

(技術資料)

製鉄・非鉄用圧延設備における近年の事例紹介

黒田直行^{*1}・細川晴行^{*1}・前田 剛^{*1}・赤川正憲^{*1}・宮園太介^{*1}

Recent Status of Ferrous and Non-Ferrous Rolling Mills

Naoyuki KURODA・Haruyuki HOSOKAWA・Go MAETA・Masanori AKAGAWA・Taisuke MIYAZONO

要旨

機械事業部門のメニューである圧延機やその上流側や下流側の設備の設計では、各お客様の操業ノウハウや様々なニーズに、真摯に向き合い具現化していく必要がある。本稿では鉄鋼用圧延設備において、操業停止期間を最短化するための工事期間の最短化の工夫、老朽化更新時の省エネ設備の提案、さらにお客様が希望する設備仕様に応えてきた事例を紹介した。また非鉄の箔圧延機では、箔の自動形状制御の高精度化ニーズに対し、制御モデルを非線形に改良し、熟練オペレータの制御修正ノウハウを機械学習させアクチュエータのプリセット精度を向上させることで、定常部の平坦度が約10%改善し、先端形状の修正時間が半減した事例を紹介した。

Abstract

The Machinery Business Division produces rolling mills and their upstream and downstream apparatuses, the design of which requires thorough consideration and realization of each customer's operational know-how and needs. This paper introduces ideas for minimizing construction time to reduce shutdown periods, proposals for energy-saving equipment when updating aging facilities, and cases of responding to customer-desired equipment specifications in rolling mills for steel. In the case of a non-ferrous foil mill, the control model has been improved to be nonlinear in response to the need for high-precision automatic shape control of foils. This has included machine learning of the control correction know-how of experienced operators to improve the precision of the actuator presets, which has in turn resulted in an improvement of approximately 10% in the flatness of the steady state portion and a halving of the tip shape correction time.

検索用キーワード

圧延機、棒鋼、線材、多段圧延機、シャー、KTミル、機械学習、AI

ま え が き = 電炉を利用した製鉄・非鉄産業は、生産された製品がその役目を終えスクラップとなり、また製品に戻る、リサイクルプロセスとして長きにわたり成立している。そのプロセスの一部である圧延機やその上流側・下流側の設備においても、近年のお客様のニーズである効率化・省エネ・DXをキーワードにさらに改良が続けられている。本稿では機械事業部門のメニューである圧延機やその前後設備において、休止期間の最短化や製品品質向上というお客様の様々な要望を具現化してきたので、その近年の取組み事例を紹介する。

1. 線材・棒鋼用圧延設備の事例

本設備における近年のお客様のニーズとして、大規模な設備更新でも極力生産を継続しながら導入する計画や、設備更新時に併せた省エネ化の計画が挙げられる。

1.1 操業を極力継続しながらの設備更新工事

鉄鋼圧延では24時間の連続操業が通常であり、設備更新の工事期間は、生産計画で許される期間内に留めることが要求される。

操業を続けながら半連続式の旧式圧延設備の空きスペースに最初の数スタンドを設置し、短い休止期間(切換・試運転)を経て設備を立ち上げ、不要となった設備の撤去跡につぎの数スタンドを立上げる。このように短い休

止期間の工事を数回繰り返し完成させる方法がある¹⁾。

また、立上げリスクが複数回に及ぶのを避けたいというお客様に対しては、全ラインの操業休止期間を無負荷・負荷試運転含めて一回で行うこともある。その例として、中間列以降が冷却床を含め二系列あるラインにおいて適用した工事例について紹介する。図1に事前工事中のパスラインと工事写真、図2に更新後の機器配置を示す。

- (1) スリット圧延²⁾を導入することで中間の片系列を撤去(図1-①②)
- (2) 着脱可能な仮設誘導装置による圧延ラインの確保(図1-③)
- (3) 三回の計画定期修理期間で既設基礎撤去・掘削と架構による既存設備仮受(図1-④、⑤)

これにより、粗列～中間列の機器設置と仕上列スタンド廻りとコールドシャの基礎構築までを約8箇月の事前工事で完了した。ホットラン調整5日間を含め52日間の休止期間で加熱炉を除く全圧延ラインを更新し設備を立上げた(図2)。

1.2 圧延効率向上の提案

生産性向上を目的に設備増強の検討を依頼された場合、お客様の検討案を具体化することもあるが、当社より代案を提示することも少なくない。

^{*1} 機械事業部門 技術本部 産業機械技術部

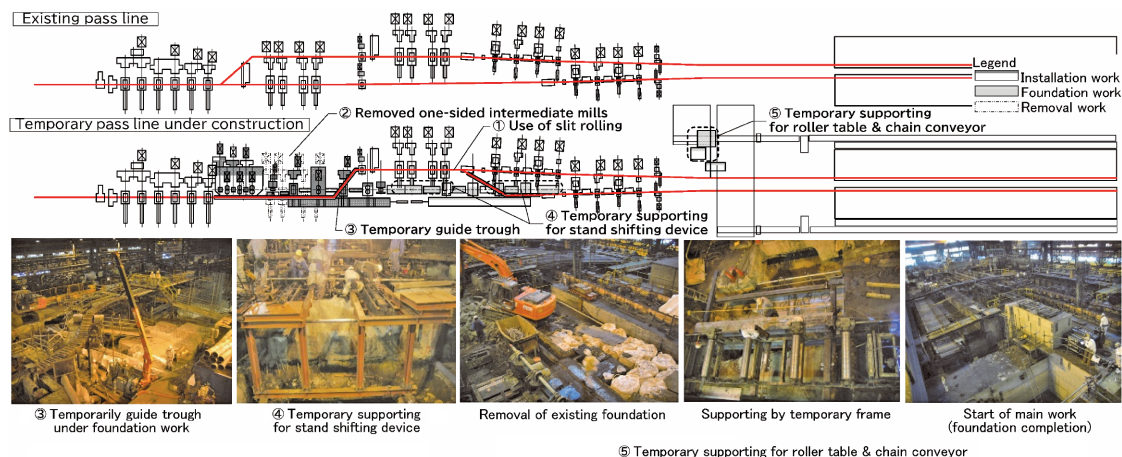


図1 事前工事中のパスラインと工事写真
Fig.1 Pass line and photos of preliminary construction

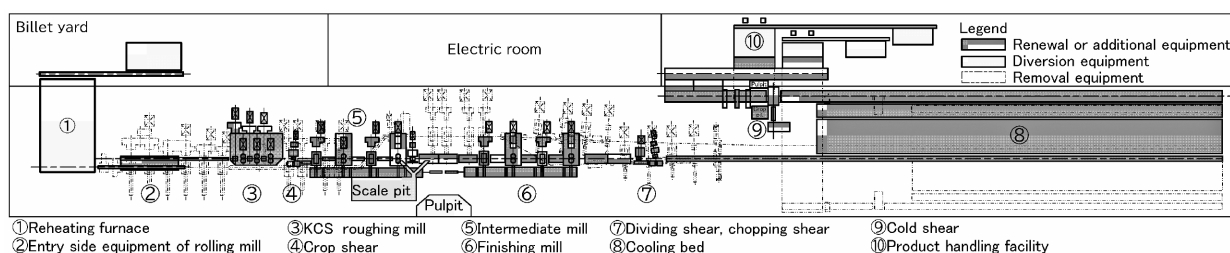


図2 更新後の機器配置
Fig.2 Update layout

小形鋼圧延設備において、製品サイズアップに伴う駆動トルク増強を要求された例がある。対象とした工場のパススケジュールと機器更新範囲の関係を図3に示す。一般的に連続圧延設備の駆動系トルク容量は上流から下流に向かって小さくなるので、最終圧延を1スタンド上流で仕上げることを提案した。中間列入側材のサイズを大きくする必要があったので、上流に1スタンドを増設する計画とした(図3 Plan B)。

その結果、多くの更新が必要となる当初案(Plan A)に対し、12スタンド中1スタンドの電動機・減速機更新だけの工事(Plan B)で要求に応えることができた。

また、同時に導入された分割シャー最適切断制御では、秤量器を新設し素材重量で仕上圧延長を予想するシステムの要求があり、最終分割切断の前に圧延が終了するスタンドのパルスカウントを使用するシステムを提案し採用いただいた。

1.3 電源容量の最適化

主電動機は一番負荷の高い圧延サイズに対して容量を決定している。その他のサイズの負荷が全てのスタンドで最高になることは通常無いため、圧延に要する総仕事率(kW)の最大値は、主電動機の容量の総和より下げることが可能である。圧延サイズごとに必要な総仕事率を検討し、数台のコモンコンバータにインバータを最適配置することで、コモンコンバータやトランス容量など電源容量を減らせるので大きな原低効果がある。最適な動力仕様を提案することは、電動機の更新工事においても当社のようなミルメーカーが選ばれる理由の一つである。

STD No.	Existing Product size	Existing & additional size			
		Plan A		Plan B	
		○ is renewal	○ is renewal	○ is renewal	○ is renewal
M0H	From roughing mill				
M1H					
M2V					
M3H					
M4V					
M5H					
M6H					
F1V					
F2H					
F3H					
F4H					
F5H					
F6H					

図3 パススケジュールと機器更新範囲
Fig.3 Pass schedule and equipment update updates

1.4 電機品交流化更新の具体事例

2024年に、棒鋼・線材を生産するお客様に対し、主機直流電動機10台と補機直流電動機2台を交流電動機に変更し、制御PLC3台を更新した具体事例を紹介する。

お客様から20日間の操業停止期間を利用して、設備を更新したいとの要請を受け、更新方針の検討を行った。電動機を交流化更新するため、電動機自体の入替に加えて、受配電機器やケーブルの大幅な更新も必要である。コントローラ、ドライブ装置の入れ替え後の試運転調整まで含むと、全機器を一度で更新する案は期間的に

成立しない。そこで、制御コントローラの機能で区分を切り分けて、既設のコントローラとドライブ装置を半分残して更新する案を提示した。その事例では既設電気メーカーが制御コントローラやドライブ装置の事業から撤退しており、更新後は新旧設備のメーカーが混在することになる。コントローラ間で通信が成立するか、指定された期間中にライン全体で機能が満足できるか、確実に設備を立ち上げられるかなど、様々な問題が考えられた。そこで既設コントローラとの通信実績を有し、既設制御機能を満足する改造を実施できる電機サプライヤを当社で選定した。当社が、設計から製作、検査までトータルでエンジニアリングを行った結果、ほぼお客様の要求どおりの期間内で設備の垂直立上げを達成した。

2. 600 tonf大せん断設備の納入事例

特殊鋼製造ラインの中間圧延の前工程に高温矩形断面鋼片のクロップを切断する大せん断設備および前後搬送設備を納入した事例を紹介する。この設備は、お客様から要望を受けた多種の鋼種および断面サイズの鋼片を切断する約600 tonfの切断能力を有した油圧駆動式切断機である。600 tonf大せん断設備本体図を図4に示す。

2.1 お客様の要求仕様に応える提案

本案件は他社製既設切断機の老朽化に伴う更新案件であり、既設機の操業を止めずに切断機を更新するために

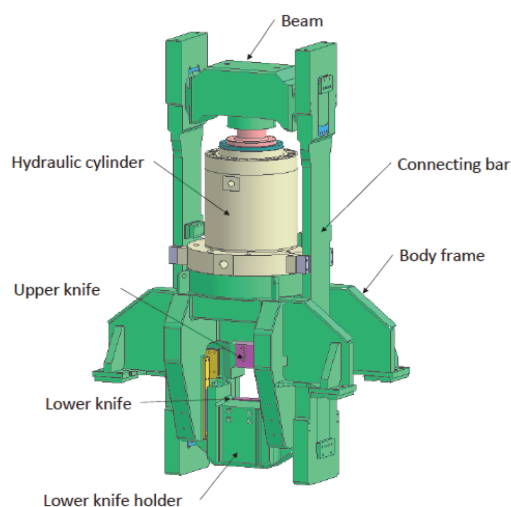


図4 600 tonf大せん断設備本体図
Fig.4 600 tonf Hydraulic shear (shear proper)

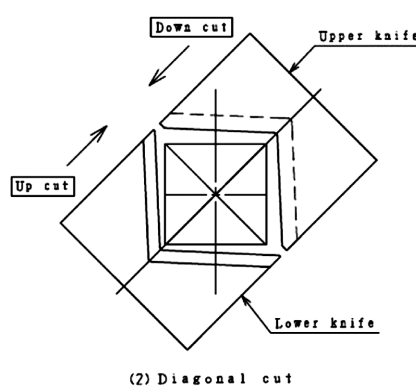
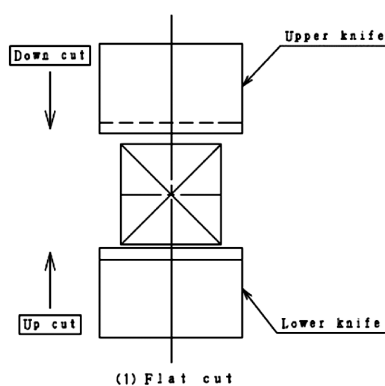


図5 切断方式
Fig.5 Cutting Type

既設備に隣接する空きヤードに新切断機を増設、既設製造ラインと接続した。既設切断機は電動駆動式切断機であったが、お客様は設備のコンパクト化およびメンテナンス性を考慮し、油圧駆動式切断機の導入を希望した。

設備設計においては、既設製造ラインとの接続、生産性（サイクルタイム）、製品品質、設備保護、メンテナンス性などの要求をお客様から受け、当社はこれらの要求を具現化するために検討・提案を繰り返し、設計の完成度を高めた。その一例を次節に記す。お客様の要求を満たした本設備は納入後順調に稼働中である。

2.2 技術紹介

2.2.1 油圧切断機の形式

油圧切断機の切断方式は、下刃を上方へ作動させるアップカット式、上刃を下方へ作動させるダウンカット式がある。ダウンカット式の場合は、鋼片をサポートしている周辺設備も上刃に同調して作動する必要があり、設備構成は比較的複雑となるが、切断時の鋼片の曲がりを抑制できるメリットがある。いっぽう、アップカット式は周辺設備の同調機構が不要であり、初期投資や設備メンテナンスの点でメリットがあるため、本案件ではアップカット式を提案し採用された。

また切断方向には、切断刃を鋼片上下面と平行にしてストロークするフラットカット式と、矩形鋼片の対角方向にストロークさせるダイアゴナルカット式がある。ダイアゴナルカット式の方が切断面の変形は小さいが、フラットカットの方が切断ストロークを短くできる利点がある。お客様と協議した結果、次工程の中間圧延では切断面の変形は問題にならないことからフラットカット式が採用された。切断方式の説明図を図5に示す。

2.2.2 クロップ測長方式

切断するクロップ長さは、鋼片の末端形状により様々な長さに設定される。当社が通常納入する従来設備では、鋼片を搬送するローラテーブルの駆動ローラにパルスジェネレータを設置し、ローラ回転数から鋼片の搬送量を測定・制御することで、所定のクロップ切断位置に送っていた。しかし、この方法では鋼片とローラ間にスリップが発生した時に切断長さに誤差が生じてしまう。お客様から新たなクロップ測長方法を導入するよう要望を受け、鋼片端面位置をレーザ距離計で測定し、クロップ長さを制御するオプション機能も併せて納入した。

3. 硬質箔用多段圧延設備における自動形状制御の高精度化

高強度極薄板の圧延においては、平坦度と表面光沢において厳格な品質精度が求められる。このため、多段(クラスター型)圧延機による小径ワークロールでの操作が広く採用されている。

当社の多段圧延機(KTミル)は、小径ワークロールを用いた極薄、硬質材料を効率的、かつ安定的に生産することを目的とし、中間ロールのラテラルシフト、クラウン押出し機構、チルト機構などの多数の形状制御アクチュエータを備えている(図6)。

さらに、圧延機の入出側に形状検出ローラを装備し、自動形状制御システム(AFC)を適用することで、平坦度の高品質化と省人化のニーズに応える設備を提供している。

3.1 高品質・生産性の高い操業ノウハウのシステム化

通常の操業では、全てのオペレータが均質な製品を生産するのは困難で、豊富な経験とノウハウを身につけた一部の熟練オペレータに依存しているのが実態である。

属人化を解消する設備側の代替手段としては、当社は従来から形状影響係数と最小二乗法に基づく線形制御モデルを用いた自動形状制御システムを提供してきた³⁾。

しかし実操業において、材料の板厚や圧延荷重などが大きく変化する場合、形状制御用アクチュエータを手動で補正する場合があります、板形状の安定収束性向上が課題となっていた。

この課題を解決するため、最新の機械学習技術と圧延理論に基づく数理モデルを組み合わせ、熟練オペレータの感覚に近い自動形状制御モデルを開発した。

3.2 技術紹介

3.2.1 非線形影響係数推定⁴⁾

従来の形状制御モデルでは、特定の圧延操業条件において、アクチュエータ動作量と形状変化量は線形関係にあると仮定し、独立した制御パラメータと定義していた。

いっぽう、実際の操業では、圧延材先端部では圧延速度の加速に伴い摩擦係数が変化し、初期圧延荷重も変化する。このため、油圧圧下シリンダが動作して荷重を一定に保つ必要があり、板形状に悪影響を及ぼすケースが

確認されている。

従来、線形形状影響係数の算出モデルは、各アクチュエータの単位動作が板形状に与える影響を幅方向の影響係数分布として多項式近似によりモデル化してきた。いっぽう、アクチュエータが大きく移動し、圧延荷重が大きく変化する場合には、このモデルでは限界がある。そこで、最新のモデルでは、圧延荷重等の影響を考慮した非線形形状影響モデルを採用した。加えて局所外れ値因子法(Local Outlier Factor: LOF)を適用し、圧延パス終了ごとに実績データから影響係数分布を動的に推定して、各制御アクチュエータの動作量と板形状の変化量を正確に反映する方式を開発した。

本手法により、外乱を受けた異常なデータが効果的に排除され、正確かつ妥当なアクチュエータ位置での形状影響係数の抽出が可能となった。

図7に中間ロールシフトでの実例を示す。

3.2.2 各制御アクチュエータのプリセットモデル⁴⁾

圧延先端部の非定常状態と前パスから当該パスへの材料の加工硬化に伴う圧延荷重変化を考慮し、圧延開始前に各アクチュエータを事前に適切な位置に設定すること(プリセット)は、圧延材全長にわたる操業の安定化に有効である。適切なアクチュエータ位置の設定は、経験や熟練度に基づく操業オペレータの感覚に依存しており、物理モデルだけでは正確な予測が難しいとされてきた。

一般的に、安定している前パスの圧延荷重(P_{prev})から当該パスの定常状態の圧延荷重変化量(ΔP_1)を推定し、つぎに当該パスの先端部と定常状態の圧延荷重変化量(ΔP_2)を推定する(図8)。これら ΔP_1 および ΔP_2 は、従来はオペレータのノウハウに依存していたが、過去の圧延実績データを用いた機械学習により、圧延荷重を予測できるモデルを構築した。

このモデルにより、前パスの荷重実績を基に当該パスの先端部荷重の増分($\delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$)を高精度で予測することが可能となる。また、従来は前パスの尾端部の板エッジ部の形状からオペレータ判断によるアクチュエータプリセット方式が一般的であったが、本方式は前パスと当該パスの目標形状の差異を取り込み、総合的に形状偏差を最小化するアクチュエータ位置とすることを実現している。これにより、前パスの圧延荷重(P_{prev})か

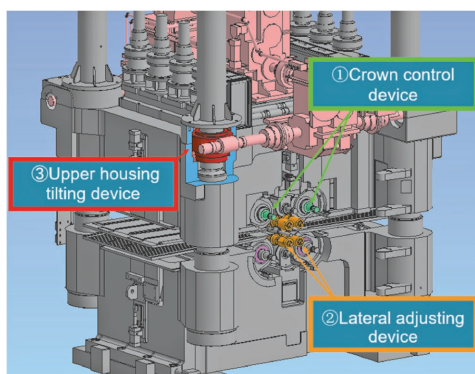


図6 多段圧延機(KTミル)の形状制御アクチュエータ
Fig.6 Actuators of flatness control for multi-high rolling mill (KT mill)

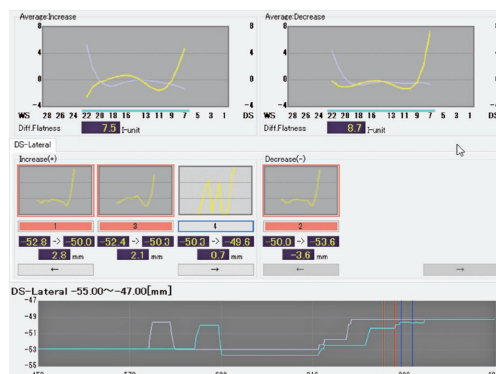


図7 中間ロールシフトの影響係数における局所外れ値除去システム
Fig.7 Remover local outlier of lateral shift for flatness influence

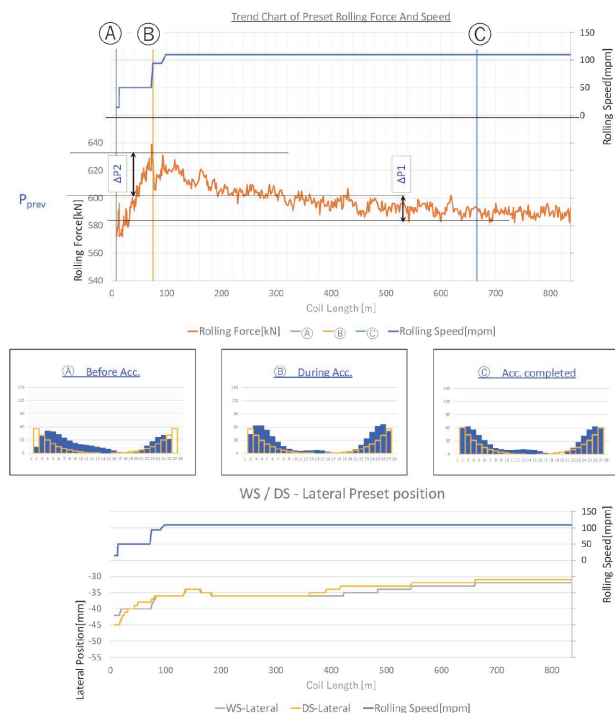


図 8 システム適用後の圧延荷重と圧延速度における平坦度の相関図
Fig.8 Flatness correlation between rolling force and speed after system application

ら現パスの最先端部荷重にラテラル基準位置 (L_{ref}) を初期設定し、荷重変動の予測と形状偏差が最小となる最適なアクチュエータ初期位置を機械学習にて予測することが可能なモデルが完成した。

これらの技術を組み合わせて、当社製圧延機において機能の効果を検証したところ、定常部では平坦度が約10%改善し、先端部分形状の適正精度への収束時間を半減させることが確認できた。

むすび＝製鉄・非鉄機械は、お客様各社の操業技術を設備に反映するため、ほぼオーダメイドにならざるを得ない。お客様のニーズは各社様々であるが、本稿では休止期間の最短化・省エネ・設備仕様要求・製品品質向上に関する近年の実施例を紹介した。

当社の設備が選ばれ続けるためには、これからもお客様のニーズに真摯に耳を傾け、設備として具現化していく必要がある。引続きお客様に寄り添いながら、製鉄・非鉄業界の発展に貢献していく所存である。

参 考 文 献

- 1) 黒田直行ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.2, p.7-11.
- 2) 西垣内徳生ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.2, p.64-68.
- 3) 宮園太介ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.67, No.2, p.39-43.
- 4) 逢坂武次ほか. 材料とプロセス. 2025, Vol.38, p.75-77.