



水素脆化の研究を通じた産学間の橋渡し

上智大学大学院理工学研究科理工学専攻；
博士後期課程3年
齋藤 圭

1. はじめに

私は上智大学大学院理工学研究科の博士後期課程において、高井健一教授の下、金属材料の水素脆化に関する研究に日々励んでおります。

この度、本稿執筆という貴重な機会をいただきましたので、前職の民間企業での経験、これまでの研究活動、そして産学の両視点からの研究への取り組み方を踏まえた今後の抱負について述べたいと思います。

2. 民間企業の材料技術者としての経験

私は上智大学大学院理工学研究科博士前期課程を修了した後、自動車メーカーにおいて、車体の軽量化に向けて、実験と計算工学を駆使して次世代高強度鋼板の開発業務に従事しておりました。そこでの開発課題は、プレス成形や衝突耐性の向上に必要な鋼板の力学特性(延性・強度)の確保、およびそれとトレードオフの関係にある技術課題(例：スポット溶接性、耐水素脆性)との最適解を見出すことでした。この課題の解決は困難でしたが、社内部署や鉄鋼メーカー、部品メーカーに属する様々な関係者と議論し、試験片や模擬部品を用いた実験と合わせ、計算工学を通じて、必要な力学特性およびスポット溶接が可能な化学成分範囲を明確化しました。また、脆化メカニズムが十分に分かっていなかった中、部品製造プロセスや市場環境を評価条件に落とし込むことで、耐水素脆性の向上に必要な特性を見出しました。様々な技術課題はありましたが、鋼板と部品の製造プロセス、部品要求特性、そして鋼板特性を引き出す材料工学の知見をより深め、それらを活用して自動車部品として成立する鋼板の目標特性を設定する貴重な経験ができました。一方、高強度鋼の水素脆化メカニズムの解明とそれに基づく耐水素脆性に優れた高強度鋼板の開発には未だ多くの課題があると痛感しました。

3. 高強度鋼の水素脆化に関する研究

自動車産業では急速な脱炭素社会への移行が求められており、2節で述べた通り、自動車の軽量化が喫緊の課題となっています。軽量化には、車体に占める鋼材量の削減につながる鋼材の高強度化、すなわち高強度鋼の適用が有効な手段の一つとなり得ますが、反面、水素脆化の発生リスクが顕著に高まることから、十分な普及には至っていません。水素脆化とは、金属材料中に ppm オーダーの微量な水素が侵入し、荷重が負荷された状態で脆性的に突如破壊する現象です。従来から水素は高強度鋼中において様々なトラップサイト(例：転位、原子空孔)に存在することが報告されていますが、室温での水素拡散係数が大きい本質的にどのような状態で存在する水素が脆化に関与するかはよく分かっていませんでした。

私は現在、博士後期課程において、水素脆化に関与する水素の存在状態と脆化の発生メカニズムを明らかにし、それに基づいた耐水素脆性に優れた高強度鋼の開発指針を提案する研究に取り組んでいます。具体的には、代表的な水素脆化破面の一つである擬へき開破面を示す高強度マルテンサイト鋼について、水素雰囲気下における引張試験にて水素脆化破壊が生じる直前で除荷したものを試料として、 -200°C からの昇温脱離分析法を通じて、水素脆化に関与する格子欠陥の同定とその形成過程の明確化を試みました。その結果、破断直前もしくは破面近傍において、転位からの放出に対応する分とは別に、原子空孔にトラップされていた水素の放出量が顕著に増加することを確認できました。つまり、高強度マルテンサイト鋼において水素を含んで塑性変形させることで、過剰な原子空孔が形成・蓄積することで水素脆化現象が起きることを実験的に明らかにしました⁽¹⁾。本研究成果は国際的に評価され、米国 TMS(The Minerals, Metals and Materials Society)において過去2年間に発表された論文の中で最も科学的な発見に貢献した論文として、論文賞「TMS-AIME CHAMPION H. MATHEWSON AWARD」を受賞しました(図1)。また、本研究成果を応用し、転位易動度を低下させ



図1 TMS-AIME CHAMPION H. MATHEWSON AWARD.
(オンラインカラー)

て原子空孔の形成量を低減させることで、水素脆化を間接的に抑制できると考えました。そして、熱処理条件を工夫することで、同一強度であるが転位すべりの起こり易さを変化させた低合金マルテンサイト鋼の耐水素脆化特性を引張試験にて評価しました。その結果、約 1.5 ppm 以下の低い水素量の範囲では、転位すべりが起こり難い鋼材の方が優れた耐水素脆化特性を有することを見出しました⁽²⁾。以上より、水素量が低く、擬へき開破壊する鋼材に関して、脆化メカニズムに関与する格子欠陥(転位と原子空孔)の役割を明らかにし、特別な合金を添加せずに熱処理条件を工夫することで、効果的に耐水素脆性に優れた鋼材を開発できる指針を提案しました。

4. 最 後 に

産業界から学术界に主軸を移して研究に取り組んでいく中で、民間企業での多角的に物事を把握して課題に取り組む姿勢が研究活動を進める上でも重要だと感じています。今後、

実際の材料の使われ方や水素脆化以外の技術課題を考慮し、自身の水素脆化に関する研究成果の産業界への応用を最大化できるようなテーマ選定をしていきたいと思います。特に、長期間にわたって安全に構造部材を使用するための実験と、計算工学を駆使した水素脆化寿命予測とメカニズムを反映させた評価法開発に関する研究に取り組んでいきたいと考えております。

最後になりましたが、本稿執筆の機会をいただきました日本金属学会関係者の皆様、ご指導いただいております先生方をはじめ、私の企業勤務時代に技術者としての基礎を築いてくださった方々に、この場を借りて心より感謝申し上げます。

文 献

- (1) K. Saito, T. Hirade and K. Takai: Metall. Mater. Trans. A, **50** (2019), 5091–5102.
- (2) K. Saito and K. Takai: ISIJ Int., **64**(2024), 1587–1598.
(2024年12月3日受理)[doi:10.2320/materia.64.198]
(連絡先: 〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1)