

米国における鉄鋼材料研究の 位置づけと戦略

村山 光 宏*

1. はじめに

2011年にアメリカ合衆国大統領行政府が出した Materials Genome Initiative for Global Competitiveness と名付けられた材料系研究ガイドライン⁽¹⁾は、日本で材料研究に携わってきた立場から見ると取り立てて目新しいアイデアとは思えなかった。しかし、National Science Foundation(NSF, 全米科学財団), Department of Energy(エネルギー省), Department of Defense(国防総省)等の複数の省庁が、それぞれ独自の方針に基づいて運用している基礎研究費の配分を変更し、この指針に厳密に沿った形での課題募集を相次いで行うなど、すでに米国の材料研究の方向づけに影響を及ぼし始めている。米国の基礎研究予算の多くが3年単位であることから、この先最低5年(2サイクル)程度の期間、米国における材料研究は、Materials Genome Initiative が積極的に反映されたものになるのではと予想できる。

2006年後半から2007年後半にかけてエネルギー省、国防総省がスポンサーとなって行った、Integrated Computational Materials Engineering(ICME)構想に関する委員会が、Materials Genome Initiative の策定には強い影響を与えている。ICME 構想の詳細はUS National Academies からの刊行物⁽²⁾等で知ることができる。この構想は、どちらかといえば理論や計算機シミュレーションを専門とする産官学の研究者が中心となり、計算材料科学をエンジニアリングへ積極的に応用することを目指して創りあげられている。そこで、アメリカ合衆国(以下、米国)における鉄鋼を含む材料基礎研究の戦略を理解するための一助として、このICME 構想の提案者の一人である Elizabeth Holm 博士(Sandia National Laboratory)が、最近の TMS annual meeting(March 2012, Orlando, FL)で行った ICME 構想に関する基調講演の内容をかいつまんで紹介するところから始めたい。

2. ICME 構想

ICME 構想では、計算材料学で用いられている各種ツールを融合させて包括的システムとすることにより、材料開発の促進、エンジニアが行う最終製品の構成要素設計プロセス最適化の支援、さらには設計・製造の統一化を目指している。誤解を恐れず単純化してみる。すなわち、製造現場でエンジニアレベルが無理なく使えるツールは、有限要素法シミュレーションだけと割り切って、第一原理計算から Monte Carlo, Phase field, Mean field 等の各サイズスケールに応じたツールは、有限要素シミュレーションで最終的なデザイン決定を行う際の材料パラメーターを与えるために統合的に活用する。現場のエンジニアは、研究者レベルの専門知識や理解がなくても、最新の材料科学研究から得られた材料パラメーターをその場でデザインの最適化に応用する事ができる。これによって、エンジニアが有限要素シミュレーション上で、部分的なデザイン変更、例えばタービンブレードの曲率の変更を行った場合の部品またはシステムの応答や寿命を予測できれば、開発期間および開発費の低減に加えて、世界的な景気の後退に伴う各種予算の削減によって生じるエンジニアの習熟度不足、および専門技能の伝承が途絶えることを防ぐためのトレーニングツールとして働くことも期待できる。ICME 構想に先立つ同様な工業用ツール開発の成功例として、フォード自動車が開発した Virtual Aluminum Casting がある。これを活用することにより、製品の開発時間を15~20%短縮することに成功したと報告されている。

この ICME 構想において興味深いのは、開発するシステムをエンジニアにとって有用にするため、材料に依存しない形に作りあげる点である。即ち Ni 基合金を Ti 基合金に置き換えても、さらには金属材料を炭素系複合材料に置き換えても、同じシステムを用いてデザインの最適化が可能となるところまで到達しようとしている点である。現実的に考えると、すでに数多くの研究結果が発表されている合金系でなら、上述のような予測システムが実現可能な気もする。しか

* バージニア工科大学材料工学科; 准教授(Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061)
A Medium-term Outlook for U.S. Structural Metallic Materials Research; Mitsuhiro Murayama (Dept. of Materials Science and Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, U.S.A)
Keywords: ICME(integrated computational materials engineering), Materials Genome Initiative, structural metallic materials, steel
2012年6月18日受理

し、これを材料によらない普遍システムにするためには、どの機械的特性が定量的に予測可能で、その支配的因子をどう材料組織と結びつけ、決定できるのかを各サイズスケールで、きちんと理解する必要がある。さらに、計算科学ツールが試作工程と評価(解析)過程の迅速化を促すと同時に、ナノスケールから可視領域までの各サイズ領域で実験と計算機シミュレーションの相補的かつ反復的なフィードバックを行い、これによって各サイズスケールで実験と計算機シミュレーションを融合させることで、計算材料科学ツールを基本としたシステムを完成させようとしている。Holm 博士は、人的資源と予算を実験に重点的に配分し、かつ計算機シミュレーションは、各サイズ領域で実験結果を正確に再現し、ひいては最終製品またはその構成要素の寿命予測が可能なところまで手法の改善や最適化を図ると明言されていた。実際の研究プロジェクトにおいて、実験と計算機シミュレーションの重みが7:3位に考えられているようである。計算材料科学の専門家が、実験屋により予算を回せと言ってくれるのは、ありがたいような恐ろしいような話である。

勿論現時点では、計算・実験ともに解決しなければならない問題を多く抱えている。例えば計算機シミュレーション側に課せられた課題としては、第一原理計算における最適化をパラメーターレベルで行えるのか、あるいはポテンシャルの開発まで遡らなければならないのか、計算機内実験の時間軸を現実の物理現象とどう整合させるか等がある。実験に関しても、個々の測定点についての精度に加え、統計的な信頼性が重要となる。特に、サイズスケールの小さな(空間分解能の高い)組織・組成解析手法において、観察結果がマクロな機械的特性の評価因子として適当なのか、代表的な組織・構造をどのように見分け、特性変化を支配する組織因子を抽出するのか、といったこれまでも繰り返されてきた議論をより厳密に追求する必要がある。また、複数回の計算機シミュレーション—実験の反復作業を行うことが必要になるが、一般に空間または組成分解能の高い観察手法ほど測定点数(N数)を増やすのが不得意なことを考えると、理論が実験的に押さえない限りならぬ組成範囲や解析する組織のサイズ領域を精度良く予測してくれることが不可欠になる。講演を聞きながら、 μm 以下のサイズスケールにおいて計算と実験の間の相補的かつ反復的なフィードバックを基に、材料に依存しないシステムが構築できるのは、まだ少し先のような気がしたのだが、このような一見無謀とも言えそうな高いハードルを掲げ、複数の省庁から予算を配分し始めてしまうところがいかに米国らしい。

繰り返しになるが、計算機シミュレーションと実験を組み合わせる部材製造プロセスの基盤技術を開発するというアプローチは決して目新しいものではない。このようなアイデアの基に行われた研究は、規模の大小を問わず今までにいくつもあった。では、なぜこのような取り組みが改めて注目されているのであろう。最近のHarvard Business Review誌に「Does America Really Need Manufacturing」という、40代以上の工学系教官が聞いたら怒るところかいまさらと笑い出しそうな記事が載っていた⁽³⁾。記事では、米国の連邦政府がマーキュリー、アポロ計画を実施した1960年代の基礎研究

から生み出された技術が現在までの製造プロセスを支えてきた事、ところが米国はその後何十年にもわたって脱工業化経済モデルを実験してきた事、そして現在では多くの製造業で製造部門を単なるコストセンターとして見ている事を述べている。この実際の製造現場を持たずに先端的な製品を販売するモデルを提唱してきた機関の1つであるHarvard Business Schoolの教官たちが、航空宇宙、ロボット工学、超微細エレクトロニクス、バイオマテリアル、エネルギーといった米国が現在でも比較的競争力を保っている分野を中心に、過去20年以上にわたる製造プロセスのアウトソーシング(外注、外製)を止めるようにと180°違った意見を述べている。今すぐに、自国での製造プロセスを支え、刷新を目指すための取り組みを再開しないと、この先の技術革新は興せない=国際競争力を失っていく、という指摘がなされているわけである。製造現場と物理的な距離があると技術革新が継続しないという認識を産官学が共有したと考えて良いだろう。

もう1つの背景に、減り続ける開発研究予算、熟練工の減少と若手エンジニアの低定着率などといった日本と同様の問題がある。ジェットエンジンとその部材の開発を例にとって考える。特に安全性が重視される分野では、新材料が実機に採用されるまでの期間が非常に長いので、実機材と開発材との間には数世代の差がある。この時間的要因に加えて、コンポーネント開発のためには材料の特性とデザインのバランスを取ることが必須であり、これにかかる試作・評価の費用が莫大である。そのため、たとえ次世代軍用機の開発研究といった比較的成本に縛られない部門であっても、数台のジェットエンジンを同時にかつ継続的に試作・評価する。さらにはエンジニアが材料と対話しながら試行を繰り返すことで、開発と同時にエンジニアの習熟度を上げ専門技能の伝承を計るといった従来の経験知ベースの手法は転換を迫られている。実際の開発・製造現場のエンジニアを指導する層からは、ICME構想を活用することで、たとえスクリーン上でのシミュレーションでも、エンジニアが最低限の「経験から学ぶ」機会を確保し、自ら判断しながら開発を進められる自律型エンジニアを養成するという切実な要望がある。

このような動きは、現在日欧米間での競合になっているEV(電気自動車)の充電システムの標準化競争や、日本を含む先進工業国と中国との間で問題となっている基礎科学と製造技術に関する情報の一方的な流れといった問題とも関連がないとは言えない。最近、米国の製造業、特に機械・電子機器等が製造拠点を中国から本国に戻す動きが出始めているという統計もあり⁽⁴⁾、このICME構想がカントリーリスク(country risk)と製造コストを減らす点から、このような流れを加速させることも考えられる。ICME構想の中には欧州の研究機関または企業の存在感が感じられるのに対して、残念ながら、日本の機関が企画段階に影響を及ぼした様子は見られない。でき上がった枠組みへの参加を歓迎されるのは当たり前であり、その前の段階である枠組み作りへの参加を望まれるかどうかが必要不可欠なパートナーとして認識されているかどうかを測る上において重要である。あなた達抜きでは国際的な枠組みや仕組み作りを進めることができないと声がかかるような存在感と相互理解(信頼)が積み重ねられてい

るかという点から国際協力や提携のあり方を見直すことも必要ではないかと感じた。

3. 米国の構造用鋼プロジェクト研究

米国の基礎研究予算の中で、日本の科研費に相当するのが National Science Foundation (NSF) であり、NSF の通常枠で進められている研究は、いわゆる基礎研究に該当すると考えられる。さて、現在どのくらいの数の構造用鋼に関する基礎研究に予算がつけられているかを探してみると、片手で足りるくらいしか見つからず、実施機関もほぼ予想通り、例えば以下のような鉄鋼研究者になじみ深い大学の名前ばかりである：Case Western Reserve University, University of Wisconsin-Madison, Drexel University, Colorado School of Mines, University of California-Berkeley, University of Texas Austin. 米国では、構造用鋼研究は趣味としか思われていないと、もう20年以上も言われているのはやはり本当だったのだろうか。さらに悪いことに、これらの課題のほとんどは相変態の基礎研究を行うための材料として鉄系合金を扱っているだけで、実際に鉄鋼材料を研究しているわけではない。

ところが、プロジェクト研究となると少し様子が違ってくる。実は、近年のエネルギー安全保障と炭素排出量削減の流れを受けて、米国でも構造用鋼が重点課題として取り上げられている複数のプロジェクト研究が進行中である。プロジェクト研究があまり目につかない理由はいくつか挙げられるが、一般に missionary agency と呼ばれるエネルギー省や国防総省では公募型研究にもいろいろな形態があり、進行中の全ての研究課題が公表されているわけではないこと等がある。またプロジェクトによっては、学会などで成果をすぐに発表できないこともあり、構造用鋼研究がかなり活発に進められていても、参加者以外にははっきりとわからない場合があると考えられる。そこで本稿では、エネルギー省の下で現在実施されている、大学を主な対象としたプロジェクト研究プログラムのうち、鉄鋼材料が関係するものを2つ取り上げてみたい。

Nuclear Energy University Programs (NEUP)は、商用軽水炉の安全性と持続可能性を確保するためのプログラムの一部として位置づけられており、原子炉の設計から各種計測機器の開発、材料の経年変化を予測するための計算機シミュレーションモデルの構築、原子力関連材料研究全般といった産官学の原子力関連研究を包括的に対象とするプログラムである⁵⁾。通常の基礎研究予算が Office of Science の管轄であるのに対して、このプロジェクト研究は Office of Nuclear Energy が担当しており、産官学の連携を重視している。原子力と関連するであろう構造用鋼に関する研究は、全てこのプログラムに応募することが可能である。例えば過去5年間の実績だが、

- 2009年 71研究課題(31大学) \$44 million
- 2010年 42研究課題(23大学) \$38 million
- 2011年 51研究課題(31大学) \$39 million
- 2012年 47研究課題(32大学) \$36.2 million

となっており、他に大学への装置整備予算(2009年 \$6 million(31大学)・2010年 \$13.2 million(39大学))や毎年 \$3~5 million の奨学金など総額 \$50~60 million の予算を交付している。構造用鋼に関する研究課題では、第3~4世代の原子炉用構造材料として ODS 鋼、オーステナイト耐熱鋼や高 Si フェライト鋼などの開発から照射による組織と力学特性変化、または原子炉環境における腐食の解析等が実施されている。

エネルギー省は、実験用原子炉や加速器施設を傘下にある複数の国立研究所に設置しており、NEUP のようなプロジェクトに参加した場合、大学の教官・学生が放射線照射などの実験を進める上でのサポートを提供している。例えば MIT, North Carolina State University には実験用原子炉が、University Michigan, University of Nevada, University of Wisconsin 等には、原子炉照射後や原子炉模擬環境における材料評価を行うための施設があり、これらはエネルギー省の元で国内共同利用施設として整備されている。

勿論、NEUP は米国で行われている原子力研究のほんの一部に過ぎない。太平洋の反対側から福島第一原発の事故以降の日本の報道をみていると、脱原発と原子力研究をきちんと分けて考えているのだろうかかと心配になってしまうことが多い。確かに米国では軍事用技術としての原子力研究が存在し、研究者の雇用や研究資金の配分という面では、日本よりも選択肢が多いのは事実である。現在100基を超える原子炉が運転中であるが、商用(発電用)の原子炉建設は、1979年のスリーマイル島事故以来行われていない。しかしながら、原子力業界へ就職を希望する学生は少なくないことから、機械系、材料系を中心に原子力工学プログラムを持つ大学も多い。つまり、学問・研究分野としての原子力関係分野は、その必要性が社会的に認識されていると考えられる。原子力発電施設のような複雑なシステムを設計し、維持するために必要な知識や技術の量、そしてそれらをすり合わせてシステムとしてまとめあげるためのノウハウなどは、一度失われてしまうと取り戻すことが容易ではないものである。将来的に原子力発電がなくなっていくとしても、このような知識の集約を失ってしまわないような方向に、関連学問分野を導いていく必要があるのではないだろうか。

同じエネルギー省の中で、化石燃料(石油・石炭)に関する研究を主に担っているのが、Office of Fossil Energy であり、傘下の国立研究所の1つである National Energy Technology Laboratory (NETL) を中心として Regional University Alliance (RUA) という産官学連携プロジェクトを実施している。こちらのプロジェクトは NEUP とは違って、事前に選ばれた5つの大学(Carnegie Mellon University, Pennsylvania State University, University of Pittsburgh, West Virginia University, Virginia Tech)からの研究課題提案を元に、それぞれ NETL の研究者と5大学の研究者が混合した17のグループに分かれ、グループ毎に計算機シミュレーションと実験を並列する形式で進められている(完全な公募ではない)。この17グループが超々臨界発電プラントに向けた先進耐熱鋼開発から、地質調査、鉍石の精錬さらには環境保全まで化石燃料の利用に関する全ての分野を網羅している。2012年度の研究予算は総額で \$57.5 million であり、\$16.5

million が188の研究課題に分配されている。このグループ編成は少々変わった方法であり、17グループの研究代表者が自分の必要とする専門を持っている人を所属とかかわりなく選べるという利点がある。公募型の研究では、1つ1つの研究課題が自己完結型として提案されるため、申請者側で選択した共同研究者以外が直接研究課題に関わるような体制がとりにくい。この RUA 方式だと、米国東部の比較的狭い地域にある5つの大学を選んでパートナーとしているため、今まであまり付き合いの無かった他大学の研究者とチームを組むことで、それぞれの視野が広がり、ここでの研究を基に他の外部研究資金獲得を狙うといった効果も期待できる。現在、筆者はこの RUA の中で改良 9Cr 系耐熱鋼の開発と寿命予測に参加している。国立研究所の研究者が実際どのように研究活動を行っているかを知る機会が今までになかったので、実際に共同研究を始めてみると日本の超鉄鋼プロジェクトや、EU の Advanced materials for power engineering components, high efficiency, low emission systems (COST-MPNS-501, 1981-1997), Alloy development for critical components of environmental friendly power plant (COST-MPNS-536, 2004-2009)等の先行プロジェクト等を正当に評価し、さすがに鍛造等は日本鍛造鋼株式会社や DOOSAN (韓国)に外注しているものの、9Cr 試験鋼開発やクリープ試験等による材料特性評価を実際に行っていると知ったときには驚いた。このプロジェクトでは、9Cr 系耐熱鋼の他にも CO₂ ガス輸送用パイプ材の劣化過程を電気化学的手法により動的観察する手法の開発、耐酸化コーティングや拡散バリアコーティングによる高温部材の長寿命化に関する研究、ガス燃焼室等の構造部材の高温酸化など鉄鋼材料に関係した課題が多く進められている。

4. グローバル化時代における日本の金属材料研究の優位性の有無

ここからは主観的な話となることをお許し願いたい。まず、グローバル化時代における日本について、たまたま内と外とから見る機会を持てたところでの感想を書いてみたい。自分の国とよその国を比較して、どちらのどかが優れているという判断を下すのはなかなか難しい。特に米国のように、平均像というものが存在しない国では、経済的または社会的な立場の違い、例えば学位を取りにきたのか、短期留学(招聘)なのか、就職したのか等によって何が違って何が経験できるかは大きく変わってくる。1990年代以降の米国の大学の仕組みについては、電気通信学会誌にある小林久志氏(元プリンストン大学工学部長)のインタビューが非常に参考になるので是非ご一読頂きたい⁽⁶⁾。個人的には、米国で visiting researcher (短期留学-お客様)、research faculty (研究職)、tenure-track teaching faculty (教育職)と違う職位を経験した。たとえ同じような事態に遭遇しても、職位が違えば周りの対応が全く違う。誤解を恐れずに言えば、日本よりもはっきりと職位の違いが地位の違いとして理解されていることを感じた。なお、日本ではあまりなじみがないと思われる research faculty と teaching faculty の違いであるが、teach-

ing faculty は教授会構成員であり、ポストは大学から保証されている代わりに授業やマネジメントなどが義務づけられている。research faculty は一般に外部研究資金を獲得することにより、自分の給料を自分で稼ぐことを要求されている。極端に言えば身分の保障はない代わりに、授業などの義務がほとんどない。

では、若い人達が海外に出ることは有益なのだろうか？現在、学部生、院生だったり任期制のポストにいる方が、果たして海外に出たらいいことがあるのか、または同時期に国内にいるよりも多くのことを得られるのであろうか？

まず学位留学についてであるが、医学系、理学系や航空・機械工学系の方たちからは、ポジティブな意見を聞くことが多く、またこういった分野では、米国およびヨーロッパ諸国で卒業後そのまま就職されている方も多いようである。現役留学生や留学経験者が自分の学位留学の経験・ノウハウを日本の学生に伝え、学部・大学院への留学をサポートしようとするグループ(例えば米国大学院院生会)も存在する。実際にこちらの大学で勤務してみると、どうしても海外からの学生の成績や履歴書は、国内の学生に比べて低めに見積もられてしまう傾向にあり、奨学金や研究室配属などにおいて不利になることが多いように認められる。採用する側は、米国学生の基準が当てはめられない場合は、たまたまその学科で過去にこの国から来た学生が平均的に優秀であった等の情報を頼りに判断することになってしまう。自分の国を出ると、知らないうちに不利な条件からスタートしなければならないことになっていくという状況になりがちである。そんな点からも、学位留学をするのであれば、スタートで得をするかよりも損をしない準備が重要であると思われる。特に語学は、米国で学校に通って授業を聞いているだけでは決して上達しない。さらに、どの程度のサポートや学習の機会が得られるかは、学校によってまちまちであるため、かなりの努力が必要と思われる。一方、学位を取るまで最低3年、長ければ10年程度を海外で過ごすわけであるから、その後ずっと付き合いける友人ができる可能性は高い。学位留学の面白さと辛さについては、多くの方がインターネット上や学会誌等に記されている。例えば金子賢治氏の英国での学位留学記がまてりあ⁽⁷⁾に掲載されている。

博士号取得後のポスドクの1,2年間、または大学で教職を得てからの短期(招聘)留学についてはどうだろうか。世界的に名前を知られている大学は言うに及ばず、筆者が勤務している大学レベルでも毎年かなりの数の学生、研究者が世界中から訪れる。学科や学部が公式に招聘した一部の人達を除くほとんどの滞在者の交流範囲は、ホストグループを中心とした極めて限られたものになりがちである。短期留学や海外での生活経験がその後の研究生生活に刺激となるのは間違いのないのだが、こういう形で海外経験を持つ方の多くは、欧米圏で1,2年程度留学するだけでは、その後の国際会議で知り合いを見つけるのに不自由のない数の知人や同僚はできないと思われたのではないだろうか。そういった意味では、今から10年以上も前に、ある分野の世界的な権威が発した言葉が思い出される。「国際会議のバンケットでは、昼の会議で皆が驚くような成果を発表している日本人が端のテーブルに

