

1. 研究課題名：ギガサイクル疲労破壊機構に及ぼす水素の影響の解明と疲労強度信頼性向上方法の確立

2. 研究期間：平成14年度～平成18年度

3. 研究代表者：村上 敬宜（九州大学・大学院工学研究院・教授）

4. 研究代表者からの報告

(1) 研究課題の目的及び意義

金属の疲労強度については、歴史的には Wöhler が 1850 年代に疲労試験を開始して以来、鉄鋼材料では 107 回までの試験で破壊しなければ永久に疲労破壊は起こらないとしていわゆる「疲労限度」が決定されてきた。しかし、近年特に高強度鋼について、108～109 回の繰返しまで疲労試験を続行すれば、通常の疲労限度以下の応力でも材料内部の介在物などの欠陥を起点として疲労破壊が起こることが報告されるようになった。研究代表者らは 1998 年に、超長寿命疲労破壊をもたらす原因として介在物にトラップされた水素の役割の可能性を仮説として提案した。

本研究はこうした背景のもと、①水素の役割が決定的に重要であることの確証を得ること、②超長寿命疲労破壊のメカニズムの解明、③超長寿命疲労破壊の防止法の確立、を目的として開始された。

さらに、本研究が開始されて以降、地球温暖化問題やエネルギー問題に関連して、水素エネルギー社会実現に向けての取り組みが国内および欧米各国において活発化した。燃料電池自動車や家庭用定置型燃料電池の安全確保のために、水素環境中で長期間使用される部材の信頼性確保も重要な課題となった。しかし、水素が金属疲労に及ぼす影響については世界的にも研究例が少なく、疲労強度低下の機構が不明なことはもとより、強度設計の基礎となる実験データすらほとんど存在していなかった。そのような状況の中で、本研究の成果は数少ない貴重なものとして高い評価を得た。これを受けて、研究期間の後半では、水素の影響についての研究対象を高強度鋼の超長寿命疲労に限定せず、燃料電池システムに使用される各種金属材料の数万サイクル程度の寿命を想定した低サイクル疲労強度特性にまで広げて研究を行った。

(2) 研究成果の概要

本研究では当初の目的であった高強度鋼のギガサイクル疲労破壊に及ぼす水素の影響に加え、近い将来燃料電池システムへの使用が想定される各種金属材料の疲労強度に及ぼす水素の影響の解明に取り組んだ。得られた成果・知見を以下にまとめる。

- ① 超長寿命域における疲労き裂進展への非金属介在物にトラップされた水素の関与の証拠を、水素濃度を制御した試験片の疲労試験や 2 次イオン質量分析 (SIMS)、トリチウムオートラジオグラフィによって示した。
- ② 水素の関与を考慮した超長寿命疲労破壊のメカニズムを提案した。それを基に、材料中の水素濃度の制御や材料中に含まれる非金属介在物の寸法・種類の制御による超長寿命疲労強度向上の指針を得た。
- ③ 研究代表者・村上が提案したパラメータモデル、極値統計法および ODA (Optically Dark Area) の成長曲線に基づく疲労強度設計法を確立した。
- ④ 各種金属材料の疲労強度に及ぼす水素の影響についての実用的なデータに加えて、水素によってすべり変形が局在化する現象や、相変態に伴う水素拡散機構の変化がき裂進展の加速に果たす役割など、いわゆる水素脆化 (Hydrogen Embrittlement) と呼ばれている水素による疲労強度低下の機構解明への足掛かりとなる重要な知見を得た。

本研究の成果を総合的に分析して 2 つの重要なことが明らかになった。

- I. 水素はいわゆる脆化を引き起こすのではなく、転位を動きやすくし、すべりの集中をもたらす。
- II. ギガサイクル疲労の発端となる介在物周辺にトラップされた水素の役割は、低応力で微視的なすべりの集中を引き起こすことである。

5. 審査部会における所見

A (期待どおり研究が進展した)

本研究課題は、高強度鋼の超長寿命域での金属疲労強度に及ぼす水素の影響に関する研究と構造健全性評価手法の開発を目的としている。具体的には、介在物を起点とするき裂発生・成長と水素濃度の関連を定量的評価し、従来の疲労限度を基準とした設計法に代わる新しい信頼性確保の方法を提案している。水素によるすべり変形抵抗変化に起因する疲労破壊機構を解明し、水素燃料電池の金属構造への適用への展開を図るなど、基礎研究から社会のニーズに応える応用研究までの広範囲の研究は、目的を達成していると判断する。一方、研究の方法論や設計手法において新規性が乏しい。今後は、ミクロな原子レベルからの機構解明に基づく学理の探究を期待する。