

ラジャマンガラ大学（タイ） 研修報告書

鋼の凝固割れ感受性評価技術開発

先進理工系科学研究科 機械工学プログラム 楊 少偉

1. はじめに

2023年7月24日から同年8月25日の間、タイのラジャマンガラ大学において、共同研究を行った結果について報告する。

2. 研修/共同研究課題の決定

私が所属する材料接合工学研究室では、複数の海外の大学と研究のつながりがあります。その中でも、ラジャマンガラ大学では数年前に広島大学卒業生が溶接中の凝固割れ領域に用いられる先端方法の研究が行われています。この共同研究は、凝固割れ感受性評価で技ワールドフロントアプローチを知り、所属する研究員と意見交換を行えるなど海外研究を知るうえで貴重なチャンスであると考えておりました。

3. 研修/共同研究スケジュール

7月24日 出国

7月25日~8月24日 研究

8月25日 帰国

4. 研修先/共同研究派遣先の概要

溶接中の鋼の凝固割れの問題に対する研究は工業にとって非常に重要な価値があります。鋼の凝固割れ感受性評価方法の開発を解明するという研究の一部として、可視化技術による凝固割れ形成過程観察、割れ形成プロセス及びひずみ解析を行うことを目的とする凝固割れ感受性評価装置が開発され、信頼性試験が行われます。本研究では、新型可変拘束緩和式凝固割れ感受性評価装置が開発され、信頼性試験が行われていました。310s ステンレス鋼を試料材料としてレーザー溶接過程の凝固割れ試験を行い、凝固割れを効果的に再現し、この過程を高速カメラでリアルタイム観測しました。そして、光学顕微鏡、高速度カメラを組み合わせた割れ発生現象、溶融池後端部の凝固現象の高倍率その場観察での直接観察を検討しています。(Fig. 1, 2)

同時に、凝固割れの評価過程は凝固過程における溶融池の末端の局所領域ひずみを得るだけでなく、その凝固温度区間範囲に対して正確な測定を行う必要がある。上記の取り組みと並行し、材料の割れ感受性を評価するトランスバレストレイン試験、ラジャマンガラ大学で S50C 鋼を試料材料として TIG 溶接過程の凝固割れシステムの開発してその凝固割れ実験を行っている。

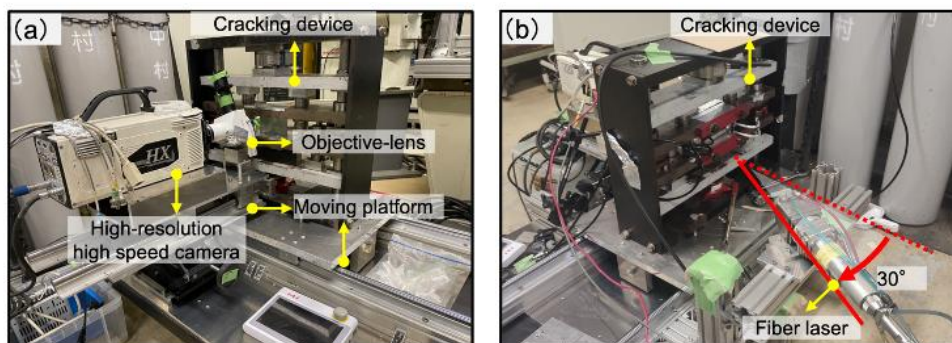


Fig.1 The newly developed system for the evaluation of solidification cracking

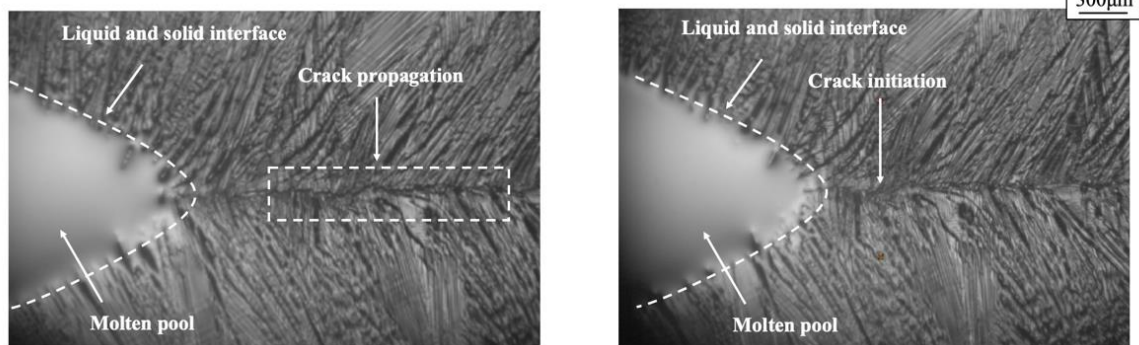


Fig.2 Images of Cracking process by high magnification in-situ observation

5. 研修/共同研究の内容

5.1 研究概要

本研究では TIG 溶接過程の凝固割れ試験を行い、Trans-Varestraint 試験法で凝固割れを効果的に再現し、この過程を高速カメラでリアルタイム観測する。図 3.1 に Trans-Varestraint 試験の模式図を示す。溶融池の端が試料の中心に移動すると、増加したひずみが曲げによって試料に加えられ、凝固割れの発生を引き起こす。この過程で、試料に急速に印加されるひずみは、試料の厚さ及び曲げブロック半径に関する： $t/2(R+t)$ 。式中、 t は試料の厚さ、 R は曲げブロックの半径です。Trans-Varestraint 試験では、異なる表面半径を有する湾曲ブロックを変化させることにより、異なる補強ひずみを加えることができる。

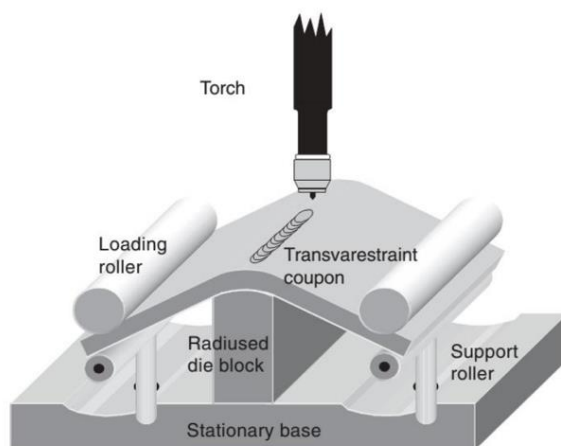


Fig.3 Schematic illustration of Trans-Varestraint test method

5.2 本研究目的

本研究の目的は、溶接中の凝固割れを評価するための横向可変拘束実験方法を利用して凝固割れ評価システムを開発することです。S50C 鋼を試料材料として TIG 溶接過程の凝固割れ試験を行い、凝固割れを効果的に再現し、この過程を高速カメラでリアルタイム観測します。

5.3 実験条件

S50C 鋼を用いて、その場観察法を用いて TIG 溶接過程における Trans-Varestraint 試験を行った。表 1 は 200 l×75 w×6 t mm のサイズを選択された材料の化学成分を示す。TIG 溶接プロセスにおける高温割れ感受性を評価するために、図 4 に Trans-Varestraint 試験機の特徴を示す。試料を曲げブロックに固定し、溶接方向の中心線に沿って試料の先端と後端を締め付ける。試験中、溶融池の後縁が試料の中心に移動すると、曲げ歪が 2 つのバンドアームを熱源として下に移動して停止することにより試料に印加され、割れの発生を引き起こす。

Table.1 Chemical compositions of used stainless steels (wt %)

Composition (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Fe
0.5	0.216	0.673	0.020	0.016	0.04	0.102	0.075	0.012	0.002	Bal.

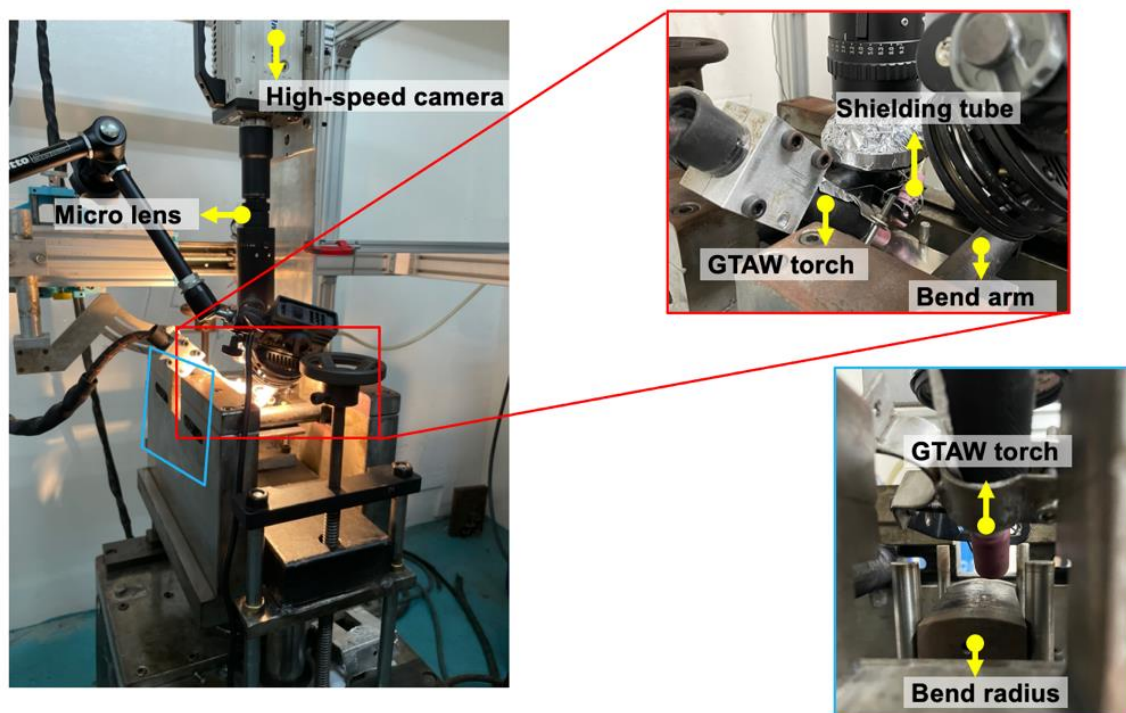


Fig.4 Experimental appearance

表 3.3 に溶接条件を示す。主なパラメータは溶接速度 1.7 mm/s、アーク電流 100 A、アーク電圧 22 V、アーク長 2.0 mm、電極延長長 10.0 mm、Ar 保護ガス流量 15 L/min。この溶接条件下では、完全な溶接ビード成形を得ることができる。この過程を高速カメラでリアルタイム観測します。表 3.3 に高速撮影観測条件を示す。高速度カメラ (Memrecam HX-7 型、nac 製) は試料中心に垂直に設置され、Trans-Varestraint 過程で凝固割れが発生した後の溶融池の形状を捕捉するために使用される。同時に、可視画像を得るために Metal-halide 照明を用い、マクロレンズ、960 nm バンドパスフィルタ、および保護レンズは、溶接期間中の Trans-Varestraint 試験中に明瞭で高拡大率の画像を得るためにも使用される。主なパラメータはシャッタースピード 5k、フレームレート 500 fps。

Table.2 Experimental conditions

Welding Current (A)	100 (DCEN)	Camera	High-speed camera (HX-7)
Arc Voltage (V)	22	Lighting	Metal-halide
Welding speed (mm/s)	1.7	Lens	Micro-lens
Arc length (mm)	2	Shutter speed, sec	5k
Electrode diameter (mm)	2.4	Resolution	1280 × 960
Electrode extension length (mm)	10	Aperture grade	1
Shielding gas (Ar), (L/min)	15	Optical filter	Filter (960nm)
Ceramic cup (Number)	7	Frame rate, fps	500
Flow gas (L/min)	15	Camera to specimen, mm	85mm

5.4 実験結果

図5は、補強歪が4.8%の場合、溶接速度が1.7 mm/sのTIGプロセスにおけるTrans-Varestraint試験プロセス中の溶融池の可視画像を示す。可視画像画像からは、図5右側の図に示すように、溶融池後部周囲の凝固割れ分布が観察された。しかし、これらの画像だけでははっきり見える凝固割れを得ることはできないようだ。これは、より明瞭なレーザー照明ではなく metal 照明を使用しているためです。しかし、それでも高速撮影過程で試験後に再溶融池の尾部に長さは異なるが明らかな割れが発生したことを観測することができる。前述したように、白線は溶融境界を表し、黄色線領域内の凝固割れ発生領域を表す。図3.7は異なる補強歪を印加した場合、溶接速度1.7mm/sのTIG過程において、Trans-Varestraint試験後の溶融池及び溶融池後端割れ形成のSEM画像を示す。Trans-Varestraint試験の場合、凝固割れは曲げ中にピークに達する前に発生する。したがって、増加したひずみはピークと考えられる。溶接方向に垂直な増加ひずみは曲げによって直接的に強く寄与し、この値は曲げブロック半径の減少に伴って増加する。

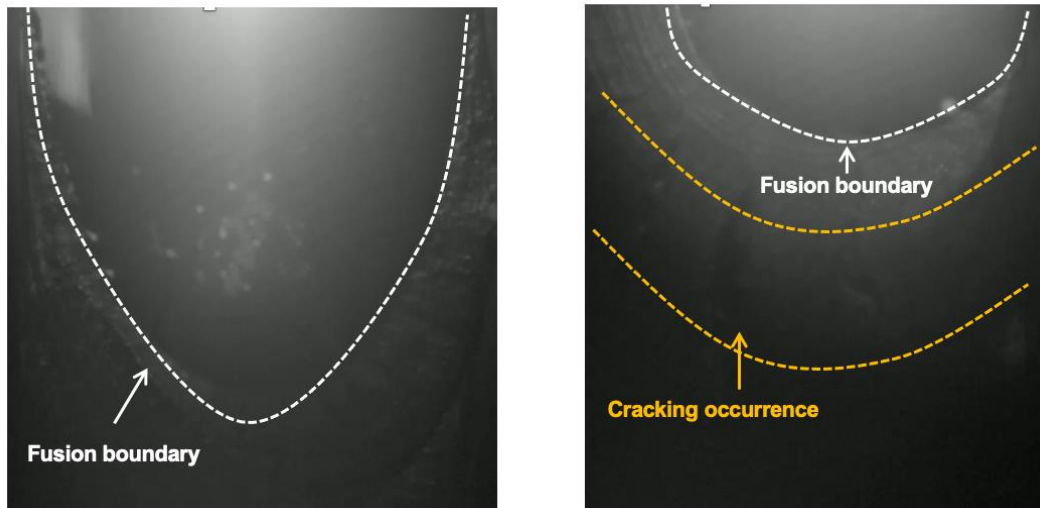


Fig.5 In-situ observation images before and after Trans-Varestraint test at welding speed of 1.7 mm/s under augmented strain of 4.8 %

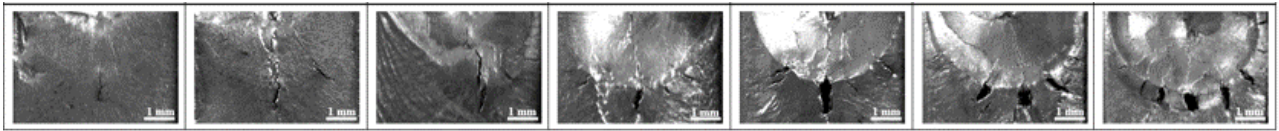


Fig.6 SEM images of the solidification cracking after Trans-Varestraint test at welding speed of 1.7 mm/s under various augmented strain from 0.7% to 4.8%

図7は異なる強化歪の下で、溶接速度が1.7mm/sのTIG過程において、S50C鋼の延性曲線の傾向を示す。ここで、温度は溶接中の溶融池の尾部に熱電対を挿入することによって測定される。ある特定のひずみ条件下の温度区間は、溶接ビード中心における最大クラック長を測定することによって推定される。延性曲線の傾向は、異なる拡大歪の下で各最高温度範囲の描画値と交差する線を描画することによって得ることができる。しかし、クラックのない試料は発見されなかったため、破線で示すように、凝固クラックを引き起こすだけの臨界増強歪は明らかではなかった。

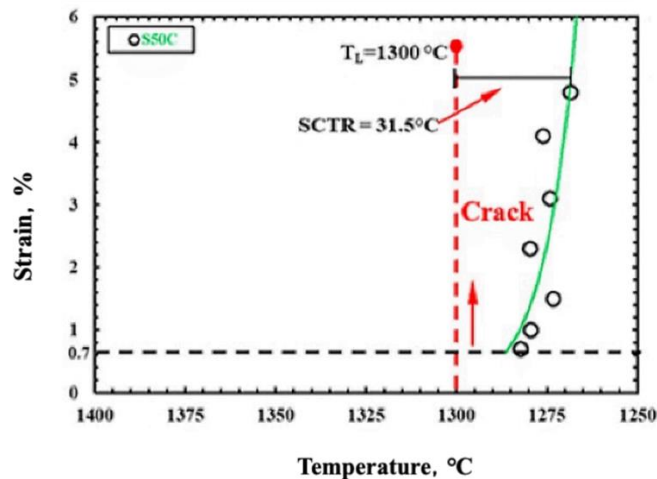


Fig.7 Solidification Cracking Temperature Range (SCTR) at welding speed of 1.7 mm/s after Trans-Varestraint test

6. まとめ

本研究では、鋼凝固割れ発生評価を目指し、S50C鋼を試料材料としてTIG溶接過程の凝固割れシステムの開発を行なった。開発した評価システムを用い、S50C鋼の凝固割れとSCTR取得した結果について報告しました。

7. 謝辞

スワンナプーム国際空港に到着すると、Somchai教授が出迎えて住所まで送ってくれた。空港から住所まで1時間以上かかりますので、教授には大変お世話になりました。バンコクで生活を学んだ1ヶ月、Rittichai教授の研究過程の指導に本当ありがとうございました。また、研究室のみなさんは私の世話をしてくれました。私はタイ語が話せないのに、彼らは生活の中のいろいろなことに世話をしてくれましたことに本当ありがとうございました。