

工業材料とは

1.1 工業材料の 4 群

主に工業（industry）または技術業（engineering）で各種生産に用いられる固体材料を、工業材料（engineering materials）という。

通例、天然資源（natural resources）を原材料（raw materials）として採鉱、選別、製錬などの手法で抽出し、使いやすい形状に製造した板や棒線などを意味する。天然資源には、有用な金属を抽出できる鉱石（ore）、セラミックスなどの生産に用いる鉱物、プラスチックの生産に用いる重油などがある。

工業材料は、それを所望の形状に成形加工することによって、機械・構造などの部材（member）として、また様々な製品の部品（parts）や要素（element）として用いられるところから、素材ともいわれる。現代の工業材料は、図 1-1（概念図）に示すように、基本となる構成物質から、金属（metals）、プラスチック（plastics）、セラミックス（ceramics）ならびに複合材料（composites）の 4 群に大別できる。

金属は、便宜的に鉄鋼材料と非鉄材料に分けられ、たいてい複数の元素を含む合金（alloy）になっている。プラスチックは基本的に、高分子鎖が寄りあった有機化合物（organic compound）の集合体で、ゴム、木材なども同類になる。セラミックスは自然界に存在する物質から成るものと新たに合成されたものがあり、無機化合物（inorganic compound）の集合体になる。

複合材料は、コンポジットともいわれ、鉄筋コンクリート、繊維強化プラスチック（FRP）、粒子分散強化金属などの例がある。前 3 者の群内あるいは群間で異種の物質を組み合わせ、主に接着、焼結などを用いて、複機能をもたせた材料、部材、または部品としている。

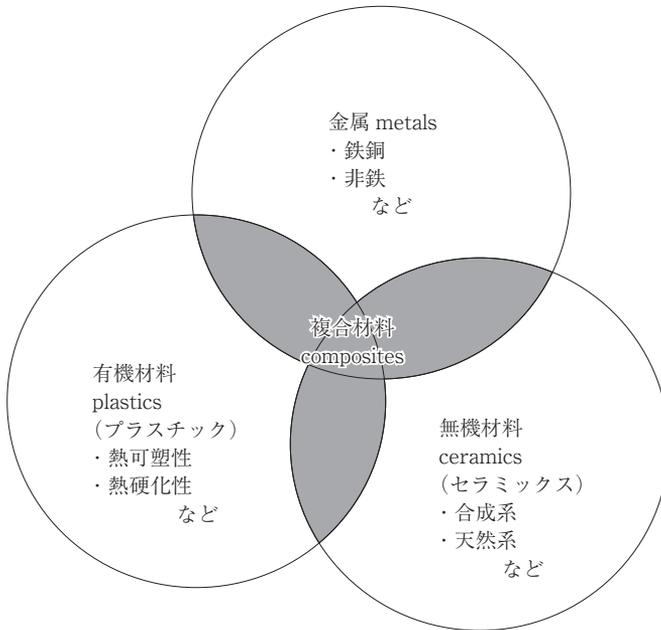


図 1-1 代表的 4 種類の工業材料

1.2 工業材料の包括的特性

1.2.1 金属、プラスチック、セラミックスの主な特性

工業材料は、その性質が生産しようとする製品の性能や部品の特性に適わなければ用いられない。用途は、いわば材料の就職先ということになる。したがって、工業材料は用途によって重視される性質がある。例えば、機械・構造の部材や製品の部品や要素に用いられる金属材料では、強度や延性などの機械的性質がまず重視される。

材料特性には、機械的性質のほかに、物理的性質、化学的性質、電気的性質などがあり、部材が使われる環境によって参照される。金属、プラスチック、

表 1-1 工業材料の3群と主な特性

主構造	結合形態	比重	熱膨張係数 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	熱電気伝導性	引張強さ N/mm^2	その他の特徴	
		結合エネルギー / $\text{Kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$	融点 $^{\circ}\text{C}$	耐熱温度 $^{\circ}\text{C}$	化学的安定性		弾性係数 N/mm^2
金属	純金属	金属結合	2~20	4~40	優	300~3000	金属光沢、不透明、展延性など
	固溶体の多結晶体	70~100	400~2000	200~1300	小	5~ 20×10^4	鉄、アルミニウム、チタン、銅、タングステンなど
セラミックス	化合物の多結晶体	イオン/共有結合	1~5	0~100	劣	1000~20000	透明~不透明、硬脆性、方向性など
		80~3000	800~3500	1800~3000	大	20~ 60×10^4	窒化硅素、炭化硅素、アルミナ、ダイヤモンドなど
プラスチック	分子鎖の非晶質	van der Waals/共有結合	0.9~2	100~250	劣	10~100	透明~不透明、熱変形 など
		2~10	140~350	65~250	大	1~100	ポリエチレン、ポリプロピレン、PET、ABS など

セラミックスそれぞれ様々な種類があるので細部は各論に譲るが、大雑把にそれぞれの群の材料がもつ属性を示すと表 1-1 のようになる。複合材料は、その構成割合によって、これら3者の複合または混合した性質が現れる。

金属の包括的特徴として、元素単体でも存在できること、固体結晶 (Hg を除く)、伝導性 (導体)、光反射 (金属光沢)、金と銅を除いて白っぽい色彩、展延性などが挙げられる。

プラスチックの包括的特徴として、軽量性 (低比重)、耐食性、非伝導性、成形性、複合性などが挙げられる。

セラミックスの包括的特徴として、軽量性 (低比重)、耐熱性、耐食性、非伝導性などが挙げられる。

1.2.2 原子間結合

部材を構成する物質 (material) を考えよう。物質は、つきつめれば原子 (atom) が結合した元素の単体 (simple substance、elementary substance)、分子 (molecule) あるいは化合物 (compound) の集団ということになる。元素 (element) は、それぞれ固有の原子番号 (atomic number) をもち周期表 (periodic table、299 ページ) で固有の位置を占める。原子は、物質の元になる単位で、その固有属性 (300 ページ参照) を変えることはできない。原子間結合と結合体の集合状態は、ある程度人為的に変えられる。

原子間の結合 (atomic bond) は、原子を構成する電子 (electron) とくに外殻電子 (荷電子、valence electron) の働きによる。構成元素の種類、原子間結合方式ならびに結合体の集合方式で、とくに電子の自由度が異なる。そして、物質の基本的性質がほぼ定まる。

どの原子結合でも、金属原子、高分子、無機化合物が結晶または非晶体 (無定形) になり、それが集合して材料 (部材) になるので、その集合形式も実際の部材の性質に大きな影響を与える。

主な原子間結合方式に、金属結合 (metallic bond)、イオン結合 (ionic bond) ならびに共有結合 (covalent bond) がある。そのほかに、ファンデルワールス結合 (van der Waals' bond) と水素結合 (hydrogen bond) があり、稀にその例が見られる。結合体の多くはその原子や分子によって固有の結晶構造をもった物質になる。

表 1-2 に原子間結合形式とその主な物質 (結晶) の結合エネルギー、主な物質、融点、結晶構造、代表的性質を掲げる。結合エネルギーは、金属結合、共有結合、イオン結合の順に大きくなっている。ファンデルワールス結合や水素結合はこれらに比較すると桁違いに小さな値をとり、不安定な結合形式といえる。

(1) 金属結合

金属はこの原子間結合形式をとる。**図 1-2** に、マグネシウムの原子構造と結合状態を示す。Mg 原子核 (atomic nucleus) の軌道 (電子殻、electron

表 1-2 物質（結晶）の原子間結合形式と特性

結合様式	物質	結合エネルギー (kJ/mol)	融点 (K)	結晶構造の 特徴	実際の 結晶構造	性質
金属結合	Na Al Cu Fe W	109 310 339 406 842	370.5 933 1356 1803 3643	・非常に高い 充填率を示 す。 ・配位数が大 さい。 ・対称性の高 い結晶系を とる。 ・相転移する。	体心立方 面心立方 稠密六方	・電気伝導性 ・熱伝導性 ・展延性 ・光沢 ・塑性変形
イオン 結合	CaCl NaCl LiF CuF ₂ Al ₂ O ₃	469 767 1006 2585 15159	919 1074 1143 1633 3773	・正負のイオ ンからなる。 ・かなり等方 的な結合を 示す。	立方晶	・低温では電気伝 導が悪い。 ・高温ではイオン 伝導による良好 な電気伝導性を 示す。 ・へき開する。 ・透明のものもあ る。 ・高融点
共有結合	Ge GaAs Si SiC ダイヤモンド	314 ≈ 314 352 1186 712	1321 1511 1693 2873 3823	・結合が方向 性をもつ。 ・配位数は小 さい。	ダイヤモンド型 閃亜鉛鉱 型	・絶縁体あるいは 半導体。 ・融点が高い。 ・硬脆性
ファン デル ワールス 結合	Ne Ar CH ₄ Kr Cl ₂	2.5 7.5 10 12 31	24.3 83.6 89 116 170	・最密構造 ・配位数が大 さい。	面心立方 正方晶 稠密六方	・融点・沸点が低 い。 ・電氣的絶縁性が ある。 ・軟らかい。 ・圧縮性が大きい。
水素結合	HF H ₂ O	29 50	181 273			・ファンデルワ ールス結合の場合 より高融点。 ・多くの分子の多 重化傾向。

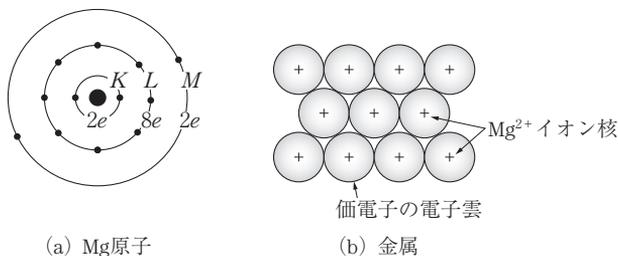


図 1-2 マグネシウムの金属結合

shell) を電子 (electron) が気ままに周回している。もっとも外側の電子を、原子荷電子 (valence electron) または単に荷電子という。

Mg 原子どうしが結合するとき、Mg は Mg^{2+} イオンになり、解放された荷電子は Mg 原子周りに電子雲 (electron cloud) を形成して結合に寄与する。荷電子は自由電子 (free electron) として、金属中を飛び回る。他の金属でも同様な原子結合をしている。

このように、金属結合では本来個々の原子に属する電子を全体で共有した形になる。電子が全物体内を自由に飛び回れることで、伝導性 (導体)、光反射性 (金属光沢)、腐食性 (さび) などの特徴が現れる。

(2) イオン結合

無機化合物の多くはこの原子間結合方式をとる。荷電子が移動して陽イオン、荷電子を受け入れた原子が陰イオンになり、電気的引力 (クーロン引力) で結合する。

食塩のイオン結合を図 1-3 に示す。構成元素のナトリウムは最外殻に 1 個の荷電子をもち、塩素は最外殻に 7 個の荷電子をもっている。Na は Na^+ イオンになり、放出された荷電子は隣接の Cl の外殻に移ることができる。その結果、Cl は Cl^- イオンとなり 8 個の最外殻電子をもつ。この荷電子の授受が至る所で生じて両者は化合物になる。

セラミックスのイオン結合化合物では、異種の 2 原子が陽または陰イオンになり互いに電氣的に中和をしている。荷電子は隣接の異種原子との間で行き来するだけなので、熱電気絶縁性や耐食性が現れる。