

レーザー加工技術を援用した 長寿命大型溶接構造物建造技術に関する研究

九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門
教授 後藤 浩二

(2018 年度 一般研究開発助成 AF-2018206-B2)

キーワード：レーザー照射，結晶粒微細化，応力集中緩和，疲労

1. 研究の背景と目的

船舶・海洋構造物，橋梁，鉄道車両，高層建築鉄骨構造等，多くの大型構造物の損傷形態は応力集中部を起点とする場合が大半である。日本機械学会による機械・構造物の破損事故例の分類によれば，損傷事故の 8 割以上に疲労が深く関わっていることから，大型構造物における疲労損傷事故を防止することは，豊かかつ安全な社会活動を営むために，極めて重要な課題である。大型溶接構造物中には応力集中源である溶接継手が多数内在していることに加え，母材性能が改善しても疲労強度の改善には寄与しないという広く知られた事実がある。溶接継手の疲労強度改善を目的とした耐疲労鋼も開発されているが，耐疲労性能の劇的な改善には至っていない。

金属材料の強度と靱性を同時に改善可能な手法は結晶粒微細化のみであるが，西尾ら¹⁾は，軟鋼板にレーザー照射を繰り返し，照射部近傍温度履歴が A₃ 変態点を跨ぐ前後となるようにすることで，結晶粒が微細に均一化することを示している。ただし西尾らの方法では，金属を溶融させないように小入熱のレーザー照射を複数回付与するようにしている。一方，金属表面を溶融させないレーザー照射条件を与えることは必ずしも容易ではない。著者らは，大型構造物の強度部材として使用される通常鋼を評価対象として，西尾らの方法に沿って，材料表面を完全に溶融させない結晶粒微細化を試みたが，適切な条件を導出することは困難であった。

この結果を考慮し，表層部の溶融は許容する立場を採用することにしたが，表層部の溶融を許容すると，逆に以下の点で有利なことが期待される。

- (1) 大型溶接構造物で生じる損傷の多くは，溶接止端部を起点とする疲労破壊である。そこで，溶接止端部にレーザー照射処理を施して結晶粒微細化効果を付与しようとするれば，TIG ドレッシング処理と同様に溶接止端形状が滑らかなることから，応力集中が緩和して溶接継手の疲労強度に対して有利に働く。
- (2) 表層部が溶融するということは，付与される熱履歴の観点から，表層より一定距離深い箇所の結晶粒が微細化される。船体の船倉部やバラスタタンク部を考えると，経年に伴う腐食や積載時の（バケットなどの衝突に相当する）グラブ荷重等の影響で表層部

は深刻なダメージを受け，場合によっては剥がれ落ちてしまうこともある。長期に渡って疲労強度を良好に保持することを考えると，応力集中の影響が低下する表層部よりも深い箇所に結晶粒微細化効果を付与するほうが望ましい。

一方，申請者は従来のアーク溶接と比べて優れた継手品質を有し，かつ大型構造物建造に適用される板厚やギャップ裕度にも対応可能と期待されるレーザー・アークハイブリッド溶接技術を船体構造の建造に適用するため，様々な検討に取り組んできた²⁾。その成果の一つとして，大型溶接構造物中に多数存在するすみ肉溶接継手を，ハイブリッド溶接により片側からの 1 パス完全溶込み継手に置き換えることを考え，長尺溶接にも対応できる施工条件を確立するとともに，溶接変形や疲労強度の面での優位性を確認している。この置き換えを達成できれば，強度要件を満たしつつ，より軽量の構造物の製造が可能となる。また，上述のハイブリッド溶接による継手の溶接止端に表面近傍の溶融を許容するレーザー照射処理を施せば，従来のアーク溶接による溶接継手と比較して長期の稼働期間において優れた疲労寿命を有する継手の製造が可能となる。

本研究では，上述の研究背景に基づき，溶接止端部に対する表面溶融を許容する適切なレーザー照射条件について検討するとともに，疲労強度改善効果に関しても検討を実施した。実験には申請者の研究室が所有するレーザー・アークハイブリッド溶接実験装置を活用し，レーザー光路上に意図するガス雰囲気形成するため，アークトーチからガスのみを噴出するなどの工夫を行った。

2. レーザー照射条件に関する検討

2.1 実験条件と方法

最初に，レーザー照射条件と結晶粒微細化の関係性に関する知見の蓄積を目的に，レーザー照射時の雰囲気ガスおよびレーザー照射回数が溶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。

実験方法は，レーザー光路上に CO₂ ガス雰囲気形成した状態で照射を行った。レーザーヘッドは試験体とほぼ垂直に配置した。供試材は板厚 14 mm の KD36 鋼（船級協会承認を有する降伏応力 36 kgf/mm² 級の低炭素鋼）である。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。レーザの照射条件を表 1 に示す。レーザ移動速度は全て 600 mm/min とした。

表 1 試験条件

試験 ID	1	2	3
レーザ出力 (kW)	0.3	2.6	
デフォーカス距離 (mm)	5	10	15

試験 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、上記 ID 1~3 において、照射回数の影響を検討するため、大気中（ガス無し）の条件下で、レーザ照射回数を 4 回とした実験及びレーザ光路上が大気まま（CO₂ ガスパージ無し）での実験も行った。

2.2 実験結果

レーザ照射後の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 まで研磨後、4%ナイタ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マクロ断面観察を行った。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溶融域の計測結果、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 0.1 mm の間隔で測定したビッカース硬さ試験の結果を表 2 に、1 回照射試験片のマクロ断面の写真を図 1 に示す。

ID 2 と ID 3 においては、大気中照射と比較して CO₂ 雰囲気中照射では溶融および変質域の幅が増大した。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溶融部において少ないために、表面張力対流が変化した影響を受けたと考えられる。ID 2 は溶込みが深いため表面近傍でのみ溶融地内の対流の変化が影響した結果、表面付近の溶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溶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た。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。熱伝導型の溶融形態を想定した ID 3 の照射条件はキーホール型の溶融形態を想定した 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 10.4 μm 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。

表 2 断面マクロ観察による測定結果と硬さ測定結果

試験 ID	ガス雰囲気	レーザ照射回数	レーザ照射影響範囲		溶融範囲		平均結晶粒直径 (μm)	ビッカース硬さ最大値 (HV)	
			最大幅 (mm)	最大深さ (mm)	最大幅 (mm)	最大深さ (mm)			
1	A	Air	1	0.97	0.47	0.68	0.39	2.8	499
	B	CO ₂		0.89	0.39	0.67	0.31	3.1	462
	C	Air	4	1.13	0.50	0.75	0.40	2.4	495
2	A	Air	1	4.12	4.07	2.94	3.77	3.6	441
	B	CO ₂		5.09	4.03	4.02	3.45	4.0	430
	C	Air	4	4.66	4.21	3.44	3.89	2.8	431
3	A	Air	1	3.15	2.63	2.06	2.21	2.4	445
	B	CO ₂		4.96	2.74	3.83	2.49	3.6	419
	C	Air	4	3.20	2.83	2.10	2.51	2.3	462

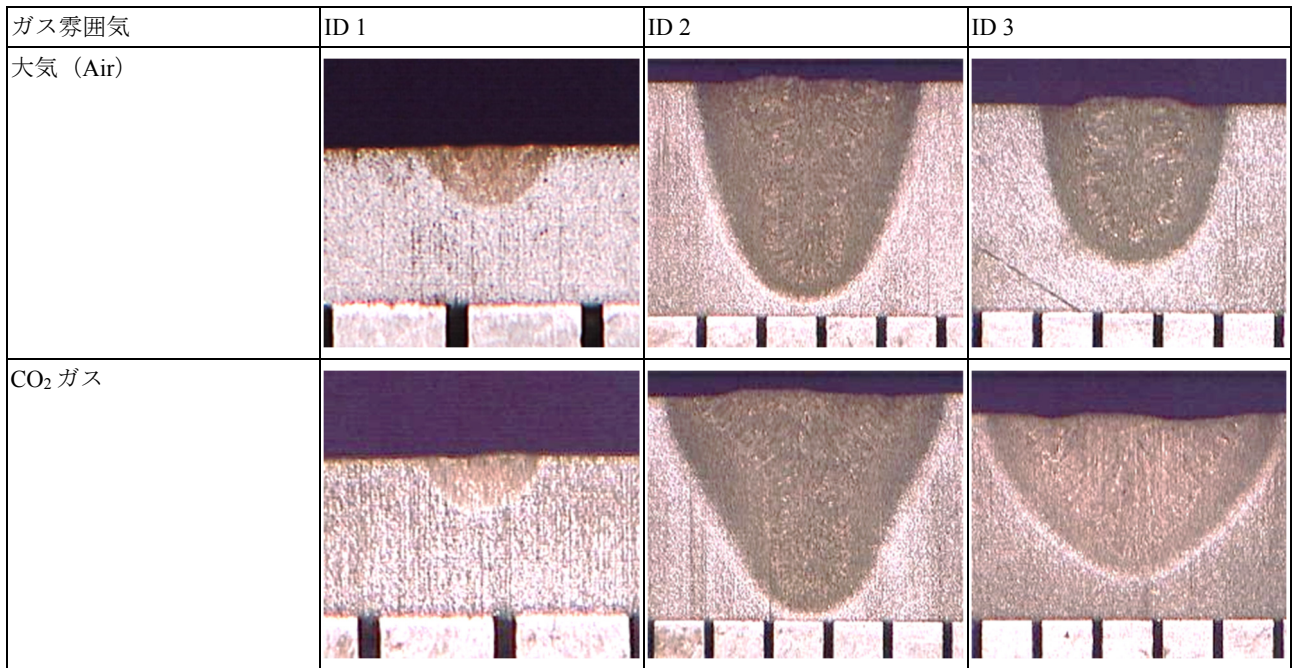


図 1 断面マクロ

3. 表面溶融無しでの結晶粒微細化条件探索

3.1 実験条件と方法

前章に示したレーザー照射実験では、いずれも鋼材表面の溶融が確認された。表面の溶融を許す場合、結晶粒の細粒部自体は照射影響部内に存在するが、同時に溶融部と細粒部の間に粗粒域が発生する。この領域では亀裂進展速度が母材原質部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、レーザー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）表面を溶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、レーザー出力、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ー照射施工を実施し、適正な照射条件を探索した。なお、建造中の構造物への適用を念頭に、照射回数は1回に固定した。

2.で説明した実験ではレーザーヘッドを鋼材と垂直に配置したため、鋼材表面におけるレーザーの熱源形状は、ほぼ円形であったため、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。そこで本検討では、照射角度を移動方向と平行に傾斜させることで鋼材表面の熱源形状は楕円形状とした。この結果、熱源集中度が緩和されるため、鋼材表面の溶融防止が期待される。

表 3 にはレーザー出力、デフォーカス距離、移動速度の照射条件とこれらの照射条件に基づいて、式 (1) により計算したエネルギー密度を示す。式 (1) は熱源形状が円である場合の式であるので、レーザー照射に角度をつけた際のレーザー熱源形状はやや楕円型となり厳密には異なるが簡便さを優先し、近似ではあるがこれを適用することにした。

$$E = \eta W / v\phi \quad (1)$$

ここで、

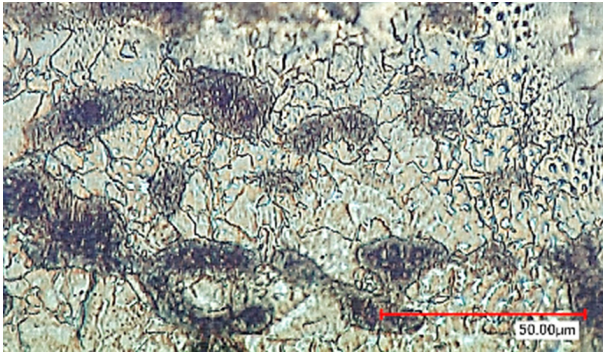
- E : エネルギー密度 (J/mm^2),
- η : 熱効率,
- W : レーザ出力 (W),
- v : レーザ照射移動速度 (mm/s),
- ϕ : レーザスポット直径 (mm).

表 3 表面の結晶粒微細化を検討するためのレーザー照射条件

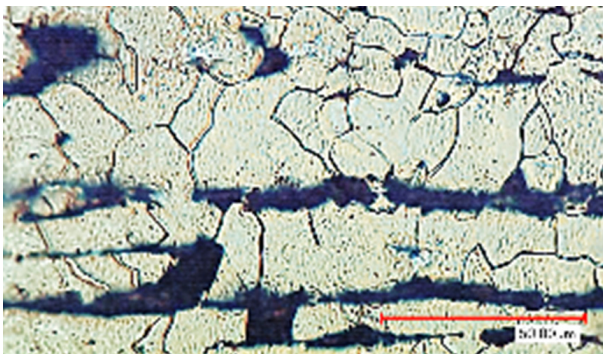
ID	レーザー出力 (kW)	デフォーカ ス距離 (mm)	移動速度 (mm/min)	エネルギー密度 (J/mm^2)
1	1.04	50	2,000	6.74
2		60		5.62
3				4.82
4	1.41	70	1,700	5.67
5			1,000	9.65
6			600	16.1
7			2,000	6.54
8	1.41	70	1,800	7.27
9			1,400	9.34
10			1,000	13.1

3.2 実験結果

図 2 には本実験で得られた微細化領域のマイクロ観察写真の一部と、比較のために母材の金属結晶粒マイクロ観察写真を示す。



(a) 実験 ID 2 で得られた微細結晶



(b) 母材原質部

図2 マクロ観察 (赤線の長さ 50 μm)

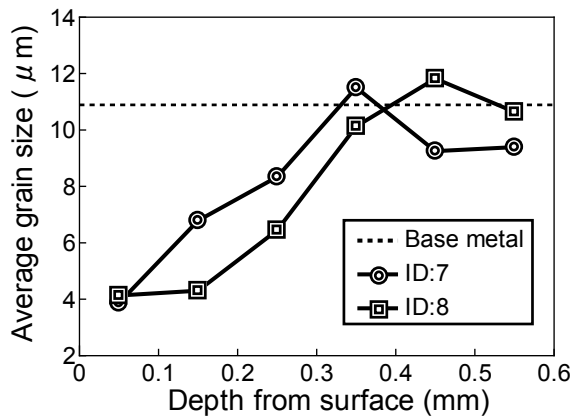


図3 表層からの深さと結晶粒系の関係 (ID 7, ID 8)

本章に示すレーザー照射条件での結果は、表面の溶融がほとんど無く結晶粒微細化を達成していることを確認した。一方、1.でも述べたように、長期稼働期間に渡って疲労強度の健全性を担保するには、表層部ではなく、ある程度の深さ位置において結晶粒微細化を達成することが必要である。本研究を実際の大型構造物建造に付加的に適用することを考慮すれば、深部までレーザー照射効果が届き、かつレーザー照射時間が短時間であることが望ましい。そこで、表3に示す実験の中でこれらの条件を満たすと思われる施工条件のID7とID8に着目し、微細化効果の及んでいる深さを調査した。図3に結果を示すが、表面から0.3 mm

程度深くなった段階で微細化効果は消失し、母材の金属結晶粒径と同等な大きさととどまることを確認した。

4. すみ肉溶接止端部に対するレーザー照射

4.1 実験条件と方法

本章では、溶接継手へのレーザー照射効果による、溶接止端部近傍の結晶粒微細化効果及び止端半径に起因する応力集中の緩和効果を検証する。

表4に示す溶接施工条件で、図4に示すすみ肉溶接によるT継手を製作し、この溶接止端部(主板側)に対して表5に示す条件でレーザー照射を行った。レーザー照射速度は溶接施工速度と同じ600mm/minとした。

表4 T継手製作の溶接施工条件

電流 (A) :	373
電圧 (V) :	31.7
溶接速度 (mm/min) :	600

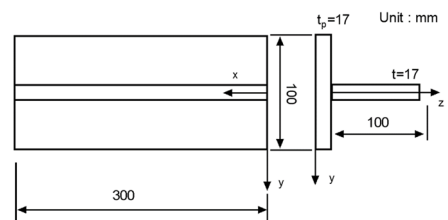


図4 T継手

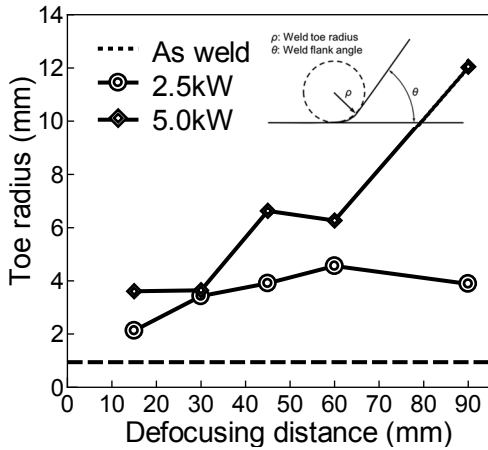
表5 レーザー照射条件

ID	レーザー出力	デフォーカス距離 (mm)	エネルギー密度 (J/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

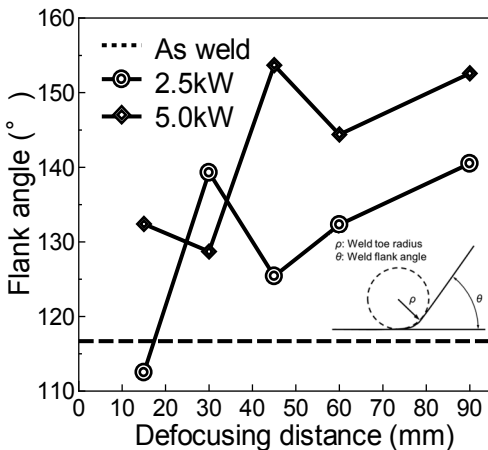
レーザー照射の前後で溶接止端部の形状を三角測距方式二次元レーザー変位計 (KEYENCE LJ-V series) とスライド方向に座標間隔が均一なりニアエンコーダシステム (RENISHAW Tonic T100x RGSZ) を組み合わせて用いることで測定し、止端半径ならびにフランク角等の幾何形状を得た。測定は、溶接線方向中央の100mmにおいて間隔0.2mm (500点) で形状を計測し、各パラメータの分布と平均を計測した。

4.2 実験結果

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図5に、立板・主板側の脚長の平均を図6に示す。加えて、辻³⁾による非荷重伝達型隅肉継手止端部に対する応力集中推定式を用いて曲げを受ける T 継手の形式に対して応力集中係数 K_t を算出し、結果を図7に示す。



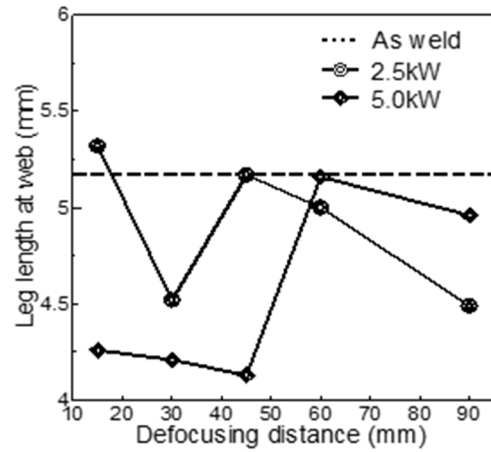
(a) 止端半径



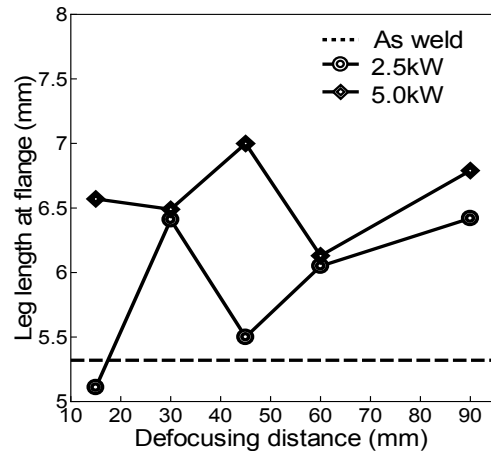
(b) フランク角

図5 レーザ照射後の溶接止端部形状

図5に示す結果から、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 を大きくする程増大する傾向を確認した。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場合もある。この原因として、すみ肉溶接のピード形状のバラツキを考慮せず一律にレーザー照射したことが狙い位置のずれなどを引き起こした可能性が考えられる。しかしながら、いずれの場合もデフォーカス距離 D_f を大きくとるほど応力集中係数 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デフォーカス距離を大きくとることが望ましいと考えられる。



(a) 主板側



(b) 立板側

図6 レーザ照射後の脚長

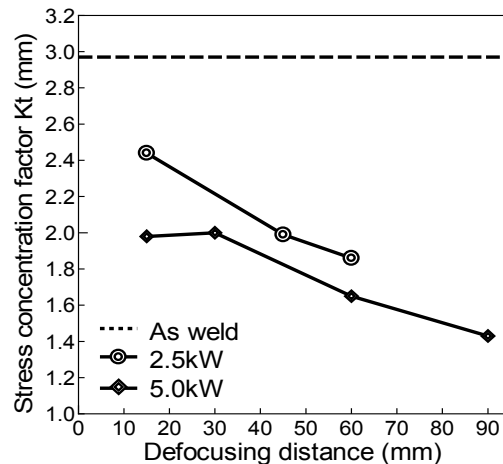


図7 レーザ照射後の止端部の応力集中係数

5. 疲労強度改善に関する検討

5.1 実験条件と方法

溶接止端部に対するレーザー照射による疲労強度改善効果を継手製造時に付与することを目的に、継手製造に資するアーク溶接に対してタンデム方式でレーザー照射を行う

こととした。すなわち、アーク溶接後生成される溶接止端位置を予測したうえでレーザー照射位置を決定し、生成された溶接ビードを被覆するスラグを除去することなくアーク溶接とほぼ同時にレーザー照射施工した。アーク溶接の施工条件は4.の表4であり、レーザー照射の施工条件を表5のID2とID3である。これらの施工条件により製作した継手のIDを順にF1, F2とする。また、疲労強度の比較検討のため、アーク溶接のみ施工・レーザー照射無しの継手も製作した。この継手のIDをF3とする。

5.2 レーザ照射による止端形状改善

レーザー照射後のそれぞれの継手に対して、溶接止端半径及びフランク角を測定した。また、4.2と同様に辻の式により応力集中係数も算定した。これらの結果を表6に示すが、レーザー照射による応力集中の緩和を確認できる。参考のため、レーザー照射した溶接止端部の断面マクロ観察写真を図8に示す。

表6 レーザ照射後の溶接止端形状等

ID	止端半径 (mm)	フランク角 (°)	応力集中係数
F1	3.16	20.2	1.53
F2	2.17	22.2	1.65
F3	1.04	38.8	2.33

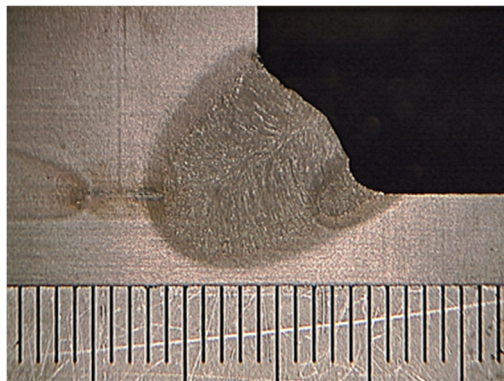


図8 レーザ照射した溶接止端部の断面マクロ観察

5.3 疲労強度に関する検討

上記の継手F1~F3から三点曲げ疲労試験片を複数体製作して疲労試験を実施した。結果を図9に示す。同図にはすみ肉溶接継手に対する複数の疲労設計線図 (IIW FAT100, FAT80, JSSC Class E) も示すが、これらとの比較結果より、レーザー照射を行うことによる疲労強度の改善が確認できる。これは、溶接止端部へのレーザー照射による止端形状の変化にともなう応力集中の緩和が主要要因と考えられる。結晶粒微細化の効果の定量的な確認のためには、疲労亀裂成長履歴を確認し、微細化領域での伝播速度低下を確認す

る必要があるが、今回はこの確認には至っておらず、将来課題と考える。なお、全ての試験片において、疲労亀裂はレーザー照射端部より発生した。

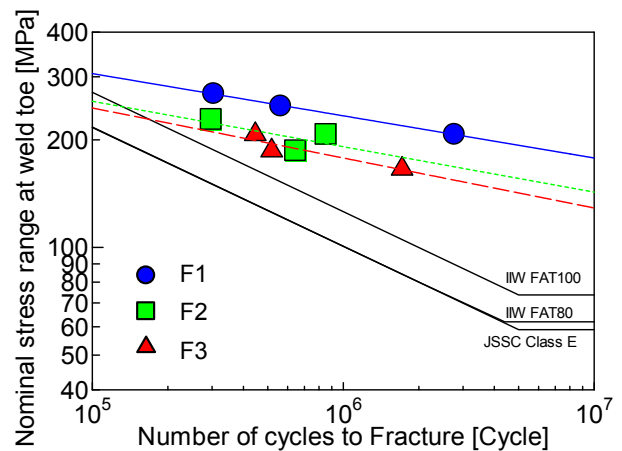


図9 疲労試験結果 (S-N 曲線)

6. 結論

本研究では、溶接止端部にレーザー照射することで、溶接止端部の応力集中緩和及び内部組織の結晶粒微細化を同時に処置し、溶接継手の疲労強度を改善する目的に資するレーザー照射条件の探索を行った。

その結果、実際の大型溶接構造物建造時に同時にレーザー照射することを前提とした照射条件を導出し、疲労強度の大幅な改善を確認した。一方、板内部の結晶粒微細化効果が疲労寿命改善効果に及ぼす定量的検証には至っていないため、これを検証するための疲労亀裂伝播試験方法の検討等が将来課題であろう。

謝辞

疲労試験の実施に際して、(国研)海上技術安全研究所の穴井陽祐氏にご協力を賜りました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 西尾 一政 他：レーザー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) 例えば，Gotoh, K. et al.: Fundamental Studies on Application of Laser-Arc Hybrid Welding for Manufacturing Primary Structural Members in General Merchant Ships, Proceedings of the 8th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP 2019), May 2019.
- 3) 辻勇：非荷重伝達型すみ肉溶接継手の止端部の応力集中係数の推定式，西部造船会会報，No.80, 1990, 241-251.