
ウォータルー大学（カナダ）研修報告書

DICシステムを用いた高温ひずみの計測

工学研究科 材料物理工学専攻 草本悠貴

1. はじめに

2019年8月6日から8月30日までカナダのウォータルー大学で共同研究した結果について報告する。

2. 共同研究課題の決定

私の所属する材料接合工学研究室では、溶接中の高温ひずみを取得する方法として直接観察法を用いたU型高温割れ試験と呼ばれる方法を採用している。これは溶接中の試験片にひずみをかけて凝固割れを発生させ、それを高速度カメラによって撮影することで溶接金属の高温域での限界ひずみを知るといったものである。しかし現状ではそのひずみの計測方法に課題がある。本研究室ではひずみ計測用にソフトウェアを用いているが、その精度は高いものではなく、人間の目によって標点を設定するため再現性も低い。一方、カナダのウォータルー大学のAdrian Gerlich教授の研究室ではDIC（デジタル画像相関法）とよばれる分析機器を用いたひずみ計測を行うことが可能となる。そのため従来のひずみ計測の精度向上を目指して、共同研究を行うこととした。

3. 共同研究スケジュール

8月6日 出国

8月6日～8月29日 研究

8月30日 帰国

4. 共同研究派遣先の概要

大学名：ウォータルー大学

所在地：カナダ オンタリオ州

指導教員：Prof. Adrian Gerlich

5. 共同研究内容

5.1 研究背景

近年、火力発電によるエネルギー供給量が8割を超える状況となっている。それにともなって火力発電によるCO₂排出量が問題となる。そこで日本では火力発電開発において、タービン蒸気温度を700℃まで高温化することによりCO₂排出量を低減した発電プラントの設計を行うことが検討されている（先進超超臨界圧火力発電）。この計画はタービンの入口蒸気温度を高温化することで熱効率を高め、比較的少量の燃料によってエネルギーを生み出すことによって、結果的にCO₂排出量を低減することができるというものである。

このプラント開発を進めていくにあたり、高温下で強度・耐酸化性ともに良好な材料が必要となる。そこでNi基合金が注目されている。大型構造物では各部の接合方法において溶接が広く使われており、このNi基合金を用いるにあたっては、溶接構造物において重大な欠陥となりうる割れを防ぐことが大きな課題となる。本研究室では、溶接金属の割れ感受性を知ることができる高温延性曲線の取得のために、直接観察法を用いたU型高温割れ試験を行う。

5.2 直接観察法を用いた U 型高温割れ試験

拘束緩和式 U 型高温割れ試験で用いた，試験片形状を Fig. 5.2.1 に，試験方法を Fig. 5.2.2 に示す．

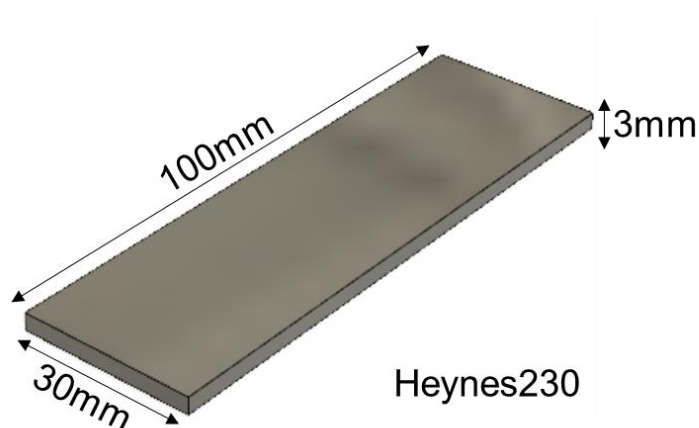


Fig. 5.2.1 Specimen for U-type hot cracking test.

拘束緩和式 U 型高温割れ試験とは，材料の高温延性曲線の一部をもとめることで割れ性を測る試験である．試験方法を Fig. 5.2.2 (a) に，計測方法を Fig. 5.2.2 (b) に示す．まず，油圧ジャッキで U 型割れ試験治具をたわませた状態で試験片を取り付け，その後油圧ジャッキを取り除くことで試験片長手方向に荷重をかける．その後溶接を行い，光速度カメラとズームアップレンズによって同時に可視化も行う．

可視化動画より，ひずみ計測ソフトを用いて計測を行う．ひずみの計測方法を Fig. 2 に示す．まず可視化動画から割れ位置を決定し．このフレーム ($t = t_c$) での割れ位置がプール後端に来るところまで戻す．戻したフレーム ($t = t_0$) において，プールを中心として左右に基点を見つける．この時，基点間の距離 (L_0) はすべての計測動画において統一しておく．その後基点間の距離 (L_0) を基準として，割れ位置までのひずみを計測する．ひずみの計測式を式 (1) に示す．尚，ひずみ計測には専用のひずみ計測ソフトである Dipp-motion (DITECT 社) を用いて行う．

$$\varepsilon = \frac{L_x - L_0}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

(ε : ひずみ, L_0 : 初期基点間距離, L_x : 各フレームでの基点間距離)

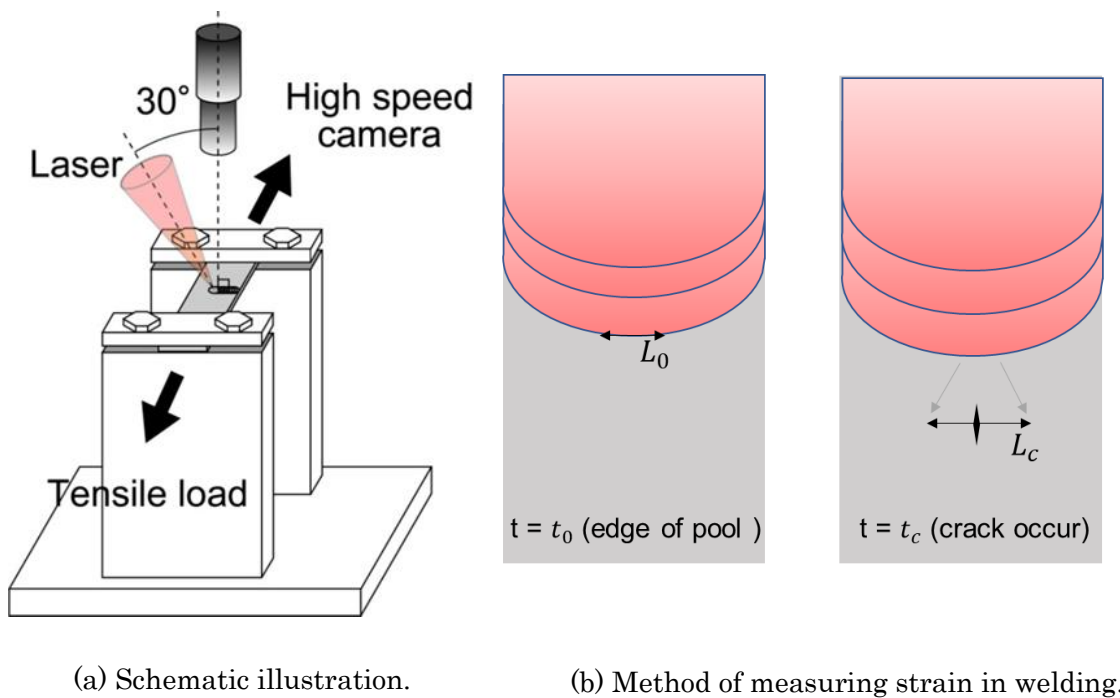


Fig. 5.2.2 Method of U-type hot cracking test.

5. 3DIC システム (ウォータルー大学)

ウォータルー大学の DIC システムは、3つのソフトウェアで構成されている。まず、引張試験機の設定や、引張強さの計測を行う “Navigator” というソフト。次に、2つのカメラでの撮影を行う “Vic snap” である。この DIC システムは3次元でターゲットの位置を計測するため、このソフトで一定のタイミングで2台同時に別方向から撮影を行う。最後に “Vic snap” で撮影した画像をもとにひずみ計測を行う “Vic 3D” と呼ばれるソフトである。このシステムでは、試験片表面のスペクルパターンをカメラで認識してひずみを測定するため、試験片表面に特殊な塗装を要する。まず、試験片表面を真っ白に塗装する。その後遠くから黒の塗料を大きく振るように、薄く塗料のドットを吹き付ける。これらの塗料は特別なものではなく、市販の塗料でよい。

このシステムでは、撮影場所が変わるごとに計測位置の校正が必要となる。Fig. 5.3.1 に示すように、キャリブレーションモデルを用いて “Vic 3D” で校正を行う。キャリブレーションモデルには 10×14 の小さな穴が開いており、さらに小さなポイントが2つ開いている。これらの位置をソフトが読み取り、ターゲットポイントがイメージ内で検出された位置と、数学的キャリブレーションモデルがポイントを配置する理論上の位置との平均誤差（ピクセル単位）を算出する。この誤差が低くなるようなキャリブレーション画像をツインカメラを用いて 30～40 枚撮る。これによってソフトは計測に用いる原点と、計測位置を認識することが可能となる。

Take the photo for
calibration 30 ~40
times

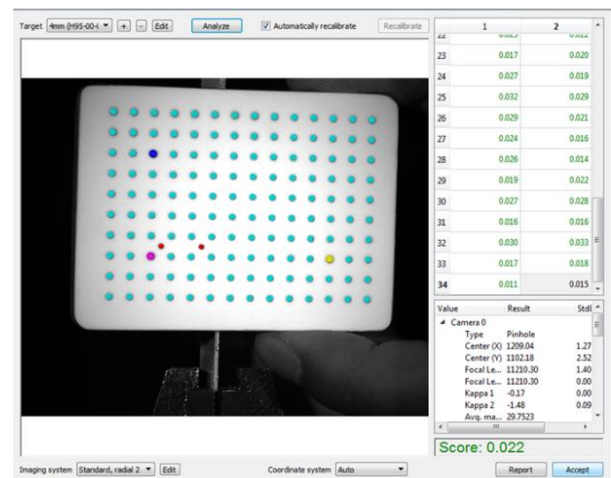
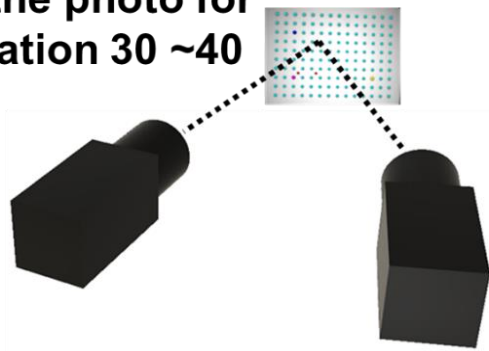


Fig.5.3.1 Calibration.

5.4 実験方法

本共同研究の目的である可視化動画からの高温ひずみの取得は、すでに撮影した動画から計測を行うため、DIC システムの中でも” VIC 3D “のみを用いた。そこで、DIC システム全体を理解するために、同研究室の高野の研究よりフレア継手を借りて引張試験を行い、その様子を撮影することで継手が破断に至るまでのひずみ分布の取得を行った。

5.4.1 フレア継手

フレア継手の引張試験の外観を Fig. 5.4.1 に、実験条件を Table 5.4.1 に示す。クロスヘッド速度は 5mm/min、保持長さを 40mm として引張試験を行った。2つの高速度カメラを用いて、LED 照明で試験片表面を照らし、フレームレートを 15fps として撮影を行った。



Table 5.4.1 Experimental conditions.

Tensile set speed, mm/min	5
Length of grabbing, mm	40
Camera	High-speed twin camera
Frame rate, fps	15
Lighting	Two LED lights

Fig. 5.4.1 Experimental appearance of tensile test

5.4.2 直接観察法を用いた拘束緩和式U型高温割れ試験

広島大学で撮影した拘束緩和式高温割れ試験の溶接条件を Table 5.4.2(a) に、撮影条件を Table 5.4.2(b) に示す。熱源にはファイバーレーザーを用いて、レーザー出力 1.95kW、溶接速度 0.1m/min、焦点はずし距離を 50mm として溶接を行った。撮影には高速度カメラである HX-3 (NACK) を用いて、シャッター速度が 1/2000sec、フレームレートが 500fps、倍率を 3.2 倍として撮影を行った。

また、この実験から取得した DIC システムによるひずみ計測に用いた動画の一部を Fig. 5.4.2 に示す。黄色い楕円で示した部分が割れ発生部である。

Table 5.4.2 Experimental conditions.

(a) Welding conditions

Laser type	Fiber Laser
Laser power, kW	1.95
Defocus length, mm	50
Laser irradiation angle, deg	30
Welding speed, m/min	0.1
Shielding gas (Ar), l/min	Top : 50
	Back : 20
Applied load, kN	7.6, 16.9, 18.0

(b) Shooting conditions

Camera	HX-3
Lightning	Metal-halide lamp + CAVILUX
Lens	Zoom-up lens (Leica)
Shutter speed, sec	1/2000
Resolution	2560 × 1780
Aperture value	3
Magnification	× 3.2
Optical filter	Short-pass filter (840nm)
Frame rate, fps	500
Distance from Laser spot to shooting range, mm	0.55

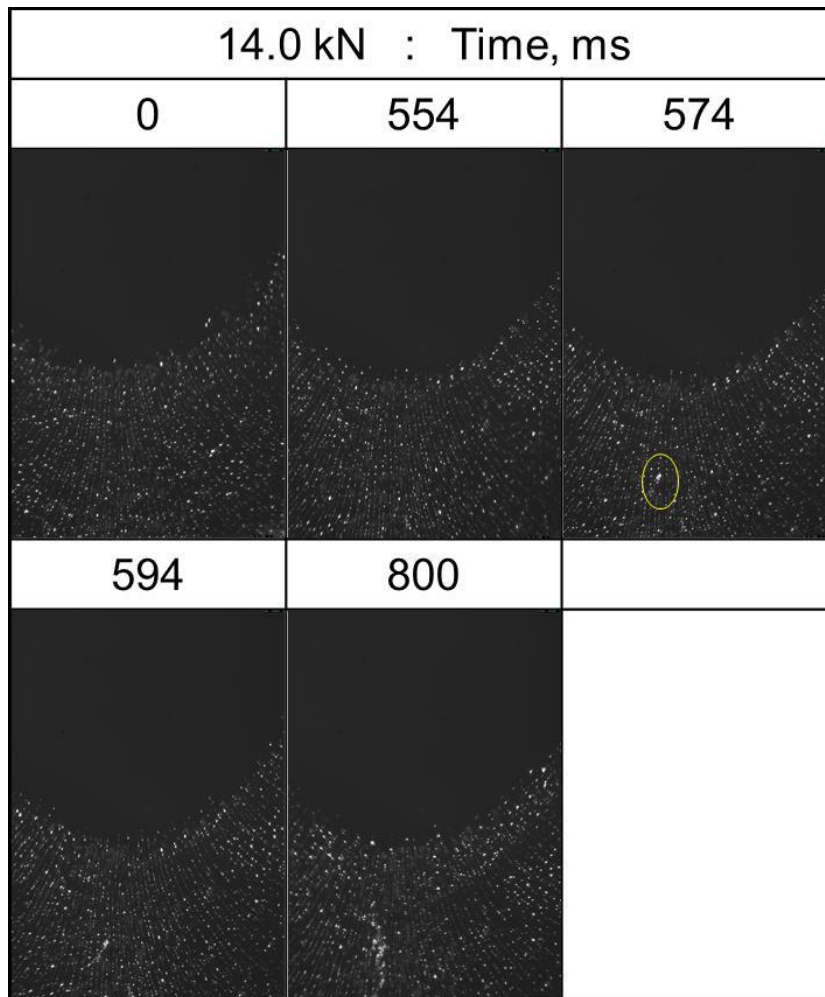
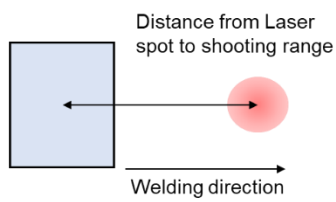


Fig. 5.4.2 Visualization video of U-type test

5.5 実験結果・考察

5.5.1 フレア継手

フレア継手のひずみ計測データの一部を Fig. 5.5.1 に示す。図中に緑で示す範囲がひずみ計測可能範囲である。これにより、フレア継手の破壊に至るまでのひずみを計測できていることがわかる。

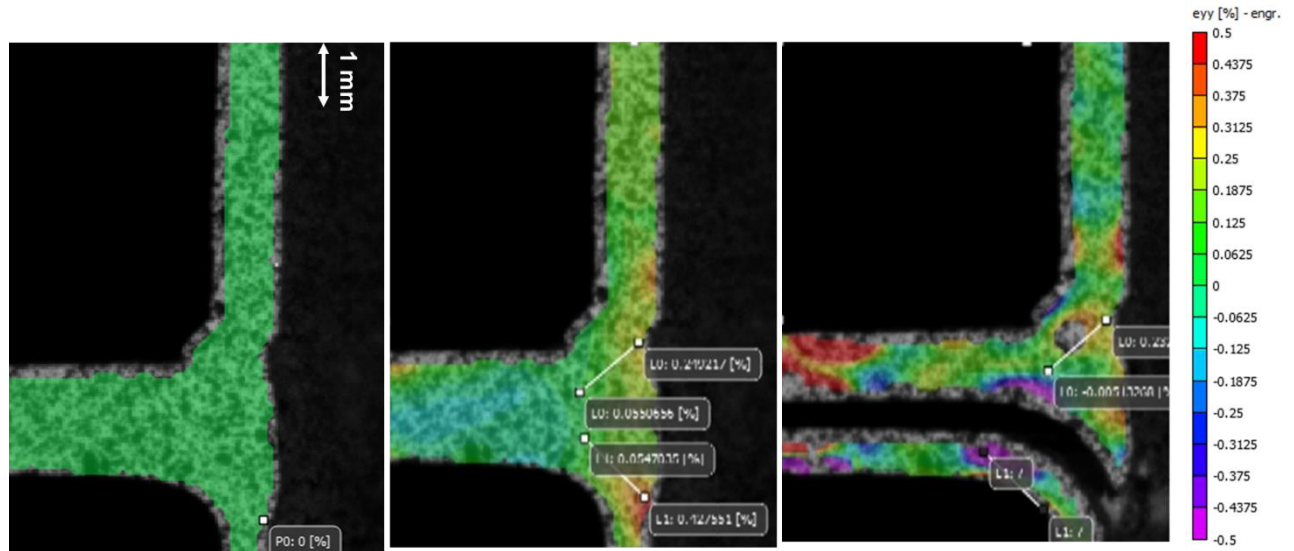


Fig. 5.5.1 Strain measurement of flare joint

5.5.2 直接観察法を用いた拘束緩和式U型高温割れ試験

直接観察法を用いた拘束緩和式U型高温割れ試験のひずみ計測結果を Fig. 5.5.2 に示す。フレア継手の結果と同様に、ひずみの計測を行うことができたが、割れ発生の瞬間のひずみの取得は行うことができなかった。これは、実験で撮影した動画の熱の揺らぎによるものと考えられる。フレア継手では常温の環境で、熱による外乱の影響が入らない状況での撮影を行った。それに対して直接観察法を用いた拘束緩和式U型高温割れ試験での撮影では、溶接中の撮影のため熱によって可視化動画に揺らぎが発生していた。そのため、ソフトが認識できる計測可能範囲が狭くなってしまったと考えられる。

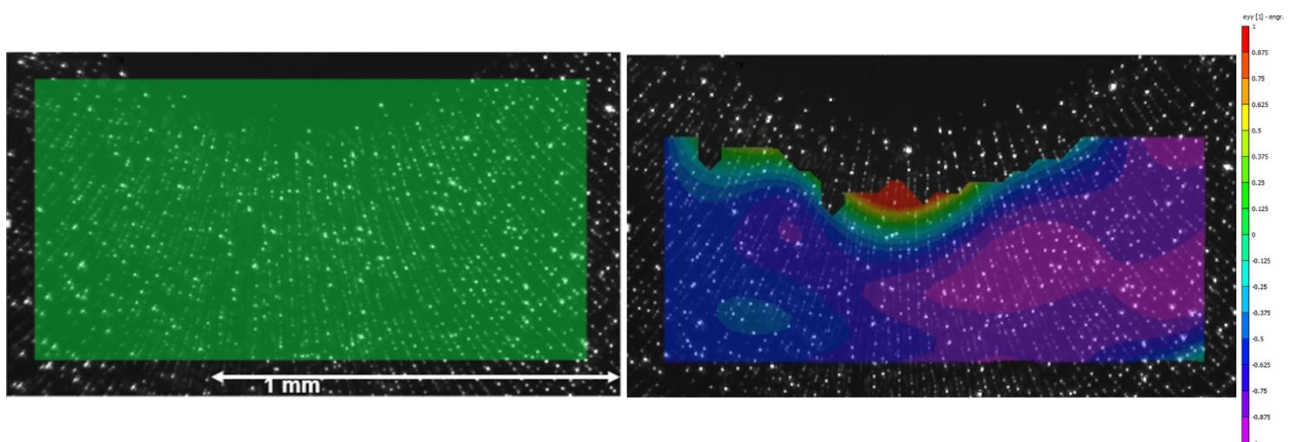


Fig. 5.5.2 Strain measurement of U-type test

6. まとめ

ウォータールー大学の DIC システムを用いて、直接観察法を用いた拘束緩和式 U 型高温割れ試験で撮影した動画をもとに高温ひずみの計測を試みたが、熱による動画の揺らぎから計測は困難であった。今後広島大学で熱の揺らぎを抑えた動画の撮影を検討した後、従来の計測方法とウォータールー大学での DIC システム双方での再計測が必要と考える。

7. 謝辞

本研究において熱心なご指導を頂きました Adrian Gerlich 准教授、研究面のみならず、現地での生活を助けていただいた CAMJ 研究室の学生の方々に厚くお礼申し上げます。また、このような機会を与えてくださった広島大学材料接合工学研究室の山本元道教授に厚くお礼申し上げます。最後に、海外共同研究プログラムをサポートしていただきました実行委員会の諸先生方をはじめとする工学研究科学生支援グループ国際事業担当の皆様に厚くお礼申し上げます。
