

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

上村, 崇杜
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 : 博士後期課程

田口, 慎
九州大学大学院工学府

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/2324/4794744>

出版情報 : 溶接構造シンポジウム講演論文集, 2019-12. 溶接学会
バージョン :
権利関係 :



レーザー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

九州大学 大学院工学府 建設システム工学専攻 博士後期課程 ○上村 崇杜
(一財) 日本海事協会 (研究当時, 九州大学大学院工学府) 田口 慎
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

Fatigue strength improvement of welded joints using metal grain refinement technology by laser

by Takamori UEMURA, Makoto TAGUCHI and Koji GOTOH

1. 緒言

船舶や橋梁等の大型構造物中には非常に多くの溶接継手が存在し、鋼構造物の破壊原因の多くはこの継手から亀裂が発生した後、進展することで破壊に至る。大型構造物の構造強度健全性を改善することを目的に、従来鋼と比較して結晶粒径が細かく、低炭素等量化により溶接熱影響部でも優れた破壊靱性を示す TMCP 鋼が開発され、構造物用鋼母材の疲労強度も大幅に改善したが、溶接継手部では溶接入熱による結晶粒粗大化や、溶接止端部近傍に降伏点レベルの高い引張残留応力場が存在すること等の結果、大型溶接構造物の疲労強度の改善には至っていない。

溶接継手部で疲労強度が低下する要因として溶接止端部近傍の応力集中が挙げられる。特に大型溶接構造物では構造形状の不連続は避けがたく、その結果として応力集中が生じるが、それに加えて溶接ビード部近傍で母材との形状不連続のため、局所的に応力集中が生じる。これらの相乗効果の結果、溶接止端近傍に作用する応力は著しく増大する。そこで溶接止端部の形状を滑らかにすることで応力集中を緩和し、継手の疲労強度を向上させることが可能である。

一方、金属材料の機械的性質は結晶粒度に依存することが知られており、結晶粒を微細化することは強度と靱性の両方を改善できる唯一の手段として広く知られている。結晶粒の微細化については製造プロセスにおいてこれを達成するための様々な手法が開発されているが、すでに完成した鋼材に対する手法として、西尾ら¹⁾³⁾は、鋼材表面を溶融させない程度にレーザーを繰り返し照射することで、金属結晶粒が微細化できることを示している。そこで、大型溶接構造物の疲労強度向上対策として、建造後の溶接止端部近傍の結晶粒粗大化領域にレーザー照射して再度微細化を施すことで、溶接継手の疲労強度向上が期待できる。なお、同様の方法で熱源を高周波誘導加熱とする場合も結晶粒の微細化が可能であることも報告されている⁴⁾。結晶粒微細化による溶接継手の疲労強度改善効果の検証例として、永田ら⁵⁾はすみ肉溶接止端部に高周波誘導加熱による結晶粒微細化手法を適用し、溶接止端部近傍の平均結晶粒径 $30\mu\text{m}$ を $10\mu\text{m}$ 程度まで微細化することで、疲労寿命が 1.5~2.5 倍になると報告している。

西尾らによるレーザー照射による結晶粒微細化技術では、鋼材表面を溶融させないことを前提としているが、溶接止端部ではあえて止端形状を溶融させることで TIG ドレッシングと同様の効果を生じることが期待されることから、溶接止端極表面では止端形状緩和効果による亀裂発生寿命の改善、板内部では結晶粒微細化効果による伝播抑制を同時に付与できるレーザー照射条件を確立することで、大型溶接構造物の長期間に渡る疲労寿命改善に寄与できるものと期待される。加えて、Fig. 1 に示すように、レーザーアークハイブリッド溶接

(以下、ハイブリッド溶接と称す.) と組み合わせることで、ハイブリッド溶接で突合せ継手もしくはT継手を往路で製作した後、復路工程でレーザ溶接に切り替え、溶接止端形状の緩和と金属結晶粒微細化を施すことで、継手全体が従来の溶接継手に対して強化されることに加えて作業工程の簡略化すなわち、省人化や省力化に繋がり、生産効率の向上が期待できる。

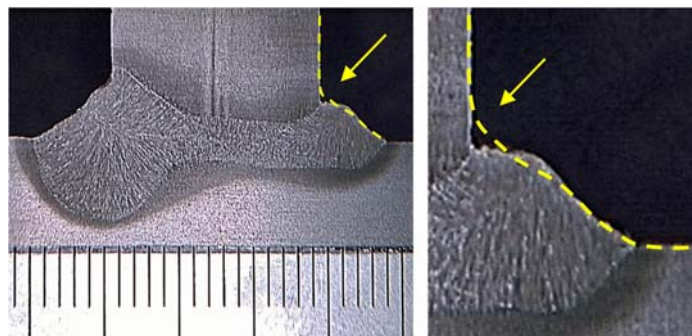


Fig. 1 Image of construction of a tough welded joint combining LAHW and laser irradiation technology.

2. ビードオンにおけるレーザ照射実験

2.1 緒言

レーザ照射による結晶粒微細化技術を溶接継手の疲労強度改善手法として採用するためには、照射条件と結晶粒微細化の程度に関して知見を蓄積する必要がある。本章では、平板へのレーザ照射実験と断面計測により照射条件の微細化への影響に関して検討した。

2.2 実験内容

本実験ではレーザ照射時の雰囲気ガスおよびレーザ照射回数が溶け込み形状と結晶粒の微細化の度合いに与える影響を確認した。実験方法として、ハイブリッド試験機を用いることにより、レーザヘッドからのレーザ照射時にアークトーチからのガスパージにより CO_2 ガスを噴射し、レーザ光路上に CO_2 ガス雰囲気を形成した中で照射を行った。レーザヘッドは試験体とほぼ垂直（レーザ前進角または後退角 0 度）に配置した。

2.3 照射条件等

共試材は板厚 14mm の KD36 鋼を用いた。表面性状は防錆プライマを剥離し、フライス加工により黒皮を切削したものである。レーザの照射条件を **Table 1** に示す。レーザ移動速度は全て 600mm/min である。

Table 1 Test conditions.

Test ID.	1	2	3
Laser power (kW)	0.3	2.6	
Defocusing distance (mm)	5	10	15

ID.1 は試験体表面を溶融させないことを想定した照射条件、ID.2 は溶け込みの深いキーホール型の溶融形態、ID.3 は ID.2 からデフォーカス距離のみを大きくし、幅広の溶融形態となることを想定した照射条件である。また、西尾らの照射条件^{1)~3)}と比較するために、大気中（ガス無し）の条件下において、レーザ照射回数を 1 回と 4 回に分けた実験も行った。さらに、 CO_2 雰囲気中で 1 回のみレーザ照射した試験片をそれぞれ取得し、研磨と腐食を行った後にマクロ断面の観察を行い、溶融・変質域の計測と平均結晶粒径の計測を行った。

2.4 マクロ断面計測結果

実験より得られた試験体を適切な大きさに切り出し、ベルトサンダーを用いて粒度#1000 まで研磨を行った後、4%ナイトールでエッチングを行い、断面をアセトンで洗浄した試験片について顕微鏡を用いてマクロ断面の観察を行った。照射影響により母材部と組織の様相が異なった領域および熔融域の計測結果、微細化が顕著な領域における粒径計測結果、変質部と母材部の境目を 0.1mm の間隔で測定したビッカース硬さ試験の結果を **Table 2** に、1 回照射試験片のマクロ断面の写真を **Fig. 2** に示す。

Table 2 Irradiation affected zone and melted zone.

Test ID		CO ₂ gas	Number of irradiation	Irradiation affected zone		Melted zone		Average grain size (μm)	Maximum Vickers Hardness (HV)
				Width(mm)	Depth(mm)	Width(mm)	Depth(mm)		
1	A	X	1	0.97	0.47	0.68	0.39	2.8	499
	B	○		0.89	0.39	0.67	0.31	3.1	462
	C	X	4	1.13	0.50	0.75	0.40	2.4	495
2	A	X	1	4.12	4.07	2.94	3.77	3.6	441
	B	○		5.09	4.03	4.02	3.45	4.0	430
	C	X	4	4.66	4.21	3.44	3.89	2.8	431
3	A	X	1	3.15	2.63	2.06	2.21	2.4	445
	B	○		4.96	2.74	3.83	2.49	3.6	419
	C	X	4	3.20	2.83	2.10	2.51	2.3	462

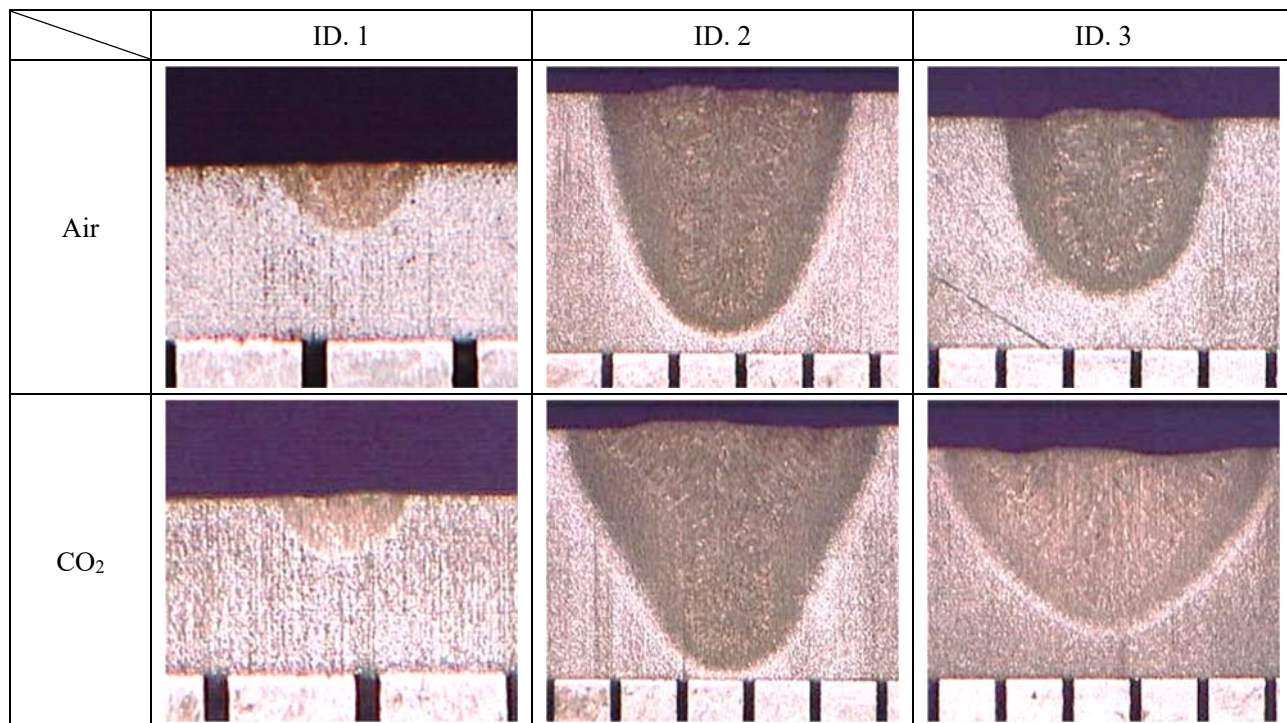


Fig. 2 Cross section macroscopic observation.

ID.2 と ID.3 においては大気中照射と比較して、CO₂ 雰囲気中照射では熔融および変質域の幅の増大が確認された。この理由は、CO₂ 雰囲気中では大気中よりも表面活性元素である酸素の量が熔融部において少ない

ために、表面張力対流が変化したことが考えられる。ID.2 は溶込みが深いいため表面近傍でのみ熔融地内の対流の変化が影響したために表面付近の熔融および変質域の幅が増加したものと考えられる。照射回数を重ねることで、ID.1 と ID.2 では幅方向に、ID.3 では深さ方向に顕著に熔融および変質域の増大が確認された。

金属結晶粒径について、全ての条件で結晶粒の微細化が確認された。一方で、全ての条件で CO₂ 雰囲気中照射 (ID.B) では大気中照射 (ID.A) と比較して粒径がわずかに大きくなるという傾向が確認され、CO₂ 雰囲気中ではわずかに微細化効果が小さくなることが考えられる。また、照射回数 4 回 (ID.C) の方が 1 回 (ID.A) と比較して粒径が小さく出ており、照射回数の増加に伴い微細化が促進される傾向が確認された。西尾らの研究においても同様の傾向が報告されている。熱伝導型の熔融形態を想定した ID.3 の照射条件はキーホール型の熔融形態を想定した ID.2 から得られた試験片より全体的に粒径が小さく出ており、微細化効果がより大きくなることが示唆される。

母材部の硬さの平均は、KD36 では 190 HV であり、平均結晶粒径は 10.4μm であった。いずれもボンド部もしくはその近傍で最高硬さを確認した。

3. 熔融無しでの表面改質を目的とした金属結晶粒微細化実験

3.1 緒言

前章で説明したレーザ照射実験では、いずれも鋼材表面の熔融が確認された。表面の熔融を許した場合、結晶粒の細粒部自体は照射影響部内に存在するが、同時に熔融部と細粒部の間に粗粒域が発生する。この領域では亀裂の進展速度は従来よりも速くなるため、全体で見ると疲労強度の有意な向上効果が得られない恐れがある。このことから、レーザ照射点における亀裂の発生ならびに進展抑制のためには鋼材（照射点）表面を熔融させずに一定以上の深さで結晶粒を微細化させる必要がある。

そこで、レーザ出力、デフォーカス距離、照射速度を変更しながら複数の条件でビードオンによるレーザ照射施工を実施し、以上の課題を達成する照射条件を探索した。

3.2 照射条件

前章で述べた実験では、いずれもレーザヘッドは鋼材と垂直に配置し、鋼材表面におけるレーザの熱源形状は円となる状態であったため、熱源強度分布はガウス分布に近い状態であり、円形状の中心で熱源強度は最大となる。

そこで、本章での検討では、照射角度を移動方向と平行に傾斜させた。これにより鋼材表面の熱源形状は楕円形状となり、熱源の集中度合いが下がるため、鋼材表面の熔融を防ぐことが可能となると期待される。

Table 3 にはレーザ出力、デフォーカス距離、照射回数、移動速度の照射条件とこれらの照射条件に基づいて計算されたエネルギー密度を示す。エネルギー密度の式は(1)に示すとおりで、本式は熱源形状が円である場合の式のため、レーザ照射に角度をつけた際のレーザ熱源形状はやや楕円型となり厳密には異なるが、現段階では簡易的なエネルギー密度算出として(1)式を採用した。

$$E = \frac{\eta \cdot W}{V \cdot \phi} \quad (1)$$

ここで、

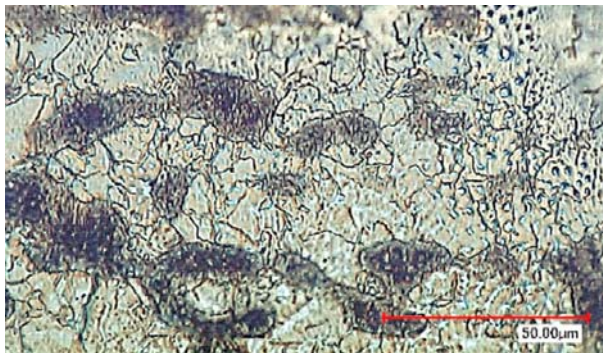
E :	エネルギー密度	η :	熱効率	W :	レーザ出力 (W)
V :	移動速度 (mm/sec)	ϕ :	スポット直径 (mm)		

Table 3 Irradiation test conditions. (Place of grain refinement: Surface)

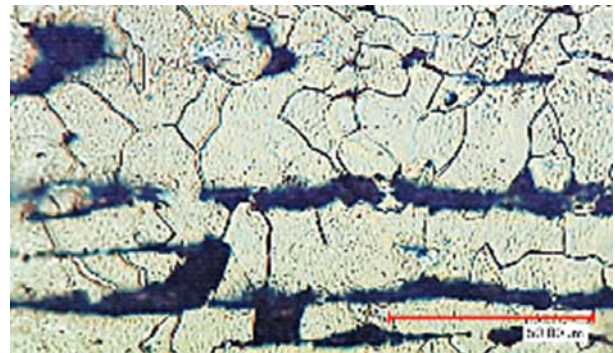
ID.	Laser power	Defocusing distance	Number of irradiations	Travel speed	Energy density
	[kW]	[±mm]		[mm/min]	[J/mm²]
1	1.04	50	1	2,000	6.74
2		60			5.62
3		70			4.82
4		70		1,700	5.67
5				1,000	9.65
6				600	16.08
7	1.41	70		2,000	6.54
8				1,800	7.27
9				1,400	9.34
10				1,000	13.08

3.3 照射結果

Fig. 3 には本実験で得られた微細化領域のミクロ観察写真の一部と比較のために母材の金属結晶粒ミクロ観察写真を示す。



A) Fine grain area of ID. 2



B) Base metal

Fig. 3 Cross section macroscopic observation. (2,000 magnifications)

本章では複数のレーザ照射条件で表面の溶融がほとんど無く、結晶粒の微細化を確認した。疲労亀裂の発生と進展を抑制するためには、ある程度の微細化領域の深さが必要であると考えられる。しかしながら、**Table 4** と **Fig. 4** に示すように、微細化領域の深さを表面から計測したところ、表面からおおよそ 0.3mm の地点で母材の金属結晶粒径と同等な大きさになることを確認した。

Table 4 Average grain size. (From surface)

Depth from surface (mm)	Average grain size (μm)	
	ID. 7	ID. 8
0.0 ~ 0.1	4.13	3.87
0.1 ~ 0.2	4.30	6.79
0.2 ~ 0.3	6.45	8.34
0.3 ~ 0.4	10.13	11.50

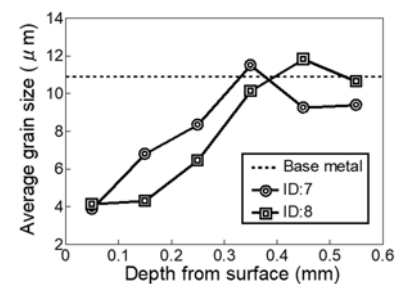


Fig. 4 Average grain size in each depth.

4. 隅肉溶接継手の溶接止端部に対するレーザ照射実験

4.1 緒言

第3章における実験から、レーザ照射施工により結晶粒の微細化領域が形成されること自体は確認できたものの、多数の条件では照射点近傍において溶融する結果となった。また、レーザ出力、デフォーカス距離、照射速度に加えてレーザヘッド傾斜角を操作することで、鋼材表面を溶融させずに結晶粒の微細化可能なものもあったが、そこで形成された微細化領域は鋼材表面から非常に浅く（0.3mm程度）、亀裂の発生ならびに進展の抑制に対して大幅な効果は期待できない。

しかしながら、レーザ照射による2つ目の継手疲労寿命効果として期待される、以下に示すように、止端部の再溶融の応力集中緩和を組み合わせることで、微細化との相乗効果を得られる可能性がある。

- 1) 高い応力の作用する継手止端を再溶融し、応力集中を緩和して亀裂発生寿命を改善。
- 2) 金属内部に形成される微細化領域で亀裂の進展を遅延。

以上の効果により疲労亀裂発生および伝播の両面で延命化性能を発揮させることで、大幅な疲労強度の向上が可能となると期待される。さらには、序論で述べたハイブリッド溶接に加えて浸炭処理等の表面改質技術を組み合わせることでさらに頑健な継手を簡単な付加装置や材料により構築できる可能性がある。

4.2 試験方法

予めTable 6に示す溶接条件で両側隅肉溶接されたT継手を製作し、このビードの溶接止端部にレーザを照射することで止端形状の変化を調査した。レーザの照射条件はTable 5に示すようなデフォーカス距離とレーザ出力を変えた10通りである。また、溶接止端部の照射前後の形状計測は三角測距方式二次元レーザ変位計（KEYENCE LJ-V series）⁶⁾とスライド方向に座標間隔が均一なリニアエンコーダシステム（RENISHAW Tonic T100x RGSZ）⁷⁾を組み合わせることで取得した。得られたデータはCSV形式として出力が可能であり、その数値データを基に専用プログラムにて止端半径ならびにフランク角等の算出を行った。

Table 5 Irradiating conditions.

ID.	Laser power (kW)	Defocusing distance (mm)	Energy density ($W \cdot s/mm^2$)
1	2.5	15	172
2		30	89
3		45	60
4		60	45
5		90	30
6	5.0	15	343
7		30	178
8		45	120
9		60	90
10		90	60

Table 6 Fillet welding conditions.

Arc current (A)	373
Arc voltage (V)	31.7
Travel speed (mm/min)	600
Arc torch angle with horizontal (deg.)	40.0

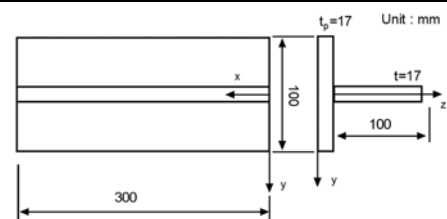
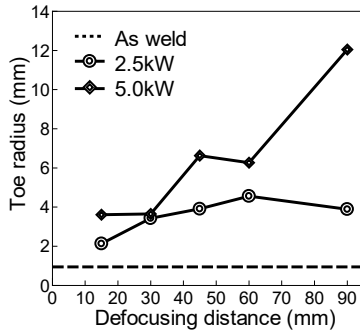
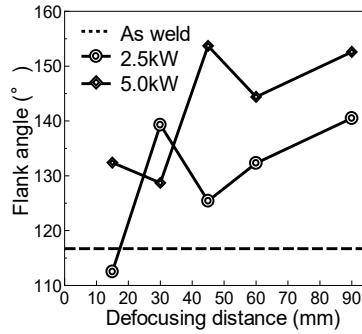


Fig. 5 Geometry of test specimens

長手方向の中央の 100mm において間隔 0.2mm (500 点) で形状を計測し、各パラメータの分布と平均を計測した。各照射条件における止端半径およびフランク角の平均を Fig. 6 に、立板・主板側の脚長の平均を Fig. 7 に示す。また、(2)式に示すように、辻による非荷重伝達型隅肉継手止端部に対する推定式⁸⁾を用いて曲げを受ける T 継手の形式に対して算出を行った。各照射条件により得られた溶接止端部の K_t 計算結果を Fig. 8 に示す。なお、 K_t の計算において Fig. 7 内であまりにも全体の傾向から逸脱していると思われる照射条件は初期ビードのバラツキが大きいと考えられるため計算から除外した。

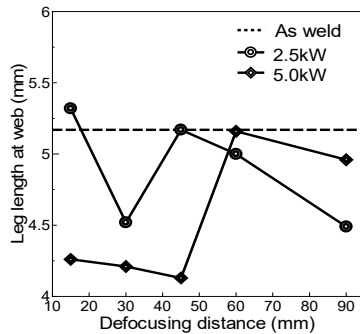


(A) Toe radius

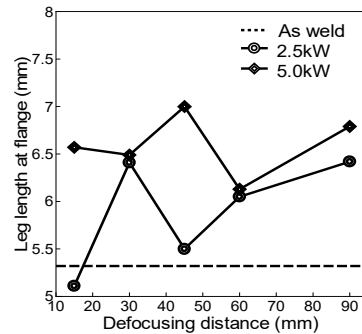


(B) Flank angle

Fig. 6 Average geometry parameters.



(A) Leg length at web



(B) Leg length at flange

Fig. 7 Average leg length.

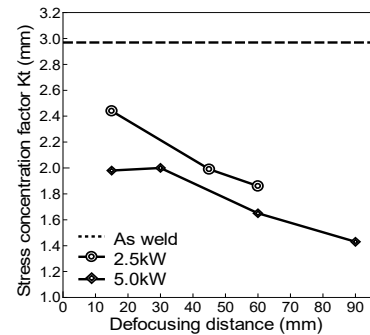
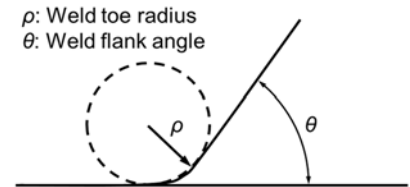


Fig. 8 K_t in T-joint under bending load.

$$K_t = 1 + \left\{ 0.629 + 0.058 \cdot \ln \left(\frac{T}{t} \right) \right\} \cdot \left(\frac{\rho}{t} \right)^{-0.431} \cdot \tanh \left(\frac{6h}{t} \right) f_\theta \quad (2)$$

ただし、

h_p : 主板側隅肉脚長

h : 立板側隅肉脚長

θ : フランク角

ρ : 溶接止端半径

t : 主板板厚

t_p : 立板板厚

Fig. 6 の結果から、止端半径およびフランク角いずれもデフォーカス距離 D_f を大きくとるほど増大する傾向にあることが確認できる。しかしながら、一部の照射条件でその傾向から逸脱している点が見受けられる。この原因として、隅肉溶接は全て同じ施工条件としたが、雰囲気温度や試験片形状のわずかな違い、ティーチングのズレなどの原因で継手ごとにビード形状に違いが生じたためと考えられる。このレーザー照射前の溶接ままのビード形状の違いが、照射後の形状パラメータに影響を及ぼしている恐れがあると考えられる。

いずれの形式も、 D_f を大きくとるほど K_t は減少傾向にあり、効果的な形状緩和効果を得るためには D_f を大きくとることが望ましいと考えられる。

5. 結論

本研究では、レーザ照射による継手疲労寿命向上として、結晶粒微細化と応力集中緩和の 2 つの効果について基礎的な検討を実施し、以下の結論を得た。

- a) 鋼材へのレーザ照射実験と結晶粒径の計測から、レーザ照射による表面の微細化のみでは継手の大幅な疲労寿命向上は期待できないことを確認した。
- b) 隅肉 T 継手止端部へのレーザ照射実験と 3D スキャンによる形状計測から、レーザ照射により応力集中の緩和が可能であることが確認され、また照射条件と改善効果に関して複数の知見を得た。

今後、上記の継手へのレーザ照射実験に関して熱伝導解析と結晶粒の計測から結晶粒の微細化に関して定量的な検討を進めるとともに、試験体に対して疲労試験や破壊靱性試験等を実施し、実際の疲労寿命向上効果を確認することで同技術の有用性を確立する必要がある。

また、ハイブリッド溶接や浸炭処理等による表面改質効果技術などを組み合わせることにより、さらに強靱な継手の構築を検討し、溶接工程と仕上げ工程がひとつの工程で完結するような生産システムの提案を進める。

参考文献

本研究は公益財団法人天田財団による一般研究開発助成により実施したものである。関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 西尾 一政, 加藤 光昭, 山口 富子: レーザ照射による結晶粒の微細化, 機能材料, Vol.27, No.7, pp.56-60, 2007.
- 2) Tomiko YAMAGUCHI, Hideyuki IKEDA and Kazumasa NISHIO: Simulation of Grain Refinement using Monte Carlo Method, Journal of the Japan Welding Society, Vol.81, Issue 2, pp.90-95, 2012. (in Japanese)
- 3) Tomiko YAMAGUCHI, Naohide IMAMURA, Mitsuaki KATOH and Kazumasa NISHIO: Grain Refinement of Austenitic Stainless Steel by Laser Irradiation, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol.27, Issue 4, pp.270-277, 2019. (in Japanese)
- 4) 福岡県工業技術センター: 溶接継手部組織の微細化による疲労寿命延命化を図る高周波誘導加熱システムの開発, 中小企業産学官連携研究開発事業報告書, 2003.
- 5) Yukinobu NAGATA, Masahiro TOYOSADA, Koji GOTOH and Koji MURAKAMI: A fatigue life prolonging method for welded built-up steel structures by the grain fining around weld toe, 溶接構造シンポジウム 2004 講演論文集, 2004.
- 6) <https://www.keyence.co.jp/mykeyence/>. (Accessed on September 22, 2019)
- 7) <https://resources.renishaw.com/jp/details/tonic-t101x-rslm-relm--63119>. (Accessed on September 22, 2019).
- 8) Isamu TSUJI: Estimation of stress concentration factor at weld toe of non-load carrying fillet welded joint, Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, No.80, pp.241-251, 1990. (in Japanese)