

3. 材料力学部門

3.1 部門活動

3.1.1 ポリシーステートメント

日本機械学会の各部門のポリシーステートメントは、2004年に策定され、2007年と2012年に順次改訂されてきたが、2014年に一層の充実が図られた。材料力学部門では、1) 基礎学術の深化と普及、2) 実用的課題の抽出と解決策の提示、3) 国内外での地位向上とリーダーの育成の3点を基本ポリシーとして活動を行っている。過去10年間における材料力学部門の主要な活動を表1に示す。

3.1.2 講演会・シンポジウム

M&M 材料力学カンファレンスは、毎年開催される部門の一大イベントである。研究発表講演に留まらず色々な行事を企画することによって部門の活性化を図るために、2004年から従来の材料力学部門講演会という名称から変更している。過去10年間は毎年500名程度の参加者を得て、400件程度の講演発表を初めとする多様な企画が実施されている。なお、講演論文集については、2007年からはCD-ROM化、2015年からはWEB化を実現している。

若手シンポジウムは、2002年から2～3年毎に開催している合宿形式の行事で、学生を除く若手会員のみが講演発表し、互いの研究内容を理解し合うとともに、親睦を深めることを目的としている。中堅会員が運営を担当し、ベテラン会員がコメンテータとして参加することによって、世代間の交流を深めるとともに、世代間で順次役割を引き継ぐ体制も構築している。2008年、2010年及び2016年には国際シンポジウムとして開催し、特に2010年と2016年は米国で開催することによって、海外の若手研究者との交流も深めた。

なお、その他の講演会やシンポジウムの開催回数は2006年以前に比べて減少しているが、これはさまざまな活動がM&M材料力学カンファレンスに集約されていることによるものである。

3.1.3 分科会・研究会活動

2007年度から2016年度の期間に活動した部門所属分科会（P-SCD）は8件、部門所属研究会（A-TS）は9件であり、材料力学部門が関係した部門協議会直属分科会（P-SCCII）は5件であった。

日本機械学会では、特に産業界の会員にとって魅力的な活動を行うことが過去10年以上にわたる大きな課題となっている。材料力学部門ではこの課題について特に2013年から2015年にかけて議論した結果、部門所属の分科会・研究会の活動を活発化させることが重要であるとの結論を得て、そのための一手段として2013年度から分科会・研究会への補助金を増額した。今後、分科会・研究会活動の更なる活発化が期待される。

3.1.4 国際交流活動

材料力学部門が企画運営している国際会議は、International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics (ATEM) と Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength (APCFS) の二つである。ATEMは1993年から2年毎に開催してきたが、その後アジア地域の実験力学に関する複数の国際会議間で調整がなされ、2003年からは4年ごとに開催している。過去10年間では2007年、2011年、2015年の3回が開催された。いずれも多数の参加者を得て、アジア地域の実験力学に関する主要な国際会議に成長した。

一方、APCFSは、中国（CMES-IMME）及び韓国（KSME-MFD）と回り持ちで1993年から2～3年毎に開催しており、過去10年間では2009年（APCMM）と2016年に日本で開催された。なお、2016年には同様のテーマで1991年から開催されている日本機械学会協賛の国際会議International Conference on Fracture and Strength

of Solids (FEQFS) も日本で開催され、関係各国の事情はあるものの、今後の新たな展開を期待する声もある。

この他、1992年に米国の実験力学会 (SEM) と材料力学部門の間で締結した協力協定があるが、締結後25年を経て見直しの必要が生じている。また、1993年から2年毎に開催され、RC271分科会を中心に熱工学部門、計算力学部門とともに協力してきたASMEのInternational Conference on Electronics Packaging (InterPACK) についても、2017年度に向けて方向性を見直しつつある。

以上のように、現在の国際交流活動は、いずれも1990年代前半に当時の部門関係者の努力によって立ち上がったものであるが、四半世紀を経て、近い将来の新たな展開が期待される。

3.1.5 講習会

講習会の開催は部門の重要な活動の一つと位置付けており、表1に示すように毎年5回程度の講習会を開催している。特に、設計・生産技術者のための基礎講座は、材料力学、破壊力学・弾性力学、粘弾性力学の要点をコンパクトにまとめたもので、過去10年間に26回開催されて好評を得ている。

3.1.6 部門英文ジャーナル・日本機械学会学術誌

材料力学部門では、2007年から機械材料・材料加工部門と協力して部門英文ジャーナル (Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering) の編修運営に携わり、2014年からは日本機械学会学術誌・SMMカテゴリの編修運営に携わっている。特に、国際会議や若手シンポジウムをベースとした特集を積極的に企画するだけでなく、特集の中でも優秀な論文には部門として掲載料の補助を実施することにより、論文の積極的な投稿を促している。

3.1.7 技術ロードマップ

技術ロードマップについては、特に産業界の期待が大きい活動として、2002年に部門WEBサイトに初めての技術ロードマップを公開して以来積極的に取り組んでいる。2007年にはイノベーションセンター・技術ロードマップ委員会の設立を受けて「エネルギー機器の効率・出力向上」を作成し、2015年には「エネルギー機器の安全・信頼性・効率向上」に改訂して部門WEBサイトに公開するとともに、日本機械学会誌2016年5月号に掲載した。また、技術ロードマップ委員会の活動とは別に、部門所属分科会P-SCD381の成果として「高圧水素機器の設計合理化に関するロードマップ」を2016年に部門WEBサイトに公開した。

3.1.8 その他

材料力学は機械工学の要となる基礎学術の一つであることから、日本機械学会内外の多様な活動に貢献してきた。日本機械学会内では、年次大会における各種企画、技術基準・規格、JSMEテキストシリーズ等の各種出版物をはじめとして、多様な活動に関与してきた。また、日本機械学会外においても、日本学術会議主催の理論応用力学講演会・シンポジウム、構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム、安全工学シンポジウムを主体的に運営するなど、幅広い活動を行ってきた。ただし、これらの活動も旧態依然のままでは衰退しかねないため、常に新しい視点から活動を見直す努力が必要であり、そのためには材料力学分野における若手の研究者・技術者の育成に積極的に取り組むことが重要であろう。

[井上裕嗣 東京工業大学]

表1 材料力学部門の主要活動

2007年	9月	国際会議「実験力学先端技術国際会議ATEM'07」(福岡)
	10月	講演会「M&M2007材料力学カンファレンス」(東京)
2008年	1月	講習会「よく分かる材料力学・破壊力学—設計・生産技術者のための基礎講座—」(東京)
	3月	国際会議「M&M若手研究者による国際シンポジウム」(白浜)
	9月	講習会「よく分かる材料力学—設計・生産技術者のための基礎講座第2回—」(東京)
	9月	講習会「よく分かる破壊力学・弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第3回—」(東京)
2009年	9月	講演会「M&M2008材料力学カンファレンス」(草津)
	2月	講習会「よく分かる材料力学—設計・生産技術者のための基礎講座第4回—」(東京)
	2月	講習会「よく分かる破壊力学・弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第5回—」(東京)

	6月	シンポジウム「産官学連携シンポジウム 安全安心社会の技術開発に果たす材料力学研究の役割」(東京)
	7月	講演会「M&M2009 材料力学カンファレンス」(札幌)
	9月	講習会「よく分かる材料力学—設計・生産技術者のための基礎講座第6回—」(東京)
	9月	講習会「よく分かる破壊力学・弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第7回—」(東京)
	11月	国際会議「アジア太平洋材料力学国際会議 APCMM2009」(横浜)
2010年	12月	特別講演会「配管減肉管理改善に向けた基盤技術研究に関する特別講演会(P-SCCII-2 成果報告会)」(東京)
	1月	講習会「応力・ひずみ測定の基礎と応用」(東京)
	3月	国際会議「M&M 若手研究者のための国際シンポジウム」(米国, カリフォルニア州)
	9月	講習会「よく分かる材料力学—設計・生産技術者のための基礎講座第8回—」(東京)
	9月	講習会「機械工学の基礎講習会 ものづくりのための材料力学の基礎(初級2日間コース)」(広島)
	9月	講習会「よく分かる破壊力学・弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第9回—」(東京)
	9月	講習会「よく分かる粘弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第10回—」(東京)
	10月	講演会「M&M2010 材料力学カンファレンス」(長岡)
2011年	1月	講習会「応力・ひずみ測定の基礎と応用」(東京)
	3月	第60回理論応用力学講演会(東京)
	5月	講習会「よく分かる材料力学—設計・生産技術者のための基礎講座第11回—」(東京)
	5月	講習会「よく分かる破壊力学・弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第12回—」(東京)
	5月	講習会「よく分かる粘弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第13回—」(東京)
	7月	安全工学シンポジウム2011(東京)
	7月	講演会「M&M2011 材料力学カンファレンス」(北九州)
	9月	国際会議「実験力学先端技術国際会議 ATEM' 11」(神戸)
2012年	12月	講習会「荷重・耐力係数法による信頼性評価」(東京)
	1月	講習会「応力・ひずみ測定の基礎と応用」(東京)
	5月	講習会「配管減肉管理に関する最新技術知見(P-SCCII-3 成果報告会)」(東京)
	6月	講習会「よく分かる粘弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第14回—」(東京)
	6月	講習会「よく分かる材料力学—設計・生産技術者のための基礎講座第15回—」(東京)
	6月	講習会「よく分かる破壊力学・弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第16回—」(東京)
	8月	シンポジウム「M&M 若手シンポジウム2012 Hakodate」(函館)
	9月	講演会「M&M2012 材料力学カンファレンス」(松山)
	12月	講習会「荷重・耐力係数法による信頼性評価」(東京)
	12月	講習会「有限要素法による構造強度設計入門~CAEのV&Vを学ぶ」(東京)
2013年	7月	講習会「よく分かる材料力学—設計・生産技術者のための基礎講座第17回—」(東京)
	7月	講習会「よく分かる破壊力学・弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第18回—」(東京)
	7月	講習会「有限要素法による構造強度設計入門~CAEのV&Vと1DCAEを学ぶ」(東京)
	9月	講演会「M&M2013 材料力学カンファレンス」(岐阜)
2014年	5月	講習会「配管減肉管理に関する最新技術知見(P-SCCII-4 成果報告会)」(東京)
	7月	講習会「よく分かる材料力学—設計・生産技術者のための基礎講座第19回—」(東京)
	7月	講習会「よく分かる破壊力学・弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第20回—」(東京)
	7月	講習会「よく分かる粘弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第21回—」(東京)
	7月	講習会「有限要素法による構造強度設計入門~CAEで正しい結果を得るための実践的知識を学ぶ」(東京)
	7月	講演会「M&M2014 材料力学カンファレンス」(福島)
2015年	7月	講習会「よく分かる材料力学—設計・生産技術者のための基礎講座第22回—」(東京)
	7月	講習会「よく分かる破壊力学・弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第23回—」(東京)
	7月	講習会「有限要素法による構造強度設計入門(CAEで正しい結果を得るための実践的知識を学ぶ)」(東京)
	7月	講習会「機械設計のための非線形有限要素法入門(幾何学的非線形, 超弾性, 粘弾性, 弾塑性, 接触摩擦, 動的解析の基礎を学ぶ)」(東京)
	8月	講演会「M&M 若手シンポジウム2015 Ise」(伊勢)
	10月	国際会議「実験力学の先端技術に関する国際会議 ATEM' 15」(豊橋)
	10月	第8回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム JCOSSAR2015(東京)
	11月	講演会「M&M2015 材料力学カンファレンス」(横浜)
2016年	7月	講習会「機械設計のための非線形有限要素法入門(幾何学的非線形, 超弾性, 粘弾性, 弾塑性, 接触摩擦, 動的解析の基礎を学ぶ)~MSC MARC 実習付き」(東京)
	7月	講習会「よく分かる材料力学—設計・生産技術者のための基礎講座第24回—」(東京)
	7月	講習会「よく分かる破壊力学・弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第25回—」(東京)
	7月	講習会「よく分かる粘弾性力学—設計・生産技術者のための基礎講座第26回—」(東京)
	8月	国際会議「M&M 若手研究者のための国際シンポジウム」(米国, ニューヨーク州)
	9月	国際会議「破壊と強度に関する環太平洋国際会議 APCFS2016」(富山)
	10月	講演会「M&M2016 材料力学カンファレンス」(神戸)
2017年	1月	講習会「ひずみ測定の基礎と応用」(東京)

3.2 疲労における計測技術

3.2.1 高輝度放射光

金属材料の疲労に関連した計測技術で、この10年間に急速な発展を遂げたものの一つに高輝度放射光を利用したイメージング技術がある。その背景には、世界で最高の輝度を誇る大型放射光施設Spring-8が兵庫県・播磨科学公園都市に設置され、1997年から供用を開始したことがある。材料力学部門関連の利用としては、供用開始から数年して応力測定に利用され始めたが、2003年12月に(財)新産業創造研究機構(NIRO)

に材料疲労・損傷技術研究会が設立されるとともに、日本材料学会疲労部門委員会高輝度放射光による疲労損傷技術研究分科会（2004年）、Spring-8利用推進協議会にSpring-8疲労損傷評価研究会（2005年）が設立され、イメージング技術を利用した疲労研究への応用が開始された。なお、大型放射光施設としては、Spring-8以外にESRF（European Synchrotron Radiation Facility, グルノーブル, フランス, 1994年供用開始）、APS（Advanced Photon Source, アルゴンヌ, 米国, 1996年供用開始）があり、各施設で材料力学に関する研究が行われている。

さて、現在のコンピュータトモグラフィ（CT）の原型は1971年に開発され、主として医療分野で発展してきた技術であるが、輝度の低い医療用CT装置で金属材料の撮影をするのは困難である場合が多く、材料力学分野での活用には、大型放射光施設の登場を待つ必要があった。高輝度放射光は、単に輝度が高いというだけでなく、平行度が極めて高いという特徴もある。それを利用すると、屈折コントラスト・トモグラフィが得られ、密度差の小さい物質の界面が明瞭に表示される。また、疲労き裂の場合、開口量が少ないため、通常の透過像を利用したCTでは検出できない場合でも、屈折コントラストを利用すれば検出できる場合が多い。これまでに、鋼中の介在物⁽¹⁾やフレット疲労⁽²⁾、ねじり疲労⁽³⁾のような複雑な形状の疲労き裂観察、腐食疲労⁽⁴⁾、超長寿命疲労における内部き裂の発生・成長挙動の観察⁽⁵⁾が行われている。

通常のCTでは試料のあらゆる方向に放射光が透過する必要があるが、その制限を緩和し、薄板状の物質のイメージングを行う方法が提案され、ラミノグラフィと呼ばれている。転動疲労⁽⁶⁾や摩擦攪拌接合材の疲労におけるき裂発生・成長過程の観察⁽⁷⁾に威力を発揮している。

一方、結晶の回折現象を利用したイメージング技術として、回折コントラスト・トモグラフィがある。これを利用すると、多結晶体を構成する全結晶粒の形状および方位を3次的に同定することができる。また、各結晶内の各結晶面のゆがみ（ミスオリエンテーション）を測定することができ、疲労損傷との対応が解明されつつある⁽⁸⁾。医療分野で開発されつつある圧縮センシング技術を用いることにより、更なる発展が期待される。

3.2.2 EBSD (Electron Back Scattering Diffraction) 法

材料の機械的性質は結晶構造に敏感であることは周知の事実である。特に局所損傷である疲労損傷は局所的な結晶方位、結晶配列等に多大な影響を受けることが知られている。このため、これまでX線極点図法や、ラウエ法、局所的な方位が測定できるエッチピット法などが用いられてきたが、測定の困難さも有り有効な手段となり得ていなかった。これに対して最近、SEM内での電子線回折現象をいわゆるKikuchiパターンを利用して局所領域の結晶方位、ひずみ分布等が簡便に観察できるEBSD法が開発された。対象エリア全測定点からの方位情報によりマッピング像を取得することによって試料の結晶方位（IPF）マップ、結晶粒（Grain）マップ、局所方位差（KAM）マップ、微小方位変化（GROD）マップなど各種マップにより多くの情報が得られる。

これらの情報により、疲労損傷⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、繰返し変形に伴う結晶方位や構造変化⁽¹¹⁾、疲労き裂発生⁽¹²⁾、疲労き裂進展⁽¹³⁾、疲労強度への加工の影響⁽¹⁴⁾等の他、転がり接触疲労損傷、熱疲労損傷、クリープ・疲労損傷など多方面の観察に利用され、疲労現象の解明に非常に役立ってきている。

3.2.3 散逸エネルギー

赤外線サーモグラフィを用いて、負荷を受けた材料において生じるエネルギー散逸に起因する温度変動を捉えることができる。この温度変動を散逸エネルギーとして評価し、応力振幅の大きさに対して整理することで材料の疲労限度を推定できることが経験的に示されてきた⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。疲労損傷過程におけるすべり帯の成長などの微視組織変化と散逸エネルギーとの対応関係の検討などが行われ、散逸エネルギーの発生メカニズムや散逸エネルギーに基づく疲労限度推定の科学的根拠が明らかになりつつある⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。散逸エネルギーは疲労損傷の研究において有効なパラメータとなるものと期待される。

[中井 善一 神戸大学, 菅田 淳 広島大学]

参考文献

- (1) 塩澤大輝, 中井善一, 栗村隆之, 森影康, 田中拓, 尾角英毅, 宮下卓也, 梶原聖太郎, 放射光マイクロトモグラフィによる鋼中のき裂観察, 材料, Vol. 56, No. 10 (2007), pp. 951-957.

- (2) Nakai, Y., Shiozawa, D., Kurimura, T., and Kajiwara, K., Observation of fretting fatigue cracks by micro computed-tomography using ultrabright synchrotron radiation, Fourth International Conference on Experimental Mechanics, edited by Quan, C., Qian, K., Asundi, A., Chau, F. S., Proc. of SPIE Vol.7522, 75224B (2010), pp.1-7.
- (3) Shiozawa, D., Nakai, Y., Murakami, T., and Nosho, N., Observation of 3D shape and propagation mode transition of fatigue cracks in Ti-6Al-4V under cyclic torsion using CT imaging with ultra-bright synchrotron radiation, International Journal of Fatigue, Vol.58 (2014), pp.158-165.
- (4) 中井善一, 塩澤大輝, 高輝度放射光 CT 法による腐食疲労損傷の観察, 非破壊検査, Vol.58, No.10, (2009), pp.446-451.
- (5) Yoshinaka, F., Nakamura, T., Nakayama, S., Shiozawa, D., Nakai, Y., and Uesugi, K., Non-destructive observation of internal fatigue crack growth in Ti-6Al-4V by using synchrotron radiation μ CT imaging, International Journal of Fatigue, Vol.93 (2016), pp.397-405.
- (6) Makino, T., Neishi, Y., Shiozawa, D., Kikuchi, S., Okada, S., Kajiwara, K., and Nakai, Y., Effect of defect shape on rolling contact fatigue crack initiation and propagation in high strength steel, International Journal of Fatigue, Vol.92 (2016), pp.507-516.
- (7) 佐野雄二, 政木清孝, 梶原堅太郎, ラミノグラフィによる産業用構造材料接合部の疲労き裂の評価, 日本放射光学会誌, Vol.29 (2016), pp.32-37.
- (8) Shiozawa, D., Nakai, Y., Miura, R., Masada, N., Matsuda, S., and Nakao, R., 4D evaluation of grain shape and fatigue damage of individual grains in polycrystalline alloys by diffraction contrast tomography using ultrabright synchrotron radiation, International Journal of Fatigue, Vol.82 (2016), pp.247-255.
- (9) Blochwitz C., Brechouhl J. and Tirschler, Analysis of activate slip systems in fatigued nickel polycrystals using the EBSD-technique in the scanning electron microscope, Materials Science and Engineering A, Vol.210 (1996), pp.42-47.
- (10) 釜谷昌幸, EBSD による低サイクル疲労損傷の観察, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.77, No.773 (2011), pp.154-169.
- (11) Kunz L, Lukas P, and Svoboda M., Fatigue strength, microstructural stability and strain localization in ultrafine grained copper, Materials Science and Engineering A, Vol.424 (2006), pp.97-104.
- (12) Bridier F. Vilechaise P. and Mendez J., Slip and fatigue crack formation processes in an α/β titanium alloy in relation to crystallographic texture on different scales, Acta Materialia, Vol.56 (2008), pp.3951-3962.
- (13) Salvati E., O' Connor S., Sui T., Nowell D. and Korsunsky A.M., A study of overload effect on fatigue crack propagation using EBSD, FIB-DIC and FEM methods, Engineering Fracture Mechanics, Vol.167 (2016), pp.210-223.
- (14) Tajiri A., Uematsu Y., Kakiuchi T., Tozaki Y., Suzuki Y. and Afrinaldi A., 14. Effect of friction stir processing conditions on fatigue behavior and texture development in A356-T6 cast aluminum alloy, International Journal of Fatigue, Vol.80 (2015), pp.192-202.
- (15) 入江庸介, 井上裕嗣, 森大樹, 高尾守道, 散逸エネルギー計測による切欠試験片の疲労限度の評価, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.76, No.764 (2010), pp.410-412.
- (16) 赤井淳嗣, 塩澤大輝, 阪上隆英, オーステナイト系ステンレス鋼の疲労限度評価, 材料, Vol.61, No.12 (2012), pp.953-959.
- (17) Shiozawa D., Inaba K., Akai A. and Sakagami T., Experimental Study of Relationship Between Energy Dissipation and Fatigue Damage From Observation of Slip Band by Atomic Force Microscope, Advanced Materials Research, Vol.891-892 (2014), pp.606-611.
- (18) Akai A. Inaba K. Shiozawa D. and Sakagami T., Estimation of Fatigue Crack Initiation Location Based on Dissipated Energy Measurement, Journal of the Society of Materials Science Japan, Vol.64, No.8 (2015), pp.668-674.

3.3 モニタリング，非破壊検査（NDT）

検査・モニタリング技術を取り巻く，この 10 年間の社会的背景として，高度成長期に建設された多くのインフラ構造物の経年劣化損傷の社会問題化，ならびに製造業における抜き取り検査から全数検査移行による製品の高付加価値化がある．これらを背景に，効率性と確実性を両立させた非破壊検査法への要求と期待が高まっている．これに呼応して，新たな検査法の開発，既存の検査法の高度化が進められてきた．

赤外線サーモグラフィは，遠隔から非接触で対象物の温度分布を可視化計測できることから，橋梁等の鋼構造物，コンクリート構造物の遠隔からの診断，複合材や接合材の剥離検出，応力分布計測に基づく維持管理などの非破壊評価技術に加え，プラントのコンディションモニタリングに適用されてきている⁽¹⁾⁽²⁾．構造物の健全性をパッシブに評価できるアコースティックエミッション（AE）計測は，タンクや配管のグローバルな腐食診断に適用され⁽³⁾，土木構造物を対象とした AE トモグラフィ⁽⁴⁾の開発も進められた．また，構造にセンシング機能を持たせた，構造ヘルスマニタリングに関する研究も，航空宇宙から土木構造に至るさまざまな分野で進められた⁽⁵⁾．

既存の非破壊検査技術分野における進展として，まず放射線透過試験（RT）分野では，高輝度放射光および中性子の利用が挙げられる．前者は 3.2.1 項で詳説されている．後者については，中性子の高い物質透過性やビーム発散性を利用して，残留応力評価や中性子イメージングが行われた⁽⁶⁾．超音波試験（UT）分野では，実用面ではガイド波⁽⁷⁾，TOFD 法およびフェーズドアレイ法の進展が著しい⁽⁸⁾．TOFD 法は構造物の供用適正評価（FFS）のための欠陥サイジングに，フェーズドアレイ法は UT 技術の高精度化・適用性の拡大に貢献した．また，レーザー超音波や空中超音波等の非接触超音波非破壊検査法⁽⁹⁾にも進展が見られた．研究面では，非線形超音波に基づく非破壊評価法⁽¹⁰⁾に関する研究が活発に進められた．近年では，これまでの非破壊検査技術をロボット化，自動化することにより，全数検査に対応させることが検討されている．また，遠隔検査に対してはドローン（UAV）の活用が進んでいる⁽¹¹⁾．さらには，非破壊検査におけるビッグデータの活用，IoT 等の情報化技術の導入が進められている．

〔阪上 隆英 神戸大学〕

参考文献

- (1) Sakagami, T., Remote nondestructive evaluation technique using infrared thermography for fatigue cracks in steel bridges. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 38 (2015), pp. 755-779.
- (2) 特集「赤外線サーモグラフィ試験－建築・土木構造物への適用－」，非破壊検査，Vol. 63 (2014)，pp. 265-296.
- (3) 日本高圧力技術協会，HPIS G 110 TR 2005 AE 法による石油タンク底部の腐食損傷評価手法に関する技術指針 (2005)．
- (4) 小林義和，塩谷智基，AE 源を利用した速度分布同定手法「AE トモグラフィ」の開発，非破壊検査，Vol. 64 (2015)，pp. 255-261.
- (5) 武田展雄，越岡康弘，航空宇宙機複合材構造の構造ヘルスマニタリング技術の進展，非破壊検査，Vol. 60 (2011)，pp. 157-164.
- (6) 特集「中性子ラジオグラフィの現状と今後」，非破壊検査，Vol. 65 (2016)，pp. 2-39.
- (7) 林高弘，大型構造物検査のためのガイド波技術，日本 AEM 学会誌，Vol. 20 (2012)，pp. 639-644.
- (8) 特集「超音波による非破壊検査最新技術の紹介」，非破壊検査，Vol. 65 (2016)，pp. 49-84.
- (9) 川島紘一郎，空気伝搬超音波法による非破壊材料評価と検査，非破壊検査，Vol. 58 (2009)，pp. 250-255.
- (10) 特集「非線形超音波による非破壊検査・評価 V」，非破壊検査，Vol. 64 (2015)，pp. 553-600.
- (11) 堀口賢一，無人航空機による橋梁点検，土木学会誌，Vol. 101 (2016)，pp. 28-29.

3.4 シミュレーション技術

3.4.1 分子動力学（MD）

第一原理計算による強度やそれを支配する変形素過程に対する解析は，材料強度の本質に迫ることを目的として 1980 年頃から始まったが，最近 10 年でも精力的に研究が行われ⁽¹⁾，多軸応力下での強度解析，フォノンモードによる不安定性解析，複雑な内部自由度を有する場合の変形経路解析など，より詳細な解析へと

発展している。計算機性能の向上により、これまで困難であった転位芯構造やその運動、転位と不純物との相互作用など、多数の原子の取り扱いが必要な問題への適用が積極的に行われ始め、塑性現象の根本理解に向けた新展開として注目されている。手法面では、分子動力学計算を行うと同時に第一原理計算を用いた原子間相互作用の機械学習を行い計算速度と精度を両立する手法や、第一原理計算の精度で有限要素解析を行う方法など、第一原理計算の精度を維持しつつ計算対象の規模を拡大するための手法が開発され、材料力学問題に応用されている。一方、古典分子動力学法や関連手法は成熟の域に達しつつある。LAMMPS⁽²⁾など高機能汎用コードが発達し、計算の専門家でなくても比較的容易に解析が可能となっている。これにより、例えば近年発達が著しいナノ力学実験を理解するためのツールとして用いられている。手法面では、力学実験と比較する場合に問題となる解析時間の短さの問題克服に精力が注がれ、NEB 法、strain boost 法⁽³⁾、adaptive boost 法⁽⁴⁾などが材料の変形問題に適用され、実験との時間スケールギャップを埋めることに成功している。

3.4.2 フェーズフィールド法

フェーズフィールド法 (phase-field method)⁽⁵⁾⁽⁶⁾は、1990 年頃に金属凝固におけるデンドライト成長の再現に成功してから注目を集め、今日では多種多様な材料組織発展の表現のみならず、き裂進展、トポロジー最適化、バイオメカニクスなど形態変化を伴うさまざまな問題に適用されている。フェーズフィールド法は、表面・界面・粒界などの境界を場の変数の変化領域として捉え (拡散界面モデル)、反応拡散方程式に帰着する場の発展方程式を数値的に解くことで、境界を追従することなく複雑なダイナミクスを表現する手法である。元来、拡散界面モデルには計算コストが高いという問題があるが、今後の計算機の高速化によって、さらに強力な手法となることが期待される。

3.4.3 結晶塑性解析

金属材料の微視組織中に生ずる変形現象を、連続体力学を基礎とした有限要素法を用いて解析する結晶塑性有限要素法 (CPFEM) の分野では、変形が比較的等方的な FCC 結晶から強い異方性を有する HCP 結晶などへと研究が展開されてきている。すべり変形の物理的な実体は結晶中の転位の運動であるため、転位挙動に関するモデル群を構築して CPFEM に組み込むことにより、材料中の微視的レベルの特徴から巨視的な力学特性を再構築する試みがなされている。また、巨視的力学特性が材料の結晶粒径などに依存する寸法依存性を連続体力学の中に合理的に組み込む研究も行われている。最近の 10 年では特に、塑性ひずみの空間こう配と力学特性を結びつける研究が多方面にわたって展開されている。加えて、CPFEM の工業的応用としては板材のプレス加工を精密に予測する手法が挙げられる。一方、ポリマの変形応答に対しても結晶塑性論的扱いが試みられている。特に分子鎖網目モデルでは、熱可塑性ポリマの結晶相を結晶塑性論でモデル化している。また、非晶相の絡み点における分子鎖群をすべり系と見なして結晶塑性論的に定式化する分子鎖塑性モデルも提案されている。このように、ポリマの力学的挙動を結晶塑性論の体系として記述することで、分子鎖配向や結晶回転などの微視的情報をより簡便かつ精密に表現することが可能となってきている。

[尾方 成信 大阪大学, 梅野 宜崇 東京大学, 高木 知弘 京都工芸繊維大学,
大橋 鉄也 北見工業大学, 志澤 一之 慶應義塾大学]

参考文献

- (1) Pokluda, J., Cerny, M., Sob, M. and Umeno, Y., Ab initio calculations of mechanical properties: Methods and applications, Progress in Materials Science, Vol.73 (2015), pp.127-158.
- (2) Plimpton, S., Fast parallel algorithms for short-range molecular-dynamics, Journal of Computational Physics, Vol.1 (1995), pp.1-19.
- (3) Hara S. and Li, J., Adaptive strain-boost hyperdynamics simulations of stress-driven atomic processes, Physical Review B, Vol.82 (2010), 184114.

- (4) Du, J., Wang, Y., Lo, Y., Wang, L. and Ogata, S., Mechanism transition and strong temperature dependency of dislocation nucleation from grain boundaries: An accelerated molecular dynamics study, *Physical Review B*, Vol.94 (2016), 104110.
- (5) 小山敏幸, 高木知弘, フェーズフィールド法入門 (計算力学レクチャーコース) (2013).
- (6) 高木知弘, 山中晃徳, フェーズフィールド法—数値シミュレーションによる材料組織設計— (2012).

3.5 維持管理・リスクベース工学

機械工学におけるものづくりの三本柱は、設計、製造およびメンテナンスであるが、ここ 10 年で見たと、これらの概念の整理が進んだことを指摘することができる。設計・製造が機械工学の根幹をなすことは言うまでもないことであり、機械学会の活動としても重点的に取り扱われてきたが、メンテナンスに関しては、破壊力学等の学術レベルでは広範囲に取り扱われていたものの、規格としての取扱いは明確には位置づけられていなかった。このことは、規格・規準の状況を見れば明らかで、例えば機械学会の発電用設備規格委員会⁽¹⁾で発行される原子力関係の民間規格の中で、設計製造規格は当初から整備されていたのに比して、メンテナンスの段階の規定をまとめた維持規格については遅れて発行されることとなった⁽²⁾。原子力保有国の諸外国と比較しても、維持規格の発行は 30 年以上の遅れをとっていた。設計段階は、蓄積してきた経験と、既存データ、加速試験データに基づく予測行為であるのに対して、メンテナンス段階では、設計時の予測結果を実際に確認することができる。このように設計段階とメンテナンスの段階での区別が明確に意識されるようになったが、この概念の普及に果たした機械学会維持規格の役割は大きい。実際、原子力分野以外の分野においても、維持規格・技術規準の開発が促進された⁽³⁾。

維持規格の導入によって機械構造物のメンテナンスは大幅に合理化されたものの、構造物の経年化が進むと必ずしもこれだけでは充分でないことが欧米では早くから認識されていた。維持規格の考え方をういたとしてもその運用はどちらかというと画一的方式であり、柔軟に変更できるような仕組みとはなっていない。画一的方式は、実施事業者側から見たとき、検査時の手順が機械的であり、容易に処理ができるという利点があり、規制側から見たときにも、法規への適合性の判断が容易で、客観的な判断ができるという利点が考えられる。その一方で、機械構造物が新規の建造間もない頃には問題が露呈することはないが、経年化とともに規格上の検査対象部位と実際の材料の損傷部位と相関がなくなってくるという問題が発生する。欧米では、この問題の解決のためにリスクベース工学の導入が進められた。日本機械学会誌において、リスクベース工学の動向とともに、その概要、重要性に関する解説が掲載された⁽⁴⁾。この結果、リスクベース工学の認知度も高まり、圧力機器の分野では規格の発行にまで結びついている⁽⁵⁾。この流れを加速するためには信頼性工学の普及が不可欠であるが、この技術検討をするための研究分科会活動も実施され、この分科会が母体となった年次大会企画、部門企画講習会が実施された。これらの一連の活動は JIS 規格の発行へと結びついた⁽⁶⁾。

[酒井 信介 東京大学]

参考文献

- (1) 森下正樹, 日本機械学会「発電用設備規格」のノート特集号の企画にあたって, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 78, No. 790 (2012), pp. 770-771.
- (2) 日本機械学会, JSME S NA1-2000 発電用原子力設備維持規格 (2000).
- (3) 日本高圧力技術協会, HPIS Z 101-1 圧力機器のき裂状欠陥評価方法 (2008).
- (4) 酒井信介, 小林英男, リスクベース設計, Risk Based Design, 日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1020 (2003), pp. 853-856.
- (5) 日本高圧力技術協会, HPIS Z 106 リスクベースメンテナンス (2010).
- (6) 日本規格協会, JIS B 9955:2017 機械製品の信頼性に関する一般原則 (2017).

3.6 エネルギー機器・材料分野

社会インフラを支える火力発電機器や原子力発電機器については、安全性・信頼性・効率向上が求められており、その基盤を支える材料力学部門への期待は、従来にも増して高まっている。材料力学部門では、こ

のような状況を踏まえて、産業界での研究ニーズや大学等での研究シーズの橋渡しを行う技術ロードマップ⁽¹⁾を公開している。ここでは、機械工学年鑑での関連記事⁽²⁾⁽³⁾も含めて、この10年の歩みのトピックスを概観したい。

石炭を燃料とする超々臨界圧USCボイラでは、600°C程度の高圧配管に用いられる改良9Cr-1Mo鋼など、高強度フェライト鋼溶接継手部でのType IVクリープ損傷の防止が大きなトピックスであった。冶金的・力学的両面の取組みが不可欠であり、溶接継手の長時間クリープ強度、多軸負荷の影響、試験体サイズ効果など実験力学面での検討がなされている。板厚内部での損傷発生となることから、フェーズドアレイなど超音波非破壊検査に基づく損傷評価、余寿命評価の研究が活発になされている。クリープキャパシティなど多軸応力下でのマイクロ損傷と、損傷力学・破壊力学評価などマクロな余寿命評価を結びつける研究も活発である。一方、次世代の700°C程度の蒸気温度を目指したA-USCプラントに向けた研究も活発化している。

天然ガスを燃料とするガスタービンコンバインド発電⁽⁴⁾については、効率向上のためのガスタービン入口温度の上昇に対応するため、動翼材としてNi基鋳造合金を用いた一方向凝固および単結晶材が用いられ、結晶塑性力学的視点での疲労やクリープ損傷評価がなされつつある。また、遮熱コーティングの実用化・改良が行われており、遮熱コーティング層の割れ・剥離の定量評価に関する研究がなされつつある。

原子力発電プラントに対しては、材料力学分野の基礎技術である弾塑性解析、破壊力学等の学術成果の社会実装の一環として、機械学会を中心に構造設計、耐震設計、材料強度、維持に関する規格化活動が積極的に行われた⁽⁵⁾。また従来の実験に代わりシミュレーションの活用が期待されるようになり、その適用範囲拡大に向けて検証と妥当性確認 (V&V) の方法の標準化がすすめられた⁽⁶⁾。

従来は事故を起こさないための設計が機械技術者の活動の主目的であったところ、2011年3月に発生した東日本大震災と福島第一原子力発電所事故を経験したことから、事故が起こることを前提とし、減災やレジリエンスを考慮した設計と対策が世の中と規制側から求められるようになった。このため、設計・メンテナンス・緊急時対応などの役割分担を合理的に決めるためのリスクベース工学や、現実的強度を予測するための材料科学技術の活用がこれまで以上に必要とされている。具体的には、過大地震、津波、竜巻や航空機衝突に対する機器や建物の強度評価が求められるようになった⁽⁷⁾。実験が難しい事故時のシナリオ検討等には、マルチフィジックスシミュレーション技術の応用が期待されている。また今後、福島第一原子力発電所や老朽化プラントの廃炉が進む中、プラントの設計から廃炉までのトータルライフサイクルマネジメントを合理的に行うための技術を確認することが望まれている。以上のように、要素技術の高度化と共に、知識の統合化と社会実装のための研究活動が重視される傾向にある。

[笠原 直人 東京大学, 猪狩 敏秀 三菱重工業 (株)]

参考文献

- (1) 笠原直人, 猪狩敏秀, 泉聡志, 高木愛夫, 釜谷昌幸, 藤山一成, 「エネルギー機器の安全・信頼性・効率向上」技術ロードマップ, 日本機械学会誌, Vol. 119, No. 1170 (2016), pp. 296-299.
- (2) 高橋由紀夫, 高温機器分野の材料研究の動向, 日本機械学会誌, Vol. 118, No. 1161 (2015), pp. 459-460.
- (3) 野中勇, 機械工学年鑑 2016, 5. 材料力学, 日本機械学会 (2016).
- (4) 岡田郁夫, 原田広史, 発電用ガスタービンの材料の変遷と将来展望, 日本機械学会誌, Vol. 119, No. 1173 (2016), pp. 454-457.
- (5) 発電用設備規格, 日本機械学会
- (6) 日本原子力学会, AESJ-SC-A008:2015シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン: 2015 (2015).
- (7) 原子力規制委員会, 実用発電用原子炉に係る新規規制基準について, https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/shin_kisei_kijyun.html

3.7 水素社会

3.7.1 材料強度に関する研究

2002年に当時の小泉首相が燃料電池自動車FCVに試乗したことにより、水素社会が実現する期待が膨らんだ。水素・燃料電池実証プロジェクト⁽¹⁾の第I期(2002~2005年度)では、水素ガス圧力が35MPaである水素ステーションで水素ガスを充填した35MPaFCVが公道を走行した。第II期(2006~2010年度)では、70MPaFCVと70MPa水素ステーションの組合せであった。水素社会に関する材料強度研究の最近10年のあゆみとしては、FCVと水素ステーションで使用される金属材料(水素構造材料)が主な対象であったが、そ

のあゆみは規制の見直しあるいは標準の制定と表裏一体であった。35MPa FCV⁽²⁾と 35MPa 水素ステーション⁽³⁾で使用が認められた材料はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L とアルミ合金 6061-T6 であった。認められた条件は SSRT 特性（低ひずみ速度引張特性）、疲労寿命特性、疲労き裂進展速度が大気中と水素ガス中で同程度であることであった⁽³⁾。低合金鋼 SCM435 の使用も認められたが、SCM435 の水素脆化感受性が高いことから、超音波探傷などにより有害な欠陥がないことが確認できるものに制限された。70MPa 水素ステーションでは、ニッケル当量が 28.5%以上、27.4%以上、26.5%以上の 3 段階に分類された SUS316 と SUS316L の使用が認められた⁽⁴⁾。相対絞り（RRA）が 0.8 以上であり、疲労限度が水素ガス中で低下しないことを条件として、例えば、引張試験またはミルシートの絞りが 75%以上、ニッケル当量が 28.5%以上の SUS316 と SUS316L は、82MPa 以下の水素ガス中において、-40～-10℃で使用できることが示された。RRA は大気中に対する水素ガス中の絞りの比である。ニッケル当量が規定された SUS316 と SUS316L は SUS316 ニッケル当量品と呼ばれている。このような一般高圧ガス保安規則の見直しはさらに行われ、最新の見直しでは、温度が-45～250℃、圧力が 20～82MPa となっている⁽⁵⁾。また、鉄基超合金 SUH660 が温度-45～50℃、圧力が 82MPa 以下で使用可能となっている⁽⁵⁾。規制の見直し、標準の制定の結果、トヨタのミライが 2014 年 12 月、ホンダのクラリオンティが 2015 年 3 月に市販された。

3.7.2 高圧水素容器の強度評価

安全で安心な水素社会の実現には高圧水素マネジメントの信頼性向上が不可欠であり、その基幹部品となるのが自動車用および水素ステーション用の高圧水素容器である。低合金鋼製の Type1 容器、低合金鋼製の容器に炭素繊維強化プラスチック（CFRP）によるフープ補強を施した Type2 容器、アルミ合金容器を CFRP でフルラップ補強した Type3 容器、プラスチックライナーをフルラップ補強した Type4 容器の選択肢があるが、自動車用容器で常用圧力 70MPa、ステーション用蓄圧器で 80MPa の超高圧となるので、軽量化と製造上の制約から Type2, 3, 4 のいわゆる CFRP 容器が主流となっている。CFRP 容器に対しては、試験片を用いた許容応力の決定と計算による容器肉厚の決定という鋼製容器の設計手法を適用できず、破裂試験と圧力サイクル試験を主体とする設計確認試験により信頼性を確保することになっている。その源流は容器保安規則別添 9「圧縮天然ガス自動車燃料装置用容器の技術基準の解釈」（2000 年）や ANSI/CSA NGV2-2000（2000 年）にまで遡る。天然ガス自動車用のものを流用し、耐水素性を保証するために使用可能な金属を A6061-T6 と SUS316L に限定する形で、自動車用 35MPa 容器に関する「JARI S 001 圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準」（2004 年）や、「KHKS0128 70MPa 圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準」（2010 年）が定められた。その試験方法は、燃料電池自動車の使用環境を模擬したシリーズ試験という形で国連基準である UNR134 および別添 11 に取り入れられた。一方蓄圧器に関しては、鋼製容器に対する枠組みである「KHKS0220 超高圧ガス設備に関する基準」（2010 年）や「ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 3」（2015 年）が存在し、その枠組みに CFRP 製容器特有の設計確認試験の考え方を導入する方向で安全基準の策定が進み、「KHKT5202 圧縮水素蓄圧器用複合圧力容器に関する技術文書」（2014 年）が発行されるに至っている。許容応力に基づく鋼製容器の設計と、性能試験をクリアすることで良しとする CFRP 容器に対する評価手法が根本的に相いれないものであり、その齟齬を埋めるための研究開発が必要である。端的に言えば、「試験片を用いた許容応力の決定と計算による設計パラメータの決定」が可能となるような方法論が求められている。この状況は、CFRP 製容器に限らず、CFRP 製部品全般に対して広くあてはまるものであり、問題解決のための研究開発が強く求められている。

〔松岡 三郎 九州大学, 吉川 暢宏 東京大学〕

参考文献

- (1) 水素・燃料電池実証プロジェクト, 日本自動車研究所,
<http://www.jari.or.jp/portals/0/jhfc/index.html>
- (2) 一般高圧ガス保安規則の機能性基準の運用について（2010 年 12 月 8 日）, 経済産業省
- (3) 日本自動車研究所, JARI S 001 圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準,（2004）及び JARI S 002 圧縮水素自動車燃料装置用附属品の技術基準,（2004）.
- (4) 一般高圧ガス保安規則の機能性基準の運用について（2012 年 12 月 26 日）, 経済産業省
- (5) 一般高圧ガス保安規則の機能性基準の運用について（2014 年 11 月 20 日）, 経済産業省

3.8 航空・宇宙・複合材料

航空・宇宙・複合材料関係でこの10年間で最も衝撃的なイベントは2009年に初飛行したB787だろう。既に広く知られていることであるが、機体重量の約50%が複合材料化され、燃料消費効率を20%以上高めている⁽¹⁾。機体の大部分は炭素繊維強化複合材料（CFRP）である。実際の機体引き渡しはさまざまな理由から2011年9月になっている。日本国内ではMRJが2008年から開発を初め2015年11月に初飛行に成功している。このMRJでは尾翼と舵面にCFRPが使用されている。防衛省向けにはP-1が2007年9月に初飛行している⁽¹⁾。P-1では尾翼、舵面、翼胴フェアリング、扉などにCFRPが使用されている⁽¹⁾。2013年9月に打ち上げられたイプシロンロケット試験機では2段と3段のロケットモーターケースがCFRP製である⁽²⁾。2006年9月に打ち上げられた「ひので」の望遠鏡構造は熱膨張をゼロにするCFRP構造を採用している⁽³⁾。航空宇宙以外においては、電車の台車にCFRP製板バネが使用されたefWINGが2014年から営業運転されている⁽⁴⁾。2013年5月には70MPa充填の車載用水素ガス容器の例示基準が施行され、水素自動車用のガスタンクにCFRPが適用されるようになった⁽⁵⁾。また日本各地にも水素ステーションが設置されるようになった。ロボットやスポーツ用品にもCFRPが多用されるようになってきている。スポーツ用品としてはシューズにも適用されるようになってきた。2012年にはGFRPでできたサンドイッチ構造の津波救命艇が開発されている⁽⁶⁾。

2009年7月には1/1モデルのガンダムがGFRPで製造され、お台場に展示された⁽⁶⁾。自動車ではBMW i3が2013年に11月から車体のほとんどの部分にCFRPを用いた自動車を発売開始した。2015年からは3DプリンタでCFRPが製造できるMarkOneがアメリカから発売開始されている。世界的には風力発電ブレードや自動車への適用拡大を目指した低価格ハイスピード成形の複合材料がトレンドになりつつある。研究開発においては、カーボンナノチューブを用いた燃糸、センサーなどのナノ複合材の研究、複合材のさまざまなシミュレーション技術や最適設計技術の開発、センサーやアクチュエーターを搭載した知的複合材料の実用化や充電機能を有する多機能複合材料などの開発研究が行われている。また、天然繊維などを用いたグリーンコンポジットの研究開発が盛んに行われている。

〔轟 章 東京工業大学, 北條 正樹 京都大学〕

参考文献

- (1) 小祝弘道, 一般社団法人強化プラスチック協会, FRP60年の歩み (2015), pp. 232-238.
- (2) 紙田徹, 一般社団法人強化プラスチック協会, FRP60年の歩み (2015), pp. 239-242.
- (3) 宇都宮真, 一般社団法人強化プラスチック協会, FRP60年の歩み (2015), pp. 243-249.
- (4) 西村武宏, 一般社団法人強化プラスチック協会, FRP60年の歩み (2015), pp. 227-231.
- (5) 竹花立美, 一般社団法人強化プラスチック協会, FRP60年の歩み (2015), pp. 282-290.
- (6) 高橋儀徳, 一般社団法人強化プラスチック協会, FRP60年の歩み (2015), pp. 348-355.

3.9 鉄鋼材料の高性能化, 高機能化

3.9.1 自動車用鋼材

最近10年間, 世界的な環境規制強化の動きを背景に自動車の低燃費化が強く指向され, 小型・軽量化のため, 使用する鋼材の高強度化が進められてきた。車体用薄鋼板に関しては, 更に衝突安全性向上が求められ, 軽量化と高強度化を両立する素材として高張力鋼板(ハイテン)の採用が拡大している。車体骨格用冷延ハイテンの引張強度は1990年代では590MPa級に留まっていたが, 2000年代初頭に980MPa級に, 2013年には1,180MPa級まで到達した。また, バンパー等の補強部材においては1,470MPa級にも達している⁽¹⁾。高張力鋼板の適用における課題である成形時の割れと寸法精度不良に対して, 材料の延性改善に加え, プレス成形工程・金型設計の革新による部材内の応力制御⁽²⁾などにより解決が図られてきた。今後, CAEの活用による更なる設計技術の進歩が期待される。

エンジン, パワートレインなどの部品に使用される特殊鋼線材・棒鋼においては, 部品を小型化しても同等の耐久性を発揮できる高強度鋼の開発が進められてきた。具体的には, 規格鋼に対し50%の軽量化を実現できる超高強度弁ばね用鋼⁽³⁾, 12.9級超の強度区分で使用できる高強度ボルト用鋼, 高面圧下での耐久性を高めた歯車用鋼などである。直近では, 自動車産業のグローバル競争が激化する中, 素材コストや部品加工

コストの削減に資する鋼材やそれを実現する加工技術のニーズも急速に高まっており、結晶粒の粗大化を抑制し高温・短時間の浸炭を可能にする歯車用鋼や、部品加工工数を削減した破断分割プロセスに適したコンロッド用非調質鋼などが開発されている。

3.9.2 船舶・インフラ・建設用鋼材

造船向け極厚鋼の脆性破壊伝播停止特性（アレスト特性）の問題について、日本海事協会の研究委員会によって大型コンテナ船に用いられる極厚鋼の要求アレスト靱性値が実験的に明らかにされた⁽⁴⁾。加工熱処理（TMCP）技術を駆使して、70mm程度の板厚で460MPa級の降伏強度（YS）と十分に高いアレスト特性を持つ高機能厚鋼板が開発され、コンテナ船の大型化と安全性向上に貢献した⁽⁵⁾。また、船舶の衝突や座礁による海難事故の被害を軽減するために、YS360MPa級の船体用高延性鋼が開発され、ばら積み船に適用された。構造物の大型化、軽量化、操業効率などの観点から厚鋼板の高強度化が進んだ例として、建築ではYS880MPa級鋼、橋梁ではYS700MPa級鋼、海底資源生産設備ではYS550MPa級鋼、海底資源掘削設備ではYS690MPa級鋼、水力発電用水圧鉄管ではYS890MPa級鋼、天然ガス用ラインパイプではYS830MPa級鋼、建設・産業機械ではYS1100MPa級鋼などが実用化された。省資源および経済性の観点では、YS620MPa級の高強度と-196℃での低温靱性を具備した液化天然ガス貯蔵タンク向け9%Ni鋼において、TMCP技術の適用によってNi含有量を6%まで低減することに成功した。以上のような厚鋼板の高機能化が、海運、インフラ、エネルギー、建設などで用いられる溶接構造物の進歩を支えてきた。

母材の高強度化が進む中で問題となるのは溶接部の疲労対策である。古くからグラインダー等による溶接止端形状改善による応力集中緩和が広く用いられているが、近年、超音波衝撃処理（UIT）を始めとしたHigh Frequency Mechanical Impact（HFMI）が用いられることも多くなってきた。この技術は溶接止端部に連続打撃を与えて塑性流動を起こさせ、止端形状の改善による応力集中の低減と共に、止端部の残留応力を圧縮側に変化させる。これにより、繰返し引張応力の働く溶接部の応力振幅と平均応力が低下し、その重畳効果によって疲労強度向上効果や疲労寿命の劇的な延長が得られる⁽⁶⁾。これまで、羽田空港のD滑走路橋脚部の疲労対策などの大規模プロジェクトでの適用や、国土交通省のNETIS推奨技術登録などもあり、特に鋼橋の疲労対策では高い割合で適用されている。その他船舶や建設機械、各種製造機械・部品など広い分野へ活用が広がっている。

〔稲田 淳・三浦 正明 （株）神戸製鋼所、児島 明彦・島貫 広志 新日鐵住金（株）〕

参考文献

- (1) 内海幸博，白木厚寛，濱本紗江，衣笠潤一郎，1,300，1,500 MPa級マルテンサイト鋼板，R&D 神戸製鋼技報，Vol.66，No.2（2017），pp.3-7.
- (2) 小高秀元，日産自動車におけるハイテン材の成形事例，型技術，Vol.29，No.6（2014），pp.38-41.
- (3) 増本慶，鹿磯正人，茨木信彦，超高強度弁ばね用線材の開発，R&D 神戸製鋼技報，Vol.59，No.1（2009），pp.67-70.
- (4) 財団法人日本海事協会，脆性亀裂アレスト設計指針（2009）
- (5) 白幡浩幸，大川鉄平，中島清孝，柳田和寿，井上健裕，稲見章則，石田浩司，皆川昌紀，船津裕二，脆性亀裂アレスト特性に優れた大型コンテナ船用極厚 YP460N/mm²級鋼，新日鐵住金技報，No.400（2014），pp.26-30.
- (6) 島貫広志，田中睦人，UITによる溶接構造物の疲労亀裂発生抑制技術の活用，新日鐵住金技報，No.400（2014），pp.100-108.