

# レーザー溶接接合材の3次元的内部観察による劣化損傷機構に基づく高機能複合接合技術の開発

広島大学大学院工学研究科 機械物理工学専攻

助教 曙 紘之

(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013207)

キーワード：レーザー溶接, 劣化損傷, 内部観察

## 1. 研究の目的と背景

レーザー溶接はその多くの利点から、近年、その適用範囲が拡大している接合技術<sup>1) 2)</sup>である。しかしながら、その接合部形状については経験的な部分が多いのが現状であり、優れた耐久性を有する最適な接合部形状についての知見が求められている。このような最適な接合部形状の選定には、長期の使用に伴う劣化・損傷機構を把握することが必要不可欠であるが、レーザー溶接接合材のような多くの接合材の損傷は、その多くが被接合材内部に生じる内部損傷であるため、一般的な外部からの観察では損傷メカニズムを追跡することが困難である。そこで申請者らはこれまでスポット溶接接合材、および樹脂系接着接合材の強度特性、とりわけ繰返し負荷に対する耐久性評価を実験的に行っており、独自の3次元的内部観察手法により内部劣化損傷機構の解明に成功している。同手法をレーザー溶接接合材に適用することにより、繰返し負荷に対する耐久性、および内部劣化損傷機構の解明を行い、最適なレーザー接合部形状について検討することが本研究の目的である。さらに、得られた知見に基づき、レーザー溶接を主要接合方法としながら、そこにスポット溶接、樹脂系接着を援用し、従来の接合部材よりも極めて優れた耐久性を有する複合接合技術を提案することが本研究の最終目的である。

## 2. 供試材料および実験方法

### 2.1 供試材料

図1に本研究では、板厚  $t=1.2\text{mm}$  の 270MPa 級自動車用軟鋼板 (JSC270D) を供試材料とした。同材の化学成分および機械的特性を表1、表2に示す。

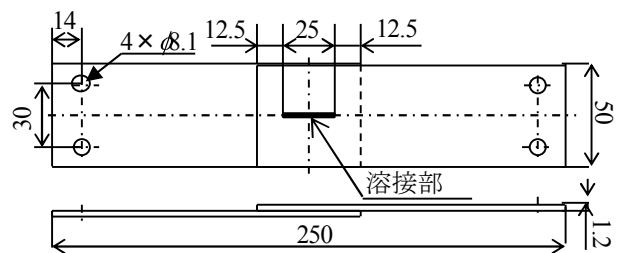
表1 JSC270Dの化学組成

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.046	<0.01	0.18	0.015	0.007	Bal.

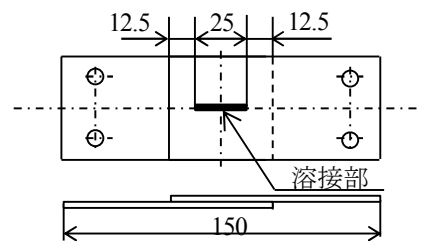
表2 JSC270Dの機械的特性

Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
177	314	47.6

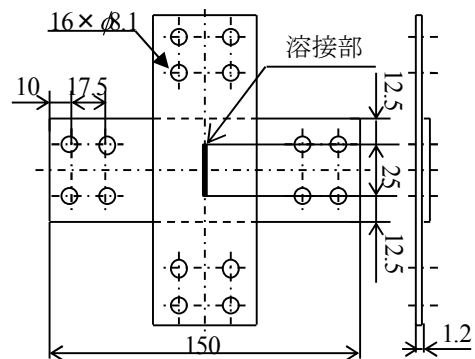
同材を板状に機械加工後、図1に示すように二枚の鋼板を重ね合わせ、レーザー溶接によって線接合を行ないそれぞれ試験に供した。本研究ではこれ以降、図1(a)レーザー溶接部に主にせん断負荷が作用する継手を TS(Tension Shear)継手、図1(c)レーザー溶接部に主に引張負荷が作用する継手を CT(Cross Tension)継手と称す。なお、図1のTS継手に関してはTS継手よりも持ち手部の短いTS-Short継手(図1(b))、CT継手に関しては溶接幅の太いCT-Wide継手を作成し実験検討を行った。



(a) TS継手



(b) TS-Short継手



(c) CT継手

図1 レーザー溶接試験体形状

本研究で採用したレーザー溶接条件を表3に示す。ビード長は全継手において25mmに統一し、ビード幅はCT-Wide継手では2.3mm,他継手では0.9mmに統一した。なお、シートギャップは0mmにてレーザー溶接を行った。

表3 各種レーザー溶接条件

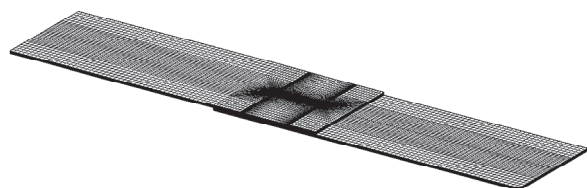
Parameter	TS, CT	CT-wide
Laser power [kW]	3.0	2.0
Focus size [mm]	0.4	
Welding speed [m/min]	2.8	0.5
Defocus [mm]	0	
Laser incidence angle [degree]	5	
Sheet gap [mm]	0	
Welding length [mm]	25	
Welding width [mm]	0.9	2.3

## 2.2 試験方法

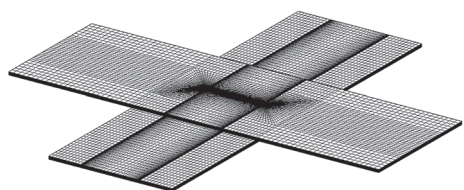
静的引張試験, および繰返し疲労試験は, 電気油圧式5kNサーボパルサーを用いた。疲労試験の試験条件は, 試験周波数  $f=5\sim 20\text{Hz}$ ,  $R_p(P_{\min}/P_{\max})=0.1$  で行い, 未破断時の打切り回数は  $N=10^7\text{cycles}$  とした。

## 2.3 有限要素解析条件

有限要素法解析には MSC.Software 社製ソフト, Patran および Nastran を用いた。解析で用いた各継手モデル形状を図2にそれぞれ示す。スリット先端は応力が集中すると考えられるため, 図3に示すように要素寸法を他の部分に比べ細密に分割した。なお, スリット幅はレーザー溶接継手の断面観察結果より  $0.02\text{mm}$  とした。母材とする JSC270D の機械的性質に基づき, 全継手においてヤング率  $206\text{GPa}$ , ポアソン比  $0.33$  とし, メッシュ形状は六面体で統一した。



(a) TS継手



(b) CT継手, CT-wide継手

図2 FEMモデル

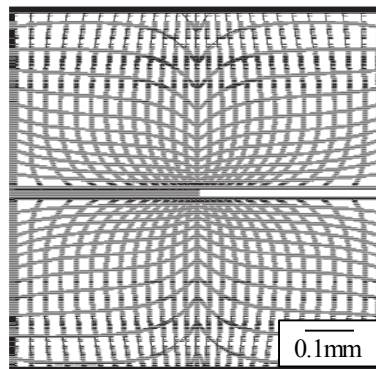
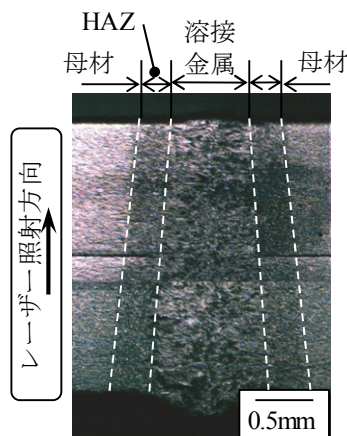


図3 スリット先端のモデル詳細

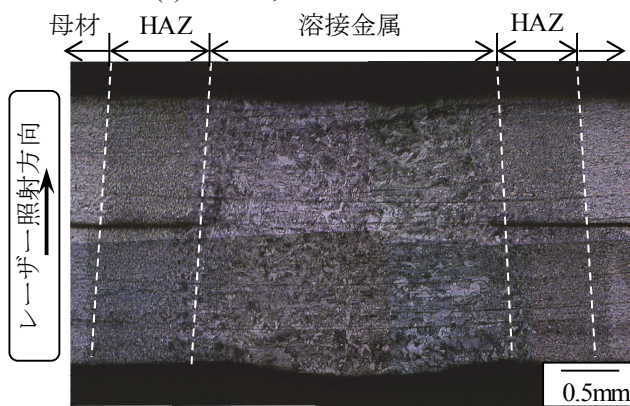
## 3. 実験成果

### 3.1 組織観察結果

ビード幅の細い TS 継手, TS-Short 継手, CT 継手, およびビード幅の太い CT-Wide 継手の溶接部周辺組織の観察結果をそれぞれ図4(a)および図4(b)に示す。なお両図は, 溶接方向に対し直角方向からの断面観察結果である。どちらにおいても, レーザーの入熱によって母材が熔融・凝固して形成された溶接金属 (Weld metal), 溶接金属の周辺で母材が一度オーステナイト相になり冷却されることで巨視的に組織変化が認められる熱影響部 (HAZ), および母材部 (Base metal) の3種類の組織に分類される。



(a) TS継手, TS-Short継手, CT継手

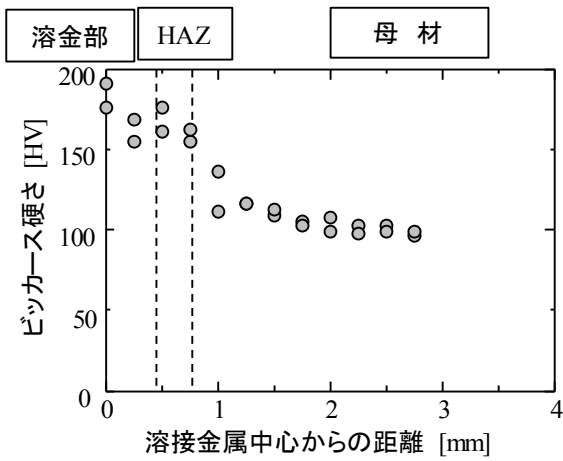


(b) CT-wide継手

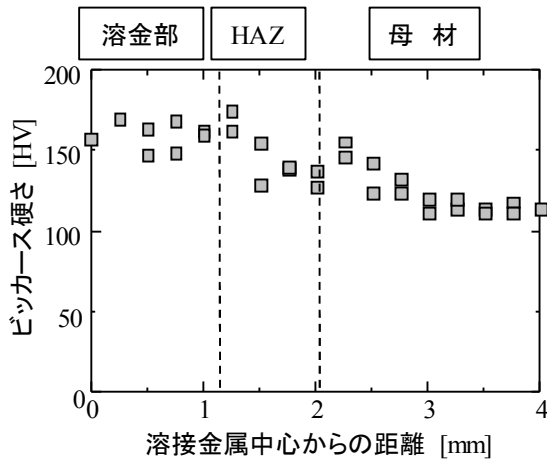
図4 溶接部の組織観察結果

### 3.2 硬さ測定結果

ビード幅の細い TS 継手, TS-Short 継手, CT 継手, およびビード幅の太い CT-wide 継手の溶接金属周辺の硬さ分布を測定した結果を図 5(a)(b)に示す. 縦軸はビッカース硬さ, 横軸は溶接金属中心からの距離とする. 同図より母材部と比べ溶接金属は約 1.6 倍高い硬さを示し, 熱影響部においては溶接金属近傍から母材部に向い硬さが低下する傾向が確認された.



(a) TS継手, TS-Short継手, CT継手



(b) CT-wide継手

図5 溶接部周辺の硬さ測定結果

### 3.3 静的引張試験結果

各継手の静的引張試験結果および静的強度を図 6, 表 4 にそれぞれ示す. 同図縦軸は継手に負荷した試験力を, 横軸はピストン変位を表している. なお, 各継手において, 最大荷重付近でビード部端よりき裂が確認され, その最大荷重を継手の静的強度とした. また, 各継手 2~3 本を試験に供し, 同程度の静的強度となることを確認している. 同図より, TS, TS-Short, CT および CT-Wide 継手の静的強度は同程度あることがわかった. このことから, ビード幅は静的強度に顕著な影響を及ぼさないことがわかった.

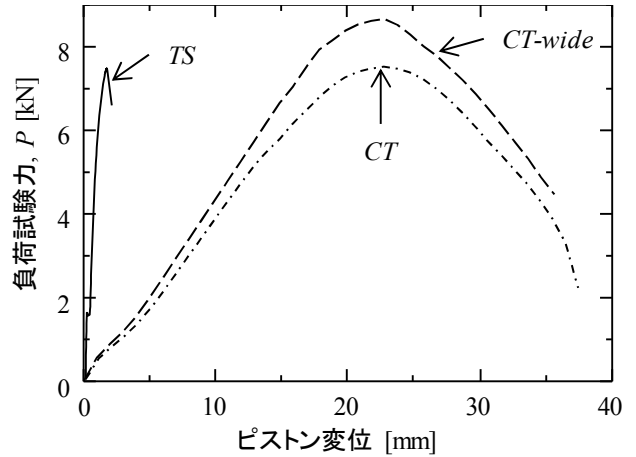


図6 各種継手の静的引張試験結果

表4 各種継手の静的強度

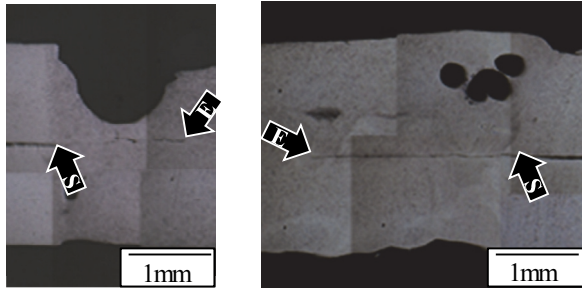
Type	静的強度 [kN]
TS	7.7
TS-Short	8.0
CT	7.7
CT-wide	8.5

### 3.4 繰返し負荷試験による損傷機構 (TS 継手, TS-Short 継手)

TS 継手, および TS-Short 継手に繰返し負荷を与え, 試験途中で試験を停止し, 継手中央断面を観察することにより, 両継手の損傷機構の解明を行った. なお, TS 継手, および TS-Short 継手に損傷機構の差異は確認されなかったため, 代表例として TS 継手の観察結果を図 7 に示す. 同図はすべて溶接方向に平行な断面観察結果であり, (i), (ii)は高荷重振幅 ( $P_a=2100N$ ) を与えた場合の溶接始端側, および終端側の観察結果を示している. なお同図の S, E は図において確認されたき裂の発生, 終点の場所をそれぞれ示している. 同図より, き裂発生起点は鋼板の間のスリット先端であり, 溶接始端および終端側のき裂は溶接金属領域内を溶接方向と平行に進展していることが観察された.

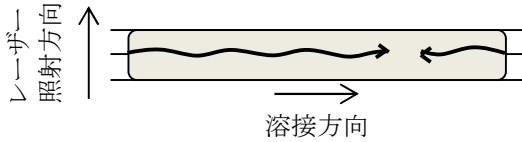
次に, より低い荷重振幅 ( $P_a=900N$ ) を与えた場合の継手中央断面の溶接始端側, および終端側を観察した結果を図 8 に示す. 同図より, き裂発生起点は鋼板の間のスリット先端であり, 溶接始端および終端側のき裂は溶接金属領域内を溶接方向に対して約  $50\sim 60^\circ$  の方向へと進展していることが観察された.

以上の観察結果より, 溶接部に主にせん断の負荷を受ける溶接継手の場合, き裂発生部は溶接部両端のスリット先端であること, また発生したき裂は負荷する試験力レベルにより, 進展経路が異なることが明らかとなった.



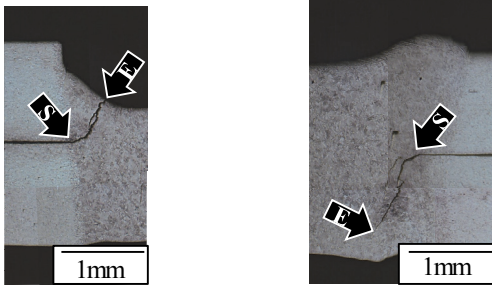
(i) 溶接始端部 (ii) 溶接終端部

(a) 溶金部両端の断面観察結果( $P_a=2,100\text{N}$ ,  $N/N_f=80\%$ )



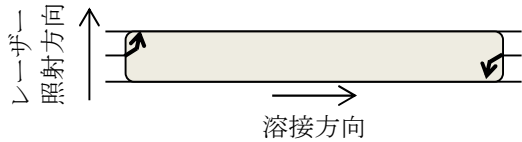
(b) き裂進展経路の模式図

図7 損傷機構の観察 (TS継手)



(i) 溶接始端部 (ii) 溶接終端部

(a) 溶金部両端の断面観察結果( $P_a=900\text{N}$ ,  $N/N_f=57\%$ )



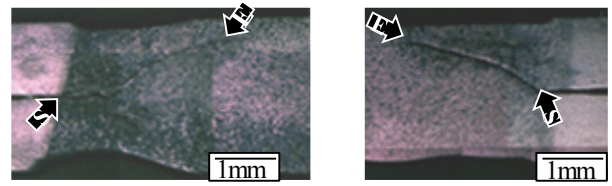
(b) き裂進展経路の模式図

図8 損傷機構の観察 (TS継手)

### 3.5 繰返し負荷試験による損傷機構 (CT 継手, CT-wide 継手)

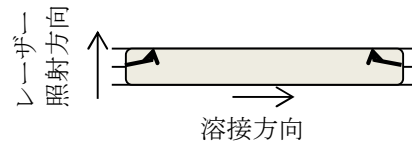
前節同様, CT 継手, および CT-wide 継手に繰返し負荷を与え, 試験途中で試験を停止し, 継手中央断面を観察することにより, 両継手の損傷機構の解明を行った. なお, CT 継手, および CT-wide 継手に損傷機構の差異は確認されなかったため, 代表例として CT-wide 継手の観察結果を図9に示す.

同図より, CT-wide 継手のき裂発生箇所は, TS 継手同様, 溶接部始端部, および溶接部終端部のスリット先端であり, き裂発生後, 溶接金属領域内を溶接方向に対し約  $40\sim 50^\circ$  の方向へ進展していることが観察された. なお, CT 継手, および CT-wide 継手の場合, 負荷する試験力レベルによらず, 全て同様の損傷機構であった.



(i) 溶接始端部 (ii) 溶接終端部

(a) 溶金部両端の断面観察結果( $P_a=175\text{N}$ ,  $N/N_f=89\%$ )



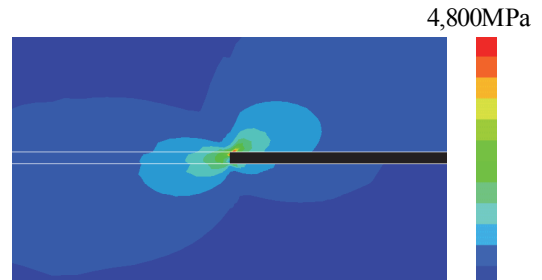
(b) き裂進展経路の模式図

図9 損傷機構の観察 (CT継手, CT-wide継手)

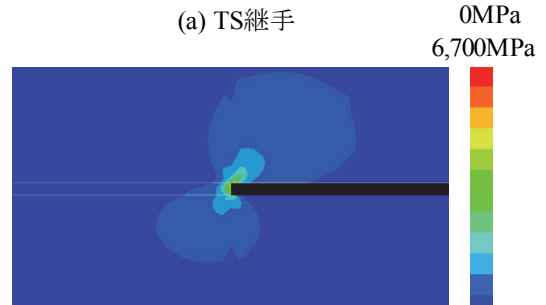
### 3.6 有限要素解析を用いた応力状態の検討

これまでの実験的検討より, レーザー溶接継手の損傷機構は溶接部両端のスリット先端であることが明らかとなった. そこで有限要素法 FEM 解析により, 初期損傷の発生箇所であるスリット先端の応力状態を定量的に評価した. 結果を図10に示す.

同図より, 継手形状によらず, スリット先端には非常に高い応力が作用していることがわかる. さらに, スリット先端から  $1\text{mm}$  程度内部にはほとんど応力が作用していないこともわかる. このような高い応力状態であるスリット先端が初期損傷の発生起点となり, き裂の発生を助長し, 最終的な継手全体の破壊を導くことが明らかとなった.



(a) TS継手



(b) CT継手

図10 各種継手のスリット先端の応力状態

### 3.7 より優れた耐久性を有するレーザー溶接接合技術の提案

これまで得られた実験的知見を総合すると、レーザー溶接継手の弱部は溶接始端部、および終端部に形成されるスリット先端であるといえる。これら劣化損傷機構の解明に基づくと、より優れた耐久性を有する高機能接合継手を実現するためには、上述したスリットを形成しないことが重要であることが考えられる。例えば、予め2枚の鋼板を樹脂接着し、そこにレーザー溶接を施すことにより、上述したスリット先端の形成を抑制することが可能となる。今後は、このような複合接着技術の開発を行い、その耐久性について実験的検討を行っていく予定である。

### 4. 結び

本研究では、負荷様式の異なる2種のレーザー溶接試験体を用い、繰返し負荷に対する内部劣化損傷機構を詳細に

解明し、得られた知見を基に、より優れた耐久性を有するレーザー溶接接合技術の提案を行った。今後、提案する新接合技術の優位性・有用性について積極的に検討を行う予定である。

### 謝 辞

本研究の遂行をご支援いただきました公益財団法人天田財団に深く謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 津田, 臺丸谷, 小林, 砂山: 高張力鋼板のレーザー溶接継手の衝撃引張特性に及ぼす予疲労の影響, 材料, Vol.55, No.9(2006), 824-830.
- 2) 北村: レーザ溶接重ね継手の強度に関する基礎研究, 溶接学会誌, Vol.73, No.8(2004), 565-568.