

変形が異なる
「金属」「セラミックス」「高分子」

世の中の材料

金属・セラミックス・高分子(上)

材料の分類

図1



あらゆる物質は力を加えると、形状・容積が変化する。その観点について、「金属」「セラミックス」「高分子」の3材料の物性を比較してみよう。

金属

「金属」は、一般的に多数の原子が規則的に配列しているミクロン(μm)単位の結晶粒の集合体だ。鉄の結晶粒中の原子は、「体心立方構造」という原子の規則配列を持ち、各結晶粒はさまざまな方向を向いて密着し、結晶体を構成している。

通常、常温で力を加えると、あるところまで変形しながらもスプリングのように戻ろうとする力(弾性)が働き、その限界を過ぎると積み重ねたトランプを倒したときのように滑り(グライド)伸びて変形し、元の形には戻らない(塑性)。これを「弾塑性変形」と呼び、金属に特徴的な性質で、鉄の加工性が良いのはこのためだ。

セラミックス

「セラミックス」は、金属と同様に結晶の集合体で、ミクロン単位の結晶粒からできている。粒の間に異なる物質の相(粒界相)が入り込むこともある。一般的に常温で硬く、力を

図2

<p>代表的な結晶構造</p>	<p style="text-align: center;">金属</p> <p>鉄の結晶は立方体の角8カ所と中心に1つ原子がある体心立方構造</p>
<p>材料の内部相</p>	<p>粒界 結晶粒 ~10μm</p>
<p>力と伸びの相関</p>	<p>[降伏強さ] [引張り強さ] くびれ発生 破断 単位面積あたりの力 弾性変形 塑性変形 変形量</p>

世の中の材料は、「金属」「セラミックス」「高分子(ポリマー)」の3つに大別される(図1)。これらの3つの材料は、結晶構造や原子同士の結び付き(化学結合)の違いにより、引っ張りや圧縮に対する変形特性、熱に対する耐久性などが異なる。金属は、硬くて脆いセラミックスと軟らかくて粘りがある高分子の中間的な性質を持つ。今号から2回にわたり、これら3材料の物性の違いを見ながら、最も多く利用されている金属材料鉄を中心に金属の特性を浮き彫りにし、それぞれの特徴を活かした複合材料の可能性を探る。

加えると少し変形した後、わずかな歪みで割れる（脆性）。結晶の滑りが少なく伸びないため破断しやすい。つまり、セラミックスの伸びは「弾性」の範囲に限られることが多い。

例えば、セラミックスに分類される石は非常に硬いが、加わる力が弾性域を超えると脆く割れる。また、セラミック包丁や義歯などに使われるアルミナも、アルミと酸素の原子が六角形に並ぶ複雑な結晶構造で、力を加えても変形しにくい（硬い）性質を持つ（図2）。

高分子材料（ポリマー）

「高分子材料」は、一般的に個々の鎖状分子が集まり糸が配列した硬い結晶部分と、その間にある柔らかい非結晶部分からできている。5～20ナノメートル単位で結晶質と非結晶質が混在し、例えば、炭素と水素の原子が1～4万個くっついて並んだ糸状の分子を持つポリエチレンは、その分子が寄り集まりきれいに並んだところが結晶質で、不規則にバラバラの方向を向いたところが非結晶質になっている（図2）。

非結晶質の部分は柔らかく粘性を持つため、引っ張るとその箇所が伸びて糸の方向が揃い始め、次第に結晶質に変化して全体が硬くなり弾性が生まれる（図3）。柔らかいゴムがあるところまではスーッと伸びて、その後硬くなっていくような現象だ。このように、粘性と弾性を併せ持つ性質を「粘弾性」と呼ぶ。弾性、塑性は長年広く知られていたが、粘弾性はそ

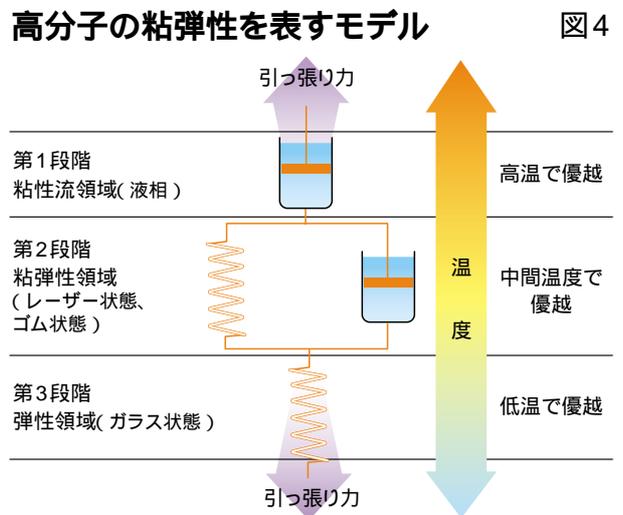
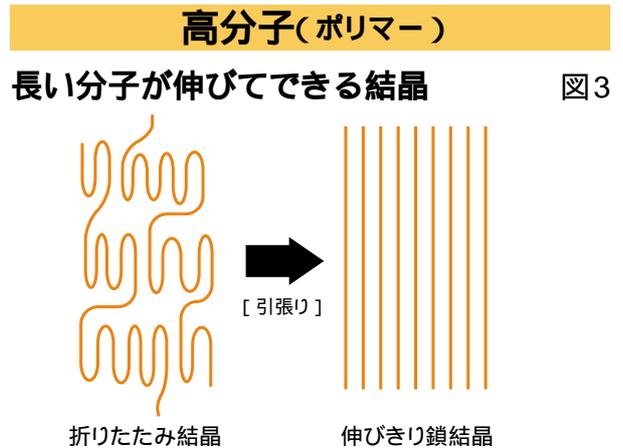
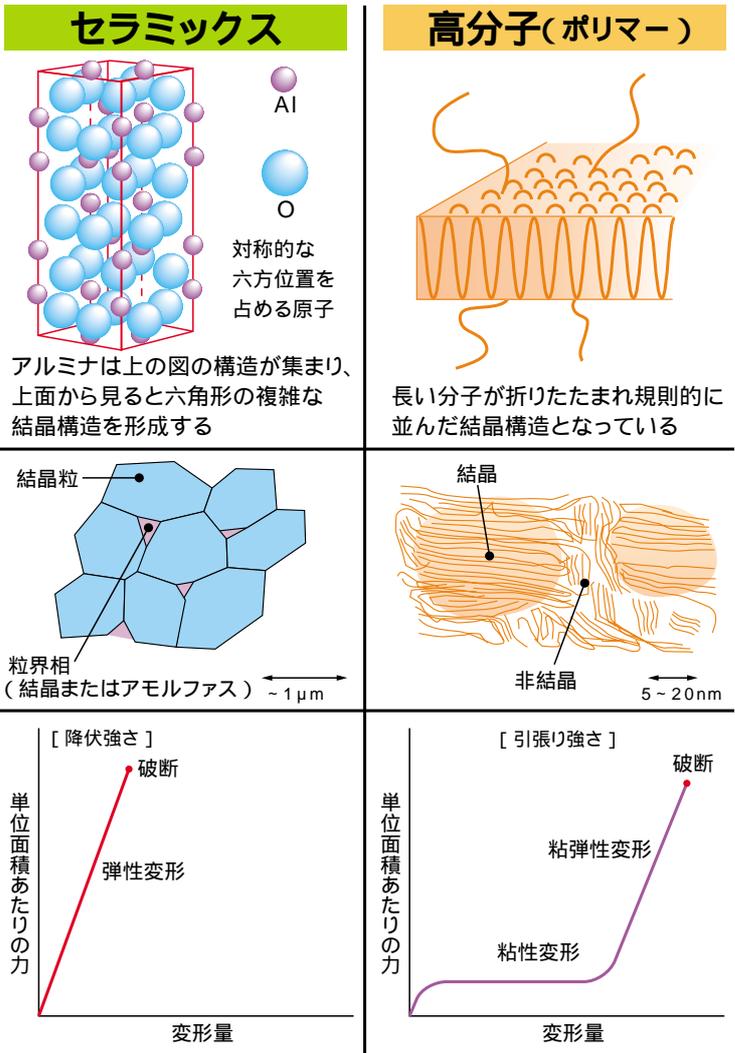
の後の新しい学問領域だと言える。

図4は、粘弾性のメカニズムを表したモデルだ。シリンダ（dash pot）とスプリングを組み合わせたものを引っ張ると、最初は餅のように粘りながら伸び（粘性）餅が伸びきるとスプリングの力（弾性）が働く様子を示している。高分子は一般的に、低温で弾性、高温で粘性、中間温度域で粘弾性を持つ。糸状分子の並び方を変えることで、軟らかいゴムから防弾服などに使われる強い繊維まで作ることができる。

「道具」の歴史を「材料」の面から見てみる。まず硬い石（セラミックス）を、割るなどの加工により道具として使い、石よりも伸びが良く加工しやすい金属が登場して、その後、近代になって、石油を合成してゴム（高分子）を作ることになり成功し、次いでナイロンなどが生まれた。高分子材料が工業化されたのはここ40～50年の出来事だ。

物の性質を決める「化学結合」

「金属」「セラミックス」「高分子」の物性の違いは、原子が結びつく「化学結合」の違いによるところが大きい。化学結合は、分子や結晶中で原子の間を結び付けている力のことで、「金属結合」「イオン結合」「共有結合」の3つの形態に大別される。



金属結合

鉄は、鉄原子同士が結び合った「金属結合」だ。金属元素の原子は、結合する共有電子以外に「価電子()」を放出して正イオンになりやすい。そして、放出した電子が結晶格子間を自由に動くため電気を伝えやすい性質を持つ。ちょうど電子の海の中に、配列した正イオンの骨格が浮かんでいるようなものだ(図5)

セラミックスのイオン結合

セラミックスの多くは「イオン結合」だ。電子を放出しやすい原子と、電子を受け取りやすい原子の間で電子のやり取りが行われ、その結果生じた陽イオン(プラス)と陰イオン(マイナス)の強い力(クーロン力)で引き付け合い、結び付いている。原子は所定の位置に配置し、プラスとマイナスが引き合うため結合力は非常に強い(図5)。

例えばアルミナは、アルミのプラスイオンと酸素のマイナスイオンが結合したものだ。初めはアルミと酸素が引力で引き寄せられ、あるところまでくると安定し、さらに近づくと互いが反発し合って離れようとする。その結果、アルミと酸素の原子間は、原子が安定状態で維持される距離に保たれている。

結合力が強いイオン結合では、押しや引きの力に対する抵抗力が強いため、原子を動かすには大きな力が必要になる。

したがって、材質として硬いが、限界を超えると一気に破断する脆さも持っている。また、イオン結合性の物質は、結合の際に動いた電子もイオンに固定されるので電気伝導性が低い。

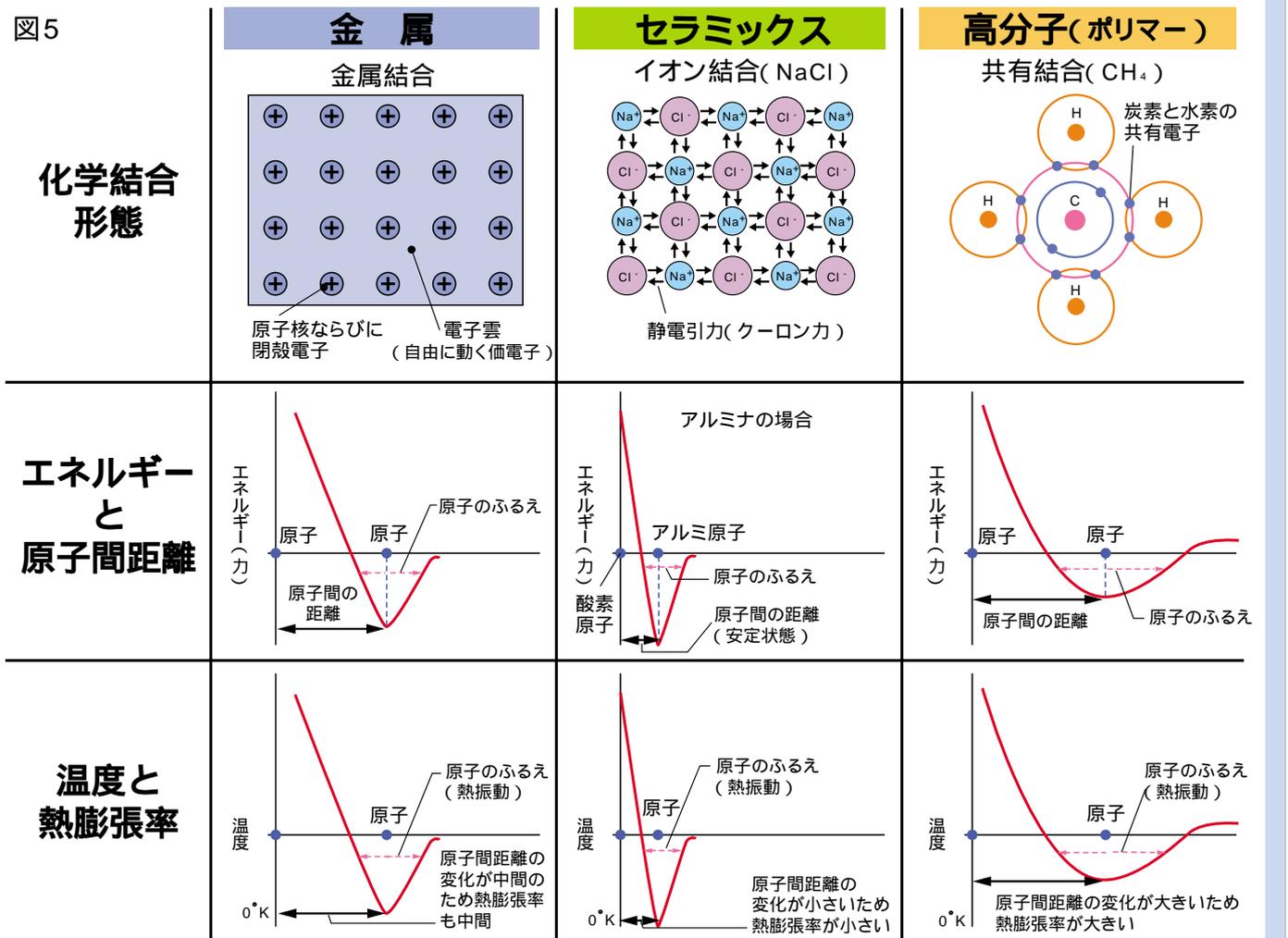
高分子材料の共有結合

高分子材料は「共有結合」だ。共有結合は有機分子などで特徴的に見られ、原子同士が互いの電子を共有することで結び付いている。例えば、2個の原子核(陽子)が2個の電子を共有し結合した水素分子は、そのわかりやすいモデルだ。共有電子による結合のため、非常に緩やかで結び付きは弱い(軟らかい)(図5)。金属結合である鉄原子の結び付きの強さは、イオン結合と共有結合の中間だ。共有電子で結合した高分子は、電子が各原子と強く結び付いているため、自由に移動できず電気伝導性が低い。

図5のグラフは、さまざまなことを表している。例えば、エネルギーを示すグラフの縦軸を温度に置き換え谷底を0度とすると、温度上昇とともにそれぞれの原子の運動が活発になっていく。原子のふるえ(熱振動)が大きくなるとともに、徐々に谷の幅(原子のふるえの距離)が広がる。そして高温になりその挙動が最大になったときに溶融する。

熱膨張率は、温度による原子間距離の変化率を表している。耐火物などに利用されるセラミックスは温度を上げても谷の

図5



グラフの角度が鋭利で深いと、原子が動きにくいいため弾性率が高い。一方角度が大きく浅いと原子が動きやすく弾性率が低い。

価電子：原子がイオンになったり、原子同士が化学結合するときに重要な働きをする最も外側の軌道にある電子。

幅（原子のふるえの距離）の中心があまり変わらない。これは熱膨張率が低いことを意味する。

セラミックスのように谷の角度が鋭利で深いと、中央の谷底の位置があまり変わらず、2つの原子の位置が安定的で動きにくいいため、弾性率が高い。逆に、高分子は熱膨張率が高く弾性率が低く、金属はセラミックスと高分子の中間の性質を持つことがわかる（図5）。このように材料の特性には、力や温度などのエネルギーに対する原子間距離の変化の仕方が大きく影響している。

複合材料「鉄筋コンクリート」 鉄とセラミックスの特長を活かす

このような各材料の特性を組み合わせることで新たな機能を生み出すものを「複合材料」と呼ぶ。その代表例が、金属とセラミックスを複合化させた「鉄筋コンクリート（RC：Reinforced Concrete）」だ。

セメント、石および砂でできているコンクリートは、セラミックスに分類される。圧縮力に強いが、細かい孔があるため引っ張るとすぐに破断してしまう。セラミックスは塑性領域がほとんどなく、少しでも疵が入るとそこから割れる。例えば、宝石は、疵を入れて割ると割れる面（壁開面）が決ま

っているため、きれいな破断面・形状ができる。

これに対して、金属である鉄は、引っ張りに強く伸びもある。塑性領域が大きく、すぐに破断することがないのが金属の特徴だ。また、鉄は引張力だけではなく、圧縮力に対しても耐久性を持つものの、形状が細いと圧縮する前に曲がってしまう。

鉄筋コンクリートは、引っ張りに強い鉄と、圧縮に強いコンクリートの性質を組み合わせることで、耐久性を向上させている。例えば建築物の梁として使用する場合、鉄筋は自重や揺れの力が加わり圧縮力がかかる上面ではなく、引っ張りがかかる下面を守るように入れられる（図6）。

また、鉄は酸には溶けるがアルカリの環境下では腐食せず、耐食性が高い。一方セメントは、カルシア、シリカ、アルミナなどの化合物が主成分で、水と反応すると水酸化カルシウムが生成され、強いアルカリ性を示す。したがって、セメントの中で大気に触れない鉄筋は腐食しにくい。

コンクリートでは、原料のセメントに水を加えて軟らかく粘り気を出し（ゾル）細かい石をコーティングすることで、ゾルが「糊」の役割を果たす。そして、時間とともにゾルがゲル化（固化）して強度を増していく（図7）。

金属とセラミックス、それぞれの長所を活かした鉄筋コンクリートは、優れた特性によって長年活用されてきた。セメントの利用領域を、鉄が広げたとも言える。さらに、流し込んだコンクリートが固まる前に、組み込んだ鉄筋に弾性の範囲内で引張力をかけておき、固まった後それを解き放つことで、ゴムが縮むような力を働かせ、引っ張りへの対応力を強化した「PC鉄筋（Prestressed Concrete）」も登場し、電柱やコンクリート杭などに使用されている（図8）。

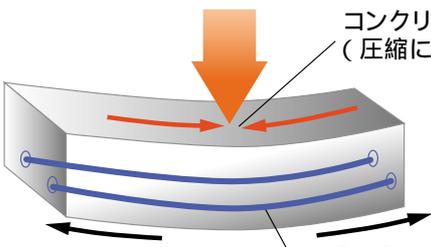
PC鉄筋は、弾性・塑性のメカニズムが詳細に解明され、鋼線自体が高強度・高張力化し、引っ張りに対する耐久性が向上したことなどから実現した技術と言える。この技術により、コンクリートの薄手化も進んだ。

現在、一般的に橋梁などの構造物は、安全性の観点から弾性の範囲までの力で設計されている。コンクリートは弾性域を越えるとすぐに割れるが、鉄の場合はたとえその領域を出ても塑性により伸びてすぐには破断しない。

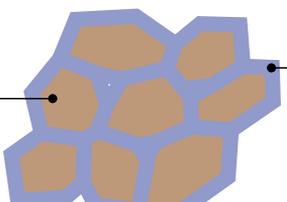
今後、構造物の倒壊を防ぐために、鉄が持つ「塑性」をうまく活かすことは構造物の安全性を向上させる設計上の重要な要素になってくるだろう。もうすでに、建築物においては、この考え方にに基づき、新日鉄が開発したアンボンドブレース（本誌2005年6月号参照）が使用されている。

複合材料「鉄筋コンクリート」

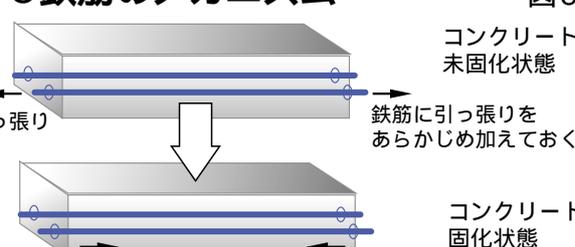
構造と変形挙動 図6



コンクリートの物質的性状 図7



PC鉄筋のメカニズム 図8



引張力から解放すると鉄筋が縮み、コンクリートが圧縮されて強度がさらに高まる。

監修 新日本製鉄(株)フェロー 伊藤 叡 (いとう・さとし)

プロフィール

1946年生まれ、福岡県出身。

1974年入社。2001年よりフェロー(取締役待遇)。

2003年4月より、先端技術研究所長。

1991年：米国ASTM (American Society for Testing and Materials) SAM TOUR Award受賞

1992年：新技術開発財団 市村賞 貢献賞受賞

1998年：鉄鋼協会 西山記念賞受賞

2001年：文部科学大臣賞 科学技術功労者賞受賞

