.....
解 説 (3)
.....

多孔質セラミックス湿度センサ

定岡 芳彦・松口 正信・酒井 義郎

愛媛大学工学部工業化学科 〒790 松山市文京町 3

(1988年6月1日 受理)

Humidity Sensor using Porous Ceramics

Yoshihiko SADAOKA, Masanobu MATSUGUCHI and Yoshiro SAKAI

Faculty of Engineering, Ehime University
3-Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime 790

(Received June 1, 1988)

Ceramics are useful materials for humidity sensing device because the electric impedance of porous ceramics is strongly affected by the humidity in atmosphere. The sensitivity could be controlled by the pore structure, surface area and/or chemical modification of the pore wall surface. For the sample where the surface occupancy area of acidic protons was larger than ca. 0.1 nm^2 , the impedance value at 90% r.h. was controlled by the surface area and the morphologies of pores. In the range below 0.1 nm^2 , the impedance especially for >40% r.h. could be lowered without any increase in the surface area and was reciprocally proportional to the concentration of acidic protons. The introduction of alkali ions to the pore wall surface instead of protons is a preferable method to improve the humidity sensitivity and durability. It is difficult to lower the impedance for <30 % r.h. by the introduction of acidic protons and/or alkali cations. To lower the impedance for the lower humidity region, the use of super ionic conductor or ferroelectrics instead of usual insulating metal-oxide was proposed.

1. はじめに

近年、化学センサへの期待が高まっており、種々の原理に基づく素子が研究、開発されている。既にこれらに関する優れた成書もいくつか発刊されている¹⁻³⁾。常温作動型湿度センサについても研究が活発に進められているが、材料面からみると、高分子、多孔質セラミックスに大別され、検出原理から見ると、吸湿にともなう導電率および電気容量の変化を検知するものと分類される。このうち多孔質セラミックスを用いた湿度センサは、粒子表面に吸着もしくは凝縮した水の層を導電路としたプロトン伝導性が吸湿量に対応して変化することを利用している。この感湿特性を理解するには、細孔分布、細孔半径あるいは細孔表面積などの幾何学的因子はもちろんのこと、吸着水の形態、表面の酸塩基性、更には表面水酸基の分布などかなり幅広い情報を得る必要がある。

本稿では金属酸化物焼結体を中心として幾何学的因子ならびに細孔表面状態と感湿特性（導電性の湿度依存性）との相関性について概説する。

2. 細孔形態と等価回路

多孔性セラミックスに存在する細孔には、閉孔と開孔とがあり、開孔には多孔体中を気体などが通過できる貫通細孔と、入口があるものの出口のない入口細孔の2種類がある。このうち、感湿特性に影響するのは入口細孔と貫通細孔である。実在する細孔は、細孔半径に変化のある曲りくねった形状をもつであろうが、簡単にするため、これらの細孔はすべて円筒状であり、素子の電極面に対し垂直方向に形成されていると仮定する。この場合素子の等価回路は、**Fig. 1** で与えられる。ここで電気的成分として抵抗および容量を考え、更に、電極-セラミックス接合面に対する成分はないものとした。図中、

Fig. 1 Electrical analogue for porous oxide.

R_B, R_B', C_B, C_B' : resistance and capacitance for oxide, R_S, C_S : resistance and capacitance for physisorbed water on throughpore surfaces, R_S', C_S' : resistance and capacitance for physisorbed water on a accesible pore surface.

C_B, R_B はセラミックス自体の容量, 抵抗成分, C_S, R_S は貫通細孔表面に吸着した水の容量, 抵抗成分, C_S, R_S , は入口細孔表面に吸着した水の容量, 抵抗成分, 更に, C_B', R_B' は入口細孔の電極間方向に存在するセラミックスの容量, 抵抗成分である。全インピーダンス, Z_{ob} は次式で与えられる*。

$$\frac{1}{Z_{ob}} = \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_S} + \frac{1}{Z_X} \quad (1)$$

$$Z_B = \frac{1}{\frac{1}{R_B} + j\omega C_B} \quad (2)$$

$$Z_S = \frac{1}{\frac{1}{R_S} + j\omega C_S} \quad (3)$$

$$Z_X = \frac{1}{\frac{1}{R_B'} + j\omega C_B'} + \frac{1}{\frac{1}{R_S'} + j\omega C_S'} \quad (4)$$

絶縁性金属酸化物においては, その抵抗成分は非常に大きなものであり, 通常温度においては, $Z_B = 1/j\omega C_B$, $Z_B' = 1/j\omega C_B'$ となり, 表面吸着水に対しては, $Z_S = R_S$, $Z_S' = R_S'$ となることが数多くの実験から判っている。それ故, (1)式は,

$$\frac{1}{Z_{ob}} = j\omega C_B + \frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_S' + \frac{1}{j\omega C_B'}} \quad (5)$$

に改めることができる。(5)式において, C_B, C_B' はセラミックス自体の容量であり吸湿量には依存しない定数となり, R_S, R_S' のみが依存する。入口細孔のみからなる場合と貫通細孔のみからなる酸化物について例示す

* この種の湿度センサは通常, 分極, 水の分解を抑えるため交流法を用いて検出を行なう。

る。通常の焼結法で得られる多孔質セラミックスでは上記モデルに適合するものは得がたいが, 酸性浴を用いて陽極酸化したアルミニウム膜は, 細孔形態がよく制御された均一な入口細孔をもつとともに入口細孔の電極間方向に存在する酸化物質層 (いわゆるバリアー層) の厚みもかなり容易に制御できる。更に, この酸化物は化学的処理によりバリアー層を除去することができ, 貫通細孔のみを有する酸化物とすることが可能である⁴⁾。入口細孔のみを有する皮膜および貫通細孔のみを有する皮膜を用いて, サンドイッチ型電極構造をもつ素子のインピーダンス-湿度特性を **Fig. 2, Fig. 3** に示す。入口細孔の

Fig. 2 Humidity dependence of impedance for anodized alumina with barrier layer. reanodization voltage: ○ 20 V, ○ 50 V, △ 200 V, △ 300 V.

Fig. 3 Humidity dependence of impedance for anodized film which removed the barrier layer. ○ impedance at 100 Hz, ○ R_S , △ $C_S + B$.

みからなる前者において、湿度 20% r.h. 以下でのインピーダンスは酸化物の容量に、また、高温状態でのそれはバリアー層の容量に対応し、バリアー層の厚みに対し反比例する。例示した膜の全厚みは $6.2\ \mu\text{m}$ であり、バリアー層の厚みは $48\text{nm}\sim 420\text{nm}$ である。一方、バリアー層を取り除いた膜においては、インピーダンスの高湿度状態*での飽和は全く認められない。このように、入口細孔底部に存在する酸化物層の厚みが全厚みの $1/1000$ 程度の場合でも高湿度状態でインピーダンスの飽和がみられ、感湿感度の低下がおこることになる。

3. 細孔表面積とインピーダンス

入口細孔の存在は感湿感度の低下をもたらすことから、素子に存在する細孔は貫通細孔のみからなることが大切である。このような注意を払って作製したセラミックスの感湿感度は、おおむねその細孔表面積によって決定される。なお、乾燥状態でのインピーダンスは、セラミックス自体の誘電率で決定される。**Fig. 4** には、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, ZrSiO_4 などの特別な可動イオンとなる物質を添加していない系についての表面積（単位体積当たり）と 90% r.h. (30°C) でのインピーダンスとの関係を示した⁶⁾。幾分バラツキはみられるものの両者の間には反比例関係が認められる。このような関係が認められるセラミックスの微細構造を走査型電子顕微鏡で観察すると、各微粒子は球形に近く、焼結は余り進んでいない。なお、入口細孔の存在率の高い系、粒子形状に著しい異方性（例えば層状構造をもつ α -リン酸ジルコニウムおよびその焼結体）がみられる系における両者の相関性には **Fig. 4** からの明確なずれが認められている。

Fig. 4 Relationship between impedance at 90% r.h. (1 kHz) and surface area of porous oxide.

* 90% r.h. 以下の湿度下である。湿度が 90% r.h. 以上になると毛管凝縮がおこり、孔内は凝縮水が存在するようになる⁸⁾。

Fig. 5 Relationship between resistivity and concentration of surface hydroxyl groups for silica gel.

4. 表面水酸基濃度とインピーダンス

焼結法によって得た酸化物の表面には、常に表面水酸基が存在する。この水酸基は、当然のことながら導電性に影響を与える。水酸基の濃度と導電性との関連性については、Anderson らによって検討されている⁷⁾。**Fig. 5** に、シリカゲルの抵抗と表面水酸基濃度との関係を示す。水酸基濃度の増大に伴ない抵抗値は増加する傾向がある。これは、水酸基濃度の高い状態では、第 1 層物理吸着水が 2 つの表面水酸基と水素結合し、回転の自由度が失われているが、少ない場合には第 1 層物理吸着水は 1 つの表面水酸基とのみ結合しているため、水分子の回転が容易におこるためと考えられている。**Fig. 5** の結果から、抵抗が急激に増大し始める濃度から求めた水酸基の表面占有面積は $10\ \text{\AA}^2$ 程度となり、納得できる結果が得られている。

5. 物理吸着水量とインピーダンス

酸化物表面には水酸基が形成されており、これはかなりの高温で処理しない限り除去できない。常温作動型湿度センサのうち加熱クリーニングを必要としないタイプの酸化物では、表面にはかなりの濃度で表面水酸基が存在しているであろう。このような表面での水分吸着はまず表面水酸基上に水素結合によっておこり、つづいて多分子吸着層の形成がおこる。吸着水の自由度に関する研究は、既にいくつか報告されている。Rennie と Clifford は、シリカ表面に吸着した水において、被覆率 θ が 2.5 以下の状態では -100°C においてすら凍らないこと、即ち吸着水はかなり束縛された状態にあることを示した⁸⁾。また Harkins と Jura は、アナターゼ型 TiO_2 表面に吸着した水の吸着熱は、 $\theta=5$ 程度まで

被覆率の増大とともに指数関数的に減少することを報告した⁹⁾。更に McCafferty らは、 α -Fe₂O₃ 上の物理吸着水は被覆率の低下につれ自由度が失なわれる結果、 $\theta=1$ および 2 における誘電率は液体水とは異なり、それぞれ 2, 28 と見積っている¹⁰⁾。Fig. 4 に示したような関係が認められる系での 90% r. h. における被覆率は 3~5 であり、単分子層は 30% r. h.~40% r. h. で完成される。このことは、検知湿度範囲で吸着している水分子はかなり自由度が失なわれていることを示唆しており、電気伝導は、活性化過程を含むプロトンもしくは水とプロトンの移動によるものと考えられる。キャリアと考えられるプロトンの生成が吸着水の解離によるものとすれば、

$$\frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]} = \exp\left(\frac{\Delta S_1}{k}\right) \exp\left(\frac{-\Delta H_1}{kT}\right) \quad (6)$$

の関係およびプロトンのジャンプ周波数, W_j ,

$$W_j = \nu_0 \exp\left(\frac{\Delta S_2}{k}\right) \exp\left(\frac{-\Delta H_2}{kT}\right) \quad (7)$$

更に

$$\sigma = na^2 e^2 W_j / kT \quad (8)$$

とから、電導度 σ は

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{[H_2O]^{1/2} a^2 e^2 \nu_0}{kT} \exp\left(\frac{\Delta S_1 + \Delta S_2}{2k}\right) \\ &\quad \exp\left(\frac{-\Delta H_1 - \Delta H_2}{2kT}\right) \quad (9) \\ &= A \exp\left(\frac{\Delta S}{k}\right) \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) \quad (10) \end{aligned}$$

なる関係が得られる。表面積などの幾何学的因子に影響されない式(10)における活性化エネルギー, E , と水分被覆率との関係を Fig. 6 に示す。活性化エネルギーは、 $\theta \approx 2.5$ までは単調に低下し、 $\theta > 2.5$ ではその減少がゆるやかとなり、高い被覆率では 0.1 eV に近づく。純水

Fig. 6 Coverage dependence of activation energy in conduction for porous insulating oxide.

Fig. 7 Relation between pre-exponential factor and activation energy.

における電導度の活性化エネルギーは ≈ 0.26 eV, 空気中から捕集した水のそれは ≈ 0.12 eV, 水におけるプロトン移動度のそれは ≈ 0.1 eV¹¹⁾であることから、 $\theta > 2.5$ の被覆状態での吸着水は液体水に近い状態で存在していることが推定される。一方、アレニウスの式 $\sigma = \sigma_0 \exp(-E/kT)$ における σ_0 は、Fig. 7 に示すように $\log \sigma_0$ は活性化エネルギーに対し単調に増加し、両者の関係は電導度が次式で表現できることを示唆している*。

$$\sigma = A \exp\left(\frac{E}{kT^*}\right) \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) \quad (11)$$

Fig. 7 に示した材料の Na⁺ に対するイオン交換容量の最大値は 8×10^{-4} mol/g であり、表面積は 3×10^5 cm²/g であることから、表面に存在する解離性プロトンの表面占有面積は ≈ 0.1 nm² となる。このことは、かなりの解離性プロトンが表面に存在しても電導度は水分被覆率のみによって決定されることを意味する。このことから、吸着水の電導性はかなり高く、解離性は非常に大きいことが示唆される。Fripiat らは、モンモリロナイト、シリカゲル、シリカガラスにおける物理吸着水の解離度を試算している¹²⁾。それによると、解離度はいずれの試料においても被覆率 0.5 で 0.01 程度であり、純水のそれよりも 10^6 倍程大きい。また、Clement らは、アルミナにおけるそれは 400 K で 0.1 であることを報告している¹³⁾。

6. 強酸性プロトンの導入

解離性プロトン濃度が 3×10^{-9} mol/cm² 程度存在する場合でも、インピーダンス-湿度特性における変化量は

* (11)式は Meyer-Neldel rule として知られている経験則である。(10)式との比較から E/T^* は ΔS (エントロピー)に関係づけられる。

セラミックス自体の誘電率、水分被覆率、および細孔表面積により規制されていることから、細孔表面積の制御のみによる感湿感度の改善には限度がある。特に、低湿度領域におけるインピーダンスの低下を達成するには他の手段によらなければならない。1つの方法として、解離プロトン濃度の増大が考えられた。ここでは、焼結体の細孔表面積、細孔形態をほとんど変化させることなくプロトン濃度を高めることが可能である $\text{ZrSiO}_4\text{-H}_3\text{PO}_4$ 系の結果について述べる^{14,15)}。試作されたセラミックスの表面積および水素イオン濃度を **Table 1** に示し、インピーダンス-湿度特性を **Fig. 8** に示す。乾燥状態でのインピーダンスはプロトン濃度を高めても余り改善されないが、加湿下でのそれはかなり低下する。900°C 以下の処理温度で作成したものにおいて、各湿度での水分被覆率は湿度のみに依存する (**Fig. 9**)。また 1000°C 以上で焼結したものについては、被覆率は前節で述べた系のそれと類似しており、プロトン濃度はかなり低くなっている。それぞれの素子における強酸性プロトンの表面

Table 1 Characteristics of fired zircon with phosphoric acid.

	d_t ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	d_a ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	S_{N_2} ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	$C_{\text{HS}}\times 10^3$ ($\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	$C_{\text{HT}}\times 10^3$ ($\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)
ZP 600	4.1	3.2	2.76	0.11	0.24
ZP 800	4.2	3.2	2.19	0.05	0.11
ZP 1000	4.0	3.2	1.92	0.003	0.024

d_t : true density

d_a : apparent density

S_{N_2} : surface area

C_{HS} : concentration of strongly acidic proton

C_{HT} : concentration of total acidic proton

Fig. 8 Humidity dependence of impedance for fired zircon with phosphoric acid. firing temperature: ○ 600°C, ▲ 800°C, △ 1000°C.

Fig. 9 Firing temperature dependence of coverage of water. ● 90% r.h., ○ 60% r.h., △ 20% r.h..

占有面積は、0.042 nm² (ZP 600), 0.073 nm² (ZP 800), 0.107 nm² (ZP 1000) である。PO₄ の占有面積は 0.1 nm² 程度であることから細孔表面がすべてリン酸で覆われている程度の表面濃度においてはじめて加湿下におけるインピーダンスの低下が達成されることになる。これ以上のプロトン濃度の増大は乾燥状態下でのインピーダンスを 10² 倍程度まで低下させるが、湿度変化に対する応答速度が著しく低下する。なお、強酸性プロトンの表面占有面積が 0.33 nm² 以下の領域では、高湿度下でのインピーダンスはプロトン濃度に対しほぼ反比例することが確められており、電導の主キャリアは強酸性プロトンである。このように、解離性プロトンの導入は、インピーダンスの低下をもたらすが、一定相対湿度下での電導の活性化エネルギーは、プロトン占有面積が 0.1 nm² 程度以上の素子におけるそれよりも高くなる傾向がみられる。これは、吸着水の自由度の違いにもとづいている。

7. アルカリイオンの導入

強酸性プロトンの導入はインピーダンスの低下をもたらすが、この種のプロトンは、汚れの一部であろうアルカリイオンと交換可能である。このような性質は、センサの安定性からみると良好でない。このような観点から、強酸性プロトンの代りにアルカリイオンの導入による感湿特性の改善が試みられている。著者らは、アルカリイオンの導入方法として、アルカリリン酸塩のジルコン表面への固定化を試みた¹⁶⁾。この系においてもリン酸添加の場合と同じく、細孔分布、細孔表面積の大幅な変動を伴わずに脱水反応によりジルコン表面にアルカリイオンを固定化することが可能である。**Fig. 10** に、 XH_2PO_4 (X=H, Na, K)- ZrSiO_4 焼結体のインピーダンス-湿度特性を示した。いずれの素子においても、イン

Fig. 10 Humidity dependence of impedance for fired zircon with XH_2PO_4 . X: $\circ$ H, $\circ$ Na, $\triangle$ K.

Fig. 11 Relationship between activation energy in conduction and coverage of physisorbed water. XH_2PO_4 . X: $\circ$ H, $\circ$ Na, $\triangle$ K.

Fig. 12 relationship between resistance and its activation energy. XH_2PO_4 . X: $\circ$ H, $\circ$ Na, $\triangle$ K.

ピーダンスは湿度に対しほぼ指数関数的に低下し、その絶対値はアルカリ塩を用いることにより全湿度において低くなっている。また、Fig. 11 に示すように、電導の活性化エネルギーと水分被覆率との間には、Fig. 6 の結果に類似した相関性が認められ、抵抗成分と活性化エネルギーとの間には、Fig. 12 に示すような直線関係がみられる。アレニウスの式における前指数係数、 σ_0 はアルカリ塩を用いることにより増大しており、これが乾燥状態におけるインピーダンス低下の一因となっている。

8. 他の方法による改良

実用的な観点からみると、これまで述べた方法でつくられたセンサは、特に低湿度領域でのインピーダンスが高い。通常の回路を用いて湿度検出をおこなうには、少なくとも $1.0 \text{ M}\Omega$ 以下のインピーダンスをもつことが望まれている。この条件下を満たし、かつ他の特性（応答性など）をも満足させる方法として、セラミックス自体の物性を改変することが考えられた。

超イオン導電体の1つとして知られる $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_3\text{PO}_{12}$ およびその類似化合物は、空気、湿気に対する安定性にすぐれ、乾燥状態において $1 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 程度の抵抗をもつ多孔質焼結体が容易に得られる。この場合も、吸湿による抵抗の低下は細孔表面に水の吸着層が形成されることで説明されるが、インピーダンス変化は2けた程度であり、変化量は前述の系に較べると少ない¹⁷⁾。また、高い誘電率をもつ多孔性セラミックス-各種アルカリ塩複合体の利用も考えられている。PLZT*- KH_2PO_4 系の場合、乾燥状態で $1 \text{ M}\Omega$ 、吸湿によるインピーダンス変化は3けた程度である¹⁸⁾。

9. おわりに

多孔質セラミックス湿度センサの感湿能の制御は、現在ではかなり容易になっている。しかしながら、特に実用上問題となる長期安定性、耐環境性、検出確度などに関しては、かなり改善されているものの充分とは言えないのが現状である。今後、これらについての研究、改良を進める必要がある。

文 献

- 1) 清山哲郎, 塩川二郎, 鈴木周一, 笛木和雄編: “化学センサ, その基礎と応用” (講談社, 1982).
- 2) 山香英三編: “ハイテクノロジー・センサ” (三共出版, 1986).
- 3) 片岡照栄, 柴田幸男, 高橋 清, 山崎弘郎編: “センサハンドブック” (培風館, 1986).

* (Pb, La) (Zr, Ti) O_3

- 4) Y. Sadaoka, Y. Sakai, and S. Matsumoto: J. Mat. Sci. **21**, 1269 (1986).
- 5) 定岡芳彦, 酒井義郎: 電気化学 **51**, 437 (1983).
- 6) 定岡芳彦, 酒井義郎: 電気化学 **51**, 879 (1983).
- 7) J. H. Anderson and G. A. Parks: J. Phys. Chem. **72**, 3662 (1968).
- 8) G. K. Rennie and J. Clifford: J. C. S. Faraday Trans. I **73**, 680 (1977).
- 9) W. D. Harkins and G. Jura: J. Am. Chem. Soc. **66**, 919 (1944).
- 10) E. McCafferty and A. C. Zettlemoyer: Dis. Faraday Soc. **52**, 239 (1971); E. McCafferty, V. Pravdic and A. C. Zettlemoyer: Trans. Faraday Soc. **66**, 1720 (1970).
- 11) 戸田盛和: 日本物理学会誌 **7**, 17 (1952).
- 12) J. J. Fripiat, A. Jelli, G. Poncelet and J. André: J. Phys. Chem. **69**, 2185 (1965).
- 13) G. Clement, H. Knözinger, W. Stählin and B. Stübner: J. Phys. Chem. **83**, 1280 (1979).
- 14) 定岡芳彦, 酒井義郎: 電気化学 **53**, 896 (1985).
- 15) Y. Sadaoka and Y. Sakai: J. Mat. Sci. **21**, 3717 (1986).
- 16) Y. Sadaoka and Y. Sakai: J. Mat. Sci. Letters **5**, 565 (1986).
- 17) Y. Sadaoka and Y. Sakai: J. Mat. Sci. **20**, 3027 (1985); 定岡芳彦, 酒井義郎: 電気化学 **53**, 395 (1985).
- 18) Y. Sadaoka, M. Matsuguchi, Y. Sakai, H. Aono, S. Nakayama and H. Kuroshima: J. Mat. Sci. **22**, 3685 (1987).

Book Stand

光 触 媒

窪川 裕, 本多健一, 斉藤泰和 編著
朝倉書店 A5 版 189 頁 3500 円

TiO₂ 半導体電極による光の増感電解が発表されて以後, 光触媒の研究が活発に行われるようになったが, この分野の研究は, 光照射なしでも起こる触媒反応が光により促進される場合などに対して行われるようになったのが端緒であり, 比較的新しい分野でもありまとまった成書は今まではなかった。

本書は, 新しい科学としての“光触媒”の基礎から新しい展開, 将来への応用までを分かりやすく解説するという観点から企画され, 大学3, 4年生および大学院生を対象に書かれている。また, 光触媒の分野が従来, 触媒化学から, 電気化学, 錯体化学と多岐におよぶところから, それぞれの分野の研究者の共著であり, 窪川, 本多, 斉藤の各教授が編者となることにより, とすれば各分野で独立に扱われ易かった現象や反応を, 光触媒の観点から, 統一的に説明するよう配慮がなされている。

構成は, 第1編「固体光触媒」, 第2編「錯体光触媒」と均一, 不均一系の2編に分かれており, 各編は, それぞれ独立に読むことも可能である。

第1編は第1章～9章, 第2編は第1章～5章と基礎から応用までの章がもうけられており, 第1章には, 光化学の概要が述べられているが, 本著の性質上, 読者には, ある程度の光化学, 触媒化学, 電気化学, 錯体化学についての基礎知識が要求される。

第1編の「固体光触媒」では金属酸化物・硫化物の光触媒反応, 半導体光電極反応, 第2編の「錯体光触媒」では, 金属カルボニル錯体など金属錯体のかかわる光触媒反応が中心に述べられているが, 単に事例の説明に留まらず, 光触媒作用の解明にも一章が当てられている(1編8章)。

終章は, いずれも今後の展望に当てられているのが特長であり, CO₂, N₂の固定, 人工光合成への挑戦, C-H結合の活性化などのトピックスは, 光化学を専門としない有機合成, 触媒化学の研究者にも参考となろう。

(福島貴和)