

# ディファレンシャル装置における鋳鉄と炭素鋼との異材レーザー溶接

西本 大地\*    津田 翔太\*    田淵 隆行\*    島田 秀一\*\*    鈴木 健史\*

## 抄 録

自動車の電動化や小型化により、パワートレイン部品においては鋳鉄と炭素鋼の溶接が必要となるが、鋳鉄を含む異材溶接では遅れ割れが課題となる。遅れ割れの対策としてNiを添加しながら溶接を行うことにより、応力の低下、韌性の確保を図っているが、割れの撲滅は難しいのが現状である。本稿では鋳鉄と炭素鋼の異材溶接部において調査を行い、溶融部におけるNi攪拌の重要性を確認した。また、溶融部よりも熱影響部が硬く、割れのリスクが高いこと、溶接中にマルテンサイト生成に十分な冷却速度が発生することを確認した。

### 1. ま え が き

近年、電気自動車普及に伴いバッテリー搭載空間を確保するため、パワートレイン部品においては小型軽量化が要求される。またガソリン車においても、低燃費化を目的とした軽量化が必要とされる。

一方、ディファレンシャル装置では、差動機構を格納するケース部(鋳鉄製)とファイナルギヤ(炭素鋼)の接合にボルトが使われてきた。Fig. 1に示すようにボルトによる接合は接合面の確保のため大型化するうえ、ボルトの数だけ重量も増加する。この鋳鉄と炭素鋼の接合方法をレーザー溶接に置き換えることで、小型軽量化を実現する。しかし鋳鉄を含む異材溶接では、溶接後数日以内に発生する遅れ割れが課題となり、生産適用が難しい。

本稿ではこの遅れ割れ低減のため、レーザーの照射条件によって変化する材料組織の状態と、材料組織の形成に影響を与えるNiの分布状況を調査した。

### 2. 遅れ割れの要因と対策

溶接時の遅れ割れは熱影響部、又は溶融部で、48時間以内に発生するとされている。遅れ割れの詳細ははまだ解明されておらず、Fig. 2に示す溶接部の金属組織・拡散性水素・内部応力の3要素によって発生するとされている。遅れ割れ全体では研究途上である一方で、3要素の各々では研究が進んでおり、次に示すような事象が一般的に知られている。

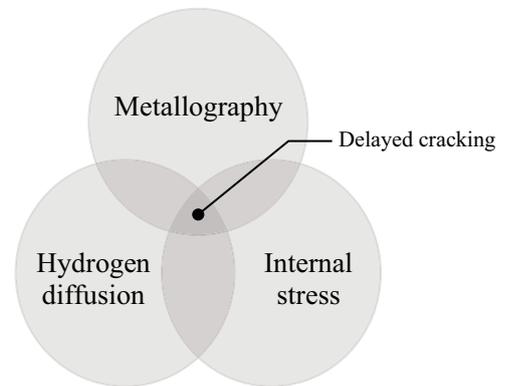


Fig. 2 Three elements of delayed cracking

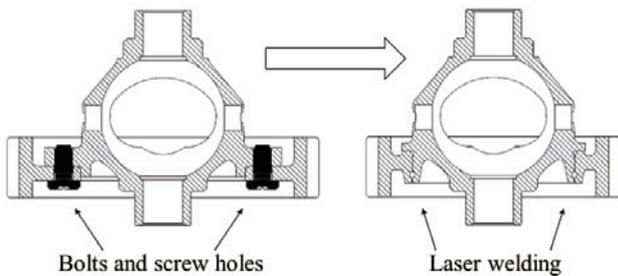


Fig. 1 Downsizing and weight reduction by laser welding

\* 部品技術部    \*\* 技術統括部

## 2.1 金属組織

金属組織の観点では、急冷による熱影響部でのマルテンサイト生成が割れの要因となる。溶接では材料に与える温度履歴が急熱急冷となるため、マルテンサイトのような高硬度の組織が生成されやすい。マルテンサイトは熔融温度から500℃付近までの冷却速度が速くなることで生成されるため、予熱行程や徐冷行程を設けて、金属組織の制御を行う場合もある。

## 2.2 拡散性水素

金属材料内部には常温で結晶格子内を移動できる水素原子が存在し、これを拡散性水素という。拡散性水素は、材料内部の高応力部位に集積する特性があり、溶接によって内部応力が高くなった場所に集積することで水素脆化を引き起こし、遅れ割れの要因となることが知られている。拡散性水素は溶接前に材料に含まれるものと、溶接時に周囲から巻き込むものがあり、遅れ割れ対策としては溶接後に残留する水素を低減することが重要である。

## 2.3 内部応力

鋳鉄を含む溶接を行う場合は一般的にNiを添加し、生産工程ではNi合金ワイヤを添加しながら溶接している。これはFeに対しNiを約36%<sup>(1)</sup>添加すると熱膨張係数が最小となるインバー特性を利用し、冷却時の熔融部の収縮量を小さくすることで残留する内部応力を下げることが目的である。またNiはCと結合しないため、周囲からCを固溶することによる熔融部の硬化を防ぐこともでき、靱性確保の点でもNi添加は有効である。

本稿では遅れ割れの全容解明に向けた第一歩として、熔融部のNi濃度分布測定を行い、レーザ照射条件によって異なる遅れ割れの発生状況との関係を調査した。また、金属組織の視点で溶接部の組織観察、硬さ分布測定を行い、割れ発生箇所と高硬度部位との関係を調査し、実際に高硬度組織を形成する急冷が発生しているかを、温度履歴測定で確認した。

## 3. 実験方法及び結果

レーザ溶接実験の概要をFig. 3に示す。母材は鋳鉄と炭素鋼で、φ1.0mmの70%Ni合金ワイヤを添加しながら溶接する。ワイヤはレーザの進行方向前方から45°の角度で熔融池に投入する。シールドガスにはN<sub>2</sub>を使用した。レーザはYb:YAG発振による焦点直径φ0.4mmのIRレーザを使用した。レーザパワーを2,510W, 2,650W, 2,710Wの3条件、焦点高さを溶接部表面から-2.5mm, -3.0mmの2条件変化させ、Table 1の合計6条件で溶接を行った。溶接中は上部から赤外線ハイスピードカメラで撮影を行い、溶接後はFig. 4に示す方向に試料を切り出し、Ni濃度分布と硬さ分布測定を行った。

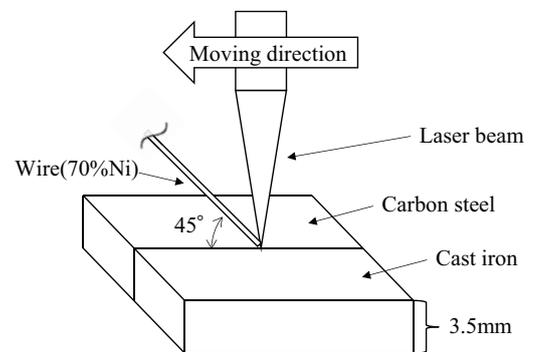


Fig. 3 Laser welding setup image

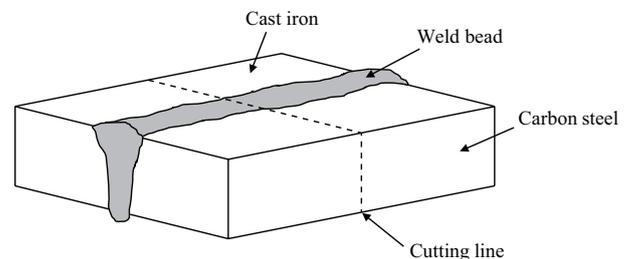


Fig. 4 Cutting

Table 1 Experimental settings

No.	Laser power (W)	Focus position (mm) (from surface)
1	2,510	-2.5
2	2,650	-2.5
3	2,710	-2.5
4	2,510	-3.0
5	2,650	-3.0
6	2,710	-3.0

### 3.1 Ni 濃度分布

#### 3.1.1 測定方法

Ni濃度分布の測定にはEPMA (Electron Probe Micro Analyzer) を用いた。EPMAは試料に電子を衝突させ、放出される特性X線を計測することにより元素分析を行う装置である。今回は最大加速電圧30kVの装置を使用し、溶接部の断面を測定した。濃度分布のカラーマッピングを行う際に、溶接時に使用するNi合金ワイヤを濃度基準とすることで、視覚的に比較可能な、同レベルでのカラーマッピングを行った。

#### 3.1.2 結果と考察

Fig. 5にレーザー照射条件ごとのNi成分のカラーマッピング結果と割れの発生状況を示す。割れの発生状況は発生率をLow, Middle, Highの3段階で評価し記載した。焦点距離-2.5mmでは上部に滞留しているのに対し、-3.0mmでは下半分までは到達している。レーザーパワーによる変化でも割れ発生率は変化するが、Ni濃度分布が割れに大きく影響を与えることを確認した。

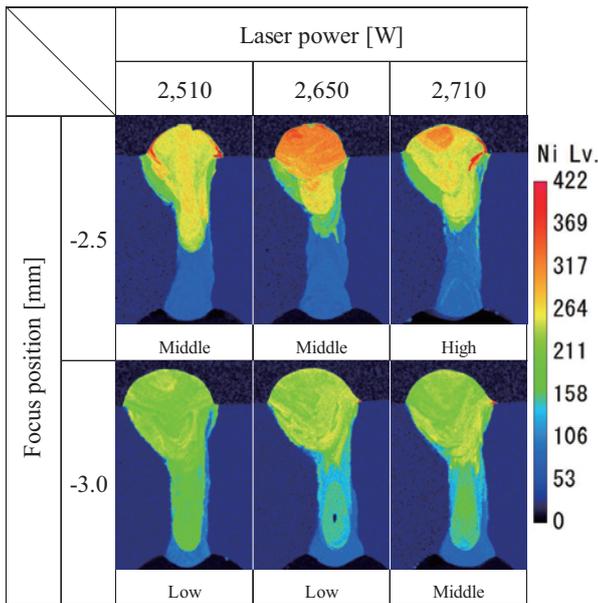


Fig. 5 Distribution of Ni and crack rate

### 3.2 硬さ分布測定

#### 3.2.1 測定方法

硬さ分布の測定にはマイクロビッカース硬さ試験機を用いた。荷重300g, 0.2mmピッチで測定を行い、等倍した試料写真上にマッピングした。測定範囲は溶融部と両側の熱影響部を含む、縦5mm (24点), 横3.5mm (17点) とした。

#### 3.2.2 結果と考察

Fig. 6に硬さ分布のカラーマッピング結果を示す。熱影響部の、特に鋳鉄側で最も硬く、600HV以上を示しており、組織観察の結果マルテンサイトが生成されていた。一方で溶融部は300~350HVに抑えられており、溶融部の靱性確保の観点では、Ni添加の効果が得られている。

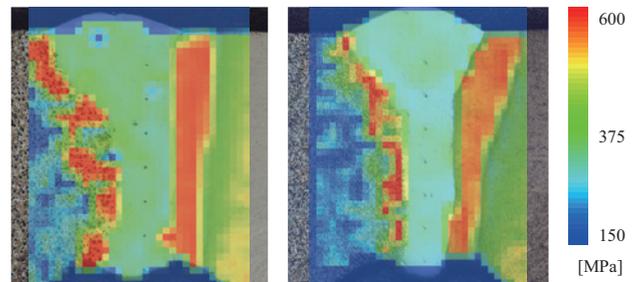


Fig. 6 Hardness distribution of welded area

### 3.3 温度履歴測定

#### 3.3.1 測定方法

温度履歴の測定には赤外線ハイスピードカメラで撮影した映像データを用いた。撮影には最大画素640×512で1,000fpsの撮影が可能なカメラを使用した。また波長感度を3,000~5,000nmとすることで、レーザー光とヒュームの影響を除外した。撮影した映像と材料固有の放射率を用いて温度換算を行い、位置情報から経過時間を算出することで温度履歴グラフを作成した。

### 3.3.2 結果と考察

温度履歴作成に至る過程とグラフをFig. 7に示す。放射率は鋳鉄の0.29と鉄の0.42から平均0.35として計算した。溶融部表面では凝固後も800°C/sec以上の急冷が観測され、熱影響部においてもマルテンサイト生成には十分な冷却速度が発生していると考えられる。

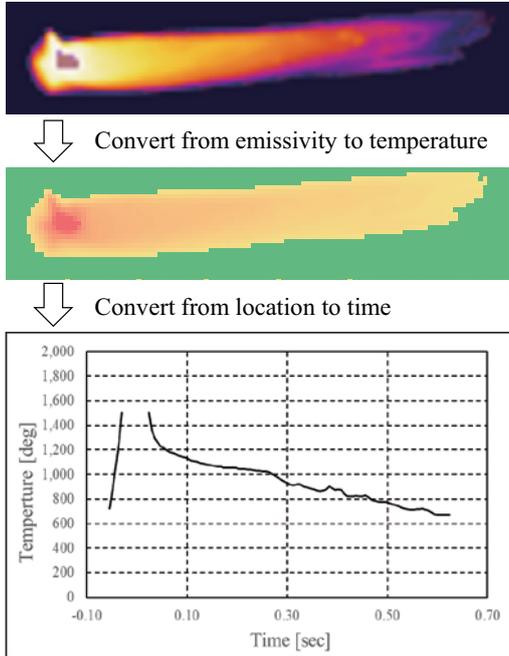


Fig. 7 Creating a temperature history graph

### 4. まとめ

鋳鉄と炭素鋼の溶接を行うにあたり、遅れ割れに影響する3要素の1つである組織について、関連する調査を行った。今回の調査で得られた結果を下記に示す。

1. Ni分布、硬さ分布、温度履歴の測定方法を確立し、可視化できた
2. Ni分布が割れに大きく影響を与えることを確認した

### 5. 今後の課題

今回確立したNi分布、硬さ分布、温度履歴の測定手法を用いて、金属材料視点での遅れ割れメカニズムについて引き続き調査を進める。また今後は残り2要素の応力・水素も考慮した調査を行い、遅れ割れの全容解明に向けて取り組んでいく。

### 6. 参考文献

- (1)機械材料学, 武井英雄, 中佐啓治郎, 篠崎賢二, 292 - 293, 株式会社オーム社, 2016 (第1版第3刷)
- (2)溶接・接合技術, 溶接学会編, 200 - 202, 338 - 339, 産報出版株式会社, 2015 (再版第6刷).
- (3)溶接学会全国大会講演概要, 西本大地 他, Ni合金ワイヤを用いた鋳鉄と炭素鋼のレーザー溶接部におけるNi分布状況の調査, 第113集, 60 - 61, 溶接学会, 2023.
- (4)溶接学会全国大会講演概要, 張人之 他, Ni合金ワイヤを用いた炭素鋼と鋳鉄のレーザー溶接温度場解析モデリング, 第113集, 58 - 59, 溶接学会, 2023.

### ■ 著者 ■



西本 大地



津田 翔太



田淵 隆行



島田 秀一



鈴木 健史