

# 冷延プロセスライン溶接状態監視装置の開発

## Development of Welding Condition Monitoring System in Cold Steel Sheet Process Line

高田 英紀 TAKADA Hideki JFE スチール サイバーセキュリティ統括部 主査  
渡邊 孝祐 WATANABE Kosuke JFE スチール 西日本製鉄所（倉敷地区）冷延部 冷延技術室長  
佐々木聡洋 SASAKI Toshihiro JFE スチール 薄板セクター部 主査

### 要旨

冷延鋼板連続焼鈍ライン（CAL: Continuous Annealing Line）は、入側の溶接機で先行材と後行材を溶接し鋼板を連続で焼鈍するプロセスである。溶接不良起因で板破断が発生すると操業を停止し長時間の復旧作業が生じるため、ラインの安定稼働には、正常な溶接を実現する技術と溶接不良を高精度で検知する仕組みが必要となる。JFE スチール東日本製鉄所（千葉地区）缶用鋼板連続焼鈍ラインにおける溶接良否を高精度で判定することを目的に、溶接部の温度を精密に測定する 2D 温度計と溶接監視装置を開発した。

### Abstract:

The continuous annealing line for cold rolled steel sheets is a process in which steel sheets are continuously annealed by welding the preceding and following sheets with a welding machine at the entry section. When sheet fracture occurs due to defective welding, operation stops, and restoration work takes a long time. Therefore, technique to stable welding and a device to detect weld defects with high accuracy are required for stable operation. We have developed a 2D thermometer to precisely measure the temperature of the weld zone and a weld monitoring device at the continuous annealing line of JFE Steel East Japan Works (Chiba).

## 1. はじめに

東日本製鉄所（千葉地区）缶用鋼板連続焼鈍ライン（CAL: Continuous Annealing Line）の設備構成を図 1 に示す。入側セクションの溶接機<sup>1</sup>で先行材と後行材を溶接し鋼板を連続で焼鈍するプロセスである。溶接不良起因で板破断が発生すると操業停止に陥るばかりか、板破断処理に長時間を要するため、正常な溶接を実現する技術と溶接不良を高精度で検知する仕組みが必要となる。溶接部の温度を

測定し溶接良否を判定する仕組みはあるが、判定性能に問題があった。そこで、より高精度な判定を実現するため、溶接部のプロフィール温度を測定する 2D 温度計、および溶接監視装置を開発した。

## 2. 連続プロセスラインの溶接

入側セクション溶接機（マッシュシーム溶接機）での溶

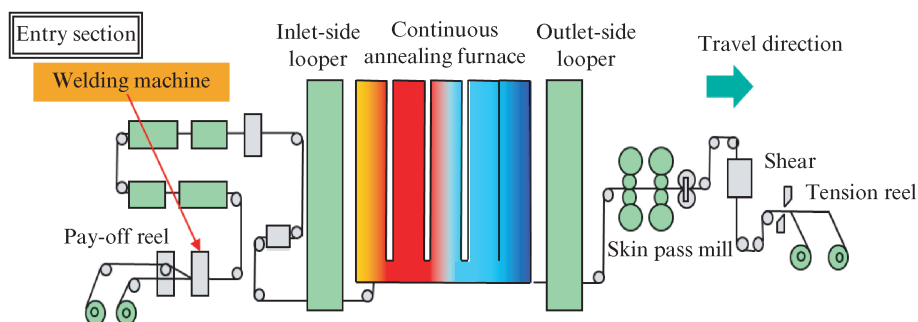


図 1 連続焼鈍ライン設備構成

Fig. 1 Layout of continuous annealing line

2025 年 3 月 14 日受付

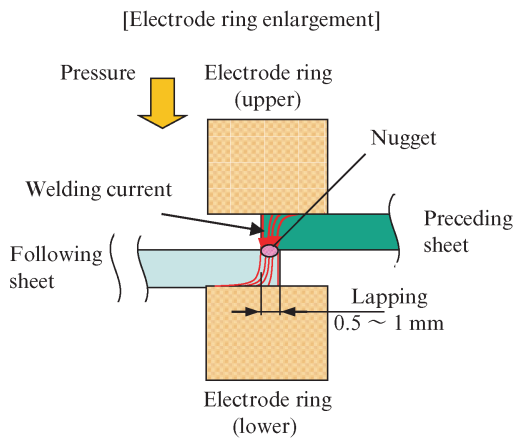
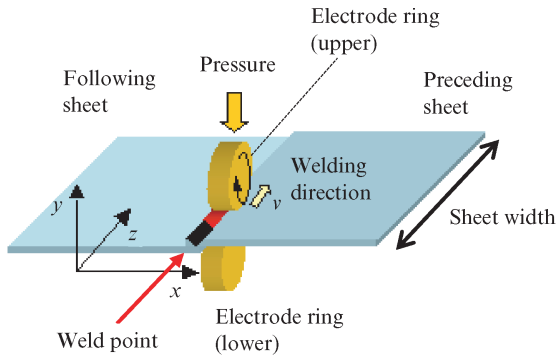


図2 シーム溶接の模式  
Fig. 2 Schematic diagram of seam welding

接模式を図2に示す。溶接機では、溶接する先行材と後行材の鋼種、板厚等の仕様から溶接条件を設定し、先行材尾端と後行材先端を重ね合わせ上下の電極輪を設定圧力で挟み、圧下状態で設定電流を通電すると電極輪との接触面が加熱され、板面から溶融・凝固し先行材と後行材が溶接される。続いて、電極輪を板幅方向に走行させることで板幅方向全体の溶接が完了する。適正な溶接電流と電極加圧で溶接することで、正常な溶接になる<sup>2)</sup>。

しかし、設備不良で電極輪の加圧力が設定値より低くなると、溶融金属が鋼板から噴出しナゲット割れ（溶接不良）が発生し、溶接板破断の原因の一つとなる。ナゲット割れ発生時は、板表面から噴出した高温の溶融金属により溶接部の温度変化が大きくなるため、溶接部の正常、異常を把握するには、溶接部の温度測定が有効である。そのため、従来から溶接機に付帯の放射温度計で溶接部温度を測定し、溶接良否を判断する手法が用いられており、JFE スチールの連続焼鈍ラインの溶接機でも溶接温度による溶接良否判定を適用している。

### 3. 溶接温度測定

連続焼鈍ラインの溶接機では、電極輪の進行方向後方に

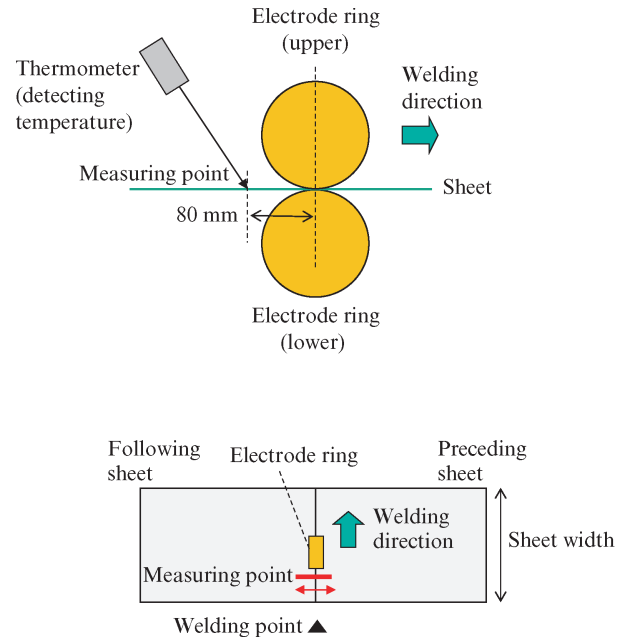


図3 溶接温度計の測定位置  
Fig. 3 Temperature measurement positions

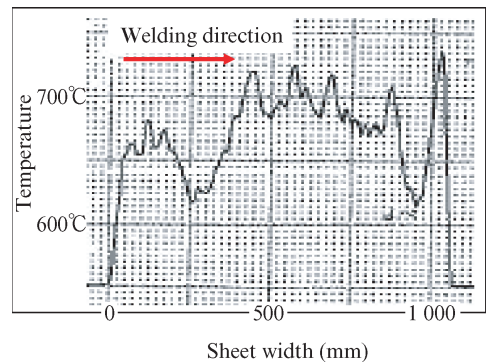


図4 溶接温度測定例  
Fig. 4 Welding temperature measurement

設置したスポット型放射温度計で、溶接直後の溶接温度を測定している。放射温度計の測定位置を図3、溶接温度の測定結果例を図4に示す。缶用鋼板ラインの溶接判定装置は、判定性能が自動車用鋼板ラインの同装置と比較して低いという問題があった。各ラインの溶接温度測定と溶接良否判定結果を比較した結果、缶用鋼板の溶接温度測定値が不安定で、溶接良否の判定には不適合であることが原因と考えた。

そこで、温度測定値が不安定となる原因を検証した。缶用鋼板と自動車鋼板では、製品の鋼種、サイズが異なる(表1)。溶接機では溶接対象に合わせて適切なラップ代と溶接電流等の溶接条件を設定し溶接している。自動車鋼板の溶接は、缶用鋼板と比較して製品板厚が厚く溶接に高い熱量が必要なため、ラップ代と溶接電流が大きい。その結果、溶接部の温度は高くなる。先行材と後行材で加熱、溶接されたHAZ部（Heat-Affected Zone）の外観例を写真1に示す。

表 1 自動車, 缶用鋼板製造サイズ  
Table 1 Sheet size for automobiles and tin plate

	Automotive sheet	Tin plate
Thickness (mm)	0.40 — 2.60	0.15 — 0.60
Width (mm)	800 — 1 900	600 — 1 200

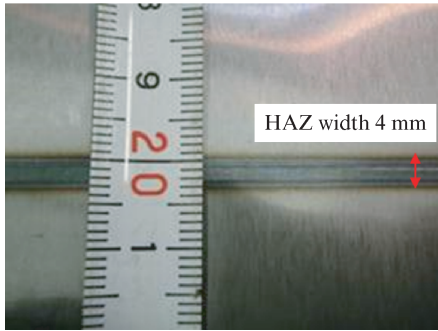
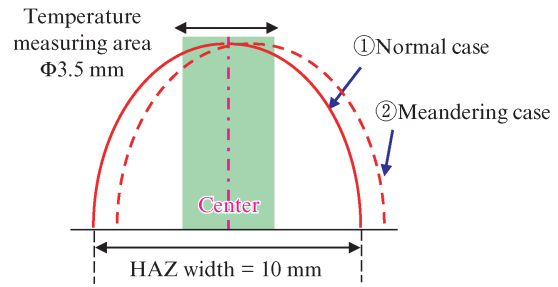


写真 1 鋼板溶接 HAZ 部外観  
Photo 1 Appearance of welding steel sheet

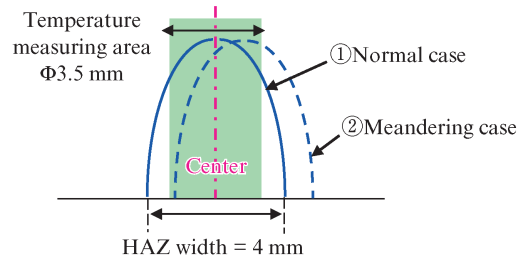
正常に溶接完了した自動車鋼板の HAZ 部が約 10 mm なのに対し, 缶用鋼板の HAZ 部は約 4 mm である。溶接中の HAZ 部のサイズと温度を確認するため, 溶接機に既存のスポット型放射温度計に加え, テスト的に走査型放射温度計を取付け, HAZ 部の温度を測定した。自動車鋼板と缶用鋼板の, それぞれの溶接 HAZ 部の温度モードを図 5 に示す。

スポット型放射温度計 (測定視野  $\Phi 3.5$  mm) の測定位置は, HAZ 部の中心に合わせている。缶用鋼板 HAZ 部の幅は 4 mm と温度計の測定視野幅 3.5 mm と近いので, 温度プロフィールが急峻に変化する範囲を測定することになる。そのため, 温度計の測定値は, 温度計取付け位置の精度, HAZ 部の幅変動および蛇行 (図内, 温度プロフィールが①から②に変化) の影響を受けやすく不安定になることが分かる。

自動車鋼板の溶接では, 溶接の中心から高温の範囲が広いので, 缶用鋼板の溶接温度測定で問題となった温度計の取付け精度, HAZ 部蛇行の影響が小さく測定値は安定する。なお, スポット型放射温度計の検査範囲を広くすれば測定値は安定するが, 変化が小さく捉えにくくなるため, 溶接良



○Temperature profile of steel sheet for automobile



○Temperature profile of steel sheet for tin plate

図 5 溶接 HAZ 部温度プロフィール

Fig. 5 Temperature profile of welding steel sheet

否判定の支障となる。

以上の結果を受け, 缶用鋼板の溶接温度測定に有効な冷延プロセス向け溶接温度計および監視装置を開発した。

#### 4. 溶接温度計の開発

缶用鋼板の溶接の精度高い溶接良否判定を実現するため, 溶接温度計を開発した。温度計の開発項目, 目的および要件を表 2 に, 開発した温度計検出部の外観を図 6 に示す。開発項目は 2 点で, ①温度計検出部の小型化, ②広範囲の測定視野と温度プロフィール測定, である。まず, 検出部の小型化が必要な理由を説明する。溶接機電極輪の周辺は高密度で機器が配置され設置スペースが狭い。一方で, 電極輪至近に温度計を設置できれば, 溶接部 (測定位置) までの距離が短くなり, 溶接 HAZ 部を高分解能で測定できる。

表 2 溶接温度計の開発項目と要件

Table 2 Development items and requirements for thermometer

Development item	Purpose	Requirements
Small size of detection unit	Mount in close to electrode rings a) To achieve a high resolution b) To measure the temperature immediately after welding	Size: Detection unit $\Phi 30$ mm * 200 mm or less
Wide range of measurement profile (2D)	a) Measurement of HAZ width b) To follow the weld meandering c) Response to inadequate thermometer installation	Measuring field of view: 20 mm or more Resolution: 0.2 mm or less

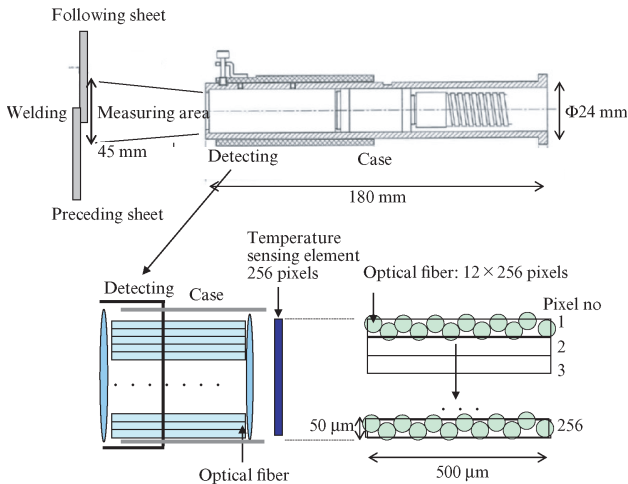


図6 温度計検出部の構成

Fig. 6 Composition of thermometer

そのため、電極輪至近に設置可能な小サイズの温度計を開発項目とした。続いて、温度計の構成を図6で説明する。プロフィール測定のため、温度計の受光部に256ピクセルの受光素子を溶接機進行方向と垂直に並べ、HAZ部の温度の幅プロフィールを測定できるようにした。測定対象となる溶接部の赤外光は、検出部のレンズで集光し、複数の光ファイバを介して受光素子へ受光する構成とした。検討、設計を経て、要件(Φ30 mm, 長さ200 mm以下)を満たす検出部サイズΦ24 mm, 長さ180 mm, プロフィール45 mmを測定できる温度計を製作した。

開発した温度計を溶接機電極輪の至近に設置した。設置後の試運転で、要件(測定視野20 mm以上, 温度プロフィール分解能0.2 mm以下)を満たす測定視野約45 mm, 温度プロフィール分解能0.17 mmを確認した。なお、本温度計は、HAZ部の温度プロフィールも測定することから、以下「2D (Dimension) 温度計」と記載する。

### 5. 溶接温度測定結果と良否判定

2D温度計実機の測定結果例を図7, 図8に示す。2D温度計では、温度センサのスキャン(走査)ごとにHAZ幅方向の温度データを取得するため、溶接完了後にHAZ幅方向と溶接方向の測定データを集計し、図7の温度マップを表示する。温度マップの一部を拡大し、センサスキャンのモードと測定したHAZ幅方向の温度データ、すなわち温度プロフィールを図8に示す。スキャン(1)点から(10)点までの測定部位を左の温度マップ上に、スキャンごとの温度プロフィール10点を右グラフに示す。温度プロフィール10点それぞれでHAZ幅, ピーク温度位置が変化し、温度プロフィール10点のうちScan No (5)のみ, 他プロフィールとの比較でHAZ幅が約40%縮小していることが分かる。

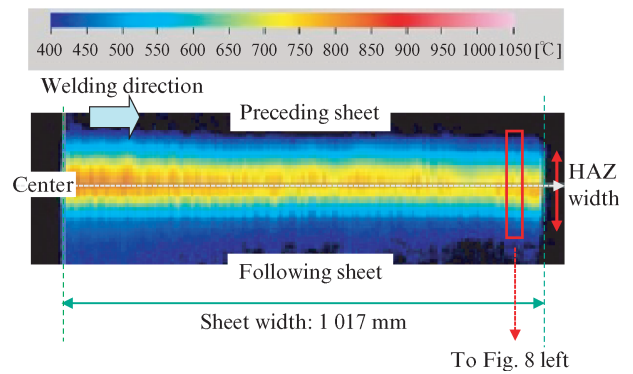


図7 溶接温度測定結果/温度マップ

Fig. 7 Welding temperature measurement result / temperature map

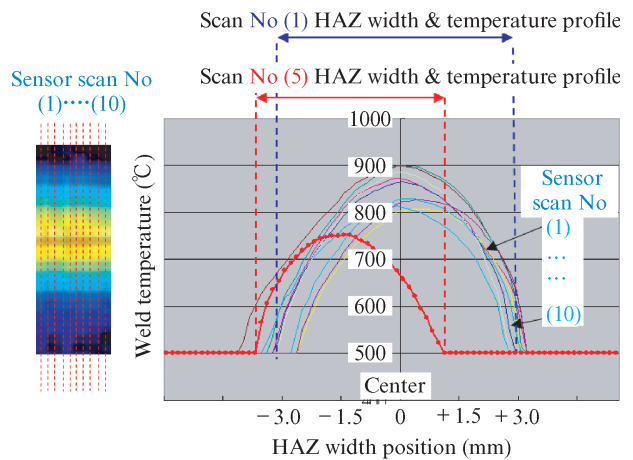


図8 溶接温度測定結果/センサスキャンごとの温度プロフィール  
Fig. 8 Welding temperature measurement result / Temperature profile per sensor scan

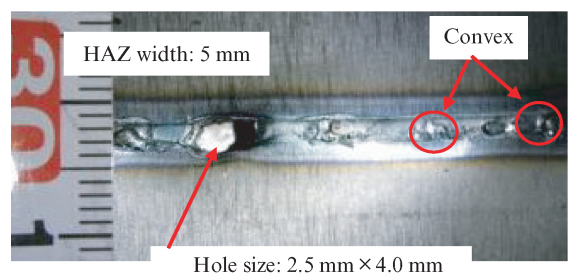


写真2 溶接不良外観

Photo 2 Appearance of welding defect

2D温度計で取得する測定データから溶接良否判定条件を検討した。検討に当たり、溶接不良時の温度測定データが必要となるが、操業中の溶接不良は発生頻度が低いため、溶接テストを実施しデータを取得した。溶接電流を設定より30%高い過電流で溶接し溶接不良を発生させ、溶接温度データと溶接外観を突き合せた。溶接テストで取得した溶接不良の外観を写真2, 溶接温度測定結果を図9, 図10,

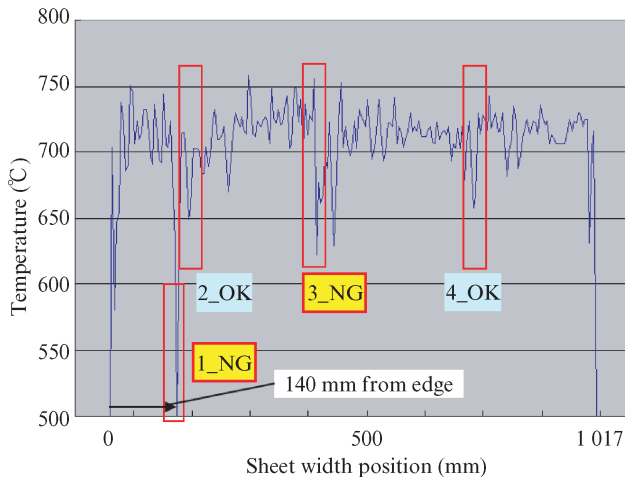


図9 溶接温度測定結果 板幅方向

Fig. 9 Result of welding temperature (sheet width position)

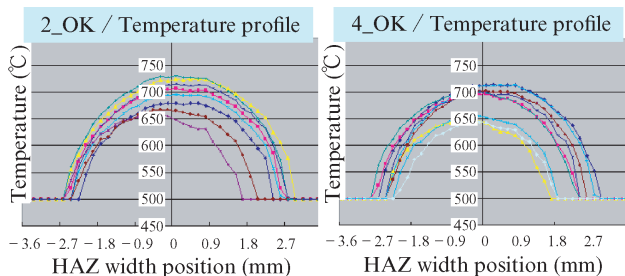


図10 溶接温度測定結果 溶接正常部温度プロフィール

Fig. 10 Result of welding temperature (normal temperature weld profile)

図11にそれぞれ示す。溶接不良のHAZ外観は、局所的に尖った凸部とナゲット割れによる穴が発生している。

図9の板幅方向（溶接方向）温度チャートで、温度低下した板幅位置4点を実溶接と突き合せた。温度低下位置4点の内、図内記載2\_OKと4\_OKの2点の溶接外観は正常であった。各位置の10点温度プロフィールを図10に示す。1\_NGと3\_NGの2点の外観は、いずれも穴が発生していた。各位置の10点温度プロフィールと溶接外観を図11に示す。1\_NGは、溶接温度が温度計の測定下限である500℃以下となることがあり正常部と比較して差が大きいため、不良部の検知が容易である。一方、3\_NGは他の温度低下部と温度が同程度で、不良部の検知が困難である。しかし、温度プロフィールの情報があれば不良部の判断が可能となる。例えば、3\_NGの温度プロフィールでは、正常部のHAZ幅が5~6mmなのに対し、最小HAZ幅3mmの部位があるので不良と検知できる。従来から使用しているスポット型放射温度計では、板幅方向温度の測定データしか入手できないが、2D温度計では、温度プロフィールのデータから、不良部前後のHAZ幅の変化、溶接温度ピーク位置の変化等を把握できる。

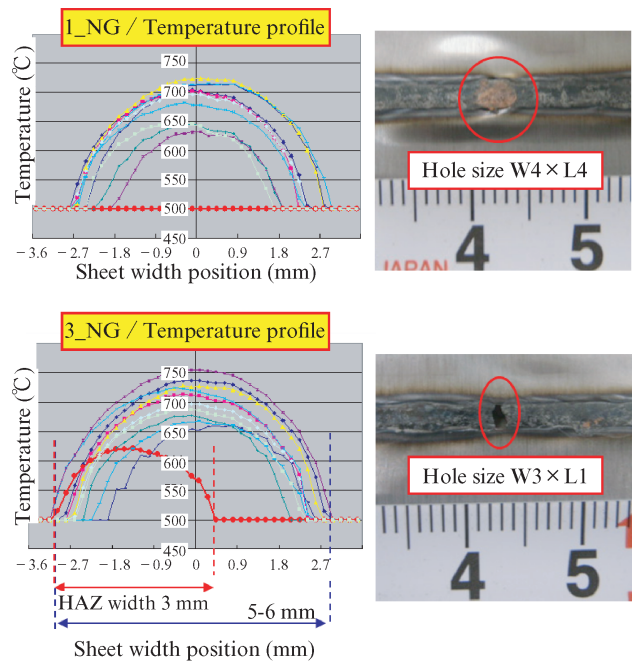


図11 溶接温度測定結果 溶接異常部温度プロフィール

Fig. 11 Result of welding temperature (abnormal temperature weld profile)

板幅方向温度と温度プロフィールを適用することでさまざまな形態の溶接不良を検知可能と判断し、溶接テストを繰返し、溶接不良の事例を集め、溶接異常を判定するロジックを構築し、溶接不良判定装置に実装した。溶接不良を判定するロジックの一例を図12と下記で説明する。

判定1 (Judge 1): 温度下限しきい値超えの監視

従来からの判定手法で、単純に設定しきい値 (Threshold) 以下の溶接温度が発生した場合に異常と判定する。

判定2 (Judge 2): 板幅内加熱範囲の監視

加熱範囲(%) = しきい値超えの幅(mm) / 板幅(mm) \* 100  
板幅内の加熱範囲を算出し、加熱範囲が設定値以下の場合異常と判定する。

判定3 (Judge 3): HAZ幅の監視

取得する温度プロフィールごとにHAZ幅を算出し、HAZ幅が設定以下の場合異常と判断する。

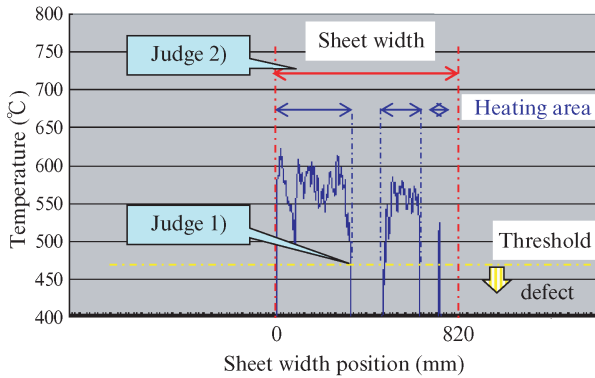
判定4 (Judge 4): 加熱中心位置の監視

判定3同様、取得する温度プロフィールごとに温度ピーク位置となるHAZ中心位置を算出する。続いて、センター位置とHAZ中心位置の変化量(図内の1.7mm)を算出し、変化量が設定以上の場合異常と判断する。

以上の判定項目を並列で処理することで、HAZの微小な異常部位まで検知できるようになった。また、測定結果と判定結果は長期間保存し、溶接機の傾向値管理にも適用している。

Judging process of welding

- 1) Monitor the peak temperature.
- 2) Monitor the ratio of the sheet width to the heating area.  
Heating area (mm) / Sheet width (mm)



Judging process of welding

- 3) Monitor the HAZ width.
- 4) Monitor the HAZ center position.

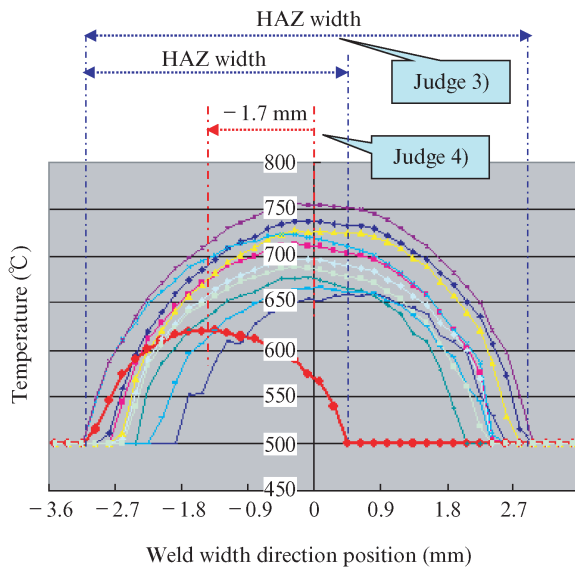


図 12 溶接良否判定ロジック

Fig. 12 Welding quality judgment logic

## 6. おわりに

溶接良否判定に有効な 2D 温度計と判定装置を開発し、2013 年に東日本製鉄所（千葉地区）缶用鋼板連続焼鈍ライン（CAL）溶接機に導入した。缶用鋼板の生産を西日本製鉄所（福山地区）に集約したことで該当ラインは休止したが、本技術を福山地区の缶用鋼板 CAL に展開し<sup>3)</sup>、さらに性能が向上した判定技術を導入することで、安定操業に寄与している。

参考文献

- 1) 富永憲明, 石井久義, 田所寛樹, 佐藤恵一, 田方浩智, 渡部裕二郎. 鋼板板厚 6 mm まで連続圧延を実現する新マッシュシーム溶接機の開発. 三菱重工技報. 2019, vol. 49, no. 4, p. 38-46.
- 2) 山本利雄, 奥田滝夫. 高速重ねシーム溶接の接合部形成現象の基礎的研究 (第 3 報). 溶接学会誌. 1977, vol. 46, no. 10, p. 40-45.
- 3) 北井賢吾. DS 技術を用いた溶接異常判定機能レベルアップ. 電気学会研究会資料, 産業応用部門ものづくり研究会. 2023, MZK23011, p. 11-16.