

特別寄稿

□第179回春季講演大会俵賞受賞記念特別寄稿

マルチマテリアルと マテリアルズインテグレーション

Multi-materials and Materials Integration

岸 輝雄
Teruo Kishi

東京大学 名誉教授、
物質・材料研究機構 名誉理事長、
新構造材料技術研究組合 理事長



*脚注に略歴

1 はじめに

図1を参照していただきたい。これは、島根県安来市にある和鋼博物館の中にある俵先生の記念コーナーの写真である。俵先生は東京大学工学部冶金学科在任中、冶金学教育の基礎を確立し、金属組織学の発展の中心的な役割を担われた。同時に日本鉄鋼協会の設立に関与し、その後の日本鉄鋼業の大きな発展に寄与した。東京大学工学部4号館の中には、未だに俵先生の教授室は学科のシンボルとして使用されている。この度、俵先生を記念する俵賞の受賞の栄誉に浴することができ、望外の喜びである。ここに至るまで、ともに研究に従事していただいた方々に感謝の意を表します。



図1 和鋼博物館における俵先生記念コーナー

2 変形・破壊の研究と非破壊評価

ここで、鉄鋼研究に関する、自からの歩みをまとめてみたい¹⁻⁵⁾。

大学3年の時に3週間の実習生として、北海道室蘭市の日本製鋼所に滞在し、水素脆性の研究に従事したことが研究の始まりであった。その後、恩師である五弓勇雄教授の塑性加工研究室で、卒業論文として4340鋼のオースフォーミングに関する研究をおこなっている¹⁾。オースフォーミングに要した加工エネルギーと最終強度の上昇が比例するという関係を見出し、塑性加工としての加工熱処理の面白さを味わった。大学院の博士課程では、整直加工による強度を理解する観点から、各種金属のパウシンガー効果に関する研究を進めた。純鉄から0.8 mass% Cの鋼に至るまでのパウシンガー効果を測定し、加工硬化の量とパウシンガー効果の関係を導出している。結晶粒径、固溶元素、析出物、双晶、積層欠陥エネルギー等の金属学的因子のパウシンガー効果への影響を明らかにしている。同時に、パウシンガー効果を含む降伏条件式の提案を行い、変形に伴う異方性の導出に成功している。

東京大学工学部において助手を経て、その後東京大学の宇宙航空研究所に奉職した。高比強度材料の部門に配属され、堀内良教授のもとで、破壊および非破壊評価の研究に従事した。この間、ドイツのゲッチンゲン大学にフンボルト奨学生として滞在し、金属物理研究所に籍をおき、疲労と破壊力学に関する研究を進めた。帰国後、宇宙航空研究所の助教授として鉄鋼材料の破壊、特に破壊靱性試験における巨視亀裂進展前に生ずるマイクロクラックの形成と破壊靱性の関係に興

* 1969年3月東京大学助手、同宇宙航空研究所助教授、工学部助教授、先端科学技術研究センター教授（現在 名誉教授）、1995年4月先端科学技術研究センター長、1996年4月通商産業省工業技術院産業技術融合領域研究所長、1997年7月日本学会会議員（17-20期）、2001年4月独立行政法人物質・材料研究機構理事長（現在 名誉理事長）、2003年7月日本学会会議副会長、2013年10月新構造材料技術研究組合理事長、2013年12月内閣府政策参与科学技術政策・イノベーション担当、2015年9月外務大臣科学技術顧問（外務省参与）。

味を持って研究を進めた。

マイクロクラックの検出のためにアコースティックエミッション (AE) の計測を行った。当初、AEによる破壊の予知に興味を持ち、ロケットモーターケースの耐圧試験の安全率を求める研究を行った。徐々にAE発生源の物理的意味に興味を抱き、多チャンネルのAE信号から、AE発生の位置を3次元で正確に評定し、そこでのマイクロクラックの破壊モード (せん断モード、引き張り破壊、混合モード) を同定し、大きさを決定することに注力した。これは、地震学の震源地でのサイスミックモーメントを求めることに対応し、ある時期、研究室の勉強会が地震学にシフトしたことを懐かしく思い出している。いずれにしろ、このAEの逆問題解析により、マイクロクラックの物理的特性を求めると同時にCT試験片における巨視亀裂進展の特性距離を求めることにより、破壊靱性の定量的な値を評価することが可能になった。

これらの研究で出会った興味ある現象が、マクロな破壊が進展する以前にマイクロなマイクロクラックが生ずること。そして、材料によっては、図2に示すように、マイクロクラックの数が多いと、き裂先端の応力緩和が進められ、破壊靱性 K_{IC} が向上することが見いだされた。これを「フェイルセーフマテリアル」と名付けている。小さなクラックを導入し、主亀裂の進展を抑制するという概念であり、高強度材料の靱性向上の指針を示している。

マイクロクラックを、塑性変形、双晶と置き換えることにより、幅広く強度と延性・靱性の向上を考えることが可能となる。以下、このような概念に基づいた、現在進行中の高強度にして、高延性な材料を開発する「革新材料」のプロジェクトを次章で紹介する。また、開発した革新材料を接合して用いるマルチマテリアルの現状をまとめてみる。

加えるに、現在はデータ科学の時代のなかにある。材料科学と情報科学を融合し、材料開発を構成するプロセス・構造・特性を結び付け、最終性能を推測する順問題型の解析、および、所望の性能材料を開発する構造・組織を導き出す逆問題解析が、材料の開発期間の低減を含めて強く要望されている。この手法をマテリアルズインテグレーション (MI) と名付けているが、4章でその一例を紹介する。

3 革新材料の開発とマルチマテリアル

エネルギー消費量削減や二酸化炭素 (CO₂) 排出量削減は、国際的な重要課題である。産業・運輸・民生の各部門で様々な対応が図られており、例えば、自動車の燃費改善に係る課題には、エンジンを始めとした動力機関の効率向上、車両の軽量化、空気抵抗低減などがある。車両の軽量化は、燃費改善とともにCO₂排出量の低減効果が大きいとされ、重要な課

題の一つになっている。

自動車における軽量化技術開発では、従来技術の延長上で形状最適化が進められてきたが、近年では高強度鋼材とともに軽量材料を適材適所に用いるマルチマテリアル化が進められている。自動車のマルチマテリアル化においては欧米が先行し、高級車やスポーツカーにおいて実用化されてきたが、国内においても2017年にトヨタ自動車がLEXUS LC500/LC500hにおいて軟鋼、高張力鋼板、アルミ合金、熱硬化性CFRP (繊維強化プラスチック)、G-SMC (Glass Sheet Moulding Compound) から成るマルチマテリアル車体を採用した⁶⁾。

筆者が理事長を務める新構造材料技術研究組合 (ISMAと略す) は、自動車、航空機、高速鉄道車両などの輸送機器の抜本的な軽量化に向け、革新的接合技術の開発や、鋼材、アルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、炭素繊維及び熱可塑性炭素繊維強化樹脂 (CFRTP) などの輸送機器の主要な構造材料の高強度化等に係る技術開発を一体的に推進することを目的として2013年10月25日に設立された。2020年4月1日現在、42企業、1財団法人、2国立研究開発法人、2大学の組合員および65機関の再委託機関の構成にて「革新的新構造材料等研究開発」事業を推進している^{7,8)}。

革新的新構造材料等研究開発事業は経済産業省における未来開拓研究プロジェクト⁹⁾の一つであり、事業化まで10年を超えるようなリスクが高い研究開発を国が主導し、技術と事業の両面で世界に勝てる産学官ドリームチームによって研究開発を推進することを狙いとする。本事業における研究開発項目は、①マルチマテリアル技術開発、②接合技術開発、③革新的チタン材の開発、④革新的アルミニウム材の開発、⑤革新的マグネシウム材の開発、⑥革新鋼板の開発、⑦CFRTPの開発、⑧革新炭素繊維基盤技術開発、⑨戦略・基盤研究、に大別されている。図3に示す通り2017年度までの事業期間の前半5年間は、革新的な接合技術・材料開発を推進してきたが、後半の5年間はマルチマテリアル技術開発に重点を置いている¹⁰⁾。

図4に各種構造材料の比強度と伸びの関係を示す。一般に

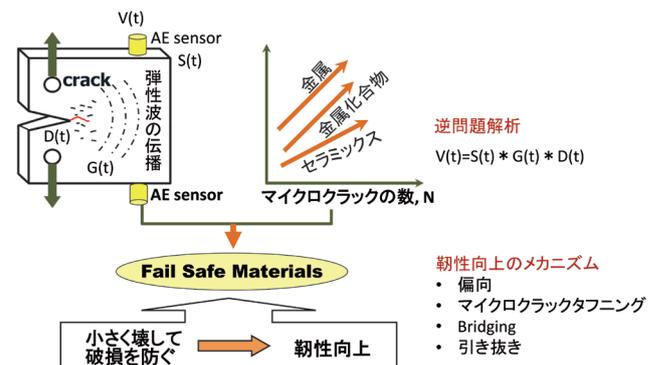


図2 フェイルセーフ材料の概念

高強度の材料は伸びが小さく、形状が似ているためバナナカーブと呼ばれている。伸びが小さいと変形能が低く成形加工性が劣ることとなる。本事業では、材料そのものの性能を高めるだけでなく、コストを低減して国際競争力を高めることも狙いの一つである。鉄鋼、非鉄金属、CFRTPなどの各材料の達成目標については、「革新的新構造材料等研究開発」基本計画¹¹⁾を参照されたい。

本事業における研究開発成果の一部を紹介したい。革新鋼板の開発では、世界最高性能の自動車用超高強度鋼板開発を目指し、従来の590MPa級鋼板の2.5倍の引張強度である1.5 GPaかつ従来の590MPa級鋼板と同等の伸び20%を有する鋼板をラポレベルで開発することを最終目標とした。図5に結果を示す。a)の残留オーステナイト(γ)を高度に制御した革新鋼板の開発では、残留γを最大化し伸びを最大化するタイプAと、金属組織の微細化を併用し成形性バランスを兼ね備えたタイプBを開発した。b)の高炭素鋼をベースに軽元素を添加した革新鋼板では、成分設計と圧延・熱処理条件を最適化しマルテンサイト組織の微細粒を得るための組

織制御を行い、微細組織にすることで既存の高炭素鋼と比べ伸びを大幅に向上させた。一方、c)では安価な炭素活用と微細なγの均一分散により、合金成分と熱処理条件を最適化した。このようにラポレベルではあるが最終目標である引張強度1.5GPa、伸び20%を達成し、2018年度から超高強度鋼板の実装化のために水素脆性や腐食の研究に注力している。

接合技術開発では、同種の高融点材料同士の接合(高強度中高炭素鋼およびチタン合金)、異種材料接合(鋼/アルミニウム合金/CFRTPの組み合わせ)の技術開発を行っており、2017年度末目標として設定された接合強度などをほぼ達成している。図6は1.5GPa級高炭素鋼板の摩擦接合例であり、ツール素材・形状・接合プロセスを改善することによりツール寿命が大幅に改善されたことが示されている。

本事業ではほぼ全てのテーマで中間目標を達成しており、鉄鋼以外では成形加工性を考慮したCFRTPシャシーを作製し、難燃性マグネシウム材では高速鉄道車両用のモデル構体の試作に成功した^{12,13)}。

2018年度から始まる事業後半の課題として、これまでに開

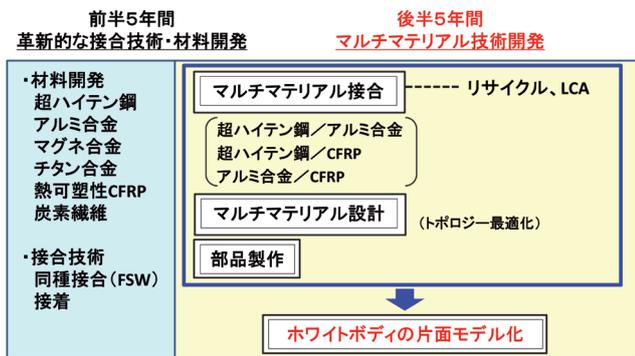


図3 革新的新構造材料等研究開発事業における研究開発項目の模式図

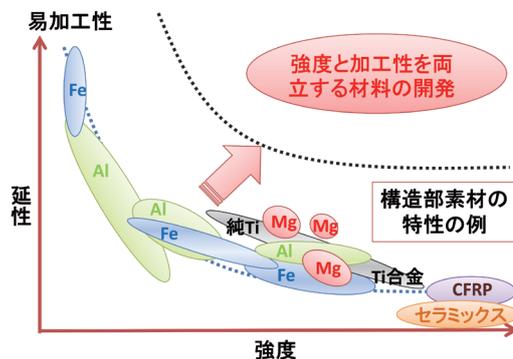
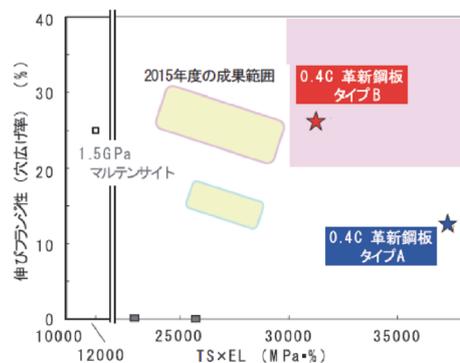
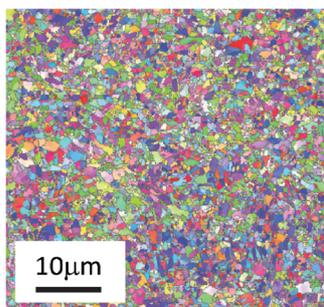


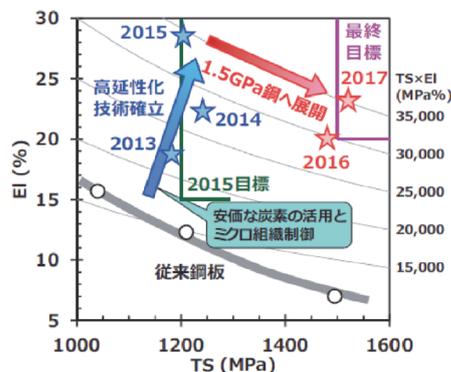
図4 各種構造材料の比強度と延びの関係



a) 残留オーステナイトの高度制御による強度、伸び、伸びフランジ性のバランス向上



b) 軽元素の有効活用によるマルテンサイト組織の微細化



c) 炭素活用とマイクロ組織制御による強度と延性の両立

図5 革新鋼板テーマにおける研究成果

発した材料を実用化するための成形技術や設計技術により重点を置いている。マルチマテリアル車の設計に向けて計算科学を駆使したCAE (Computer Aided Engineering)、成形加工を含む材料技術、量産化に適した接合技術を三位一体で確立していく。

4 マテリアルズインテグレーション (データ駆動型材料開発)

マテリアルズインテグレーション (MI) は、実験、計算、理論、データ科学を融合して、材料の4要素、すなわちプロセス (Processing)、構造 (Structure)、特性 (Property)、性能 (Performance) を計算機上で連関することである (図7)^{14,15)}。複数の計算モジュールを、一つのモジュールの出力が次のモジュールの入力となるように接続し、そのデータ授受を自動化することにより、最初の入力である材料・プロセス・使用条件から、最終の出力である部材性能 (寿命予測、破壊確率など) までの計算を一気通貫で行う、データ駆動型材料開発であり、材料開発に要する時間・コストを大幅に削減しようとするのが主目標である。

マテリアルズインテグレーションは、自らプログラムディレクターを務めた内閣府戦略的イノベーション創造プログ

ラム (SIP) 「革新的構造材料」(2014~2018年度) において提唱した概念である。マテリアルズインテグレーションは「統合型材料開発システム」とも呼ばれ、これは内閣府総合科学技術・イノベーション会議による第5期科学技術基本計画 (2016~2020年度) で提唱されたSociety5.0を支えるサブシステムの一つとして位置づけられている¹⁶⁾。さらに、SIP第2期 (2018~2022年度) の「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」でも最初の1年間、プログラムディレクターを務めた。なお、類義語としてマテリアルズ・インフォマティクスがあるが、それに属する研究の多くは、構造・特性に着目した物質探索である、という印象を持っている。これに対してマテリアルズインテグレーションは材料の4要素の連関を扱うことが肝要である。本章では以下、SIP第1期「革新的構造材料」および第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」におけるマテリアルズインテグレーションに関する研究開発 (以下、SIP-MIと呼ぶ) の一端を紹介する。

SIP第1期「革新的構造材料」では、東京大学と物質・材料研究機構 (NIMS) を中心として産学官14の研究機関がMIシステムのプロトタイプの開発に取り組んだ。ゼロからのスタートであり、例題を解きながらシステムを構築していくことになった。例題としては金属材料の中で最も多様なプロセスで製造され、多様な条件で使用される鉄鋼材料を選定し、

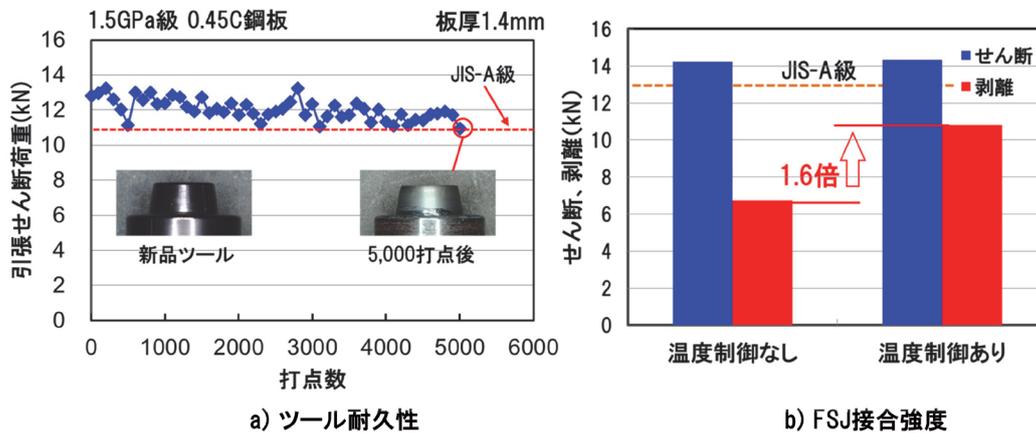


図6 引張強度1.5GPa級高炭素鋼板の摩擦点接合例



図7 マテリアルズインテグレーション (MI) システムの概念

特に工業的に重要な部位である溶接部を取り上げた。その組織予測は溶融・凝固・結晶成長・相変態、性能予測は疲労・クリープ・水素脆化・脆性破壊と、いずれも工業的に極めて汎用性が高いものを扱い、165個のモジュール、101個のワークフローを開発した¹⁷⁻²⁰⁾。これらはチタン合金、ニッケル基合金等の材料開発にもスムーズに展開できると考える。

SIP-MIによる性能予測の一例として、耐熱鋼溶接管のクリープ損傷寿命の予測を紹介する(図8)^{14,21)}。この場合、入力には部材形状、溶接条件、化学組成、初期組織で、出力は寿命と損傷箇所である。溶接を模擬するモジュールにより最高到達温度の空間分布を計算し、そこから組織分布を計算して、溶接金属、熱影響部、母材に分ける。さらに、そのデータベースから得られるクリープ特性を各部に付与し、これらを部材形状に組み込んだ有限要素解析モデルを作成し、クリープ損傷解析を行うモジュールについで、クリープ寿命や損傷箇所を求める。

このように、複数の計算モジュールを組み合わせたワークフローにより、プロセスから性能までを一気通貫で計算することが、SIP-MIの唯一無二の特徴である。計算の高速化・高精度化のために、個々の計算モジュールの性能向上はもちろん重要であるが、ワークフローも計算回数を重ねて蓄積されることで、より強力なツールとなる。

SIP-MIにおいてAIは重要な役割を果たす。例えば、データ同化は材料定数の推定に有効であり、スパースモデリングにより、ワークフローの各モジュールを開発する場面において、説明性の高いモデリングが可能となる²²⁻²⁴⁾。また、マイクロ

組織をはじめとする画像データを計算システムに取り込むことも不可欠であり、三次元画像処理、組織識別などの技術開発も並行して進めた^{25,26)}。

SIP第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」においては、第1期のMIシステムの次のステップとして、「逆問題MIシステム」、すなわち要求される性能から、それを達成する材料・プロセス条件を導き出すMIシステムの開発に取り組んでいる。実際には、数的に逆関数を求めるのではなく、第1期で行った順方向(プロセス→構造→特性→性能)の計算を、入力パラメータを変えて要求性能に到達するまで続け、その時の入力、すなわち材料・プロセス条件が求める解となる(図9)²⁷⁾。その際、できるだけ速く、すなわちできるだけ少ない計算回数で要求性能に到達することが肝要であり、そこでベイズ最適化などのAI手法が活用される。逆問題MIの代表的な対象として、3次元成形技術として極めて注目度が高い積層造形を扱い、例えば、成形時の微細亀裂発生を抑制



図9 逆問題MIシステム概念²⁷⁾

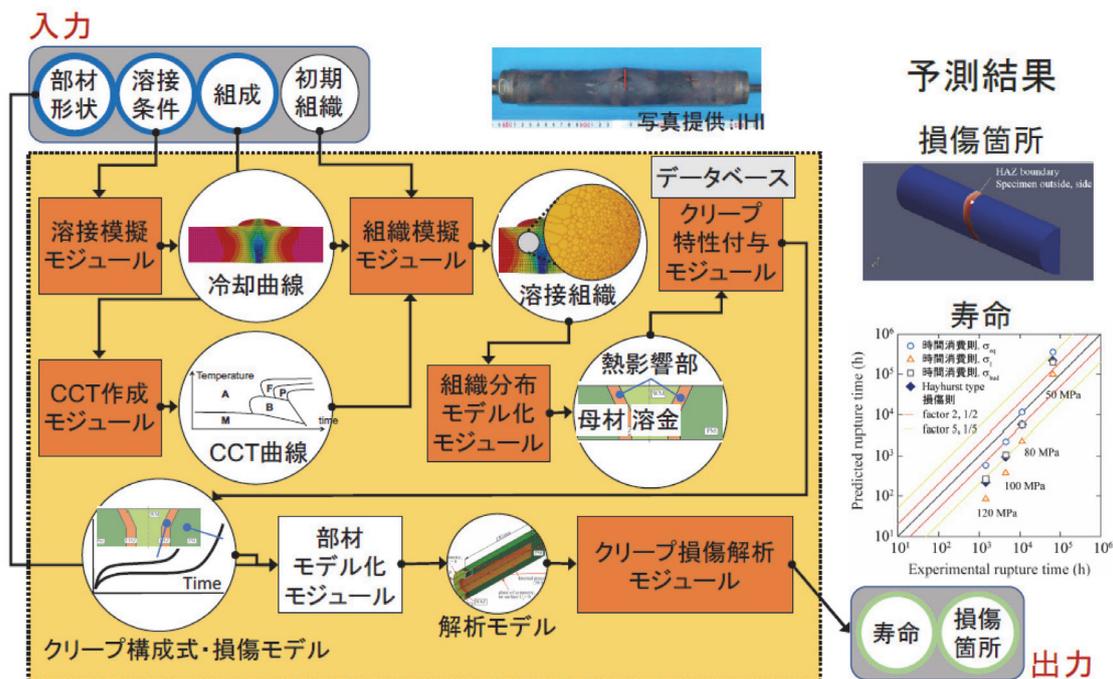


図8 耐熱鋼溶接配管のクリープ損傷寿命の予測のためのワークフロー

し、生産性を上げるプロセス条件の予測では、ベイズ最適化の導入により、網羅計算と比較して約1/6の計算回数で最適プロセス条件に到達した。また鉄鋼材料についても、引張強度2.0GPa、伸び20%の高張力鋼板という、従来の開発アプローチでは到達できないような目標を設定し、挑戦している。

これまで金属材料について述べてきたが、炭素繊維強化プラスチック (CFRP)、セラミックス基複合材料 (CMC) についても SIP-MI としての研究開発を行ってきた。特に CFRP に関しては "Atoms to Aircraft" と言うように、原子・分子レベルから、機体相当の構造体レベルまで、マルチスケール・マルチフィジックスの解析技術を取り入れ、航空機産業の海外 OEM にも注目されている^{28,29)}。

5 おわりに

輸送機関構造物やロボットなどの軽量化は今後とも大きな解決課題であり、突出した性能の革新材料の開発とその時間依存型破壊の評価、および異材接合技術の開発による設計技術 (CAE) の連携研究開発が要請されている。このマルチマテリアルは未来の材料開発のキーワードといえる。一方、これらの材料開発のあらゆる段階で、計算科学の果たす役割が増大してくる。要求した材料性能を設定し、計算科学を多用した、逆問題計算材料科学がマテリアルズインテグレーションであり、新規材料を短期間に開発する切り札になりうる。

参考文献

- 1) 五弓勇雄, 岸輝雄: 塑性と加工, 10 (1969) 107, 863.
- 2) 森康彦, 岸輝雄: 機械の研究, 31 (1979) 2, 7.
- 3) 大平貴規, 岸輝雄: 鉄と鋼, 70 (1984) 16, 2188.
- 4) 岸輝雄, 榎学: 日本機械学会講演論文集, (1986) 860-3, 303.
- 5) 堀谷貴雄, 鈴木洋夫, 岸輝雄: 鉄と鋼, 75 (1989) 12, 2250.
- 6) LEXUS ホームページ, https://lexus.jp/models/lc/features/multi_material_body/
- 7) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 ホームページ, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100077.html
- 8) 新構造材料技術研究組合 (ISMA) ホームページ, <https://isma.jp/>
- 9) 内閣府総合科学技術・イノベーション会議ホームページ, <https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/hyouka/kentou/hikariele/haihu1/sanko2.pdf>
- 10) 兵藤知明, 山下秀, 平田好則: 自動車技術, 72 (2018) 11, 4.
- 11) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

- ホームページ, <https://www.nedo.go.jp/content/100749300.pdf>
- 12) 新構造材料技術研究組合: ISMA REPORT, (2018), 11, <https://isma.jp/2018/06/21/isma-report-no-11/>
 - 13) 新構造材料技術研究組合: ISMA REPORT, (2018), 12, <https://isma.jp/2018/09/28/isma-report-no-12/>
 - 14) 出村雅彦: 第70回白石記念講座, 日本鉄鋼協会, (2018)
 - 15) 小関敏彦: 溶接学会誌, 86 (2017) 1, 12.
 - 16) 内閣府: 第5期科学技術基本計画, (2016)
 - 17) M. Ohno, Y. Shibuta and T. Takaki: Mater. Trans, 60 (2019) 2, 170.
 - 18) F. Briffod, T. Shiraiwa and M. Enoki: Mater. Trans., 60 (2019) 2, 199.
 - 19) K. Koiwa, M. Tabuchi, M. Demura, M. Yamazaki and M. Watanabe: Mater. Trans., 60 (2019) 2, 213.
 - 20) A. T. Yokobori, Jr., G. Ozeki, T. Ohmi, T. Kasuya, N. Ishikawa, S. Minamoto and M. Enoki: Mater. Trans., 60 (2019) 2, 222.
 - 21) H. Izuno, M. Demura, M. Tabuchi, Y.-I. Mototake, and M. Okada: Science and Technology of Advanced Materials, 21 (2020) 1, 219.
 - 22) A. Yamanaka, Y. Maeda and K. Sasaki: Materials & Design, 165 (2019)
 - 23) K. Sasaki, A. Yamanaka, S.-I. Ito and H. Nagao: Comp. Mater. Sci, 141 (2018), 141.
 - 24) S.-I. Ito, H. Nagao, T. Kasuya and J. Inoue: Science and Technology of Advanced Materials, 18 (2017) 1, 857.
 - 25) D. S. Bulgarevich, S. Tsukamoto, T. Kasuya, M. Demura and M. Watanabe: Scientific Reports 2018 8:1, 8 (2018) 1, 2078.
 - 26) 足立吉隆, 田口茂樹, 弘川奨悟: 鉄と鋼, 102 (2016) 12, 722.
 - 27) 国立研究開発法人科学技術振興機構: 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」ホームページ, <https://www.jst.go.jp/sip/p05/index.html>
 - 28) Y. Kumagai, S. Onodera, M. Salviato and T. Okabe: International Journal of Solids and Structures, 193 (2020), 172.
 - 29) G. Kikugawa, Y. Nishimura, K. Shimoyama, T. Ohara, T. Okabe and F. S. Ohuchi: Chem. Phys. Lett., 728 (2019), 109.

(2020年7月14日受付)