
ウォータールー大学(カナダ) 研修報告書

溶接継手破壊現象の高精度評価

工学研究科 機械物理工学専攻 増野 友大

1. はじめに

2017年8月7日から9月7日まで、カナダのウォータールー大学において、共同研究を行った結果について報告する。

2. 共同研究課題の決定

私の現在所属する研究室では、最先端の溶接研究を行っている。その中で私は、ホットワイヤ・レーザ溶接法という、従来の溶接法には成しえなかった高品質・高能率な溶接継手を作製するための技術開発を進めている。カナダのウォータールー大学では、CAMJ という先進的な溶接技術開発を行うための研究施設を有している。また、同大学の担当教授である Adrian 教授の研究室では、DIC (デジタル画像相関法) という分析機器を保有しており、継手の性能評価を高精度に行うことが可能である。そこで、日本でホットワイヤ・レーザ溶接法により、作製された継手の強度評価に関する共同研究を行う。

3. 共同研究スケジュール

8月7日 出国
8月7日～9月6日 研究, プレゼンテーション
9月7日 帰国

4. 共同研究派遣先の概要

大学名: ウォータールー大学
所在地: カナダ オンタリオ州 キャッチーナ
指導教員: Prof. Adrian Gerlich

5. 共同研究内容

5.1 研究背景

船舶、橋梁、高層ビルなどの大型構造物には高強度材を含む一般構造用圧延鋼材や、溶接構造用圧延鋼材が広く用いられている。近年では構造物の軽量化が行われるとともに、機能性向上、信頼性の獲得、省資源・省エネルギーなどが求められており、さらなる高強度化が必要になっている。また、大型構造物のほとんどは溶接構造であることから、高強度のみならず、信頼性の高い溶接性も同時に要求される。

高張力鋼は、炭素を始め種々の元素を適切に含有させ、必要に応じて熱処理を施して結晶粒を微細化するなどして、強度を高めた構造用鋼である。しかし、高張力鋼を溶接構造部材へ適用する際に、一般的に用いられているアーク溶接等を施すと、溶接に伴う入熱によって、溶接熱影響部 (HAZ) において、組織の粗粒化や軟化が生じる場合があり、その結果として、溶接部の靱性低下や静的強度 (降伏強度・引張強度) が母材を下回る可能性が生じる。

本研究では、低入熱施工を実現できるレーザ熱源の特徴を維持したまま、レーザ溶接やレーザ・アークハイブリッド溶接に比べて施工裕度が大きく、高張力鋼溶接継手の静的強度と靱性の両方を高いレベルでバランスさせることのできるホットワイヤ・レーザ溶接プロセスの開発を行っている。そこで継手強度評価を行うために、デジタル画像相関法という、非接触型の強度評価

装置を用い、本溶接法で作製された継手の高精度評価を行うことを目的とする。

5.2 ホットワイヤ・レーザ溶接法

ホットワイヤ・レーザ溶接法とは、主溶接熱源とは異なるホットワイヤ電源を用いて、添加ワイヤをジュール発熱によって融点直下まで通電加熱するホットワイヤシステムと、半導体レーザによるレーザ溶接を組み合わせた溶接法である。ホットワイヤシステムでは、母材溶融と添加ワイヤの溶融を独立して制御することが可能なため、溶接入熱が非常に少なく、母材側の希釈も低減でき、かつ高能率の溶接を行うことができる。また、板厚方向にほぼ均一な開先形状を採用することができ、適用するワイヤの選択自由度が高いため、低入熱化による熱影響部特性の向上に加えて、溶接金属の特性制御、溶接金属部幅（開先幅）制御も可能になり、高張力鋼溶接継手部の総合的な継手特性を制御可能になると考えている。

5.3 デジタル画像相関法

デジタル画像相関法（Digital Image Correlation）は、物体表面に描かれた変形前後のランダムパターン画像を比較し、物体表面の移動量（変位）を調べる手法である。デジタル相関法、デジタル画像相関法、デジタル像相関法、DICとも呼ばれる。1台のカメラを用いた場合には平面物体の面内変位を測定することができる。複雑な光学系を必要としないために測定が簡単であり、水中の物体の測定、高温での測定、顕微鏡と組み合わせた微小物体の変位測定、動的破壊挙動の観察、き裂開口変位（COD）の測定、応力拡大係数の測定、大型実構造物の変位測定など広く用いられている。一方、複数のカメラを用いることで、ステレオ法の原理により三次元表面の変位およびひずみを測定可能である[19]。また、X線トモグラフィ等と組み合わせた三次元物体内部の変位計測法も開発されている。

二次元画像相関法では、測定対象物体表面を撮影した画像から変位を直接検出する。Fig. 5.1に示すような測定装置を用い、変形前後の測定対象表面の画像を撮影する。これらの変形前後の画像を比較し、変形前の物体表面の点が変形後に移動した場所を探し出すことで変位を求める。その方法として、サブセットと呼ばれる複数の画素からなる計算領域（例えば20×20画素の領域）の変形後の位置を輝度値分布（光強度分布）の相関などを用いて求める。これは、物体表面の模様は物体表面と共に移動し、変形の前でその特徴が保存されるという考えに基づいている。Fig. 5.2は変形前後の画像の一部である。変形前の画像におけるサブセットの変位は、そのサブセットと同じ輝度値分布を有する領域を変形後の画像内で探し出すことによって決定する。したがって、測定対象表面は特徴的な模様を有している必要がある。測定対象物体表面に模様がない場合には、人工的な模様を塗布する。

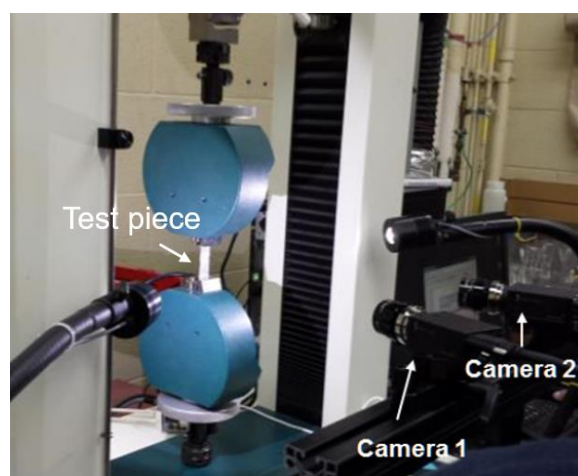


Fig. 5.1 Appearance of apparatus.

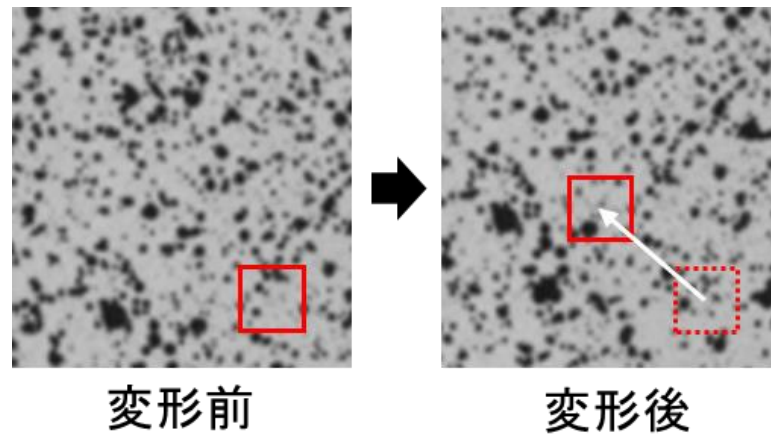


Fig. 5.2 Deformation before and after comparison

5.4 実験条件および供試材料

供試材料として、試験片母材には 780MPa 級高張力鋼板 HT780 を、添加ワイヤには TG-S50 を用いた。これらの化学組成を Table 5.1, 5.2 に示す。溶接継手の作製条件について Table. 5.3 に示す。熱源には半導体レーザー 6 kW を用い、通常丸型のレーザースポットをホモジナイザという特殊な光学系を使用することで 1.6×11 mm の矩形レーザー形状を形成している。また、レーザー揺動照射を行うことで、開先壁面へ高エネルギー密度の状態が入熱が可能となっている。溶接速度は 0.5 m/min および 0.3m/min の 2 条件としているまた、これらの条件で作製された、溶接継手から Fig. 5.3 に示す試験片を作製し、強度評価を行った。

Table. 5.1 Chemical composition of HT780.

Material	Chemical composition, mass%													
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Nb	V	Ti	N	B	So/Al
HT780	0.14	0.25	1.32	0.0011	0.004	0.01	0.02	0.25	0.002	0.002	0.01	0.0022	0.001	0.03

Table. 5.1 Chemical composition of TG-S50

Material	Chemical composition, mass%						
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
TG S-50	0.06	0.73	1.47	0.021	0.007	0.24	0.03

Table. 5.3 Welding condition.

Welding speed, m/min	0.3, 0.5
Laser type	LD
Laser power, kW	6
Laser irradiation angle, deg	5
Defocus length, mm	10
Laser core, μm	400
Focus lens	f400
Homogenizer	LL6
Spot size, mm	1.6 \times 11
Weaving width, mm	0.62
Weaving frequency, Hz	15
Wire feeding speed, m/min	12.7
Wire current, A	180
Wire feeding position, mm	0
Wire feeding angle, deg	70
Ar gas shielding, l/min	10
Energization distance, mm	81

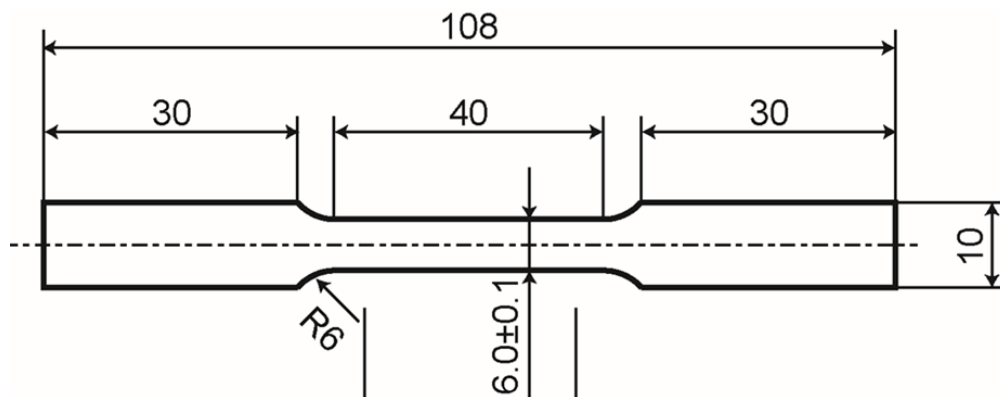


Fig. 5.3 DIC test piece.

5.5 実験結果

5.5.1 溶接速度 0.3 m/min における試験結果

溶接速度 0.3 m/min の条件において作製された継手の、デジタル画像相関法（以下 DIC）による測定結果を以下に示す. Fig.5.4に試験片破断直前のひずみ分布を示す. これからわかるように、試験片は溶接金属部近くの熱影響部において破断することが確認される. Fig. 5.4 に溶接金属部中

心からの距離とひずみの関係を示すグラフを示す。溶接金属部から 5 mm 程度の部分で変形が集中し破断に至っていることが確認される。Fig. 5.5 に有限要素法による解析結果と実際の引張試験との結果を比較した図を示す。これから、ひずみに関しては概ね同様の箇所で集中していることが確認でき、破断力所は同様の位置になるものと推察される。

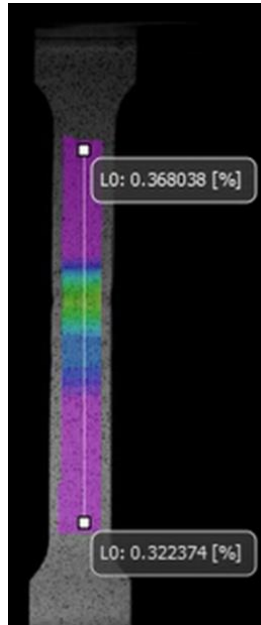


Fig. 5.4 Strain distribution of test piece..

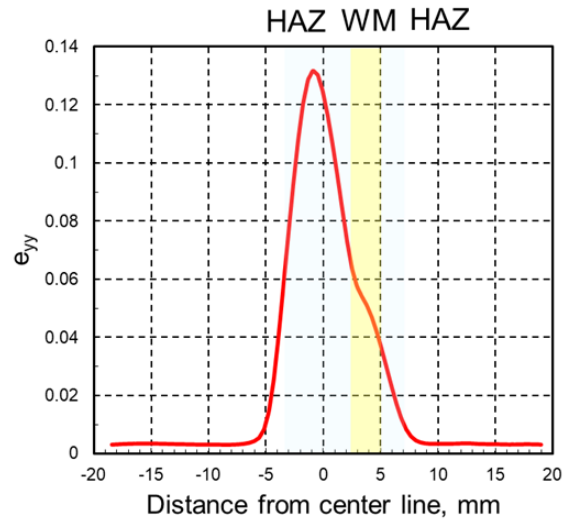


Fig. 5.5 Strain distribution.

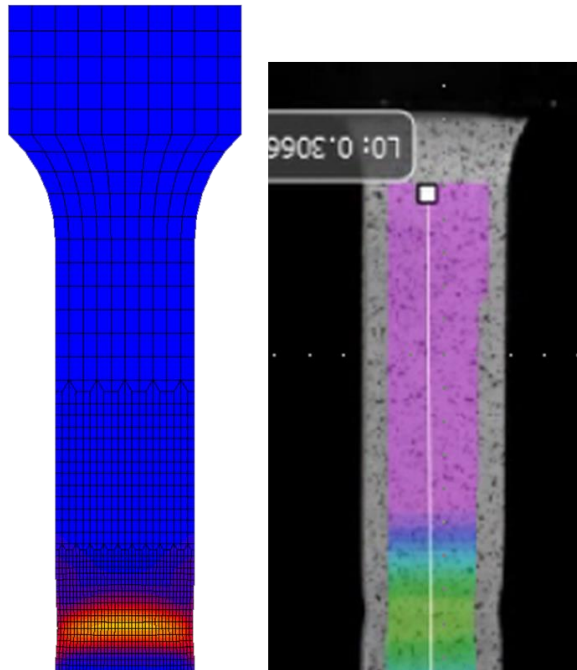


Fig. 5.6 Comparison of FEM and experiment..

5.5.2 溶接速度 0.5 m/min における試験結果

溶接速度 0.5 m/min の条件において作製された継手の引張試験結果について報告する。Fig.5.4 に試験片破断直前のひずみ分布を示す。これからわかるように、試験片は溶接金属部近くの熱影響部において破断することが確認される。Fig. 5.6 に溶接金属部中心からの距離とひずみの関係を示すグラフを示す。溶接金属部から 5 mm 程度の部分で変形が集中し破断に至っていることが確認される。Fig. 5.7 に有限要素法による解析結果と実際の引張試験との結果を比較した図を示す。ひずみの挙動が異なるのは、溶接速度 0.3 m/min の試験片と異なり、冷却速度が速いことから軟化域が狭いため、塑性拘束効果を強く受けているためだと考えられる。

また、引張試験後の破面を観察した結果を Fig.5.9 に示す。破面はディンプルの確認される典型的な延性破面であった。

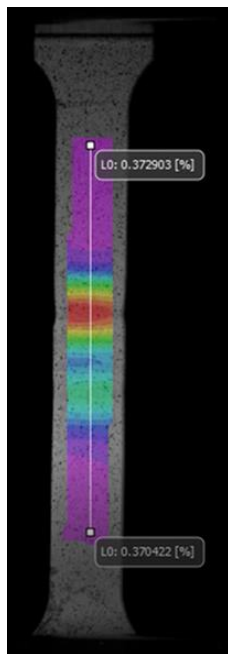


Fig. 5.7 Strain distribution of test piece.

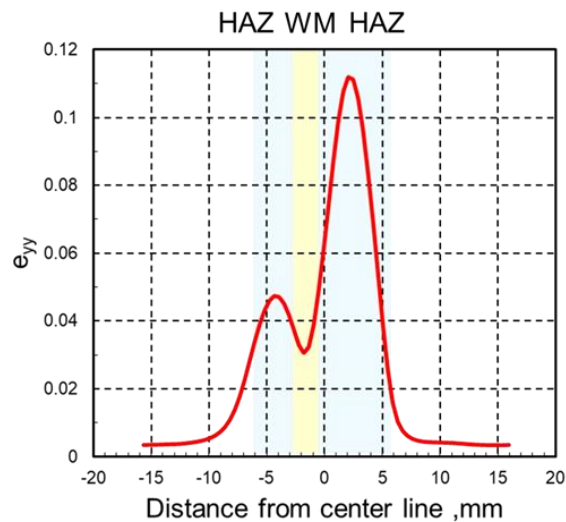


Fig. 5.8 Strain distribution.

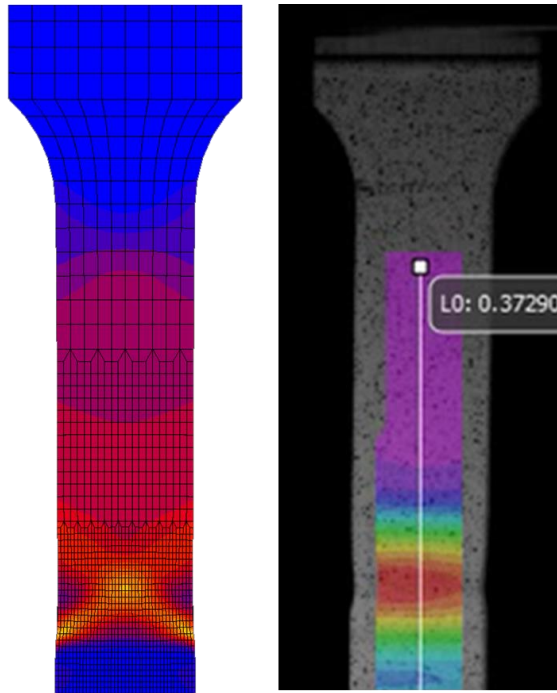


Fig. 5.9 Comparison of FEM and experiment.

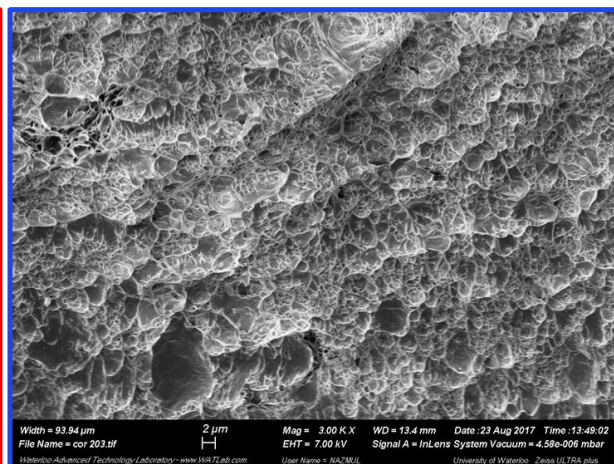
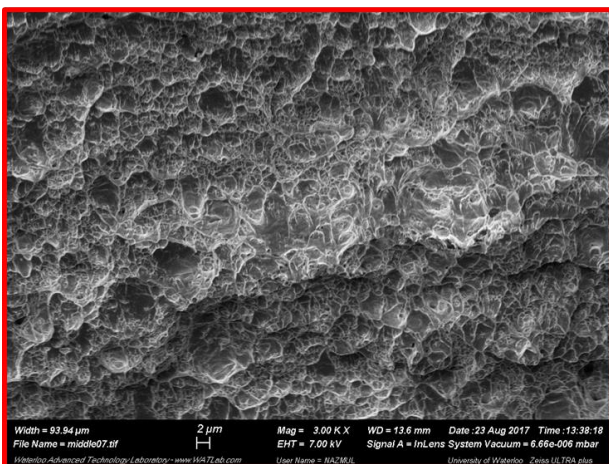
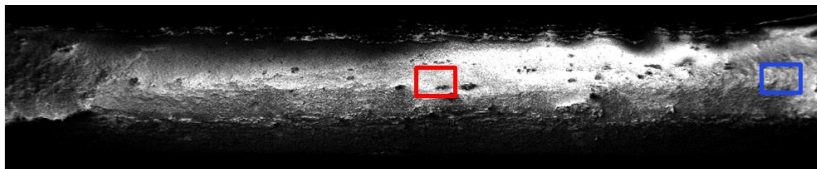


Fig. 5.10 Fracture surface.

6. まとめ

1ヶ月という短い期間だったが、日本での生活とは大きく異なる環境に身を置くおくことができたのは非常に有意義な経験となった。カナダは多様性溢れる国で、研究室の学生ほとんどが他国からの留学生であった。研究の進め方も、効率を重視しているという印象があり、私生活と研究を上手く切り分けているように感じた。また、他者への発表に対しても積極的な質問・議論が展開され、私も学ぶべきことが非常に多かった。

今回のプログラムを通じて、日本に留まり続けているだけではわからなかった、様々な国籍の方々とのコミュニケーションの取り方、日本の研究への取り組み方の長所と短所などを知ることができた。この度の経験を、将来エンジニアとして働いていく上で、積極的に取り入れていきたいと考える。

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、このような貴重な機会を頂いた広島大学材料接合工学研究室の篠崎賢二教授、山本元道准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、高屋様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も厚くお礼申し上げます。
