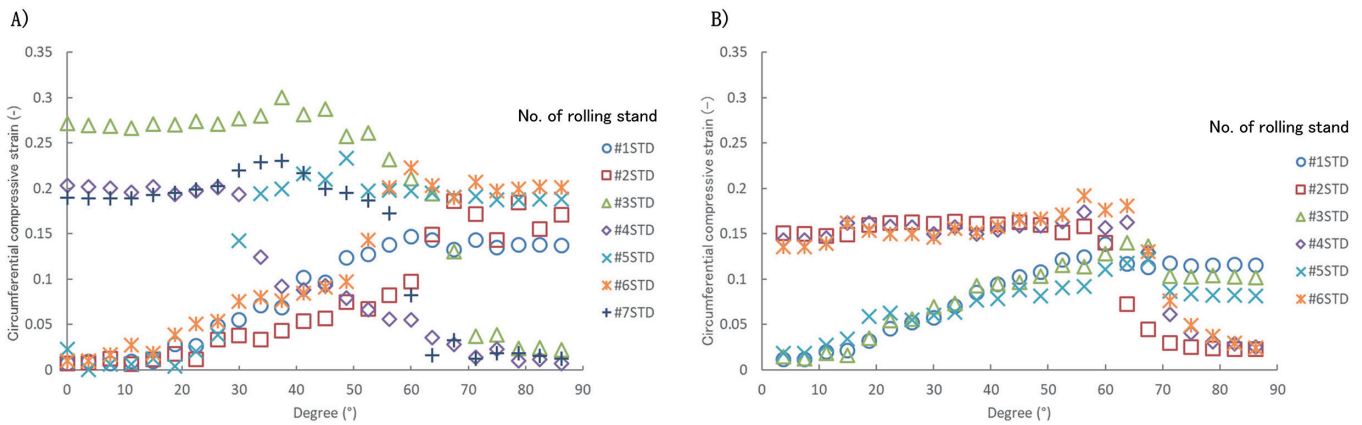


図4 粗圧延機の周方向圧縮歪計算結果 A) 既設, B) 改善案(解析ソフトウェア: NSCARM, 日本製鉄社製<sup>2)</sup>)  
FEM result of circumferential compressive strain A) existing, B) improving

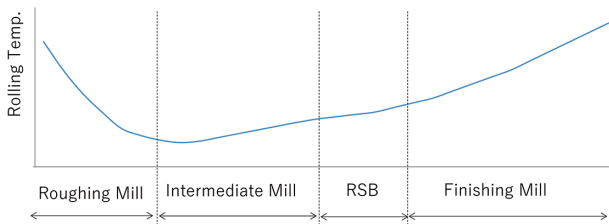


図5 圧延温度推移イメージ  
Image of rolling temperature transition (old layout)

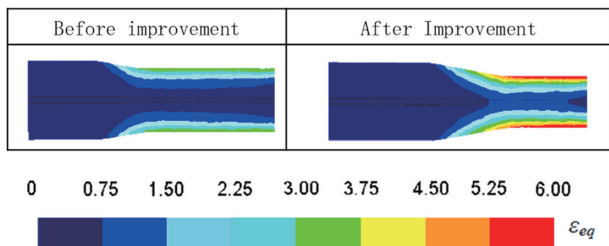


図6 傾斜圧延条件改善前後の相当塑性歪の鋼材長手断面分布  
Equivalent plastic strain distribution

また、主に合金元素の高いステンレス鋼の第二相であるデルタフェライト相(以下、 $\delta$ 相)は母相との加工性の差により、圧延中に割れを生じる懸念があり、光棒線工場では $\delta$ 相比率の高い鋼種は製造困難であった。傾斜圧延で付与可能な大きなせん断変形を用いると鋼材内の $\delta$ 相を分断し、有害性低減の可能性がある。

これらの可能性を定量化するために三次元剛塑性有限要素法を用い<sup>3)</sup>、現行水準と高減面化した水準の比較評価を行った。図6は改善前後の相当塑性歪の鋼材長手断面分布である。表層に大きな歪が入っていることが分かるが、圧下量を大きくした改善後については、歪が鋼材の径方向の奥深くまで浸透するだけでなく、表層に入る歪自体も大きくなることが分かった。

このS添加、及び $\delta$ 相起因の割れの抑制に関しては加工性の悪い温度領域を避けた圧延をすることによっても改善可能であるため、3.2節の圧延温度域の上昇による効果も

表1 設備改造・改善概要  
Table of improvement and converted facility

Facility	Content of improvement	Purpose
High reduction mill	Increase reduction	Improve quality Expansion manufacturable range
Holding furnace	Extend	Improve quality
Roughing mill	Replace for horizontal-vertical type Change groove design Decrease reduction	Improve quality Expansion manufacturable range
No.1 rotary shear	Increase motor capacity Cut speed optimization	Improve quality

期待できる。

また3.1節にて言及したフェライト系ステンレス鋼については、上述の結果の通り傾斜圧延での高減面化で歪の導入を大きくできることから、結晶粒微細化によるしわ疵抑制の効果も期待できる。

#### 4. 改善のコンセプト

3章の結果より、粗圧延機を水平式から水平-垂直式コンパクト圧延機に更新し、スタンド間距離を短縮し放冷を軽減した。粗圧延機の更新に伴う圧下スケジュール見直しとして、傾斜圧延の減面率を高くし粗圧延を低減面率とすること、孔型形状も見直すことでしわ疵抑制を図った。この傾斜圧延の減面率を高くすることにより導入歪の増加で組織改善を図り、製造可能範囲の拡大と品質改善を狙った。また、圧延機間にインダクションヒーターを設置することにより、温度低下抑制を強化した。さらに後端部の摺動疵発生防止対策としてNo.1ロータリーシャーの更新を実施した(表1)。

粗圧延機は圧延ラインの中段に位置するため、既設操業と切り離された空間で工事を進めることができない。工事内容を分割し比較的短い工事休止を繰り返すことで長期間の連続休止を回避し、操業中に工事を行うことで工事と生産活動のバランスを図った。

## 5. 改善結果

### 5.1 しわ疵

図7に同サイズ・同鋼種における断面内のしわ疵発生数と深さの変化を示す。この指標は改善前における $20\mu\text{m}$ 以下のしわ疵個数を100としている。改善後は、改善前に存在した深さ $23\mu\text{m}$ 以上の深いしわ疵がなくなり、全体的に疵深さ、個数ともに低減された。未だ $22\mu\text{m}$ 程度のしわ疵が発生しているのは中間圧延機の捻転が残っていることが原因の1つと考えられる。また、フェライト系ステンレス鋼では傾斜圧延を高減面化したことにより、蓄積される歪が増加し表層再結晶が促進されしわ疵抑制につながった。

### 5.2 圧延中の鋼材温度低下による製造可能範囲制約

図8に改善前後の $\phi 5.5$ の圧延温度推移を示す。改善により圧延温度域を $40^\circ\text{C}$ 向上することができた。これにより二相系ステンレス鋼については高温圧延化が可能となったため、安定的に $\sigma$ 析出温度域を回避し製造することが可能になった。

### 5.3 インライン分塊プロセスの最適化

傾斜圧延を高減面化したことにより、表層に大きなせん断歪を導入することができた。これと5.2節の鋼材温度上昇の相乗効果により高 $\delta$ 相の溶材用途のオーステナイト系ステンレス鋼種等を製造可能になった。

また、S添加鋼種については傾斜圧延で高減面化をすることにより、せん断歪による加工を増加させ加工割れ防止効果を得ることができた。

## 6. おわりに

2016年に完了した一連の粗圧延の改善により、品質面、

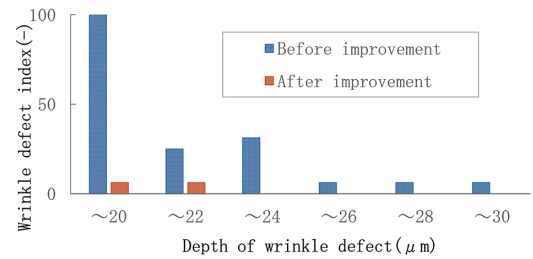


図7 改善前後におけるしわ疵の深さ指標  
Histogram of wrinkle defect generation index

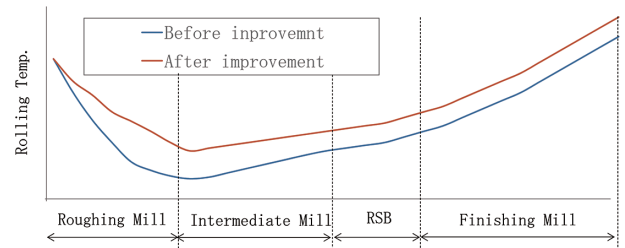


図8 改善前後の圧延温度推移イメージ  
Image of rolling temperature transition (old and new layout)

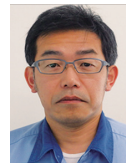
製造可能鋼種の拡大効果を得ることができた。しかし、最終製品から振り返ると棒線はあくまで中間製品であり、最終製品まで問題なく加工され、使用されるためには、更なる品質改善が求められている。今後も改善を継続していく所存である。

### 参考文献

- 1) 串田仁 ほか：神戸製鋼技報. 61 (1), 29 (2011)
- 2) 山田健二：第169, 170回西山記念技術講座. 日本鉄鋼協会, 1998, p.53
- 3) 山根康嗣, 下田一宗, 黒田浩一：塑性と加工. 60, 249-255 (2019)



森田博樹 Hiroki MORITA  
日鉄ステンレス(株)  
製造本部 山口製造所 光エリア  
棒線工場 棒線技術室  
山口県光市大字島田3434 〒743-8550



藤井孝樹 Takaki FUJII  
日鉄ステンレス(株)  
製造本部 山口製造所 光エリア  
棒線工場 工場長



吉澤明展 Akinori YOSHIZAWA  
日鉄ステンレス(株)  
製造本部 山口製造所 光エリア  
棒線工場 棒線技術室 室長



高野光司 Kohji TAKANO  
日鉄ステンレス(株)  
研究センター 厚板・棒線材料研究部  
部長 工学博士