

高校化学および 大学教科書における 構造と化学結合に 関する記述の問題点 と改善案

Problems and Solution Proposals of the Description on the Structure and Chemical Bonding in the High School Chemistry and University Textbooks

Key-words : High school chemistry textbook, Crystal structure, Amorphous material, Chemical bonding, Metallic bonding

八島 正知

Masatomo YASHIMA (Tokyo Institute of Technology)

1. はじめに

化学はセラミック材料科学をはじめとする科学技術の基礎であり、高等学校の科目の中でセラミックスを直接扱っている重要な科目である。高校で最近使用されている化学の教科書は、わかりやすい、図を多用している、カラー刷りである、最新の研究成果も紹介している等素晴らしい。しかしながら、いくつかの間違いや誤解を生む記述がある。そのような指摘は過去に

多くなされている^{1)~5)}。筆者は東京工業大学の学部1年生の必修講義「無機化学基礎」の教科書^{6),7)}を執筆したとき等に、高校化学の教科書を調べることがあった。その際、構造と化学結合の記述について、いくつか気になる点があった。多くの研究者や技術者はそれに気づいていると推察するが、本稿では、浅学を顧みず、いくつかの問題点とその改善案を示したい。改善の方針としては、大学の教科書や英語の専門用語との整合性を取ることである。その目的は高校生や高専生が大学あるいは大学院に進学したり、セラミックスや化学系のメーカーに就職した際に、スムーズに材料科学や化学を理解して、研究や仕事に活用できるようにすることである。結晶と非晶質固体の原子スケールでの構造と化学結合は、材料科学の基礎として重要である。本稿では、主として平成29年度使用の高等学校の化学教科書^{8)~28)}における構造と化学結合等の記述における問題点(表1)とその解決案を議論することを目的としている。大学の教科書等専門書の用語および記述で気になる点も少し指摘したい。

2. 金属の結晶構造とブラベー格子が混在している問題

多くの高校化学の教科書^{8)~14), 16)~19), 22)~28)}で、金属の結晶構造として体心立方格子、面心立方格子、六方最密構造が記されている(表1の項目①, 表2)。また、金属の結晶格子として体心立方格子、面心立方格子、六方最密構造^{注1)}を記した教科書もある。例えば、ある教科書では

表1 高校化学教科書の問題点の該当ページ(問題点①, ②, ③, ④, ⑤の詳細については、それぞれ2, 3, 4, 5, 6節を参照せよ)

文献番号	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
会社名	東書	東書	実教	実教	実教	啓林	啓林	啓林	数研	数研	数研
教科書の記号・番号	化基 313	化基 314	化基 315	化基 316	化基 317	化基 318	化基 306	化基 307	化基 319	化基 320	化基 309
発行年	2017	2017	2017	2017	2017	2016	2012	2016	2017	2017	2017
①結晶構造	p.84	pp.76-77	pp.83-84	p.65	p.51	p.92	p.99	—	p.84	p.63	p.70
②非晶質	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③斜方硫黄	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
④SiO ₂ の化学結合	p.81, 86	p.73, 79	p.99	p.64	p.49, 55	p.87	p.95, 101	p.67	p.79	pp.58-59, 64-65	p.64
⑤金属結合	p.82	p.74	p.82	p.62	p.50	p.88	p.96	p.68	p.80	p.60	p.67
文献番号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
会社名	第一	第一	第一	東京	東京	実教	実教	啓林	数研	第一	
教科書の記号・番号	化基 321	化基 322	化基 312	化学 301	化学 302	化学 303	化学 304	化学 305	化学 306	化学 307	
発行年	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2016	2017	2017	
①結晶構造	p.76	—	—	pp.68-70, p.80	pp.42-43, p.50	p.38, 45	p.34, 37	pp.39-43	p.21	p.8	
②非晶質	—	—	—	p.77, 80	p.40, 48	p.43	p.32, 36	p.7, 256	p.25	p.22	
③斜方硫黄	—	—	—	p.206	p.132	pp.178-179	p.140	p.197	p.205	p.171	
④SiO ₂ の化学結合	p.72, 81	p.69, 73	p.55, 61	p.12, 67, 75, 80	p.41, 46, 50	p.10, 45	p.13, 147	p.37	p.26	p.7, pp.15-16, p.30, 183	
⑤金属結合	p.76	p.70, 73	p.56	—	p.42	p.45	—	—	p.20	—	

注1 六方最密構造のブラベー格子は、単純六方格子であり、六方最密構造とするのは間違いである。

表2 金属の結晶構造図を示す表の一部の例とその改善案
現在の誤った記載：表 金属の結晶構造の例

結晶構造	体心立方格子	面心立方格子	六方最密構造
改善案：表 金属の代表的な結晶構造			
結晶構造	体心立方構造	面心立方構造 立方最密構造	六方最密構造

「金属結晶の多くは、体心立方格子、面心立方格子、六方最密構造の3種類の結晶格子のいずれかをとる。」

(1)

と記述されている。ここで下線部は修正すべき点である。体心立方格子および面心立方格子は結晶構造ではなく、ブラベー (Bravais) 格子である (結晶格子と記すのは不自然である)。しかも六方最密構造は結晶構造の名称であるので、結晶構造とブラベー格子の名称が同列で混在している。また、高校生にとってブラベー格子の概念は難解であろう。例えばC₆₀のブラベー格子が面心立方格子であることを考えさせるような入試問題もあるが²⁹⁾、ブラベー格子を理解するのは大学生になってからで良いと考える。そこで結晶構造の名称で統一するのが好ましい。また、金属間化合物の多様な結晶構造を除外するために単体の金属に限る方が良い。したがって、

「単体の金属の多くは、体心立方構造、面心立方構造 (立方最密構造)、六方最密構造の3種類の結晶構造のいずれかをとる。」 (1')

とするのが正確かつ平易であると考え、(1') の二重の下線部は(1)の下線部を修正した部分である。表2に示すように、

結晶構造：体心立方格子 面心立方格子 (2)

を
結晶構造：体心立方構造 面心立方構造 (立方最密構造) (2')

のように修正すべきである。この問題は「化学用語に関するご意見募集パブリックコメント」¹⁾にも記載されているが、上記のような修正提案はなされていない。

3. 用語「アモルファス (非晶質)」が英語と対応しない問題

アモルファスおよび非晶質を名詞として扱っている教科書がある^{22)~28)} (表1の項目②)。例えば

「このような固体をアモルファス (非晶質) という。」 (3)

との表現があるが、英語の「amorphous」は名詞ではなく形容詞なので、

「このような固体をアモルファス (非晶質) 固体という。」 (3')

あるいはより多く使う

「このような物質をアモルファス (非晶質) 物質という。」 (3'')

あるいは

「このような材料をアモルファス (非晶質) 材料という。」 (3''')

が良いと考える。下線部は追加あるいは修正した部分である。

4. 結晶系の名称

「斜方硫黄」という言葉が教科書に使われている^{22)~28)}

(表1の項目③)。例えば、

「硫黄の単体には斜方硫黄、単斜硫黄、ゴム状硫黄等の同素体があり、…」 (4)

結晶格子は7つの晶系に分類されるが、「斜方晶系」は7つの結晶系の一つ「orthorhombic system」の日本語訳である。「orthorhombic system」の単位胞は直方体であり (格子定数 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$)、日本結晶学会は、「orthorhombic system」を「直方晶系」と訳すことを推奨している³⁰⁾。したがって、(4)を次のように修正することを提案する。

「硫黄の単体には直方硫黄^註、単斜硫黄、ゴム状硫黄等の同素体があり、…」

注 直方硫黄を斜方硫黄ということもある。 (4')

大学の教科書や専門書^{31), 32)}において、「tetragonal」と「tetragonal system」はたびたび

「正方晶」 (5)

と訳される。「tetragonal」は形容詞であり、

「正方」あるいは「正方の」 (5')

と訳されるべきだろう。「正方晶」を敢えて英訳すれば、「tetragonal crystal」になると考えられる。例えば、「tetragonal barium titanate」は「正方晶チタン酸バリウム」ではなく「正方チタン酸バリウム」である。

TZP: Tetragonal Zirconia Polycrystalsは「正方晶ジルコニア多結晶体」というよりは、「正方ジルコニア多結晶体」が自然な訳であると考えられる。

5. 二酸化ケイ素 SiO₂ を典型的な共有結合の結晶と記述している問題

高校化学のすべての教科書^{8)~28)} (表1の項目④)、書籍「セラミック化学」³²⁾、放送大学の教材 (7節参照) 等では、共有結合の結晶 (共有結晶) の例としてダイヤモンドCの他、二酸化ケイ素SiO₂を取り上げている。例えばある高校化学の教科書では

「また、二酸化ケイ素は1個のケイ素原子Siに4個の酸素原子Oが共有結合して四面体構造をつくり、ダ

イヤモンドのように三次元的に繰り返し結合した共有結合の結晶である。」[「共有結合の結晶」の項目に記載]

(6) と記されている。この表現は正確ではないし、 SiO_2 は共有結合の割合が高い典型的な共有結合結晶であるという間違った理解につながる。 SiO_2 の共有結合性の割合は Pauling の式^{7), 33)} を使うと半分程度 (共有結合性 49%, イオン結合性 51%) であると大雑把に見積もられる (詳細については付録を参照のこと)。 SiO_2 のイオン結合性と共有結合性については、今でも決着がつかないように見える。例えば、Zwijenburg ら³⁴⁾ はシリカのイオン性を研究するために密度汎関数クラスター計算を行い、各原子の電荷を3種類の方法で解析した。その結果、Si-O 結合のイオン性は、Bader 法を用いると約 83% であるのに対し、Hirshfeld 法では約 14%, Mulliken 解析では約 28% と見積もられ、明確な結論を得ることができなかった³⁴⁾。このように、確立していない SiO_2 の化学結合を、高校の教科書で記すべきではない。

そもそもイオン結合、共有結合、金属結合等の用語は、それぞれに特徴的な電子状態 (電子の空間分布 (電子密度分布) やエネルギー分布 (電子状態密度) 等) を表すために便宜上使われているに過ぎない^{7), 35)}。そこで筆者は、密度汎関数理論に基づいて SiO_2 (α -石英)、Si、Li および NaCl の電子密度分布を計算した^{7), 36)}。その結果、Bader 電荷解析により SiO_2 (α -石英) のイオン結合性は 82% であると見積もられ、典型的なイオン結晶である NaCl の 87% に近く、典型的な共有結合の結晶である Si の 0% からは大きく離れていることがわかった。実際、 SiO_2 (α -石英) の電子は Si および O 原子の中心付近に局在している (図 1(a))。この分布は NaCl の電子密度分布 (図 1(d)) と類似しており、典型的な共有結合の結晶である Si (図 1(b)) とは大きく異なっている。以上の結果は、 SiO_2 (α -石英) のイオン結合性が高いことを示唆している。この結果は、Garvie ら³⁷⁾ による電子エネルギー損失分光 (EELS) 実験および第一原理計算の結果と矛盾しない。なお、100% のイオン性を持つ結合はありえないということに注意すべきである。すなわち NaCl と SiO_2 (α -石英) も共有結合性を少しは持っている。

以上の考察より、(6) については、
「また、二酸化ケイ素は 1 個のケイ素原子 Si に 4 個の酸素原子 O が結合して四面体をつくり、ダイヤモンドのように三次元的に繰り返し配列した結晶である。」
[「共有結合の結晶」の項目から削除し、「セラミックス」あるいは「イオン結晶」の項目に記載] (6)

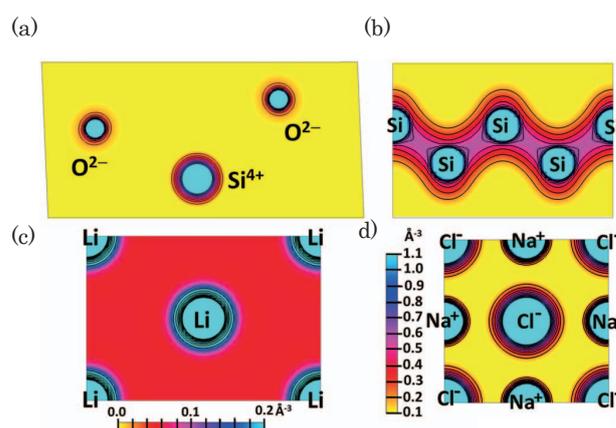


図 1 (a) SiO_2 (α -石英) の $(6\bar{2}1)$ 面上の電子密度分布, (b) シリコン Si の (110) 面上の電子密度分布, (c) リチウム Li の (110) 面上の電子密度分布, (d) 塩化ナトリウム NaCl の (100) 面上の電子密度分布. 色のスケールは (a), (b), (d) で同じである. 等高線の範囲は $0.2 \sim 1.2 \text{ \AA}^{-3}$, 間隔は 0.1 \AA^{-3} である. 学生や教員が化学結合を正確に理解できるよう, 高校や大学の化学とセラミックスの教科書に, このような図を用いることを提案する. プログラム vasp³⁸⁾ により, 最適化した構造に対して計算した電子密度分布を, VESTA³⁹⁾ により描画した.

のように修正すると良いと考える。

6. 「金属結合」の定義と用語「自由電子」の問題

高校や大学の教科書では度々自由電子による原子の結合を金属結合と定義している^{8)-21), 23), 24), 27), 32)} (表 1 の項目⑤)。例えばある高校化学の教科書では、
「金属の原子が集合した金属の単体では、価電子は各原子から離れ、特定の原子に所属することなく金属全体を自由に移動できるようになる。このような電子を自由電子と呼ぶ。自由電子による金属の原子間の結合を金属結合という。」 (7)
と記されている。筆者は密度汎関数理論に基づいた電子状態計算により、Li 金属の構造を最適化した後、電子密度分布を計算した^{7), 36)}。

図 1(c) に示すように、Li 金属の価電子は単位胞内を広く分布している^{7), 36)}。しかし、金属の電子伝導に寄与するのは、Fermi 準位付近の電子であり⁴⁰⁾、価電子のごく一部である (図 2)。自由電子という用語は、単純な初期のモデルである「自由電子モデル」において使われている。しかしながら、「自由電子 (free electron)」という用語は、金属物質内の原子や他の電子の影響を受けているため不適切であると考えられる。金属における電子伝導のキャリアを、自由電子と呼ぶよりは、伝導電子 (conduction electron)、可動電子 (mobile electron) または可動ホール (mobile hole) と呼ぶべきであろう。したがって、次のような

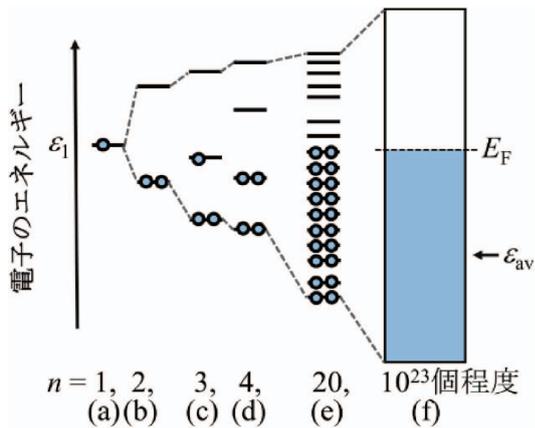


図2 価電子を1個持つ孤立した1個の原子 ($n=1$ (a)) および n 個 ($n=2$ (b), 3(c), 4(d), 20(e)) の原子からなる孤立した分子および 10^{23} 個程度の原子から成る凝集体(f)における価電子のエネルギー準位の模式図。青丸は充填した電子を、 ϵ_1 は孤立した1個の原子における価電子のエネルギーを、 ϵ_{av} は凝集体における価電子の平均エネルギーを、 E_F はフェルミエネルギーを表す。(f)のハッチは電子による占有を示す。

表現がより正確であると考える。

「金属の原子が凝集した金属の単体では、価電子の一部が特定の原子に所属することなく金属全体に広がっている (図1(c))。このような広がった価電子を持つ金属の原子間の結合を金属結合という。広がった電子の一部が移動することにより、金属は電気伝導を示す。」 (7)

ここで電子の「一部」とした理由は、Fermi 準位付近の電子のみが伝導電子になるためである (図2)。一方、凝集体が安定化する理由は、孤立した原子の価電子のエネルギー ϵ_1 よりも、凝集体における価電子の平均エネルギー ϵ_{av} が低いことによるものであり (図2において $\epsilon_1 > \epsilon_{av}$)、伝導電子だけの寄与で凝集体が安定化されるわけではないことに注意されたい。

7. まとめと展望

本稿の内容を以下にまとめる。高校化学の教科書等について、次の問題点を指摘し (表1)、改善案を示した。

- 金属結晶の代表的な結晶構造として、結晶構造ではなくブラベー格子である体心立方格子と面心立方格子が記されている。これを体心立方構造と面心立方構造 (最密立方構造) に修正することを提案した。
- 「アモルファス (非晶質)」を名詞としてではなく、形容詞として使い、「アモルファス (非晶質) 物質」, 「アモルファス (非晶質) 固体」, あるいは「アモルファス (非晶質) 材料」に修正すること

を提案した。

- 「斜方硫黄」を「直方硫黄 (斜方硫黄とも言う)」に修正することを提案した。
- 「正方晶」を使わずに「正方」または「正方の」を使うことを提案した。
- 二酸化ケイ素 SiO_2 は共有結合性の高い物質ではなく、かなりイオン性を持つと考えられるが、正確なイオン性と共有結合性は確立していないように見える。 SiO_2 が典型的な共有結合の結晶であるとの記述は削除し、化学結合については言及しないように修正することを提案した。また、 SiO_2 の記述を共有結合の結晶の項目からは削除し、セラミックスの項目またはイオン結晶の項目で構造の特徴を説明することを提案した。
- 高校および大学の教科書の化学結合の説明に、図1のような電子密度分布図 (模式図ではない!) を利用することを提案した。拙著⁷⁾ではそのような説明を行っている。
- 用語「自由電子」を使わないことを提案した。もし同等な意味の言葉を使うとすれば、「伝導電子」または「可動電子」を使用することを提案した。自由電子による金属原子の結合としてではなく、金属における広がった価電子を持つ金属原子間の結合として金属結合を定義することを提案した。

内容の一部は2016年春のセラミックス協会春の年会で筆者が口頭発表した内容を改めてまとめたものである。口頭発表に先だって、ある教科書の監修を行っている先生にお伺いしたところ、「そのように改訂したいが、…中略…ちょっと時間がかかりそうです。」とのお返事も頂いたので、少しずつ改善していくと期待している。入試問題ともリンクするので、早急な改訂は容易ではないと推察する。しかしながら、間違った知識による不利益は小さくないので、今後なるべく早い改訂が進むと期待したい。

このような改訂が必要なのは、高校の教科書だけではない。例えば、放送大学の講義をたまたま聞いたところ、「 SiO_2 は典型的な共有結合の結晶である」と説明していてショックであった⁴¹⁾。放送大学の教材で金属の結晶構造として体心立方格子と面心立方格子が記されている^{42)~44)}。「自由電子の働きによって、金属原子間にできる結合を金属結合という。」^{42), 45)} といった間違いが記されている。用語「斜方硫黄」も使われている⁴⁶⁾。

必ずしも専門ではない筆者の浅学ゆえ、本稿には間違いや不正確なカ所があるかもしれない。また、ここで提案した改善案については、高校生にとって、より

わかりやすくなるように、さらに改善できるであろう。より良い教科書に向けて、本稿が議論のきっかけになれば幸いである。最初にも書いたが、最近の教科書は素晴らしい。教科書の内容を印刷体にしておくだけでなく、今後ウェブ等で無料で電子書籍として公開されるよう希望する。そうすれば、日本の科学技術の発展に一層貢献するであろう。

付録⁷⁾

セラミックスの化学結合はイオン結合と共有結合の中間である。Paulingは元素AとBからなる化合物のイオン結合性 p_{AB} を大雑把に見積もる半経験式、 $p_{AB} = 1 - \exp\left[-\frac{1}{4}(\chi_A - \chi_B)^2\right]$ を提案した³³⁾。ここで χ_A と χ_B はそれぞれAとBの電気陰性度である。Paulingによる電気陰性度の値を用いた場合、Si-O結合のイオン結合性は0.51と計算される。一方、共有結合性は $(1 - p_{AB}) = 0.49$ と見積もられる。

謝辞 直方硫黄について東京工業大学の日比野圭佑氏と有益なディスカッションを行った。本稿で説明した第一原理計算の一部は、科学研究費補助金(課題番号:15H02291, 16H06440, 17H06222)の御援助を受けた。

文献

- 1) 日本化学会化学用語検討小委員会, 高等学校化学で用いる用語に関する提案(1), <http://www.chemistry.or.jp/news/press/1-1.html> (2015).
- 2) 日本化学会化学用語検討小委員会, 高等学校化学で用いる用語に関する提案(2), <http://www.chemistry.or.jp/news/press/1-1.html> (2016).
- 3) 例えば浜田圭之助, 長崎大学教育学部研究報告, **33**, 45-50 (1982).
- 4) 例えば柿原聖治, 化学と教育, **39**, 316-318 (1991).
- 5) 例えば坪村 宏, 化学と教育, **47**, 782-783 (1999).
- 6) 八島正知, 第4章 固体化学(1), 理工系学生のための基礎化学, “無機化学第2版”, 東京工業大学理学院化学系編, 化学同人, 京都, (2017) pp.27-34.
- 7) 八島正知, 第4章 固体化学(2), 理工系学生のための基礎化学, “無機化学第2版”, 東京工業大学理学院化学系編, 化学同人, 京都, (2017) pp.35-43.
- 8) 竹内敬人ら, “改訂化学基礎”, 東京書籍 (2017).
- 9) 竹内敬人ら, “改訂新編化学基礎”, 東京書籍 (2017).
- 10) 木下 實ら, “化学基礎新訂版”, 実教出版 (2017).
- 11) 相原惇一ら, “新版化学基礎新訂版”, 実教出版 (2017).
- 12) 務台 潔ら, “高校化学基礎新訂版”, 実教出版 (2017).
- 13) 齋藤 烈ら, “化学基礎改訂版”, 新興出版社啓林館 (2016).
- 14) 齋藤 烈ら, “化学基礎”, 新興出版社啓林館 (2012).
- 15) 齋藤 烈ら, “新編化学基礎改訂版”, 新興出版社啓林館 (2016).
- 16) 辰巳 敬ら, “改訂版化学基礎”, 数研出版 (2017).
- 17) 辰巳 敬ら, “改訂版新編化学基礎”, 数研出版 (2017).
- 18) 野村裕次郎, “高等学校化学基礎”, 数研出版 (2017).
- 19) 山内 薫ら, “高等学校改訂化学基礎”, 第一学習社 (2017).
- 20) 山内 薫ら, “高等学校改訂新化学基礎”, 第一学習社 (2017).
- 21) 山内 薫ら, “高等学校新化学基礎”, 第一学習社 (2017).
- 22) 竹内敬人ら, “化学”, 東京書籍 (2017).
- 23) 竹内敬人ら, “新編化学”, 東京書籍 (2017).
- 24) 井口洋夫ら, “化学”, 実教出版 (2017).
- 25) 井口洋夫ら, “新版化学”, 実教出版 (2017).
- 26) 齋藤 烈ら, “化学”, 新興出版社啓林館 (2016).
- 27) 辰巳 敬ら, “化学”, 数研出版 (2017).
- 28) 山内 薫ら, “高等学校化学”, 第一学習社 (2017).
- 29) 日本化学会化学教育協議会大学入試検討小委員会, 化学と教育, **47**, 442-446 (1999).
- 30) 大橋裕二, 日本結晶学会誌, **57**, 131-133 (2015).
- 31) 例えば, 後藤 孝ら訳, “ウエスト固体化学”, 講談社, (2016) p.2.
- 32) 日本セラミックス協会編, “セラミック化学改訂第2版”, 技報堂, (2003), (正方晶は p.112, SiO₂は p.25, 金属結合と自由電子は p.27).
- 33) ポーリング著, 小泉正夫訳, “化学結合論 [改訂版]”, 共立出版, (1962) p.86; L. Pauling, *The Nature of the Chemical Bond*, 3rd Ed., Cornell University Press, (1960) p.98.
- 34) M. A. Zwiijnenburg, S. T. Bromley, C. van Alsenoy and T. Maschmeyer, *J. Phys. Chem. A*, **106**, 12376-12385 (2002).
- 35) 例えば, 宇野良清ら訳, “第4版キッテル固体物理学入門”, 丸善 (1974) p.97.
- 36) 八島正知, 未発表データ (2016).
- 37) L. A. Garvie, P. Rez, J. R. Alvarez, P. R. Buseck, A. J. Craven and R. Brydson, *Am. Mineral.*, **85**, 732-738 (2000).
- 38) G. Kresse and D. Joubert, *Phys. Rev. B*, **59**, 1758-1775 (1999).
- 39) K. Momma and F. Izumi, *J. Appl. Crystallogr.*, **44**, 1272-1276 (2011).
- 40) 例えば, 文献31)のp.168.
- 41) 例えば, 荻野 博ら, “初歩からの化学”(放送大学教材1130609-1-0811), 放送大学教育振興会 (2008) p.44.
- 42) 文献40)のp.49.
- 43) 瀧口利夫, 東 千秋, “物質工学の世界”(放送大学教材54711-1-9111), 放送大学教育振興会 (1991) p.22.
- 44) 平川暁子編, “基礎化学”, (放送大学教材23060-1-9011), 放送大学教育振興会, (1990) p.118.
- 45) 平川暁子, 濱田嘉昭編著, “物質の世界 化学入門”, (放送大学教材13021-1-0211), 放送大学教育振興会, (2002) pp.31-32.
- 46) 文献41)のp.188.

筆者紹介



八島 正知(やしま まさと)

筑波大学卒業, 東京工業大学大学院修士課程および博士課程修了。東京工業大学助手, 助教授, 准教授を経て教授。学部1年生の無機化学基礎, 学部3年生の固体化学, 大学院修士課程1年の固体構造物性特論等の講義を行っている。専門はセラミック材料科学, 結晶学, 固体化学。現在のテーマは新構造型イオン伝導体等新構造型機能性材料の探索, 結晶構造解析と構造物性, 酸化物, 複合アニオン化合物等。

[連絡先] 〒152-8551 東京都目黒区大岡山2-12-1-W4-17 東京工業大学理学院化学系

E-mail: yashima@cms.titech.ac.jp