

常識を破る鉄鋼材料の疲労特性：疲労き裂研究の新機軸
Research on supreme fatigue property in steel:
importance of microstructurally-small fatigue crack

課題番号：16H06365

津崎 兼彰 (TSUZAKI, KANEAKI)

九州大学・大学院工学研究院・教授



研究の概要：

出口を見据えた夢のある基礎研究領域として部材の設計強度を決定する金属疲労に注目して、独自に見出した常識を破る疲労現象のメカニズム解明を行います。その上で、従来にない優れた疲労特性を持つ鉄鋼材料を創製するとともに、疲労き裂先端近傍での材質変化を積極的に取り込むことによって、新しい疲労き裂研究の学問体系の土台を築きます。

研究分野：構造・機能材料

キーワード：疲労強度，疲労き裂進展，ひずみ時効，マルテンサイト変態，鉄鋼材料

1. 研究開始当初の背景

機械システムの破損事故の8割は金属疲労に起因しており、疲労は重要な破壊現象です。しかし『金属材料の疲労研究は沈滞しており閉塞感がある』との印象があります。『低サイクル疲労ではManson-Coffin則（塑性歪み幅が寿命を決定）が成り立つ、アルミ合金では疲労限が存在しない等の経験則が数多く存在して新たな発見はない；また疲労き裂進展・停留の力学的解釈・制御に関する学問的研究は成熟している』という認識です。

しかし、疲労研究の経験則や力学的解釈は、主要構造材料である炭素鋼（BCC相）とアルミ合金（積層欠陥エネルギーが高いFCC相）で得られたものです。どちらも転位の交差すべりが容易で金属材料としては特殊です。大量に使われる材料であるがために、本来は特殊な現象であるのに、これが金属の普遍的現象であると間違っていて認識されている可能性があります。

2. 研究の目的

出口を見据えた夢のある基礎研究領域として、部材の設計強度を決定する金属疲労に注目して、「疲労き裂研究の新領域」を拓きます。そのために、研究代表者らが独自に見出した特異な現象である(1)アルミ合金での疲労限の出現と(2)鉄鋼での低サイクル疲労の長寿命化の二つを研究シーズとして、そのメカニズムを徹底解明します。その知見をもとに、(a)高い疲労限を持つオーステナイト系ステンレス鋼や(b)水素環境下でも疲労特性が劣化しない鉄鋼など、従来常識を打ち破

る新規の鉄鋼材料の創製を行います。その上で、原子拡散、マルテンサイト変態などによって起こる疲労き裂先端近傍での材質変化を積極的に取り込んだ新しい疲労き裂研究の学問体系の土台を築きます。

3. 研究の方法

第一ステージ（H28, 29年度）では、独自に見出した(1)アルミ合金での疲労限の出現と(2)鉄鋼でのManson-Coffin則を破る低サイクル疲労の長寿命化について、実験によってメカニズムの解明を行います。メカニズム解明にあたっては、き裂先端という特殊な応力場での原子拡散、転位運動ならびにマルテンサイト変態挙動（図1）についての十分な観察と討論を行います。

第二ステージ（H30-32年度）では、応用と基礎の二本立てで取り組みます。応用として

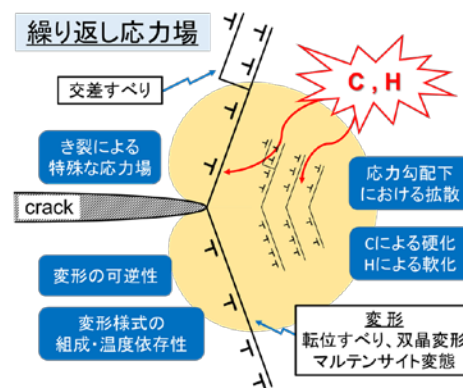


図1 本研究で対象とする疲労き裂先端の描像

は、前半に得られた知見を基に、画期的な疲労特性を持つ新規の鉄鋼材料を創製します。基礎では、き裂先端での材質変化を積極的に取り込んだ疲労研究を機械工学と材料科学でスクラムを組んで遂行し、新しい学問体系の土台を築きます。

4. これまでの成果

主要な研究活動成果を以下に示します。

■ **金属疲労に強いミクロ構造を鉄鋼材料で発見**：疲労き裂の発生と伝ばを抑えるために、き裂先端部分での局所的な力学状態と金属ミクロ構造の関係に注目した研究を行いました。き裂発生抑制の為にき裂周囲の金属が膨張や硬化する構造、き裂伝ば抑制の為にき裂面同士の摩擦が起こる構造に着目して、画期的な疲労特性を示す鉄鋼（Fe-9Mn-3Ni-1.4Al-0.01C）を見出しました。その成果は米国 *Science* 誌に論文として公表されました（6. で示す論文の[1]：2017年3月公開；引用数 86 件）。

■ **き裂先端での転位組織観察**：初年度に予算前倒しによって導入した高分解能 SEM を立ち上げ、疲労き裂先端での転位組織の観察に成功しました。成果は、*Materials Research Letters* 誌にオープンアクセス掲載されました（論文[2]：2017年10月公開；閲覧数 632 Views）。

■ **疲労限の出現のメカニズム解明**：Fe-30Mn-4Si-2Al 合金の低サイクル疲労の長寿命化のメカニズムとして、FCC→HCP マルテンサイト変態によってき裂先端での変形の局在化が抑制されることを提案しました。その成果は、*International Journal of Fatigue* 誌に論文掲載されました（論文[3]：2017年6月公開；引用数 5 件）。

■ **耐水素鋼研究の道筋をつける**：研究計画第二ステージで行う予定の応用研究対象である耐水素鋼開発の候補として高エントロピー合金に研究を展開し、引張特性に及ぼす水素の調査を行いました。成果は、*Scripta Materialia* 誌に論文掲載されました（論文[4]：2018年3月公開；引用数 12 件）。

■ **解説論文執筆**：本研究プロジェクトの位置づけを明確にするために、動的ひずみ時効/水素脆化/水素可視化に関する解説論文 3 編を執筆しました。水素可視化技術の論文は、広く成果を公表するためにオープンアクセス処置を行いました（論文[5]：2017年3月公開；閲覧 1,710 Views；引用 21 件）。

■ **2 回のプレス発表を行いました**：九州大学のプレスリリースを参照ください。

5. 今後の計画

これまでは順調に研究成果が得られています。今後も下表に示す当初計画に従って着実に研究を遂行していきます。

研究項目	第一ステージ		第二ステージ		
	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度	平成32年度
画期的な特性シーズのメカニズム解明	疲労限の出現と消失	低サイクル疲労の長寿命化			
優れた疲労特性を持つ新規な鉄鋼材料の創出	応用	情報	[2-1] 疲労限を持つオーステナイト系ステンレス鋼		
新しい疲労き裂研究の学問体系の土台を築く	基礎	情報	[2-2] 水素下で疲労特性が低下しない鉄鋼		
			[2-3] 時間依存性と相安定性を取り込んだ体系		

6. これまでの発表論文等

以下の 5 編の主要論文を含めて、これまでに合計 40 編の論文を発表しました。

[1] M. Koyama, Z. Zhang, M.M. Wang, D. Ponge, D. Raabe, K. Tsuzaki, H. Noguchi, C.C. Tasan. “Bone-like crack resistance in hierarchical metastable nanolaminate steels”, *Science*, **355** (2017) 1055-1057.

[2] K. Habib, M. Koyama, T. Tsuchiyama, H. Noguchi. “Visualization of dislocations through electron channeling contrast imaging at fatigue crack tip, interacting with pre-existing dislocations”, *Materials Research Letters*, **6** (2017) 61-66.

[3] Y.-B. Ju, M. Koyama, T. Sawaguchi, K. Tsuzaki, H. Noguchi. “Effects of e-martensitic transformation on crack tip deformation, plastic damage accumulation, and slip plane cracking associated with low-cycle fatigue crack growth”, *International Journal of Fatigue*, **103** (2017) 533-545.

[4] K. Ichii, M. Koyama, C.C. Tasan, K. Tsuzaki. “Comparative study of hydrogen embrittlement in stable and metastable high-entropy alloys”, *Scripta Materialia*, **50** (2018) 74-77.

[5] Motomichi Koyama, Michael Rohwerder, Cemal Cem Tasan, Asif Bashir, Eiji Akiyama, Kenichi Takai, Dierk Raabe, Kaneaki Tsuzaki. “Recent progress in microstructural hydrogen mapping in steels: quantification, kinetic analysis, and multi-scale characterization”, *Materials Science and Technology*, **33** (2017) 1481-1496.

7. ホームページ等

<http://www.mech.kyushu-u.ac.jp/~force/research.html#2>