

---

# (ラジャマンガラ大学 (タイ)) 研修報告書

## FCAW を用いたレール補修肉盛溶接における低温割れ感受性評価

先進理工系科学研究科 機械工学プログラム 氏名 社本 航

### 1. はじめに

本報告では7月25日から8月27日までの間、タイ王国のラジャマンガラ工科大学クルンテープ校で実施した研究について報告する。

### 2. 研修/共同研究課題の決定

研究課題は指導教員である、山本先生、受け入れ先指導教員の Rittichai 教授の三者で話し合い決定した。本研究では鉄道レール材 R900A の母材熱影響部低温割れ感受性をインプラント試験により評価した。また冷却速度  $t_{8/5}$ 、溶接金属及び熱影響部の硬さ分布を取得することで、低温割れ感受性の定量化を試みた。

### 3. 研修/共同研究スケジュール

7月25日 出国

7月26日～8月26日 研究

8月27日 帰国

### 4. 研修先/共同研究派遣先の概要

大学名：ラジャマンガラ工科大学クルンテープ校 (Rajamangala University of Technology Krung Thep)

所在地：タイ バンコク

指導教員：Prof. Rittichai Phaoniam

### 5. 研修/共同研究の内容

#### 5.1 研究背景

タイ国内では長距離の物流、人流の手段として鉄道が多く用いられている。鉄道レール表面は高重量の貨物列車などにより損傷することがある。この補修方法として、タイではフラックスコアードアーク溶接 (以下 FCAW) による補修肉盛溶接が多く用いられている。この補修溶接のフローを Fig. 5.1.1 に示す。まず損傷が発生したレール上部表面をグラインダー等で取り除く。その後 FCAW を用いた補修肉盛溶接を行い、レール表面を溶接金属で覆う。最後に溶接金属の余盛を除去し、補修前のレール形状に仕上げることで補修を行っている。この時間問題となるのは、Fig. 5.1.2 に示すように、母材熱影響部 (Heat Affected Zone, 以下 HAZ) 内の、ビードの下側やビード端部で発生する低温割れである。このような低温割れが発生したまま使用すると、割れが進展しレールが破断し重大な事故が起こる可能性があるため、低温割れが発生しない溶接条件で補修溶接を行う必要がある。

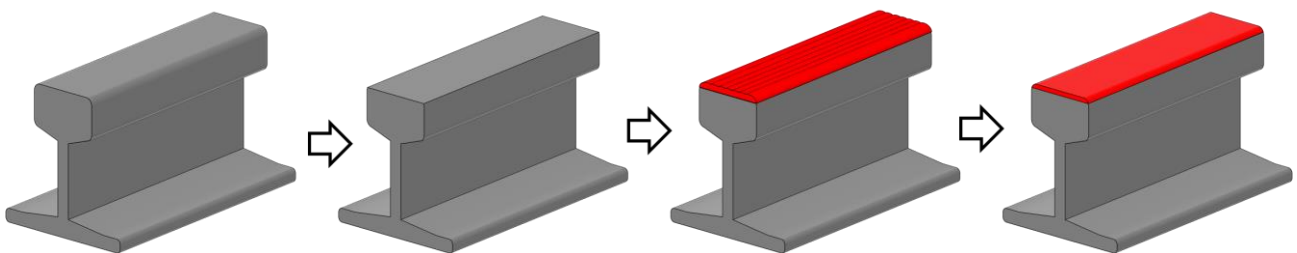


Fig. 5.1.1 Rail repair flow in Thailand.

---

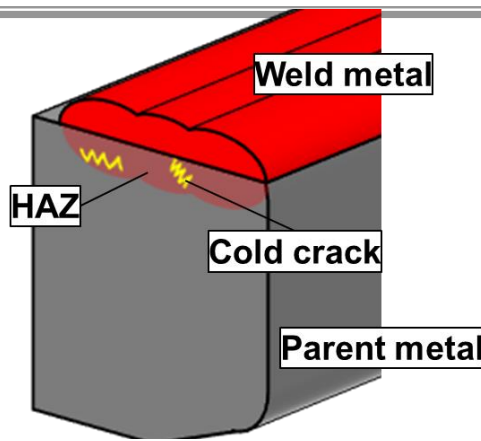


Fig. 5.1.2 Cold crack in HAZ.

## 5.2 低温割れ

低温割れとは溶接後 300 °C以下で発生し、溶接後数時間あるいは数日経ってから発生する割れである。低温割れの原因は以下の 3 つである。

- 1) 溶接部の拡散性水素
- 2) 溶接熱サイクルにより生成される硬化組織
- 3) 溶接部に加わる拘束応力

低温割れはこれら 3 つの要因の重畳により発生する。そのためこれらのうち少なくとも 1 つの要因の影響を低減させることが防止策として重要である。低温割れ防止策の最も一般的なものは、溶接前の予熱、溶接後の後熱である。予後熱により拡散性水素の放出の促すとともに、溶接後の冷却速度を遅くすることでマルテンサイト等の硬化組織の生成を抑制することができるためである。特に溶接時の 800 °Cから 500 °Cまでの冷却時間  $t_{8/5}$  と低温割れ感受性には強い相関があり、 $t_{8/5}$  が速くなるほど低温割れ感受性は高くなる。さらにマルテンサイト等の硬化組織が生成されると、溶接金属および HAZ 内の硬さが上昇するため、硬化組織の生成量は硬さの測定により予測することが可能である。

## 5.3 インプラント試験概要

低温割れ感受性評価手法には様々な試験方法があるが、本研究ではインプラント試験を用いて低温割れ感受性評価を行った。インプラント試験の試験概要図を Fig. 5.3.1 に示す。インプラント試験とは母材熱影響部の低温割れ感受性を評価する試験方法である。

試験の流れについて説明する。まずインプラント試験片の直径と同等の穴を設けた試験板に挿入する。インプラント試験片には拡散性水素、および応力が集中するよう円周切欠きが設けられており、切欠き先端からの低温割れ発生を誘発している。インプラント試験片を挿入した試験板をサポートプレート上に置き、インプラント試験片をロードセルにセットし、試験版を固定する。試験片のセットが完了したら試験版表面の、溶接後 HAZ となる部分に温度計を取り付け、温度を計測する。溶接ビードはインプラント試験直上が定常部となるよう、十分な長さを確保する。溶接終了後試験板が所定の温度に達したとき、ロードセルによりインプラント試験片に静的荷重を付与し、16 時間以上保持する。16 時間以内にインプラント試験片が破断した場合は、破断した時点で試験を終了し荷重付与から破断までの時間を計測し、破断面を観察する。16 時間以上経過してもインプラント試験片が破断しなかった場合は、荷重を除荷し試験片を取り出し、断面を観察することで、切欠き先端からの低温割れ

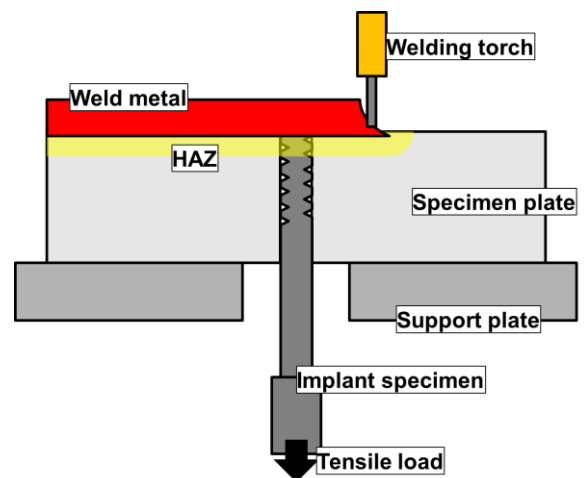


Fig. 5.3.1 Schematic illustration of Implant test.

の有無を観察する。

インプラント試験の特徴として、インプラント試験片が溶接時に母材が受ける熱サイクルを再現できる点が挙げられる。この熱サイクルによる組織の形成及び拡散性水素の放出を再現しつつ、任意の負荷応力を加えることで、低温割れ感受性を定量的に評価することが可能である。

#### 5.4 供試材料および実験方法

使用したインプラント試験片の組成、FCAW で使用したワイヤの組成を Table5.4.1, Table5.4.2 にそれぞれ示す。インプラント試験片にはタイでレール材として広く使用されている R900-A の  $\phi 6$  mm の丸棒を使用した。また FCAW 溶加材としては  $\phi 1.2$  mm のフラックス入り鋼系ワイヤである E71T-11 を使用した。

本研究では実施工の多パスでの肉盛溶接の際の低温割れ感受性を評価するために 2 パスでビード作製した。1 パス目、2 パス目およびインプラント試験片の位置関係を Fig. 5.4.1 に示す。1 パス目直下にインプラント試験片を配置し、1 パス目と 2 パス目のビード中心の距離が 7 mm となるように 2 パス目の溶接を行った。またこの時のパス間温度は 200 °C に設定した。2 パス目終了後、1 パス目の温度が 250 °C となった時に所定の荷重をインプラント試験片に付与し、24 時間保持した。24 時間以内に試験片が破断した際は破断した時点で試験を終了し破断面の観察を行った。破断しなかった場合は荷重付与から 24 時間後に荷重を開放し、試験片を取り出し、試験片中心から断面を採取することで低温割れの有無を確認した。また溶接金属およびインプラント試験片の硬さ分布を取得することで、低温割れ感受性の定量化を試みた。

実験概観を Fig. 5.4.2 に示す。また本研究で用いた試験条件を Table5.4.3 に示す。溶接ビードの作製は Table5.4.3 に示す溶接条件を 1 パス目、2 パス目ともに用い、付与荷重を 792 MPa, 528 MPa の 2 種類の条件も用いて試験を行った。

温度計測には K 型熱電対を用いた。3 本の熱電対を 1 パス目のビード端部から 0 mm, 2 mm, 4 mm の位置に取り付け計測周波数 100 Hz で計測を行っている。

Table 5.4.1 Chemical composition of railway steel, R900A.

Grade of steel	Chemical composition, mass %					
	C	Mn	Si	Cr	P	S
R900A	0.60 - 0.80	0.80 - 1.30	0.10 - 0.50	-	0.04	0.04

Table 5.4.2 Chemical composition of used flux cored wire

Used wire	Chemical composition, mass %					
	C	Mn	Si	Al	P	S
E71T-11	0.30	1.75	0.60	1.80	0.03	0.03

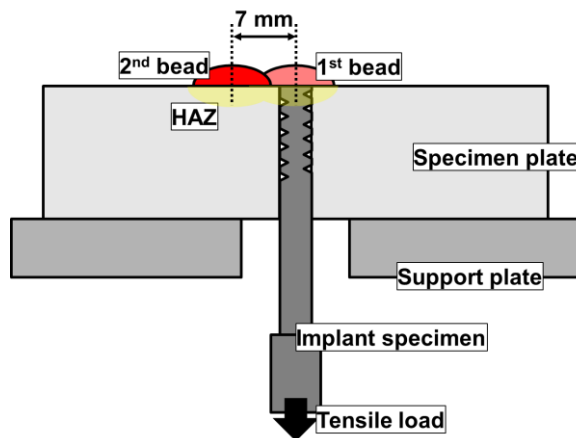


Fig. 5.4.1 Rail repair flow in Thailand.

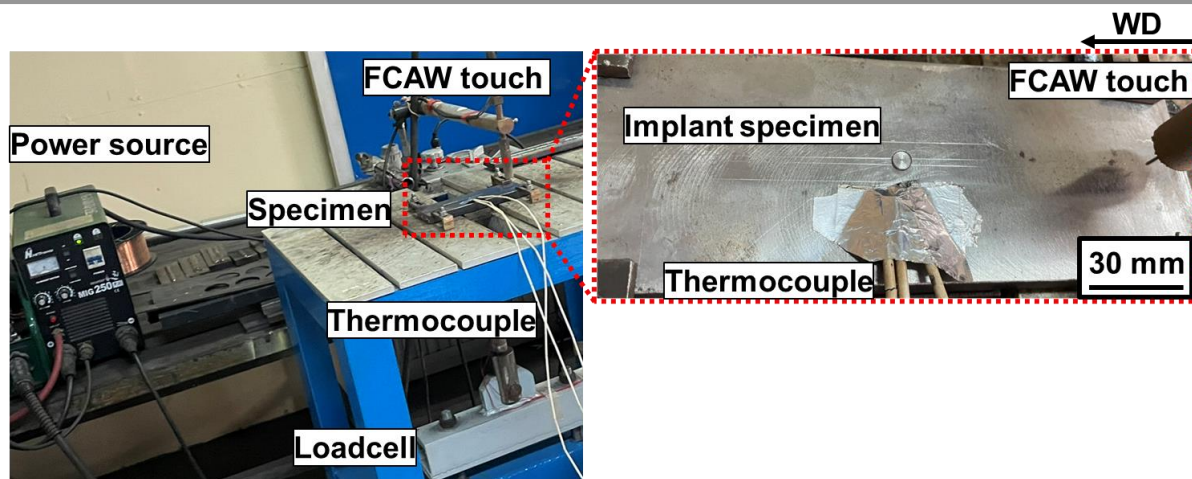


Fig. 5.4.2 Experimental appearance for Implant test.

Table 5.4.3 Implant test conditions

Welding current, A	180	
Welding voltage, V	22	
Welding wire	E71T-11	
Wire diameter, mm	1.2	
Arc length, mm	15	
Cover gas, L/min	15	
Welding speed, mm/s	1.3	
Welding length, mm	150	
Temperature measurement frequency, Hz	100	
Tensile stress, Mpa	792	528

## 5.5 試験結果

Fig. 5.5.1 に作製したビードの外観写真を示す。外観上は欠陥のない健全なビードを作製することができた。またいずれの荷重条件においても荷重付与から 24 時間以内にインプラント試験片は破断しなかった。そのためインプラント試験片中央で断面を採取し低温割れの有無を観察した。取得した断面写真を Fig. 5.5.2 に示す。荷重条件 792 MPa, 528 MPa の断面ともに、低温割れは確認できなかった。

次に試験版に取り付けた熱電対により計測した温度履歴を Fig. 5.5.3 に示す。横軸が計測時間、縦軸が温度を示している。また Point 1 は 1st ビード端部から 0 mm の位置に取り付けた温度履歴を、Point 2 は 1st ビード端部から 2 mm の位置に取り付けた温度履歴を、Point 3 は 1st ビード端部から 4 mm の位置に取り付けた温度履歴をそれぞれ示している。荷重条件 792 MPa の Point 1 の熱電対はビード形成中に溶融池に接触し飲み込まれてしまったため、正確な温度履歴の取得が行えなかった。他 5 つの熱電対においては温度履歴を取得することができた。取得した温度履歴から 1st ビードは 2nd ビード形成による溶接入熱により 400 °C 以上まで加熱され、そこから徐冷されていることが確認できた。次に各熱電対により計測した 1st ビード溶接時のピーク温度とその平均値、そして熱電対のビード端部からの距離を Table 5.5.1 に示す。そして 1st ビード端部からの距離とピーク温度の平均の関係を Fig. 5.5.4 に示す。このグラフと他のデータを用いることで、800 °C から 500 °C までの冷却速度  $t_{8/5}$  を導出することが可能である。また 2 回の試験のピーク温度には約 20 °C の差があるため、溶接後に 1st ビード端部から熱電対の設置位置をより正確に計測する必要がある。



最後にインプラント試験片の断面ビッカース硬さ試験の結果を Fig. 5.5.5 に示す. 硬さ試験は溶接金属頂点から 1 mm 幅でインプラント試験片内 HAZ を通るよう計測した. また付与荷重は 5 kgf, 保持時間は 5 秒間である. 硬さ試験の結果から HAZ 内で硬さが上昇していることから, 溶接熱サイクルにより硬化組織が形成されていることが確認できる. しかし最大硬さは 309 HV であり, 一般に低温割れ感受性が高くなるといわれている 350 HV を下回っていた. さらに 1st ビードのみを溶接した際に形成された組織と比較して硬化が抑えられていることが分かった. これは 2nd ビードからの熱サイクルにより加熱, 徐冷されたことにより, 焼き戻しのような効果が得られ組織が軟化したからであると考察している.

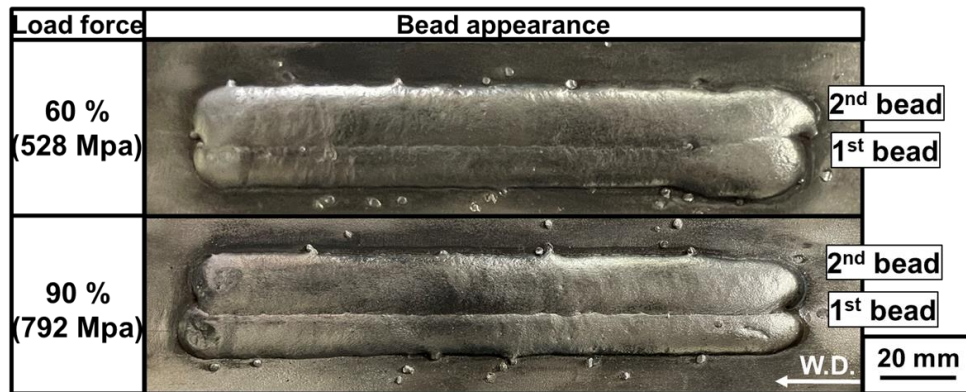


Fig. 5.5.1 Bead appearance.

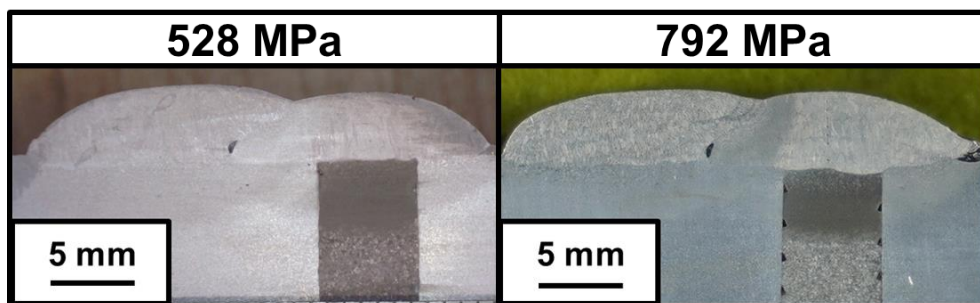


Fig. 5.5.2 Cross sections after Implant test.

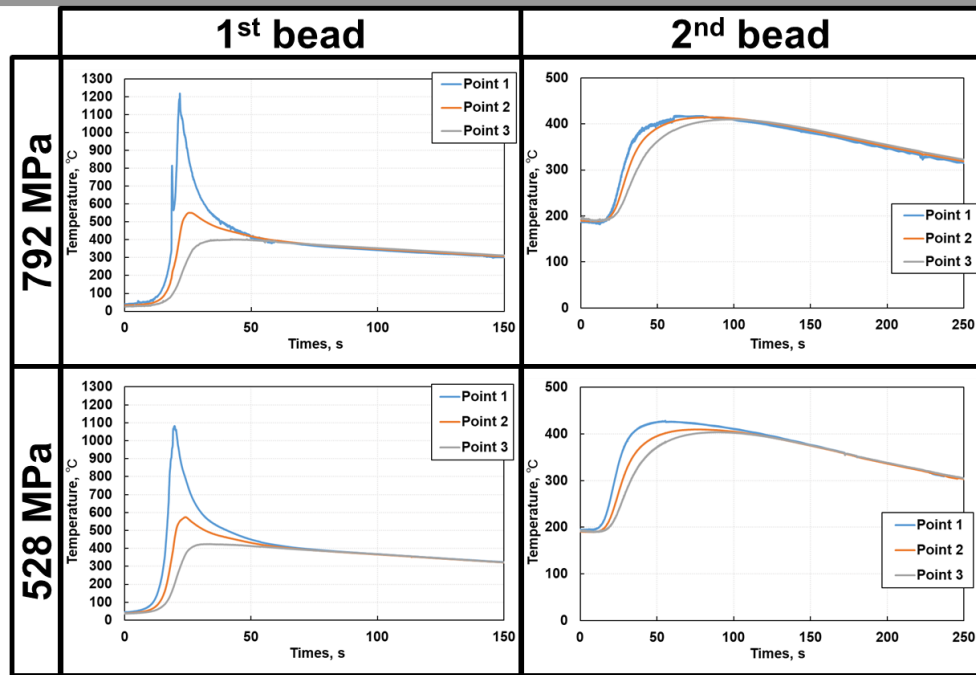


Fig. 5.5.3 Temperature history measured by thermocouple

Table 5.5.1 Peak temperature average.

Distance from 1st bead edge, mm		Peak temperature, °C		Average, °C
		792 MPa	792 MPa	
Point 1	0	-	1082.3	1082.3
Point 2	2	551.3	574.3	562.8
Point 3	4	403.6	424.7	414.15

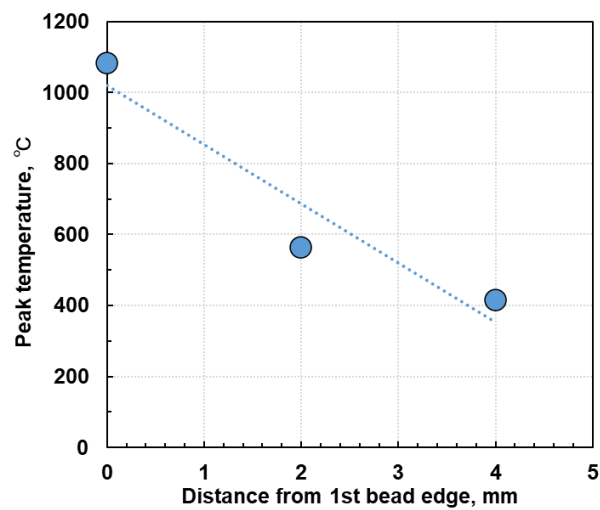


Fig. 5.5.4 Relationship between distance from 1<sup>st</sup> bead edge and peak temperature.

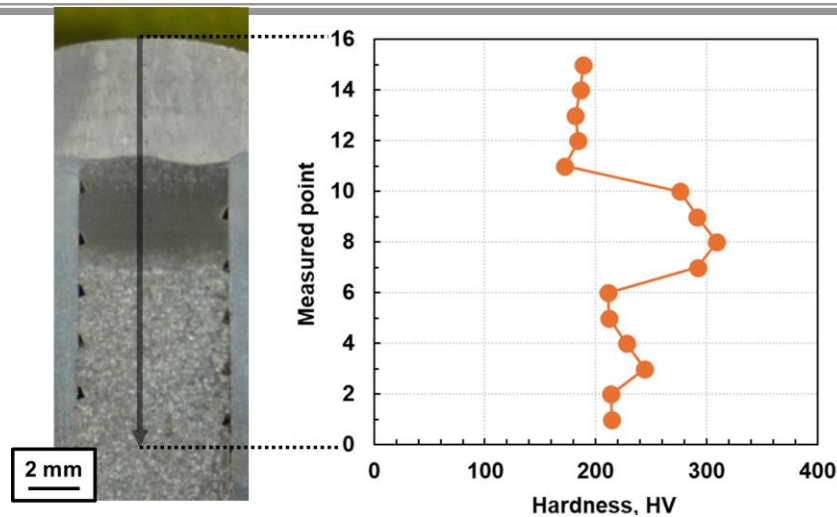


Fig. 5.5.5 Vickers hardness test result.

## 6. まとめ

今回のタイ、ラジャマンガラ工科大学クルンテープ校での海外共同研究において、タイで使用されているレール鋼 R900A の表面補修肉盛溶接時低温割れ感受性をインプラント試験により評価をした。実際の多パス溶接の際の低温割れ感受性を評価するため、溶接ビードを2つ並べ1パス目直下にインプラント試験片を配置することで、1パス目熱影響部の低温割れ感受性を調査した。同一の溶接条件（入熱条件）を用いて、荷重条件を792 MPa, 528MPaと変化させ試験を行ったが、いずれの試験片においても低温割れは確認できなかった。取得した温度履歴からは1パス熱影響部は2パス目溶接ビードにより400℃以上に加熱されていることが確認できた。またビッカース硬さ試験の結果から、1パス目熱影響部が2パス目の入熱により軟化することで、低温割れ感受性が低減されている可能性があることが確認できた。

最後に今回の海外共同研究を通して、海外で知り合いがいない中で研究に取り組んだ経験は今後の人生に生きる非常に有意義な経験となった。特に現地の学生とは互いに第2言語の英語で会話するため、伝わらないことも多々あった中で、非常に熱心に研究を教えてくれて絆が深まったと感じた。全く異なる文化圏で生活、そして研究を行うことで、成長できた1か月であったと感じる。

## 7. 謝辞

本研究において熱心なご指導をいただきました Prof. Rittichai Phaoniam, また公私ともに現地でサポートしていただいた Prof. Somchai Wonthaisong, Prof. Komkrit Lawanwong に厚く御礼申し上げます。さらに研究だけでなく私が現地での生活に馴染めるようたくさんのサポートをしていただいた, Non-destructive testing Lab.の皆さま, そして同校イサーン校からのインターン生の皆さまにもお礼申し上げます。またこのような機会をくださった接合プロセス工学研究室の山本元道教授に厚く御礼申し上げます。最後に海外共同研究をサポートしていただきました実行委員会の諸先生方, 工学系総括支援室の皆様にお礼申し上げます。