

疲労強度改善のためのレーザ照射による結晶粒微細化に関する基礎検討

寺辻, 和陸
九州大学大学院工学府 : 修士課程

内村, 友哉
九州大学工学部技術部

松田, 和貴
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

後藤, 浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

<https://hdl.handle.net/2324/4822550>

出版情報 : 溶接学会九州支部講演論文集. 19, pp.37-40, 2022. 溶接学会九州支部
バージョン :
権利関係 :



疲労強度改善のためのレーザ照射による

結晶粒微細化に関する基礎検討^{*1}

○寺辻 和陸^{*2} 内村 友哉^{*3} 松田 和貴^{*4} 後藤 浩二^{*4}

Key Words: 疲労強度, 結晶粒微細化, レーザ照射, デフォーカス距離

1. 緒 言

船舶や橋梁等の大型溶接構造物の損傷形態は疲労破壊が大半を占める．特に溶接止端部は応力集中部となり，疲労亀裂発生 の起点となりやすい．そのため，溶接止端部の疲労強度の向上に関する研究が盛んであるが，その多くは溶接施工後に実施される処理であり，作業工程の増加から生産効率の低下を招く恐れがある．これに対し，上村ら¹⁾は継手製造ラインにおいて溶接後引き続き処理できるレーザ照射により，疲労寿命の向上が期待できる止端部の形状緩和と溶融部周辺の結晶粒微細化が可能であることを明らかにした．

鉄鋼材料における結晶粒微細化層は，急熱・急冷の熱サイクルに起因するフェライト/オーステナイトの相変態に起因して生じることが知られている．結晶粒が微細化された結晶粒界は亀裂進展の妨げとなることに加え，結晶粒が微細な組織では材料強度が向上するため，微細な結晶粒を有する鋼材では疲労強度が向上する．一方，長期間の使用が想定される船舶や海洋構造物では，疲労寿命改善のために溶接止端部の結晶粒を微細化しても，表面部の腐食や摩耗という経年劣化により疲労寿命改善効果が消滅することが懸念される．船舶の構造部材に対しては，海水曝露環境には 1.0 mm，貨物倉横隔壁には 1.0 ～ 5.2 mm の腐食予備厚を考慮した設計が要求される²⁾．

結晶粒を微細化する手法として，比較的簡便に局所的にこれを生じさせることが可能なレーザ照射を活用して鋼材表面の結晶粒を微細化する手法³⁾⁴⁾について種々の試験が検討されているものの，レーザ出力，走査速度ならびにデフォーカス距離（レーザ焦点距離を基準とした移動量）等のレーザ照射条件を拡張した検討は行われていない．本研究では数 mm ほど鋼材の内部に形成し，さらにその位置や厚さを照射前から予測できる手法の確立に向け，レーザ照射条件や温度履歴の観点から検討を行った．

2. 温度履歴の実測値ならびに理論値との比較

2.1 デフォーカス距離の影響調査

溶接冶金学における知見から，結晶粒微細化層を制御するためにはその温度履歴の条件範囲（最高到達温度，冷却速度）を求める必要がある．そこで，理論解⁵⁾と実測値が一致すれば任意位置の温度履歴を予測できることから，理論解を適用可能なレーザ照射条件を探索した．Table 1 に示すレーザ照射条件にて，Fig. 1 に示す 5 点の温度履歴を測定し，移動熱源ならびに線熱源による温度分布の理論解と比較した．Fig. 1 中の CH1, CH4 または CH5 の温度履歴の比較結果を Fig. 2 に，レーザ照射部のマクロ断面写真を Fig. 3 に，理論解に基づく溶融領域の断面図を Fig. 4 に示す．Fig. 2 より，デフォーカス距離（D.D）+25 mm で理論解として移動熱源を採用した場合のみの，実測値と温度履歴がおおよそ一致することを確認した．一方，D.D が+5 mm のときは，両方の理論解ともに鋼材裏面の実測値を下回った．次に溶融領域形状について比較する．Fig. 3 に示すように D.D が+5 mm のときは溶融領域形状が狭く深いのに対して，D.D が+25 mm のときは半円状であった．一方，Fig. 4 に示すように，いずれの理論解を採用しても溶融領域形状は半円状である．以上の結果より，実測値と理論解の温度分布の相違

^{*1} 原稿受付 2022 年 8 月 19 日，2022 年度九州支部研究発表会で発表

^{*2} 九州大学 大学院工学府 修士課程 Master course, Graduate School of Engineering, Kyushu University

^{*3} 九州大学 工学部技術部 Technician, Technical Division, School of Engineering, Kyushu University

^{*4} 正会員 九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門 Member, Department of Marine System Engineering, Kyushu University

は、溶融領域形状の差異が原因であると推察される。加えて、線熱源の理論解と実測の温度履歴が一致しなかったのは、走査速度が不十分で線熱源の状態には相当しなかったためと推察される。これらの結果を踏まえて、以降は D.D を +25 mm と固定して検証を進めた。

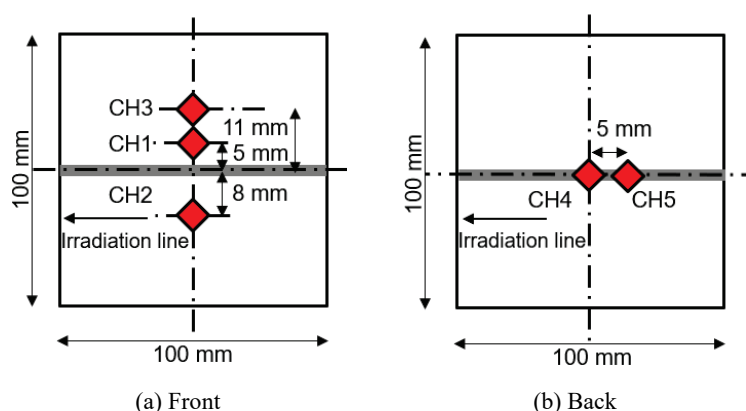


Fig. 1 Temperature history measuring points.

Table 1 Laser irradiation conditions.

Specimen ID	A	B
Laser power [kW]	3.0	
Travel speed [mm/min]	500	
Defocus distance (D.D) [mm]	+5	+25
Plate thickness [mm]	12	
Steel grade	KA	

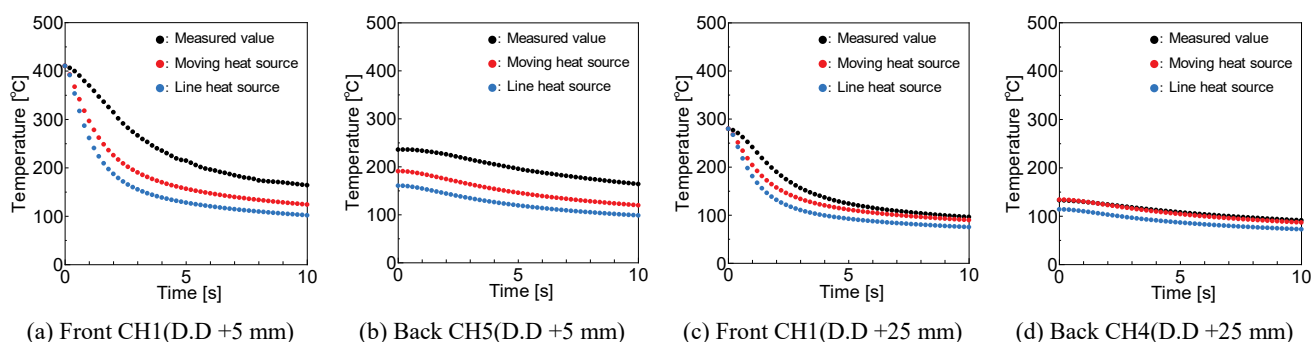


Fig. 2 Comparison of measured temperature history with theoretical solution.

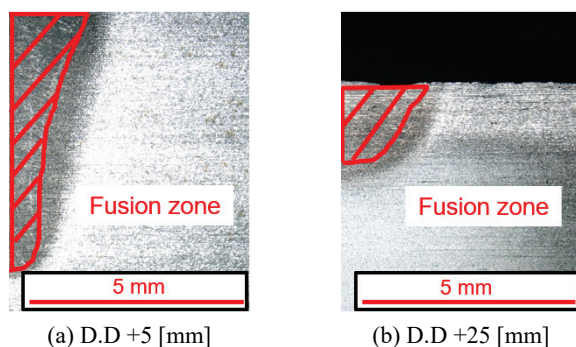


Fig. 3 Cross-sectional observation.

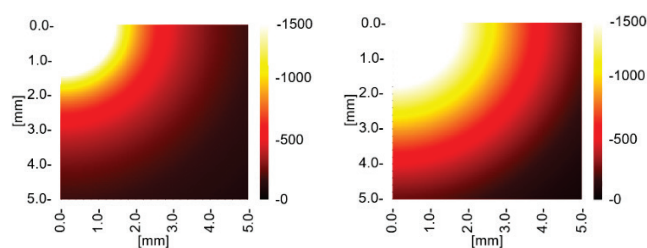


Fig. 4 Temperature distribution in the cross section.

2.2 レーザ出力・走査速度ならびに板厚の影響調査

レーザ出力・走査速度ならびに板厚が温度履歴の測定値と理論解の差異に及ぼす影響を調査した。レーザ照射条件を Table 2 に示す。板厚 12.5 mm に対し、走査速度 3 条件、レーザ出力 3 条件で計 9 条件、ならびに、板厚 8.0, 20 mm に対し、走査速度 1 条件、レーザ出力 1 条件で計 2 条件の全 11 条件とした。また、試験片形状は Fig. 1 から板幅を 150 mm に変更した。測定した温度履歴と理論解の比較の一部を Fig. 5～Fig. 7 に示す。温度履歴の測定位置 (CH) は Fig. 1 に示したものと同一である。Fig. 5 に示す板厚 12.5 mm における実測値と理論解の比較結果では、移動熱源の方が実測値に近い結果が得られた。また、実測値と線熱源の温度履歴を比較すると、走査速度 500 mm/min 時には 2.1 節に示した結果と同様に差異が大きかったが、走査速度が 750 mm/min 以上であれば、ある程度一致することを確認している（紙面都合で走査速度 750 mm/min の図は省略）。また、板厚は異なるがレーザ照射条件は同じである場合の温度履歴比較 (Fig. 6, Fig. 7) を参照すると、板厚 8.0 mm のときはいずれ

の理論解も裏面が実測値と一致しなかったものの、板厚 20 mm のときはいずれの理論解においても理論値と実測値が良好に一致した。板厚 8.0 mm のときに理論値と実測値が一致しなかった理由は、理論解における裏面での熱反射の考慮が断熱反射である一方、本実験での状況はこれと異なり、熱伝達や輻射等により一部の熱が散逸したためであると推察される。以上の結果と前節における結果を考慮すると、本研究で実施したレーザ照射条件下における板厚内温度分布を理論解により推定できるのは、板厚 12 mm 以上の場合であることが判明した。

Table 2 Laser irradiation conditions.

Specimen ID	Laser power [kW]	Travel speed [mm/min]	Plate thickness [mm]	Steel grade
1	1.0	500	12.5	KA36
2		750		
3		1,000		
4	3.0	500		
5		750		
6		1,000		
7	5.0	500		
8		750		
9		1,000		
10	3.0	750	8.0	
11			20	

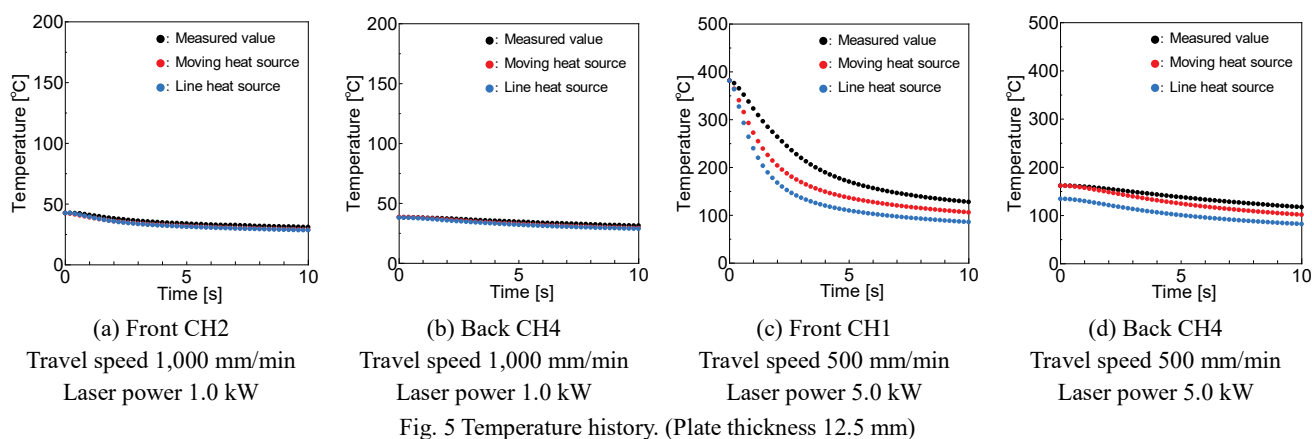


Fig. 5 Temperature history. (Plate thickness 12.5 mm)

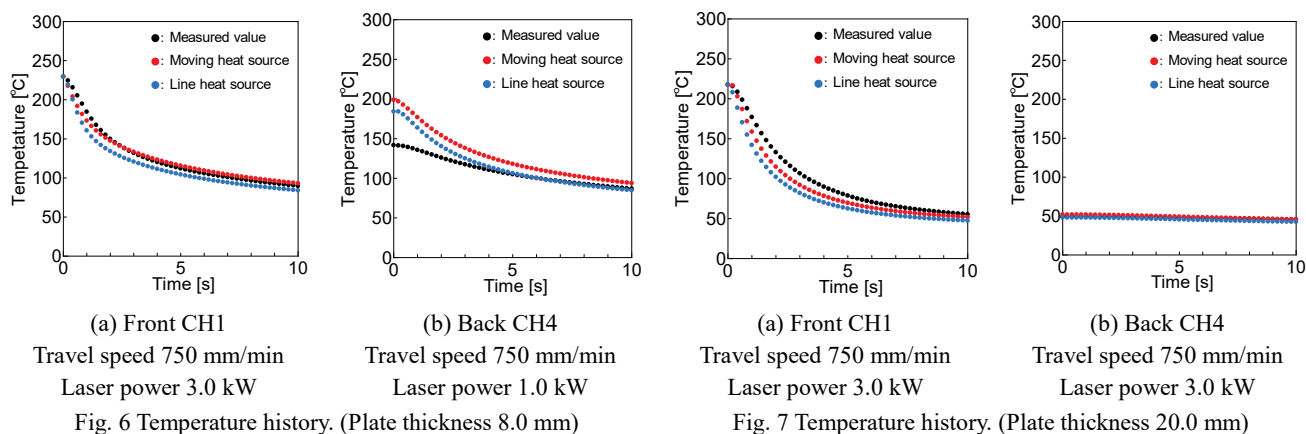


Fig. 6 Temperature history. (Plate thickness 8.0 mm)

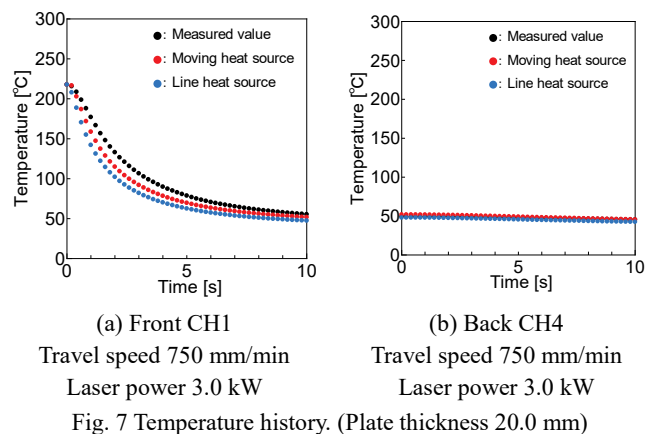


Fig. 7 Temperature history. (Plate thickness 20.0 mm)

3. 結晶粒微細化層の発生条件

最高到達温度ならびに 800 °C から 500 °C までの冷却時間 ($\Delta t_{8/5}$) が溶接熱影響部の最高硬さの支配パラメータであること⁹⁾および、最高硬さと結晶粒径の相関を考慮すると、微細化層の出現に $\Delta t_{8/5}$ が何らかの関与を有することが期待される。そこで、2.1 節で用いたデフォーカス距離+25 mm 時の試験体のレーザ照射線直下における結

晶粒微細化層の深さ位置を計測した後、移動熱源による理論解により同位置の温度履歴を解析した。なお、試験体表面を原点とし、母材の平均結晶粒径よりも小さな結晶粒径が確認される層を結晶粒微細化層と定義した。まず、母材における組織写真を Fig. 8、結晶粒微細化層を含む組織写真を Fig. 9 に示す。結晶粒径の測定は JIS G 0551⁷⁾に準拠した。その結果、レーザ走査線直下の最深部において、結晶粒微細化層は試験体表面から 2.18~2.35 mm に位置した。また、移動熱源による理論解での温度履歴の解析結果を Fig. 10 に示す。溶融領域に最も近い結晶粒微細化層の最高到達温度は 930 °C で、 $\Delta t_{8/5}$ は 0.384 s であった。また、溶融領域から最も遠い結晶粒微細化層の最高到達温度は 839 °C で、 $\Delta t_{8/5}$ は 0.424 s であった。以上の結果より、結晶粒微細化層が発生する条件は最高到達温度が 839 °C から 930 °C、 $\Delta t_{8/5}$ は 0.384 s から 0.424 s の間に収まると考えられる。一般的な軟鋼の A₃ 点は 900 °C 前後であり、この熱サイクルは冶金学的な観点から妥当と言える。

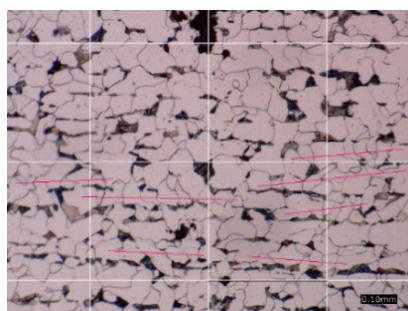


Fig. 8 Base metal's crystal grain.

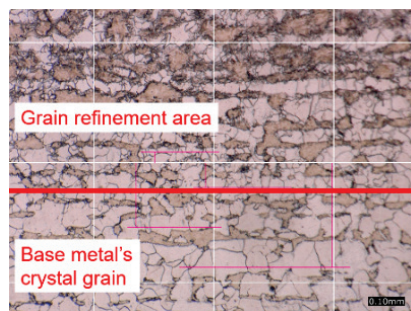


Fig. 9 Grain refinement area and base metal's crystal grain.

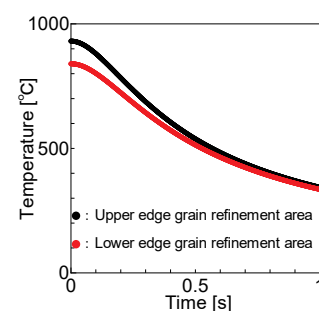


Fig. 10 Temperature histories of grain refinement area soluted by theoretical formula of moving point heat source.

4. 結 言

本研究では、疲労強度改善と耐腐食の観点から、結晶粒微細化層の位置を予測する手法の確立を目的に、理論値と実測値の温度履歴の比較ならびに結晶粒微細化層の発生条件について検討を行った。以下に結論を示す。

- (1) デフォーカス距離は溶融形状の観点から+25 mm 時に実測値と理論解が良好に一致したことを確認した。
- (2) 移動熱源の理論解はレーザ出力、走査速度に拠らず、実測値と概ね一致することを確認した。
- (3) 線熱源の理論解はある一定の走査速度を超えないと、実測値と一致しないことを確認した。
- (4) 精度の良い移動熱源を用いて、断面観察と比較して結晶粒微細化層の発生する温度履歴範囲を推定した。

今後は任意のレーザ照射条件で事前に結晶粒微細化層の位置を予測し、実際の発生位置と比較する必要がある。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、各種のご助言を賜りました久留米工業高等専門学校の森園靖浩教授に感謝の意を表します。本研究は JSPS 科研費 JP20H02372 の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- 1) 上村 崇杜 他：レーザ照射による金属結晶粒微細化技術を用いた溶接継手部の疲労強度改善に関する諸検討，溶接構造シンポジウム 2019 講演論文集，pp. 287-294，2019.
- 2) 日本海事協会：CSR-B&T 編 ばら積貨物船および油タンカーのための共通構造規則，pp. 70-71，2021.
- 3) 沓名 宗春 他：炭素鋼の結晶粒微細化に及ぼす多重熱サイクルの影響，溶接学会全国大会講演概要第 73 集，pp. 519，2003.
- 4) 西尾一政，加藤光昭，山口富子：レーザー照射による結晶粒の微細化，機能材料，Vol. 27，No. 7（2007），pp. 56-60.
- 5) T.TERASAKI and T.G.GOOCH：Prediction of Cooling Time for Ferrite-Austenite Transformation in Duplex Stainless Steel，ISIJ International，Vol. 35，No. 10，pp. 1272-1276，1995
- 6) 稲垣道夫：鋼材の熔接諸条件と冷却時間（第 7 報），溶接学会誌，Vol. 28，No. 4（1959），pp. 244-249.
- 7) 日本産業標準調査会：JIS G 0551，鋼－結晶粒度の顕微鏡試験方法，2022