
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 竹本 直矢

1. はじめに

2018年8月8日から9月3日までカナダのウォーター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

私の所属する研究室では、ホットワイヤ・レーザ法という新しい溶接技術の研究が行われている。本溶接法では高能率・高品質な継手作製を可能とし、先行研究では従来法で作製した継手と比較して機械的特性の向上が報告されている。しかし、このメカニズムの検証が行えておらず、調査が必要である。一方、カナダのウォータールー大学はCAMJとよばれる最先端の溶接技術を扱う研究施設を有し、受入れ先の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継手の高精度評価が可能である。広島大学は先進的なホットワイヤ・レーザ溶接法の技術、ウォータールー大学は継手の高精度な性能評価技術を提供しながら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8日 出国

8月8日～9月3日 研究、プレゼンテーション

9月4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

本研究では、ホットワイヤ・レーザ溶接法により作製された突合せ継手と重ね継手の2種類を評価した。

突合せ継手に関して、船舶や橋梁、高層ビルといった大型構造物では軽量化と同時に省資源化が求められており、更なる高強度化が必要とされている。しかし、これに用いられる高張力鋼は溶接時の入熱により溶接熱影響部における組織の粗粒化や軟化が生じる恐れがあり、低入熱での施工方法の開発が求められている。そこで、本研究室ではホットワイヤ・レーザ溶接法を提案している。本溶接法は低入熱施工が可能であり、高張力鋼を用いた場合にも高い強度と靱性を高いレベルで両立できることが先行研究より明らかとなっている。

重ね継手に関して、自動車業界では地球温暖化をはじめとする環境問題への対策として、温室効果のあるCO₂の排出制限を中心に規制強化が進んでいる。企業では、動力源の開発と同時に車両重量の削減に向けた取り組みが行われてきた。車体軽量化のための取り組みとして、高張力鋼・超高張力鋼といった高強度材を用いた薄肉部材への置換が行われているが、足回り部品については溶接部の疲労強度が向上せず、現在でも軟鋼が用いられている。本研究室の先行研究では、ホットワイヤ・レーザ溶接法を用いた重ね継手において従来法より静的強度および疲労強度が向上した結果が得られている。

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、母材とワイヤの溶融にそれぞれ半導体レーザとホットワイヤ電源の異なる熱源を用いた溶接法である。レーザ溶接の特長である高速溶接が可能であり、母材とワイヤへの入熱を独立して制御できるため溶接時の入熱が少ない。このため、高能率・高品質な継手作製が可能である。また、添加ワイヤを自由に選択できることより、溶接金属の特性制御が行えるため継手設計の自由度が向上するメリットがある。

5.3 デジタル画像相関法

本研究ではデジタル画像相関法（Digital Image Correlation）により継手の引張試験中の局所ひずみを分析した。この技術は、物体表面のランダムパターンを撮影し、得られた画像を比較することで物体の変位量を調べる手法である。今回の実験では、試験片の撮影に 2 台のカメラを用い、三次元計測で試験片表面を調査した。

5.4 供試材料および実験条件

突合せ継手について、昨年度の共同研究では溶接金属と母材が同等の硬さとなるイーブンマッチ継手を対象に局所ひずみ計測が行われた。引張試験の結果、試験片は熱影響部軟化域で破断し、その後実施された解析でも同様の結果となった。溶接金属の硬さを変更して解析した結果、溶接金属の硬さが母材より低いアンダーマッチ継手の条件において溶接金属にひずみが集中し、イーブンマッチ継手と異なる破断位置となることが予想された。Fig. 5.4.1 に解析モデル形状、Fig. 5.4.2 に解析時の溶接部近傍の硬さ分布入力値、Fig. 5.4.3 に解析の結果得られた塑性ひずみ分布を示す。本年度の共同研究ではアンダーマッチ継手を作製し、昨年度の結果と比較・検討することで、継手性状による破壊現象の違いについて考察することを目的とした。供試材料の化学組成を Table 5.4.1、溶接条件を Table 5.4.2、試験片形状を Fig. 5.4.4 に示す。

重ね継手について、継手の機械的特性の中で静的強度向上に関するメカニズムについて調査することを目的とした。Fig. 5.4.5 に先行研究で実施された引張せん断試験結果を示す。図中の MAG とは従来法を示し、ホットワイヤ・レーザ溶接法の継手は強度・破断伸びともに向上していることが確認できる。Table 5.4.3 に供試材料の化学組成、Table 5.4.4 に溶接条件を示す。どちらの継手の試験についても、クロスヘッド速度を 1.0 mm/min とした。

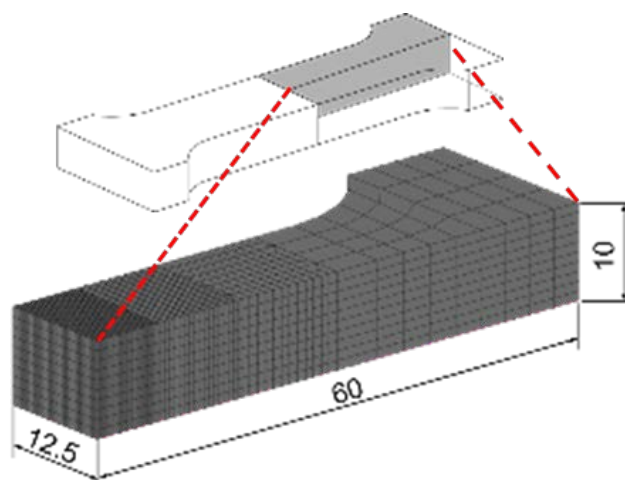


Fig. 5.4.1 The analysis model shape.

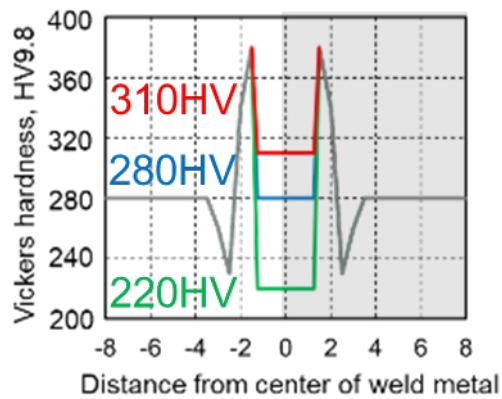


Fig. 5.4.2 The hardness distribution of weld in the analysis model.

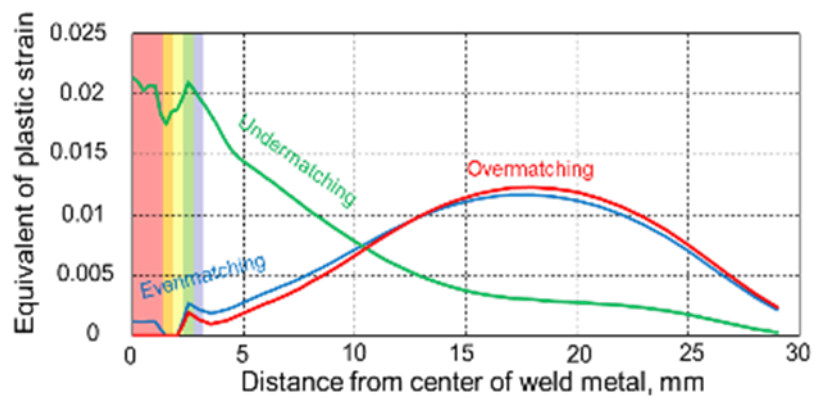


Fig. 5.4.3 Strain distribution obtained by the analysis.

Table 5.4.1 Chemical compositions of specimen (butt-welded joint).

Base metal

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti	Sol.Al	Fe
HT780	0.14	0.25	1.32	0.001	0.004	0.01	0.02	0.25	0.01	0.03	Bal

Filler wire

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Fe
TG-S50	0.06	0.73	1.47	0.021	0.007	0.24	0.02	Bal

Table 5.4.2 Welding conditions (butt-welded joint).

Welding speed, m/min	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
Homoginizer	LL-line2.85
Spot size, mm	1.6×11
Weaving width, mm	0.6
Wire feeding speed, m/min	12.7
Wire feeding position, mm	0
Wire feeding angle, deg	180
Ar gas shielding, l/min	10
Energization distance, mm	81

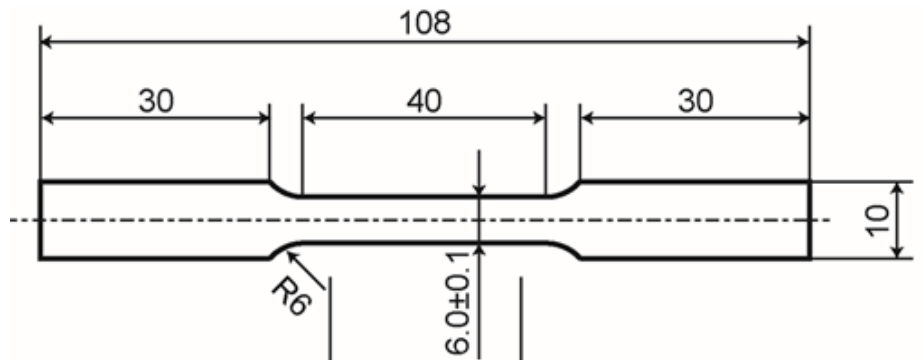


Fig. 5.4.4 Specimen shape.

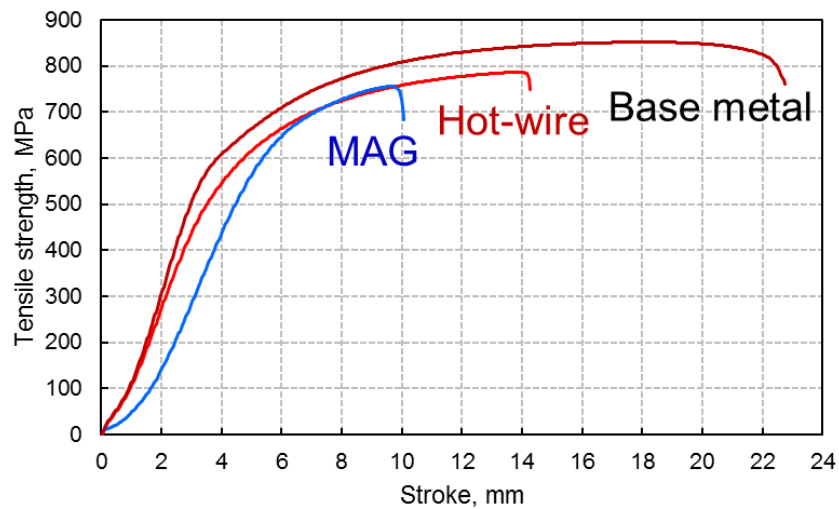


Fig. 5.4.5 Load-displacement curve (lap joint).

5.5 実験結果

5.5.1 突合せ継手の試験結果

引張試験の結果得られた荷重—変位曲線を、昨年度の結果と合わせて Fig. 5.5.1 に示す。溶接部付近の硬さ分布および引張試験中の局所ひずみ分布について、アンダーマッチ継手のものを Fig. 5.5.2, イーブンマッチ継手のものを Fig. 5.5.3 に比較として示す。続いて Fig. 5.5.4 に試験片マクロ写真, Fig. 5.5.5 に組織観察結果, Fig. 5.5.6 に破面観察結果を示す。アンダーマッチ継手は引張強度、破断伸びともに低いことが確認できる。これについて、Fig. 5.5.2 より主に熱影響部軟化域にひずみが集中していることが確認できる。これについて、アンダーマッチ継手では溶接金属部の硬さが低く、イーブンマッチ継手のような溶接金属側での塑性拘束が発生しないためであると考えられる。また、前節の Fig. 5.4.3 より溶接金属部でのひずみ集中、破断が予想されていたが、Fig. 5.5.4, 5.5.5 より熱影響部軟化域での破断であることが確認された。以上より、アンダーマッチ継手としても熱影響部軟化域で破断したことより、イーブンマッチ以上の継手とし、熱影響部軟化域を塑性拘束することで静的強度の優れた継手が得られると考えられる。

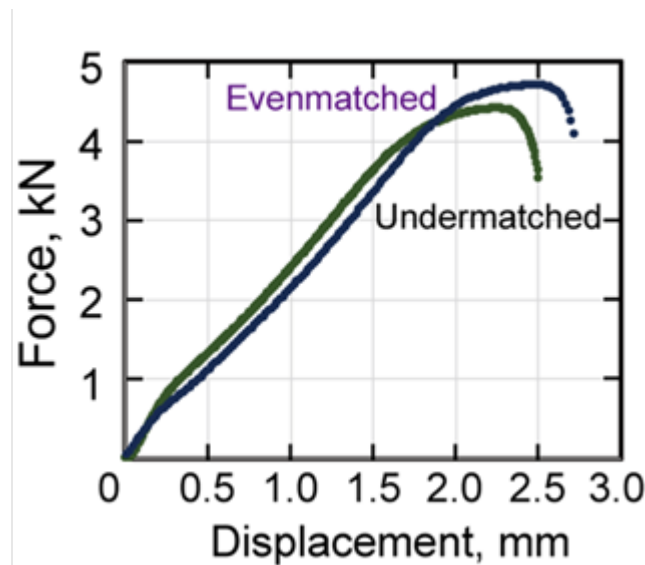


Fig. 5.5.1 Load-displacement curve.

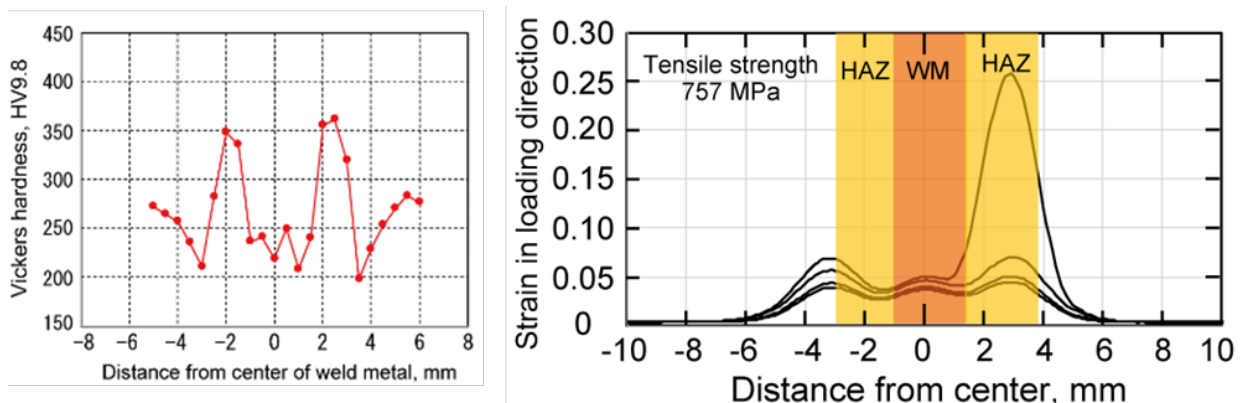


Fig. 5.5.2 Hardness distribution and the strain distribution (undermatched).

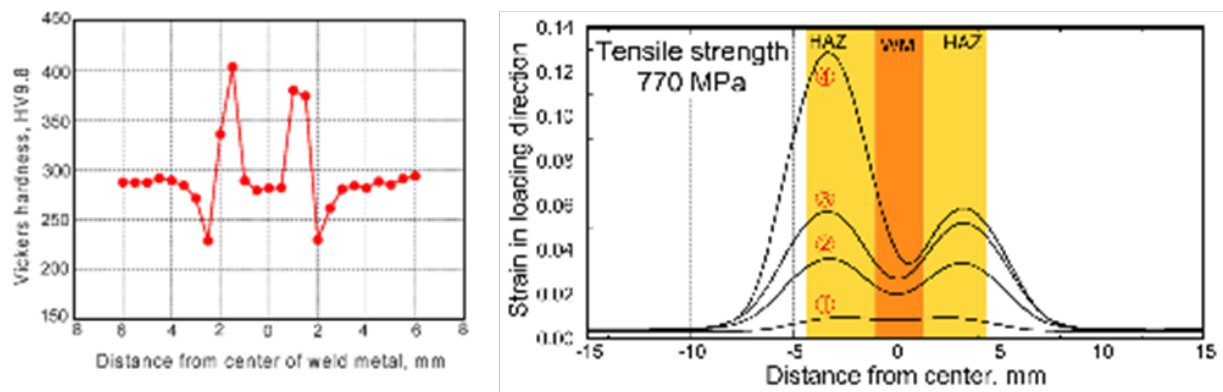


Fig. 5.5.3 Hardness distribution and the strain distribution (evenmatched).

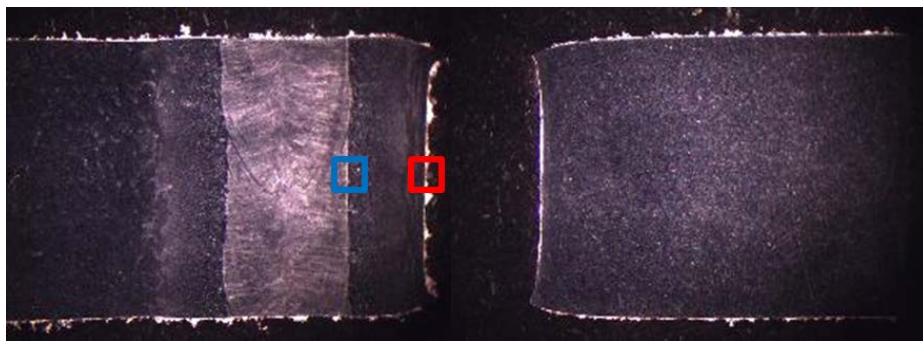


Fig. 5.5.4 The specimen after tensile test.

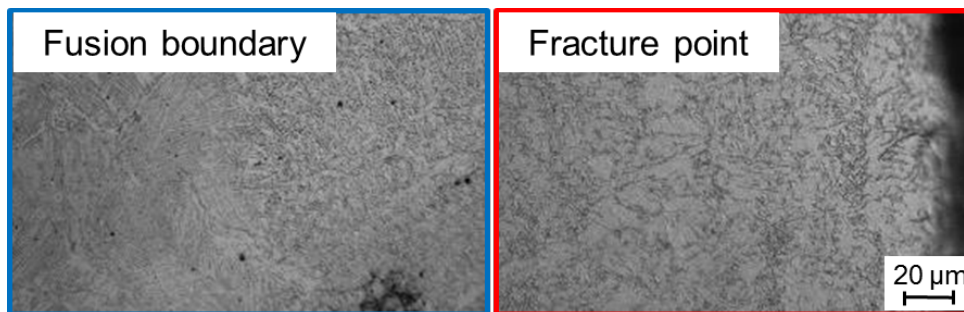


Fig. 5.5.5 Microstructure near the fracture point.

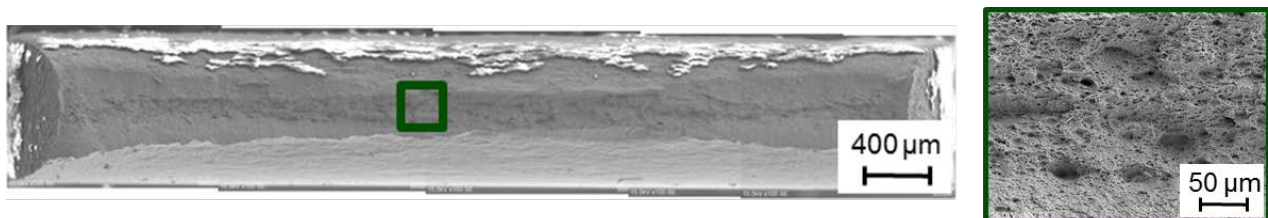


Fig. 5.5.6 Fracture surface.

5.5.2 重ね継手の試験結果

溶接部付近の硬さ分布および引張負荷中のひずみ分布について、ホットワイヤ・レーザ溶接法で作製した継手のものを Fig. 5.5.7, 従来法のものを Fig. 5.5.8 に示す. ひずみ分布の様子が異なり, 硬さ分布より熱影響部軟化域の広さと考えられる. 具体的には, ホットワイヤ・レーザ溶接法のは熱影響部軟化域が 1.5 mm 程度と狭く, この部分が周囲の溶接金属と母材で変形が拘束され, 母材を含めた伸びが確認された. これに対し, 従来法の熱影響部軟化域は 2.5 mm と広く, 周囲から変形が拘束されず, この部分にひずみが集中したものと考えられる.

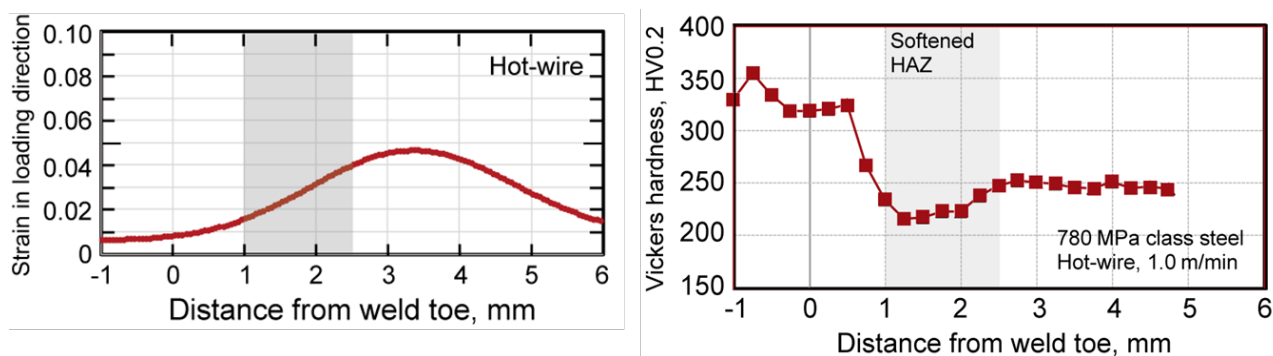


Fig. 5.5.7 Hardness distribution and the strain distribution (Hot-wire).

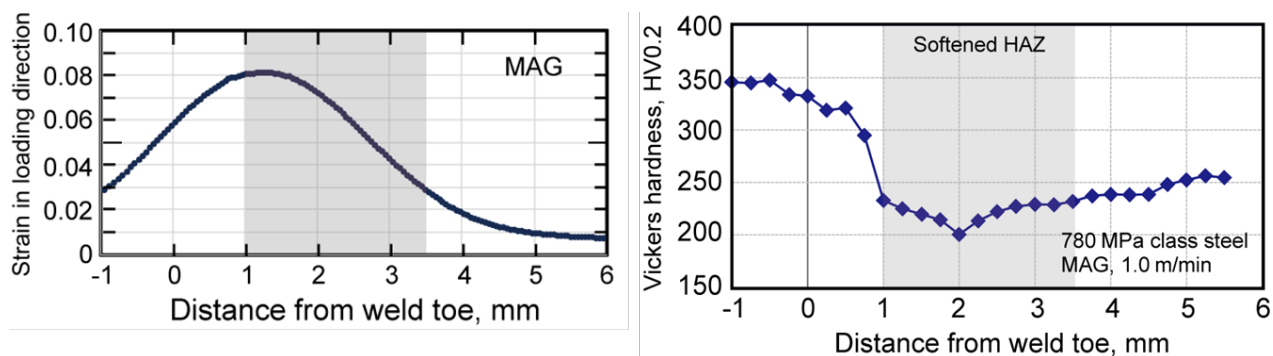


Fig. 5.5.8 Hardness distribution and the strain distribution (MAG).

6. まとめ

この海外共同研究を通して, 大学のシステムだけでも日本と大きく異なることに驚いた. 特に, 修士以上の学生は労働者として扱われていること, 企業とのつながりが日本より強く研究テーマのほとんどが企業と共同で進められており, 企業でのプロジェクトが大学でも進められているように感じたことである. また, 日本と交通状況が異なり必要とされる製品の違いを実感したこと, 文化や宗教の異なる人々と交流できたことが私にとって非常に貴重な経験となった. 今回の経験を今後の学生生活および就職後の活動に活かしていきたいと考えている.

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, 徐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厚くお礼申し上げます.