

放射光X線ラミノグラフィーによるスポット溶接鋼板の非破壊観察 Nondestructive Observation of Spot-welded Steel by Synchrotron Radiation X-ray Laminography

吉住 歩樹, 小林 龍, 古迫 誠司
Ayuki Yoshizumi, Kamui Kobayashi, Seiji Furusako

日本製鉄(株)
Nippon Steel Corp.

40 mm × 125 mm × 板厚 1.6 mm の超高張力鋼板 2 枚をスポット溶接した鋼板に対して、X 線ラミノグラフィー測定を実施し、スポット溶接部近傍の断面像を再構成した。溶接部近傍にはき裂が発生しており、スポット溶接時の溶接条件によって、き裂の深さに違いがあることを非破壊で可視化することができた。本手法によって、スポット溶接時の条件が、スポット溶接部近傍に発生するき裂分布に与える影響を評価できる可能性が示唆された。

キーワード： 超高張力鋼板、めっき鋼板、割れ、X 線イメージング、ラミノグラフィー

背景と研究目的：

自動車業界では衝突安全性向上や低燃費化の観点から軽量化が進められており^{[1], [2]}、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。また、鋼板に高い防錆性を付与するために合金化溶融亜鉛めっきを施す必要がある。一方、超高強度亜鉛めっき鋼板をスポット溶接すると、めっき層の亜鉛が鋼板表層の結晶粒界に拡散侵入して粒界割れ（Liquid Metal Embrittlement、LME 割れ）が発生することが知られている^{[3]-[5]}。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ため、これらの因子のいずれかを取り除く必要がある。これまで LME 割れの種類や大きさが材料特性に及ぼす影響は調査されてきたが、その多くは試料の断面を 2 次元で観察したものであり、き裂の 3 次元的な形状や分布が材料特性に及ぼす影響について研究された例は少ない。

本研究は、2 枚の高強度鋼板をスポット溶接した鋼板に対して、X 線ラミノグラフィー測定を実施することで、スポット溶接部近傍に発生するき裂を非破壊で可視化する手法を開発するとともに、発生したき裂がスポット溶接鋼板の材料特性に及ぼす影響を調査することが目的である。最終的には、得られた知見をもとに、材料特性に影響を及ぼさないスポット溶接条件を客先に提案する、あるいは客先のスポット溶接条件下で、き裂の発生を抑える超高張力鋼板を開発する。

スポット溶接鋼板の内部に発生するき裂を非破壊分析するには、試料形状は板状のままで測定を行うことが望ましい。そこで本課題では、板状試料の非破壊分析に適した手法である X 線ラミノグラフィー法を用いて、き裂形状を可視化するための測定条件を検討することとした。

実験：

本実験の供試材は、板厚 1.6 mm の 980 MPa 級 GA 鋼板を用いた。本実験では、き裂の発生促進を狙った外乱要因として、図 1 に示すように、スポット溶接時に打角と、板隙を設けた。打角とは、鋼板表面の垂直方向に対して電極の軸心が傾く角度であり、板隙は 2 枚の鋼板の間にスペーサーを挟むことで、板の間に設けた隙間の大きさのことである。

X線放射光を用いたラミノグラフィー測定は、SPring-8/BL20B2において実施した。試料は表面(0°)に対して30°傾斜させ、最大強度が得られるX線エネルギーが110 keVとなる準単色光($\Delta E/E = 0.01$)のX線を照射して実験を行った。X線透過像1枚当たりの露光時間は70 msで、試料を360°回転させながら、3600枚の透過像を撮影した。この構成におけるX線カメラの実効的な画素サイズは4.6 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ で、視野は約 $\phi 18.8\text{ mm}$ であった。断面像の再構成はフィルター補正逆投影法(FBP: Filtered Back Projection)で行った。

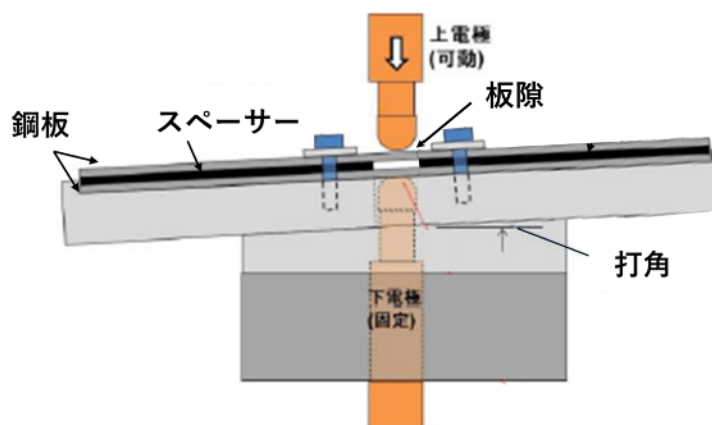


図1 スポット溶接の試験片設置方法

結果および考察：

スポット溶接によって接合された2枚の鋼板の接合界面の断面再構成像を図2に示す。図2(a)は打角が3°で板隙が1 mm、図2(b)は打角が4°、板隙が1 mmの条件でスポット溶接した試料である。

再構成画像のコントラストは主に密度による線吸収係数の違いを表しており、密度が高い(線吸収係数大きい)ほど明るいコントラストとなる。そのため、金属(灰)、空隙/き裂(黒)が判別できる。図2より、スポット溶接部の周辺に沿ってき裂が発生している様子が確認された。また、発生したき裂の範囲をスポット溶接中心部から見た角度で示した結果を表1に示す。表1より、スポット溶接時の打角が大きくなると、き裂発生範囲も広がることが分かった。

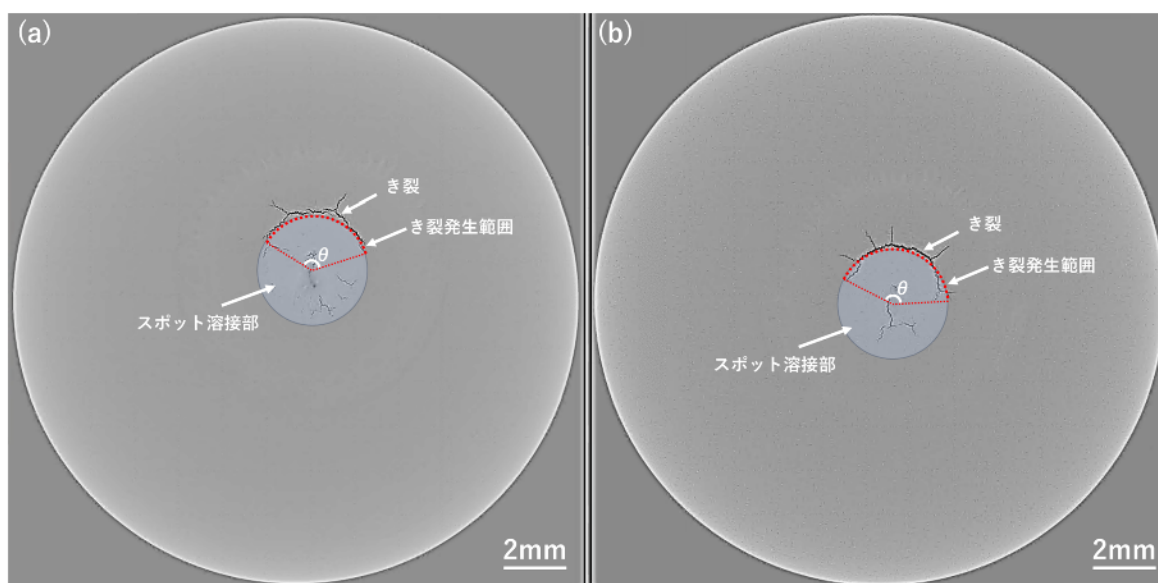


図2 接合界面の断面再構成像

表 1 き裂の発生範囲

打角	3°	4°
き裂発生範囲	144°	160°

今後の課題：

本課題においては、打角だけでなく、板隙の有無も含めた外乱条件の異なる試料を測定している。今後は、外乱条件の違いがき裂形状に及ぼす影響について解析を進める。また、き裂の3次元的な形状についても解析を進めて、鋼板の特性との関係を調査する予定である。

参考文献：

- [1] 宮崎康信、他、レーザ加工学会誌, **26**, 1 (2019).
- [2] 樽井大志、精密工学会誌, **84**, 5 (2018).
- [3] 高島克利、他、溶接学会全国大会講演概要, **100**, p16 (2017).
- [4] 澤西央海、他、溶接学会全国大会講演概要, **100**, p18 (2017).
- [5] 谷口公一、他、溶接学会全国大会講演概要, **100**, p20 (2017).