

京都大学若手人材海外派遣事業 ジョン万プログラム
研究者派遣プログラム

成果報告書

提出日：平成 30 年 9 月 27 日

【基本情報】

○申請者

採 択 年 度：平成 29 年度
部 局 名 等：工学研究科
職 名：准教授
氏 名：柴田 暁伸
研究課題名：マルテンサイト鋼の水素脆性破壊挙動

○渡航先

国 名：フランス
研究機関名：パリ国立高等鉱業大学 (MINES ParisTech)
研究室名等：[研究室名] 材料センター (Centre des Matériaux)
[職名等・氏名] 教授・Jacques Besson
渡 航 期 間：平成 29 年 9 月 20 日～平成 30 年 8 月 31 日 (347 日)

○渡航期間中の出張

出 張 先：Oxford 大学 (イギリス)
目 的：Oxford 大学で開催された「Polycrystals: Microstructure and Effective Properties Workshop」にて招待講演を行った。
期 間：平成 30 年 3 月 26 日～3 月 28 日

出 張 先：京都大学 (日本)
目 的：京都大学辻研究室にて、本プログラムの受入研究者であるパリ国立高等鉱業大学 Jacques Besson 教授によるセミナーを開催するとともに、マルテンサイト鋼の水素脆性に関する今後の国際共同研究のための実験設備の確認、研究討論、研究打合せを行った。
期 間：平成 30 年 6 月 13 日～6 月 23 日

出 張 先：Freiberg 工科大学 (ドイツ)
目 的：Freiberg 工科大学に招待され、セミナーにて講演を行うとともに、今後の国際共同研究に関する研究打合せを行った。
期 間：平成 30 年 7 月 18 日～7 月 19 日

京都大学若手人材海外派遣事業 ジョン万プログラム 研究者派遣プログラム

〔成果〕

○プロジェクトの成果及び今後の展開

・研究概要

近年、二酸化炭素排出量の削減が急務な状況であり、燃費向上を目的とした輸送機器の車体重量軽量化が重要な社会的課題となっている。そのため、鉄鋼材料のような構造用金属材料の高強度化を目指した研究が盛んに行われている。しかし、高強度金属材料を幅広い用途で使用していく際に大きな問題となるのが「水素脆性」である。水素脆性とは材料中に水素が侵入することによって、材料が著しく脆化する現象である。材料の強度が上昇するにつれて水素脆性が容易に生じるようになり、高強度金属材料は通常の大気環境下においても水素脆性が発現してしまう危険性が提唱されている。そのため、水素脆性破壊を抑制していくことが、新たな高強度金属材料を開発・実用化していく上で必要不可欠である。

申請者は、代表的な高強度鉄鋼材料であるマルテンサイト鋼を対象として、電子顕微鏡を用いたマイクロ組織解析によって、水素脆性破壊における「破壊クラック発生点」および「破壊クラック伝播経路」とマイクロ組織の関係を正確に理解することを目的として研究を行ってきた。今後、マルテンサイト鋼の水素脆性破壊メカニズムを解明していくためには、破壊挙動とマイクロ組織の相関に加えて、破壊特性精密評価とマイクロメカニクス解析を組み合わせた複合的手法によって研究を行っていくことが水素脆性破壊メカニズムの解明に繋がると考えられる。

そこで、本プロジェクトでは、精密な破壊特性評価やマイクロメカニクス解析などにより数多くの優れた業績を発表している世界的に著名な研究者の一人である、パリ国立高等鉱業大学 材料センター (MINES ParisTech, Centre des Matériaux) の Jacques Besson 教授とマルテンサイト鋼の水素脆性破壊挙動に関する国際共同研究を行った。具体的には、種々の環状ノッチ付き試験片を用いた引張試験およびコンパクトテンション (CT) 試験片を用いたコンプライアンス試験といった破壊力学に立脚した破壊特性評価試験により、種々の水素濃度における破壊特性 (破壊靱性値, ティアリングモデュラス) を正確に評価した。また、引張試験結果およびコンプライアンス試験結果に対して、有限要素シミュレーションを用いた Cohesive zone model 解析を行うことによって、結晶粒界の凝集力におよぼす水素の影響を実験結果に基づいて評価した。これらの結果を申請者がこれまで行ってきたマイクロ組織レベルでのクラック伝播挙動の観点から考察した。本プロジェクトにおける研究手法および得られた結果は水素脆性研究分野においては極めて新しいものであり、今後の展開が大きく期待されるものである。

・国際共同研究の立上げ・ネットワークの構築

本プロジェクトでは、マイクロ組織観察、破壊特性精密評価、マイクロメカニクス解析を組み合わせた複合的手法によって、高強度マルテンサイト鋼の水素脆性破壊挙動について研究を行った。今後は、本プロジェクトの継続として、Cohesive zone model などの有限要素シミュレーションの精度を高めていくだけでなく、本プロジェクトによってその有用性が実証された研究手法を、種々の材料の水素脆性破壊に適用していく新たな国際共同研究を開始する。パリ国立高等鉱業大学との新たな国際共同研究の準備をすでに開始しており、本プロジェクトの受入研究者であった Jacques Besson 教授に京都大学へ訪問していただき (平成 30 年 6 月)、当研究室の研究設備の確認、研究打合せを行った。さらに、申請者の滞在中に、この新たな国際共同研究を見据えた試験的な実験も実施した。

パリ国立高等鉱業大学 材料センターには種々の研究グループがあり、申請者が所属していた研究グループ (MIMEX) 内の放射光トモグラフィ解析を専門とする研究者達とお互いの研究内容について日常的に議論を行った。さらに、彼らの協力を得て、フランスの放射光施設 SOLEIL にて水素脆性破壊クラックの 3 次元トモグラフィ実験を試験的に実施するなど、今後の国際共同研究への展開を見据えた研究ネットワークを構築した。

京都大学若手人材海外派遣事業 ジョン万プログラム 研究者派遣プログラム

今後、申請者が継続的にパリ国立高等鉱業大学 材料センターに訪問・滞在して研究を行うだけでなく、フランス政府給費留学生制度などを利用して申請者の所属する研究室の博士後期過程学生をパリ国立高等鉱業大学 材料センターに派遣するなど、大規模な国際共同研究に発展させていくことも計画している。

・国際共著論文の投稿・発表等の状況、国際学会等での発表状況 [予定を含む]

[国際共著論文]

マルテンサイト鋼の水素脆性破壊に関する論文を2報程度投稿する予定である。

[国際学会]

Akinobu Shibata, Yuji Momotani, Takashi Yonemura, Kazuho Okada, Yazid Madi, Jacques Besson, Nobuhiro Tsuji: “Hydrogen-related fracture behavior of martensitic steels”.

【招待講演】

Polycrystals: Microstructure and Effective Properties Workshop, Oxford University, England, 2018/3/27-29

・在外研究経験によって習得した能力等

申請者の滞在したパリ国立高等鉱業大学 材料センターは、マイクロメカニクス解析に必要な有限要素シミュレーション用のソフトウェア (Z-set Finite Element Code) を独自に開発し、金属材料に限らず、セラミックス材料やポリマー材料など幅広い材料分野の研究に利用してきている。申請者はそのシミュレーションソフトウェアの基礎原理を理解し、材料内部の局所的な応力・ひずみの評価はもちろんのこと、複雑な形状をした構造体の3次元メッシュ構築法や Cohesive zone model などの解析手法を習得した。さらに、破壊力学に立脚した破壊特性評価技術も十分に習得し、申請者の所属する研究室でも実施できることを確認した。

申請者の所属していた研究グループでは、研究進捗会のようなメンバー全員が出席するグループミーティングは実施されていなかった。しかし、それぞれが個別に独立して研究活動をしているわけではなく、研究スタッフ、学生、技術者が日常的に議論・情報交換をしており、研究テーマごとに様々な組み合わせの連携研究がなされていた。実際、申請者も受入研究者である Jacques Besson 教授とは毎週のように研究内容に関する議論を行っていた。また別の研究スタッフ・学生・技術者と実験・解析方法についての議論を毎日のように行い、このような日常的な議論の結果、ある研究テーマに連携研究者として携わることもあった。このような研究体制は研究を効率的に推進していく上で非常に重要であり、今後の申請者の研究活動においてぜひ参考にしたいと考えている。

・在外研究経験を活かした今後の展開

本プロジェクトによる在外研究によって、これまでの申請者の研究を大きく飛躍させるような非常に興味深い成果が得られた。本プロジェクトによってその有用性が実証された研究手法を水素脆性破壊に限らず、低温脆性破壊、疲労破壊、延性破壊などの金属材料において生じる種々の破壊挙動に関する研究にも展開していく予定である。

パリ国立高等鉱業大学 材料センターには、多くの同世代の若手研究者や新進気鋭な博士課程学生が在席しており、彼らと研究生活を伴に送ることによって、研究ネットワークを築くことができた。今後は、受入研究者であった Jacques Besson 教授との国際共同研究を継続していくだけでなく、新しく知り合った若手研究者と幅広い分野での国際共同研究を行っていききたい。

京都大学若手人材海外派遣事業 ジョン万プログラム
研究者派遣プログラム

英文成果報告書

○申請者情報

部 局 名 : Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering

職 名 : Associate Professor

氏 名 : Akinobu Shibata

研究課題名 : Hydrogen-related fracture of martensitic steel

渡 航 期 間 : September 20th, 2017 – August 31st, 2018

○渡航先情報

国 名 : France

研究機関名 : MINES ParisTech

研究室名等 : Centre des Matériaux

受入研究者名 : Jacques Besson

○渡航報告

MINES ParisTech (another name, École des Mines de Paris) at France was established in 1783 by King Louis XVI. Main campus of MINES ParisTech is located close to Luxembourg Park in Paris. Centre des Matériaux, which is a teaching and research center of MINES ParisTech, is located at Evry city (Essonne) 25 km south of Paris. The appearance of building of Centre des Matériaux is shown in Figure 1. It consists of four major research clusters; MIMEX (Microstructure, Mécanique, Expérimentation), SIMS (Simulation des Matériaux et des Structures), SIP (Surfaces, Interfaces, Procédés), and FAMHES (Fabrication Additive des Matériaux Hors Équilibre et des Systèmes). During my stay at Centre des Matériaux, I belonged to MIMEX group. There are about 200 people including researchers, technicians, and doctoral students. It should be noted that a lot of technicians are hired by Centre des Matériaux. Because technicians are basically responsible for experimental facilities, researchers and students can concentrate on their research works very much. Probably this is one of the important strong points for researchers and students in Europe, and I think that universities in Japan should refer to this system.



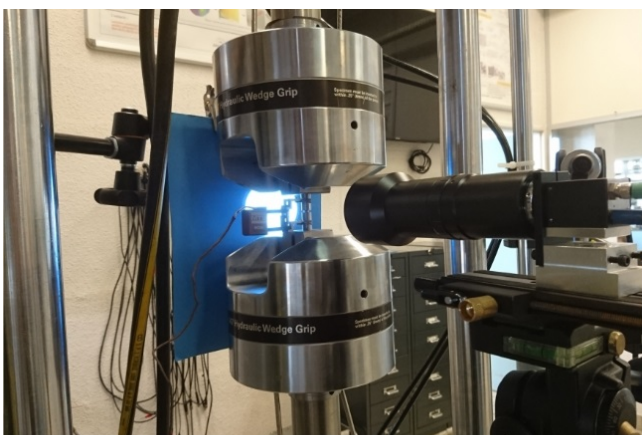
Figure 1

京都大学若手人材海外派遣事業 ジョン万プログラム
研究者派遣プログラム

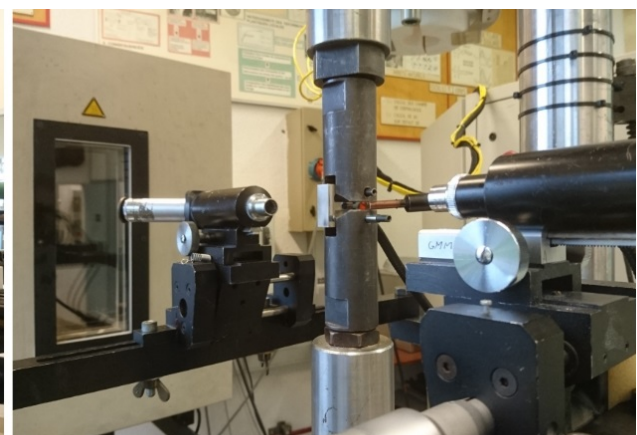
There are a lot of immigrants in France, and in the similar way many researchers and students with nationalities other than Europe, such as Algeria, Morocco, Cameroon, China, Guatemala, etc., belong to Centre des Matériaux. Their attitudes for research were sometimes very different from that of Japanese. By spending the research life together with them, I can understand their wide ways of thinking very much.

Even though there was no periodical research meeting in MIMEX group, researchers, students, and technicians frequently made a discussion to understand their research progress each other. I understood that such the daily discussions were very important, because the discussions often led to new collaboration works inside Centre des Matériaux. Actually, as a result of such the daily discussion, I started to participate some research programs during my stay at Centre des Matériaux.

In the present research program, I studied hydrogen-related fracture of martensitic steels. Specifically, I conducted tensile tests using axisymmetric notched-bar specimens with different notch radii, and compliance tests using compact tension specimens (Figure 2). For the tensile test, length and radius changes during test were precisely measured by extensometer and CCD camera technique, respectively. All of the experimental results were analyzed by finite element simulation using Z-set code (<http://www.zset-software.com/>), which has been developed by Centre des Matériaux. For example, cohesive zone model was applied to evaluate effect of hydrogen on cohesive energy. The obtained results are quite interesting and novel in the research filed of hydrogen embrittlement. A part of the results has been presented at “Polycrystals: Microstructure and Effective Properties Workshop”, held at Oxford University (England), 2018/3/27-29, as an invited talk. The presentation title and authors are “Hydrogen-related fracture behavior of martensitic steels”, Akinobu Shibata, Yuji Momotani, Takashi Yonemura, Kazuho Okada, Yazid Madi, Jacques Besson, Nobuhiro Tsuji (authors with underline are my colleagues at Centre des Matériaux, MINES ParisTech, France). I am now preparing the manuscripts for submitting to international journals.



tensile test



compliance test

Figure 2

京都大学若手人材海外派遣事業 ジョン万プログラム
研究者派遣プログラム

Based on the present research project, Professor Jacques Besson and I have already started to prepare new international collaboration research project concerning with hydrogen embrittlement. I am going to stay again at Centre des Matériaux, MINES ParisTech for several weeks in near future. In addition, I also plan to establish student exchange program between MINES ParisTech and Kyoto University.

Finally, I would like to express my sincere thanks to Professor Jacques Besson for accepting me to stay at Centre des Matériaux, MINES ParisTech. I spent a fruitful research life, and the experience must be beneficial to my future research activity. I also greatly appreciate the financial support by Young Scholars Overseas Visit Program & Supporting Program for Young Scholar's Home Laboratories "The John Mung Program", Kyoto University.