



## 躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

# 材料信頼性研究活動を通じて感じる 基礎・基盤研究の重要性

小野嘉則

Yoshinori Ono

物質・材料研究機構  
材料信頼性評価ユニット  
極限環境材料グループ

## 1 はじめに

機械、構造物やプラントを設計する場合には、使おうとする材料が、想定される環境でどのような特性を示すのかを見極めるためのデータを取得し、整備することが重要である。筆者が所属するグループでは、液体水素 (20K) や液体酸素 (90K) を用いる液体ロケットエンジンや、液体ヘリウム (4.2K) を用いる核融合炉や磁気浮上列車等の超伝導応用機器に使われる構造材料について、極低温あるいは高圧水素ガス環境中での材料特性の取得・蓄積と信頼性向上に関する研究を進めている。具体的には、引張試験、疲労試験、衝撃試験などの試験条件を吟味し、極低温あるいは高圧水素ガス環境中で評価を可能にする試験設備や試験法を開発・確立し、世界的にも貴重な材料試験データを蓄積する (図1)。そして、

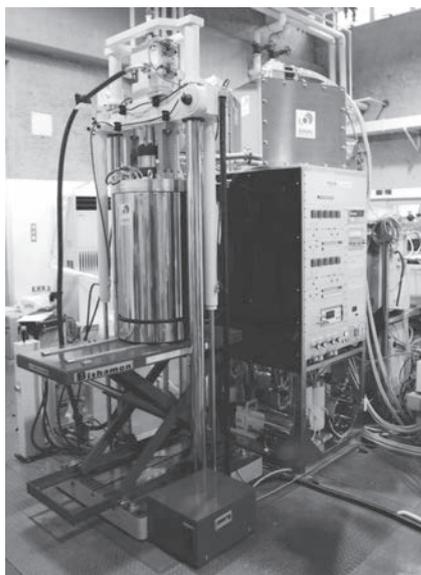


図1 極低温疲労試験設備の外観写真  
本設備は、液体ヘリウム (LHe) の再凝縮装置を有するため、LHe 環境中で、LHe を補給することなく、長時間の試験が可能である

材料の組織と特性の関係や変形と破壊に関する研究により、取得したデータの裏付けを行っている。そのような研究活動の中で得られた液体ロケットエンジン用材料の特性評価データは、H-IIAロケットおよびH-II Bロケットの第1段エンジン (LE-7A) と第2段エンジン (LE-5B-2) の強度余裕評価や改良設計に使用されており、宇宙関連材料強度データシート<sup>1)</sup>としても一部公開されている。

本稿では、まず、筆者が構造材料の信頼性に係わる研究活動の中で得た知見の一部として、Ti-5Al-2.5Sn extra low interstitial (ELI) 合金の高サイクル疲労特性に関する研究を紹介させて頂く。そして、研究活動を通じて感じていること、考えていることについて付記させて頂く。

## 2 研究紹介

### 2.1 Ti-5Al-2.5Sn ELI 合金の高サイクル疲労特性と 疲労破壊起点部方位の温度依存性

代表的な  $\alpha$  チタン合金であるTi-5Al-2.5Sn ELI合金は、低温で高い強度とともに優れた延性・韌性を有することから液体ロケットエンジン用材料として使用されている。筆者らは、同合金鍛造材の低温 (4.2, 20, 77K) での高サイクル疲労特性を調査し、低温では室温に比べて引張強度は高くなるが、高サイクル疲労強度は低くなることを明らかにした<sup>2)</sup>。疲労破壊起点部には平坦部 (ファセット) が見られるが、低温と室温ではその様相が異なっていた。そこで、本合金の疲労き裂発生機構を明らかにするために、SEM-EBSD (電子線後方散乱回折法) を用いて、起点部に形成されるファセットの面方位を測定した<sup>2,3)</sup>。その結果、起点部の面方位は、低温 (77K以下) では  $\{11\bar{2}1\}$  双晶面<sup>2)</sup> (図2) で、室温では (0001) 底面<sup>3)</sup> であり、き裂発生機構が低温で変化することが示唆された。低温での疲労強度低下が双晶変形と関係していると推察し、現在は、疲労試験中の  $\{11\bar{2}1\}$  双晶の形成挙動とそれ

に関連したき裂発生挙動に着目して調査を進めている。また、低温疲労における損傷が双晶変形と位置づけて、低温疲労損傷評価法の確立を試みている（これは、実機コンポーネントの燃焼試験後の余寿命評価に繋がるものと考えている）。純チタンやチタン合金における引張変形などの静的荷重が加わる場合には、双晶変形は加工硬化率の増大ならびに延性の向上をもたらすことが知られている。しかし、高サイクル疲労試験のように繰り返し荷重が加わる場合には、双晶変形は特性に悪影響を及ぼすことがあり、特性改善のためには、むしろその発生を抑制することが重要と考えられる。

2.2 Ti-5Al-2.5Sn ELI 合金の高サイクル疲労特性に及ぼす応力比の影響とその温度依存性

実際の機械部品として使用される場合、作用する荷重条件は平均応力が広範囲にわたるため、疲労特性に及ぼす平均応力（応力比  $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ ）の影響を把握することは重要である。図3は、室温 (a) および77K (b) での疲労限度 ( $10^7$ 回強度) 線図である<sup>4)</sup>。 $10^7$ 回強度（縦軸）を比較すると、 $R = -1, 0.01, 0.5$ （全て  $\sigma_{max} < \sigma_{0.2}$  の試験）のいずれの応力比でも室温より77Kの方が低い。これは、2.1節で示した双晶変形に伴う疲労き裂発生と関連していると推察している。図中には  $\sigma_a = \sigma_{w, R=-1} (1 - \sigma_m / \sigma_B)$  で表される修正 Goodman 線図を破線で示している。 $\sigma_{w, R=-1}$  は  $R = -1$  試験の疲労限度、 $\sigma_m$  は平均応力である。修正 Goodman 線を用いれば、多くの材料について、安全側の推定ができることが知られている。室温の場合、 $10^7$ 回強度は修正グッドマン線上にほぼ位置しており、いずれの応力比においても修正グッドマン則で予測可能であることがわかる。一方、77Kでの修正グッドマン則による予測は、 $R = 0.775$  付近の高応力比側では安全側になるものの、 $R = 0.01$  と  $0.5$  では危険側になっている。本供試材では、低温において、引張-引張荷重下での高サイクル疲

労強度が、疲労限度線図から予測される強度よりも低くなるといった特異な平均応力依存性を示すことが明らかになった。このような低温での高サイクル疲労強度の特異な

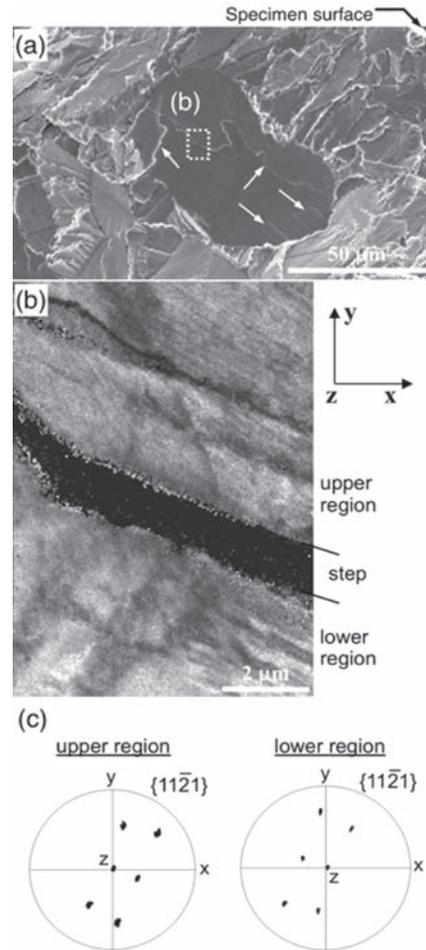


図2 (a) 77Kで疲労破壊した試験片の疲労破壊起点部のSEM写真 (b) 方位解析を行った部分（ファセット）のImage quality map ((a)中の(b)) (c) ファセット上側と下側の {11-21} 極点図

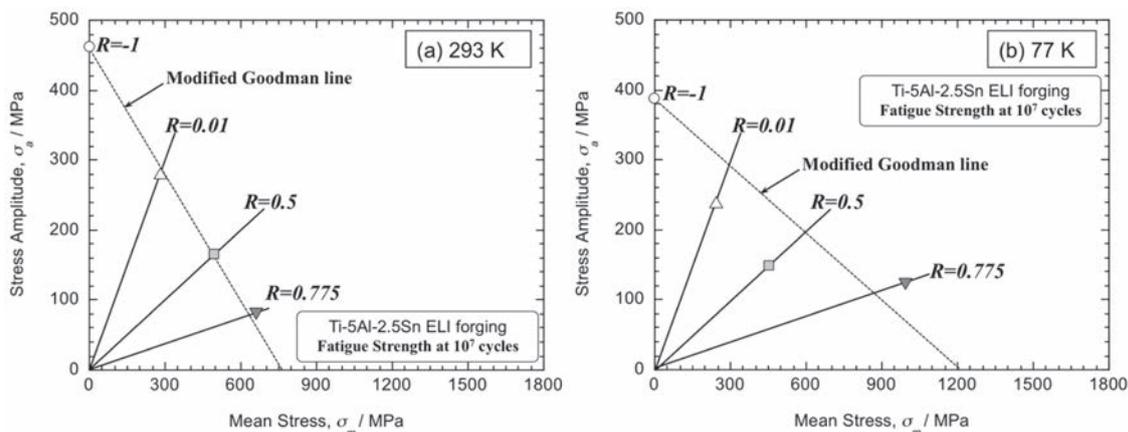


図3 Ti-5Al-2.5Sn ELI 合金鍛造材の疲労限度線図 (a) 293K、(b) 77K

平均応力依存性は、等軸 $\alpha$ 組織を有するTi-6Al-4V ELI鍛造材でも確認している。現在、この現象について、 $\alpha$ 相(hcp構造)におけるすべり変形、双晶変形の起こりやすさとその温度依存性に着目して検討を進めるとともに、疲労き裂進展挙動に及ぼす応力比の影響とその温度依存性についても調査したいと考えている。

### 3 研究活動を通じて感じていること

昨今の安全性・信頼性に関する研究が重要視される中で、筆者は、極低温環境をはじめとした特殊環境で構造部材として使用される材料に関して、構造体の設計や保守に反映されるようなデータの取得・解析にかかわる研究に従事している。そこでは、設計者などの材料のユーザーの方々とは議論することが多く、構造体を造りあげていく上でどのような材料が必要か、使用する材料に関して必要なデータは何か、取得したデータをどのように解釈して利用するのか、利用できるデータを揃えるまでにどのくらいの費用がかかるのかなど、「材料を使う」ということに触れる。筆者も材料評価の一部を担当させて頂くわけであるが、その機会あるごとに、材料の研究者として、材料のことをしっかりと理解し、信頼できる特性データを取得し、データが意味することをきちんと解釈し、それを説明できることの重要性を認識する。さらに、極低温をはじめとした特殊環境における特性データは、その環境特有の測定技術や蓄積されてきたノウハウによって信頼性が支えられているため、それらを理解して体得すること、レベル向上を図ることの大切さを強く感じる。また、材料のユーザーの方々から、材料を使う過程で起こった不具合事象について時折相談を受けることもある。その際は、自らの材料研究に関する経験・知識を総動員して、問題解決に協力できるよう対応しているが、このような機会では、専門分野の研究

遂行だけでは、気づかない課題に直面することがよくある。

このような経験をするたびに、基礎・基盤研究とそれを継続することの重要性を再認識する。そのため、研究活動の中で、自分が気づいた課題については、できる限り基礎研究のテーマとして具現化して行きたいと考えている。そして、それを課題解決や測定技術の向上につなげていくことが安全性・信頼性を支えていくことに直結すると信じている。研究者として、自分の未熟さにあきれることの方が多い日々であるが、その一方で得られる「なにくそ」というエネルギーで頑張りたい。

前掲の研究をはじめとした成果は、これまで多くの先生・先輩方、および共同研究者の方々のご指導や叱咤激励の下で得られたものです。この場を借りて厚く御礼申し上げます。安全性・信頼性の研究に係わる研究者として、「信頼してもらえ」研究者になるべく、今後も努力して参る所存です。ご指導・ご支援の程、よろしくお願い致します。

#### 参考文献

- 1) (独) 物質・材料研究機構 材料情報ステーション 物質・材料データベース <http://smds.nims.go.jp/space/>
- 2) 小野嘉則, 出村雅彦, 由利哲美, 緒形俊夫, 松岡三郎, 堀秀輔: 日本機械学会論文集A編, 74-739 (2008), 329-334.
- 3) 小野嘉則, 出村雅彦, 由利哲美, 緒形俊夫, 松岡三郎, 砂川英生: 日本材料学会 第12回フラクトグラフィシンポジウム前刷集, (2010), 68-70.
- 4) 小野嘉則, 由利哲美, 緒形俊夫, 松岡三郎, 砂川英生: 第26回宇宙構造・材料シンポジウム講演集 CD-ROM, (2010), A8.

(2012年3月5日受付)

## 先輩研究者・技術者からのエール

横浜国立大学 大学院工学研究院 機能の創生部門 教授

梅澤 修

「ふえらむ」記事の新企画、「躍動（若手研究者・技術者の研究・技術紹介）」が立ち上がり、戸高先生（豊橋技科大）に続く小野博士（物材機構）へのコメント役を依頼されました。小野博士は、物材機構において、材料ユーザーとのやり取りをする状況、かつ極限環境での材料使用と世界に唯一のデータを取得する立場にあります。地道な材料信頼性データ評価ですが、より高い見識をもって事に当たるには、自らが基礎・基盤研究を通じて成長することが必須であり、「信頼してもらえ」研究者たらんとする同氏の思いに共感する一人です。そこには、データ評価と基礎研究との狭間に置かれたある種のジレンマも感じとれます。

道を開くには、先に加藤先生（東工大）がコメントされている「自然体」である姿が、研究者に限らず、最も大切な要件だと思います。自らを振り返っても、わずかなことであれ、自信を持てる分野や内容をもてるかどうかは、多くの先輩方の知遇を得て教えを請う上で、自らを勇気づけ、背伸びをしな

い等身大の姿で接する大きなきっかけを与えたいと思います。小野博士は、極限環境下にある材料の信頼性データ評価の第一人者であり、そこで得られた貴重な知見から、新たな視点での基礎・基盤研究への取り組みを進められるものと期待しています。なぜならば、極限環境下での破壊現象は、材料そのものの弱部を如実に語るからに他なりません。すなわち、材料の本質を垣間見ることができると信じています。モデルを考え、真理を目指してその姿を愚直に追い詰めていくことは、まさに基礎研究の一端であると思います。今後とも、共に切磋琢磨して進んでいければうれしく思います。

産学官、それも国内外を問わない関係を構築されており、近いうちに外国留学のチャンスを得るとのお話も伺っています。さらに視野を広げ、新たな研究テーマに邁進する機会を得て躍進していただければと思います。小野博士のますますのご発展をお祈りします。

新日本製鐵（株） 鉄鋼研究所 薄板材料研究部 主幹研究員

藤井 秀樹

若手研究者の代表格である小野先生に対し、先輩研究者としてコメントするようにとの依頼を受け、バリバリの若手のつもりであった私としては、もう若くないのかな？と一抹の（いや、相当な）寂しさを禁じえませんでした。実年齢はともかく、気持ちはほんの少しだけ先輩のつもりで産業界側研究者としてコメントさせていただきます。

小野先生が携わっておられる極低温、高圧水素中などの極限環境下での構造材料特性評価は、構造部材の安全性・信頼性に直結する研究分野で、今後の人類の進歩を左右しかねない重要分野であると言っても過言ではないと、先端科学技術に携わる者であれば誰しもが認めるどころです。しかし、様々な種類の材質の特徴を十分に理解する必要があり、また、様々な過酷な使用環境の特徴をも十分に理解した上で、安全にかつ効率的に適切な評価を行う必要があり、決して平易な分野ではありません。極限環境材料評価はまさに極限研究環境に耐えて初めてなし得るものと私は理解しています。

このような理解のもとで小野先生の「躍動」を読ませていただき、単にデータを取得するだけでなく、材料がその特性を示した理由まで遡って探求し、取得データの確実性・信頼性を科学的に裏付けようとする基礎・基盤研究重視の姿勢は、強く共感を覚えます。また、データ利用者のニーズを常

に汲み上げ、データの使われ方まで認識して研究を行う姿勢も、使う側から見れば大変ありがたく、データ利用者側の技術の大きな進展を促しているはずで。この「躍動」の記事に書かれている「極低温環境における繰り返し応力下でのチタン合金の双晶発生、ファセッティング、疲労破壊」に代表される基礎・基盤解析研究は、今後ともぜひ続けて頂きたい。

しかし、「基礎・基盤研究」について、敢えて材料メーカーの研究者として付け加えさせていただきたいことがあります。それは、材料評価研究における基礎・基盤研究の出口は取得データのユーザ（構造部材設計者）だけではないということです。構造部材だけでなく材料製造も大切な物造りです。小野先生の研究成果を基に、さらに極限環境耐性の強い材料が開発できれば、それは素晴らしいことではないでしょうか。ある意味これは材料メーカー側の仕事でもあります。材料製造側への基礎研究成果のフィードバックもぜひ意識していただきたい。また、材料メーカー側の若手研究者をも大いに刺激し、指導していただければと思います。私の周辺の若手にも小野先生のご指導を受けるよう指示しました。もう逃げられませんよ？ 今後のますますのご発展を心より祈念しております。