

# 金相学の誕生と材料科学への発展

小岩 昌 宏\*

## 1. はじめに

私が学生であった頃、冶金学科の学生が最初に受講する専門科目は「金属組織学」であり、状態図の読み方、金属の組織形成の原理が主な内容であった。状態図を使いこなせることが冶金学(金属工学)を学んだ学生と他専攻の学生との大きな差異であり、強みであると聴かされた。学科名や講義の科目名はいろいろ変わっても、材料関係の基幹講義として「状態図と微細組織」に関する教育が重要であることに変わりはないであろう。「金属組織学」はメタログラフィー(Metallography)の訳語であり、「金相学」と呼ばれることもある。

本稿では、メタログラフィーの誕生と、その材料科学への発展を概観する。また、メタログラフィーの学問としての基礎を固めたタンマン、そのもとで学び、「金相学」という訳語を提唱した近重眞澄<sup>ちかしげますみ</sup>の足跡、材料科学の将来の方向に関する論評を紹介したい。

## 2. メタログラフィーの誕生<sup>†</sup>

最初に金属を顕微鏡で調べたのは、ロバート・フック(Robert Hooke)で、1665年に出版した「ミクログラフィア」には100倍に拡大された針の先端の図、50倍に拡大されたかみそりの刃の図が載っている。これが顕微鏡で観察された金属のもっとも古い像である。その後、1720年代にフランスのレオミュール(René Antoine Ferchault de Réaumur)が鉄の研究に顕微鏡を用いた。彼は浸炭鋼と可鍛铸铁の製造法を発明し、浸炭、脱炭、焼入れの過程を科学的に解明するため、破面の肉眼観察、拡大鏡、さらには顕微鏡も使用した。よく知られているのは白色銻および灰色銻の劈開面の拡大鏡

による観察である。

1808年、オーストリアの王立工業製品蒐集館の館長ウィドマンステッテン(Count Alois von Beckh Widmanstätten)は、隕鉄の研磨面を希薄硝酸で腐食し肉眼で観察した。以前、印刷業を営んでいた経験を生かし、腐食表面にインクをつけて紙に転写して詳しく観察した。針状の析出物が特定の結晶面に沿って配列しているのが見られた。その美しい幾何学的な格子模様は「ウィドマンステッテン組織」と呼ばれている。「研磨して腐食する」する手順は、その後の組織観察の標準的方法となるもので画期的であったけれども、肉眼観察が主であったので長い間人々の関心を引き起こすことがないままに過ぎた。

1864年、英国 Sheffield の冶金学者のソルビー(Henry Clifton Sorby)はウィドマンステッテンに倣って、金属または合金を研磨し、顕微鏡を用いて肉眼的以上に微細な組織を検査する方法を考案した。しかし、彼の研究も20余年、世間の顧みるところにならず、まったく忘れられたかに思われた。この間、ドイツの Martens、フランスの Osmond がそれぞれ独立に合金の顕微鏡的研究を進め、この方法の有効性を示し多くの学者が注目するようになった。その後、欧米諸国の著名な学者が現れた。フランスの LeChatelier、英国の Robert-Austen、Rosenhain、米国の Howe、Sauveur、ドイツの Heyn、Tammann などである。

## 3. グスタフ・タンマン(Gustav Tammann)<sup>(2)-(4)</sup>

タンマン(写真1)は熱分析法を用いて温度による状態変化を詳しく調べ、合金系に異相平衡論を応用しメタログラフィーを単なる顕微鏡による観察の記述から理論的な学問へ確立する道を開いた。彼はエストニア共和国のタルトゥ市でドイ

\* 京都大学名誉教授(〒520-0246 大津市仰木の里1-18-7)

The Beginning of Metallography and Its Development to Materials Science and Engineering; Masahiro Koiwa (Emeritus Professor, Department of Materials Science and Engineering, Kyoto University, Kyoto)

Keywords: metallography, materials science & engineering, education, history

† メタログラフィーの歴史に関しては Cyril S Smith による名著(1)がある。1988年にペーパーバック版が発売されたが、現在では入手が難しい。

2009年4月12日受理



写真1 Gustav Tammann (1861-1938).

ツ系の家系に生まれドイツ語を常用語とする地域に育った。小学校、ギムナジウムを通じて数学、歴史、宗教などの教科はよくできたが、語学は性に合わなかったようで、とくにロシア語を苦手とした。ドルパト(Dorpat)大学<sup>†</sup>化学科を卒業した後、農業大学に職を求めるつもりで植物生理学、顕微鏡学の研究に従事した。しかし、物理学と化学の境界領域に興味を覚え、1887年に元素の周期律表に関する研究で博士の学位を得た。親交を結んだメンデレーフに「ロシアの大学に職を求めるなら、ロシア語を学べ」という忠告に従って本格的にロシア語を学び習得した。ドルパト大学の化学研究所長、正教授に就任したが、休暇のたびにヨーロッパの諸大学を訪問し、とくにオランダの学者から強い影響を受けた。なかでも、ローゼボームとの討論を通じて不均質系の平衡について多くを学んだ。

1903年、ゲッチンゲン大学に招かれ、ロシア皇帝から市民権放棄の許可を受けてドイツに帰化し、以後約30年間この大学で研究に従事し、金属学の基礎を築いた。ドルパト大学時代に、無機物質の不均質平衡およびそれに及ぼす高圧の影響に関する研究を行っていたが、ゲッチンゲンではガラスに関する研究を始め、次第に金属合金に手を広げていった。その主な業績を以下に述べる。

### (1) 熱分析と平衡状態図

ギブスの熱力学はローゼボームにより合金系に適用され、多くの研究者が平衡状態図の作成に取り組んだ。タンマンの熱分析法は状態図研究に飛躍的な進歩をもたらした。この方法は合金を熔融状態からゆっくり冷却するときの温度-時間曲線上の節点あるいは滞留点から、状態図を決定するものである。この方法は他の研究者も用いていたけれども、タンマンは克明に実験し、固溶体のみならず金属間化合物の安定領域を定めた。また、熱分析によって定めた状態図の妥当性を

<sup>†</sup> エストニア最古の大学で、現在はタルトゥ(Tartu)大学と呼ばれている。タルトゥ市は首都タリンについてエストニア第2の都市で、学問・文化の中心である。エストニアは13世紀以降、ドイツ、デンマーク、ポーランド、ロシアなど外国勢力に支配され、タンマンの青年期にはロシア帝国の一部であった。なお、1991年にはソ連から独立回復を宣言し、2004年には欧州連合(EU)に加盟した。

確認するため、光学顕微鏡による金属組織の観察に加えて、電気伝導度の温度依存性も測定した。このように細心の注意を払って、20種のよく使われる金属の2元系について10 at%刻みの組成の試料(総数1900個!)を作製し、大づかみながら状態図の全貌を明らかにした。

### (2) 規則格子の発見

タンマンは、固溶体の化学腐食挙動が合金の製造法や前処理により異なることに気付いた。たとえば、Au-Cu系において組成比が簡単な整数比である場合、融液から凝固したものは腐食されにくい、電着法で作ったものは腐食されやすい。彼はこの結果を次のように説明した。「融液から凝固し徐冷した試料では、AuとCuの原子が規則的に配列(この状態を規則格子という)している。電着した試料では原子の配列に規則性がない」また、「凝固法で作製した試料でも、高温から急冷すると腐食されやすいので、規則格子は形成されておらず、徐冷した場合には原子の移動(すなわち拡散)が起こって、規則格子が形成される」と推論した。1919年にタンマンが提唱した規則格子の考えは、1923年のペインによるX線の実験で確かめられた。

### (3) 冷間加工と再結晶

平滑に研磨した多結晶を塑性変形したのち光学顕微鏡により観察し、直線的で微細な模様(すべり線のこと)を認めた。その模様はすべての結晶粒で同時に発生するのではなく、応力軸と結晶粒方位の幾何学的関係によって発生のしやすさに差異があることを見出した。これは、金属の塑性変形機構の解明、転位論の提唱につながる先駆的な研究である。また、塑性変形した多結晶を加熱した場合の再結晶に関し、後述の凝固過程と同様に、核形成・成長の考え方を適用し、その後の研究の端緒を開いた。

### (4) 凝固過程の研究

液体から固体への相変態、すなわち凝固過程の最初の系統的研究はタンマンによって行われた。透明な有機物質を用いた実験により、凝固過程は結晶核の生成・成長という2つの素過程により説明できることを示した。また、核形成および成長と過冷度の関係を明らかにし、液体→固体反応における凝固潜熱の役割について明快な解釈を与えた。単結晶の作製法として知られている「タンマン-ブリッジマン法」も凝固研究の所産である。

タンマンの発表論文は546件で、当時の研究者としては驚くべき多産である。この中には著名な教科書 *Lehrbuch der Metallographie* (初版1914, 第2版1921, 第3版1923, 第4版は *Lehrbuch der Metallkunde*<sup>††</sup>と改題1932)が含まれている。タンマンは毎日10時間実験室で過ごし、研究室員にも長時間実験することを求め、思うようにデータを出さないものにはきびしい叱責の声が飛んだ。研究室にはドイツ人学生

<sup>††</sup> 冶金学(あるいは金属学)教科書。



写真2 近重眞澄(1870-1941)<sup>(7)</sup>.

に加えて諸外国からの留学生も多く、日本からは近重眞澄、本多光太郎がここで学んだ。タンマンが亡くなったとき、本多は日本金属学会誌に弔詞を掲載しその死を悼んでいる<sup>(5)</sup>。

#### 4. 近重眞澄と金相学<sup>(6)</sup>(7)

近重眞澄(写真2)は、日本人として初めてタンマンの研究室に留学した人である。あとから留学した本多とは約5ヶ月、滞在期間が重なっている。この間、近重は先輩として研究・生活両面で親切に助言し、帰国後も親交が続いた。

近重はタンマンの研究室では、Bi-Tl, Cu-Te合金の状態図に関する研究を行い、帰国後も各種の2元系、3元系状態図や、鉄-炭素-酸素間の平衡など鉄鋼製錬に関する研究を行った。1917年には、著書「金相学」<sup>(8)</sup>を出版した。180ページ足らずの冊子であるが、簡潔明解に記述されており、一読の価値がある。巻頭の自序には以下の様に記している。

金相学ノ書欧米其撰ニ乏シカラス 就中 Tammannノ Lehrbuch der Metallographie, Guertlerノ Metallographie 及 ヒ Rosenhainノ Physical Metallurgy ヲ推シテ白眉トナスヘシ 顧テ本邦亦タ斯学ノ興隆ニ際シ亦ター書ノ其間ニ公ニセラレシ者アルヲ知ラス 豈ニ昌代ノ恨事ニ非スヤ 是レ余カ浅劣自ヲ揣ラス敢テ本書ヲ公ニシテ後学ニ資スル所アラントスル所以ナリ

金相学ノ大本ハ既ニ主トシテ西人ノ手ニ成レリ 此書著シテ余カ著述トナスト雖モ然カモ 其実質ノ創作ニ関シテハ余ニ於テ殆ト与カル所ナシ 況ハンヤ余カ曾テ Tammann 先生ノ門下ニ在リ師承スル所ノ者ハ既ニ拳ケテ先生ノ近著ニ尽ク 乃チ余ノ本篇ハ寧口之ヲ該書ノ訳述トナスノ当レルニ非ラサルヤヲ疑フ 只タ余カ講説固ヨリ遠ク先生ノ精微ニ及ハス 且ツ問々加フルニ自家ノ小研究ヲ以テス 是レ余カ猶ホ強ヒテ著スルニ著述ノ字ヲ以テセント欲スル所以ナリ 読者乞フ之ヲ諒セヨ

さらに、緒言において Metallography の訳語として「金相学」を用いる理由を以下のように記している。(文語体の原文を口語体にして記す。)

金相学は金属及び合金の内部組織を研究し、またこれと成分との関係、物理的ならびに機械的性質との関係について論究する学問である。金相学は原名を Metallography という。この原語の意味は金属に関する学術の発達とともに

に変化し、最初は単に金属記載学という意味を持つものであったが、1892年フランスの冶金学者 Osmond により顕微鏡的組織論の意味で用いられた。わが国においても近年この方面の学問が輸入され、主として Osmond 式に偏って顕微鏡の研究が中心となったので、Metallography を訳して金属組織学とされてきた。しかし、この学問は純理学的及び工業的の両方面の興味により非常に盛んになり、顕微鏡以外に異相平衡論を応用するようになったため、Metallography は金属の物理化学、より適切には金属の相則論という実質を備えるに至った。私は明治42年以来、金相学という訳名を創り、いつもこれを使用してきた。相則の相は形態を意味するから、金相の2字は一方において金属組織の意味を保存するのみならず、他方においては最近の進歩の方向も見据えており、この学問の本領を明示しようという利点があると思う。なお、金相という熟字は古書にも見受けられるもので、金属の外形ということを言うために用いられたものと思う。したがって、決して生硬の文字ではないことを一言しておきたいと思う。私は本邦において、金相学という名称が一般に使用されるようになることを希望する。

近重眞澄は1870年9月3日、代々山内侯に仕えた土佐藩士の家に生まれた。中学時代を過ごした高知は当時、自由党が全盛で政治への関心が高く、眞澄も初めは政治、法律に進もうとしたが、のち科学を志すようになり、17歳のとき漢文で「科学論」(744字)を書いた。これは61歳のとき出版した漢詩集、「太秦山房詩集」(1931)に付録として収録されている。科学の研究は「ひとり我国を利するのみならず、その恵みは万邦に及ぶ。為政者が僅かに一邦を利し、一代を益するのと同じ日に語れない」と論じた。東京帝国大学理科大学に入学して化学を専攻し、大学院を修了後、第五高等学校教授を経て、1898年、京都帝国大学理工科大学助教授に任ぜられ、1905年、3年間独英に留学し、上述のように Tammann の研究室に学んだ。1920年には前年に創設された「金相学講座」を担当した。Tammann は77歳で死ぬまで科学研究を続けたのに対して、近重は定年退官とともにまったく科学研究から離れ、茶人、漢詩人、俳人として過ごした。17歳の青年近重は科学に夢を託したが、60歳の定年時には『科学亡国論』を説いたとのことである。

「科学によって国運が伸びる。そこでますます科学を奨励する。しかし科学は必ずしも人類に幸福を与えない。人類を最も多く害するの科学である。文化の極度は人間の退化ともなる。」(雪だるま, 1935)

京都大学図書館の目録には近重の著書が20冊ある。そのうち科学書は前述の「金相学」など5冊で、他は禅に関するもの(参禅録, 禅学真髓, 禅学論, 禅心録, 野狐禪), 漢詩集 随筆(問居集 観風稟, 太秦山房詩集, 病牀録, 弥勒出生以前, 安井隱居集, 雪だるま, 呂宋島見聞記)であり、趣味人として余生を送ったことが窺われる。

#### 5. 訳語「金属組織学」の由来

上述のように、近重は「この原語(Metallography)の意味は金属に関する学術の発達とともに変化し、最初は単に金属

記載学という意味を持つものであったが、わが国においても近年この方面の学問が輸入され、主として Osmond 式に偏って顕微鏡の研究が中心となったので、Metallography を訳して金属組織学とされてきた」と述べている。

英和辞典によれば“-graphy”は名詞語尾で、2種の意がある。

- (1) 書法, 画法, 記録法などの意.      Lithography, Stenography など
- (2) 記述したもの, 学的記述などの意.      Biography, Geography など

近重は(2)の意に解して「金属記載学」としているが、metallography が誕生した時点では、顕微鏡で金属表面の模様を観察し描き、記録する方法という意味で、むしろ(1)の意が強かったのであろう。訳語として、「金属組織学」が定着したのはいつごろであろうか？ 1917年の東大工学部冶金学科の履修科目名にはこの語が用いられているので、それ以前であることは確かである。なお、俵 国一は1906年に発表した論文では、「金属顕微鏡学」と訳している。「組織学」は生物学、医学の分野で用いられてきた用語で、ウィキペディアには次のように記されている。

組織学(Histology)とは、生物組織の微細構造や機能、性質を研究する学問。解剖学から発展し、生物学や医学の重要な方法論の一つである。一組織学の歴史は1590年に顕微鏡が発明され、後にレーヴェンフックが改良し微細な観察が可能となったことから始まる。19世紀には生体を構成する組織という概念が誕生し、細胞、神経、血管、骨髄、上皮組織などが発見されていった。

顕微鏡により「微細構造や機能、性質を研究する学問」であり、対象が生物ではなく金属であることから「金属組織学」という用語が生まれたのであろう。研究対象が金属からセラミックスをはじめ各種の材料に広がるにつれて、ceramography、さらにはmaterialographyのような新語が現れたが、あまり普及していない。ただし、「材料組織学」はよく見かける。R. W. Cahn はその著書<sup>(9)</sup>で次のように述べている。

“ドイツ語圏においては100年ほど前から、Metallography は physical metallurgy を意味して用いられてきた。そのことは Tammann の著名な教科書 Lehrbuch der Metallographie の内容を見るとわかるであろう。”

してみると、Metallography は「物理冶金学」と訳するのが適切であったのかもしれない。

## 6. 材料科学への発展

私が大学生活を送った1950年代には、金属関係の学科は冶金学科か金属工学科のいずれかを名乗っていた。1960年代の理工系振興政策により工学部がほぼ倍増し、金属材料工学科、鉄鋼工学科、金属加工工学科などが登場した。1980年

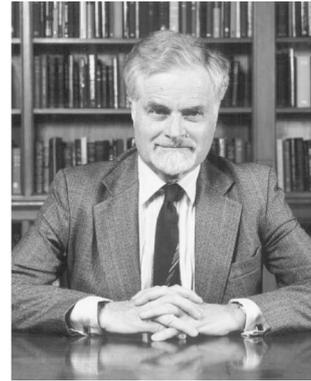


写真3 Robert W. Cahn(1924-2007).

代には材料物性工学科、材料加工工学科などに名称変更が行われ、「金属」も学科名称としては少数派になっていった。全国大学材料関係教室協議会の名簿で調べてみると、「冶金学科」の数は6(1982)、4(1989)と減少し、1994年には0となった。ちなみに有終の美?を飾ったのは京都大学である。こうした変化は日本独自のものではなく、諸外国において Department of Metallurgy が Department of Materials Science & Engineering へと改名した流れをうけたものである。

Metallurgy(冶金学)の Materials Science(材料科学)への発展ないし転換は、いつ、なぜ、どのようにして起こったのであろうか？ R. W. Cahn(写真3)の著 The Coming of Materials Science(材料科学の到来)<sup>(9)</sup>を参照しつつ、その問いに答えてみよう。

### (1) 大学における動き

材料科学の胎動は、米国 Northwestern 大学の冶金学科ではじまった。1954年、同大学の冶金学科はベル電話会社の研究者であった Morris Fine(写真4)を新たな Department head に招いた。その頃、高分子、半導体、セラミックスなどの物質群が工業材料として登場してきたのに、大学における研究・教育体制は旧態依然であった。Fine は、材料に関する教育の中核となるべき冶金学科における教育が対象を金属合金に絞りすぎていると感じていた。原料から素材を作り、成型して材質を調整する、さらに材料としての強度、諸性質を測定するなど製造と試験のプロセスには、すべての材料に共通する部分が多く、冶金学の分野で長年にわたって培われた手法は広く応用が可能であると Fine は考えた。大学院の教育カリキュラムがまず改定され、続いて学部段階の教育の改革が行われた。1959年には学科の名称が Metallurgy から Materials Science と変更された。大学の首脳部は“Metallurgy”が学科名から消えると学生が集まらなくなるかもしれないと心配したが杞憂であった。Northwestern に始まったこの変革は、冶金学の大御所 R. F. Mehl など長老教授の頑強な反対にあったけれども、1969年にはおよそ30%の学科が Materials Science and Metallurgy を名乗るようになり、現在(2001年)では、殆どの学科が MSE(Materials



写真4 Morris E. Fine.

als Science and Engineering)となっている。

## (2) 産業界の動き

MSE という用語が市民権をうる以前から、産業界ではそのような動きが始まっていた。その典型例の一つはベル電話会社の研究所に見られる。W. Shockley のグループでは、物理、化学、冶金の研究者たちが一体となってトランジスタ、ダイオードの開発に当たっていた。その成否の鍵を握ったのは、W. G. Pfann により発明された原料素材の高純度化技術、Zone melt(帯熔融)法である。ベル研究所に入所し夜間の大学で化学工学を学んだ彼の仕事は顕微鏡用の試料づくりであった。Shockley がかってない高純度の Ge 単結晶を供給してくれとやってきたとき、冶金学を学んだ同僚との会話がヒントとなりこの方法が誕生した。異なる出自の研究者の交流が新たな展開を生み出した例は、ナイロンの発明などいくつもあげることができる。

1900年に化学者 W. Whitney をリーダーとして創設された General Electric Laboratory は米国の企業における研究史上、特別な地位を占めている。W. Coolidge と I. Langmuir は、白熱電球の実用化を可能にした研究でよく知られている。1946年には卓越した冶金学者 J. H. Hollomon が加わって、新たな冶金グループが誕生し、物理、化学、冶金、電気などの諸学科を修了した研究者が共同で研究を進めた。彼がリーダーを勤めた15年間に人工ダイヤモンド、高性能熱絶縁体、透光性セラミックス Lucalox など多くの優れた材料が作り出された。後年、Hollomon はケネディ大統領のもとで、最初の科学技術補佐官をつとめた。

## (3) The Materials Research Laboratories (MRL)

物理学者 F. Seitz の回想によると、表記の材料研究所群の誕生は1954年のある出来事に端を発するという。偉大な数学者・計算機理論家である John von Neumann は、原子力委員会(AEC)の5人の委員のうちただ一人の科学者であった。彼は Seitz を招き「何かしようと思っても、材料の科学が未発達であるがゆえに実現できない。この科学の成長を妨げているものはなにか？」と尋ね、Seitz は「人材不足」と答えた。

Neumann は、いくつかの大学に学際的材料研究所を設置して政府が資金援助する構想を建て、Seitz の協力を得てイリノイ大学にまずプロトタイプの研究所を作り、さし当たって AEC が援助する方向で話が始まった。全体構想がまとまり正式の提案書が連邦政府に提出されたのは1957年初頭であったが、それが具体化する前に Neumann は病に斃れ、計画は宙に浮いた形となった。しかし、1957年10月、ソ連が人工衛星の打ち上げに成功したことはアメリカ議会に大きな衝撃を与え材料研究推進の動きが一気に高まり、計画が動き出した。Cornell, Pennsylvania, Northwestern の3大学を皮切りに諸大学に材料研究所(MRL)が設置されていった。それまで学界主導で進んでいた材料科学への再編成は冶金学を母体にしたものであったが、政府主導での改革は、より広い分野の研究者を巻き込み新しい形の研究所を生み出した。前述のベル電話会社、GE 研究所など企業の研究所のリーダーが、この動きを強力に支持したことも成功の大きな要因である。1972年、MRL の運営は政府直轄から国立科学財団(National Science Foundation, NSF)に移された。この時点で総数12の MRL に属する研究者の専門は物理35%、化学25%、冶金19%、電気工学など16%、数学・地学など5%である。この統計でとくに目を引くのは、(以前は材料研究に携わるものが極めて少なかった)物理出身者の多いことである。MRL 創立25周年に当たる1987年には、その足跡と成果を記した記念誌が発行された。この時点までには総数17の研究所が作られ、そのうち7はすでに閉鎖、または閉鎖に向けた手続きが進行中であった。

さて、MRL の活動は人材育成という当初の目的を達成したのだろうか？ R. W. Cahn は「従来の Metallurgy から MSE に転換した学科の博士課程修了者数の増加の割合は、工学分野全体と比較すると大きいとはいえない」と批判的見方を示している。一方、NSF は「(異なる専門分野の)研究者の学際的共同研究が、異なる学科間の相互交流を生み出し、従来の材料関連学科の進化発展を促した点こそ評価されるべきである」と主張する。いずれにしても、昔の Metallurgy の教育は、学部学生のレベルでも MRL における研究によって大きく変革されたことは疑いないことで、その意味において MRL は大きな貢献をしたといつてよいであろう。

## 7. 材料科学とは、そしてその将来は？

鑄造工学及び凝固の科学の第一人者である Flemings(写真5)は、材料科学分野の確立に貢献してきた人の一人であり、その将来を論じたレビューを1999年に発表している<sup>(10)</sup>。その要点を紹介しよう。

### (1) MSE は学際領域(multi-disciplinary)である

歴史的に見ると、大学という組織体は、物理学、化学、冶金学など伝統的な学問領域の集合体であり、それぞれの領域の発展・変革の流れにしたがって成長してきた。Materials Science and Engineering(MSE)の分野は、これら伝統的な

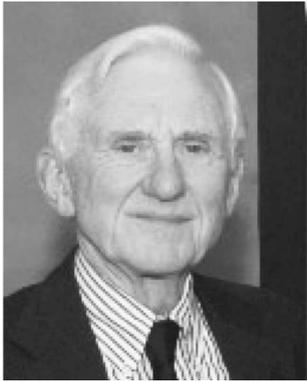


写真5 Merton C. Flemings.

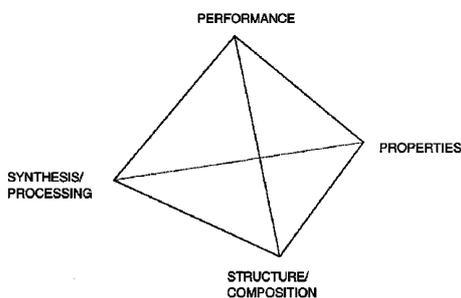


図1 材料科学工学の4要素<sup>(11)</sup>.

学問領域マトリックスの学際領域として形成されたもので、材料の構造/性質/製法/性能の多様な総体を対象とするものである。図1はその様相を四面体として示したもの<sup>(11)</sup>で、諸側面の密接なつながりを表現している。この四面体は、一方では固体物理学、基礎化学といった基礎科学領域につながり、他方では工場、社会的要請に連結しているとみるべきもので、MSEは広汎な学際領域(multi-disciplinary)である。しかし、MSEが単に学際的なものであるならば、大学に材料系学科(Department of MSE)が存在する意義・必要性はあるのだろうか？

## (2) MSEは単なる学際領域ではない

MSEは単なる学際領域(multi-disciplinary)ではなく、知的統合性(intellectual cohesiveness)を有し、それ自体の存在を主張しうる固有の学術分野(a discipline in its own right)に育成してきた。その誕生から30年のときを経て、工業界からの認知を得て、(材料全般を対象とする)MSE固有の学協会・学術誌を持つようになってきた。

上で述べたように、MSEは以下の4つの基本要素を研究あるいは制御することを目的とする科学技術分野である。

材料の構造と組成(Structure and Composition) 構成原子の種類と配列  
 合成と製法(Synthesis and Processing) 構成原子の特定の配列の実現  
 材料の性質(Properties) 特定の原子配列によって生ずる  
 材料の性能(Performance) 実用性(経済性, 社会的コスト, 利便性)

現在及び将来の産業は、さまざまな種類の材料に共通する原理を理解し活用できる人材を必要としている。特定種類の材料に限定することなく広汎な材料を対象とする教育が望まれ、4つの要素とその相互関係を総体として学部学生段階から教育することが重要である。それができるのはMSEを標榜する学科のみである。この分野を固有の学問領域(学際領域ではなく)として考えることの主要な利点は、学科の構成員が特定の材料種別(金属とかセラミックスとかの)の枠組みから解放されて、自由な思考のもとに教育・研究を展開できる点にある。研究の多くの部分を担うのは大学院学生である。その分野を集中的に教育する学部学生向けのプログラムを持たない学科は、大学院学生をひきつけるのはむずかしく、生き残りは困難であろう。

## (3) MSE学科の存在意義

MSEを標榜する学科は現在(1999年)米国には41ありその多くの前身は冶金学科である。15年前と比較すると6つ減少しており(消滅, 大学院コースのみに縮小, 他学科に吸収合併, のいずれかによる), 現存する学科に対しても縮小・合併を迫る圧力があると聞く。一方、材料系以外の諸学科、とくに化学工学, 機械工学, 物理, 化学の学科はMSEを自らの領域の一分科とみなし、その分野の教育を強化している。こうした状況の中で、MSEが固有の学術分野として、また大学において独立した学科として生き残るためには、何をすべきであろうか？

MSEが固有の学問領域として、大学における学科として存在する意義は、第一にMSEの現在そして将来の方向を定め、それにふさわしいカリキュラム改定を行う自由を持つことである。学部学生段階では、材料一般に通ずる原理を教えるべきである。第二番目の意義は、われわれが主力を注ぐべき領域を選択し、そこに何をとり込み、何を他の分野との共同の学際領域とするかを決定する基準を持つことである。たとえば凝縮物質の物理学はMSEの固有領域内にあるものではなく、周辺分野との境界に位置づけられる。電子材料の性質、製造、使用に関する事柄の大部分はわれわれが扱うべき領域に属する。しかし、高分子の物理と工学はどの程度わが領域に属するかまだはっきりしない。また、バイオテクノロジーを図1に示した四面体とどのように関連付けたらよいか、またその分野でわれわれがリーダーシップを発揮すべきかいかも未確定である。しかし、ここで述べたMSEに対する見方は、学生に対した社会に対してわれわれの分野を定義し、その方向を示すガイドラインになるであろう。

## (4) MSEのカリキュラム

MSEを時代の要請に沿って発展させていくためには、将来の材料技術を担う人々に真に有用な教育を施すため、カリキュラムを絶え間なく点検し改革していく必要がある。過去においては講義課目名から採鉱工学や選鉱学が消え去り、非鉄冶金学がより広汎な冶金学に吸収されて行った。今後は、結晶学、金属製錬、状態図の理論などこれまで重視されてき

た教科と、数学的モデリング、生体工学、情報工学など新たな教科の折り合いをどうつけるかが問われる。

MSEの学部学生の教育においては、特定の工業(技術)固有の教科を教える必要はない。抽出冶金、鋳造、溶接、粉末冶金などは、材料プロセッシングの科目の中で取り上げるのが適当である。鋳造や溶接に関しても、特定の材料に関する理解の他の材料への適用、他の工業的応用の可能性を常に意識させるべきである。

MSEの四面体に関して考える際、化学工学科の人々から学ぶべきことがある。彼らが成功したのは、お家芸(基本要素)である熱力学、輸送理論、反応速度学に特化することによってではなく、これらの基本特技を適用できる新領域を探し求め、基本特技の威力をコンピューターモデリングによって高めたことによる。われわれも、その得意とする特技をモデリングにより強化し、構築してきた諸概念を広く材料一般に拡張し、新しい方法、新しい分野にお家芸を適用する能力を高めるべきである。MSEの研究分野は物理学科、化学科、生物学科などと重なる分野があり、共同研究が大きな成果を収めてきた。しかし、これらの自然科学系諸学科と異なる点は、われわれの関心は実用材料と工業的応用にあり、さらに要素自体(図1参照)に関する個別の発見よりも、その相互関係を重視することである。化学工学科の友人と異なる点は、われわれは構造と、構造-性質の関係を理解しており、さまざまな種類の材料にわたる知識がある点である。また、機械工学の友人との違いは、材料の内部構造に関心がある点である。

今やわれわれは新たな道具を手にして未開拓な分野を開拓し、古い分野を新しい方法で探求する機会を持つ時代に生きている。原子を1個ずつ集めて、あるいは原子層を積み重ねて構造を組み立てることが可能である。計算機の能力は際限なく増加し、原子の基本性質の情報のみを用いて、構成される物質の構造と性質をモデリングすることが可能になりつつある。

以上述べたことは、基本的には修士コースのカリキュラムにもあてはまる。博士コースでは特定の狭い領域に特化し深く探求するべきである。工業・社会の需要に深く結びついた博士コースの研究が行われる学科が必要とされ、そうした学科は必ず繁栄するであろう。

## 8. 材料科学・工学におけるカリキュラムの発展

前の節で紹介したFlemingsのレビューは10年前に書かれたもので、バイオテクノロジーをMSEの守備範囲にどのように取り入れ、位置づけるかは今後の課題としている。このことについて、材料科学の誕生に際してキーパーソンともいえるべき役割を果たしたFineは(Voorheesとの共著で)、2005年に、カリキュラムに関して具体的な発言をしている<sup>(12)</sup>ので紹介しておこう。

材料科学が根源的に学際的性格を持つものであることは、

古くから認識されていたことである。たとえば、2000年以上前に書かれたVitruviusの著作“Ten Books on Architecture”は、機械を構成する材料として木材、鋼、青銅、ロープ、石材を挙げている。しかし、1950年の時点では、MSEを標榜する学科は大学には存在せず、冶金学科、セラミックス学科など個別の材料を扱う学科があるのみだった。

MSEが固有の学問領域として創生発現(emergence)し、大学にその名を冠した学科が現れたのは、工学教育の見地からすれば当然の論理的発展であった。広汎な材料を単一のカリキュラムに収容することができるのは、材料科学の中核が“材料の構造・性質・製造の相互関係”の研究にあるためである。カリキュラムに取り上げるべき基礎科学と実験方法を選択するための基準は、このパラダイムによって与えられる。固体物理学、熱力学、速度論、分子及び結晶の構造、力学的性質などに関する基本知識は、すべての材料に共通するものとして教えるのが効率的である。

現在、多くの大学において、生体材料は材料科学および工学のカリキュラムに組み入れられつつある。木材やセルロース製品は文明の始まりから人間にとって最も重要な材料であったけれども、最近の動きは生物医学の方面からの刺激によるものである。1970年代以降、生体材料への関心が再び高まったのは分子生物学の分野における革新によるものである。

分子生物学者および生物化学者によって、絶妙な分子制御の技法が開発された。この技法を応用することによって、材料の生物学反応を制御することが可能になり、生物学的経路を活用して新しい材料を創造することができるようになった。そのような道筋を材料のカリキュラムに組み入れるには、基礎教育として分子生物学と生物化学を取り入れる必要がある。神経は体内のある場所から他の場所へ電気的パルスを送る。この現象は電子材料の講義で教えることができる。同様に、分子生物学の基礎は、柔らかい材料(soft materials)あるいは生物材料の講義に組み入れられる。材料科学のパラダイム Processing, Structure, Properties, Performance を念頭に置きつつ、この新しい領域を既存の材料科学のカリキュラムの中に組み入れることは容易である。X線回折、電子顕微鏡は生体材料にも用いられている。二重ラセンの発見はX線によるものであったし、電子顕微鏡は生物学者が永年用いてきた。原子結合の理論、物質中の原子の配列様式はすべての材料に共通するものである。自己組織化は相変態の一種であり、凝固、結晶化、析出などと同じように熱力学及び速度論の原理に支配されている。骨材の性質を記述するに必要な力学的特性は、構造材料の場合と大きく異なるものではない。機能性分子の枠組みは広汎な細胞組織の成長を促進するのに使われている。

過去50年の間にMSEのカリキュラムは大きく変貌してきた。生体材料が加わることにより、MSEカリキュラムは更なる変貌を遂げ、より広汎で知的好奇心をそそる活力ある分野となるであろう。

## 9. お わ り に

私が15年間在職した京都大学工学部材料工学教室では、大学院の入試問題として材料・物性・加工・製錬の4分野から出題し、そのすべてを解答することを要求していた。受験するものにとっては大きい負担であったと思うが、入試を受験した学生は(たとえ不合格であっても)材料工学全体のバランスの取れた知識と力をつけることができた。ある意味では図1に示した材料工学の4要素を総体として学んだといえよう。FineとVoorheesは材料工学のカリキュラムの現在そして将来に向けての変革として、分子生物学と生物化学の取り込みを挙げている。新たな教科を導入する場合には、従来の教育で必須とされてきた教科の一部を切捨てるを得なくなる。材料工学のコアカリキュラムはどうなっていくのだろうか？

本稿をあらまし書き上げた段階で粗稿を数人の友人に送り、日本の諸大学における状況を尋ねるとともに、意見を求めた。その一人はFineらの見解に疑問を投げかけ「(MSEの今後の発展の)鍵を握っているのはコンピューター、直接観察、微細加工ではないでしょうか」と以下の点を強調する。

- (1) コンピューターの高速、大容量化と検索機能の進化により、材料に関する膨大な経験知は系統的データベースとして整備されるのは間近い。ミクロからマクロまでをコンピューターで結びつけるマルチスケールモデリングの手法が開発されつつある。
- (2) 高分解能走査、透過電子顕微鏡、走査型トンネル顕微鏡による直接観察、イオンエッチング法による試料作製法の開発により、原子の直接観察による構造や組織の万能評価法が開発されている。原子像を見て構造を決める方向に変わりつつある。
- (3) 集積化は年毎に進み、ナノスケールに達しようとしている。機能材料はすべてナノスケールになるときも近い。

上記(1), (2), (3)のいずれにおいても無機、有機を問わず電子論が理論的背景になっている。

MSEが若い人々にとって魅力的な分野であり続けるために、諸大学が行っている取り組みが本誌に報告されることを期待したい。本稿は、2008年9月、金属学会秋期大会(熊本大学)の際に開催された材料工学教育研究集会(主催 全国大学材料関係教室協議会)で行った講演内容に加筆して構成し

たものである。講演の機会を与えてくださった黒田光太郎教授(名大工, 全材協会長)に謝意を表す。また、近重眞澄に関する情報収集に協力していただいた吉村一良教授(京都大学化学教室)、レビュー執筆時(1999年)以降の米国の状況についての問い合わせに答えて下さったFlemings教授、Morris E. Fineのレビューを送ってくださった三宅淳司氏(日鉱金属株)、冶金学教育の歴史についてご教示いただいた松尾宗次氏、ならびに粗稿にコメントを寄せてくださった方々に謝意を表す。なお、Fine, Flemings両教授はともに日本金属学会名誉員であり、掲載した写真は本稿のためにお送りいただいたものであることを付記する。

## 文 献

- (1) C. S. Smith: A History of Metallography, The University of Chicago Press, (1960).
- (2) "G. A. Tammann", Dictionary of Scientific Biography, vol. 13, Gillespie, Ch. C., Ed., New York: Charles Scribner's Sons, (1981), pp. 242-248.
- (3) 大塚正久: "グスタフ・タンマン", 鉄鋼界, 昭和49年11月号, 86-93.
- (4) A. G. Morachevskii: Russian Journal of Applied Chemistry, 74 (2001), 1610-1615.
- (5) 本多光太郎: "Gustav Tammann" 先生を弔す, 日本金属学会誌, 3(1939), No. 2.
- (6) 可知祐次: "近重眞澄", 日本の基礎化学の歴史的背景, 京大理学部化学・日本の基礎化学研究会編, (1984).
- (7) 島尾永康: "近重眞澄", 人物化学史, 朝倉書店, 137-146, (2002).
- (8) 近重眞澄: 金相学, 東亜堂, (1917).
- (9) R. W. Cahn: The Coming of Materials Science, Pergamon, (2001).
- (10) M. C. Flemings: "What next for departments of materials science and engineering?" Annual Review of Materials Science, 29(1999), 1-23.
- (11) Materials Science and Engineering for the 1990's. 1989. Report of the Committee on Materials Science and Engineering, National Research Council. Washington DC: Natl. Acad. Press.
- (12) M. E. Fine and P. W. Voorhees: Daedalus, Spring (2005), pp134-136. (Journal of the American Academy of Arts & Sciences).



小岩昌宏

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★  
東京大学工学部冶金学科卒業(1959年), 同大学院博士課程修了(1964年)。東北大学金属材料研究所に21年勤務した後、京都大学工学部教授。2000年 定年、京都大学名誉教授  
専門分野: 材料物性工学(拡散, 相変態, 内部摩擦に関する理論および実験的研究)  
金属の科学の発展(歴史, 貢献した人物, エピソード)に関心があり、『金属学プロムナード—セレンディピティを追って』(アグネ技術センター, 2004)を上梓。『英国の材料科学者 R. W. Cahnの自伝の翻訳『激動の世紀を生きて—あるユダヤ系科学者の回想』(アグネ技術センター, 2008)を上梓。  
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★