

TODAY

随想:大学における研究費と教育効果



東京大学 生産技術研究所
サステイナブル材料国際研究センター
センター長・教授 森田 一樹

“アークプラズマを用いたクロム鉱石の溶融還元”という卒業論文をきっかけに研究を一義とした生活を始め約30年、懺悔とノスタルジーに満ちた気分で顧みることも多くなった。その間、周囲からさまざまな教育を受け自分なりの価値観も固まりつつある。一方、世の中の速い動きに追従できず、周りの学生に「昔は・・・」などとぼやく機会も増えた。この度、本誌巻頭言執筆の命を受け、僣越ながら、日頃問題に感じているところを思いつくまましたためさせていただくこととした。

我々にとって最重要ファクターである研究費については、諸先輩方や関係機関のご尽力のおかげで、非常に恵まれた時代となった。しかし、高度な装置による最先端研究や研究員の雇用、学生の旅費などフレキシブルに使える反面、分野による配分の差が拡大し、研究費獲得こそが研究者の使命という風潮が気にかかる。その背景には、国立大学の法人化等に伴う大学運営の資本主義化、自由度向上のための外部資金獲得の必要性が挙げられる。研究費獲得は、当然、個々の研究業績に裏打ちされるものではあるが、評価においては割算の分母にされてもよい“インプット”が、“アウトプット”より重視されている気がしてならない。

大学人としての“アウトプット”には、発表論文数や被引用件数で示されるような研究成果だけではなく、教育者としての貢献、すなわち学生を教え育て社会に送り出すという重要な使命が含まれており、後者の目的には高額な研究費を必ずしも必要としない。時として、学生にとって恵まれすぎた研究

環境が金銭感覚を麻痺させ、自身の実力を勘違いさせる危険もはらんでいる。例えば、原理原則を知らずとも解析結果を瞬時に教えてくれる機器は、研究の効率化をもたらしても教育効果は小さい。社会が修士や博士の学位取得者に求めるものは何か。博士教育の理想はT字型とよく言われるが、結果として身についた知識よりもむしろ重要なのは、問題点を見出し、テーマを設定、遂行する能力と方法論を有することである。しかし、我が国では、学位取得者に対する要求にコンセンサスがなく、社会の受け入れ体制も未だ熟していないように感じられる。このような社会意識を改革することも、大学における人材育成が抱える課題の一つである。

一方、何事も疑わず“待ち姿勢”が目立つ最近の学生自身の意識改革もまた必要である。小職の研究室では、留学生も含め博士課程の最初の半年は放任し、小職の目指す範囲内で、研究の方向性を決めるよう促している。ほとんどの場合、右往左往しながら苦しみぬき、最後には独自のテーマを創り上げている。道中、飢えや挫折、方針変更のリスクもつきまとうが、潤沢な研究費で与えられた課題を指示通りこなす研究より、自立した研究者の育成に適しているのは自明である。

先日、ハラスメントに関する講習会に出席した。残念ながら日本社会がドライになり、学生と教員双方からの心の距離が広がったのは事実かも知れない。しかし、このような講習会を大学という場で行わなければならない現状を憂えるとともに、ベースにある保身的な考え方に正直いらだちを感じている。中でもご専門家の“学生の将来に影響を及ぼすような言動は慎むべき”というご講話には呆れてしまった。人の将来に影響を及ぼさない教育って何だろうか。

もはや修行ではなく、ややもするとビジネスと割り切って研究と向き合う学生が増える中、満ち足りた研究費が仇とならぬよう、ツボを押さえた人材育成に努めたい。まずは己に警鐘を鳴らしながら、リスクを恐れずに、持続可能社会形成のための教育と研究に研鑽を積んでいく所存である。

NEDO「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」における
内部起点疲労破壊サブグループの活動（2）
横浜国立大学 梅澤 修（内部起点疲労破壊サブグループリーダー）

1. はじめに

本研究開発項目では、「材料力学と材料因子の両方を考慮した世界初の転動疲労の寿命予測式を構築し、目標寿命に対する介在物サイズの臨界値を得る」との目標設定を行い、平成21年度までに、内部起点疲労損傷状況と初期き裂観察状況と合致する非金属介在物周囲の応力シミュレーション技術を構築・検証し、初期き裂形態に影響を及ぼす酸化物系介在物の各種要因を抽出に成功した段階にある。また、素過程である局所損傷・き裂発生、き裂伝播・停留を実験的に検出・解析する共通基盤技術開発と追跡調査を行い、これらの現象を予測するシミュレーション技術の構築、剥離メカニズムの明確化を経て、新しい寿命予測式や介在物制御指針を考案するために密接な産学官連携のもと研究を推進している。本報告では、中間段階における進捗について紹介する。

2. 成果報告

2.1 酸化物系介在物を対象とした剥離損傷プロセスの調査

酸化物系介在物を対象としたき裂の発生段階の詳細を調査するため、最初の経時変化観察時期を繰り返し数 10^4 回として転動試験を実施した。図1に代表的な超音波エコー像の経時変化観察結果を示す。これは、 10^4 回時点でエコーサイズの増大、すなわち初期き裂が認められた例である。き裂の発生した転動繰り返し数はほぼ同等であるにも関わらず、剥離寿命は試験片によって差異が認められた。次に剥離プロセスについて考察する。図2に

転動疲労にともなうエコーサイズの変化を示す。ここで、まず初期き裂発生について、ほぼ同サイズの推定介在物径（試験前）にも関わらず、き裂発生有無に差が生じており、また推定介在物径（試験前）が異なっているにも関わらず、転動疲労過程の極めて初期で、ほぼ同等な転動繰り返し数でき裂発生が認められることから、き裂発生寿命は介在物径によってのみ支配されるわけではないと考えられる。次に剥離寿命について、き裂発生が認められたのは、ほぼ同繰り返し数であるにも関わらず剥離寿命に差異が認められ、推定介在物径（試験前）のみに支配されているとは言えない。これらのことから、剥離プロセスは現象として、き裂発生期間とその停留・伝播期間とから成り、き裂発生が転動疲労過程の極めて初期であることから、剥離寿命は後者が支配的であると言える。また、剥離プロセスは介在物径のみが支配する現象ではないと考えられることから、介在物とマトリックスとの界面状態、その存在位置や応力状態など、様々な要因を考慮しなければならないと考えられる。以上から、今回得られた世界初のデータは、酸化物系介在物に起因した転動疲労メカニズムを解明する上で非常に有用なものと考えられる。

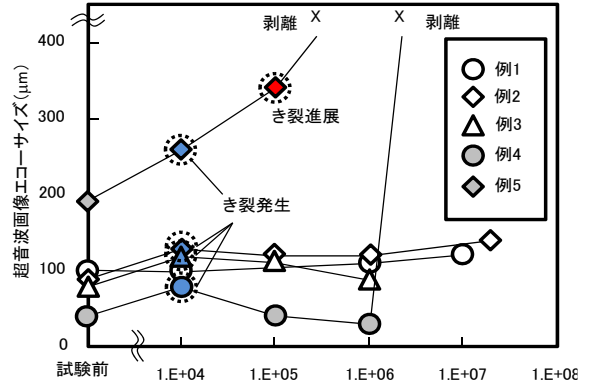


図2 転動繰り返し数増加にともなう超音波エコー像サイズの変化

2.2 転動試験における疲労損傷と残留応力場

SCM420H 鋼に人工欠陥を導入して転動疲労を与えた試験片の人工欠陥周りの様子を図3に示す。 3.0×10^4 回転動疲労材における人工欠陥周りには $100 \mu\text{m}$ 長さ以下の初期き裂が認められる。この初期き裂は 3.25×10^6 回材における主き裂と同様な深さに位置し、ひずみ勾配領域に存在する。また、き裂が形成した領域では転動疲労にともなう塑性変形が顕著であり、自由表面には凹凸形成が形成している。すなわち、塑性ひずみ振幅が大であり、低サイクル疲労損傷形態に類似している。以上は、繰り返し初期段階でのき裂形成とひずみ勾配による Mode I 応力場の作用が局所変形に関わるとの考えを支持するものである。 10^3 回までに飽和変形組織が形成され、局所変形による自由表面への凹凸形成からき裂形成が生じると推定される。

図4(a)に示すように、 10^6 回材では表面から $400 \mu\text{m}$ の範囲で圧縮残留応力が付与されている。特に、き裂発生深さに対応する表面からの距離 $80 \mu\text{m} \sim 250 \mu\text{m}$ の範囲では、高い圧縮残留応力と残留応力の勾配が生じており、ピーク位置は表面から $180 \mu\text{m}$ 深さである。また、 10^4 回材に比べ、表面から $300 \mu\text{m}$ 深さの範囲における残留応力の平均値が高い。 10^4 回材においても 10^6 回材と同様に、圧縮残留応力が付与されており、ピーク位置は表面から $300 \mu\text{m}$ 深さである。

介在物情報	試験前	10^4 回	10^5 回	10^6 回	10^7 回
例1 推定深さ ~80 μm 推定径 16 μm					剥離 2x10 ⁶ 回
例2 推定深さ ~80 μm 推定径 49 μm					剥離 5x10 ⁵ 回

図1 転動早期段階からの超音波エコー像の経時変化

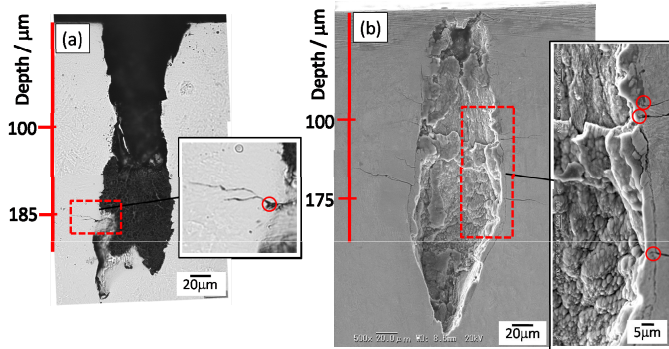


図3 転動疲労材 (SCM420H) における人工欠陥周りの初期き裂および人工欠陥内壁: (a) 3.0×10^4 回, (b) 3.25×10^6 回

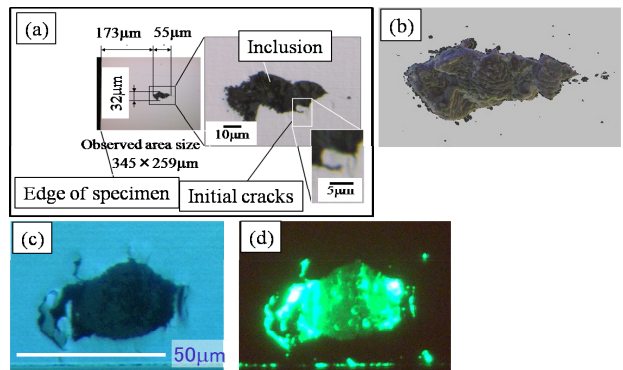


図5 軸受鋼中の介在物およびき裂の高分解能観察: (a) 断面観察像, (b) 三次元再構築像, (c) 落射光像, (d) 蛍光観察像

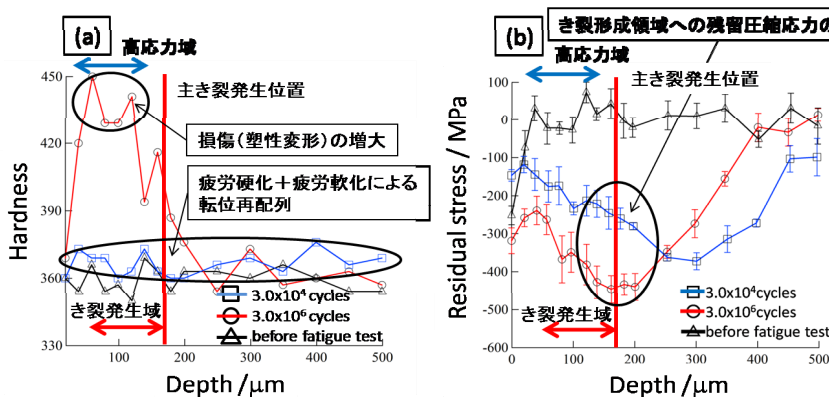


図4 転動疲労材 (SCM420H) における (a) 硬さおよび (b) 残留応力測定結果

また、図 4 (b) に硬さ測定結果を示す。 10^6 回材では表面から $40 \mu\text{m} \sim 180 \mu\text{m}$ の範囲で高硬さを示しており、塑性変形の導入 (加工硬化) に関係していると推定される。一方、 10^4 回材では硬さに大きな変化はなく、繰り返し飽和変形組織の形成段階では、高圧縮残留応力の領域全体に大きな塑性変形は導入されておらず、き裂形成は局所的な変形集中によるものと考えられる。以上の傾向は、SUJ2 鋼による同様の解析結果からも同様である。

2.3 材料内部に存在する介在物やき裂の3次元形態・分布の解明

X線CTやMicro-CTでの撮影が困難な鉄鋼材料内部に存在する大きさ数十ミクロン程度の介在物の観察と、精細な三次元形状モデルの作成を行う。高分解能観察を行うために、従来使用していた倍率1/3倍の接眼レンズ部を倍率1倍のものに交換し、倍率20倍の対物レンズとともに使用した。新たな条件により観察された断面画像を図5(a)に、三次元再構築像を図5(b)に示す。観察分解能は $0.07 \mu\text{m}$ となり、介在物の詳細形状および微細き裂を観察出来ていることがわかる。さ

らに、介在物部とき裂部を明確に判別するために、き裂部の選択的な蛍光染色を行った。図5(c),(d)に、周囲にき裂の存在する介在物を、落射光および蛍光によって観察した結果を示す。蛍光画像は、はじめに蛍光塗料を塗布し、それを乾布で除去することにより得た。蛍光画像の露光時間は5.2秒とした。落射光像では、介在物およびき裂部が共に黒色画像となり判別が困難であるが、蛍光観察像では、き裂部に蛍光色素が入り込み選択的により明るく顕在化されるために、介在物とき裂部の判別が容易となっていることがわかる。また、得られた蛍光画像から、介在物内部にも孔やき裂

が存在していることがわかった。
2.4 応力シミュレーションによるき裂発生挙動の検証

介在物とマトリクス界面の密着状況の影響を検討するため、界面が完全に剥離した状態をモデル化して計算し、引張歪、せん断歪をもとにそれぞれき裂発生位置と方向を予想する。なお、界面剥離モデルにおいては、計算の収束性が著しく低下したため、六角形の角部に丸みをもたせて収束性を改善した。解析結果を図6に示す。界面が剥離したモデルにおいて、せん断歪をもとに予測したき裂発生位置は左右部からとなり、実際に近づいたものの、方向は上下方向であり、やはり観察結果とは大きく異なった。一方、界面剥離したモデルにおいて引張歪をもとに予想したき裂発生位置と方向は、左右位置から斜め方向となり、観察結果とよく一致するようになった。これらの検討結果から、き裂発生におよぼす影響因子として、介在物とマトリクス界面の密着状況を考慮する必要があり、また、

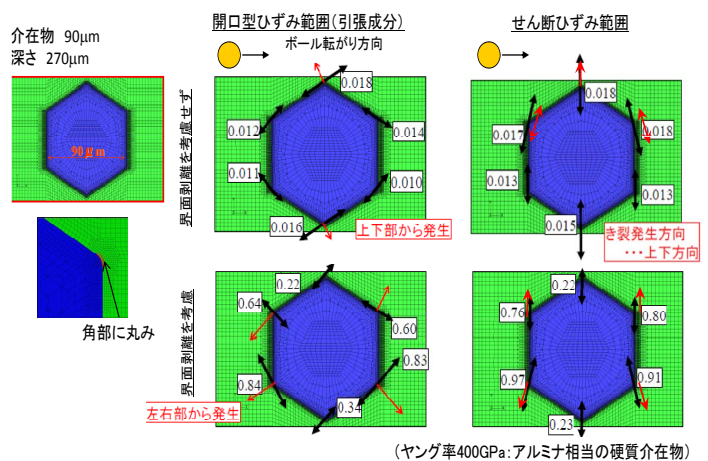


図6 実介在物実を模した六角形介在物モデルによる応力シミュレーション解析結果

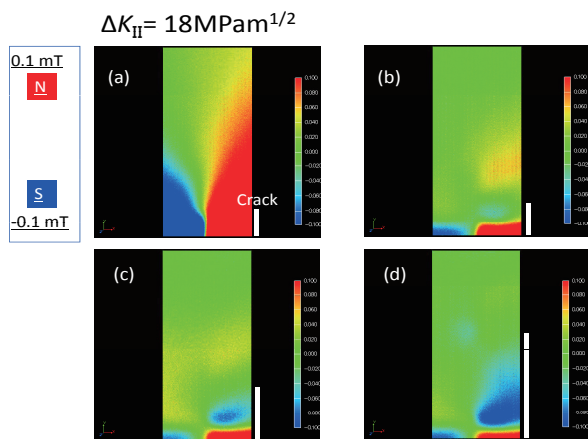


図7 き裂進展挙動にともなう磁場の変化 ($\Delta K_{II}=18\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) (磁場レンジは $-0.100\text{mT} \sim +0.100\text{mT}$):
 (a) $N=0$, き裂長さ $a=2.00\text{mm}$, (b) $N=1.0 \times 10^5$, $a=2.37\text{mm}$,
 (c) $N=2.0 \times 10^5$, $a=3.83\text{mm}$, (d) $N=3.0 \times 10^5$, $a=7.77\text{mm}$.

き裂発生に対しては、引張応力 (歪) 成分の影響が大きいことが示唆された。

2.5 三次元磁場顕微鏡によるき裂進展挙動の動的・連続観察

き裂進展にともなう磁場の変化を可視化した結果を図7に示す。実験は応力拡大係数幅 $\Delta K=18\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ で行った。図中の中央部にはき裂があるが、混乱を避けるため、各繰返し数でのき裂長さを白いバーで表し、磁場分布の枠外に示した。き裂は (a) の繰返し数 $N=0$ から (d) 繰返し数 $N=5.0 \times 10^5$ 回まで、(a) き裂長さ $a=2.00\text{mm}$ から (d) $a=7.77\text{mm}$ まで安定して進展した。(a) と (b) を比較すると、き裂が 0.37mm しか進展していないが、磁場の分布は大きく変化していることがわかる。このことから、磁場はき裂進展初期であっても、進展による影響を受けて変化することがわかる。その後、き裂進展に

ともなって、分極が起り、き裂の進展にともない、磁場の領域も移動・拡大していることがわかる。き裂停留時の磁場特性と合わせ、磁場の移動を定量化することで、き裂の進展を評価することができる。

2.6 材料力学と材料因子を考慮した寿命予測式の構築に対する実験的アプローチ

転動疲労により非金属材料からのはく離を起こす場合、極初期のき裂生成の後、全寿命の大半を伝ばが占めていることは明らかである。よって寿命予測は初期の欠陥の大きさ、すなわち非金属材料物径と付与される応力により影響されるとした破壊力学的な考えに基づくべきである。

S-N型 (負荷荷重を変えた) の寿命試験を実施し、得られたデータを $\Delta K_{II}'$ で整理した結果を図8に示す。この図から、全体的に $\Delta K_{II}'$ が大きくなるほど寿命は短くなる傾向を示すが、ばらつき下限を見ると $\Delta K_{II}'$ が概ね $30\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下の場合、 10^5 後半から 10^6 サイクルであり、 $\Delta K_{II}'$ が $30\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を超えると寿命は大きく低下することがわかる。つまり、欠陥の大きさがある一定レベルまでは、安定した速度で進展するが、ある大きさを超えると急速にき裂は進展するものと推定する。なお、 $\Delta K_{II}'$ が $10 \sim 20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の範囲では2オーダー以上ものばらつきが認められる。この理由は、前述のように非金属材料の形状や組成、非金属材料自体の割れやマトリックスとの界面はく離の有無、さらには、き裂生成部のマトリックスの結晶方位によってき裂の生成や進展のし易さが異なるためと推定され、無限寿命のものもき裂自体が生成しない可能性が大きいと考えられる。

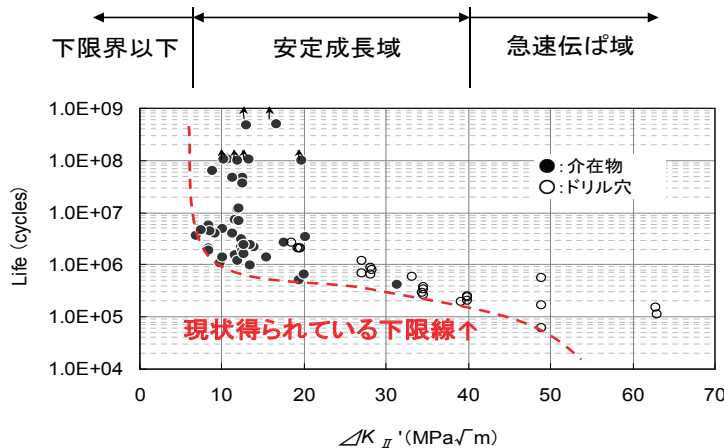


図8 $\Delta K_{II}'$ とスラスト寿命との関係 ($P_{\text{max}} = 5.3\text{GPa}$)

お知らせ

【人事異動】

- 平成22年3月31日付け
城田 良康
[旧] 鉄鋼材料研究部 主席研究員
[新] 退職
松浦 尚
[旧] 非鉄材料研究部 主席研究員
[新] 住友電気工業株式会社
- 平成22年4月1日付け
櫻田 隆
[旧] 住友電気工業株式会社
[新] 非鉄材料研究部 主席研究員

【新人紹介】



櫻田 隆
(さくらだ たかし)
①静岡県出身
②1961年4月生
③横浜国立大学大学院
工学部・物質工学科
修士課程終了

1988年、住友電気工業入社。半導体技術研究所。入社以来、主として化合物半導体の結晶開発に従事。GaAsや各種半導体材料に簡易素子を作製して、素

子特性を材料開発にフィードバックする評価等を主に担当。

- ④「窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術」や「マグネシウム新成型技術」のプロジェクトを担当します。省エネルギーや地球環境にやさしい新材料の各種分野への展開に向けて、広い視野を持って各プロジェクトの成功に貢献できればと思っています。
- ⑤多趣味ですが、テニスやスキーなど、どちらかというとアウトドア派。テニスは草トーナメント大会などにも参加しています。

The Japan Research and Development Center for Metals

JRCM NEWS / 第283号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。
 本書の内容を無断で複製・複製・転載することを禁じます。

発行 2010年5月1日

発行人 小紫正樹

発行所 財団法人 金属系材料研究開発センター

〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11東洋海事ビル6階

T E L (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285

ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>

E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp