無機材料と鉱物学

中 井 泉*

Inorganic Materials and Mineralogy

Izumi NAKAI*

Abstract

Development of industrial materials is essential to that of technology and industry. Importance of mineralogical background in the material researches is demonstrated through a review of the recent works on the high- T_c oxide superconductors. It is suggested that mineralogy should establish its solid status as a basic science of material researches. A plan of writing a book titled "Mineralogy for Material Research" is proposed.

1. はじめに

文明は人類の道具の利用と共に進歩し、道具の発達はその道具を作る材料の進歩と深く関わり合っている。人類は初め石を削って石器とし、続いて土を焼き堅めて土器を作り、さらにより精選された材料を使って陶磁器を考案した。金、青銅器から鉄器へと進んだ金属器の発展は、金属の精錬技術の発展に裏付けられたものである。

産業革命以降の化学工業の発展は、材料の進歩と一層深く結び付いている。例えば、1824年に始まるセメント製造は、建築の分野に革命的な変化をもたらした一大産業を形成した。またナイロンの発見により高分子化学工業が、半導体の発見によりエレクトロニクス関連産業が飛躍的発展をとげた。我々の周りを見回すと昔は綿、毛、絹、木、竹、紙、金属などで作られていたさまざまな物が、今はプラスチックで置き換えられていることに気が付く。その結果、日本の伝統産業であった繊維産業は形態変化を余儀なくされ、合成繊維、プラスチック産業が化学工業の中心となっている。しばらく前までは、日本の時計生産は世界に誇る精密機械工業の花形であったが、水晶振動子とICの開発は時計を電子製品に変えてしまった。それにともない機能も向上し、カレンダー機能はもちろん3年間ノンストップ、マルチアラーム、電話番号記憶など昔のゼンマイ式時計では考えられないような高度な機能を持つものが、しかも従来よりもはるかに低価格で市販されている。

この様に新材料の出現は新産業の誕生と産業構造の大規模な変革をもたらす可能性を持ち、産業とそれを支える科学技術の発展に材料の進歩が決定的に重要な役割を果たしている。一方産業の変革

1988年8月10日受理

* 筑波大学化学系

Department of Chemistry, The University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305

は我々の生活にも大きな影響を及ぼす。パソコンやワープロは我々にとってすでに必需品であり、ファクシミリが重要な通信手段となりつつある。ビデオ、オーディオなどの家電製品、コンピューター、カメラ、自動車などはめまぐるしくモデルチェンジし、まさに日進月歩の勢いで開発競争が展開している。しかしその陰には、これらの技術革新を支える工業材料の進歩があり、産業技術と材料の発展はまさに表裏一体の関係にあると言える。

2. 新素材ファインセラミックス

工業材料は、エネルギー資源、エレクトロニクス、バイオテクノロジーなどと並んで 21 世紀の文明を支える大きな柱の一つにあげられている。材料は大きく分けて有機材料、無機材料、金属材料、複合材料の 4 つに分けられる。その中でも、電子材料、磁性材料などの機能性材料に代表される無機材料の果たす役割は大きく、金属、高分子の次の時代を担う材料として注目を集めている。固体の無機材料は一般にセラミック材料と呼ばれ、物質的には鉱物と密接な関係があり、我々にも馴染みの深いものが多い。セラミック材料では、既存素材として古くからガラス、陶磁器、セメントなどが知られているが、近年新素材としてファインセラミックスと呼ばれる一群の物質が脚光を浴びている。これは、素材化のプロセスを通じてセラミック素材そのものに合目的な機能を持たせたものである。Fig. 1 は、一次原料が材料になるまでのプロセスを表している。セメント、ガラス、耐火物、陶磁器などのセラミック材料の合成反応（化学プロセス）は比較的単純で、天然鉱物をそのまま原料として用いて大量に生産される。一方産業技術の進歩とともに素材の果たす機能が多様化、高度化しそれに伴い、材料に要求される水準は高くなり、より高度の化学プロセス、材料プロセスが必要となる。例えば、半導体材料では原料粉体には 99.9999 から 99.99999999 に達する純度の制御が要求され、さらに大口径のウエハーを作るには高度の単結晶育成技術が必要とする。ファインセラミックスは、高純度の合成微粉末を原料として精度良く製造し、高度の機能を持たせたセラミックスとすることができる。

表 1 はわが国のファインセラミックス需要予測¹⁾ であり、1985 年では 8577 億円であるが、2000 年には 5 倍近くの 4 兆円に昇る需要が予測される。ちなみに製造業の産業構成を 1985 年の産業統計を見ると、製品総出荷額は 265 兆円であるが、そのうち、鉄鋼、化学工業、セラミックスなどの基礎素材型産業は 38.4% を占めており、電気、輸送用機械などの加工組立型産業が 39.8%、残りの 21.8% が食料品、繊維、出版印刷などの生活関連型その他の産業となっている。セラミックスの生産の中でファインセラミックスの占める割合は、現在はまだ低く、セメントやガラス、陶磁器などの既存素材が中心である。しかしながら新素材の市場規模の拡大は、製品市場においてはその

Fig. 1 From raw materials to materials

Table 1 わが国のファインセラミックス需要予測 (1985~2000)¹⁾

(単位: 億円)

ファインセラミックス種類	1985 (A)	(1987)	1990	1995	2000 (B)	(B)/(A)	成長率(年) (’90~2000)
1. 電 磁 気 的	6,008	(6,513)	8,695	12,499	17,875	3.0倍	
1) I C基盤・パッケージ等	1,439	1,556	1,958	2,876	4,226		8 %
2) サーミスタ・バリスタ等	322	397	500	735	1,080		8 %
3) 磁 性 体 等	1,493	1,501	2,331	3,311	4,559		6.9%
4) コンデンサ・圧電素子等	2,316	2,622	3,403	5,000	7,347		8 %
5) ス パ ー ク プ ラ グ	438	437	503	577	663		2.8%
2. 機 械 的	1,060	(1,121)	1,355	1,839	2,520	2.4倍	
6) 工 具 ・ 高 硬 度 部 材	747	748	940	1,270	1,710		6.2%
7) 耐 磨 耗 部 材	126	155	205	329	530		10 %
8) そ の 他	187	218	210	240	280		2.9%
3. 熱 的	580	(577)	1,100	2,048	4,223	7.3倍	
9) 半 導 体 熱 処 理 用 治 具	119	149	380	790	1,900		17 %
10) 高 温 耐 食 部 材	{ — 376 }	{ — 332 }	{ 200 300 }	{ 550 300 }	{ 1,359 300 }		21 % —
11) そ の 他	85	96	220	408	664		11 %
4. 化 学 医 学 的	595	(592)	702	940	1,769	3.0倍	
12) セ ン サ ー	166	182	205	280	380		6.3%
13) 触 媒 ・ 担 体	410	386	457	510	569		2.2%
14) 歯 骨 関 節 等	19	24	40	150	820		30~40%
5. 光 学 的	322	(435)	1,348	4,060	10,071	31.3倍	
15) 光 フ ァ イ バ ー	319	430	1,171	3,700	9,210		25~20%
16) そ の 他	{ 3 — }	{ 5 — }	{ 7 170 }	{ 10 350 }	{ 17 844 }		18 %
6. そ の 他 (原子力・超電導材料等)	12	(13)	49	1,631	4,910	410 倍	
合 計	8,577 (A)	(9,251)	13,249	23,017	41,368 (B)	4.8倍	

(社)日本ファインセラミックス協会。昭和62年3月調査。

十倍近い波及効果をもたらし、さらに関連既存素材の生産誘発をも引き起こすので、ファインセラミックスは今後、重要な位置を占めることが予想される。特に日本は、伝統的な窯業の強みを活かすことができるので、ファインセラミックス生産の国際的シェアは極めて高く、技術輸出量、特許出願件数も多く研究開発においても世界をリードしている。対外的には、加工組立型産業が著名な日本にあって、素材型産業のファインセラミックスは、国際産業政策上も重要な工業材料として位置づけることができる。

では、ファインセラミックスは、具体的に産業界からのどのような要求に答えることができるのであろう。まずファインセラミックスはエレクトロニクス、エネルギー、宇宙航空といった先端産業が要求する、高機能、耐熱、耐食、耐放射性を持つ極限材料の提供を可能にする。また新素材の開発により、新規産業が形成されることも期待できる。現在、金属、石油化学などの既存素材産業はある意味で一種の構造的不況に陥っており、ファインセラミックスのような新規事業分野へ積極的

に進出することにより企業活動を活性化することが可能である。自動車のセラミックエンジンのように、既存素材をセラミックスで置き換えることにより、エネルギー効率の改善によって省エネルギー化にも貢献するであろう。また高価な金属材料を安価なセラミックスで代替することにより、希少金属資源の節約と製品価格の低下をもたらすことも期待できる。

3. 酸化物超伝導体の出現

上述のようにファインセラミックスに対して経済社会から大きな期待がよせられているにもかかわらず、材料全般を通じてここしばらくナイロンやシリコンのような革新的な材料の出現がなく、技術革新の停滞期が続いており、産業界全体として新材料創出に対する渴望があった。このような背景のもとで起こったのが、この度の酸化物高温超伝導体の発見であった。液体窒素温度で使える超伝導体が実用化すれば産業界におよぼす波及効果は極めて大きなものになるため、画期的な新材料の発見として、産官学とマスコミを巻き込む超伝導フィーバーが起こったのも無理はないといえる。

Fig. 2は超伝導臨界温度の歴史の変遷をあらわしている。1911年オネネスにより水銀で超伝導現象が発見されて以来、超伝導臨界温度の上昇は遅々としたものであった。それがわずかこの2年余りの間に、図からわかるようにいわばデルタ関数的に上昇したわけであるから、そのインパクトの大きさは容易に想像できる。今回の酸化物超伝導体は物質的に鉱物とも関連が深いので、ここで一連の酸化物超伝導体の物質像を明らかにしながら、鉱物学との関わり合いについて眺めてみたい。1988年8月現在までに開発された酸化物高温超伝導体は物質的には大きく分けて3つに区分され、開発順に、第一世代、第二世代、第三世代と呼ぶことができる。

Fig. 2 Evolution of the superconductive transition temperature

第一世代超伝導体は、今回の超伝導ブームの端を発する Bednorz と Müller²⁾ によって 1986 年 初めに発見された 30 K の臨界温度を持つ $(\text{La}, \text{Ba})_2\text{CuO}_4$ と、そのアルカリ土類置換体である。こゝで興味深いことは、Bednorz と Müller らが最初に報告した物質は数種の混合物であり、超伝導相を特定するまでに 10 カ月近くもかかったことである。もし初期の段階で EPMA や電子顕微鏡、X 線結晶解析のできる鉱物学者が研究に参加していたなら、おそらく相の同定には一週間とかからなかったと思われる。 $(\text{La}, \text{Ba})_2\text{CuO}_4$ の Ba を Sr で同形置換することにより、 T_c はさらに約 10 K 程向上した³⁾。この系の物質は Fig. 3 に示すように、ペロブスカイト構造の B ユニットの欠落した 2 つの A ユニットの組み合わせでできる典型的な K_2NiF_4 型構造を持っている⁴⁾。今回の一連の酸化物超伝導体の構造は、いずれもこのようにペロブスカイト構造と密接な関連があるのがその特徴の一つである。

第二世代超伝導体は、Wu らにより発見された $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$ ⁵⁾ とその希土類置換体であり、液体窒素温度を越える 90 K の臨界温度を持っている。このときも初めは数種の混合物のまま未同定で発表され、相の同定に 1 ヶ月近くかかっている。第二世代超伝導体の問題点は相転移と双晶の存在にあった。高 T_c 相は斜方晶系の低温相で、600°C 前後の温度で正方晶系に転移する⁶⁾。正方晶から斜方晶への転移は双晶の生成を常にともなう。さらに相転移温度近傍で酸素の出入りを伴うため組成変化があり（従って厳密な意味での相転移ではない）、酸素含有量によって転移温度が変わるという複雑な性質を持っている。これらの物質は焼結法で合成されたため、高温相がしばしば共存し同定の妨げとなっていた。そのためこの物質が発見された初期の頃は、高 T_c 相がどのような化学組成を持つものであるかも良くわからず暗中模索の状態、未知の混合物を試料として測定され

Fig. 3 (a) Relationship between perovskite structure and K_2NiF_4 structure
(b) Crystal structure of tetragonal $\text{La}_{2-x}\text{M}_x\text{CuO}_4$

Fig. 4 (a) Tripled cell of the perovskite B unit (b) Crystal structure of tetragonal $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$ (c) Ideal structure of orthorhombic $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_7$

た物性データと粉末回折データのみが、速報誌で一人歩きしていた。また高 T_c 相の結晶構造は双晶の存在により単結晶構造解析が困難であったため、粉末回折から推定された誤った構造モデルがいくつも出され、中性子 Rietveld 解析⁷⁾や高温相の単結晶解析⁸⁾により構造が確定された後も新聞等のマスコミで長く構造論争が展開されたのは構造解析屋から見ると奇異な現象に感じられた。

微小結晶の構造解析、焼結混合物の EPMA 分析、高温 X 線回折実験などこれらの超伝導物質の研究には鉱物の研究手法をそのまま生かすことができた。Fig. 4 は斜方晶と正方晶の $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$ の構造図である⁴⁾。ペロブスカイトの B ユニットが三重に積み重なった構造を持ち、底面の酸素原子が欠けている。正方晶では Cu1 の周りの酸素原子が統計的に抜けているが、斜方晶では秩序配列しており、酸素原子の占有率は合成条件に依存する。このような不定比性は、鉱物では馴染みの深い現象であるが、今後実用材料とするには問題となるところである。

第三世代超伝導体は 1988 年 1 月に金材研の前田らにより見いだされた Bi-Sr-Ca-Cu-O 系超伝導体⁹⁾で、 T_c は 105 K に達したがこの時も最初の報告では超伝導相を特定できなかった。Bi 系の超伝導相には $\text{Bi}_2(\text{Sr}, \text{Ca})_2\text{CuO}_x$ (221 相: $T_c = 8-20$ K), $\text{Bi}_2(\text{Sr}, \text{Ca})_3\text{Cu}_2\text{O}_x$ (232 相: $T_c = \sim 85$ K), $\text{Bi}_2(\text{Sr}, \text{Ca})_4\text{Cu}_3\text{O}_x$ (243 相: $T_c = \sim 105$ K) の 3 つが知られている。高 T_c 相の 243 相は単一相を合成することが難しく複数の相が共存した状態でしか得られていない。またいずれの相も複雑な変調構造を持っていることから、単結晶構造解析が困難であった。一方米国では Tl-Ba-Ca-Cu-O 系で新超伝導体が見いだされ、 T_c は $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ において 125 K を記録した^{10, 11)}。Fig. 5 は Tl-Ba-Ca-Cu-O 系で見いだされた 3 つの超伝導相、 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_6$, $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$, $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ の構造図である¹²⁾。Tl と O のシートが 2 層重なり、Tl-O 層にはさまれてアルカリ土類金属-酸素層があり CuO_4 平面四角形の頂点共有によってつくられる Cu-O 平面がその間に含まれる。3 つの相の構造の基本的な違いは Cu-O 平面の数の違いで、それぞれ 1 層、2 層、3 層となっている。

Fig. 5 Crystal structures of $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{4+2n}$ for $n=1, 2$ and 3 .
 (a) $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_6$ (b) $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (c) $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ¹²⁾

Fig. 6 は単結晶構造解析より決定した Bi-Ca-Sr-Cu-O 系の 221 相と 232 相の平均構造である¹³⁾. Bi 系の三つの超伝導相の構造は, Fig. 5 の, Tl を Bi で置き換えたものにほぼ等しい. Fig. 6 からわかるように bc 面内の Bi 原子の熱振動の異方性が大きく, Bi 原子の位置的乱れを反映しており, 変調構造の原因と考えられる. Bi 系超伝導体の変調構造や微細組織の解析では, 高分解能電子顕微鏡の活躍が特筆される. Fig. 7 (a) は, 232 相の $[510]$ 方向に投影して得られた電顕像で¹⁴⁾, 金属原子の配列は Fig. 6 (b) の構造図と良く対応している. 一方 Fig. 7 (b) は 232 相の双晶構造を観察したもので, 写真の上側の部分は 232 相の a 軸方向から眺めた bc 面の構造が, 下側は b 軸方向から眺めた ac 面の構造が見えている¹⁵⁾. 変調構造の原因と考えられる bc 面内の Bi-O 層の乱れの様子

Fig. 6 Crystal structures of (a) $\text{Bi}_2(\text{Sr}, \text{Ca})_2\text{CuO}_x$ (221 相) (b) $\text{Bi}_2(\text{Sr}, \text{Ca})_3\text{Cu}_2\text{O}_x$ (232 相)¹³⁾

Fig. 7 High resolution electron microscope image of $\text{Bi}_2(\text{Sr}, \text{Ca})_3\text{Cu}_2\text{O}_x$ (232 phase) (a) taken with an incident beam along the $[510]$: large dark dots represent the Bi atoms; the positions marked by asterisks and small dots are A and B sites in the perovskite-related layers¹⁴⁾; (b) showing twinned structure: the modulated structure is visible in the upper part of the image¹⁵⁾.

は, Fig. 7 (b) 上部の Bi 原子の 2 重層の周期的な濃淡と, 原子配列 (格子) の歪みとして見る事ができる.

4. 材料開発と鉱物学のかかわり合い

今回の一連の酸化物高温超伝導体の研究開発競争に参加して感じたことは, これらの物質の開発とキャラクター化に, 鉱物学のバックグラウンドと現在, 鉱物学が常用手段として持っている研究手法が大変役に立つということである. また物性の理解に結晶構造の解明が本質的に重要であるということも再認識された. さらに思いがけない組成の物質が思いがけない機能をもつということから, 未知の多成分系化合物の発見への期待が感じられた. 複雑な組成の中に新奇な性質が見いだされる可能性が大きいことから, 今後の新材料開発は多成分系の方角へ向かって行くことが予想される. 多成分系化合物は, 理想系を扱う従来の物理, 化学では対応が難しく鉱物学が得意とする対象物であるといえる. 合成物を評価する場合, 化学では目的合成物の収率という発想が根底にあるが, 鉱物学では鉱物共生を扱うことが多いので, 多相共存の取り扱いにも習熟している. 結晶粒界などの微細組織は材料の物性に大きな影響を与えるが, 固体における微細組織の取り扱いは鉱物学者の得意とするところであろう. 第一世代超伝導体において Ba を Sr で同形置換することにより T_c が 30 K から 40 K へと上昇したが, この様な同形置換の考え方も鉱物学が教えるところ

である。従って今後予想される無機材料の飛躍的發展に於て、鉱物学が重要な役割を果たすことが期待される。また鉱物学の發展の一つの原動力とするためにも、鉱物学者は積極的に貢献すべきであると思われる。ところが材料科学の分野では、鉱物学の重要性は残念ながら十分には認識されていないようである。大学で鉱物学を専攻して材料関係の企業に就職して活躍している人は少なくないにもかかわらず、材料科学に於ける鉱物学の位置づけははっきりしていない。そこで、鉱物学と材料科学の関係をここで改めて見つめてみたい。

すでに多くの人々に指摘されているように、鉱物学は地球科学的側面と、物質科学的側面の二面性を持っている。鉱物学とその周辺科学の関係を、著者なりの見方で表したものがFig. 8である。物質科学の領域である材料科学との関わりでは、鉱物は物質的に無機材料と密接な関連があることから、これまでも鉱物学者は材料関係物質を研究対象とすることが少なくなかった。しかしながらその多くは結晶学、固体物理、固体化学の側面から研究を行っており、材料の機能を正面において議論することは希である。鉱物学は地球科学の1部門であることから、その学問としての目的は地質現象と切り放すことはできない。従って鉱物学者が材料物質を研究対象とする場合に、有用な物質の開発と評価という材料本来の研究目的を設定することは困難であり、そこに材料物質を取り扱う鉱物学者のジレンマがある。さらに鉱物学に内在する問題点として、鉱物学的研究は、鉱物という対象物を媒介として周辺領域と結び付いて行くため、単に鉱物あるいはその関連物質を研究対象としていれば鉱物学であるという立場で研究をしていると、鉱物学としてのself-identityを見失う恐れがある。では鉱物学者は材料科学に対してどのような立場をとるべきであろうか？ 著者が考えるには、まず鉱物学は材料科学の重要な基礎学問であるという認識の上に立つことが必要である。材料科学を鉱物学の土俵で行う前に、材料科学の土俵の一部を鉱物学で作ることが大切ではないだろうか。材料科学は応用の学問であることから、同じように応用で迫ると現在の力関係では材料科学に吸収されてしまう恐れがあるので、あくまでも基礎科学としてのこちらの立場を明確に打ち出す必要がある。ではどのような独自性を鉱物学は持っているのだろうか。

Fig. 8 Mineralogy and its related sciences

鉱物学は材料の設計、開発とそのキャラクターゼーションにおいて、ひとつの指導原理を与えることが期待できる。新材料の設計開発では、無機物質全般を見渡すことができる物質についての幅広い体系だった知識が必要であるが、これは従来の材料科学に欠けている部分である。材料開発の方法は、既存の材料を同形置換などにより修飾して望ましい機能を賦与し、より付加価値の高い材料へ変換する方法と、まったく新しい物質を探索していく方法とがある。今回の酸化物超伝導体の開発競争において、 $(\text{La}, \text{Ba})_2\text{CuO}_4$ の発見に続いて、Ba を Sr で置換することによる $(\text{La}, \text{Sr})_2\text{CuO}_4$ の開発、それに引き続いて起こった $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$ の発見、Bi-Ca-Sr-Cu-O 系、Tl-Ca-Ba-Cu-O 系の発見にいたる一連の研究は、まさに前者の同形置換による展開である。しかし $(\text{La}, \text{Ba})_2\text{CuO}_4$ という新物質の発見なしには、それ以降の超伝導体の発見はなかったであろうから、やはり新物質の探索は新材料開発において本質的に重要である。

さて新物質の探索に於て、周期表の 100 余りの元素から、一つ一つ新しい組合せを探していくことはおよそ非現実的なことである。ところが現代の無機化学や材料科学は、残念ながらそのような試みに対して指導的な役割を果たし得ない。著者は鉱物学の中の物質科学的体系を、バックグラウンドとして持つことが役に立つと考えている。幸いなことに、自然は周期表のほとんどすべての元素を使って、新物質の探索に必要な元素組合せの手本を鉱物として我々に示している。鉱物は種として定義されることから、基礎的な物質データも整備され組成、結晶構造の両面から体系だった分類がなされており、相互の関連もつかみやすい。この様な観点から、材料開発に役立つと考えられる鉱物についてのデータをまとめると以下ようになる。

(1) 物質科学的データ

- i) 分類整理された化学組成、同形置換についての知見
- ii) 分類整理された結晶構造についての知見
- iii) 分類整理された物性データ
- iv) i) ~ iii) を体系化したもの

(2) 地球科学的データ

- i) 共生関係
- ii) 熱力学的情報
- iii) 組織、欠陥、高次構造

5. 鉱物学者は何をなすべきか

現在の鉱物学の本に書かれているような鉱物についての情報は、残念ながら材料開発の目的には満足できる形になっていない。種という概念を捨てて材料科学の目的に不要な部分は整理することが必要である。そのためには、結晶構造に基づく分類を基本とし、用いる鉱物名はできるだけ少なくして、同形置換の考えを使って多様な化学組成を整理しグループ分けして、体系化する。天然に存在しない人工鉱物も積極的に含める必要がある。この様な知識は、現場で材料開発に携わっている人たちが、大学や高専の材料科学関係の学科を専攻する学生に役立つことから、まず第一歩として教育啓蒙を目的として、“材料開発のための鉱物学”という本を作ることを提案したい。その試案

Table 2 材料開発のための鉱物学

-
1. 無機材料と鉱物
 2. 材料設計のための鉱物学
 - i) 鉱物の化学組成と結晶構造
 - ii) 同形置換による物質の展開
 - iii) 結晶化学→結晶構造のデザイン
 - iv) 結晶構造と物性
 3. 材料化プロセスと鉱物学
 - i) 天然における鉱物の生成と共生
 - ii) 鉱物生成と共生の熱力学と速度論
 - iii) 鉱物生成の反応機構
 - iv) 結晶成長 気相, 液相, 固相
 - v) 結晶合成法
 4. 材料評価のための鉱物学
 - i) 鉱物の組織, 結晶の接合と集合
 - ii) 相転移, 多形, 双晶, ポリティピズム
 - iii) 高次構造 (超構造, 変調構造), 格子欠陥
 - iv) 物質科学的評価法
 - a. 物理的性質の評価法 (光学性, 形態, 密度 etc.)
 - b. 化学的性質の評価法 (化学分析, エッチング)
 - c. X線回折法 (粉末法, 単結晶法)
 - d. 電子顕微鏡法 (SEM, TEM)
 - e. マイクロプローブ法 (EPMA, SIMS, ラマン etc.)
 - f. 光吸収法 (赤外, 可視, X線)
-

を表2に示す。基本的な認識として、多成分系固体物質を扱うのは、現時点では物理、化学より鉱物学の方が優れているという考え方に立つべきであろう。第2章では独立な構造を持つ鉱物を中心として、同形なものはまとめてしまう。専門外の人は、鉱物名に対するアレルギーがあるので、鉱物名を使うことは必要最小限にとどめた方がよい。第3章では、化学プロセスと材料化プロセスにおける種々の問題に対応できる基礎的知識を与える。特に多成分系の合成と相平衡の取り扱い方を、鉱物共生とその熱力学的基礎を使って説明する。第4章は固体物質のキャラクタリゼーションに必要な基礎知識とその方法について、応用に力点をおいて解説する。ここでは最先端の技術を伝えることもさることながら、実際の材料研究に役に立つ知識とすることを念頭に置いて書かれるべきであろう。

産業と密接に結び付いていることから、材料科学に関係する人口は非常に多いので、このような本のニーズは大きいものと予想され、現場で材料開発に携わっている人たちにも読みごたえのあるものになるであろう。大学、高専の材料科学を専攻する学生の基礎科目としてこのような内容の講義が開かれ、この本がテキストとして使われることが一つの理想である。

鉱物学を材料科学の基礎学問として位置付ける以上のような努力は、鉱物学者の知的好奇心を満足させるものではないかもしれない。しかしながら、このような試みは最初はどうしても必要であると思われる。材料科学における鉱物学の位置づけがはっきり示された後は、鉱物学者は従来どうりあるいはさらに一層積極的に、材料物質についての研究を進めるべきである。そうすればその成果は、鉱物学者による業績として材料科学から正当に評価され、歓迎されるであろう。

材料というのは、ある意味では鉱物学に於ける研究の主流にはなり得ない対象かも知れない。し

かし、材料科学は物理、化学、生物学、医学、建築学等の非常に多くの学問と密接に結び付いている。さらに、材料は 21 世紀の産業を支える重要な柱であり我々の実生活とも深く関わり合っている。一般の人々の関心も少なくない。従って材料科学の基礎学問の一つに鉱物学が位置づけられればその波及効果は小さくなく、鉱物に興味を持つ学生が増加し、鉱物学の発展にも寄与することが期待される。また副産物として、鉱物についてのデータを整理体系化する過程で、新しい法則が見いだされる可能性もあるかも知れない。

鉱物学の高峰を築くためには、世界的な研究の出現が必要であると同時に、その裾野を広げること大切だと思われる。日本人は中学、高校に於ける教育上の問題もあって鉱物についての理解が低く、鉱物と岩石との区別がつかない人も多数いる。従って鉱物学が何を研究する学問か、研究者の間でも分野が異なるとあまり理解されていないのが実状であろう。鉱物の研究者達は若い人（小中高生までも含めて）や外部に対して鉱物学の面白さをアピールしようとする人が少ない様にも感じられる。個人の地道な努力と共に、学会としても鉱物学の理解と普及のために、社会に対して、他の学問領域に対して積極的に働きかけていく広報、サービスの活動も必要かと思われる。その意味でファインセラミックスに代表される無機材料は、そのようなコミュニケーションの格好の「材料」と思われる。

討 論

砂 川 一 郎 (コメント)

中井さんのお話は我が意を得た感じで、うれしく思いました。実際に日本の産業の発展で鉱物学分野の出身者が果たした貢献は多々ありますが、それが十分に認識されていません。内外に PR する努力を払うことが大切でしょう。

文 献

- 1) 通産省生活産業局ファインセラミックス室編：ファインセラミックス（通商産業調査会，1987）。
- 2) Bednorz, J. G. and Müller, K. A.: *Z. Phys. B-Condensed Matter* **64**, 189(1986).
- 3) Kishio, K., Kitazawa, K., Kanabe, S., Yasuda, I., Sugii, N., Takagi, H., Uchida, S., Fueki, K. and Tanaka, S.: *Chem. Lett.*, 1987 429(1987).
- 4) 中井泉, 泉富士夫：固体物理, **22**, 989(1987).
- 5) Wu, M. K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J., Wang, Y. Q. and Chu, C. W.: *Phys. Rev. Lett.* **58**, 908(1987).
- 6) Sueno, S., Nakai, I., Okamura, F. P. and Ono, A.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, L842(1987).
- 7) Izumi, F., Asano, H., Ishigaki, T., Takayama-Muromachi, E., Uchida, Y., Watanabe, N. and Nishikawa, T.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, L649(1987).
- 8) Nakai, I., Sueno, S., Okamura, F. P. and Ono, A.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, L788(1987).
- 9) Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutomi, M. and Asano, T.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27**, L209(1988).
- 10) Sheng, Z. Z. and Hermann, A. M.: *Nature*, **332**, 55(1988).
- 11) Parkin, S. S. P., Lee, V. Y., Engler, E. M., Nazzak, A. I., Huang, T. C., Gorman, G., Savoy, R. and Beyers, R.: *Phys. Rev. Lett.*, in press (1988).
- 12) Torardi, C. C., Subramanian, M. J., Calabrese, J. C., Gopalakrishnan, J., Morrissey, K. J., Askew, T.

- R., Flippen, R. B., Chowdhry, U. and Sleight, A. W.: Science, **240**, 631(1988).
- 13) Imai, K., Nakai, I., Kawashima, T., Sueno, S. and Ono, A.: Jpn. J. Appl. Phys., **27**, L1661 (1988).
- 14) Matsui, Y., Maeda, H., Tanaka, Y. and Horiuchi, S.: Jpn. J. Appl., **27**, L372(1988).
- 15) Matsui, Y., Maeda, H., Tanaka, Y. Takayama-Muromachi, E., Takekawa, S. and Horiuchi, S.: Jap. J. Appl. Phys., **27**, L827(1988).