



## 入門講座

鉄鋼材料を作り込む計測技術—6

# 冷間圧延、表面処理の計測技術の基礎と応用

Fundamentals and Applications of Measurement Technology for Cold Rolling and Surface Treatment

下萩憲次

Kenji Shimohagi

スチールプランテック (株)  
エンジニアリング支援センター  
制御技術部 制御第3グループ  
グループマネージャー

## 1 はじめに

薄板と呼ばれる製品に至るまでには数段階のプロセスを経る。高炉/転炉、電気炉等で出鋼された溶鋼が鑄造設備で固められ、熱間圧延を経てコイル状に巻き取られ熱間圧延コイルが製造される。この熱間圧延コイルを金属の再結晶温度以下の温度で圧延することでより薄いコイルに加工するプロセスが冷間圧延である。冷間圧延されたコイルは圧延によって金属固有の加工硬化を起こし、加工性、成形性が悪くなる。しかし、この後、熱処理を行うことで、高い伸びをもつ加工性・成形性に優れた鋼板にすることが出来る。冷延コイルは焼鈍、溶融亜鉛めっき、電気めっきなどの熱処理、表面処理プロセスを経て冷延鋼板、溶融亜鉛めっき鋼板、電気めっき鋼板、電磁鋼板などの最終製品となる。

これら冷間圧延、表面処理を行う設備にはその過程で求められる様々な情報を監視する機能が求められる。多くの制御系にはそれら計測技術が使用され、現在の高級鋼板をつくる技術を補完している。

本稿では、計測という観点から冷間圧延に使用される計測技術、メッキ処理など表面処理を行う際に求められる計測技術を、その用途、原理、計測したデータのインターフェイスなどについて過去の成り立ちから最近の動向を含めて解説ものとする。

## 2 冷間圧延に求められる計測機器

圧延技術の発展は欧米が先行していたが1960年代に入り、粗鋼生産量の増加に伴い日本人研究者、技術者が圧延理論を実際の圧延に適用し、大いに成果を上げた。欧米では過去の経験(蓄積データ)をベースに計算機制御をシステム化したのが、日本では、蓄積したデータが無かったこともあり、圧延

理論をベースにした計算機制御システムが発展した。理論をベースにした圧延が発展したことから、新たな圧延条件に対してより柔軟な対応が可能となり、品質の安定化や市場競争力を当時、世界一位に押し上げた。この理論を現実に移す際には、圧延機、圧延ロールなどのハード技術、材料を作り込む冶金技術に加え、圧延状況を知る計測技術の発展も不可欠な要素となった<sup>1)</sup>。

冷間圧延には代表的な設備として年産10万トンから30万トンくらいまでの生産量の可逆式冷間圧延機と年産数100万トンを超える生産量の複数台のミルスタンドを擁するタンデム圧延機がある。可逆式冷間圧延機は、必要とする用地が狭くて済み、保守も容易であり、初期投資額を抑えることが出来ることから単圧メーカーなどで多く採用されている。一方、タンデム圧延機は、ある程度広い用地、複雑な設備に対するメンテナンス体制の構築、初期投資額も高価になるため多くは下工程に多くの設備がある大規模な冷延工場にて採用されている。

### 2.1 可逆式冷間圧延機(RCM;リバースコールドミル)(図1)

本設備には酸洗済熱延コイルを巻き戻すペイオフリール(POR)と出側でコイルを巻き取る出側テンションリール(TR)、また、再度巻き戻す入側TR、入側TRと出側TR間に位置する圧延機から構成される。コイルは複数回の圧延を入側TR、出側TR間で繰り返されることで求める鋼板厚みまで延ばされる。

この可逆式冷間圧延機では計装機器としては入出側に厚み計、張力計、形状計が設置される。

また、圧下制御に用いられるセンサーとしてシリンダーの移動位置を計測するロッドセンサー、マグネスケールなどがある。単体の圧延においては計測すべき変数となる要素は少ないため、計測点は簡潔になる。

2.2 タンデム圧延機 (TCM ; タンデムコールドミル) (図2)

コールドストリップミルは4-6台の圧延機がタンデム配置され、一方向に圧延される。コールドストリップミルの圧延因子としてはスタンド入側・出側板厚、板幅、スタンド間張力、圧延荷重、ロールギャップ、ロール速度、モーター特性、ロール径など計測可能な因子のほか、ミル定数、摩擦係数、材料変形抵抗などがある。

これらの圧延因子は全スタンドにわたるので、設備全体では非常に多くの圧延因子が存在するが、それらは板を媒体に、相互に影響をおよぼし合っている。このような系については、多数の圧延因子が相互に関連を持ち変化するので、各々の圧延因子を個別に検討するよりも全スタンドを一つの系として総合的に考察するべきである。具体的な手法としては個別のミルについて圧延特性を基に連続圧延機全スタンドの圧延因子を連立させて解き、圧延機全体の特性を求める方

法がある。これが連続圧延理論と称される。連立方程式を解くことで、計測すべき圧延因子を減らすことが出来る。圧延理論には各研究者、技術者が培ってきた思考があり、それぞれの理論に応じて実機にて検証されてきている。

このタンデム圧延機についてはRCM同様、厚み計、幅計、張力計、速度計、荷重計、形状計が設置されている。これらの計測器の他、エッジドロップ計については歩留りと平坦度が厳しく要求される珪素鋼板(電磁鋼板)用の圧延機に多く設置されている。これら計測器が設置されている場所、数量は、ライン全体で適切に選ばれる<sup>2)</sup>。

2.3 冷間圧延とセンサーの歩み

2.3.1 RCM開発時期とセンサーの歩み

圧延は、1960年初頭まで、電動圧下方式にてミル圧下位置を制御していた。電動圧下方式では圧下スクリューを電動モーターで廻してロールの昇降を行ない圧下力を調整していたが、圧下ネジ部やウオーム減速機などの摩擦仕事と加速のため仕事が大きく、有効な圧下仕事は、容量の数パーセント以下になっており、応答性を上げられずにいた。一方、1960年代から電動モーターに代わり、油圧制御により、ミル上部または下部に設置したシリンダーを動作させるほぼ現在の形態に近い圧延機が登場し、その応答性の高さから圧延機の主流に移ってきた<sup>3)</sup>。

電動モーターによる制御構成はロール位置計測と圧下力計測にあった。

圧下制御においては、圧延速度の変化に応じて変形抵抗が変わるため、圧延された板の厚みは速度変化が大きい場合、均一な厚みの板が生産できない。そのため、RCMの開発当初

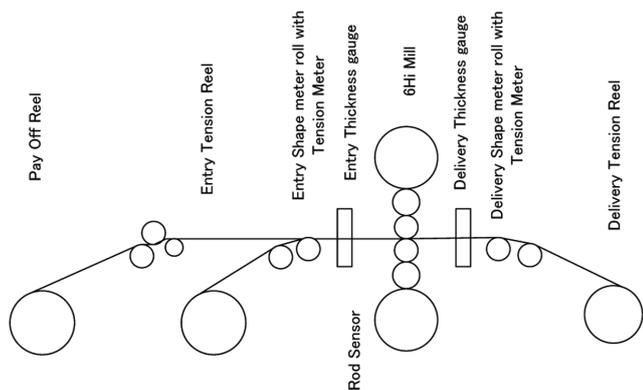


図1 RCM概要

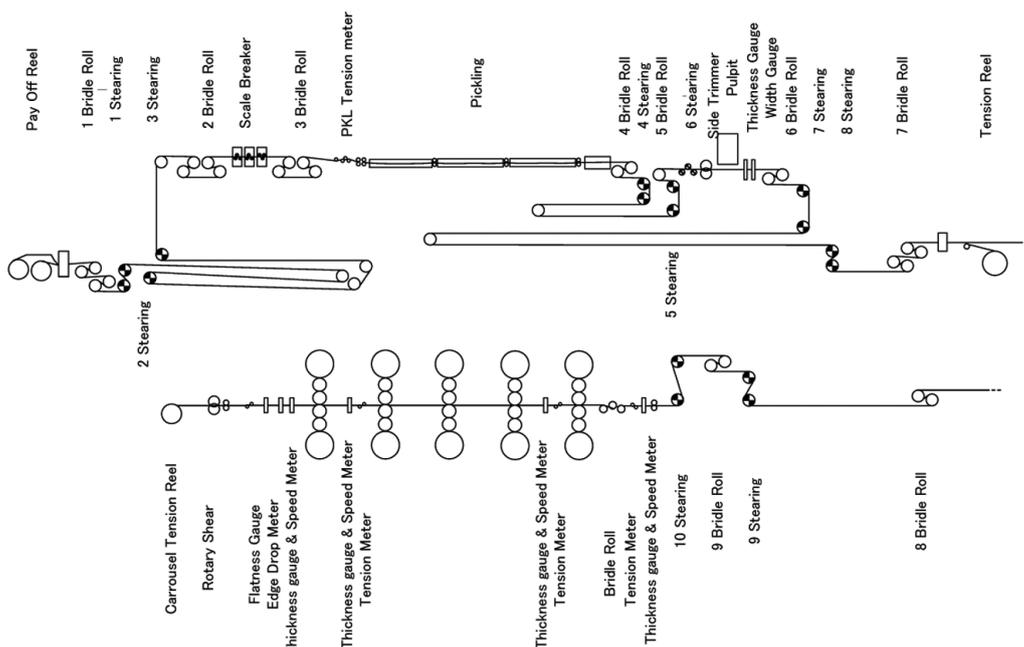


図2 PLTCM概要

はロールギャップを一定にしたうえで加速減速を最大限短時間で抑えて、主に一定速でラインを操業することで一定厚の板生産を行ってきた。このロール位置計測には電動圧下においては、圧下力そのものを計測するロードセルと電動力を圧下力に伝達するスクリュウの位置を検出する圧延機上部に設置されたトップハットセンサーが使われた。電動圧下に於いてもロードセルは上バックアップロールのショック上部に設置されている。また、この電動圧下方式で検出されたロール位置計測は油圧圧下方式への変更に伴い、ロールを昇降するシリンダーの位置を直接計測する磁気スケールに移って行った。当初、連続的に厚みを測る計測器が出るまではバッチにて厚みを計測していた。連続式厚み計は1970年代に入り、東芝がγ線厚み計を市場に投入し、一気に厚みの精度を上げ、より市場価値の高い高精度な製品を出せるようになり、一層、日本の圧延技術を押し上げることになった。AGC (Automatic Gauge Control) の理論も大いに発展し、冷間圧延機では、1970年代にBISRA AGCから発祥したAGCがモニターAGC、フィードフォワードAGC、マスフローAGCへとほぼ現在の制御まで到達した<sup>4)</sup>。

### 2.3.2 ロードセル

冷間圧延に求められる圧下力計測には、ロードセルを圧延機上部のハウジングとロールショック間に設置をする場合と下部ロールのロールショックと圧下シリンダー間に配置する二通りの設置方法がある。

また、このロードセルを用いず、油圧シリンダーにかかる圧力を計測し、圧下力を制御することもある(図1)。圧下力計測に用いられるロードセルにはその圧力によって計測素子に歪みを発生させ、変化した電気抵抗をホイートストンブリッジによって計測するひずみゲージ方式と常時発生させている磁界が圧力によって変化することを計測する磁歪式がある。圧力を検出する技術としてはこの他にも静電容量型ロードセル等があるが、製鉄機械の制御には用いられていない。

ひずみゲージ方式のロードセル選択に於いては、ロードセルを上部に入れる場合、円筒形のセルを上部スクリュウとショック間に挟み込むようにしているが、その素子には圧延荷重によりロールの傾きとスクリュウ回転力が同時に加わるため、ねじりや、スラストがロードセルにかかり、均一な荷重分布を取ることが難しく、偏荷重を受ける。この対策には、磁歪式の検出器のように検出素子自体が受圧素子になっている物を使う方法で、各素子の出力を加算することにより、偏荷重に関係なく全荷重が求まる。他の方法は受圧部の構造を適切にして荷重を検出する位置での荷重分布を一様化する方法である。

一つは円筒形の高さ $h$ と直径 $d$ の比( $h/d$ )を大きくすることで荷重を均一化できる。また、中空円筒型を用いて( $h/d$ )

を大きくする方法がある。どちらの場合においても高さを大きくとらざるを得なくなるか、円筒直径をより大きく取らざるをえなくなるため高さの制限、外径の制限がある場合、採用できなくなる。

磁歪式のロードセルが開発された当初はその悪環境に対して対応しきれないレベルのものとの認識が無かったが、今日ではその耐環境性は非常に優れており、過負荷耐量も大きくなり、ロードセル自体の故障も殆ど発生しないレベルまで到達している。そのため、今日では圧下圧力計測に於いてはそのほとんどの場合、磁歪式ロードセルが採用されている<sup>5)</sup>。

### 2.3.3 磁気スケール

圧延ロール位置の検出に関しては、1969年にソニーが開発したマグネスケールがその起源となっている。原理としては強磁性体合金で作られたロッドに等間隔にS極N極を着磁した[スケール]を磁束応答型マルチギャップヘッドで読み取り、移動量に対応した信号として出力する。スケール上の磁気パターンは極めて正確に刻まれており、また読み取るヘッドも多数のギャップを持つことで安定した高精度な信号出力を実現している<sup>6)</sup>。本スケールの精度は十分高かったものの、1970年代から80年代にかけて圧延技術の高精度化の流れのなか、より精密な計測への要望は常に存在した。

圧延技術の高度化に応じて、油圧機器の応答性の向上、油圧配管の短縮化ならびにOP/DR (Operation/Drive) のシメトリ化、PLC (Programmable Logic Controller) のサイクルタイムの短縮化、AGCサイクルの短縮化など、様々な取り組みが為されてきた。

また、センサー独自の発展にはこの磁気スケールの原理を応用し、シリンダーにセンサーを埋め込んだロッド内蔵型のセンサーがエヌエスディ株式会社にて開発された。この直線型アブソコダも圧延機の進歩と共に、使いやすさ、耐環境性、耐久性、信頼性が求められた<sup>7)</sup>。

国内製鉄所ではそれぞれの設備に必要な計測のニーズを提示し、各センサーメーカーはそれに応え得ることで常に高い技術力を保持し続けている。

### 2.3.4 厚み計

RCMに厚み計を設置したのは1960年、新日鐵八幡に納められたRCMに東芝のγ線厚み計が設置されたのが初めてであった。それ以前はフライングマイクロメータによる手動での検査が行われる程度で、一定速度、一定圧力のほぼ同一操業条件で、一定厚の板を生産していた。

この事例に端を発し、国内で設置されるRCMに厚み計の設置がほぼ常識化した。

国内設備の殆どが東芝の厚み計を採用し、その優れた精

度により、より高品質な冷延鋼板の生産が始まった。1960年代には現在、多用されている冷間用X線厚み計、透過型 $\beta$ 線厚み計、アメリカシウム $\gamma$ 線厚み計などが次々に発表されており、その中でも冷間用X線厚み計ならびにアメリカシウム $\gamma$ 線厚み計は、冷間圧延に多用されている。アメリカシウム $\gamma$ 線はそのエネルギーが60keVと低いいため、鋼板で5mmまで測定できることが特徴として挙げられている。

### 2.3.4.1 X線厚み計の原理<sup>8)</sup>

放射線が物質層に入射したとき、その層を構成している分子、あるいは原子との間に相互作用を起こし、その一部は層内にて吸収され、一部は入射方向に散乱し残りは透過してくる。強さ $I_0$ のX線が厚さ $x$ の物質に垂直に入射するとき、物質を透過したX線の強さが $I$ になるとすると、次のような関係が成り立つ。

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

ここで $\mu$ はX線に対する物質の吸収係数でその値は物質固有のものでX線エネルギーによって大きく変わる。上式からあきらかなように、 $I$ ,  $I_0$ を知れば厚さ $x$ が求められることが分かる。実際には $I_0$ が一定になるような条件を与えて単に $I$ を測定することによって $x$ を推定する方法が取られている。

### 2.3.4.2 アメリカシウム $\gamma$ 線厚み計の測定原理<sup>9)</sup>

線源の強さを $I_0$ とすると、被測定物を透過した線量 $I$ は次式で表される

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

ここで、 $x$ は測定物の厚さ、 $\mu$ は吸収係数である。

放射性同元素（アメリカシウム241）から放射されたガンマ線は被測定物を透過し、電離箱に入射する。ガンマ線量に比例した電離電流は前置増幅器にて増幅され、A/D変換器でデジタルに変換される。この変換信号は被測定物板厚信号としてマイクロコントローラで演算処理される。

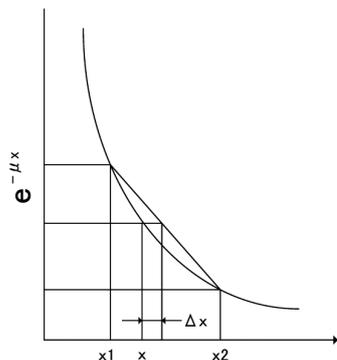


図3 アメリカシウム $\gamma$ 線厚み計の吸収曲線

### 2.3.4.3 レーザ厚さ計<sup>10)</sup>

レーザ厚さ計は、放射線を使用せず、レーザとCCDカメラ（電荷結合素子）で対象物の厚さを測定する装置であり、近年、放射線を使用しないため、遮蔽用の鉛が不要となるため、放射線厚み計に比べ、環境負荷を低減できるなどの特徴を有する。

主な特徴としては、次のとおりである。

- 1) 幅広い測定対象
  - (a) 異種の金属が任意の厚さで重ね合わさった材料（クラッド材）や金属以外の厚さも測定できる。
  - (b) 原理的に材質や厚さの制限を受けない。
- 2) 高分解能
 

測定的位置分解能や応答性は測定ポイントの面積に反比例し、面積が小さいほど位置分解能が良くなり対象物の厚さ変化に対する検出応答もよくなる。放射線厚み計に比べて測定ポイントの面積が小さいレーザ厚さ計は対象物のエッジ部など細かい所を測定することが出来る。

### 2.3.5 形状計

圧延時にミル自体に歪み等が発生し、上下のワークロールに挟まれた鋼板には、様々な応力がかかるため、圧下量、ロールギャップの制御をおこなったとしても、中央部やエッジ部に過大な応力が発生することで中間伸び、エッジ部の耳波などの不具合を生じる。良好な形状の圧延を継続するため、この形状を常時計測して、圧延中のベンディングなどにフィードバックを行い、形状制御を行っている。

形状計はミル出側に配置されたロールが検出部となっており、ロール周状に円筒型ロードセルを10数個から20数個配置して構成されている。個別のロードセルに巻き付く鋼板の応力によって鋼板形状を計測している。この形状計の開発についてはドイツをはじめとするヨーロッパメーカが先行しており、国内にて形状計を開発している会社も基本特許の許諾を得て対応している<sup>11)</sup>。

### 2.3.6 エッジドロップ計<sup>12)</sup>

1990年代中盤から2010年に至る期間は、中国に於いて非常に活発な投資欲が存在した。測定機器に対してもその要求は

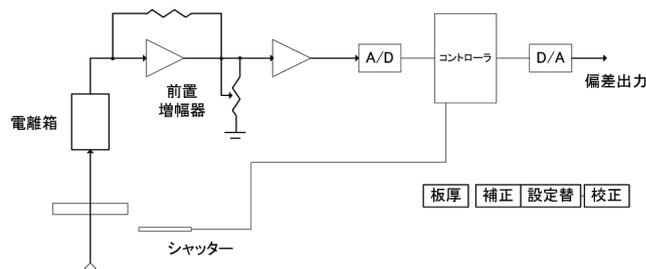


図4 動作原理図

非常に高く、国内機器メーカーにも大きな影響を与えた。冷間圧延では、その品質のニーズから、中央部とエッジ部の厚さの均一性が追及されてきた。国内ならびに中国、台湾、韓国向けに国内主要計測メーカーではエッジドロップ計を2001年から市場投入してきている。原理的にはX線厚み計をエッジ部に特化し、より細かいピッチでの計測を可能としたものと言える。

### 3 表面処理設備に求められる計測機器

日本の薄板生産は鋼板に亜鉛をめっきした亜鉛鉄板（トタン）と鉄の表面に錫をめっきしたぶりきから始まったと言える。歴史的には亜鉛鉄板の生産は既に大正時代から始まっており、1906年官営八幡製鉄所で切り板の亜鉛めっきがされたのが日本での最初と呼ばれている。

一方、ぶりきの生産ラインは1923年に官営八幡製鉄所で立ち上げられた。

冷延鋼板の本格的な生産は1940年に新日鐵戸畑製鉄所に5スタンドのタンデムミルの稼働により始まり、その後1959年にぶりき専用の連続焼鈍設備が広畑製鉄所に導入された。

プロセスラインの連続化がこのころから活発になってきた。プロセスラインは連続焼鈍設備の他、表面処理設備として以下の鋼板が実用化されてきた<sup>13,14)</sup>。

- (1) 溶融亜鉛めっき鋼板
  - 溶融亜鉛めっき鋼板
  - 合金化溶融亜鉛めっき鋼板
  - 溶融亜鉛アルミニウムめっき鋼板
  - 溶融系二層めっき鋼板
- (2) 電気亜鉛めっき鋼板
  - 電気亜鉛めっき鋼板
  - 電気亜鉛合金めっき鋼板
  - 電気系二層合金めっき鋼板
- (3) 特殊表面処理鋼板
  - 溶融アルミニウムめっき鋼板
  - ターンめっき鋼板
  - 電気銅めっき鋼板
- (4) 缶用表面処理鋼板
  - ぶりき
  - ティンフリースチール
- (5) 塗覆装鋼板
  - 塗装亜鉛めっき鋼板
  - 塩ビ鋼板
  - ジンクリッチ系塗装鋼板
  - 有機複合めっき鋼板

上記鋼板への表面処理の重要視される特性は防錆である

が、それ以外にも耐熱性、熱反射性、外観、溶接性、加工性など各種用途に基づいてプロセスが構成されている。これらの設備の計測技術としてはめっきの付着量をどう計測するかが最重要課題である。一定品質の確保は、オンラインでめっき付着量を知る必要がある。

#### 3.1 溶融亜鉛めっき鋼板<sup>14)</sup>

連続溶融亜鉛めっきライン（CGL）は、用途により様々な種類の設備があり、いわゆる、亜鉛ポットに鋼板をくぐらせて気体絞り装置にて目標量のめっきを付けるGI、亜鉛ポットを潜ってきた鋼板をGI同様気体絞り装置にて目標量のめっきを付けた後、誘導加熱装置で再加熱し、鉄-亜鉛合金を製作するGA材、亜鉛ポットに多量のアルミニウムを含有させZn-AL合金をめっきするGL材がある。他にも製鉄各社は新商品の開発に余念がなく、次々と新しいプロセスが開発されている。

図5にポット部分から合金化炉用誘導加熱装置、付着した亜鉛を計測するCWG（Coating Weight Gauge）までの構成図を提示する。

亜鉛ポットに鋼板が入る前の設備である焼鈍用加熱炉には建材用CGLの場合、横型のNOF（Non Oxidation Furnace）が採用され、自動車用鋼板設備の場合は縦型のRTF（Radiant Tube Furnace）が採用されている。

亜鉛ポットから付着量までの距離については鋼板が常温まで下げられた後にその付着量を計測することが多く、一般的なCGLの場合、水冷帯を過ぎたのちに安定したパスに付着量計を設置している。本設備にはパスを安定して走らせるために鋼板に与える張力を計測し、電動システムにてフィー

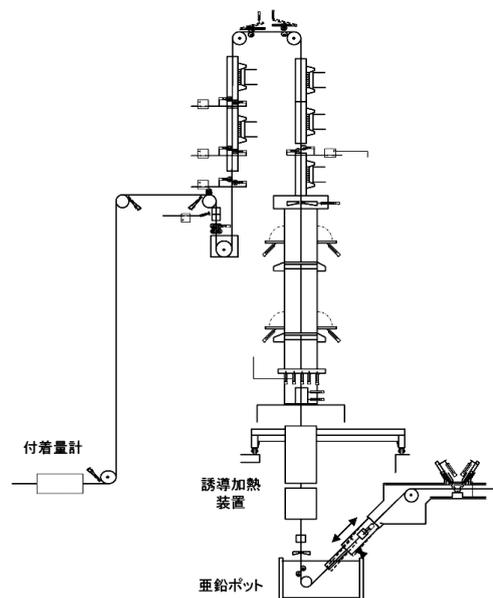


図5 ポットレイアウト

ドバック制御が行われている。

炉計装部分には温度、流量、圧力などを計測し、プロセスを制御する遮断弁、調節弁、電動弁などにてフィードバック制御を行っている。また、特殊計装設備としては、溶接点をライン内でトラッキングするための溶接点検出器 (WPD)、鋼板を搬送させる際に蛇行することを抑制するためのCPC、巻き取る板のエッジを揃えるEPC、その他鋼板搬送ならびに入出側自動化のため、PLG、Absolute Encoder、磁歪式距離計、レーザー距離計などが利用されている。

### 3.2 電気亜鉛めっき鋼板

電気亜鉛めっきは、鉄素地を亜鉛めっき液に浸漬して、電解することでめっき被膜を生成させている。そのため、めっき量を電力量で制御することが出来、極めて薄いめっきが可能となる。一般的には横型のめっき槽を数槽並べ、その間に上下電極を並べて給電する。めっき量自体は溶融亜鉛めっきと同じく、付着量計にて計測する。前後設備である入側溶接部、洗浄帯、出側板切断部を含むコイルハンドリングなどは他設備とほぼ同じ構成となる。

### 3.3 缶用表面処理鋼板

缶用表面処理鋼板は飲料缶によく用いられているぶりきと呼ばれる錫めっき鋼板と錫を使用しないめっき鋼板からなる。この錫のめっきについては、その使用量を減らすために、電気めっき方式が採用された。一方、高価な錫をどう減らすかの課題克服に、Tine Free Steelと呼ばれる錫を全く使わない鋼板が日本で開発された。Tin Free Steelの製造はやはりクロム層を電気めっきしたうえで後処理を行うものだが、めっき量は投入電力に比例することから、非常に薄い厚みに出来る上にその制御は比較的容易と言える。以下に錫めっき鋼板とTin Free Steelの各層構成を示す。

このラインの基本構成は他のプロセスラインと同じく、入



図6 電気亜鉛めっき設備プロセス部

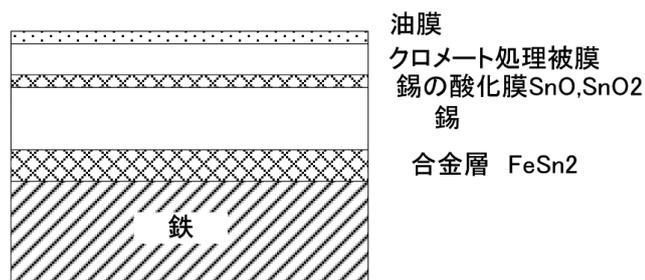


図7 ぶりきの断面

側設備、中央プロセス、出側設備の構成となっている。被膜についての厚み計測はやはり、他の表面処理設備同様、重要な設備と言える。

### 3.4 塗覆装鋼板

連続塗装ライン (CCL) には入側にてステッチャーが溶接機に代わり、設置されている。カラー鋼板となるため、模様なども含め、表面に塗装されるが、この場合、その膜厚よりも表面欠陥がなく、安定して塗装されているかが重要であり、オンラインの膜厚計、色差計、表面検査器等が設置されている。

### 3.5 表面処理とセンサーの歩み

表面処理設備に関しては、1960年代から活発になり、センシング技術としてラインを安定して走らせるライン駆動系に対するセンシング技術と、板品質確保のための、オンラインでの計測技術が個別に発展した。製品品質とは仕様通りの板特性や、めっき付着量の確保と共に、表面に疵がないことが非常に重要な要素であり、特に自動車用外板に対して求められる疵に対する品質は極めて高かった。そのため、最終商品として出荷される鋼板を中心に疵認識技術は発展していった。

表面処理の観点から本稿では疵に影響を与える要因の一つと言えるロードセルと直接的な機器品質に関わる付着量計測と疵認識について述べる。

#### 3.5.1 ライン走行とロードセル

ラインドライブに関しては当初、コイルを巻き戻したのち、再度巻き取ることから、板搬送をどう行うかが重要な課題だったが、鋼板に接するロールを全てを駆動するわけではなく、張力ならびに速度を決定するブライドルのロール駆動から始まった。そのため、張力付加に対しては、ブライドルから張力を与えるオープン制御方式が取られていた。ロードセルも監視用で用いられるのみで制御系に組み込まれるものではなかった。一方、ロードセルの開発は1960年ごろから活発になり、歪みゲージ式ロードセルが張力計測に活用され始めた。1970年代にはプロセスラインの張力制御に用いられたロードセルは張力計測用ロールにかかる応力を、操作側/駆



図8 TFSの断面

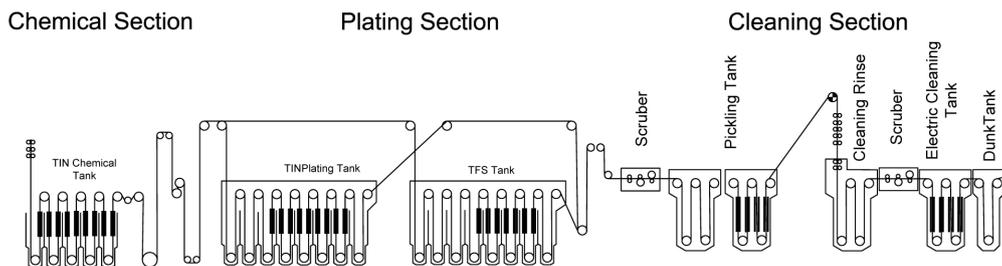


図9 ETL/TFS Process部

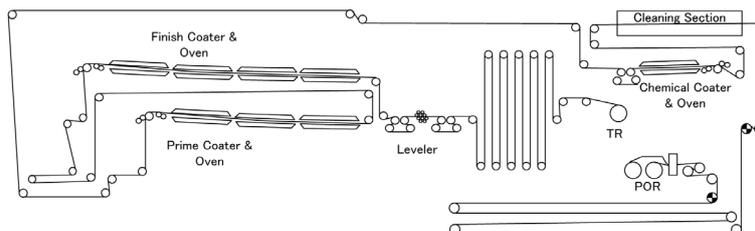


図10 CCLレイアウト例

動側それぞれのショックを通して負荷を受けるタイプとなっていた。

ロードセルにかかる応力を歪みゲージにて計測するため、その応力が負荷を正常に伝達させるためにはショックなどを支えている摩擦力をどう減らす機構にするかが非常に重要な課題となっていた。このタイプのロードセルに対して、1980年代に入り、ショックと架台の間に挟み込むだけで張力が計測できるタイプのピローブロックタイプの磁歪式ロードセルがABB社より発表され、ラインの高速化と精度向上が重要課題であったラインに対して、その採用が一気に進んだ。その後、歪みゲージに於いてもピローブロックタイプのロードセルが国内外のメーカーから発表され、その選択肢は大きく広がった。現在、様々なプロセスラインがあるが、ライン張力を計測するロードセルのタイプは殆どがピローブロックタイプのロードセルになっている。

### 3.5.2 付着量計測<sup>15)</sup>

国内の付着量計測に関しては、機器メーカー（リガク）が国内鉄鋼メーカーと共同開発にて鋼板上の錫めっき厚さのオンライン測定に道を開いたのが、1967年だった。その後、様々な付着量計測を実現しており、その累計は300台以上となっている。国内のみならず、アジアを中心とした地域については、国内有力製鉄所の信頼の高さもあり、プラント輸出に合わせて輸出されていった。連続ラインに採用されるため、付着量制御装置はロールtoロール (RR) 方式で組み込まれることが主流と言える。

コーティングの種類については、錫めっき、飲料用のクロムめっき、家電建材用の亜鉛めっき、自動車用的高级鋼板で

表1 代表的な高板と測定手法の分類

計測対象	方式	分光結晶	検出器
合金めっき	蛍光 X 線分析法 (XRF 方式) 波長分散型 X 線分析 (WDX)	あり	比例計数管 S-PC/ 計数管 SC
表面処理 (Si, P)	蛍光 X 線分析法 (XRF 方式) エネルギー分散型 X 線分析 (EDX)	無し	半導体検出器
Zn, Cr, Sn, Si, P 付着量	蛍光 X 線分析法 (XRF 方式)	無し	イオンチャンパー
合金化度計 (Fe-Zn)	蛍光 X 線分析法 (XRF 方式) 波長分散型 X 線分析 (WDX)	あり	比例計数管 S-PC
合金化度計 (Fe-Zn)	X 線回折法 (XRD 方式)	無し	比例計数管 S-PC

ある Fe-Zn 合金めっきなどさまざまな用途に用いられている。

#### 3.5.2.1 被膜厚さ及び組成分析の原理

測定対象に X 線を照射し、対象中に存在する元素から発生する蛍光 X 線を計測することにより被膜厚さ及び組成を求める。

##### a) 直接法 (被膜から発生した X 線を利用)

被膜を形成する成分から発生する蛍光 X 線を用いて検量線あるいはファンダメンタル・パラメータ法 (FP法) による感度校正にて、各成分の単位面積当たりの付着量または全付着量と含有成分の含有率を求める。複数成分で被膜が構成されている場合は、各成分から発生する X 線強度から個々の検量線にて各成分の付着量を求めるか、あるいは FP法などを用いて全付着量と各成分の含有率を同時に求める。

##### b) 吸収法 (基板から発生した X 線を利用)

被膜成分の X 線が容易に計測できない場合に、基板成分

から発生する蛍光X線を計測し、被膜による吸収効果を利用して被膜厚さの検量線を作成する方法である。この場合、被膜組成を求めることは出来ないが厚さの定量化が出来る。

### 3.5.3 表面欠陥計

表面処理鋼板の表面疵の分類ならびに検査には、製鉄所ならびにその顧客により積み重ねて来たKnow-Howが集約されてきた。その点で、製鉄所と機器メーカーとの共同開発が行われてきた歴史がある。1980年代までは、レーザーによる表面検査装置が製鉄所との共同開発で実用化レベルまで達していた。本検査装置は、自動車用鋼板など高級材の検査には欠かせない設備であったが、実用レベルまで達するには、製鉄所と機器メーカーによる情報の解析、分類など、非常に細かい対応が必要であったことから、一般にプラント輸出される際には、エンジニアリングメーカーが本体設備と一緒に納入することは行われていなかった。ところが1990年代に入り、CCDカメラ画像と画像認識技術の進化に伴い、今まで画像認識では出来なかった疵探査が容易に出来るようになり、世界の製鉄所でその採用が急激に広まった。

あるアジアの製鉄所では、疵探査を全ての冷間圧延、プロセスラインに導入し、効率的な運用が始まった。また、各国の製鉄所間では、同じ設備を採用した製鉄所同士で情報交換が日常的に行われていたこともその採用に拍車をかけた。現在、表面疵探査の他、鋼板内の疵探査などに漏洩磁束法を用いて微小欠陥の位置認識を行うなど様々な取り組みが行われている。

### 3.6 計測技術の動向

1960年代から始まった圧延機への厚み計、張力計、形状計の設置などは、各種AGCの実用化に伴い、常識となってきた。1980年代には、理論面、実用面でも成熟を迎え、ほぼ現在の設備構成になってきている。国内需要に注力してきた国内メーカーも国内市場の成熟に伴い、国内鉄鋼メーカーの海外への設備投資に合わせて、日本企業による海外へのプラント輸出も活発になっていった。それは同時に海外製鉄設備メーカーとの競合が常態化する状況となった。1980年代から始まった中国の製鉄設備投資は、非常に大きな機会となっており、活発な設備投資意欲と共に、その投資効果を求める市場原理に基づき、激しいコストダウンを重ねることとなった。このコストダウンについては、製鉄所の求める保全の容易性、予備品の入手しやすさなどを望む設備投資計画に合わせる事が前提となっているため、設備を何処で作るか、何処で調達するかなど、世界中の製鉄設備メーカーが互いに知恵を出し合いながら競争を重ねることとなった。計測技術に関しても、より精度よく、解像度が高い物との認識から必要

な精度とは何かとの前提に戻ったうえで、最適なシステム構築が求められるようになってきた。特殊計装品に関しては、現在、国産品の他、欧米の製品が多く市場に出回っており、海外に於いてはその地域での調達のしやすさ、普及の度合いがその採用に大きく影響を与えている。

また、技術的には、IoT技術やAI技術の発展に伴い、ビッグデータの取り扱いの容易さなどが最近では求められており、インターフェースの取り扱い、ネットワークのあり方が非常に重要な位置を占めてきている。

各センサーをProfi-bus、Modbusなどで繋ぎつつ、ネットワークは別途Ethernetで繋ぐことがよく採用される。現在、従来のネットワークから産業用イーサネットの実用に移ってきているが、用途に応じた使い分けなどは、今後より一層重要となっていくと考えられ、各社とも独自のネットワークを採用している現状から、スマートプロダクトの創出と共に、そのネットワークのあり方もより使いやすい構成に推移するものと思われる。

### 参考文献

- 1) 岩村忠昭：鉄鋼業の計測・制御技術の系統化，国立科学博物館，技術の系統化調査報告，第13集，(2009)
- 2) 阿高松男：鉄と鋼，100 (2014) 1, 94.
- 3) 梶原利幸，福井嘉吉：日立評論，47 (1965) 9, 1593.
- 4) 桑野博明：鉄と鋼，79 (1993) 3, 302.
- 5) 矢吹豊：鉄と鋼，55 (1969) 14, 1399.
- 6) マグネスケール社，HP，<http://www.magnescale.com/mgs/product/>
- 7) エヌエスディ(株) カタログ，Liner AGC用Sensor，(2013)
- 8) 城戸弘，西脇文雄，糸川嘉庸，島崎紀久男，乾八州男，川瀬彰：東芝レビュー，23 (1968) 10, 1254.
- 9) 荒井正一，斎藤貞勝，酒井明雄，長尾幸男，石川智美，深沢千秋：東芝レビュー，23 (1968) 10, 1261.
- 10) 東芝インフラシステムズ(株)，HP，<http://www.toshiba.co.jp/sis/menu/indust.htm>
- 11) ABB(株)，HP，<https://new.abb.com/jp>
- 12) 大熊茂幸，小原哲，西川政光：東芝レビュー，62 (2007) 10, 19.
- 13) スチール缶リサイクル協会，HP，<http://steelcan.jp>
- 14) 久松敬弘：溶融亜鉛めっき鋼板の歴史，金属表面技術歴史シリーズ，34 (1983) 7, 354.
- 15) 奥田和明：リガクジャーナル，43 (2012) 1, 1.

(2018年7月5日受付)