

(論文)

亜鉛めっき超高張力鋼板の抵抗スポット溶接で発生するLME割れが継手強度に及ぼす影響

前田恭兵*¹・鈴木励一*¹(博士(工学))・秦野雅夫*²

Influence of LME Cracks in Resistance Spot Welds of Zinc-coated Ultra-high Strength Steel Sheets on Joint Strength

Kyohei MAEDA・Dr. Reiichi SUZUKI・Masao HADANO

要旨

超高張力鋼板において、抵抗スポット溶接時に液体金属脆化割れ、いわゆるLME (Liquid Metal Embrittlement) 割れが発生する場合があります。自動車業界において問題視されている。しかし、LME割れが継手強度へおよぼす影響に関するデータは少ない。そこで本研究では、LME割れを発生位置ごとに3種類に分類し、各種割れが静的強度および疲労強度へおよぼす影響を調査した。圧痕内部に生じる割れは表裏面を貫通するものであっても継手強度にほとんど影響しないのに対し、圧痕内外周部に発生する割れはせん断、十字引張強度ともに低下させる可能性があることを明らかにした。また、継手内部で生じる割れは、せん断疲労強度特性を大きく劣化させることが分かった。

Abstract

LME cracking, seen in resistance spot welds of ultra-high strength steel, has become a subject of discussion in the automobile industry. However, only a few articles concerning the effect of this type of the crack on joint properties have been reported. Therefore, in this study, LME cracks were classified into 3 types based on location and the influence of these cracks on static and fatigue strengths were investigated. Type A crack, occurring within an indentation of a spot weld, slightly affected the joint strength, while type B crack, generating on the indentation periphery or outside it, significantly lowered both tensile-shear and cross-tension strengths, which decreased by up to 35% and 44%, respectively. Type C crack, seen near the interface of the sheets, deteriorated fatigue strength as well.

検索用キーワード

超高張力鋼板, めっき鋼板, 抵抗スポット溶接, LME, 割れ, 継手強度

まえがき = 1990年代以降、地球温暖化対策として世界規模で温室効果ガスの削減が求められており、2050年でのカーボンニュートラルが掲げられている。自動車業界では走行時のCO₂排出量を低減するため、電動化や車体の軽量化が進められている^{1), 2)}。衝突安全性の要求も年々高まっており、低燃費化とあわせて実現するために、車体への超高張力鋼板(以下、超ハイテンという)の適用が増加している。超ハイテンでは強度と加工性を両立するため、合金成分が多くなる場合がある³⁾。一般的に、合金成分の増加にともない溶接性が劣化することが知られている。たとえば、自動車の生産ラインで主に用いられる抵抗スポット溶接では、チリが低電流側で発生して適正溶接条件範囲が狭くなること^{4), 5)}、引張試験において界面破断や部分プラグ破断など脆性的な破壊を生じやすく継手強度が低下することが報告されている⁶⁾。さらに、近年開発されている超ハイテンの一部では、亜鉛めっき鋼板との溶接時に溶融亜鉛に起因した液体金属脆化割れ、いわゆるLME (Liquid Metal Embrittlement) 割れが発生することが報告されている^{7)~9)}。図1に示すように、LME割れは高い割れ感受性、溶融亜鉛、引張応力の3因子が重畳することで発生する。

換言すると、これら因子のうちどれか一つでも取り除くことができれば割れは防止可能である。過去の研究において、電極解放の直後に溶接部で大きな引張応力が生じることが数値解析にて示されており¹⁰⁾、この応力緩和や電極解放時における溶融亜鉛量の低減を狙った溶接プロセス改善によるLME割れ防止が提案されている^{10)~15)}。いっぽう、溶接条件は生産タクトタイムや部

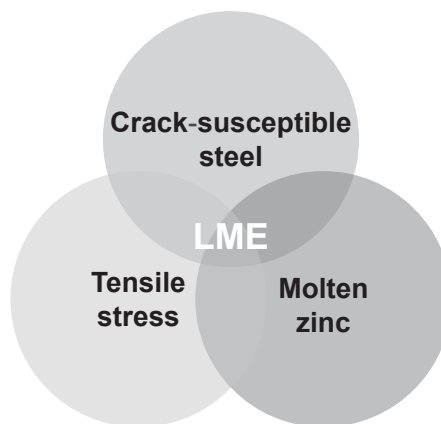


図1 LME割れの発生因子
Fig.1 Factors of LME cracking

*1 技術開発本部 ソリューション技術センター *2 コベルコ溶接テクノ(株) ソリューション技術部

品形状により制限されることから、必ずしもこれら割れ防止法が適用できるとは限らない。すなわち、超ハイテンを使いこなしていくためには、施工条件の最適化のみならず、LME割れの存在を考慮した構造設計が必要になると考えられる。一般的に、自動車の設計においては、走行時ならびに衝突時に加わる荷重から溶接部に必要な強度が算出される。スポット溶接に関しては、JIS Z 3140において鋼板板厚や強度ごとに引張せん断強さ (Tensile Shear Strength: TSS) と十字引張強さ (Cross tension strength: CTS) の要求値が規定されており、これを設計時に指標とする場合もある。LME割れが生じていても、基準の強度が得られれば割れを許容するという構造設計手法を取り入れることができれば、超ハイテンの適用範囲を広げられる可能性がある。同様の考え方はJIS Z 3104においても採用されており、4種別に区分されるきず (欠陥) のうち第1種および第4種のきずについては、所定の寸法以下である場合にはカウントしなくてよいと定義されている。しかし、LME割れが継手強度におよぼす影響に関するデータは少なく、現状LME割れに関する規格は策定されていない。このような背景から、本検討ではLME割れを発生位置ごとに分類し、各種割れが静的強度および疲労強度へおよぼす影響を明らかにすることを目的とした。

1. 実験方法

1.1 LME割れの分類

LME割れは継手の表面に生じる外割れ、内部に生じる内割れに大別される¹⁶⁾。本検討では図2に示すように、外割れを発生位置が圧痕内部であるtype A割れと圧痕内外周部であるtype B割れに詳細分類し、HAZに発生する内割れをtype C割れとした。

1.2 LME割れが静的強度および疲労強度へおよぼす影響の調査

供試材には板厚1.4 mmの980MPa級GA鋼板を用いた。静的引張試験についてはJIS Z 3136およびZ 3137に、疲労試験についてはZ 3138に準拠して、試験片は図3に示すサイズとした。鋼板を塩酸に浸漬し、片面の溶接部近傍だけにめっき層を残した試料 (以下、めっき材という) と、両面のめっき層をすべて除去した試料 (以下、裸材という) を作製した。

溶接機にはサーボ加圧式直流インバータ溶接機を用いた。電極は材質がクロム銅、先端径6 mm、先端曲率半径40 mmのDR型電極を使用した。溶接条件を図4に、継手の作製方法の模式図を図5に示す。

めっき材を用いて、外割れは上下板のめっき面を電極側に、内割れは相手材側に配置して溶接することにより、継手における欠陥の発生位置を制御した。後者については、割れの発生促進を狙って打角を7°とし、さらに板間に2 mmの隙間を設けた。比較のために、外割れおよび内割れ発生継手と同等のナゲット径を有する割れない継手を裸材により作製した (以下、無欠陥継手という)。

Type B割れは圧痕外周部から外側にかけて発生する

が、発生位置により悪影響度合いが異なることが想定される。割れの微妙な発生位置を溶接によって制御することは困難であるため、フェムト秒レーザーを利用して割れを模擬した。図6のように、mmオーダー幅の半円状溝 (以下、人工欠陥という) を無欠陥継手に対して形成す

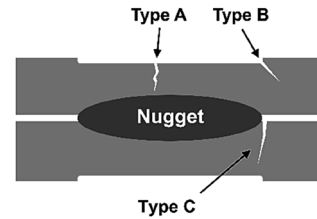


図2 LME割れの分類
Fig.2 Classification of LME cracks

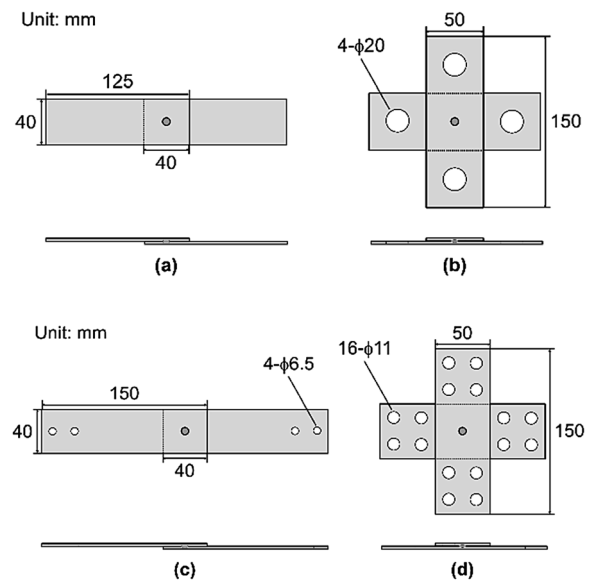


図3 引張試験片寸法
(a) 静的せん断引張, (b) 静的十字引張試験
(c) せん断引張疲労, (d) 十字引張疲労試験
Fig.3 Dimensions of tensile specimens
(a) static tensile-shear, (b) static cross-tension tests
(c) tensile-shear fatigue, (d) cross-tension fatigue tests

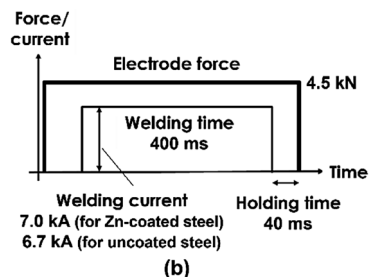
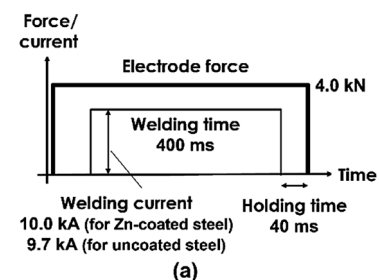


図4 割れ発生継手作製時の溶接条件
(a) 外割れ, (b) 内割れ
Fig.4 Welding conditions for producing welds with LME
(a) outer, (b) inner cracks

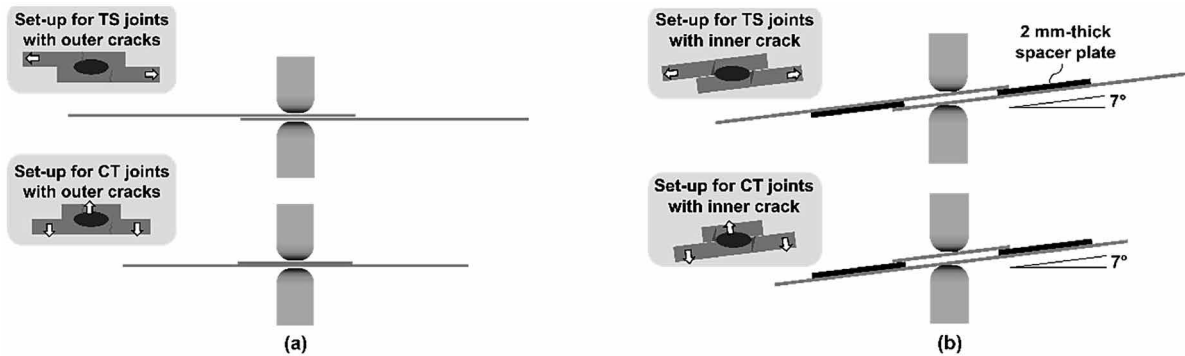


図5 割れ発生継手の作製方法の模式図 (a) 外割れ, (b) 内割れ
 Fig.5 Schematic illustration of set-up for producing welds with LME (a) outer, (b) inner cracks

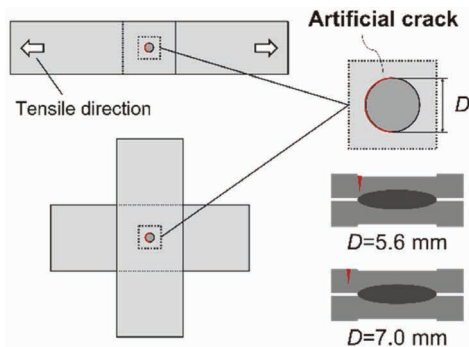


図6 人工欠陥の導入方法の模式図
 Fig.6 Schematic illustration of creating artificial crack in welds

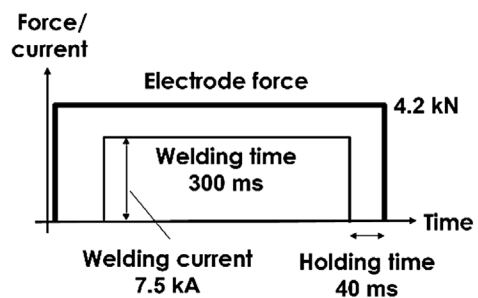


図7 無欠陥継手作製の溶接条件
 Fig.7 Welding conditions for producing welds without crack

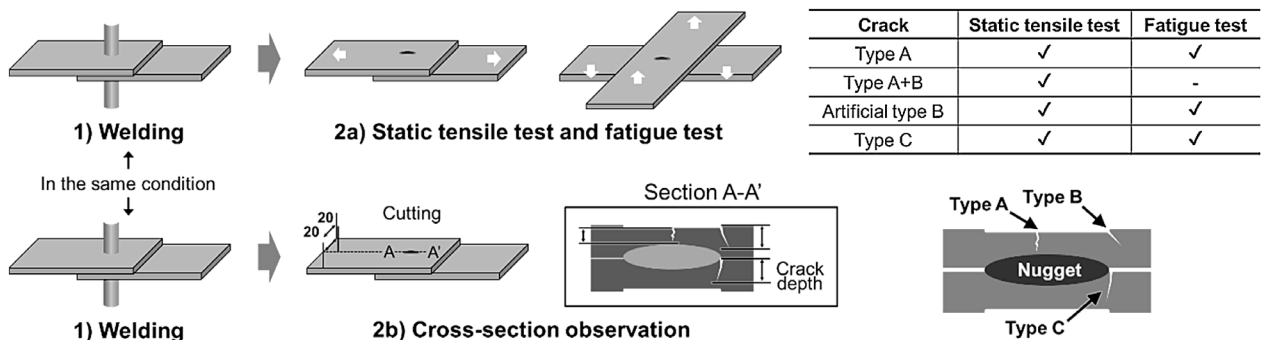


図8 評価試験の流れ
 Fig.8 Process flow of testing and evaluation

る手法により、各種発生位置における継手強度を調査した。裸材を用いて図7に示す条件で溶接した後、上板側の圧痕内外周部および圧痕外側に対して人工欠陥を導入した。人工欠陥の直径は、前者は5.6 mm、後者は7.0 mmとした。作製した継手に対する評価試験の流れを図8に示す。静的引張試験2種（せん断引張試験、十字引張試験）および疲労試験2種（せん断引張疲労試験、十字引張疲労試験）を実施した。静的引張試験におけるサンプル数（以下、nの後に数値を付けた表記は試験のサンプル数を意味する）はn3ないしn5とし、引張速度は10 mm/minとした。疲労試験は各荷重においてn2ずつおこない、応力比は0.1、振動数は5~20 Hz、最大繰り返し回数は 2×10^6 とした。なお、実験的に外割れを発生させた継手については、type A割れのみを含むものと、type AおよびB割れの両方を含むものが存在する。そのため、マイクログラフによる外観観察を実施し、

前者に対しては静的引張試験および疲労試験を、後者に対しては静的引張試験のみをおこなった。加えて、引張試験とは別のn3のサンプルに対して断面観察を実施した。溶接部の観察は、せん断引張試験片のナゲット中央部にて長手断面で切断し、ピクリン酸飽和水溶液で腐食後、光学顕微鏡を用いておこなった。割れ深さは図8に示す要領で測定した。

2. 実験結果および考察

2.1 外割れが静的強度および疲労強度へおよぼす影響

継手の外観および断面写真を図9に示す。Type A割れのみ生じた継手 (b) と、type AおよびB割れがともに発生した継手 (c) が確認された（以下、type A割れ継手、type A+B割れ継手という）。Type AおよびB割れの割れ深さはそれぞれ0.07~2.13 mm, 0.07~0.91 mmであり、圧痕部の表裏面を貫通するtype A割れが認め

られた。

静的引張試験結果を図10に示す。グラフ中の下段に、生じた割れの種類をあわせて記載した。無欠陥継手と比較して、type A割れ継手では継手強度が同等であり、type A割れは静的強度にほとんど影響をおよぼさないことが明らかとなった。他方、type A+B割れ継手では無欠陥継手よりもTSS, CTSともに低位となる場合が認

められた。最も低い継手強度同士を比較すると、type A+B割れ継手では無欠陥継手よりもTSS, CTSともに約35%低減した。図11にtype A+B割れ継手の引張試験前後の外観写真および割れ発生位置、引張試験における破断位置の模式図を示す。せん断引張試験用継手については、割れ発生位置を図のようにTransverse areaおよびLongitudinal areaに分類した。いずれの継手もtype B

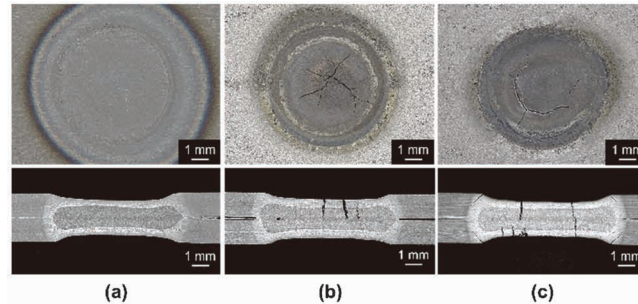


図9 継手の外観および断面写真 (a) 無欠陥, (b) type A割れ, (c) type A+B割れ

Fig.9 Surface and cross-section images of welds (a) without LME crack, (b) with type A crack, (c) with type A+B cracks

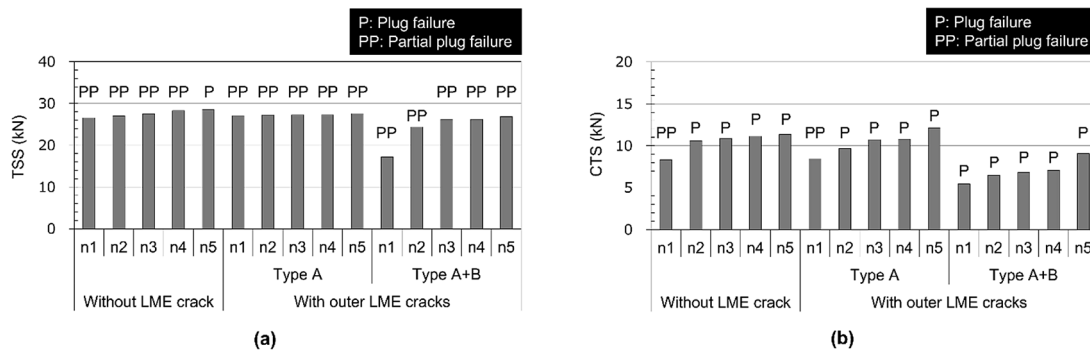


図10 静的引張試験結果 (a) せん断, (b) 十字

Fig.10 Results of static (a) TS, (b) CT tests

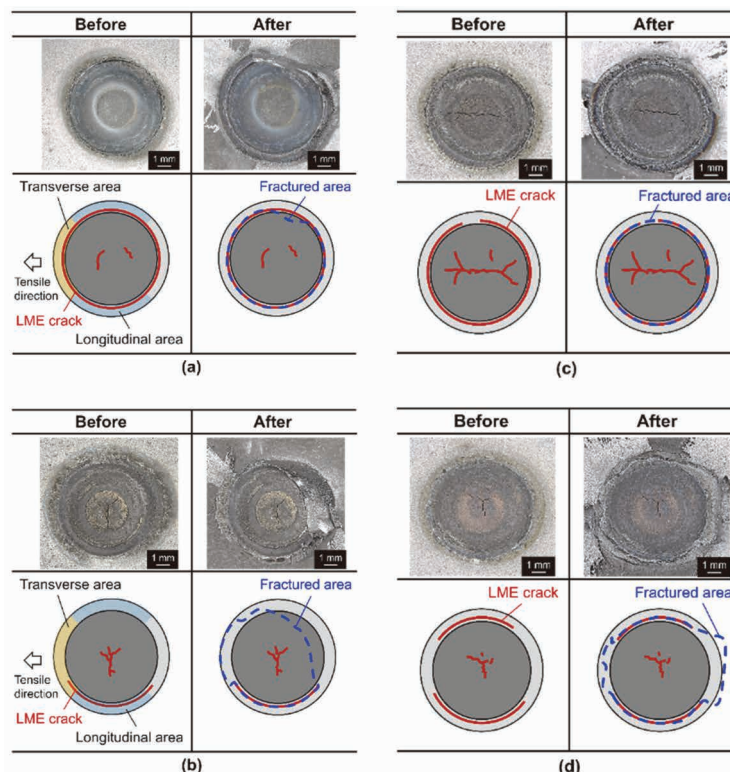


図11 Type A+B割れ継手の引張試験前後の外観写真 (せん断引張試験: (a) n1, (b) n3, 十字引張試験: (c) n1, (d) n4)

Fig.11 Surface view of specimens with type A+B cracks before and after tensile tests (TS test: (a)n1, (b)n3, CT test: (c)n1, (d)n4)

割れに沿って破断した。Transverse areaにおける割れ発生範囲が小さい継手では、無欠陥継手とTSSがほぼ同等であるのに対し、広範囲にわたって割れを有する継手では大幅なTSSの低下が認められた。十字引張ではナゲット外周部で均等に応力が負荷されるため、割れ発生位置によらず強度低下が生じる。これに対し、せん断引張では主にTransverse areaにおいて応力集中が生じるため、Longitudinal areaに発生した割れは強度にほとんど影響をおよぼさないと考えられる。Type A割れ継手と無欠陥継手の疲労試験結果を図12に示す。Type A割れ有無によるL-N線図の大きな差異は認められず、type A割れは疲労特性にほとんど影響しないことが明らかとなった。

2.2 Type B割れの発生位置が静的強度および疲労強度へおよぼす影響（人工欠陥を利用した検討結果）

継手の外観および断面写真を図13に示す。圧痕内外周部、圧痕外側における人工欠陥深さは、それぞれ0.55~0.63 mm, 0.54~0.61 mmであった。静的引張試験の結果を図14に示す。無欠陥継手と比較して、人工欠陥が圧痕内外周部にある継手ではTSSは同等であるのに対し、CTSは低位となった。いっぽう、人工欠陥が圧痕外側にある継手では、CTSに加えて微小ではあるがTSSの低下も認められた。最も低いCTS同士で比較すると、無欠陥継手よりも前者の継手では約35%、後者の継手では約44%の強度低下が認められ、圧痕から遠くなるほど割れへの悪影響度合いが増すことが示唆された。先述のtype A+B割れ継手を用いた試験と比較して、人工欠陥を導入した継手では顕著なTSSの低下は認められなかったが、これは実際の割れと人工欠陥の大きさが異なることに起因したと推察される。本試験ではレーザ加工機の制約上、人工欠陥深さを0.6 mm狙いとしており、実際のtype B割れ深さと比較して小さい。既往の研究として、Maらの数値解析を用いた検討では、type B割れサイズの増加にともなって引張せん断強度の低下量は増大することが示されている¹⁷⁾。せん断および十字引張試験後の外観写真を図15に示す。強度低下が認められた継手では、いずれも人工欠陥に沿って破断が生じた。疲労試験結果を図16に示す。人工欠陥の有無によるL-N線図の大きな差異は認められなかった。すなわち、今回検討した人工欠陥と同等の割れ深さの範囲であれば、

type B割れによる疲労特性の低下はほとんど生じない可能性が高い。

2.3 内割れが静的強度および疲労強度へおよぼす影響

継手の断面写真を図17に示す。上下板のコロナボンド端部においてtype C割れが確認された（以下、type C割れ継手という）。割れ深さは0.25~0.79 mmであった。静的引張試験結果を図18に示す。今回検討した範囲では、内割れによる継手強度の低下はほとんど生じなかった。Type C割れ継手と無欠陥継手とともに、せん断引張試験では界面破断、十字引張試験ではプラグ破断ないし部分プラグ破断を呈した。なお、本試験では内割れ有無による継手強度や破断形態の変化は認められなかったが、1.2 GPa級鋼板を用いた検討ではtype C割れによりTSSが低下することを確認している¹⁸⁾。鋼板強度の違いにより割れの影響度が異なる理由については明確ではないが、ナゲット-HAZ-母材間における硬さ分布や割れ深

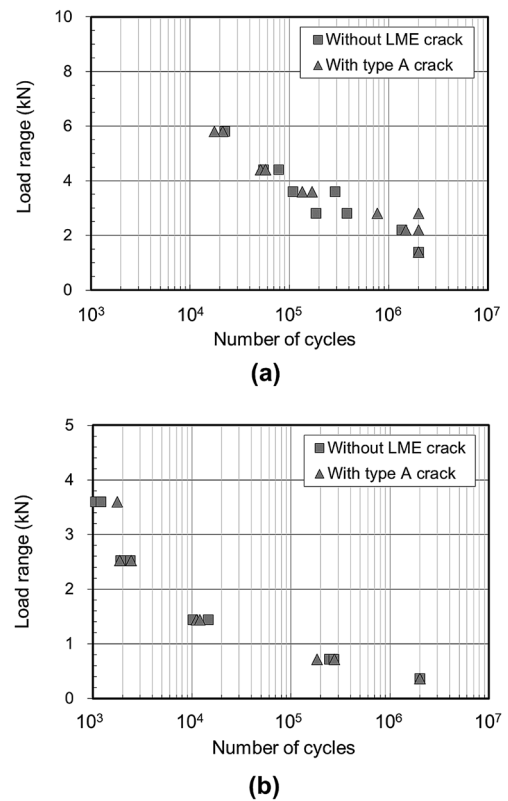


図12 引張疲労試験結果 (a) せん断, (b) 十字
Fig.12 Results of (a) TS, (b) CT fatigue tests

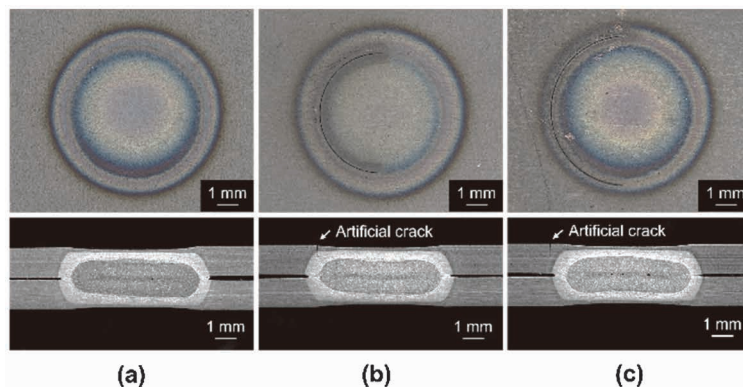


図13 (a) 無欠陥継手および (b) 圧痕内外周部, (c) 圧痕外側に人工欠陥を有する継手の外観および断面写真
Fig.13 Surface and cross-section images of welds (a) without crack, with artificial crack (b) on indentation periphery, (c) outside indentation

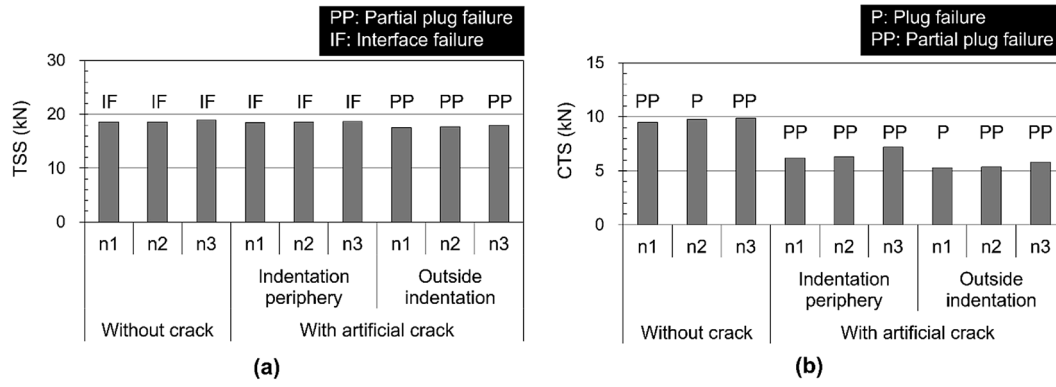


図14 静的引張試験結果 (a) せん断, (b) 十字
 Fig.14 Results of static (a) TS, (b) CT tests

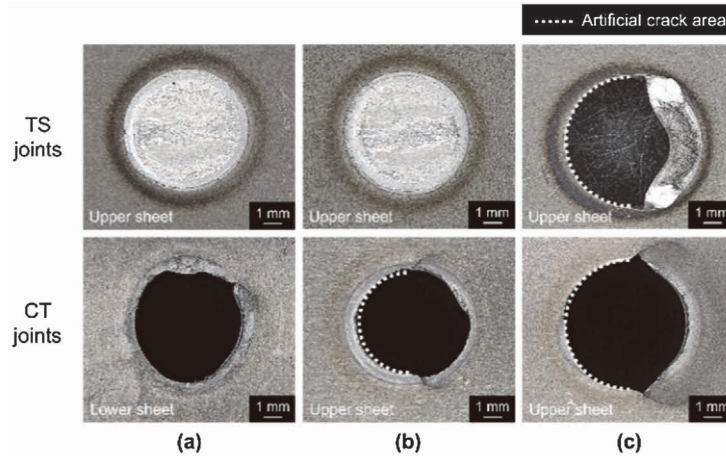


図15 (a) 無欠陥継手および (b) 圧痕内外周部, (c) 圧痕外側に人工欠陥を有する継手のせん断, 十字引張試験後の外観写真
 Fig.15 Surface view of fractured TS and CT specimens (a) without crack, with artificial crack (b) on indentation periphery, (c) outside indentation

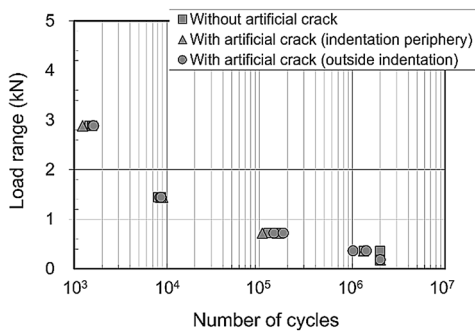
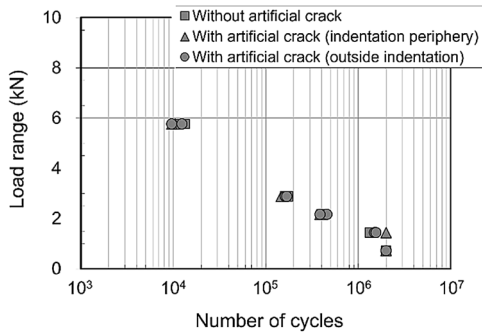


図16 引張疲労試験結果 (a) せん断, (b) 十字
 Fig.16 Results of (a) TS, (b) CT fatigue tests

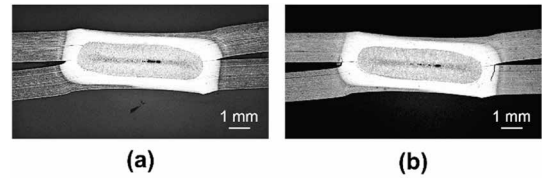


図17 継手の断面写真 (a) 無欠陥, (b) type C割れ
 Fig.17 Cross-section images of welds (a) without LME crack, (b) with type C crack

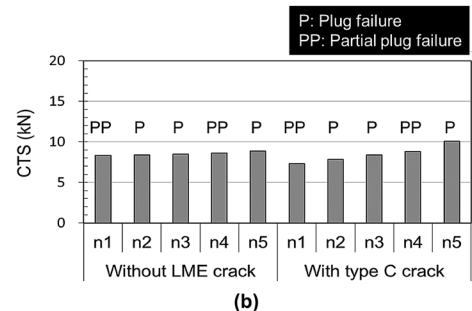
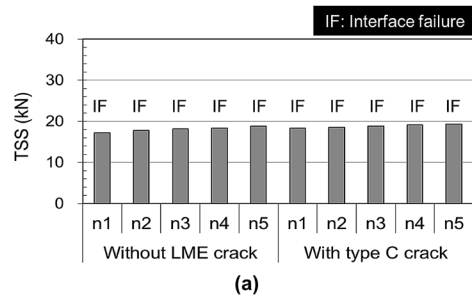


図18 静的引張試験結果 (a) せん断, (b) 十字
 Fig.18 Results of static (a) TS, (b) CT tests

さに応じてせん断引張試験時に負荷される応力の分布は変化すると考えられ、1.2 GPa級鋼板ではtype C割れへの応力集中がより顕著であったと推察している。図19に疲労試験結果を示す。十字引張疲労試験では、type C割れ継手と無欠陥継手のL-N線図に大きな差異は認められなかった。いっぽう、せん断引張疲労試験では、いずれの荷重条件下においても無欠陥継手よりtype C割れ継手で早期に破断が生じており、type C割れが疲労特性を低下させることが明らかとなった。図20に示すように、type C割れ継手ではナゲット周囲から母材に向かってき裂が進展しており、type C割れがき裂の起点となった可能性が示唆される。せん断引張疲労試験における初期き裂は、コロナボンド端部付近から生じることが報告されている¹⁹⁾。Type C割れは上記き裂とほぼ同位置に

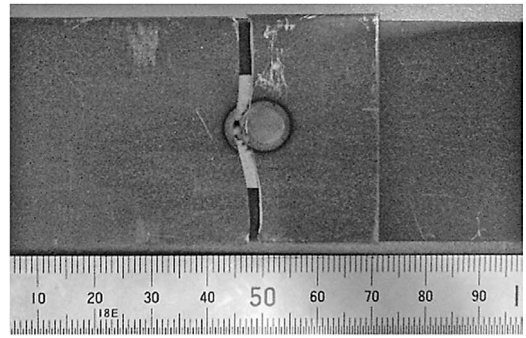


図20 Type C割れ継手の疲労試験後の外観写真
Fig.20 Surface view of fractured TS fatigue specimen with type C crack

発生することから、疲労特性の低下要因になり得ると考えられる。

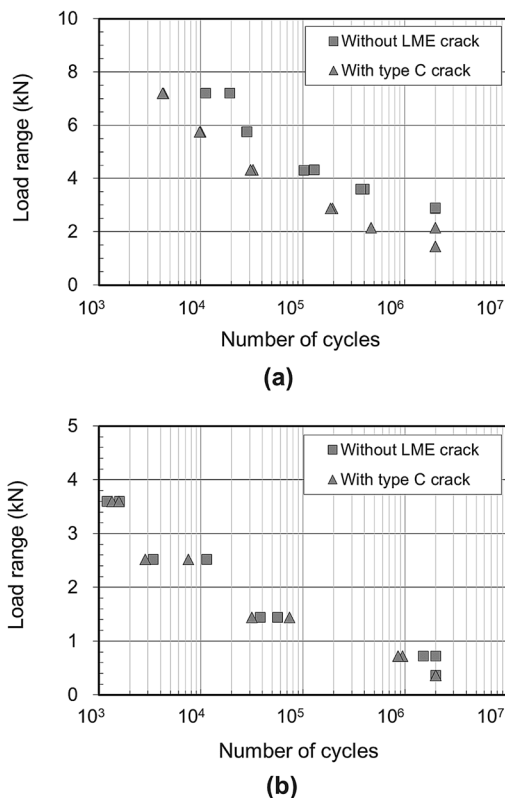
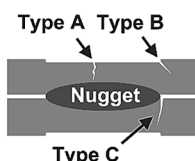


図19 引張疲労試験結果 (a) せん断, (b) 十字
Fig.19 Results of (a) TS, (b) CT fatigue tests

むすび = LME割れをtype A~Cに分類し、それぞれが継手強度へおよぼす影響について実験的に調査した。得られた結果の一覧を図21に示す。Type A割れについては、表裏面を貫通するものであっても継手強度にほとんど影響しないのに対し、type BおよびC割れについては、継手強度を低下させ得ることが明らかとなった。なお、本検討では引張試験と断面観察を別におこなったことから、継手強度と割れ深さの関係については十分な考察がなされていない。著者らは、引張試験サンプルに生じたLME割れをX線CTスキャンで事前に非破壊で観察することで、継手強度へおよぼす割れ深さの影響について定量化を試みている¹⁸⁾。また、先述の通り、鋼種や板組によってLME割れの悪影響度合いは変化する。膨大な鋼種や板組に対して本検討と同様の試験をおこなうことは非現実的であり、数値解析の利用が必要不可欠である。数値解析にも著者らはすでに着手しており、テストピースレベルでの割れの影響を予測できるモデルを構築している¹⁷⁾。さらに、実車部品レベルでのLME割れの影響についても調査を進めており、外割れや内割れを発生させたセンターピラー模擬サンプルで動的3点曲げ試験をおこなった。その結果、IIHS側面衝突相当を想定した入力では、LME割れが存在していても抵抗スポット溶接部の破断は発生せず、最大荷重や吸収エネルギー量

Crack type		Crack depth (mm)	Static strength		Fatigue strength	
			TS	CT	TS	CT
A	Weld crack	0.07~2.13	Influenced slightly	Influenced slightly	Influenced slightly	Influenced slightly
B	Weld crack	0.07~0.91	Weakened	Weakened	-	-
	Artificial crack	Approximately 0.60	Influenced slightly ¹⁾	Weakened	Influenced slightly	Influenced slightly
C	Weld crack	0.25~0.79	Influenced slightly ²⁾	Influenced slightly	Weakened	Influenced slightly



- 1) TSS might be weakened with a greater artificial crack.
- 2) The result of the experiment using 1 GPa steel.
Type C crack weakened TSS of spot welds of 1.2 GPa steel.

図21 実験のまとめ
Fig.21 Summary of experiments

など部品性能におよぼす影響は極めて小さいことを明らかにしている²⁰⁾。車体軽量化は恒久的なニーズであり、超ハイテンの適用は今後さらに拡大していくと予測される。LME割れを防止するためのスポット溶接プロセスが複数開発・提案されているが、同時にLME割れに対する品質保証手法の確立も必要になると考える。本稿で紹介した取組や知見がその一助になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 宮崎康信ほか. レーザ加工学会誌. 2019, Vol.26, No.1, p.13-23.
- 2) 樽井大志. 精密工学会誌. 2018, Vol.84, No.5, p.404-407.
- 3) 松田広志. 溶接学会誌. 2020, Vol.89, No.6, p.420-424.
- 4) 山崎一正ほか. 溶接学会論文集. 1999, Vol.17, No.4, p.553-560.
- 5) 及川初彦ほか. 新日鉄技報. 2006, No.385, p.36-41.
- 6) 池田倫正. 溶接学会誌. 2015, Vol.84, No.6, p.11-16.
- 7) A. G. Kalashami et al. J. Manuf. Process. 2020, Vol.57, p.370-379.
- 8) R. Sierlinger et al. White paper; voestalpine Stahl GmbH. 2016, p.1-16.
- 9) G. Jung et al. Met. Mater. Int. 2016, Vol.22, No.2, p.187-195.
- 10) 高島克利. 溶接学会誌. 2021, Vol.90, No.7, p.24-28.
- 11) C. Böhne et al. Sci. Technol. Weld. Join. 2020, Vol.25, No.7, p.617-624.
- 12) C. Böhne et al. Sci. Technol. Weld. Join. 2020, Vol.25, No.4, p.303-310.
- 13) E. Wintjes et al. J. manuf. sci. eng. 2019, Vol.141, No.10, Article 101001, 9p.
- 14) 前田恭兵ほか. 加圧力および溶接電流適正化による抵抗スポット溶接におけるLME割れ防止. 溶接学会全国大会講演概要. 一般社団法人溶接学会. 2020, p.130-131.
- 15) 下田陽一郎ほか. 亜鉛めっき超ハイテン鋼板の抵抗スポット溶接におけるLME割れ防止法開発～機械式打角制御シャンクの開発～. 溶接学会全国大会講演概要. 一般社団法人溶接学会. 2020, p.132-133.
- 16) O. Siar et al. Metals. 2020, Vol.10, No.9, Article 1166.
- 17) Y. Ma et al. Mater. Des. 2021, Vol.210, Article 110075, 21p.
- 18) 前田恭兵ほか. 溶接学会論文集. 2022, Vol.40, No.3, p.123-133.
- 19) 植松美彦ほか. 溶接学会論文集. 2019, Vol.37, No.4, p.152-161.
- 20) 水谷紀正ほか. ハット断面部品に発生した抵抗スポット溶接部LME割れが部品性能に及ぼす影響. 自動車技術会 秋季大会学術講演会講演予稿集. 一般社団法人溶接学会, 公益社団法人自動車技術会. 2021, Article 20216153.