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*

小野 守章**, 吉武 明英***, 大村 雅紀***

Laser Weldability of High Strength Steel Sheets in Fabrication of Tailor Welded Blanks*

By ONO Moriaki**, YOSHITAKE Akihide*** and OHMURA Masanori***

A tailor welded blank (TWB) consists of materials different in thickness, tensile strength, and other properties, and is now widely used for fabricating automotive bodies. TWBs are used not only to save materials and reduce cost in stamping and assembling, but also to improve fuel efficiency by reducing the weight of automobile bodies and to improve the stiffness. This report presents the conditions required at welds of TWBs composed of 590MPa class high strength steel sheets with high thickness ratios. Further, from the viewpoint of material properties, basic characteristics such as mechanical and fatigue properties and press formability of TWBs having a tensile strength of 590 MPa or more were clarified. The main conclusions obtained are as follows:

- (1) The weld thickness ratio T_w/T_1 must be kept at 0.8 or higher regardless of material properties and sheet thickness ratios, where T_w is the thickness of the weld, and T_1 is the thickness of the thinner base metal.
- (2) The elongation of weld joints is estimated systematically by the sum of weld metal hardness and base metal hardness.
- (3) The fatigue strength of welded joints is lower than that of base metal regardless of equal thickness or differential thickness welded joint. Also, as the thickness ratio increases for the differential thickness joints, the fatigue strength becomes low.
- (4) The formability of welded joints is inferior to that of the base metal because the weld is hard. When the weld heat input is high and thus the heat-affected zone is softened in case of 980MPa class high strength steel sheets, the formability decreases further.

Key Words: Tailor welded blank, TWB, Laser weldability, High strength steel sheet, Mechanical properties, Fatigue properties, Press formability

1. 緒 言

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) で適用がはじめられ、その後急速に全世界的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等、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予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数の削減等、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、590 MPaを超える高強度鋼板に加えて、板厚比が3にも及ぶTWBが適用されはじめている。

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の品質基準は無い。

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等の基本特性を明らかにした。

2. 突合せ溶接技術

2.1 溶接部の必要特性および必要条件を満足させるための条件

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。

本項では、隙間を設けた突合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。

2.1.1 実験方法

供試材は、板厚 0.8 ~ 2.9mm の 270 および 590MPa 級の

* 原稿受付 平成 14 年 9 月 5 日 NKK Technical Review (No.86) で発表, 平成 13 年 12 月 薄板成形研究会で発表

** 正 員 JFE スチール(株) Member, JFE Steel Corporation

*** JFE JFE Steel Corporation

銅板である。Table1に、化学成分および機械的性質を示す。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レーザを銅板上に照射して行った。溶接条件をTable2に示す。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。突き合わせた銅板の隙間を0.1mmから0.4mmまで変化させて板厚比1, 2および2.9の差厚突合せサンプルを試作した。なお、銅板の端面は、機械加工により仕上げた。

試作した溶接部の品質に関しては以下の項目を調査した。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）等の表面品質は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号引張試験片を作製し、単軸引張試験を行った。また、溶接部から縦断面を切出し溶接部形状（ビードの凹凸）およびブローホールの有無を調査した。

次に、YAGレーザとCO₂レーザのTWB製造性を調査するために、これらレーザの溶接性を比較した。YAGレーザは、コア径0.6mmの光ファイバーを用いて導光し、焦点距離200mmの集光レンズを用いてスポット径0.6mmに集光して溶接実験に用いた。CO₂レーザの集光条件は上記に示す通りである。いずれのレーザも加工点での出力を2kWに揃えた。溶接サンプルは、板厚0.8mmの270MPa級薄銅板を用い、端面を機械加工して隙間0mmで突合せ溶接して作製した。

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

Table 2 Laser welding conditions

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

2.1.2 実験結果

溶接部断面評価結果の一例を、Fig.1に示す。突き合わせた銅板の隙間量が0.1mmの場合には、溶接部には凹みやピットおよび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、隙間量が0.2mm以上では、溶融金属量が不足するために溶接部は凹んだ形状となりブローホールおよびピット等の欠陥が発生するようになる。

Table3に評価結果の一覧を示す。例えば、薄板側の板厚が1.0mmの場合には、板厚比1では隙間量0.1mmまで良好な品質を有しており、それ以上の隙間ではFig.1で示したブローホールおよびピット等の溶接欠陥が発生し、隙間量0.3mmでは溶落し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、溶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。

Fig.2は、Table3に示した実験結果を再整理したものである。縦軸に示す T_w/T_1 に関して、 T_w は溶接部の厚さを示し、 T_1 は薄板側の板厚を示す。なお、 T_2 は厚板側の板厚である。 T_{av} は、薄板 T_1 と厚板 T_2 の平均値である。

図中のプロットは実測値を示しており、OpenおよびSolid markはそれぞれ溶接部の品質が良好、不良であることを示

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				
		2.0				
		2.9				
	1.0	1.0				
		2.0				
		2.9				
590	1.2	1.0				
		1.9				
		1.0				

□ Good (Fracture in BM and no weld defects in WM)
 □ No good (Fracture in BM and weld defects in WM)
 □ No good (Fracture in WM and weld defects in WM)
 ■ No good (Melt down)

* BM: Base metal, WM: Weld metal

Fig.1 Cross section of laser weld of differential thickness TWB

Fig.2 Relation between laser welding configuration and weld quality

Fig.3 Comparison of experimental results to TWB guideline of laser welds

Fig.4 Cross section of YAG laser and CO₂ laser welded bead

している。この図から、平均板厚 T_{av} が 0.8 ~ 2mm および板厚比 2.9 までの範囲の差厚溶接継手において、溶接部厚さ比 T_w/T_1 が約 0.8 以上であれば溶接継手品質は良好であることが明らかとなった。

Fig.3 は、Fig.2 で示したデータを平均板厚 T_{av} と溶接部厚さ比 T_w/T_1 の関係で再整理した結果を示す。図中には、米国 TWB 規格および ISO 規格を示す。米国 TWB 規格では、健全な溶接部が得られるのは板厚 1mm 未満の場合には溶接部厚さ比 0.85 以上、板厚 1mm 以上では 0.8 以上と規定されている。一方、ISO 規格では板厚に拠らず溶接部厚さ比が 0.8 以上と規定されている。今回、590MPa 級高強度鋼板および板厚比 2.9 までの広範囲の差厚継手を対象としているが、現行の規格とほぼ同様であることが確認できた。

2.2 溶接精度の緩和対策

…YAG レーザと CO₂ レーザの溶接性の比較…

現在、TWB の製造は CO₂ レーザが主流であるが、近年 YAG レーザの実用化が進められている。

YAG レーザ (波長 1.06 μm) は光ファイバーで伝送が可能であり多数の銅ミラーを介して伝送する CO₂ レーザに比較して光学系がコンパクトになり溶接施工性が大幅に改善することや、レーザ誘起プラズマとの干渉が殆どないため溶接部の品質の変動が少ない等、YAG レーザのメリットが指摘されている。

ここでは、YAG レーザと CO₂ レーザの溶接性を評価することにより TWB 製造性の良否を調査した。

Fig.5 Surface and bottom bead width of YAG and CO₂ laser welds

Fig.4は、YAGレーザとCO₂レーザにおける溶接速度5および7m/minでの溶け込み形状を示す。YAGレーザの溶け込み形状は、表裏のビード幅がほぼ等しいのに対して、CO₂レーザは表側に比較して裏側のビード幅が狭くなる。これは、CO₂レーザ（波長10.6μm）は、溶接時に発生するプラズマにレーザエネルギーが吸収されるためプラズマが成長し、その熱輻射により表側のビード幅が広がる。逆に、裏側のビードはプラズマにエネルギーが吸収され鋼板を貫通するレーザエネルギーが減少するために狭くなる。一方、YAGレーザはプラズマに対してエネルギー吸収・反射が殆どなく透明なためレーザビームはほぼ入射径0.6mmのまま鋼板を貫通するため表裏面のビード幅はほぼ等しい。

Fig.5は、上記の実験結果について表裏面のビード幅と溶接速度の関係で整理したものである。いずれのレーザも鋼板を貫通する最大溶接速度は約8m/minである。YAGレーザのビード幅は表裏面とも約0.7mm以上である。一方、CO₂レーザは特に裏側のビード幅が表側に比較して狭く溶接速度7m/minでは高々0.4mmである。

この結果から、本実験範囲においてはYAGレーザでは突合せ線に対して±0.3mm程度までレーザ照射位置がずれてもオフシーム欠陥が発生しないが、CO₂レーザにおけるレーザ照射位置精度は突合せ線に対して±0.1mm以内となることから、YAGレーザを用いるとレーザ照射精度が大幅に緩和されることが示唆される。

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

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	6 kW
Welding speed	7 m/min
Shielding gas	Ar 20 l/min

* Comparative examples

Laser: CO₂ laser 3kW, Speed 4m/min

Mashseam: Current 12.5kA, Speed

2.5m/min, Electrode pressure 5kN

Lap 2mm,

度鋼板であり、端面を機械加工して溶接実験に供した。

Table4に、化学成分および機械的性質を示す。Table5に、レーザ溶接条件を示す。レーザ溶接は、焦点距離254mmの銅製放物面鏡を用いて約0.7mmに集光したCO₂レーザを鋼板突合せ線上に照射して行った。

レーザ出力および溶接速度は、それぞれ加工点出力6kW、7m/min一定とし、これを標準条件とした。比較条件として、CO₂レーザ出力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。

マッシュシーム溶接条件は、加圧力5kN、重ね代2mm、溶接速度2.5m/min、溶接電流13.5kAである。

3.1.2 評価方法

溶接部のビッカース硬さ分布は、測定荷重0.98Nで板厚中央部を0.2mmピッチで測定した。

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実施し、破断応力と標点間距離50mmでの全伸びを評価した。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、直交引張と略記）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。疲労試験には、電気-油圧サーボ式疲労試験機を用いて、周波数20Hzで荷重制御の片振り引張り（荷重比約0.1）の疲労試験を実施した。

溶接継手の成形性は、エリクセン試験により破断位置および破断時の押し込み高さにより評価した。

3.2 実験結果

3.2.1 溶接部の硬さ分布

Fig.6に溶接部近傍の硬さ分布を示す。引張強さが高い

Fig.6 Hardness distribution of weld section Hv (Laser power ; 6kW, Welding speed ; 7m/min)

Fig.8 Relation between Ceq (laser) and Vickers hardness of laser welds

Fig.7 Hardness distribution of laser and mash weld section Hv

材料程, C, Si および Mn 等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.7は, 980MPa材を用いて標準条件(レーザ出力6kW - 速度7m/min), 比較条件(レーザ出力3kW - 速度4m/min および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。P:レーザ出力(W)とv:速度(cm/sec)で求められる見掛けの標準条件および比較条件のレーザ溶接入熱Q(J/cm)は, それぞれ0.51J/cm, 0.45J/cmとほぼ同じであるが, 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, 軟化幅も広い。この結果から, 見掛けの溶接入熱Q(J/cm)では, ビード幅, HAZ幅等を推定できないことが明らかである。

マッシュシーム溶接法の入熱Qは約1.6kJ/cmであり, レーザ溶接法の入熱(0.5kJ/cm以下)に比べて大幅に大きく, 溶接部幅も広いことから軟化量は大きく, その領域も

広がっている。

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, レーザ溶接部の硬さを規定するためにレーザ溶接用の炭素当量Ceq(Laser)を回帰分析により求めた³⁾。

$$Ceq(Laser) = C + Si/50 + (Mn + Cr)/25 + P/2 \cdots \cdots (1)$$

Fig.8は, Ceq(Laser)とレーザ溶接金属の硬さの関係を示す。これより, レーザ溶接金属の硬さはCeq(Laser)により精度よく推定できることが確認された。

Ceq(Laser)は, 式(2)に示すアーク溶接用に規定された炭素当量式Ceqと比較すると, Cの寄与率が高く, SiおよびMnの寄与率が低くなっている。

$$Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5, \text{ wt}\% \cdots \cdots (2)$$

これは, 下記に示すようにレーザ溶接の方がアーク溶接に比べて冷却速度が速いためである。

レーザは貫通溶接のため移動線熱源として近似でき, 硬さおよびマイクロ組織との関連の深い800℃から500℃までの冷却時間 $t_{8/5}$ は, 次式で表される³⁾。

$$t_{8/5} = \alpha / 4 \pi \lambda^2 (q/vh)^2 [1/(500 - t_0)^2 - 1/(800 - t_0)^2] \cdots \cdots (3)$$

ここで, α :熱拡散率(cm^2/s), λ :熱伝導率($\text{J}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{C}$), q :レーザ入熱量(J/s), v :溶接速度(cm/s), h :板厚(cm), t_0 :材料温度($^\circ\text{C}$)を表す。

ここで, レーザ入熱量の推定は困難であるが, 樽井ら⁴⁾の研究結果を参考にエネルギー効率50%として計算した. 800℃→500℃の冷却時間は, 溶接速度3, 6m/minにおいてそれ

ぞれ0.3, 0.1秒であり, JIS 最高硬さ試験⁵⁾でのアーク溶接における6.3秒に比較して大幅に短時間である。

3.2.2 溶接継手の機械的性質

Fig.9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で, 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.10に, 溶接金属硬さHv(WM)と母材硬さHv(BM)の合計[Hv(WM)+Hv(BM)]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, 270~390MPaの範囲の継手において溶接金属と母材硬さの合計により, 統一的に整理できることが知られているが⁶⁾, 本研究により, 980MPa級の継手まで拡張できることが明らかとなった。

溶接金属と母材硬さの合計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よって主に支配されるが, レーザ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察されている。

3.2.3 溶接継手の疲労特性

Fig.11に, 母材の引張強さと母材および等厚直交引張継手の疲労限度(10^7 回疲労強度)の関係を示す。溶接継手の疲労限度は, 母材に比較して低い値を示す。破断位置は, 低・中サイクル寿命領域(破断回数 5×10^5 回以下)では, 材料強度に依らず溶接部から4~5mm離れた母材部であるが, 10^6 回を超える長寿命領域では溶接部近傍となる。これは, 低・中サイクル寿命領域では, 溶接部およびその近傍は変形の拘束をもたらし, すなわち疲労損傷が溶接部から離れた硬さの低い部分に集中したためと考えられる。一方, 長寿命領域では溶接部近傍の変形拘束よりむしろ溶接部の形状不連続に起因する応力集中によってき裂が発生・伝播したものと考えられる⁷⁾。

Fig.12は, 差厚直交引張継手の $\Delta\sigma$ -Nf線図を示す。差厚継手の疲労強度は, 母材および等厚継手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

Fig.9 Relationship between tensile strength of base metal and elongation of TWB

Fig.10 Relationship between hardness of weld metal and total elongation of TWB

Fig.11 Fatigue endurance limit of TWB and base metal

Fig.12 S-N diagram for differential thickness TWB and base metal

Fig.13 Relationship between fatigue endurance limit and thickness ratio of differential thickness TWB

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、このことが等厚継手に比べて差厚継手の疲労強度が低くなった原因と考えられる。

マッシュシーム溶接継手の疲労強度は、レーザ溶接継手に比較して低い値を示した。き裂は、重ね合わせ部から発生し、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。

Fig.13は、直交引張継手の板厚比と疲労限度（ 10^7 回疲労強度）の関係を示す。板厚比が大きい程、溶接段差部の応力集中係数が大きくなるため疲労限度は低下する。

マッシュシーム溶接継手の疲労限度は、レーザ溶接継手より低い値を示した。これは、マッシュシーム溶接部の重

Fig.14 Erichsen stretch test results of high strength TWB

Fig.15 Erichsen stretch test results of high strength TWB

ね合わせ部の応力集中係数が、レーザ溶接部の段差部のそれより大きいと考えられる。

3.2.4 溶接継手のプレス成形性

Fig.14に、590、780、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、いずれの材料も溶接部から割れが発生し母材部に伝播している。一方、溶接入熱が大きい比較条件（3kW-4m/min）では、Fig.7に示したように980MPa材では熱影響部が軟化しているため、熱影響部にひずみが集中し破断に至っている。

Fig.15は、エリクセン試験における破断開始時の高さを示す。破断高さは、母材に比べて標準条件（6kW-7m/min）、比較条件（3kW-4m/min）とも低下し、溶接条件による差異は認められない。特に、980MPa材では比較条件において熱影響部が軟化するため破断高さが低下している。

4. 結 言

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

強度およびプレス成形性等の基本特性を明らかにした。得られた主な結論は以下の通りである。

(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_1 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_1 ：薄板側母材の厚さである。

(2) 高強度薄鋼板のレーザ溶接特性

・溶接部の硬さは、レーザ溶接用炭素当量式で精度良く推定できる。

$$Ceq(Laser) = C + Si/50 + Mn/25 + Cr/50 + P/2$$

・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、270～980MPa 級の継手において溶接部と母材の硬さの合計で統一的に推定できることが確認された。

・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) K.Ikemoto et.al. : Laser welding of Automotive body panel, Quar.J.JWS, 10-1 (1992), 196-201. (in Japanese)
- 3) S.Kaizu, Y.Shinbo, M.Ono : Relationship between vickers hardness of laser weld and chemical compositions of steel sheets, Preprint of the national meeting of JWS, 55 (1994), 46-47. (in Japanese)
- 4) D.Tarui, H.Sakamoto, K.Shibata : Energy coupling between material and beam in laser welding, Preprint of the national meeting of JWS, 54 (1994), 86-87. (in Japanese)
- 5) F.Matsuda et.al : 溶接冶金学, Nikkan kogyo Press (1975), 179 (in Japanese)
- 6) Y.Yamasaki et.al : Effect of Chemical Composition, Mechanical and Thickness of Base Steels on Formability of Laser-Welded Blanks, Proceeding of the 19 IDDRG Congress, (1996), 501-510
- 7) K.Tokaji et.al : Fatigue strength and crack propagation property of laser butt welded joints, Tetsu to hagane, 85-1 (1999), 66-70 (in Japanese)