

テーラードブランク製造における 高強度薄鋼板のレーザ溶接性

Laser Weldability of High Strength Steel Sheets in Tailor Welded Blank Fabrication

小野 守章 総合材料技術研究所 マテリアルズ・ソリューション研究センター 主任研究員 工博
吉武 明英 総合材料技術研究所 マテリアルズ・ソリューション研究センター 主査
大村 雅紀 総合材料技術研究所 マテリアルズ・ソリューション研究センター センター長 Ph.D

Moriaki Ono
Akihide Yoshitake
Masanori Ohmura

異なる板厚・材質および表面処理の有無の鋼板を溶接して一体化したテーラードブランクは、素材歩留まりの向上や部品点数・プレス金型の削減など、コスト低減を目的として適用が始められたが、近年、地球環境保全および安全性強化に関する規制の厳格化により車体の軽量化と剛性向上など、適用目的が変わりつつある。本稿では、590MPa 以上の高強度鋼板を対象として板厚比の大きいテーラードブランクの溶接部に必要とされる条件および溶接継手の機械的特性・疲労特性およびプレス成形性を明らかにした。

TWB (Tailor Welded Blanks), which consist of materials with different thickness, tensile strength and so on, have been remarkably applied to the car bodies. The purpose of TWB's application is not only the material saving and the reduction of stamping/assembling, but also the improvement of the fuel efficiency by the weight reduction and the stiffness of car bodies. This report presented the optimum quality of weld section of differential thickness TWB with the large thickness ratio, which consists of high strength steels. The mechanical and fatigue properties and the press formability of TWB, which exceeds the tensile strength with more than 590MPa, were investigated.

1. はじめに

テーラードブランク(TWB: Tailor Welded Blank)とは、複数の異なる板厚・材質および表面処理の有無の鋼板を溶接結合して一体化したプレス素材のことである。量産レベルでは、1980 年代初頭に欧州(ドイツ)で適用が始められ、その後急速に全世界に実用化が進められている^{1),2)}。

当初、TWB はプレス端材を接合して再利用するなど、素材の歩留まり向上や複数のプレス部品をスポット溶接する従来の製造工程からあらかじめ素材を溶接した後に一体成形することにより部品点数・溶接工数およびプレス金型の削減など、主にコストの低減を目的として採用された。

近年、これらに加えて地球環境保全および安全性強化に関する規制の厳格化により車体の軽量化と剛性向上が急がれ TWB の採用目的が変わりつつある。すなわち、590MPa を超える高強度鋼板に加えて、板厚比が 3 にも及ぶ TWB が適用され始めている。

現在、TWB 品質基準には ISO および北米 ASP (Auto/Steel Partnership) 規格化がある。これらは主に軟質鋼を対象として板厚比の比較的低い TWB を対象としたものであり、高強度鋼板の差厚 TWB の品質基準はない。

本稿では、高強度鋼板を対象として板厚比の大きい TWB 溶接部に必要とされる条件を明らかにするとともに、材質

面からは、590MPa 以上の TWB の機械的特性・疲労特性およびプレス成形性などの基本特性を明らかにした。

2. 突き合わせ溶接技術

溶接で結合した素材は、プレス成形され自動車のパネルおよび部品として使用されることから、以下の項目を満たす溶接部が必要となる²⁾。

- (1) 溶接部形状ができるだけ均一で母材に近いこと。
- (2) 溶接部の強度が母材以上であること。
- (3) プレス成形性が母材に近いこと。

本章では、隙間を設けた突き合わせ溶接サンプルを作製し、溶接部の形状、溶接欠陥および継手強度の観点から溶接部に必要とされる条件を把握した。

2.1 実験方法

供試材は、板厚 0.8~2.9mm の 270 および 590MPa 級の鋼板である。Table 1 に、化学成分および機械的性質を示す。溶接条件を Table 2 に示す。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of materials used

TP no.	Thickness (mm)	C	Si	Mn	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)
CR270	0.8~2.9	0.001	0.01	0.17	171	296	53.8
CR590	1.2~2.3	0.072	0.02	1.61	383	630	28.5

溶接は、焦点距離 254mm の ZnSe 製レンズを用いて約 0.6mm に集光した CO₂ レーザを鋼板上に照射して行った。CO₂ レーザ出力および溶接速度は、それぞれ 3kW (加工点出力)、4m/min 一定とした。突き合わせた鋼板の間隔を 0.1mm から 0.4mm まで変化させて板厚比 1, 2 および 2.9 の差厚突き合わせサンプルを作製した。

Table 2 Laser welding conditions

Kind of laser	CO ₂ laser
Laser power	3kW
Welding speed	4m/min
Shielding gas	Ar 20 l/min

溶接部の品質評価項目を以下に示す。溶接部幅の均一性、アンダーフィルおよびピット (ブローホール) などの表面品質を目視により評価した。溶接継手強度は、溶接線を負荷方向に対して垂直に配置した JIS5 号引張試験片を用いて評価し、破断位置により良否を判定した。次に溶接部から縦断面を切り出し、溶接部形状 (ビードの凸凹)、ブローホールの有無および溶接金属のビッカース硬さを調査した。なお、ビッカース硬さは、溶接金属の任意の位置を荷重 100gf で 7 点測定し、その平均値を求めた。

2.2 実験結果

溶接部断面評価結果の一例を、Photo 1 に示す。突き合わせた鋼板の間隔量が 0.1mm の場合には、溶接部には窪みやピット・ブローホールなどの欠陥は発生しておらず品質は良好である。一方、間隔量が 0.2mm 以上では、熔融金属量が不足するために溶接部は窪んだ形状となりブローホール・ピットなどの欠陥が発生するようになる。

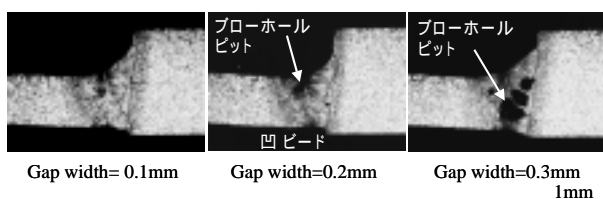


Photo 1 Cross section of laser weld of differential thickness TWB

Table 3 に評価結果の一覧を示す。たとえば、薄板側の板厚が 1.0mm の場合には、板厚比 1 では間隔量 0.1mm まで良好な品質を有しており、それ以上の隙間では溶接欠陥が発生し、間隔量 0.3mm では溶け落ちてしまい溶接不可となる。

品質が良好な溶接部が得られる隙間の限界量は、板厚および板厚比の増加に伴い、熔融金属量が増加するため増加する傾向が認められる。また、590MPa 材の結果は 270MPa 材と同様であり、実験範囲内においては材質の影響は認められない。

Table 3 Quality of laser welds

Tensile strength of base metal, MPa	Thinner gauge, mm	Thickness ratio	Gap width, mm			
			0.1	0.2	0.3	0.4
270	0.8	1.0	Good	Good	Good	Good
		2.0	Good	Good	Good	Good
		2.9	Good	Good	Good	Good
	1.0	1.0	Good	Good	Good	Good
		2.0	Good	Good	Good	Good
		2.9	Good	Good	Good	Good
	1.2	1.0	Good	Good	Good	Good
		1.9	Good	Good	Good	Good
		1.0	Good	Good	Good	Good
590	1.2	1.0	Good	Good	Good	Good
		1.9	Good	Good	Good	Good

Legend: Good (Fracture in BM and no pits in WM), No good (Fracture in BM and pits in WM), No good (melt down), No good (Fracture in WM and pits in WM). * BM : Base metal, WM : Weld metal

Fig.1 に 隙間量 G と溶接部厚さ比 Tw/T₁ の関係を示す。図中の各プロットは、溶接部品質の良否を表わしている。なお、T_{av} は差厚継手の平均板厚を示す。これより、隙間量の増加とともに溶接部厚さ比は低下するが、平均板厚および材質によらず溶接部厚さ比が約 0.8 以上であれば、溶接欠陥がなく継手強度が母材以上の溶接部が得られることがわかる。

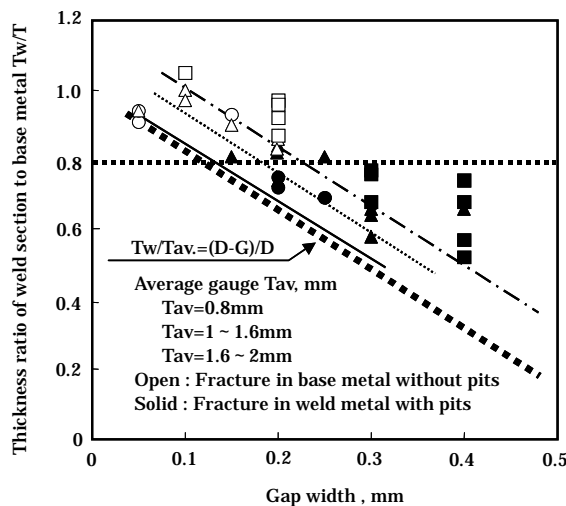
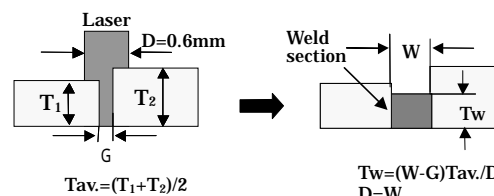


Fig.1 Relationship between configuration and quality of laser welds

3. 高強度薄鋼板のレーザ溶接特性

3.1 実験方法

3.1.1 供試材および溶接条件

供試材は、引張強さ 270, 590, 780 および 980MPa 級高強度鋼板である。Table 4 に化学成分および機械的性質を示す。Table 5 に溶接条件を示す。溶接は、焦点距離

254mmの銅製の放物面鏡を用いて約0.7mmに集光したCO₂レーザーを鋼板上に照射して行った。レーザー出力および溶接速度は、それぞれ6kW(加工点出力)、7m/minで一定とし、標準条件とした。比較条件として、CO₂レーザー出力3kW(加工点出力)および溶接速度4m/minおよびマッシュシーム溶接法でサンプルを作製した。

Table 4 Chemical compositions and mechanical properties of materials used

TP no.	Thickness (mm)	C	Si	Mn	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)
CR270	0.97	0.001	0.01	0.17	171	296	53.8
CR590	1.40	0.072	0.02	1.61	383	630	28.5
GA780	1.21	0.055	0.207	2.45	584	891	18.0
CR980	0.99	0.110	1.320	1.90	848	1037	15.5

Table 5 Laser welding conditions

Kind of laser	CO ₂ laser
Laser power	6kW
Welding speed	7m/min
Shielding gas	Ar 20 l/min

比較例：CO₂ laser 3kW-4m/min and mash seam welding

3.1.2 評価方法

溶接部近傍の硬さ分布は、2.1節で示した硬さ測定法と同様の方法で調査した。

溶接継手の機械的性質は、JIS5号引張試験片を用いて単軸引張試験を行った。溶接線は引張方向に対して平行および直行方向(以下、それぞれ平行引張、直行引張と略記する)とした。溶接継手の疲労特性は、直行引張のJIS5号引張試験片を用いて評価した。疲労試験は、電気-油圧サーボ式疲労試験機を用いて周波数20Hz、荷重制御の片振り(応力比R<0.1)で行った。溶接継手の成形性は、

100mmの球頭パンチにより張出成形を行い、破断位置および破断高さで評価した。

3.2 実験結果

3.2.1 溶接部の硬さ

Fig.2に溶接部近傍の硬さ分布を示す。引張強さが高い材料ほど、炭素・シリコンおよびマンガンなどの合金元素の添加量が多いため溶接部の硬さが高くなる。

Fig.3は、980MPa材を用いてレーザー出力3kW 4m/minの比較条件とマッシュシーム溶接法で作製した溶接部近傍の硬さ分布を示す。標準条件(レーザー出力6kW 7m/min)と比較条件(レーザー出力3kW 4m/min)とを比較すると、溶接部および熱影響部の幅は明らかに比較条件の方が広く、溶接入熱が高いことを示唆している。溶接入熱(溶接線単位長さ当たりの入熱)Q(Cal/mm)は、 $Q = P/v$ (ただし、P:レーザー出力、v:溶接速度)と定義される。

これによると標準条件と比較条件は、ほぼ同じ入熱レベルであるが、レーザー溶接ではビームが板厚を貫通しながら溶接が進行するためレーザーエネルギーは鋼板裏側から失われ、溶接入熱は必ずしも $Q=P/v$ とはならず、むしろ溶接速度に比例すると考えた方が良い。フェライトとマルテンサイトとから構成される980MPa材は、溶接部近傍で溶接熱サイクルによってマルテンサイトが焼きなまされて軟化する。

標準条件、比較条件およびマッシュシーム溶接法の順に溶接入熱が高いため、軟化量が大きく、その領域も広がっている。

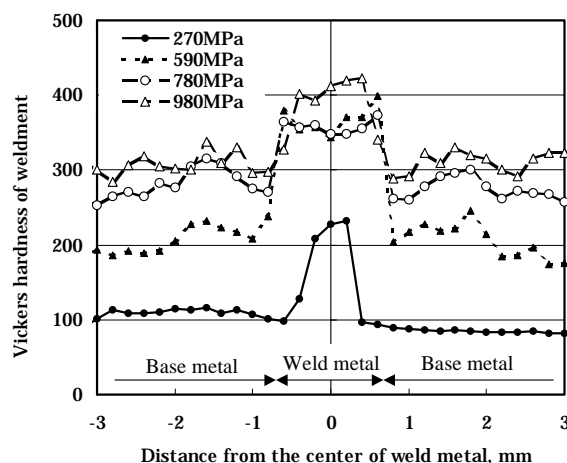


Fig.2 Vickers hardness distributions of laser welded joints (laser power ;6kW, welding speed; 7m/min)

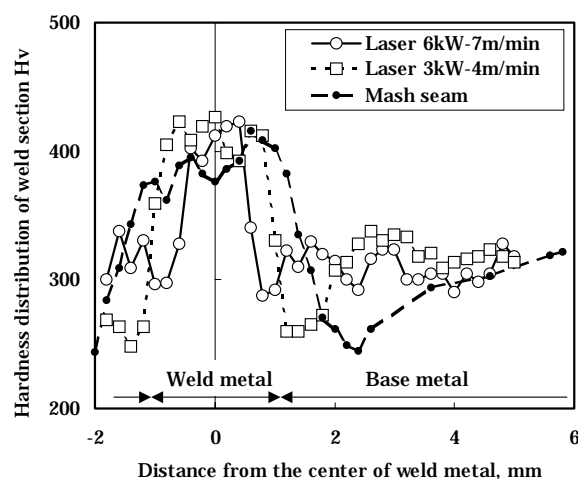


Fig.3 Vickers hardness distributions of laser and mash seam welded joints

溶接継手の強度および延性は、溶接部の硬さと関連が深い。そこで、レーザー溶接部の硬さを規定するためにレーザー溶接用の炭素当量 $C_{eq}(Laser)^3$ を回帰分析により求めた。

$$C_{eq}(Laser) = C + Si/50 + (Mn + Cr)/25 + P/2 \quad \dots\dots(1)$$

Fig.4 は、 $C_{eq}(\text{Laser})$ とレーザー溶接金属の硬さの関係を示す。これより、レーザー溶接金属の硬さは $C_{eq}(\text{Laser})$ により精度良く推定できることが確認できた。

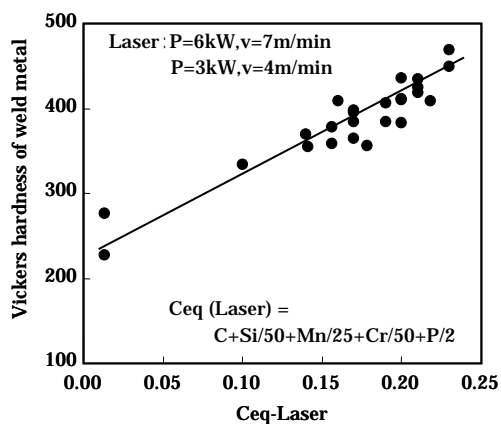


Fig.4 Relationship between vickers hardness of laser welds and carbon equivalent for weld melt

3.2.2 溶接継手の機械的性質

Fig.5 に、母材の引張強さと直行引張継手の全伸びの関係を示す。母材の引張強さの増加とともに母材の全伸びは低下するが、継手伸びはさらに母材より低くなる。継手伸びの低下は、溶接部の顕著な硬さの上昇によって継手の幅方向の変形が拘束されることにより生じたものである。780MPa 材までは溶接条件によらず継手伸びの低下量はほぼ同じであるが、980MPa 材では標準条件(6kW-7m/min)に比較して比較条件(3kW-4m/min)の方が低下する。これは、熱影響部で軟化が生じたため、その領域に変形(ひずみ)が集中して伸びが低下したものである。

マッシュシーム溶接法はレーザー溶接法に比較して溶接入熱が高いため 590MPa 材においても熱影響部に軟化が生じ継手伸びは低下する。さらに 980MPa 材ではその低下が著しい。

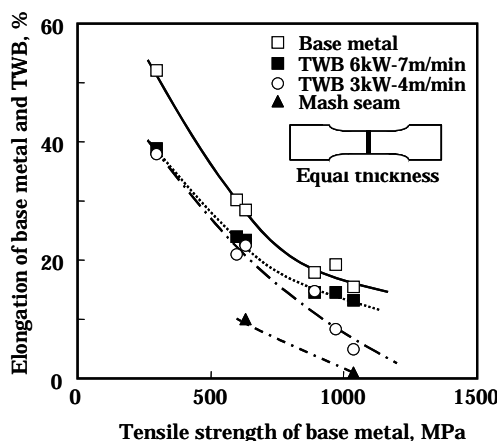


Fig.5 Relationship between tensile strength of base metal and elongation of TWB

Fig.6 に、溶接金属と母材硬さの総和と平行引張継手の全伸びの関係を示す。平行引張の全伸びは、溶接金属と母材硬さの総和により、統一的に整理できることが明らかである⁴⁾。溶接金属と母材硬さの総和により平行引張継手の伸びが整理できる理由は、割れは硬い溶接部から発生し母材方向に伝播するため、継手伸びは溶接部の硬さに律速されるが、レーザー溶接部は幅が狭いため必ずしも溶接部の硬さだけでなく母材の影響も受けるものと考えられる。

また、差厚継手については厚板側の変形拘束により段差部に相当する溶接部の変形も拘束され見かけ上、伸びの低下が緩和される場合がある。

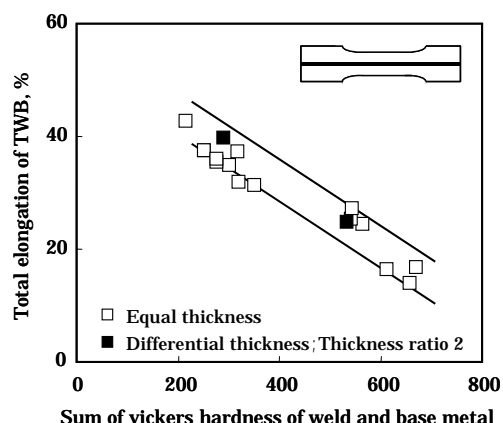


Fig.6 Relationship between hardness of weld metal and elongation of TWB

3.2.3 溶接継手の疲労特性

Fig.7 は、等厚および差厚直交引張継手の $-N_f$ 線図を示す。等厚および差厚継手の疲労強度は、母材に比較して低い値を示す。この傾向は、板厚比が増加する程、かつ破断回数が 10^6 回以上の長寿命領域において顕著である。差厚継手では、破壊は例外なく薄板側の溶接段差部において生じていた。この場合も同様に溶接部の強度は上昇するので、疲労変形が強度や硬さの低い薄板側の母材部に集中することになるが、溶接部、すなわち段差部の大きな応力集中により破壊が生じたものと思われる。また、このことが同厚継手試験片に比べて低い差厚継手試験片の疲労強度の原因と考えられる⁴⁾。

マッシュシーム溶接継手の疲労強度は、レーザー溶接継手に比較して低い値を示した。き裂は、重ね合わせエッジ部から発生し、板厚方向に伝播していたことから、重ね合わせエッジ部の応力集中が疲労強度の低下要因であることが明らかである。

3.2.4 溶接継手のプレス成形性

Photo 2 に、980MPa 材溶接継手試験片のエリクセン試験による破断位置を示す。標準条件(6kW-7m/min)では、溶接部から割れが発生し母材部に伝播している。一方、

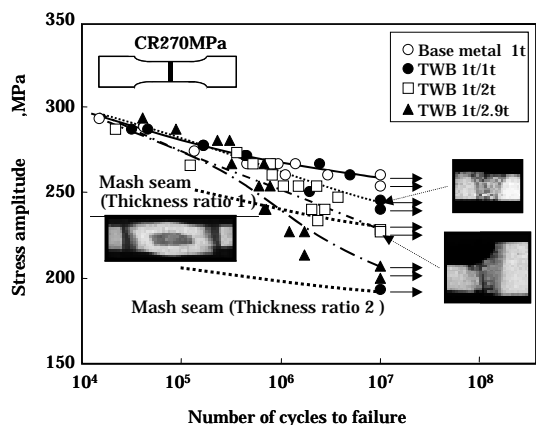


Fig.7 S-N diagram for differential thickness TWB and base metal

溶接入熱が大きい比較条件（3kW-4m/min）では、Fig.3に示したよう980MPa材では熱影響部が軟化する、熱影響部にひずみが集中し破断に至っている。590MPa および780MPa材は標準条件および比較条件においても熱影響部に軟化が生じていないため、熱影響部で破断は生じていなかった。

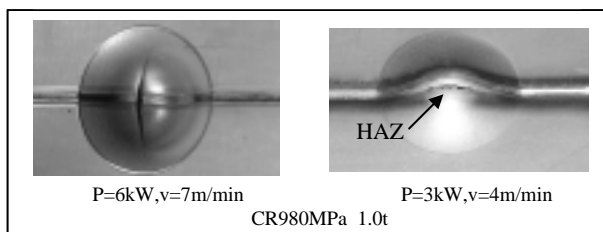


Photo 2 Erichsen type stretch test results of high strength steel sheets

4. おわりに

軟鋼および高強度薄鋼板を対象として、差厚継手（板厚比～3）溶接部の必要特性および溶接継手の機械的特性・疲労強度およびプレス成形性などの基本特性を明らかにした。得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 溶接部の必要特性

材質・板厚比にかかわらず溶接部厚さ比 T_w/T_0 は0.8以上を確保する必要がある。

ただし、 T_w ：溶接部の厚さ、 T_0 ：母材の厚さである。

(2) 高強度薄鋼板のレーザー溶接特性

- ・溶接部の硬さは、レーザー溶接用炭素当量式で精度良く推定できる。

$$C_{eq}(\text{Laser}) = C + Si/50 + Mn/25 + Cr/50 + P/2$$

- ・直交引張継手は、溶接部の変形拘束により母材より強度は上昇し、伸びは低下する。ただし、溶接入熱が大きくHAZが軟化する場合には、軟化部にひずみが集中するため伸びは大幅に低下する。

- ・平行引張継手は、溶接部が母材より硬くなるため強度は母材より上昇するが、伸びは低下する。継手伸びは、溶接部と母材の硬さの合計で統一的に推定できる。
- ・等厚・差厚を問わず溶接継手の疲労強度は母材より低下する。また、差厚継手では板厚比が大きい程、低い疲労強度を示す。
- ・溶接継手の成形性は、溶接部が硬くなるため母材より劣る。溶接入熱が大きくHAZが軟化する場合には、さらに成形性が低下する。

参考文献

- 1) W. Prange et al. "Production and Usage of Laser-Welded Sheet metal". SAE Technical Paper. No.870413(1987).
- 2) 池本公一ほか. "自動車ボデーパネルのレーザー溶接". 溶接学会論文集. Vol.10, No.1, pp.196 - 201(1992).
- 3) Yamasaki Y. et al. "Effect of Chemical Composition, Mechanical and Thickness of Base Steels on Formability of Laser-Welded Blanks". Proceeding of the 19 IDDRG Congress. pp.501 - 510(1996).
- 4) 戸梶恵郎ほか. "レーザー突合せ溶接継手の疲労強度とき裂進展特性". 鉄と鋼. Vol.85, No.1, pp.66 - 70(1999).

<問い合わせ先>

総合材料技術研究所 マテリアルズ・ソリューション研究センター
Tel. 084 (945) 3624 小野 守章
E-mail address : mono@lab.fukuyama.nkk.co.jp