

ホットスタンプ材における溶接時の熱影響による 構造体強度低下

Degradation of Structure Strength by Welding Heat Effect for Hot-stamped Material

大岡 久康*
Hisayasu OOKA

野村 友大*
Tomohiro NOMURA

河津 政裕*
Masahiro KAWAZU

要 旨

自動車の車体に用いるホットスタンプ材において、溶接による熱が構造体の強度性能を低下させる現象を明らかにした。テストピースによる試験により、抵抗スポット溶接と比べて熱の伝わる範囲が大きいレーザーなどの連続溶接では、構造体の強度性能が低下することがあることを明確にした。この現象のメカニズムを明らかにするため、CAEを用いた解析をおこなった。溶接の熱により溶接部近傍の軟化が発生する現象を再現するため、微小な引張試験片を用いて材料の強度特性を採取し、CAEモデルに反映した。計算結果は試験結果と良く一致し、構造体強度性能の低下は、材料軟化の影響であることを明確にした。さらに、材料の軟化範囲と構造体強度性能の関係を検討することにより、溶接フランジ部の軟化の影響は小さく、稜線部の軟化の影響が大きいことがわかった。これは構造的に稜線部の応力分担が大きく、その範囲が軟化したためである。以上のように、今後の車体構造や溶接手法について検討する上での知見が得られた。

ABSTRACT

The phenomenon where welding heat reduces the structure strength performance of hot-stamped materials used in automobile bodies was clarified. Tests using test pieces demonstrated that continuous welding methods, such as laser welding, that transmit heat over a wide range may reduce the structure strength performance compared to resistance spot welding. CAE analysis was performed to clarify the mechanism of this phenomenon. The material strength properties were obtained using micro tensile test specimens and applied to CAE models to reproduce the phenomenon where welding heat softens the area around the weld. The calculation results closely matched the test results, which showed that the drop in structure strength performance is due to material softening. In addition, the relationship between the material softening range and structure strength performance was investigated, and showed that softening of the welding flange area has a small effect, and softening of the hinge line areas has a large effect. This is because the hinge line areas bear a large share of the structural stress, and softening occurred in these areas. These results provided useful knowledge for future investigation of body structures and welding methods.

1. ま え が き

近年、自動車の車体において、衝突安全性能向上のための強度確保や燃費性能向上のための軽量化を目的として、高張力鋼板が多く用いられている。中でも引張強度の高いホットスタンプ材は、ここ数年で適用が急激に拡大している^{(1),(2)}。ホットスタンプとは、専用の鋼板を900℃程度

に加熱し、プレスと同時に金型による急速な冷却をおこなう工法で、1500 MPa以上の引張強度を得ることができる。この手法を適用した部材は、衝突時のキャビンの変形を抑制し乗員を保護するため、フロントピラーやセンタピラー、サイドシル部など車体のフレームに多く用いられている (Fig. 1)⁽¹⁾。

一方、780 MPa付近を超える高張力鋼板は、溶接の熱に

*四輪 R&D センター

より、溶接部周辺の材料が軟化し、溶接強度が低下することが報告されている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。近年では、車体の剛性や衝突安全性能向上を目的としてレーザ溶接などの連続溶接が用いられている⁽⁶⁾。連続溶接は熱の伝わる範囲が大きく、車体に広く使われている抵抗スポット溶接（以下RSW）より広い範囲が熱によって軟化すると考えられる。しかしながら、現状、構造体としては、熱による強度性能低下について報告された例はない。車体構造の強度は車体性能において重要な要素であり、その現象を明らかにして今後の開発に反映する必要がある。

本研究では、ホットスタンプ材を用い、RSWやレーザ溶接などで加工をおこなったテストピースを作製し、曲げ試験により強度性能への影響を明確化した。また、CAEを用いて溶接部近傍の軟化部位の微小な強度特性をモデル化することで、強度低下の要因解明をおこなった。さらに軟化の範囲と構造体強度性能の関係を明確にし、性能低下影響の大きい位置の特定と実際の試験による検証をおこなった。

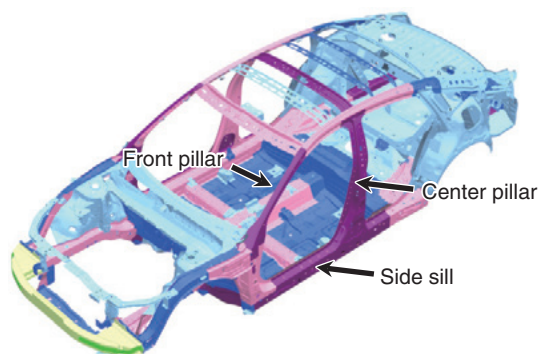


Fig. 1 Applicable parts made of hot-stamped material

2. 軟化と構造体強度性能影響の明確化

溶接による熱が車体の強度性能へ与える影響を明確化するために、フレームを想定したテストピースを用いて試験をおこなった。車体の中でホットスタンプ材が用いられる部品は、衝突の際に曲げによる変形が発生するような部位に使われることが多い。そこで曲げ試験によって評価をおこなった。

2.1. 試験方法

テストピースの形状はセンタピラーの一般的な断面を模した、ハット形状を二枚重ねて溶接した構造体（以下ハット部品）とした（Fig. 2）。材料はホットスタンプ用アルミめっき鋼板とし、ホットスタンプ後の機械特性をTable 1に示す。板厚1.6 mm、長さは1000 mmとした。溶接フランジの平坦部幅は16 mmとした。

Table 1 Mechanical properties

	Measured value
Hardness (Hv)	494.3
Tensile strength (MPa)	1505.3
Yield strength (MPa)	1050.5
Elongation (%)	9.8

各溶接の手法をFig. 3に示す。連続溶接は、レーザ溶接、アーク溶接、シーム溶接の代表的な3手法とした。一般的に用いられるRSWの30 mmピッチ（以下基準RSW）を基準として比較をおこなった。また剛性強度が高いことが報告されているRSWの15 mmピッチ（以下短ピッチスポット溶接）⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾も比較をおこなった。

曲げ試験の手法をFig. 4に示す。ハット部品の端部は曲げ試験中に変形するのを抑制するためにプレートを全周溶接した。試験は3点曲げ、圧子の接触面はR50、支点治具の接触面はR30、支点間は700 mmとした。圧子の押し込み量は200 mm、試験速度は10 mm/minとした。

2.2. 試験結果と考察

試験結果をFig. 5に示す。すべての試験体において溶接部は破壊していないことを確認した。最大反力および吸収エネルギーをFig. 6に示す。吸収エネルギーは、基準となるRSWに対し、短ピッチスポット溶接は1.5%向上しているが、レーザ溶接で5.5%、アーク溶接で13.4%、シーム溶接で7.0%の低下が確認できた。このように、連続溶接の吸

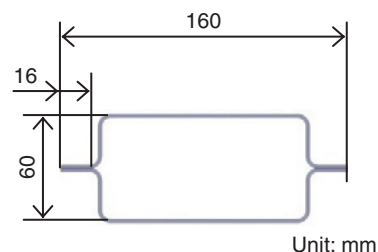


Fig. 2 Hat part section view

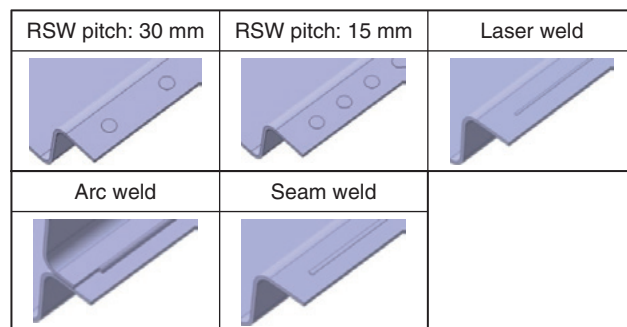


Fig. 3 Welding methods

収エネルギーはすべての場合において基準 RSW を下回っていることがわかった。

吸収エネルギー性能が低い原因は、連続溶接の熱による材料の軟化によるものと推測した。また、アーク溶接が最も低い結果となったのは、熱の影響に加え、継手が重ね隅肉であり溶接側のフランジが短いためと考えられる。

材料の軟化状態を検証するため、溶融凝固部およびその近傍の硬度試験をおこなった。結果を Fig. 7 に示す。溶接前の母材硬度は約 500 Hv であり、それぞれの溶接手法で軟化が発生したことが確認できる。基準 RSW の軟化範囲は狭く、その他の連続溶接ではフランジの端末から、稜線を含む広い範囲で軟化していることが確認できた。そこで軟化範囲の引張強度特性を明確にするために、テストピー

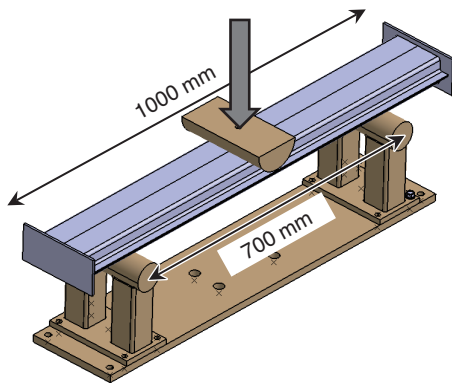


Fig. 4 Bending test specification

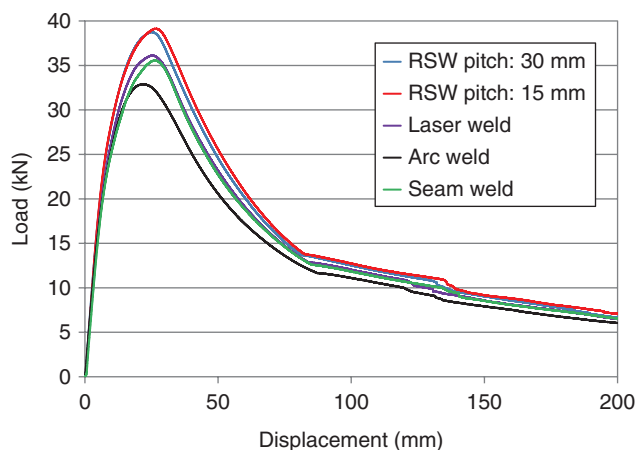


Fig. 5 Results of bending test

スの溶接周辺部から試験片を切り出し、微小引張試験をおこなった。試験片の形状を Fig. 8 に示す。レーザ溶接における試験片の切り出し部位を Fig. 9 に、試験結果を Fig. 10 に示す。溶融凝固周辺部および熱影響部は、母材部に対して材料強度が低下していることが確認できた。

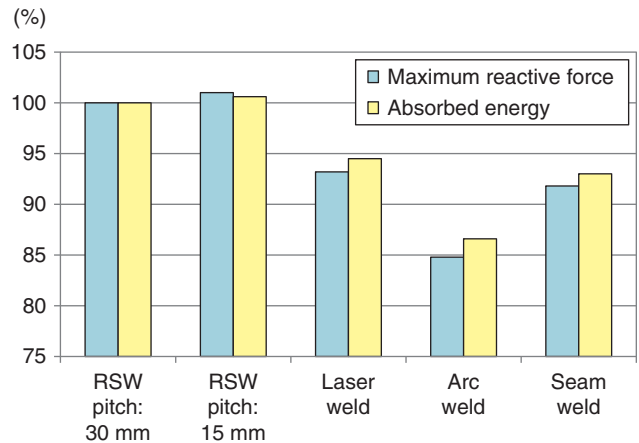


Fig. 6 Results of maximum reactive force and absorbed energy (compared to RSW pitch: 30 mm)

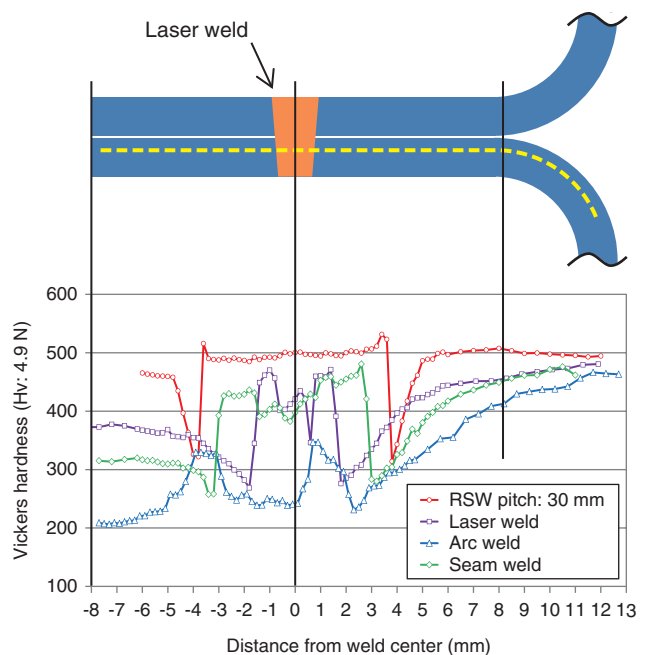


Fig. 7 Hardness test results

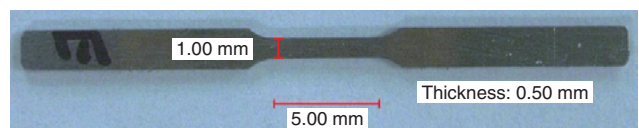


Fig. 8 Dimensions of micro specimen

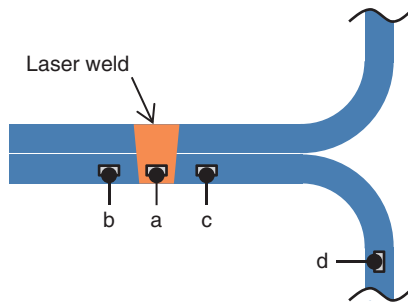


Fig. 9 Locations of micro specimens

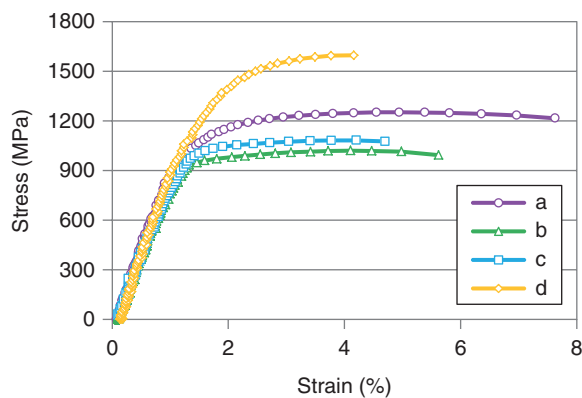


Fig. 10 Micro tensile test results (stress-strain curves)

3. CAE によるメカニズム解明

溶接の熱による材料軟化の影響で構造体強度性能が低下するメカニズムを解明するために、構造体の3点曲げ試験を構造解析CAEでモデル化した。テストピースを作製した五つの溶接手法のモデルを作成し、検証をおこなった。

3.1. 解析モデル

まず、テストピースから切り出した試験片の、微小引張試験結果 (Fig. 10) を構造解析CAEに使用するため、塑性域の応力-ひずみ曲線のモデル化をおこなった。降伏応力は0.2%耐力を用いて決定した。ヤング率は205.8 GPa, ポアソン比は0.3とした。

Fig. 11 に解析モデルを示す。モデルはハット部品をソリッド、治具を完全剛体のサーフェスで表した。境界条件については、摩擦はすべてゼロとした。構造体は四角メッシュとした。メッシュサイズを Table 2 に示す。圧子と接触し大きく変形する30 mmの範囲、さらにその周辺75 mmの範囲でメッシュサイズを小さくしている (Fig. 12)。

各溶接手法を用いた構造体のモデルを Fig. 13 に示す。溶接はハット部品の上部と下部の間に0.1 mmのギャップを設けており、ギャップを溶接部が繋ぐように再現した。

Fig. 14 に各溶接手法における材料軟化を反映した範囲

Table 2 Mesh size

		Unit: mm	
		Longitudinal direction	Lateral direction
Substrate	Low strain	3.75	5.12
	High strain	1.87	2.56
	Super-high strain	1.25	2.56
Joining area	Spot weld	3.00	
	Laser weld	3.75	0.50
	Arc weld	3.75	0.80
	Seam weld	3.75	0.80

(以下軟化モデル)を示す。硬度試験の結果 (Fig. 7) を基に軟化範囲を設定してモデル化した。各部位の引張強度値は微小引張試験から得た値である。なお、計算の比較として軟化部位がまったくないこと以外は同一のモデル (以下非軟化モデル) についても解析もおこなった。

なお、ソルバはABAQUSの陽解法を用いた。

3.2. CAE 解析結果と考察

基準としたRSWの試験結果とCAEモデルの解析結果比較を Fig. 15 に示す。荷重の立ち上がりから最大反力到達までと、その後の減少傾向が良く一致しており、吸収エ

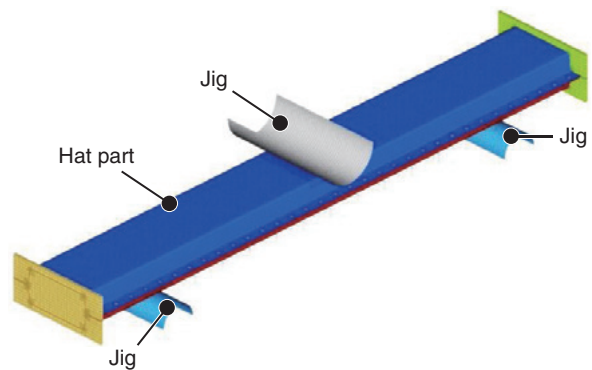


Fig. 11 CAE model

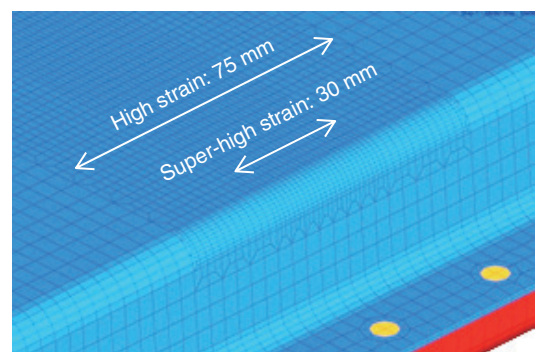


Fig. 12 CAE model detail

エネルギーは 1.6% の差異にとどまっている。

軟化モデルの結果を検証するために、各溶接手法モデルの吸収エネルギーによる評価をおこなった。テストピースによる試験結果と CAE との比較を Fig. 16 に示す。軟化モデルは試験値と近い値をとっていることが確認できた。レーザ溶接では、試験に対し非軟化モデルの吸収エネ

	Joint shape	Joint width	Image
RSW pitch: 30 mm	Circular	$\phi 6$ mm	
RSW pitch: 15 mm	Circular	$\phi 6$ mm	
Laser weld	Rectangular	1.6 mm	
Arc weld	Quarter cylindrical	1.7 mm	
Seam weld	Rectangular	1.0 mm	

Fig. 13 Joint CAE models

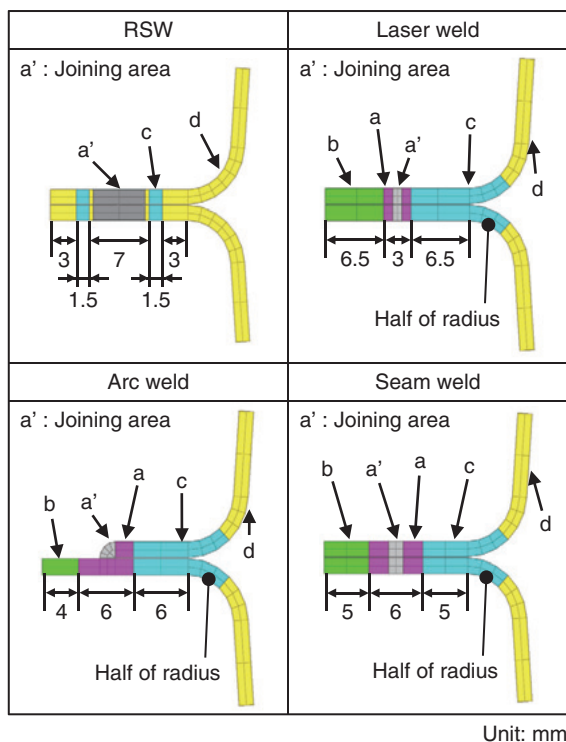


Fig. 14 CAE softening models

ルギーは 7.7% 高いが、軟化モデルでは 2.7% の差異にとどまっている。また、基準となる RSW に対して、短ピッチスポット溶接の吸収エネルギーが向上することも、試験と相関があることが確認できた。

Fig. 17 にストローク 100 mm での応力分布を示す。Fig. 17(a) の非軟化モデルは溶接フランジ周辺で高い応力が広く分布しているのに対し、(b) の軟化モデルは溶接フランジ周辺の応力集中範囲が狭く、応力も低いことがわかる。これは溶接フランジ周辺の塑性変形が低い応力で進ん

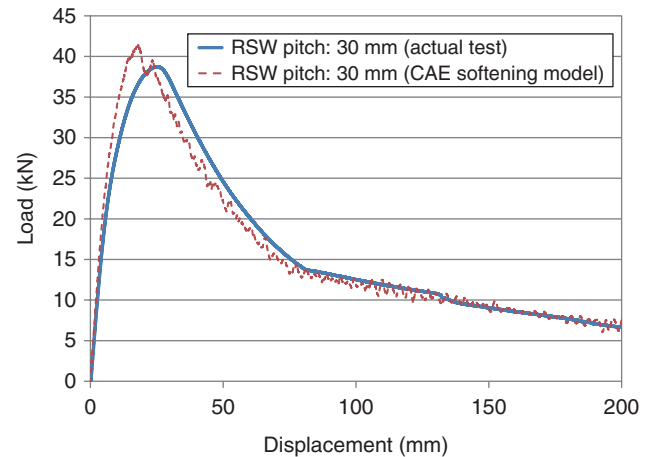


Fig. 15 Results of actual test and CAE softening model

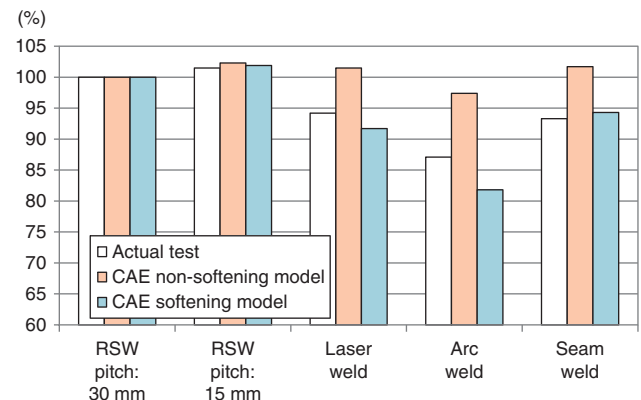


Fig. 16 Results of absorbed energy (compared to RSW pitch: 30 mm)

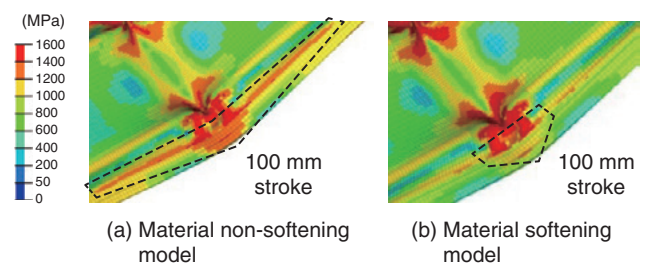


Fig. 17 Stress distribution

だことが原因である。このように溶接フランジ周辺の応力が低いまま、圧子接触部周辺に応力が集中したために吸収エネルギーが低下したと推測される。

以上のことから、溶接の熱により材料が軟化することによって反力が下がり、吸収エネルギーが低下するメカニズムが解明できた。また、熱影響を受ける範囲ごとに強度特性をモデル化することで、構造体強度性能の予測ができることがわかった。

3.3. 軟化範囲と構造体強度の関係明確化

次に、軟化範囲が構造体の吸収エネルギー低下に及ぼす影響について検討をおこなった。Fig. 17 に表す通り、曲げ入力による応力分布は溶接部位であるフランジとその周辺部で均一ではない。そこで、熱による軟化が強度性能低下に大きく影響する範囲を特定するため、材料軟化の範囲と構造体強度性能の関係を検討した。レーザ溶接の解析モデルを用い Fig. 18 に示すように、構造体の軟化範囲を 5 水準作製して解析をおこなった。

モデル A は非軟化モデル、モデル B はフランジの端側半分を軟化させたモデルである。モデル C, D, E は徐々に軟化範囲を拡大させた。

軟化範囲と吸収エネルギーの関係を Fig. 19 に示す。条件 C の吸収エネルギーは非軟化モデルの A に対して 2.4% の低下にとどまった。一方、条件 D と E のように稜線部が軟化すると吸収エネルギーは急激に低下し、条件 D で 9.4%、条件 E で 10.2% 低下した。D と E の吸収エネルギーがほとんど同じであることから、稜線部の中でもフランジの角稜近傍で多くエネルギー吸収していると考えられる。Fig. 20 に条件 A の 50 および 100 mm ストローク時の応力分布を示す。ストロークが 50 mm では圧子周辺の稜線に広く応力が分布し、フランジ部の応力は小さい。100 mm になると稜線部の応力はより広がるのに対し、フランジ部の応力は変化が少なかった。

以上のことから応力分担の大きい稜線部が軟化すること

で、吸収エネルギーの低下影響が大きくなったと考えられる。このことから稜線部の軟化を抑えることで構造体の吸収エネルギー低下を抑制できると考えた。

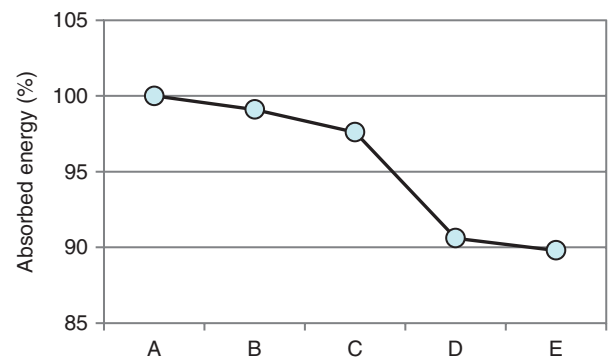


Fig. 19 Relationship between softening area and absorbed energy

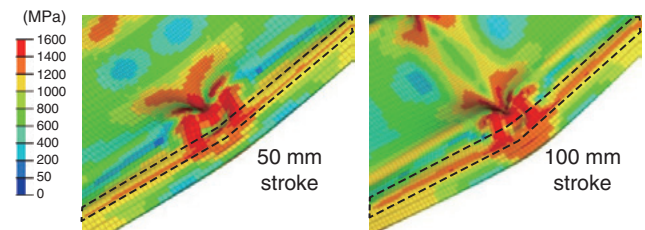


Fig. 20 Stress distribution at weld for condition A

4. 吸収エネルギー低下抑制手法の構築

稜線部の熱による軟化を抑制することを目的とし、テストピースの試験により、溶接条件を検討した。一般に溶接速度を速めることにより、溶接部周辺の熱温度上昇は低減される。そこで、レーザ溶接の速度を速める検討をおこなった。単に速度を速めるだけでは溶接品質が低下するので、溶融幅が同等となるようにレーザ出力を調整した。溶接条件を Table 3 に示す。条件 1 はこれまで検討してきた試験と同じ条件、条件 2 および 3 は溶接速度を高速にしたものである。

曲げ試験の結果を Fig. 21 に示す。レーザ溶接の速度を速めた条件 2 と 3 では、吸収エネルギーが上昇していることが確認できた。

熱の伝わりを把握するために、溶接中に稜線部の表面温度の測定をおこなった。測定位置を Fig. 22 に、結果を Fig. 23 に示す。条件 1 に対し、溶接速度を速めた条件 2 および 3 は稜線部の温度が低いことを確認した。さらに溶接部位の近傍について硬度試験をおこなった結果を Fig. 24 に示す。温度の低下に合わせて硬度の低下量が減少し硬度低下の範囲が狭くなっていることが確認できた。

Condition	A	B	C	D	E
Flange softening area	0%	50%	100%	100%	100%
Hinge line softening area	0%	0%	0%	50%	100%
CAE model					

Fig. 18 CAE softening model conditions

Table 3 Laser welding conditions

Condition	1	2	3
Welding speed (m/min)	1.0	2.5	8.0
Laser power (kW)	3	6	10

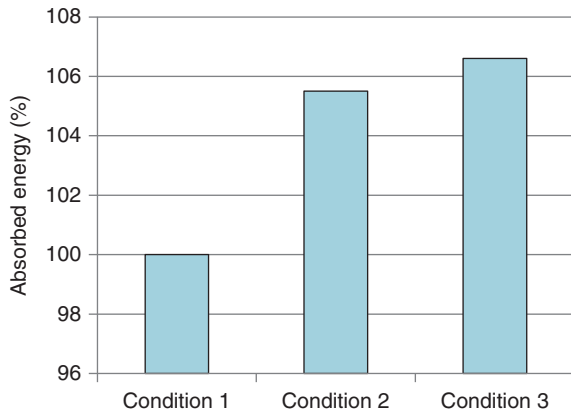


Fig. 21 Absorbed energy

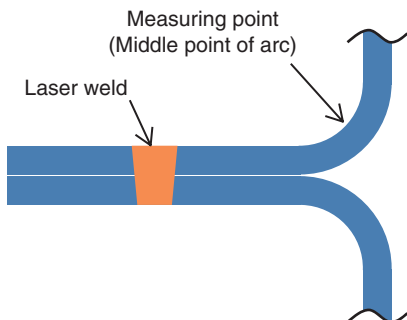


Fig. 22 Temperature measuring point

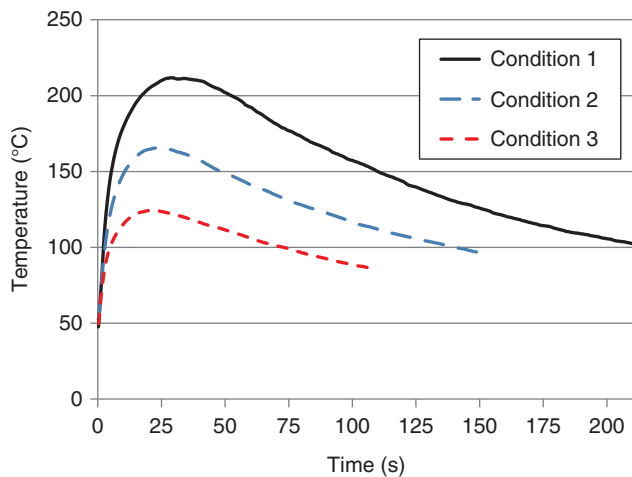


Fig. 23 Temperature history at middle point of arc

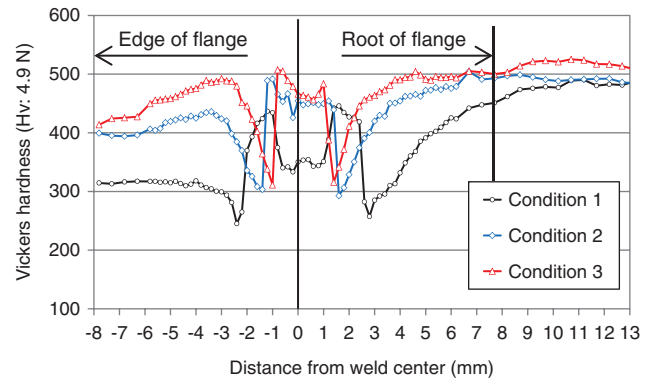


Fig. 24 Hardness test results of laser weld

5. 結論

ホットスタンプ材を用いた構造体における、溶接時の熱による強度低下の要因解明をおこない、以下の結論を得た。

- (1) ホットスタンプ材において、溶接の熱によって材料が軟化することで、吸収エネルギーが低下する仕組みが明らかになった。
- (2) CAE 解析により、材料軟化時の強度特性を CAE モデルに反映することで、構造体強度性能の予測ができる。
- (3) 構造的に応力分担の大きい稜線部の軟化が、構造体強度性能低下に大きく影響する。

参考文献

- (1) Marukawa, T., Shoji, Y., Nakamura, M.: Euro Car Body 2017, Honda ACCORD, (2017)
- (2) Palmquist, N., D'Elia, A., Nedic, S.: Euro Car Body 2016, Volvo V90, (2016)
- (3) 山崎一正, 佐藤浩一, 徳永良邦: 超高強度冷延鋼板のスポット溶接継手の強度特性, 溶接学会論文集, 第 17 巻, 第 4 号, p. 553-560, (1999)
- (4) 富士本博紀, 泰山正則, 上田秀樹, 上路林太郎, 藤井英俊: ホットスタンプ処理されたスポット溶接継手の静的強度特性, 溶接学会論文集, 第 33 巻, 第 2 号, p. 144-152, (2015)
- (5) 富士本博紀, 福井清之, 岡村一男, 宮原光雄, 中山英介: 高張力鋼板スポット溶接継手の強度と破断形態の検討, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 105-02, p.5-8, (2002)
- (6) Tarr, S.: Body Technology of Honda New NSX, 自動車技術会春季大会フォーラム, 車体の最新技術 2017, No. 17, FORUM-Y8, p. 1-20, (2017)

- (7) 大岡久康, 鈴木敦, 後東光繁, 大塚啓太, 岡田安正:短ピッチスポット溶接技術の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 25, No. 2, p. 81-86
- (8) <http://www.honda.co.jp/factbook/auto/N-WGN/201311/p22.pdf>
- (9) 大岡久康, 野村友大:短ピッチスポット溶接を用いた車体の軽量化, 溶接学会誌, Vol. 84, No. 7, p. 509-513, (2015)

■ 著 者 ■



大岡久康



野村友大



河津政裕