技術展望・技術解説

圧延の制御技術*

岡村 義英**

Control Technologies for Rolling*

Yoshihide Okamura**

1. はじめに

圧延における制御技術については、板圧延を中心と して寸法や形状精度の要求レベルの高度化に応じて、 圧延設備や成形加工技術などの発展とともに導入,開 発がなされてきた。我が国においては、1960年代後半 の鉄鋼での厚板圧延機での制御技術導入に始まり、そ の後の制御理論の進展や計算機能力の飛躍的な向上と 相まって、圧延材造り込みに必要となる制御技術が大 きく発展してきた¹⁾。このように圧延における制御技 術は、高強度、高機能化が要求される材料制御におい て不可欠な技術となっている。一方で近年では, Industrie 4.0などの第四次産業革命といわれる技術革 新が進展する中で, IoT (Internet of Things) による「も のづくり」のあり方が大きく変化しつつある。材料造り 込みに直接関わるプロセス制御技術についても、今後 IoTなどをどのように活かしていくかが重要となって くる。本稿では板圧延における制御技術について、主 要な製造工程である熱間圧延、冷間圧延を中心として、 材料造り込みに重要となる寸法・形状制御や、その周 辺のプロセス制御技術の事例を紹介するとともに、今 後の展望について述べる。

2. 板圧延における各種制御技術

2.1 熱間圧延

熱間圧延ラインでの標準的なプロセス制御機能を Fig. 1に示す²⁾。制御機能としては、おもに圧延モデル にもとづくプロセス計算機での設定制御機能、それよ り下位に位置する制御コントローラでの全長制御とな る、ダイナミック制御機能などで構成される。熱延で の材質制御においては、特に圧延初期における設定制 御、品質や機械的性質を決定づける寸法制御や温度(冷 却)制御などが重要となる。また製造条件の厳格化に伴 い、安定した圧延状態を維持するための操業安定化制 御も大変重要となっている。

設定制御については、我が国においては古くから計 算機を用いた制御が行われており、圧延理論にもとづ く物理的モデリングの高精度化が行われてきた。一方 で近年の計算機技術の飛躍的な発展により、大量の操 業データにもとづいて、必要となるタイミングで局所 回帰モデルを構築する手法も提案されている³⁾。この



Fig. 1 Process control function for a hot strip mill²).

^{*} 塑性と加工, 58 (2017), 352-356.より転載。

This review is reprinted from Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, **58** (2017), 352-356. ** (株) UACJ 技術開発研究所 第三研究部,博士(工学)

Research Department III, Research & Development Division, UACJ Corporation, Ph. D. (Eng.)

ような手法においては、局所回帰にどのようなデータ を用いるかによってモデル精度が左右される。そこで、 設定制御における物理モデルの誤差を局所回帰モデル で推定するに際し、アンサンブル学習の考え方を用い ることで、設定制御用モデルの高精度化を図る手法が 開発された⁴⁾。本手法の概要を**Fig.2**に示す。本手法 では、操業データベースの中から今回の操業条件に類 似する複数のデータセットを抽出して、複数の局所回 帰モデルを導出する。そして、それぞれのモデルの推 定値を加重平均することで、モデル誤差推定値を得る ことに特徴がある。

本手法は、Fig. 3に示す厚鋼板加速冷却での冷却停 止温度制御に適用された。ここでは温度予測モデルに よる計算温度と目標冷却停止温度が一致するよう、冷 却装置内の鋼板搬送速度や冷却水量を操作する設定制 御が実施される。本手法を用いて冷却停止温度制御を 実施した結果、Fig. 4に示すように、冷却停止温度予 測精度が従来法の12.1℃から10.9℃へと約10%向上し た。また従来法の課題となっていた、データ数が少な い製造条件での精度は、19.5℃から16.8℃へと約14%向 上することも確認されている。

熱延工程においては、その後の製品形状を左右する



Fig. 2 Outline of the proposed adaptation method⁴⁾.



Fig. 3 Layout of the plate mill⁴.



Fig. 4 Comparison of prediction accuracy of finish cooling temperature ⁴.

寸法造り込み技術として、特に板プロフィル制御が重 要となる。近年の地球環境への負荷軽減を背景として、 例えば自動車における燃費改善や衝突時の安全性向上 の観点から、軽量化と高強度化の両立が要求されてお り、高張力鋼(いわゆるハイテン)などの高強度材の適 用が拡大している。このような高強度材においては、 通常材に比べて変形抵抗が大きくなり、圧延荷重が増 大して圧延ロールなどの変形量も大きくなることから、 板プロフィルを高精度に制御することが困難となる。 このようなハイテンと通常(軟鋼)材の高効率な混合圧 延を実現するため、オンライン使用可能な高精度板プ ロフィル予測モデルが開発された⁵⁾。本手法は**Fig. 5** に示すように、板プロフィル変化がない場合の荷重、



Fig. 5 New rolling load and tension distribution prediction model⁵.

張力分布を基準として,板プロフィル変化による変動 分を加味するという計算手法である。なおδWは幅端 部の圧延荷重減少領域を表す。

本モデルを用いて,高荷重となるハイテンと低荷重 の軟鋼との混合圧延実現に必要となるクラウン制御能 力が検討された。その結果,荷重変動が大きくなる熱 延仕上前段スタンドにおいて,大きな制御能力が必要 となることが明らかとなった。これらの技術,知見を 活用した,ハイテンと軟鋼の混合圧延の実機での事例 をFig.6 に示す⁵⁾。Fig.6より板幅・板厚・鋼種が混合 し,一本毎に圧延条件が大きく変化しているハイテン と軟鋼の混合圧延下においても,板端25 mm 位置の熱 延仕上出側板クラウン目標値と実績値の偏差は,おお よそ±20 µm の精度で制御できており,軟鋼単独の圧 延時と同等の板クラウン制御精度が得られることが確 認された⁵⁾.

一方で前述のハイテンのように高圧延荷重となる場 合や、歩留向上の観点から、より平坦な(クラウンの小さ い)板を圧延するような条件では、板の蛇行が生じやす くなる^{5).6)}。**Fig.7**に蛇行現象のブロック線図を示す⁷⁾。 ここで1/sは積分器である。図で示されるように、蛇 行現象の特徴として、2階の積分器が存在するため立ち 上りは遅いが、蛇行量yから角速度ωへの正帰還ルー プが存在するため、一旦蛇行し始めると指数関数的に 発散する不安定な系である。特に熱延仕上圧延のよう なタンデム圧延機において、圧延材の尾端部が圧延機 を抜ける際に、尾端部の板張力が無張力状態となり、 蛇行が発生しやすくなる。

蛇行が発生すると、板の絞り込み(座屈した板が折れ 込んで圧延される状態)による不良や、圧延ロール疵(き ず)が発生することがあり、最悪の場合には板破断を引 き起こすなど、生産性を著しく阻害する。このような 蛇行を抑制すべく、従来から種々の蛇行制御が開発さ



Fig. 6 Example of the mixed scheduled rolling of high tensile strength and mild steel ⁵.



- y_{s} : Measured strip centerline deviation (+ : D.S., : W.S.)
- *y* : Strip centerline deviation at rolling stand (+ : W.S., : D.S.)
- *n* : Velocity distribution rate (+ : faster at D.S.)
- ω : Angular velocity of strip
- L: Distance between sensor and rolling stand
- v: Entry speed of strip
- d: Disturbance
- S: Roll gap difference (D.S. –W.S.)
- P: Load difference (D.S. –W.S.)

 K_{RA} : Influence coefficient from A to B

Fig. 7 Block diagram of the walking phenomenon⁷.

れている。代表的な制御方法としては、板が蛇行した 側の荷重が高くなる現象を利用して、板が蛇行した側 とその反対側の荷重の差を計測して、圧下レベリング や左右ロールベンダー圧力差などのアクチュエータを 操作してフィードバック制御する差荷重方式が用いら れてきた^{8)~10)}。しかし差荷重方式では、蛇行を生じる 要因が圧延前の板ウェッジ(幅方向の板厚差)であると、 本来制御すべき方向と逆方向の操作となってしまう場 合があること⁹⁾、また板幅が広くなるほど、適正な制 御ゲイン設定範囲が制限されてしまい、実用的な制御 効果が小さくなってしまう問題があった¹¹⁾。

そこで仕上スタンド間の悪環境下においても,蛇行 の高精度測定が可能な蛇行計が開発され,熱間薄板仕 上圧延における蛇行制御への適用が可能となった¹¹⁾。 また蛇行は鋼板が回転しながら並進するため,蛇行計 による蛇行量検出値y,は,制御量である圧延機位置の 蛇行量yとは異なる。この問題を解決するため,y,から モデルを用いてyを予測し,予測値を最適化するよう 圧下レベリング量Sを求める,モデル予測制御方式に よる蛇行制御が実用化された⁷⁾。本手法による実機適 用結果をFig.8に示す。モデル予測制御方式では,蛇 行量の増大に遅れなく追従できており,差荷重方式に 比べて蛇行量が大幅に改善されている。

2.2 冷間圧延

冷間圧延工程は,ほぼ最終製品を造り込むプロセス であり,特に板厚や形状など薄板の製品寸法を高精度 に制御することが,製品品質および生産性向上の観点 からも極めて重要となる。



Fig. 8 Example of the walking control⁷.

板厚制御については、圧延機のロールギャップを変 更して板厚を制御する圧下方式や、ロール速度を変更 して板に加わる張力を変化させて板厚を制御する張力 方式などの単一制御が古くから用いられている。一方 で圧延機における板厚変動と張力変動は相互に干渉す る系であるため、高精度な板厚制御を行うためには、 相互干渉の影響を考慮する必要がある。上述のような 単一の制御では、相互干渉による板厚や張力変動に十 分に対処できず、制御性能向上に限界があった。そこ で板厚・張力変動を多変数系としてモデル化し、制御 理論を活用した多変数制御方式の開発が進められてき た。特に1960年代に体系化された現代制御理論を始め として、その後のロバスト制御などの制御理論の進展 や計算機能力の飛躍的な向上とともに高精度制御技術 の開発が大きく進展した。ここでは冷間タンデム圧延 機における多変数制御方式の事例を紹介する^{12),13)}。本 方式は板厚と張力の相互干渉に積極的に対処するもの であり、現代制御理論にもとづく高精度板厚・張力制 御の先駆的な方式といえる。

本制御方式の概要を**Fig.9**に示す¹²⁾。対象とする圧 延機は2スタンドタンデム冷間圧延機であり,ここで は出側 (No.2) 圧延機の板厚制御を示している。本方式 では,板厚変動,張力変動および荷重変動の情報から,



Fig. 9 Multivariable gage control method ¹²).

圧延モデルを用いて板厚偏差および張力偏差の要因と なっている外乱 (ロールギャップ外乱およびロール速度 外乱)を推定し,推定結果にもとづいてロールギャップ およびロール速度を同時に制御する。本方式の実機適 用事例をFig. 10 に示す¹³⁾。従来の圧下方式では,加減 速部の板厚が大きく変動するため多段加速となってい たが,本方式により一気加速が可能となりオフゲージ 長も改善されている。

また冷間圧延における形状制御は,製品品質の確保 とともに,ひずみ不良による板の絞り込みや板破断な どを防止する操業安定性の観点からも重要であり,種々 の形状制御が開発されている^{14)~16)}。薄板圧延では板端 部(耳ひずみ)や中央部(腹ひずみ)の形状不良に加えて, 特にクォータバックルと呼ばれる板端近傍での局部ひ ずみが問題となることが多い。このような形状不良は ロールベンダーなどの油圧アクチュエータでは修正困難 であり,スポットクーリングなどのゾーン冷却制御が重 要となる。これまでにもゾーン冷却制御は種々開発され



てきたが^{17),18)},板形状変化予測にもとづく新たなゾー ン冷却制御方法が最近開発された¹⁹⁾。**Fig. 11**に本方式 の概念図を示す。制御開始後nステップ時における形状 偏差実測値 Δy_i を用いて,n+1ステップ後の第iゾーン形 状変化を、ゾーン冷却オン($\Delta u_i^n = 1$)またはオフ ($\Delta u_i^n = -1$)の場合に応じて形状変化モデルで予測(そ れぞれ $\Delta \hat{y}_i^{u=1}$ または $\Delta \hat{y}_i^{u=-1}$)し、予測値が目標とする形 状に最も近くなる吐出状態を選択して、冷却ノズルの 開閉操作を行なう。**Fig. 12**に本方式の実機適用例を示 す¹⁹⁾。本方式により、単純なオンオフ方式に比べて、 局部的なひずみ偏差が大きく改善されている。

一方さらに板厚が薄くなる箔圧延においては、箔厚 が数十 µm~となり、縦しわや破断が発生しやすくな るため、形状制御は極めて重要となる。圧延機におい ては、より小径のワークロール (WR) が用いられるこ とから、WR 胴長 / WR 径比が大きくなり、WR がたわ みやすくなる。また薄箔ではキスロールとなるような 圧延条件もあり、WRベンダーの効果が箔端部のみに 限定され、複雑な挙動を示す場合がある^{20),21)}。そのた めWRの軸芯たわみを2次曲線に近い形で制御するこ とが可能な、可変クラウンロール (Variable Crown Roll:以下VCロール)と併せて制御することが効果的 である²¹⁾。ただし、より高精度な形状制御のためには、 VCロールとWRベンダーとの間の相互干渉 (アクチュ エータの特性差)を考慮することが重要となる。そこ で、箔形状変化モデルにもとづいて、これらのアクチ ュエータの特性差および相互干渉を考慮した形状制御 システムが開発された²²⁾。方式では、箔形状変化を次 式のようなオンライン用制御モデルで記述し、VCロー ルおよびWRベンダーの相互干渉とともに、圧延荷重 変動の影響も考慮している。

$$\begin{bmatrix} \Delta \Lambda_{\nu} \\ \Delta \Lambda_{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\nu\nu} & K_{\nu b} \\ K_{b\nu} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{\nu} \\ \Delta P_{b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{p\nu} \\ K_{pb} \end{bmatrix} \Delta P$$
(1)

ここで $\Delta\Lambda_v$ は2次成分形状変化、 $\Delta\Lambda_b$ は4次成分また は8次成分形状変化、 ΔP_v はVCロール圧力変更量、 ΔP_b はWRベンディング力変更量、 ΔP は圧延荷重変動、 K_{ij} は圧延条件によって決まる係数である。**Fig. 13**に本方 式の箔形状制御の実機適用例を示す²²⁾。本実施例にお いて、従来方式では圧延初期での形状が安定せず、早 期に圧延速度を上げることが困難であったが、本方式 では圧延初期から形状が安定しており、最大形状偏差 も低く抑えられている。



Fig. 11 Concept of the new zone cooling control¹⁹.



Fig. 12 Practical result of the proposed method ¹⁹.



Fig. 13 Example of the flatness control for the foil rolling²²).

2.3 計測技術

制御を行う上で欠かせないのがセンシング(計測技術)である。特に熱間圧延のような過酷な環境下におい ても安定して計測できる、オンライン計測技術の開発 が大きく進展している²³⁾。例えばインライン形状測定 では、圧延スタンド間に設置されるルーパーロールを 分割して、各ロールに生じるトルクを測定することで、 板幅方向張力分布を近似して伸び差率を求めるルーパ ーシェープメータ²⁴⁾、LED光源により鋼板に投影された パターンを計測して平坦度を計測する、LEDパターン 投影方式平坦度計²⁵⁾、鋼板圧延後のランナウトテー ブル(冷却帯)内で、冷却水が大量に存在する環境下に おいても鋼板温度を高精度で計測可能なファウンテン パイロメータ²⁶⁾など、今後もプロセス計測技術の開発・ 進歩とともに、新たなセンサーを用いたオンライン制 御技術の開発がさらに進むことが期待される。

3. 今後の展望

板圧延における制御技術について、主要な製造工程 である熱間圧延,冷間圧延を中心に,寸法・形状制御や, その周辺のプロセス制御技術の事例を紹介した。冒頭 でも述べたように, 圧延制御の分野においても, 今後 IoTの進展によってBig Dataを利活用できる環境が整 備され, データサイエンスによる手法(統計学・機械学 習・データマイニングなど)の適用を図ることで, 圧延 に関する知識(理論)とデータ・情報を融合する動きが 加速していくものと予想される27)。またプロセス制御 においても、センシング技術の今後の進展と併せて、 これまで主流であった単一ラインのみの情報から、工 程(工場)間の情報を有効に活用することで、より高精 度, 高機能な制御の実現が期待される。IoTやAI, 制 御技術がさらに深化し融合が進むことで、例えば大量 のデータから情報を自ら選択して学習し制御を行うよ うな "AI圧延機" が、近い将来実現するかもしれない。

参考文献

- 1) 北村章, 西野都:鉄と鋼, 100 (2014), 1448-1455.
- 小原一浩,告野昌史,今成宏幸,佐野光彦,坂本匡:材料 とプロセス,28 (2015),432-435.
- 3) 茂森弘靖: JFE技報, 35 (2015-2), 8-13.
- 4) 角谷泰則,橘久好,児嶋次郎,中野孝一,磯部現,中川繁政: 材料とプロセス,28 (2015),440-443.
- 5) 福島傑浩, 鷲北芳郎, 佐々木保, 中川繁政, 武衛康彦, 焼 田幸彦, 柳本潤:鉄と鋼, 100 (2014), 1499-1507.
- 6)中島浩衛,菊間敏夫,松本紘美,梶原利幸,木村智明,田 川昌良:昭和55年度塑性加工春季講演会講演論文集,(1980), 61-64.
- 7) 中川繁政, 大塚敏之:ふえらむ, 16 (2011), 156-160.

- 8) 木村智明, 田川昌良:日立評論, 65 (1983), 115-120.
- 9) 古川洋一, 藤井昭吾, 田岡洋: 鉄と鋼, 78 (1992), T141-T144.
- 10) 岡村義英,星野郁弥:計測自動制御学会論文集,31 (1995), 1686-1694.
- 11) 鷲北芳郎,伊勢居良仁,武衛康彦,斎藤憲幸:鉄と鋼,95 (2009),43-50.
- 12) 星野郁弥,木村英紀:計測と制御,27 (1988),325-332.
- I. Hoshino, Y. Maekawa, T. Fujimoto, H. Kimura and H. Kimura: Automatica, 24 (1988), 741-754.
- 14)近藤勝也,大井俊哉,小峰一晃,竹本裕,伊山彰:塑性と 加工,33 (1992),241-246.
- 15) I. Hoshino, M. Kawai, M. Kokubo, T. Matsuura, H. Kimura and H. Kimura: Control Eng. Practice, 1 (1993), 917-925.
- 16) 安部可治, 関口邦男:電気学会論文誌D, 123 (2003), 1213-1218.
- 17) 服部重夫,水田篤男,山口喜弘,田宮進,辻邦夫:塑性と 加工,23 (1982),1238-1244.
- 18)前田英樹, 堺俊夫, 服部哲, 中島正明: 塑性と加工, 32 (1991), 136-140.
- 19) 堂前行宏, 岡村義英:計測自動制御学会論文集, 48 (2012), 193-198.
- 服部重夫,影山政夫,山口喜弘,松下富春:塑性と加工, 27 (1986), 632-638.
- 益居健,富澤淳,竹本裕,千田憲雄:塑性と加工,32 (1991), 464-469.
- 22) Y. Okamura and T. Ichikawa: SICE Annual Conference, (2002), 2821-2824.
- 23)本田達朗:日本鉄鋼協会第227,228回西山記念技術講座, (2016),11-32.
- 24) 金森信弥,末田茂樹,古元秀昭,林寛治,木ノ瀬亮平,馬 庭修二,大和田隆夫:材料とプロセス,27 (2014),576.
- 25)加藤朋也,中田武男,大杉正洋,伊勢居良仁:材料とプロ セス,24 (2011),888.
- 26) 植松千尋,本田達朗,橘久好,中川繁政,武衛康彦,阪上 浩一,高橋秀之,木村和喜:材料とプロセス,22 (2009), 1054.
- 27) 北村章: 材料とプロセス, 28 (2015), 428.



岡村 義英 (Yoshihide Okamura) (株) UACJ 技術開発研究所 第三研究部 博士(工学)