固体の高温放射率測定とスペクトルデータ

小 野 晃*

1. はじめに

有限の温度にあるあらゆる物体は、それ自身の熱的な励起によって放射を出射している。この熱放射は電磁波の一形態であり、空間を光速で伝わり、物質と相互作用して、反射、吸収、散乱などの諸現象が起こる。熱放射の出射もまた、放射と物質との相互作用の結果として起こる。熱放射を定量的に表現するには放射測定におけるのと同様の諸量を用いればよいが、熱放射に関しては黒体放射という普遍的なものがあるので、多くの場合黒体放射を基準にして表現される。

黒体とは、それ自身に入射する放射はすべて吸収しつつ、自らは最大の効率で熱放射を出射しているような仮想的な物体である。黒体が出射する熱放射(黒体放射)の分光分布はプランクの公式によって与えられる。現実の物体は多かれ少かれ黒体とは異なり、出射する熱放射は同じ温度の黒体が出射するそれより必ず弱い。分光放射率は、物体の分光放射輝度と、それと同じ温度にある黒体の分光放射輝度の比で定義されるので、分光放射率は1より小さい正の数値をとる。

黒体は現実の物体としては実在しないが、黒体放射は不透明の物質で空洞を形成することにより近似的に実現できる。いま空洞の開口に外から放射が入射したとする。その放射は空洞の内壁で多数回反射されるうちに壁によって吸収されてしまい、開口から再び外へ出てゆく割合はきわめてわずかである。すなわち空洞の開口は黒体と見なせるので、空洞を一樣な温度に加熱すれば、その開口から出射される放射は黒体放射にきわめて近いものとなる。

* 工業技術院計量研究所主任研究官

High Temperature Emissivity Measurements of Solids and Spectral Data; Akira Ono (National Research Lab. of Metrology, Niihari-gun, Ibaraki)

Keywords: thermal radiative property, emissivity, high temperature, measurement method, spectral data, semi-transparent, metal, insulator, semiconductor

1986年8月15日受理

材料科学という立場から見ると、材料の熱放射性質はその物性と深く関連している。熱放射性質に関する最も基本的な関係はキルヒホッフの法則であり、ある物体の分光放射率 ϵ_λ とその物体の分光吸収率 α_λ は等しい ($\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda$) というものである(黒体は放射率も吸収率もともに1である)。分光吸収率(α_λ)、分光反射率(ρ_λ)、分光透過率(τ_λ)は物質の微視的な構造を強く反映しており、物質それぞれに特徴的なスペクトルを呈する。放射率もまた材料の物性を強く反映したものである。

2. 固体の熱放射性質

(1) 現象論より

放射が媒質中をつたわるときには、放射の反射、吸収、散乱などの現象が起こる。これらの現象に基づいて固体材料を分類することができる。図1はそれを示したものである。

物体はある特定の波長の放射に対して不透明であるか、あるいはある程度透明(半透明)であるかに分けられる。半透明とは、考えている物体の大きさに対して、透過光が考慮しなければならない程度に大きい状況をさす。しかし、物質を半透明体と不透明体とに厳密に区分けできるわけではない。物体が薄くなればより透明になるし、厚くなればより不透明に近づく。また、物体が半透明であるか不透明であるかは放射の波長にもよる。

図1 熱放射性質による固体の現象論的分類。

不透明体では一般に、放射の吸収と反射の過程は物体の表面近くの薄い層だけで決まる。従って物体表面に幾何学的凹凸があれば、反射性質はそれに敏感に影響される。凹凸の代表的長さが放射の波長よりはるかに長ければ放射は拡散的に反射されるし、逆にほかに小さければ放射は鏡面的に反射される。両者が同じ程度のときは、中間的な現象となる。完全拡散反射面として理想的に考えられているのがランベルト反射面である。

半透明体では放射は物体の表面からある程度内部へ(一般に波長のオーダーよりもはるかに深く)入りこむ。従って放射の反射、吸収、透過、散乱といった現象は物体の表面層だけでなく、内部の構造にも依存する。固体内部に波長のオーダーよりも大きい構造の乱れがあると、物体内で放射の散乱が起こる。このような物体を散乱性の物体という。これにたいして波長のオーダーで一様な媒質と考えられるような物体では散乱は起こらない。これらを非散乱性の物体という。

(2) 物性論的より

放射と物質との相互作用は微視的な立場から光学物性論によって説明することができる。熱放射の波長領域(可視域から赤外域)で重要なものは固体中の電子と格子振動である。

固体中の電子は連続的なエネルギーレベル(エネルギーバンド)をとることができ、異なったエネルギーレベルの間を電子が遷移することによって、放射の吸収と出射が行われる。固体の電子的性質は主として電子のバンド構造によって決定され、おおまかに固体は金属と絶縁体に分れる。金属中の電子は自由に運動できるという意味で自由電子とよばれる。自由電子が金属の熱放射性質を特徴づけており、どの金属も赤外域できわめて小さい放射率となっている。

絶縁体の電子のバンド構造は、価電子帯と伝導帯とがバンドギャップによって明確に分れており、伝導帯には自由に動ける電子がなく、一方、価電子帯には電子が充填しているためいずれの電子も自由に動ける余地がない。従ってバンドギャップに対応した吸収端より短波長側(フォトンエネルギーが高い側)ではバンド間遷移により強い吸収が起こり、放射率も高い値を示すが、吸収端より長波長側では電子遷移は起こらず透明になり、放射率もゼロとなる。

半導体では、バンドギャップは存在するがそれが狭いため、ある割合の電子が熱的な原因でバンドギャップを越えて価電子帯から伝導帯へ励起され、そのかわり価電子帯には電子のぬけた孔であるホール(正孔)ができる。これらが電気伝導に寄与し、半導体の電気的性質を決定する。しかし光学物性という面では半導体と絶縁体のあいだに明確な区別はなく、どちらも吸収端よりも短波長

側では急激に吸収が増加し、長波長側では透明となる。

固体中のイオンの力学的振動(格子振動という)は放射と強い相互作用を行う。格子振動を量子化したものはフォノンとよばれ、フォノンは固体中で連続的なエネルギーレベルをとる(バンド構造をもつ)。特定のエネルギーのフォノンの生成と消滅により、対応したエネルギーの放射の吸収と出射が行われる。格子振動によるスペクトルは通常、絶縁体や半導体の電子的には透明な赤外領域において顕著に見出される。

3. 測定法

放射率の測定法には、放射測定法、反射測定法、熱量法があるが、ここでは高温においてスペクトルデータを取得することを目的として、放射測定法に話を限定することにする。放射測定法は、試料の放射輝度と参照黒体の放射輝度の比を測定することによって放射率を得る方法である。この原理に従って放射率測定を実行するときは、3つの基本的条件が満足されていなければならない。

第1の条件は、試料(表面)と参照黒体とは十分な精度で同じ温度に保持されるべきことであり、等温条件とよぶ。第2の条件は黒体条件とよぶべきもので、参照黒体の実効放射率がきわめて1に近い、もし1より小さいならばその値自身が正確に知られていなければならない。

第3の条件は、試料の孤立条件である。試料の周囲の物体が発した熱放射が試料表面に入射し、その反射成分が検出器に混入することがある。本来、検出器は試料が発する放射だけを検知すべきであり(試料が孤立していればその条件は自動的に満たされる)、もし混入があるならばその影響を評価し、適切な補正をしなければならない。

放射測定によって熱放射性質を得ようとするときには、どのような形態で参照黒体を準備するかに従って測定法は分離黒体法、組込黒体法、補助黒体法、反射鏡黒体法、試料移動法などに分類できる⁽¹⁾。ここでは基本的な分離黒体法と組込黒体法を述べる。

(1) 分離黒体法

分離黒体法概念を図2に示す。参照黒体と試料とは空間的に分離されており、それぞれの温度は熱電対などの何らかの温度計で測る。参照黒体の温度を試料の表面温度と等しくするように制御する。この方法の長所は、実効放射率が十分1に近い参照黒体が比較的容易に得られることであり、普通、表面を黒化した金属や黒鉛など放射率の高い材料で空洞を形成する。空洞の温度は十分に一樣になるように工夫する必要がある。

試料の加熱方法としては例えば図3(a)と(b)に示したものが考えられる。試料が鏡面的な不透明体である

図2 分離黒体法による放射率測定概念.

図3 分離黒体法における試料の加熱方法. (a)は鏡面的不透明体および非散乱性半透明体に対して. (b)は拡散的不透明体に対して. 斜線部は試料.

ならば(a)のように試料を電気炉の奥深く置いても、試料を垂直方向から図のように観測すれば、炉壁からの放射が試料表面で反射されて観測方向に混入することはない(試料の孤立条件が満たされる)。試料を電気炉中の温度分布が一樣な場所に置くことができるから、試料の温度は熱電対などの接触式温度計を用いて精度よく測定することができる。

一方、試料が拡散的な反射成分をもつ不透明体のときは、試料の孤立条件を満たすために図3(b)のように試料を電気炉の一端にまで出さなければならない。拡散的な反射成分をもつ試料は、自分自身の面が半空間から放射の照射を受けてはならないからである。このような状況では試料は自分自身が熱放射を出すだけで前方から放射を受けとることがないので、試料の中には裏面から表面に向って大きな熱流束を生じる。特に試料が熱の不良導体であるときは試料の中に大きな温度勾配が生じる。一般に精度の高い表面温度測定はむずかしいが、大きな温度勾配がある場合にはより困難になる。高温においては放射による熱流束が急激に増大するので、この困難はよりきびしくなる。

分離黒体法はあまり高くない温度で(めやすとして1270 K(1000°C)以下で)、金属など熱の良導体に対して

最も多用される標準的な測定法である。

(2) 組込黒体法

組込黒体法は、試料と参照黒体の等温条件を確保するために、参照黒体を試料のごく近傍に一体として(ときには試料自身の内部に)組み込んでしまうものである。代表的な例は試料の表面に小さな穴を掘り、その穴を参照黒体として利用する方法で図4(a)に概略を示す。穴のすぐ近傍の平らな表面を「試料面」として観測する。「試料面」と「穴」とがほぼ同じ温度であるとみなして両者の放射輝度の比を測定して放射率を求める。

試料の放射率は必ずしも高いとは限らない。放射率が低い材料で形成した空洞の実効放射率を1に近づけるためにはより深い空洞を掘ればよいが、試料中に裏面から表面に向かって大きな熱流束(従って大きな温度勾配)がある場合には「試料面」と「参照黒体底部」との間に無視しえない温度差が生ずることに注意しなければならない。普通、深さ対直径の比が2~3の、底が円錐形の円筒空洞を形成する。この方法で2270 K(2000°C)を越えるきわめて高い温度に至るまで、耐熱金属やセラミックスの放射率が測定されている。

試料が導電性で直接通電加熱ができる場合には、図4(b)に示した方法が適用できる。試料とすべき材料を用いて薄肉の細長いチューブを作り、その中央付近に小さ

図4 組込黒体法による不透明体の放射率測定の例. (a)参照黒体空洞を試料面に掘る. (b)チューブ状の金属試料に横穴を開け、参照黒体とする.

図5 組込黒体法による非散乱性半透明体の放射率および反射率測定概念図. 1は試料, 2は高温参照黒体, 3は貫通孔, 4は低温参照黒体.

な横穴を開ける。チューブの両端を例えば水冷した電極でクランプし、直接通電加熱すれば、チューブの中央一帯に温度が一樣な領域が実現される。横穴とチューブの中空部分とで形成される空洞を参照黒体として利用し、横穴のごく近傍のチューブ表面を「試料面」とする。

図5は非散乱性の半透明体のための測定法の概念図である。1は半透明の板状試料であり、背後の斜線部は試料と同じ温度に加熱される金属あるいはグラファイトで、2は高温参照黒体空洞、3は貫通孔である。さらにそれらの後方に低温(普通室温の)黒体を置く。放射計で前方から4つの標的の分光放射輝度の比を測定する。第1の標的は背後に高温参照黒体がある半透明試料、第2の標的は貫通孔を通して後方に低温参照黒体がある半透明試料、第3の標的は高温参照黒体である。また図には示していないが、放射計は第4の標的として低温参照黒体を直接観測する。

第1の標的からは、試料自身が出射する放射と、背後の高温参照黒体から出射され、さらに試料を透過してくる放射との和($\varepsilon_\lambda + \tau_\lambda$)が観測される。 $\varepsilon_\lambda + \tau_\lambda + \rho_\lambda = 1$ という関係から、第1の標的からは $(1 - \rho_\lambda)$ が得られる。第2の標的からは試料自身から出射される放射だけが観測されるので、 ε_λ すなわち α_λ が得られる。表面が平滑な板状試料の場合放射が2つの表面の間で多重反射するのでその効果を考慮し、表面1つ当りの表面反射率と内部透過率が求まる。表面反射率と内部透過率とからさらに吸収係数や光学定数(屈折率と消衰係数)が得られる。この測定法の特徴の1つは、高温における光学定数が単一の実験から決定できるということにある。

図6は半透明試料と高温参照黒体の実際の配置の一例⁽²⁾で、(a)は正面図、(b)は横方向の断面図である。

図6 組込黒体法による非散乱性半透明体の放射率と反射率測定における試料と高温参照黒体の配置の一例⁽²⁾。

板状試料をニッケル製の試料ホルダーに挟み込む。ホルダーには3つの空洞と1つの貫通孔が形成され、その表面は酸化により黒化されている。試料とそのホルダーは耐熱金属チューブのなかに設置され、金属チューブを直接通電して試料と参照黒体とを同じ温度に加熱する。参照黒体用の空洞の直径は1.6 mm、加熱用金属チューブの内径は10.5 mmであり、厚さ3 mmまでの試料を測定できる。

4. スペクトルデータ

(1) 金 属

高温における分光放射率が最も詳細に測定された金属はタングステンである。それは、多くの電球のフィラメントやリボンがタングステン製であり、さらに高温と分光放射輝度の標準が今もってタングステンリボン電球によって維持され、供給されていることによる。図7は研磨したフィラメント状およびリボン状のタングステンのきわめて高い温度における垂直分光放射率である⁽³⁾。これらのデータは図4(b)に示した組込黒体法によって測定されたものである。垂直分光放射率は可視域で高く、波長が長くなるにつれて低くなって赤外域では極めて低い値をとる。低い温度の時は高い温度の時よりもこの傾向がより顕著である。

タングステンに見られるこの傾向は金属一般に対して共通的である。赤外域で放射率が低いことは金属中の自由電子によってよく説明される(ドルーデの理論)。特に長波長域では垂直分光放射率はハーゲン-ルーベンスの公式によってよく表される。可視域での高い放射率は電子のバンド間遷移による。金属が可視域で固有の色を持つように、垂直分光放射率も可視域でそれぞれの金属に特有のスペクトルを持つ。鉄、ニッケル、クロム、コバルト、ステンレススチールなどの耐熱金属⁽⁴⁾⁽⁵⁾や、それらの溶融状態⁽⁶⁾に対して垂直分光放射率の測定が行わ

図7 タングステンの垂直分光放射率⁽³⁾。

れ、古典分散式による解析が行われている。

(2) 絶 縁 体

酸化物などに代表される絶縁体は高温によく耐えるので、近年ファインセラミックスとして開発のテンポが著しい。図 8 (a)と(b)はそれぞれ熔融石英の 1273 K(1000 °C)における垂直分光放射率と垂直分光反射率を示す⁽⁷⁾。試料は 1.54 mm および 3.20 mm の厚さの 2 種で、どちらも光学用の材質で非散乱性である。この測定は図 5 に示す測定法に従って図 6 の実験配置で行われたものである。

垂直分光放射率は可視域から波長 2 μm ではほとんどゼロであり、これは熔融石英の透明な領域に対応する。2.2 μm における小さなピークと 2.7 μm における大きなピークは熔融石英中に不純物として入っている OH 基によるものである。3 μm を越えるあたりから垂直分光放射率は急峻に立ち上る。熔融石英の場合 2 μm から 4 μm あたりまでが半透明な波長領域である。5 μm から 7 μm まではきわめて高い(0.98 程度の)垂直分光放射率を維持し、続いて 9 μm に鋭い谷を持つ放射率が低い領域が現われる。

垂直分光反射率は可視域から 3.5 μm あたりまではゆるやかに変化しつつも、0.05 あるいはそれ以下の低い値を示す。3.5 μm 付近からはそれより短波長側と比べて反射率が一段と低くなっている。これは 3.5 μm より

図 8 熔融石英の熱放射性質。(a)は垂直分光放射率、(b)は垂直分光反射率⁽⁷⁾。

長波長側では吸収が強くなるため、裏面からの反射の効果がなくなり、表面からだけの反射になるためである。垂直分光反射率の値はさらに長波長側に向って低くなり、7 μm 付近では 0.01 程度の最低値をとる。5 μm を越える波長域では、垂直分光放射率と垂直分光反射率の和は実験誤差内で 1 に等しく、熔融石英はこの波長領域で完全に不透明と考えてよい。このような垂直分光放射率と垂直分光反射率はこの波長領域で連動している。垂直分光放射率は 9 μm 付近に鋭いピークを持つが、これは熔融石英の格子振動に起因する。

図 8 のデータから表面反射率と内部透過率が求まり、さらに半透明領域での消衰係数と屈折率が得られる。それを図 9 (a)と(b)に示す。

図 9 熔融石英の光学定数⁽⁷⁾。(a)は消衰係数、(b)は屈折率、曲線は他の文献値を示す。

(3) 半 導 体

図 10 はシリコンの垂直分光透過率を示す⁽³⁾。カーブ 1 と 4 は室温におけるデータ、カーブ 6, 7, 8 はそれぞれ 473 K(200 °C), 573 K(300 °C), 673 K(400 °C)におけるデータである。シリコンのバンドギャップは室温で 1.09 eV[†]であり、これは 1.2 μm の吸収端に対応する。これより短波長側では急激に不透明になる。10 μm 付近から長波長側にかけての構造は不純物によるもので、その種類によって異なる。

図 11 はシリコンの垂直分光反射率を示す⁽³⁾。可視お

[†] 1 eV $\approx$ 1.6×10^{-19} J

図 10 シリコンの垂直分光透過率⁽³⁾ 図 11 シリコンの垂直分光反射率⁽³⁾ 図 12 シリコンの 1273 K (1000°C) における熱放射性質⁽⁷⁾. (a)は垂直分光放射率, (b)は垂直分光反射率.

よび紫外域では、強いバンド間遷移を反映して反射率が高くなっている。赤外域の反射スペクトルはやや複雑になっているが、不純物が少ないシリコンでは $10 \mu\text{m}$ を越える領域まで目立った構造はない。不純物が多いシリコンでは $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 帯に構造が現れている。

シリコンの垂直分光放射率のデータは主として常温から 470 K (200°C) 程度の温度範囲に限られていたが、その温度範囲では放射率が温度によって目立って変化するということはない⁽³⁾。一方、最近 1273 K (1000°C) で放射率と反射率の測定が行われ、興味ある結果が得られている⁽⁸⁾。図 12(a)と(b)は、厚さ 1 mm のシリコンの 1273 K における垂直分光放射率と垂直分光反射率であり、図 6 の実験配置で測定されたものである。スペクトルとしては特徴のないものになっているが、放射率は可視域から $13 \mu\text{m}$ まではほぼ 0.7 で一定であり、反射率も同じ波長域ではほぼ 0.3 で一定である。放射率と反射率の和は測定精度以内で 1 であり、透過率はこの波長全域でゼロとみなしてよい。

図 10 に見るように室温ではシリコンは $1 \mu\text{m}$ より長い波長域で透明であるが、温度が上がるにつれて透過率が低下して行く。この傾向は、 1273 K で完全に不透明となることと符合する。一方反射率がほぼ 0.3 で一定であることは、図 11 とおおむね一致する。これは、消衰係数がそれほど大きくなく、不透明になっても消衰係数が反射率に顕著な影響を与えないものと解釈される。温度の上昇にともなう透過率の低下と放射率の増加は、熱的に励起された伝導電子と正孔によるものと推測されるが、詳しい解析はまだない。中間の温度での放射率測定が望まれる。ゲルマニウムに対してもシリコンと同様に、温度上昇とともに透過率の低下が起こっている⁽³⁾。

5. データベース

放射率データの収集・蓄積・評価・普及は現在満足すべき状態にない。ほとんどのデータブックは特定の一、二の波長における垂直分光放射率あるいは半球全放射率の値を示しているのみで、スペクトルに関する情報はほとんど抜け落ちてしまっている。現在スペクトルデータを含んで利用できるほとんど唯一のデータブックは TPRC データシリーズの Vol.7, 8, 9, Thermal Radiative Properties である⁽³⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。金属、非金属、コーティングにわけて各巻を構成し、スペクトルの形で情報を提供している。試料のキャラクタリゼーションや測定精度なども極力記しており、原典も示されている。またある程度の解析と評価も行っている(データブックという印刷物の形態ゆえに、データの更新には多大の費用がかかる。1972 年の初版以来、1986 年現在まで改訂版は出版されていない。)

清浄で平滑な表面をもつ材料の光学定数や吸収係数、透過率、反射率を集めたものとしては国内に「分光学的性質を主とした基礎物性図表」⁽¹¹⁾がある。約 100 種の固体材料を扱っているが、すべてバルクとしての性質であり、表面状態は清浄で平滑なものに限られている。また温度域も室温付近がほとんどである。

収録されている材料の種類はより少ないが、測定法も含めて固体の光学定数を詳述しているのが Handbook of Optical Constants of Solids⁽¹²⁾である。金属元素 12 種、半導体 14 種、絶縁体 12 種について極めて詳細なスペクトルデータを収録している。光学定数のデータはほとんどが室温におけるもので、高温のデータは乏しい。

このほか物質名、状態名、温度範囲、熱放射性質名を入力することにより、原文献が引けるコンピュータデータベースが米国バデュー大学 CINDAS(Center for Information and Numerical Data Analysis and Synthesis)にあり、有料で利用できる。このデータベースは書籍としても出版されており、1900 年から 1980 年までの文献を網羅している⁽¹³⁾。

6. お わ り に

放射率は熱工学や温度計測の応用分野で広く活用されている物性値であり、例えば金属プロセス、ガラスプロセス、半導体プロセス、宇宙開発、エネルギー技術などで緊急の課題を抱えている。またいろいろな新材料の開発のなかで、熱放射性質は基本的性質の 1 つとして重要

である。また従来からの材料についても必ずしも満足できるデータが得られている訳ではない。測定技術、データの分析と評価、データベースの構築といったいろいろな側面で今後一層の研究が必要と思われる。

文 献

- (1) 小野 晃：第 6 回日本熱物性シンポジウム論文集，日本熱物性研究会，(1985)，245。
- (2) A.Ono, V.H.Myers and D.P.DeWitt：第 3 回日本熱物性シンポジウム論文集，日本熱物性研究会，(1982)，109。
- (3) Y.S.Touloukian and D.P.DeWitt：Thermal Radiative Properties, Metallic Elements and Alloys, Thermophysical Properties of Matter Vol.7, IFI/Plenum, New York, (1970)。
- (4) 牧野俊郎，川崎博也，国友 孟：日本機械学会論文集，47-421 B(1981)，1818。
- (5) 牧野俊郎，国友 孟，森 敏樹：日本機械学会論文集，49-441 B(1983)，1040。
- (6) 牧野俊郎，長谷川宏幸，成宮祥介，松田昌平，国友 孟：日本機械学会論文集，50-459 B(1984)，2655。
- (7) V.H.Myers, A.Ono and D.P.DeWitt：AIAA-83-1500, AIAA 18th Thermophysics Conference, AIAA New York, (1983)。
- (8) V.H.Myers：Master Thesis, School of Mechanical Engineering, Purdue University, (May, 1983), p.85, 86。
- (9) Y.S.Touloukian and D.P.DeWitt：Thermal Radiative Properties, Nonmetallic Solids, Thermophysical Properties of Matter Vol.8, IFI/Plenum, New York, (1972)。
- (10) Y.S.Touloukian, D.P.DeWitt and R.S.Hernicz：Thermal Radiative Properties, Coatings, Thermophysical Properties of Matter Vol.9, IFI/Plenum, New York, (1972)。
- (11) 工藤恵栄：分光学的性質を主とした基礎物性図表，共立出版，(1972)。
- (12) E.D.Palik：Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press, (1985)。
- (13) J.F.Chaney, V.Ramdas, C.R.Rodriguez and M.H.Wu：Thermophysical Properties Research Literature Retrieval Guide, 1900-1980, Vol.1-7, IFI/Plenum, New York, (1982)。

<新 刊 案 内>

プロセス用キルン

(社)日本粉体工業技術協会 編

金属製錬，窯業，化学工業などで古くから用いられているキルンは，これまで伝熱工学や反応装置工学の分野で研究，体系化されてきた。しかしキルンの操作および設計には粉体の問題が深くかかわっており，粉体工学の立場から見直す必要にせまられている。さらに最近では新素材の製造や環境装置へ応用も図られ，加熱方法や雰囲気条件も多様化している。本書はこのような背景のもとに企画されたもので，粉体を取り扱うプロセス装置としてのキルンの基礎，設計，応用の 3 つが体系的に記述されている。(I)の基礎編では粉体の充填モデル，充填層の力学，粉体の流動における移動層および流動層，回転円筒内における流動，混合および偏析，気体の流通，伝熱，物質移動，焼結，粉体反応などキルンプロセスにおける粉体の挙動に焦点を当てて解説されている。(II)の実用編ではキルンにおける移動層の形式選定と流動層の設定条件，基本設計の進め方，ロータリーキルンにおける設計・計算

例，粉体特性や熱特性および反応速度の評価法，燃焼装置や種々の加熱方式，熱交換器，送排風設備，構造設計，耐火物，保温材などの周辺技術について解説されている。(III)のプロセス編では，製鉄プロセス，石炭ガス化炉および石炭液化炉などの石炭利用プロセス，セメント・石灰の製造プロセスなどキルンの具体的応用例，焼却装置や油化・ガス化装置などの環境装置への応用例が紹介されている。最後にキルン技術の新領域への展開として，ファインセラミックス粉末の製造，廃棄物処理プロセスなどへの応用例が紹介され，さらに将来の熱源として熱プラズマ，イオンビーム，レーザー光などが言及されている。図表が豊富に用いられ，項目もよく整理されており読み易い。粉体プロセスにたずさわる，あるいはこの方面に興味を持たれている技術者，研究者の方に是非一読を勧めたい。

(R.W.)

[A 5 判 414 頁 1985 年 5,700 円 日刊工業新聞社]