

特別講演

□日本鉄鋼協会創立100周年記念講演
(平成27年2月3日)

構造材料研究の新しい潮流

New Trends of Research and Development
for Structural Materials

岸 輝雄
Teruo Kishi

東京大学 名誉教授
新構造材料技術研究組合 理事長



*脚注に略歴

1 はじめに

日本鉄鋼協会創立100周年、心から喜びをかみしめている次第です。まさに営々と築き上げてきた100年であり諸先輩に感謝の意を表したい。本講では、100周年を記念して、ふえらむ等では鉄鋼関係の記事が数多く記述されていることでもあり、少し幅を広めて、鉄鋼を含む構造材料の近々の状況を取りまとめてみたい。このところ、構造材料の分野では、かなり大きなプロジェクトが立ち上がっているが、それらは材料別のプロジェクトではなく、さまざまな構造材料を同時に扱うのが特徴である。また、一方では、構造材料の研究者が減少しているのも事実であり、その発展のためには研究拠点(研究のハブまたはプラットフォーム)を構築し、全国的にネットワークを張り、産学官の連携がより一層重要な時期になっている。国立研究開発独立行政法人にはこの機能が強く望まれているが、すでに日本鉄鋼協会自身が産学連携の場としての役割を創立以来果たしてきたことは高く評価される。

2 イノベーションと材料

科学技術の成果に基づくイノベーションが強く要請されている。経済を活性化し、社会にインパクトを与えることが期待されている。われわれはどうしても科学の中心は欧米にあると考えがちだが、最近のイノベーションが生まれる地は、アジアであると広く認められている。日本がその中心地であるという自信を持ってよいのだが、韓国、中国、そして台湾に短期間でキャッチアップされることが多い。それゆえに、

常に革新的な科学技術の芽を作ると同時に、技術の組み合わせによりイノベーションを喚起し、産業競争力を強くすることが重要である。これは、変化して環境に適応しない生物は死滅するという有名なダーウィンの言葉にも通じるところがあるが、革新を起こさなければ企業は死滅するであろう。このことは大学とか公的研究機関にも当てはまることである。

大学に関しては、諸外国から、新しい薬品の20%は日本初のものであるとか、日本の大学は宝の山であるという声も聞かれる。残念ながら、これらの成果が日本の産業競争力と直接結びついていないところに大きな課題がある。欧米に学ぶだけではなく、日本独自のイノベーション・エコシステムを構築することが重要であるが、大学を含めて日本の組織は保守的と言われている。組織変革を含めて柔軟性を持つことは、科学技術・イノベーションを進めるには根本的な課題といえよう。

その中で、材料とイノベーションについて考えてみたい。石器、土器、青銅器、鉄器時代と歴史的には材料開発がイノベーションの源泉であった。近々の百数十年を考えても、19世紀後半の鉄鋼、20世紀初頭の高分子、アルミニウム合金、そして第二次大戦の後にはセラミックス、半導体、複合材料の開発が、大量輸送、大量消費、高度成長、IT革命を牽引し、まさに材料革新はイノベーションの原動力となってきた。特に大事なことは、大きなイノベーションを起こした材料は消えることなく、イノベーションの源泉になった材料は不滅であり、新材料がそれに加わってくるという構図である。

21世紀になり、金属、セラミックス、高分子材料は出尽くしたと考えていた時に出現してきたのが、カーボンを中心と

* 昭和44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)、平成7年4月先端科学技術研究センター長、平成8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、平成9年7月日本学術会議会員(17-20期)、平成13年4月独立行政法人物質・材料研究機構理事長(現在 名誉顧問)、平成15年7月日本学術会議副会長、平成25年10月新構造材料技術研究組合理事長、同年12月内閣府政策参与 科学技術政策・イノベーション担当

したナノマテリアルである。今後の社会の目指す方向は、環境・エネルギーを配慮した持続的社会といえよう。ナノマテリアルは研究としては興味ある課題ではあるが、このような社会貢献に今後どう対応できるか、もう少し時間をかけてよく観察しないとしない。

このような状況の中で、日本の材料の競争力について概観してみたい。図1 (a) に示すように、日本で生産した工業製品の中で、輸出量では工業素材が急成長しており、第一位を占めている。その内訳をみると、図1 (b) に示すように鉄鋼材料、有機化合物、非鉄材料、プラスチックと続いているが、鉄鋼材料の存在感が特に大きく、素材産業のリーダーとしての構造材料の重要性を示している。

あえてここでは、力学的性質を重んずる構造材料を電気・光・磁気的性質を直接利用する機能材料と分けて論ずる。構造材料の研究開発における注目点をまとめてみたのが図2である。金属・セラミックス・ポリマーそして複合材料から構成されているが、今後、複合材料の重要度が徐々に増すとみられる。一方、材料自身は古くからプロセッシング (process)、構造・組織 (structure)、特性 (property) そしてパフォーマンス (performance) からなるといわれているが、“使われてこそ材料”という観点から考えると、パフォーマンスが大きな意味を持つ。構造材料では、強度・延性・靱性のバランスが必要になるが、それに加えて、素材の溶接・加工プロセスと、時間依存型の破壊といわれるクリープ、疲労、腐食の現象を取り扱うのが大きな課題になる。また、非破壊検査で欠陥を見つけ破壊力学を用いて寿命を評価し、それを構造設計につなげることが材料革新の課題ともいえる。

一般に、強度を上げて延性・靱性が低下する。それ故、

巨視的な亀裂が進展する前に微視的クラックが発生して、亀裂先端の応力集中を緩和して亀裂進展の抵抗を大きくする試みが行われている。つまり小さく壊して大きな破壊を防ぐことができる。この例はTRIP鋼の開発にも相通じる点であり、複合材料で短繊維を導入して微視クラックを利用した高靱化、ラメラ組織と等軸組織とを配合するヘテロ組織の導入にもつながる考え方である。このような概念はFail Safe Materials の開発ともいえるが、基本的な原理に基づく強度と延性・靱性を共に向上させる手法には、まだまだ研究の余地があり、複合材料を含めた構造材料研究の向かうべき方向といえよう。

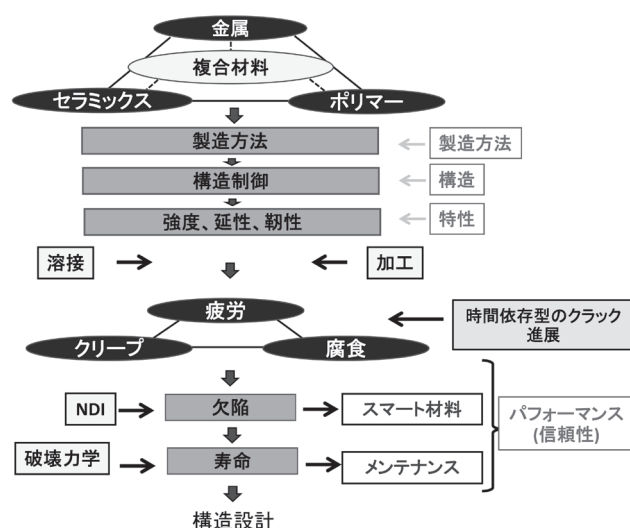
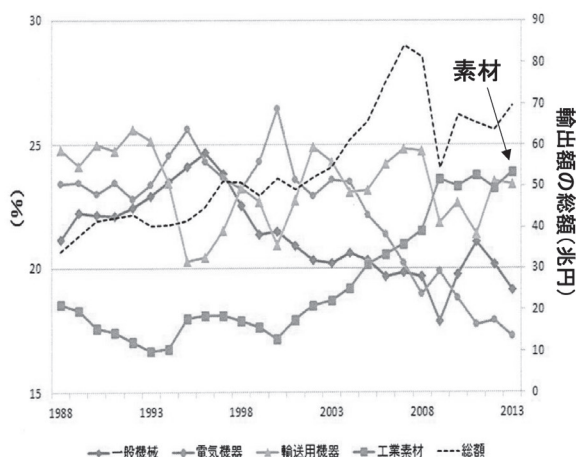


図2 革新的新構造材料の開発 (ISMA : Innovative Structural Materials Association より)

(a) 我が国の輸出額と内訳比率の年推移



(b) 工業素材の内訳

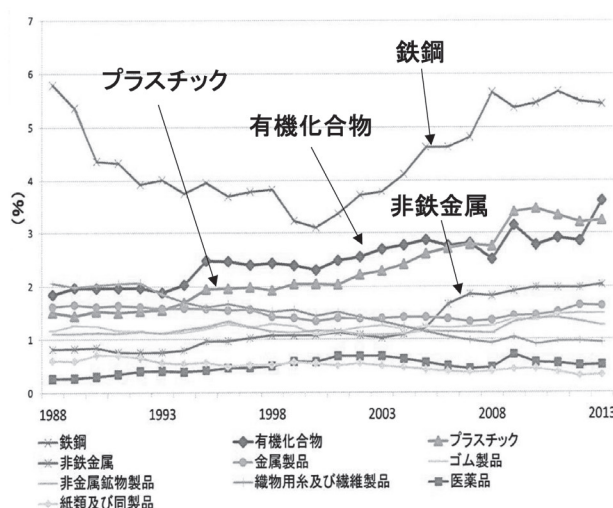


図1 我が国の輸出額と内訳比率の年推移と工業素材の内訳（財務省貿易統計より）

3 我が国における最近の構造材料プロジェクトの概要

構造材料研究の潮流の変化がこのところ顕著である。文部科学省の元素戦略の一環としての「構造材料」プロジェクト、経済産業省の未来開拓プロジェクトの一つである「革新的新構造材料」(NEDOプロジェクト)、そして、昨年開始された内閣府戦略的イノベーションプログラムの一つである「革新的構造材料」プロジェクトである。これら状況の背景には、国土強靱化、低炭素・省エネルギー社会の実現、そしてレアメタルの有効利用などが考えられるが、総じて我が国の素材産業の競争力の維持・拡大が目標といえる。ここで最近の構造材料の二つの大型プロジェクトを紹介する。

3.1 革新的新構造材料プロジェクト——高比強度材料の開発

NEDO「革新的新構造材料」プロジェクトでは、高比強度材料の開発を目的として、輸送機器、とくに自動車のマルチマテリアル化を対象としている。マグネシウム合金では鉄道の車両、アルミニウム合金では航空機の機体にも展開が期待されている。経済産業省の10年プロジェクトの一つでもあり、36企業、1独法、1大学で新構造材料技術研究組合を設立し、115の大学・独立行政法人等の研究者が再委託先として関与している。

図3は車両重量とCO₂排出量の関係を示すが、2020年ごろの欧米の排出基準は現在の140 g/kmから95 g/kmとなる見込みで、それに配慮した軽量化を目指すことが必要になる。100 kg軽量化すると1.3トンの車でおおよそ、15 g/kmのCO₂の削減が期待されており、鉄鋼、アルミニウム合金、マグネシウム合金、チタニウム合金、そしてカーボン繊維強化プラスチック複合材料(CFRP)の開発が始まっている。本プロジェクトでは、航空用の熱硬化性樹脂でなく、熱可塑性樹

脂を開発している。繊維も連続繊維ではなく、短繊維を用い、加工性とコスト低減に挑戦している。これらの開発材料を適材適所で利用するのがマルチマテリアル化の姿である。すでに欧米では、若干先行した開発も進められており、例えば、2015年のパリモーターショーで、フランスのルノー社が提案したマルチマテリアルのモデル車では、サイドメンバーやフロントエンドは鉄鋼材料、ドアはアルミニウム合金、ルーフはマグネシウム合金、床はガラスファイバー強化熱可塑性樹脂で作ったモデル車を展示していた。BMW社もCFRPを使った電気自動車を既に発売し、急速にマルチマテリアル化の動きを模索している。マルチマテリアルで大事な技術の一つが、異種材料の接合技術である。異種材料、そして1500 MPa級高張力鋼(ハイテン)の溶接を目指し、摩擦攪拌接合技術開発に各社が取り組んでいる。この際、大切な力学的特性は強度比強度と曲げ剛性である。比強度と伸びを考えると各金属材料に利用の可能性があるが、曲げ剛性(比剛性)を考えるとCFRPが有望な材料であるといえる。図4にはこれらの材料の可能性と開発目標をまとめたものである。

ただしこれらの特性に加えて、製造・利用時トータルのCO₂排出量、そして材料のコストが重要になる。比強度で計算しても鉄鋼材料のコストはCFRPの1/10程度であり、その優れた加工性と構造設計の蓄積を考えると、鉄鋼の優位性が簡単に崩れることはないともいえよう。

ここで、鉄鋼材料開発の現状を図5に示す。高強度・高延性の中高炭素鋼の開発には鉄鋼3社が取り組んでいる。軽元素による粒界強化、オーステナイトの組織制御、炭素量の高度制御が中心であるが、解析評価技術にも重きを置き、中性子線やX線の利用、アトムプローブなどによるナノ組織観察技術の高度化を活用し、ナノテクノロジーそのものの鉄鋼材料への適用ともいえる。将来を見据えた積層材料の技術開発、レーザーを用いたハイテンの溶接にも取り組んでいる。

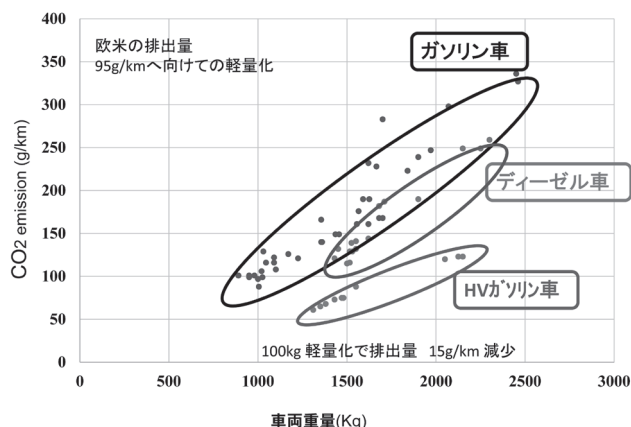


図3 車両重量とCO₂排出量(国土交通省平成26年データからプロット)

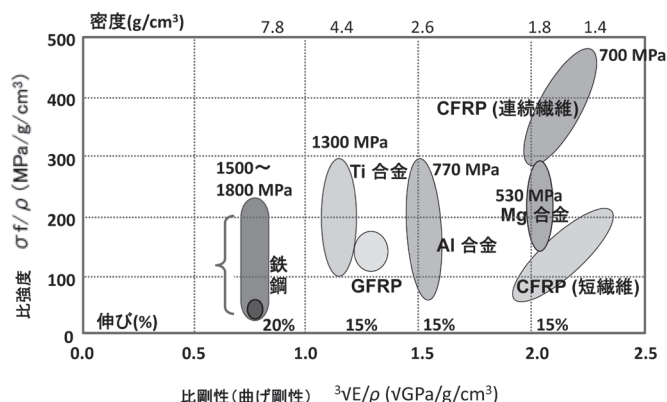


図4 材料の比強度と比剛性

3.2 革新的構造材料プロジェクト—耐熱材料の開発とマテリアルズ・インテグレーション

内閣府が総合科学技術・イノベーション会議を立ち上げて以来、初めて内閣府自身が遂行する研究プロジェクト、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) が昨年より開始している。産業競争力強化を目指した10件のプロジェクトの内の1つが、革新的構造材料プロジェクトである。先のNEDOプロジェクトと同じくスケールの大きなものであり、航空機の機体・エンジン用の耐熱材料開発と、材料計算科学・理論・実験を統合する“マテリアルズ・インテグレーション”を目標としたものといえる。ここには35大学、20企業、そして10の公的研究機関から130名の研究者が参加し、基礎・基盤技術から応用・実用化開発までを産学官協同で研究開発を進めている。大学・独法の技術を産業界に移転する文部科学省の産学官連携、産業界中心の技術開発を大学がサポートする経済産業省の産学官連携とは一味違い、基礎研究・開発研究を一貫通貫して産学官で遂行する新しい試みといえる。

本プロジェクトでは、機体のCFRPの製造プロセス開発に加えて、耐熱チタン・ニッケル鍛造技術の動翼開発、そして超高温で用いるセラミックスコーティングの研究開発に集中している。図6は材料の使用温度と比強度の関係を示している。丸で囲った材料が本プロジェクトのチャレンジする材料

である。それ故この材料プロジェクトは日本における航空機産業の発展を期待したものといえる。また一方で、マテリアルズ・インテグレーションは理論、計算科学、実験等のデータベースの統合により、材料や部品の性能を予測するシステムを構築し、材料開発時の時間短縮を目指す。構造材料のマテリアルズインフォマティクスまたは米国Material Genome Initiativeに相通じる材料計算科学の構築といえる。予測に重点を置く、準問題の計算科学と将来は逆問題の計算科学も必要になる。

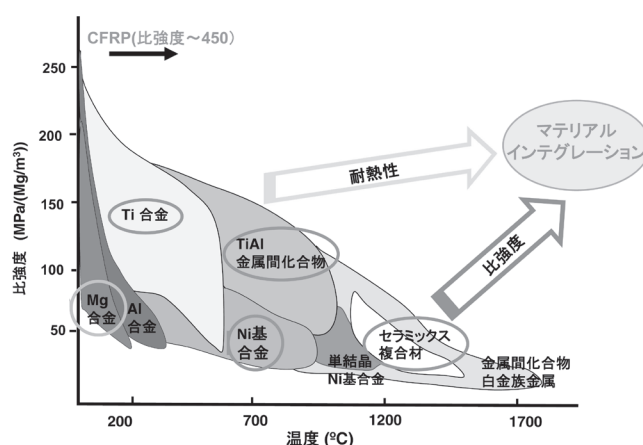


図6 航空機対象材料の耐熱温度と比強度

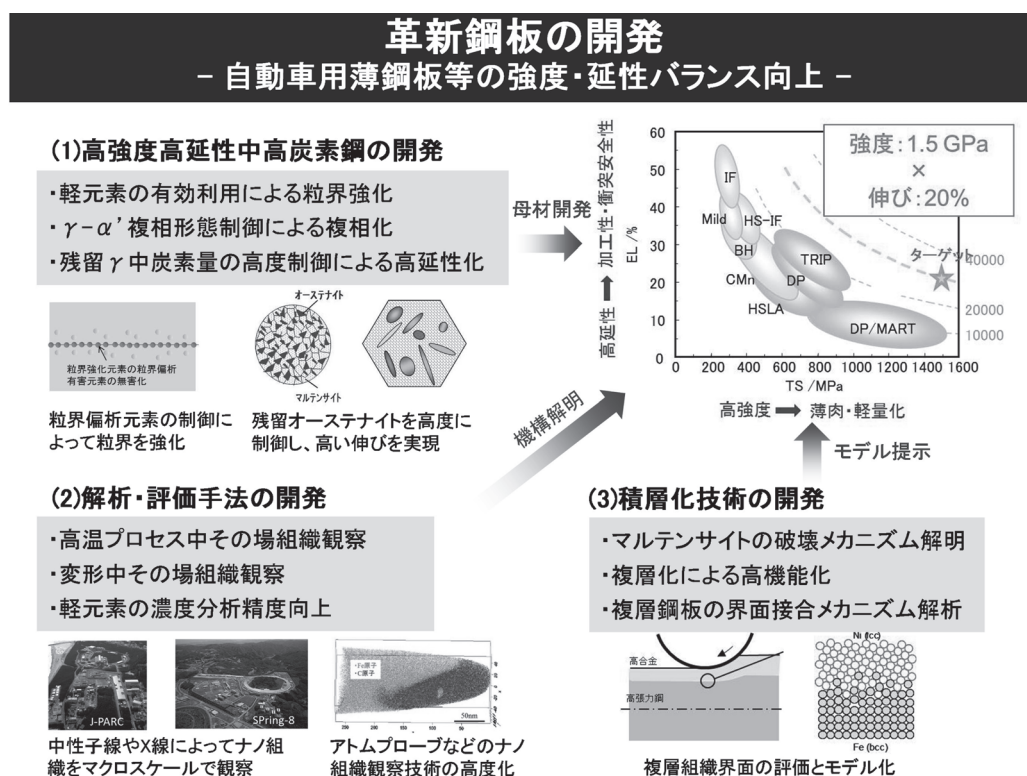


図5 革新鋼板の開発

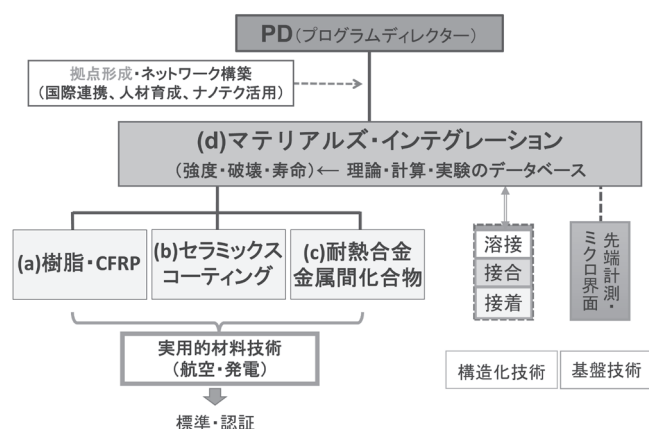


図7 研究体制

図7には、本プロジェクトの取り扱う全容を示す。この計画を実現し5年後の第一期の終了後にも継続的に研究開発を進めるには研究開発の拠点形成の構築が重要になる。このためには研究開発の拠点形成が重要になり、国内外のネットワークの構築を進めねばならない。人材育成・国際協調そしてナノテクノロジーの活用を視野に入れた研究拠点の立ち上げることも大きな目標である。

4 構造材料研究の将来

基礎・基盤研究の重要性を改めて述べる必要はないが、まずは、今後の物質材料研究について図8に私見をまとめてみた。材料工学は採鉱・冶金の流れから構築され、物質科学は物理・化学の分野から派生したともいえる。近年その垣根は低くなり、材料科学として取り扱ってよいと考えられる。さらに、バイオロジーと材料科学とが密接になってきており、そして、マテリアルズ・インテグレーションを構築するには逆問題も重要であることから数学分野との連携も必要となっ

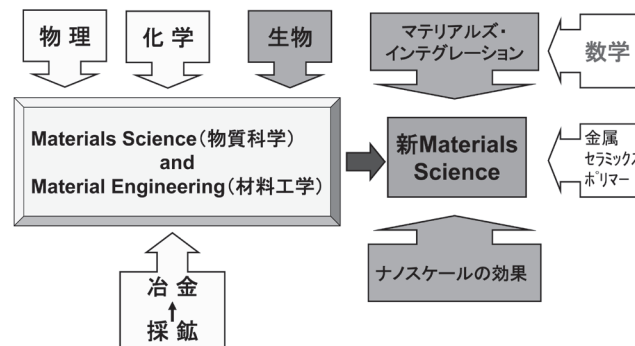


図8 新しいマテリアルズサイエンス

てきている。

電子・原子・分子のナノレベルでの観察、構造制御としてのナノテクノロジー（これを元素戦略と置き換えても差し支えないが）とビッグデータの処理も含めて、情報学を取り入れたマテリアルインテグレーションが材料研究の2つの重要な基盤技術となるであろう。これらの基盤技術の上に、新材料の開発特性を向上する技術、産業別の出口戦略材料技術が構築されるべきであろう。

これを遂行するには大学の材料系専攻がイノベーションの視点からの改革、企業は自前主義からの脱却、研究開発法人は橋渡し機能を強化しプラットフォームを形成する必要がある。構造材料の分野でナショナル・イノベーションのエコシステムの構築を成し遂げたいが、これまでどおり日本鉄鋼協会がその中核として先導役を務めてくれることを期待したい。

昨年、オバマ米国大統領がホワイトハウスで製造業復活の宣言をし、金属学と構造材料の重要性を名指しで挙げている。今後、インフラの輸出は日本の生命線であり、構造材料への期待は特に大きい。

(2015年3月4日受付)