

精整製品の低コスト・高品質化

Low Cost and High Quality of Bar Inseption and Conditioning

竹内 良太郎*
Ryotaro TAKEUCHI

小久保 浩一
Koichi KOKUBO

上田 佳央
Yoshio UEDA

木村 祐介
Yusuke KIMURA

抄 録

特殊鋼棒鋼は顧客での2・3次加工を経て自動車の重要保安部品等へ使用されるため、圧延後出荷前に製品1本毎に厳格な検査、精整が必要である。また、海外ミルとの熾烈なコスト競争が予想される中、生産性向上も急務となっている。このような背景のもと新日鐵住金(株)八幡製鉄所では矯直機、超音波探傷器更新による検査・精整ラインの高速化、品質保証力の向上、製品仕分立体倉庫による物流時の品質改善を図ってきた。これらの中には世界で初めての技術が組み込まれており、検査速度と精度を高い次元で両立することが可能になったので、これらの概要について紹介した。

Abstract

Special steel bars are worked secondly and thirdly by customers, and used in the critical safety components of automobiles, among other applications. So it is necessary to inspect and condition rolled bars accurately piece by piece before shipping. In addition, we have to improve the productivity urgently, because keen cost competition with overseas is expected. Under such a background, We make high speed and high quality bar inspection and conditioning line by updating 2-roll straightener and ultrasonic inspection and improve quality of bar before shipment by introducing automated warehouse. Some of these are included the world's first technology, It is possible to achieve both line speed and inspection accuracy at a high level. An overview of these quality and cost improvements is presented below.

1. 緒 言

特殊鋼棒鋼は顧客での2・3次加工を経て自動車のエンジン・駆動系製品や足回り系の重要保安部品等へ使用されるため、圧延後出荷前に製品1本毎の全数全長の厳格な検査、精整が必要である。また、近年では、海外勢との競争が激化する中、より一層の低コスト化、高品質化を求められている。

このような背景のもと、新日鐵住金(株)八幡製鉄所棒鋼工場では検査ラインの設備改造を実施し、処理速度の上昇により労働生産性を向上させると同時に、検査精度向上等の品質向上を達成している。本稿では、その主たる設備改造として、(1) 2ロール矯直機の更新 (2) 開口合成法を用いた丸棒鋼超音波探傷機の更新 (3) 製品自動立体倉庫を活用した物流時の品質改善について紹介する。

2. 製品精整の概要

八幡製鉄所棒鋼工場は1976年に稼働開始し、1ストランドの全連続式圧延機にて直棒及びバーインコイルを製造している。直棒製品においては、熱間圧延後に検査前在庫倉庫で保管され冷却後、自動探傷ラインにて1本毎に検査、手入れを実施する。自動探傷ラインでは、図1に示すように2ロール矯直機にて曲がり矯直を行い、表面疵検査装置にて表面検査、超音波探傷機(UST)にて内質検査を実施し、検査合格材のみ結束して出荷する。八幡製鉄所棒鋼工場では、表1に示すように、自動探傷ラインを4ライン有し、製品サイズにより通材ラインを選定している。

3. 2ロール矯直機の更新

3.1 新型2ロール矯直機の特徴

2ロール矯直機は客先要求の曲がり保証を満たすため、圧延後の冷却過程で発生する曲がりを上下に配置した2つ

* 八幡製鉄所 棒線部 棒線圧延技術室 福岡県北九州市戸畑区飛幡町1-1 〒804-8501

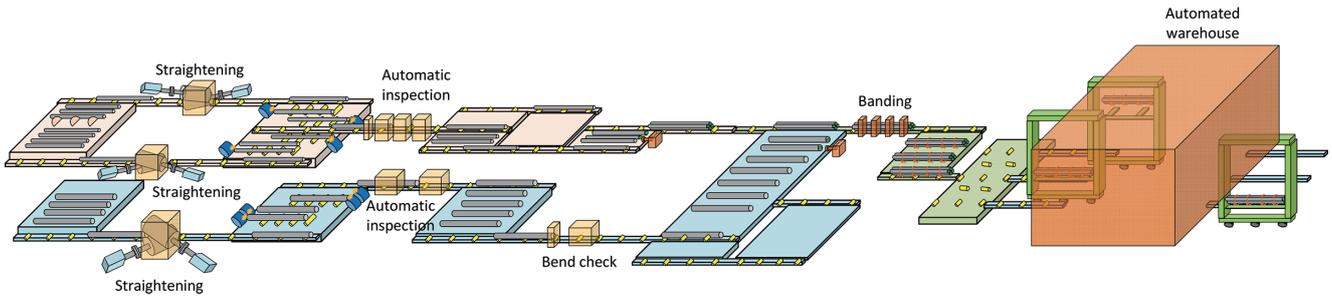


図1 特殊鋼棒鋼の製造工程
Special steel bar finishing line

表1 自動探傷ラインの検査サイズ
Main specifications of automatic finishing lines

		Product size
Yawata Works, Nippon Steel & Sumitomo Metal	No.1 automatic finishing line	Bar 40-120 mm ϕ
	No.2 automatic finishing line	Bar 18-50 mm ϕ
	No.3 automatic finishing line	Bar 25-80 mm ϕ
	No.4 automatic finishing line	Bar 18-44 mm ϕ

表2 2ロール矯直機の仕様
Main specifications of 2 roll straightener

	Before upgrade	After upgrade
Angle of roll	15°	30°
Barrel of roll	700mm	1250mm
Rotation guide	1 type	2 type

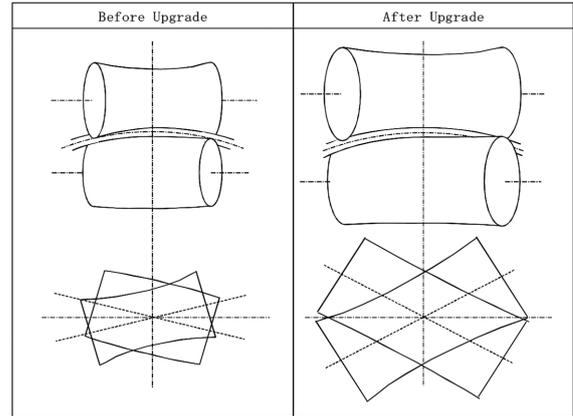


図2 更新前後の矯直機の模式図
Before and after upgrading of 2 roll straightener

のロールで矯直を行う設備である。表2に更新前後の矯直機の仕様を示す。新型2ロール矯直機の大きなメリットは次の2点である。

- 1) 矯直速度を大幅に高速化可能
- 2) 内径の異なる2系列の回転ガイドを配置したことで製品径に応じたガイディングが可能

2ロール矯直機は被矯直材を上下ロール間で塑性域が発生するまで曲げを付与し、曲げを保ったまま自転させると塑性域が引張、圧縮を繰り返し受けることになり、残存歪の半径方向での方向性が無くなることにより、曲がりを取り除くことができる。更に、上下ロールを交叉させて軸方向送りを発生させることで、直棒の連続曲がり矯直が実現する。更新後は矯直速度を向上させるため、交叉角度を15°から30°に広げているが、交叉角度を広げた場合、繰り返し引張、圧縮を十分に行うことができず、矯直精度が劣化する懸念がある(図2)。

そこで、ロールバレルを700mmから1250mmに延長することで、従来と同等の矯直精度を確保したまま、矯直速度を向上させることが可能になった。また、矯直時に被矯直材が高速で自転することで、遠心力による振れ回りが発生し、通材ラインから被矯直材が飛び出す可能性があった。従来は、製品径に関わらず、1系列の回転ガイドを使用していたが、細径材のガイディングが不十分であったため、回転ガイドを2系列化(シフト機構にてオンラインで交換

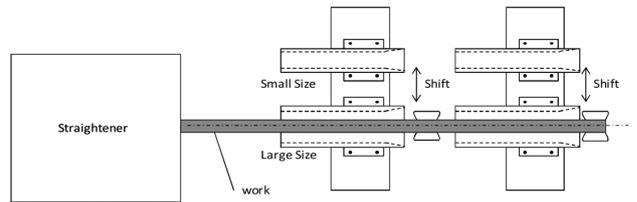


図3 更新後の回転ガイドの模式図
Rotation guide

可能)に変更することで、安定した矯直を実施することが可能になった(図3)。

3.2 新型曲がり計の導入

矯直後の曲がりの確認はこれまで被矯正材を回転させる方式の曲がり計を使用して測定を行っていたが、2ロール矯直機の更新により、矯直サイクルが回転式曲がり計の測定サイクルを上回るため、ライン全体の速度が制約されてしまう。そこで、搬送中に曲がり測定を実施できる新型曲がり計を採用した。

図4に更新前後の曲がり計の測定原理を示す。更新前の曲がり計は被矯正材に自転ローラーにて回転を付与し、端部の振れ量から製品の曲がりを算出する方式であったが、①測定サイクルが自転ローラーの回転に制約される、②端部曲がり方向と相関の薄い大曲がりを精度よく測定するのが困難、といった課題があった。

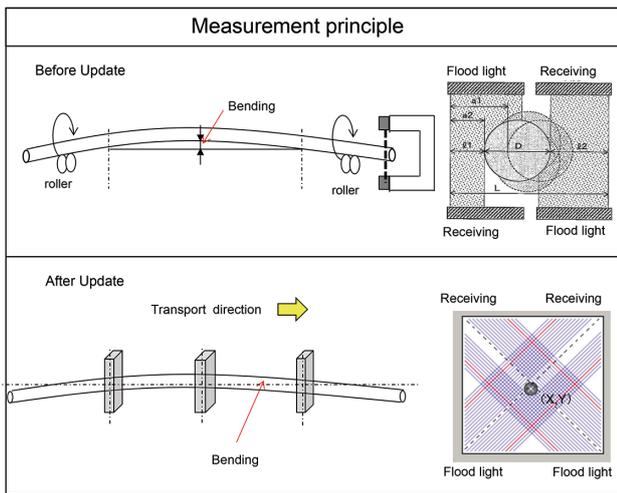


図4 曲がり計の測定原理
Measurement principle of bend check

一方、更新後の曲がり計は等間隔に配置した3つの座標寸法計を用いて測定したXY座標から演算を行い、曲がりを算出する。これを搬送途中の被矯正材に行うことで、曲がりを全長に渡って測定することが可能になり、上述する課題を克服することができた。

4. 丸棒鋼開口合成USTの導入

4.1 開口合成 UST 導入の背景

八幡製鉄所棒鋼工場の超音波探傷器は回転プローブ方式で、稼働開始後数十年が経過している。一方、競合他社においては、近年、微小素子が1つのプローブに多数配列されたアレイプローブを周方向に複数固定配置したフェイズドアレイ法が導入されており、新日鐵住金の既設USTは検出性能、検査速度の面で劣位になりつつあった。上流側の設備である2ロール矯正機を更新することで、既設USTが生産能率のボトルネックとなる実情から、検出性能と検査速度の両面の向上を図るべく、アレイプローブによる探傷に開口合成処理（Synthetic Aperture Focusing Technique: SAFT）を適用した丸棒鋼の超音波探傷を開発、導入した。

4.2 探傷方式について

種々の丸棒鋼超音波探傷の方式を図5に示す。既設探傷装置はシングルプローブが材料の周りを回転するタイプで主に内部を探傷する垂直用チャンネル（CH）と表層を探傷する斜角（L）CHが併設されている。一般的な棒鋼の超音波探傷においては、傾きを有する面状表層きずを確実に検出するために、時計回り（CW）、反時計回り（CCW）方向にビームが伝搬するように $-L$ 、 $+L$ 個のCHを有する。この方式は広い検査領域を確保するために超音波ビームが集束されておらず、また、拡散するきずエコーを限られた面積のシングルプローブで受信するだけにとどまるため、きず検出能を向上させることができない。更に、プローブヘッドを高速に回転させる必要があることから駆動系の回転速度制限により検査速度を向上できない、回転機構などの設備メンテナンスが煩雑である等の問題があった。

これらの問題を解決するため、近年、他社でアレイ式探傷装置の導入が進みつつある。その代表的なフェイズドアレイ法は所定の複数素子群を使って偏角+集束ビーム形成、1断面探傷において素子群の位置と偏角を切り替え（電子スキャン）しながら送受信を行う。この場合、1断面の探傷に複数回送受信を繰り返さなければならないが、繰り返し周期を早くしすぎると、前回送受信時に生じた超音波の材料内での散乱波が残留し、次回送受信時の探傷時のノイズになる“残響エコー”が問題となる。そのため、繰り返し周期を一定値より上げることができず、検査速度が頭打ちになる。

そこで、検出性能と検査速度の両面の向上を図るために、アレイプローブを用い、送信に拡散ビーム制御、受信に開口合成処理を組み合わせた方式（以下、新開口合成法）を考案した。送信時は、アレイプローブの遅延制御によって材料のある一点から遠方で拡散するようなビームを形成させる。拡散ビームによって広範囲が探傷可能になるだけでなく、垂直成分、 $+L$ 、 $-L$ 斜角成分を有することから、棒鋼USTに必要な3つの探傷方向を一回の送受信で実現で

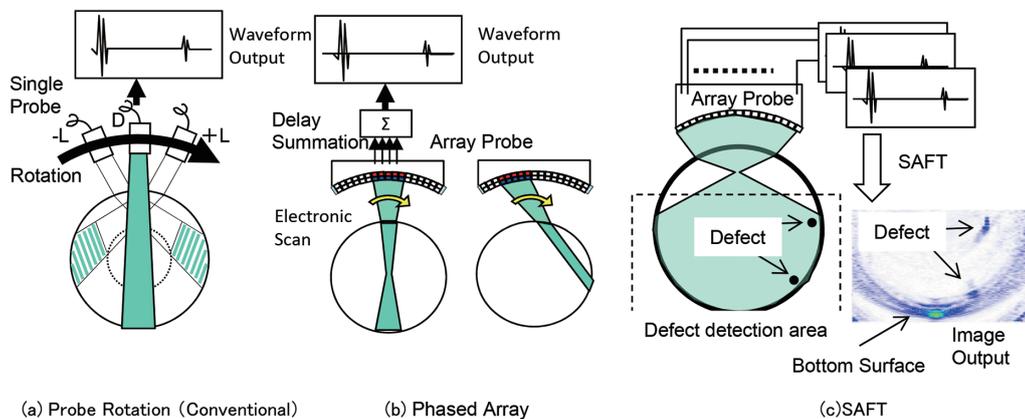


図5 丸棒鋼超音波探傷器の探傷方法
Testing method of ultrasonic inspection

きる。1断面探傷に十数回の送受信が必要なフェイズドアレイ法に比べ、検査速度向上に関して大きな利点である。

きずエコーは円筒状に広がりながら伝搬するため、開口の大きいアレイプローブで受信することで、CH毎に異なる位置で多数の探傷波形を得ることができる。そして得られた多数の探傷波形に、被探傷空間の任意の位置に集束効果をもたらす開口合成処理を適用することによって検出能、Signal/Noise (SN) 比の向上を図った。開口合成処理は、膨大な量の演算を必要とするが、近年の演算デバイスの発展により性能、コスト面で既に実用レベルにある。

4.3 開口合成の処理について

開口合成の信号処理手段について説明する。探傷時の材料形状と振動子の相対的な位置関係、また各媒質の音速を既知とすると、受信波形上の各欠陥信号は材料中のどの位置から到来したものであるかを推定できる。例えば図6のアレイプローブが持つN個の振動子のうち、端から数えて1番目の振動子（その振動子を1CHとする）の探傷信号において、伝搬時間が全てT1(s)となるような場合、曲線上

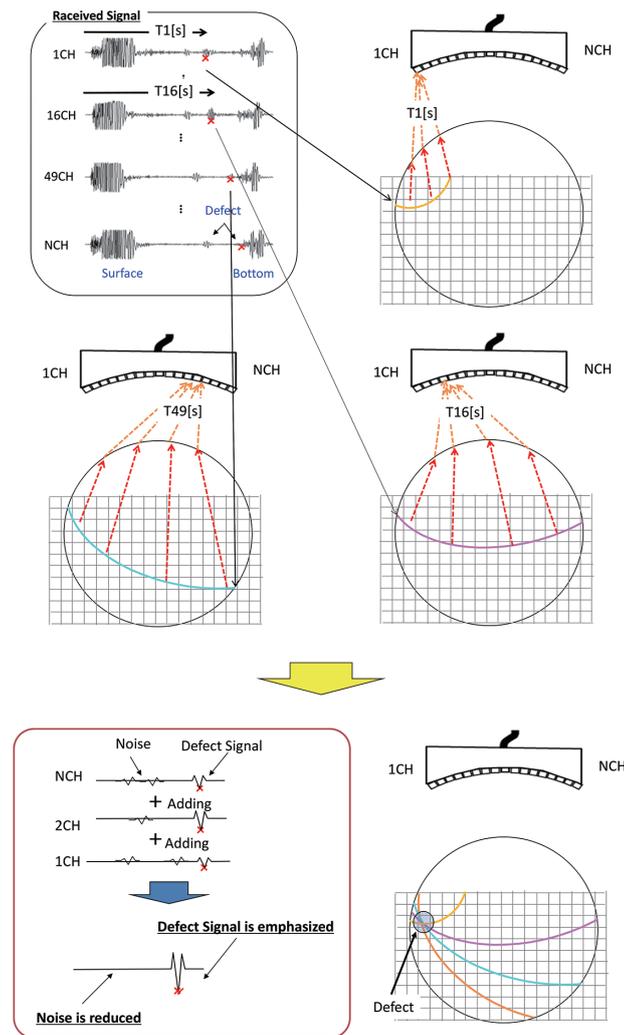


図6 開口合成法の信号処理
Synthetic aperture focusing technique

の何処かに欠陥が存在すると推定できる。従って、1CHから取得した欠陥信号のT1(s)における振幅値を、被探傷空間に予め設けた分割メッシュ内のある一意の曲線上のメッシュに加算する。次に、端から数えて16番目のプローブ（その振動子を16CHとする）についても同様の考え方を適用した場合、16CHについてもある一意の曲線上に欠陥が存在すると推定できる。

全てのCHで当該処理を適用すると、ノイズについては、出現位置が不規則であるため、各メッシュに加算されると打ち消し合い平滑化されるが、欠陥信号については各メッシュに加算される毎に値が大きくなり、強調される。結果的に被探傷空間の実際にきずのある位置のメッシュの強度が大きくなり2次元の画像として表現される。これらの処理は任意の被探傷空間のあらゆる位置に集束効果をもたらすことから広範囲で高い検出能、高SN比(S/N)を実現できる。

4.4 開口合成の校正方法について

アレイプローブの遅延制御により拡散伝搬させた超音波の被探傷空間内における音圧分布は一樣ではないため、同一寸法のきずであっても、その存在位置に応じてきずエコーの強度が異なるものと考えられる。したがって、開口合成によって得られた像においても、きず像に対応する画素領域の強度は、同一寸法のきずであっても被探傷空間のきず位置によって異なるものと考えられる。そこで、開口合成像を用いた探傷において同一寸法のきずに対応する画素領域の強度が位置によらず一定となるように、2次元の距離振幅補正(2-Dimensional Distance Amplitude Correlation: 2DDAC)のための新たな校正方法を考案した。

具体的な手順を図7に示す。長手方向及び径方向に異なる複数(例では4つ)の位置に同一寸法の人工きずを設け

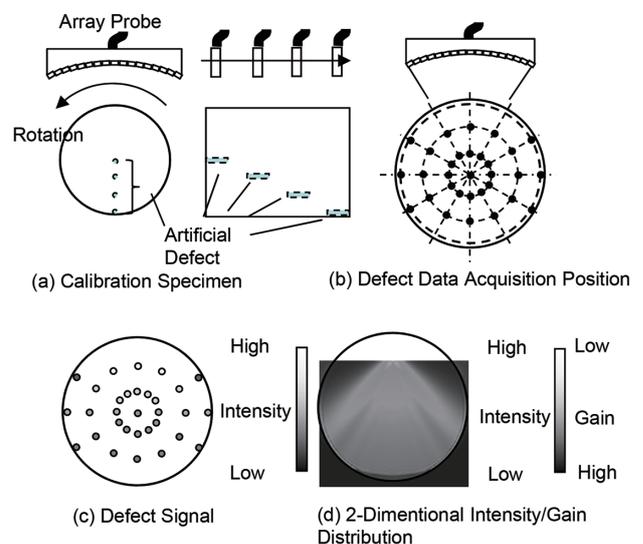


図7 開口合成法の校正方法
Calibration method for synthetic aperture focusing technique

た校正用試験体（図7(a)）を周方向に回転させ、所定の回転ピッチ毎に人工きずを探傷する。この際、各人工きずに応じてアレイプローブの位置を試験体の長手方向に移動させて探傷する。結果的に探傷することになるきずデータ採取位置を図7(b)に示す。それぞれの人工きず探傷の結果、生成される開口合成像を重ね合わせて、全ての人工きずに対するきず信号強度の像（図7(c)）を得る。図7(c)に示す像は、各人工きずに対応する画素領域の強度のみを示す離散的な強度分布であるが、隣り合うきず間の強度が連続的に変化すると仮定し2次元の補間法を適用することにより、各人工きずに対応する画素領域以外の強度が算出され、2次元の連続的な強度分布（図7(d)）が得られる。

これは横断面における任意の位置に同一寸法の人工きずを設けた場合に得られる開口合成像の強度分布を示すことに相当する。当該強度分布を均一にすることができるような各画素の補正量（各画素の強度に乘算すべきゲインや加算すべきオフセット）を算出し、この画素毎に算出した2次元補正量分布が2DDACとなる。このようにして予め作成された2DDACを被検査材の探傷結果の開口合成像に適用し、補正後の開口合成像に基づいてきず検出・判定をすることで、きずの位置やプローブ性能のばらつきによる強度変動を抑制した安定探傷を実現した。

4.5 総括

上述した新開口合成法を実機に適用することで、製品径50mmの材料中心部0.3mm径の横穴をSN比>11.9以上で検出可能なことを確認して、現在はオンラインにて安定操業中である。

5. 製品仕分立体倉庫の導入

特殊鋼棒鋼は検査・結束後、配船のタイミングに合わせて出庫されるまでの期間は工場内に在庫される。従来は、検査、精整を行った順に天井クレーン操作により平積在庫されていたため、揚港に合わせて出庫する際、1束ずつ在庫製品の配置替えの必要があり、過度のハンドリングによ

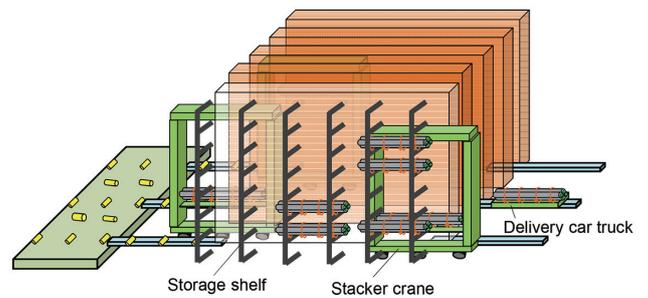


図8 製品仕分立体倉庫の概要
Automatic bar warehouse

表3 棒鋼製品仕分立体倉庫の主仕様
Main specification of automatic bar warehouse

Item		Specification
Product	Size	Round bars 18–120 mmφ
	Length	3.5–8.0 m
Number of racks		742
Unit weight		Maximum of 2.3 t and average 1.8 t
Storage capacity		4006 t
Receiving and retrieving rate (t/h)		Receiving rate of 140 t/h and retrieving rate of 140 t/h

る製品の曲がりやきずの懸念があった。このため導入した製品仕分立体倉庫は3台のスタッカークレーンを用いて、保管棚から製品を自在に出庫可能なため、天井クレーンでのハンドリング回数を最小限（1ハンドリング）に抑えることが可能になり、製品の曲がりや接触によるきずの発生を減少させることができた（図8、表3）。

6. 結 言

本稿では、棒鋼製品の出荷品質及び生産性向上を目的とした設備改善事例について紹介した。一方、顧客からの品質要求は年々高度化しており、本改善対策をベースに更なる品質保証体制の強化に取り組んでいきたい。今後も更なる技術開発に尽力し、顧客信頼の維持向上や同業他社との差別化を進めていき、新日鐵住金棒線事業の発展に努めていく所存である。



竹内良太郎 Ryotaro TAKEUCHI
八幡製鉄所 棒線部 棒線圧延技術室
福岡県北九州市戸畑区飛幡町1-1 〒804-8501



上田佳央 Yoshio UEDA
プロセス研究所 計測・制御研究部
主幹研究員



小久保浩一 Koichi KOKUBO
八幡製鉄所 棒線部 分塊工場 課長



木村祐介 Yusuke KIMURA
八幡製鉄所 設備部 システム制御技術室
主査