### モノづくりの原点 科学の世界 VOL.21

# 世の中の材料

─金属・セラミックス・ 高分子(下)



「鉄(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」の中間的性質を持つ。 鉄を基軸に他材料を見渡すことで、鉄の優れた特長 を再認識でき、新たな材料開発への発想が広がる。 シリーズ第2回目は、新日鉄独自の高分子材料開発 から生まれた先端の複合材料と、3大材料の技術的 相乗効果により実現した開発事例を紹介するととも に、今後の材料開発のキーとなる「構造設計」との 融合による「鉄」の新たな可能性を展望する。

## 複合化の妙技 ―「ポリマーアロイ」

新日鉄グループが製造している複合材料には、「炭素繊維強化プラスチック(CFRP)」や「ポリマーアロイ意匠鋼飯」などがある。中でも、新日鉄が独自開発した高分子材料「ポリマーアロイ(O-PET)」は、建材用意匠鋼板(ユニットバスなど)の被覆材として使用され、その用途を広げつつある(**写真1**)。

従来、ユニットバスなどには、鋼板に塩化ビニールのフィルムを接着剤でラミネートしたものが使用されていた。しかし近年、塩化ビニールは焼却時に塩化水素からダイオキシンが発生するため使用されなくなりつつある。

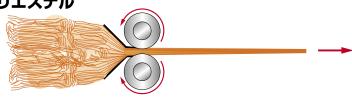
ポリマーアロイは、塩化ビニールを一切使用せず、基本原理から材質設計を行い、地道な研究により到達した新日鉄の独創的開発技術だ。表面がキラキラとオパール色に輝くことから「O-PET (opaline-PET)」と命名された。非塩ビフィルムで、強度、加工性、耐熱性、鋼板との接着性など、被覆材に求められるさまざまな特性を併せ持つ。

新日鉄では以前から、高分子材料を混ぜ合わせ優れた新機能を生み出すシーズ開発に取り組んでいた。その過程で、耐熱性、強度に優れるポリエステル(PET:ペットボトルなどに利用される樹脂)と軟らかいゴムの組み合わせに着目し、ポリエステル中に多くのゴム微粒子をバラバラに混ぜる手法(微細分散)によって、新たな高分子(ポリマーアロイ)を作り出した。

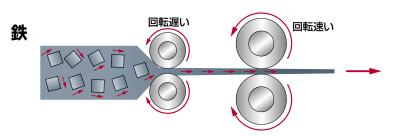
ポリエステルは、ある程度強度は高いが伸びが少なく衝撃 に弱いため、落とすと割れてしまう。衝撃に強くするために は、前号で触れたように、引っ張る(延伸する)ことによって、 バラバラの方向を向いた糸状の分子群の向きを揃え結晶を並 ばせ、硬くして強度を高め、耐衝撃性を向上させる。

現在普及している PET ボトルも、延伸させることで耐衝撃

# ポリエステル延伸と鉄圧延の結晶挙動比較 ポリエステル



ポリエステルは伸びが少なく衝撃に弱いため、延伸して、バラバラの方向を向いた糸状の 分子群の向きを揃え結晶を配列させ、強度を高めている。

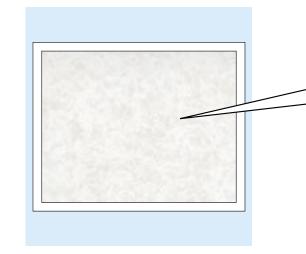


鉄も圧延することによって結晶の向きを揃え、さまざまな性質をコントロールしている。

#### O-PET意匠鋼板

図1

写真1



性を高めている。この原理は鉄の圧延と同じだ。鉄も圧延す ることによって結晶の向きを揃え、さまざまな性質をコント ロールしている (図1)。

しかし、延伸によって糸状の分子が伸びきってしまうとそ れ以上変形できず、加工性が悪くなる。そこで、新日鉄では 耐衝撃性と加工性を両立するため、ポリエステルに100~500 ナノメーター (nm) の非常に小さな粒のゴム (エラストマー) を微細分散させる方法を見出した。

## ナノの世界で"掛け算"の効果を 生み出す

一般的にゴムとポリエステルは溶け合うことがないため、 単に混ぜても微細分散状態にはならない。そこで、特殊な高 分子(相溶化剤)によって微細なゴムの粒をコーティング (カプセル化) し、ポリエステルとの化学親和性(化学的に引 き合う力)を高めた(写真2)。これは洗剤が、分離した油分 と水を微細に混ぜ合わせるのと同じメカニズムだ。

通常、高分子は共有結合のためプラスマイナスの電荷を持 たない (前号参照)。しかし、ポリエステルは炭素、水素、酸 素の共有結合ではあるものの、酸素があるためマイナスの電 荷を持ちやすくイオン的性質がある。一方、ゴムは炭素、水 素だけの共有結合で一切電荷を持つことはない。

そこで電荷を帯びやすい若干イオン化した特殊な高分子を 作り、それでゴムをコーティングすることによりイオン結合 的機能を持たせ、ポリエステルとの化学親和性を高めた。つ まり、このコーティング材はゴムとポリエステルをつなぐ接 着剤のような役割を果たしている(図2)。

この結果、硬くて強いポリエステルが伸びやすいゴムの特 性で衝撃を吸収でき、加工性も保たれる。2つの材料の特性 を緻密に分析し、耐衝撃性と加工性を両立した画期的技術だ。 また、ラミネートする際のポリエステルと鉄の接着性はあま り良くないが、鋼板との接着面に膜状に分配されたこの特殊 な高分子は鉄との接着性も良いため、熱圧着によって直接貼 り合わせることができる (図3)。

このポリマーアロイの開発では、鉄鋼製品の技術開発で培 った、微細な添加物が機能を左右する合金技術の着想が活か された。ハイテンや合金鋼などに用いられるナノメートルオ ーダー (100 ~ 500nm) の微細析出物による強度や耐衝撃性 のコントロールの発想だ。通常2つの物質を混ぜると、その 性質は各物質が持つ性質の"足し算"にしかならない。しかし、 ナノメートルオーダーの世界では、物質の微細分散により"掛 け算"のような性能、効果が表れる。

## 鉄を熟知し、 材料を横断的にみる

鉄の性質を熟知したうえで、横並びで、プラスチックやセラ ミックスなど、さまざまな材料を見る。これはマテリアルサイ エンスにおける重要な考え方だ。新日鉄は、鉄を基盤にしなが ら、幅を出し、新たな機能を追求する材料開発も進めている。

鉄(金属)は、塑性・弾性両方を持ち、また部分的に粘性 的性質など多様な性質を持つ。弾性のみの性質のセラミック ス、「粘弾性」という性質を持つ高分子の性質も包含している ため、鉄鋼材料の開発を基軸に、他の材料を見ることができ るのが大きな強みだ (前号参照)。

さらに、鉄鋼業では高炉などの製鉄設備に耐火物(セラミ ックス)を使用し、コークスをはじめとする石炭化学の領域 で高分子も扱い、新日鉄グループとして、それらの材料技術 開発にも取り組んでいる。そうした側面からも、諸材料に対 する幅広い知識と懐の深さを持つ。

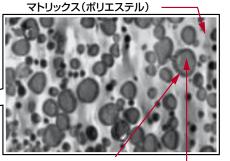
一方、こうした他材料の世界から鉄の世界に戻ると、また 新たな発見がある。その事例を紹介しよう。

鉄が本質的に「結晶質」であるのに対し、高分子やガラス には「非晶質」があることは既に述べた。それでは、鉄の世 界に「非晶質」はないのだろうか。

#### O-PET

#### 基本構造

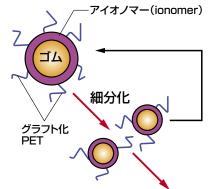
#### 写真2



相溶化剤(カプセル化剤) インパクトモディファイアー(ゴム弾性樹脂)

-般的にゴムとポリエステルは溶け合うことがな いため、特殊な高分子(相溶化剤)によって微細 なゴムの粒をコーティング(カプセル化)し、ポリ エステルとの化学親和性(化学的に引き合う力) を高めている。

#### ゴム粒のコーティング機能 図2



PET母材中に微細分散

特殊な高分子でゴムをコーティングすることで「イ オン結合的機能」を持たせ、ポリエステルとの化 学親和性を高めた。コーティング材はゴムとポリ エステルをつなぐ接着剤のような役割を果たす。

#### 意匠鋼板の構成

図3

二軸延伸PET(保護層) 印刷層 00 鋼板

白色O-PET樹脂層(ベース樹脂層)

鋼板との接着面に膜状に分配された特殊な高 分子は、鉄との接着性も良いため、熱圧着に よって直接貼り合わせることができる。

まず、通常の鉄鋼やセラミックスが結晶質である理由は、 それが最もエネルギー的に安定だからである(図4)。

前号で述べたように、物質の温度を上げていくと原子の振 動振幅が大きくなり、熱膨張する(8・9月号11頁参照)。 さらに高温になると、周囲の原子の束縛なく運動できるよう になる。この温度が固体から液体に変化する「融点」だ。

逆に液体から冷却していくと、融点で原子は配列・再結合 し、構造安定な結晶を構成する。その時、凝固のために熱を 放出する。鉄合金においても、冷却速度を非常に速くすると、 原子は配列・再結合する間もなく、ばらばらの状態のまま凝 固することがある。

このようにして、乱れた原子配列をもつ「非晶質鉄合金」 を作ることが、最近になって可能となってきた。

## 鉄の新たな可能性 **─ 「非晶質 (アモルファス) 鉄合金」**

高分子は非晶質を構成しやすく、金属は構成しにくい。な ぜなら、高分子の構成物質は長い「分子鎖」であるため、液 体からの冷却速度が1℃/秒程度でも、規則的に配列しにく く、非晶質を構成することができるからだ。

それに対し、金属を非晶質にするには、105℃/秒以上とい う速い冷却速度が必要だ。金属の構成単位は小さな原子であ るため、冷却速度を速めないと、すぐに規則的な結晶配列を 構成してしまうのが、その理由だ。

非晶質鉄合金の製造方法には、例えば、冷却用のロール に溶融合金を吹き付け、急速冷却させる方法(単ロール融 液急冷法)や、気体中の原子を高速で基板の上に急速堆積 させる方法(化学蒸着法)などがある。非晶質 Fe 系合金と して使われ始めた磁性箔帯(飽和磁化は劣るが、エネルギ ー損が少ない材料として、高周波用トランス等の鉄心に使 われる箔状の材料)の製造には、単ロール融液急冷法が使 用されている。

非晶質合金は、その原子構造から、転位を媒介とした「す べり」を生じない。そのため、塑性伸びがなく、引っ張り強 度が非常に高い (Fe 系では 3,500MPa 以上 図 4)。薄くて強い 材料として、釣り竿などに用いられる。また、優れた軟磁気 特性を持つ。なぜなら、もともと磁性をもつ(磁性発現)た めには、規則正しい原子配列が不要な上に、結晶磁気異方性、 結晶粒界など磁化の変化を妨げる要因がないからだ。

これまで、「Fe-P-C 合金」「(Fe,Co,Ni)-Si-B 合金」など多く の非晶質鉄合金が提案されている。化学的性質としては、ス テンレス鋼よりも優れた耐食性をもつ「Fe-Cr-P-C 合金」や、 触媒作用を持つ「Fe-Ni 系合金」などがある。これらの非晶 質合金の優れた特性は、非晶質の原子配列が不安定で化学的 に反応(活性)しやすいことに起因している。

一方で、鉄の技術開発で培われたノウハウが、他材料の開 発に活かされるケースは数多い。先述したナノメートルオー ダーでの微細分散はその好例だ。

さらに新日鉄グループでは、液晶や LSI における最先端の 周辺技術も数多く生み出している。その代表例が半導体実装 材料だ。半導体チップと実装基板を接続する「金ボンディン グワイヤ」は、世界的に高いシェアを誇る。ここで用いられ ている技術は鋼線の伸線と同じ原理、メカニズムで、鉄鋼研 究で培ったノウハウが活かされている(図5)。

また、デジタル家電や携帯電話での適用が進む実装材料 「マイクロボール」(写真3)、シリカ・アルミナを使った封止 剤、銅板と高分子を積層した回路基板材料(2層 CCL)など、 新日鉄グループでは鉄を基盤に、セラミックス、高分子を活 用した多彩な材料技術を開発している。

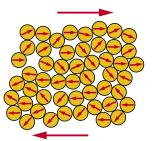
## 形と共に進化する材料 材料を活かす構造設計

セラミックス、高分子の特性を包含する幅広い性質を持つ 鉄は、今後もさらなる進化が期待できる。例えば、鉄の弾塑 性の性質を活かし、圧縮や引っ張りに強い鋼を要求特性に合 わせて作り込むことができる。

鉄の材料技術開発は、構造物などの部材として、個別ニー ズに応じた材質を適材適所に提供していく方向にある。構造

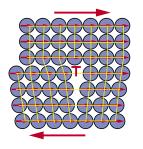
### 原子配列

a) 非晶質(アモルファス)



#### b)結晶質

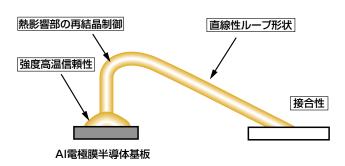
図4



せん断応力下での原子の移動の様子。

- b)では転位(T)を媒介としてすべり面上の原子のみが移動する。
- a)では原子は塊として移動するしかない。

#### ボンディングワイヤに求められる特性 図5



半導体チップと実装基板を接続する「金ボンディングワイヤ」は、 世界的に高いシェアを誇る。用いられている技術は鋼線の伸線と同 じ原理・メカニズムで、鉄鋼研究で培ったノウハウが活かされている。 物に使用する鋼材の全てを高強度化するのではなく、荷重な どの負荷のかかり方に合わせて、適材適所にさまざまな性質 の鋼材を使い分けていくことが構造設計の理想だ。そうする ことで、構造自体の省資源化や解体時の省力化が可能になる。 つまり"作りやすく、使用時には安全で、壊しやすい構造"が、 適切な材料選択によって実現する。

例えば自動車では、解体、リサイクルのしやすさを前提に、 軽量化と安全性を両立する緻密な材料選択と、モジュール化 とも言える部材の構造設計が行われている。衝突安全性につ いては、乗員を包む内部のキャビンを高強度化し、前面など は衝突時のエネルギーを吸収しながら潰れ、乗員への衝撃を 軽減する鋼材(TRIP鋼など)の採用が進んでいる。内部は "石"のように硬く、周りは軟らかく伸びの良い"餅"のよう な構造だ。鉄は、そうした材質を部材ごとに幅広く作り分け ることができる。

こうした材料技術の進展とともに、構造設計自体も変化し ている。例えば、衝突時のエネルギーを吸収しやすくするた め、高強度鋼材に等間隔で凹みをつけ、強度がありながら高 速衝突時には、提灯のジャバラのように均等にエネルギーを 吸収しながら潰れる構造が考案されている。溶接などの技術 的課題はあるが、部材断面を多角形にするとさらにその能力 は高まる (図6)。

また橋梁では、鋼製橋桁として使われるH形鋼の角や平面 に雨水が溜まりやすく、腐食の原因となっていたが、雨水を 下に流れ落ちやすくした船型構造が実用化された。その結果、 橋桁の長寿命化を図ることができるようになった例もある。 現在ではこうした"材料を活かす構造設計"が数多く見られ、 さらに、鉄だけではなくセラミックスや高分子との複合化に より、構造設計の可能性は限りなく広がる。

新日鉄では今後も、鉄を利用する加工研究、構造設計にま で踏み込んで、鉄(金属)はもちろん、セラミックス、高分 子材料など、長年培った幅広い材料知識を活かし、新たな機 能を生み出す材料開発に挑戦していく。また将来、豊富な材 料技術者を抱える日本は、材料開発の分野で先駆的役割を果 たしていくだろう。

## さまざまな材料を"横並び"で見て、 鉄の可能性を広げる

世の中の材料を、鉄を初めとする「金属」「セラミッ クス」及び「高分子」の三つに大別して、横断的に見 てみた。こうしたモノの見方は、従来より「マテリア ルサイエンス (材料科学)」という学問領域を構成して おり、特に近年大いに発達してきたものである。

その結果、それぞれの材料のもつ特徴をより根源的 に明確にするだけでなく、相補的なあわせ技術として の「複合材料技術」や、「電気伝導性高分子材料」「非 晶質鉄合金材料」「電子セラミックス材料」など、従来 では考えられなかった材料の開発を可能としてきたと いえる。

鉄は、金属の中でも、いろいろな相とその変態、炭 素との合金による多くの機械的特性、さらには磁性な ど多くの性質と現象を包含している。したがって、こ れを基軸に他の材料を見渡すことは、鉄の優れた特徴 を再認識するだけでなく、ひるがえって新たな材料開 発への指針と発想を得ることができると考えている。

#### 監修 新日本製鉄(株) フェロー 先端技術研究所長 伊藤 叡 (いとう・さとい)

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

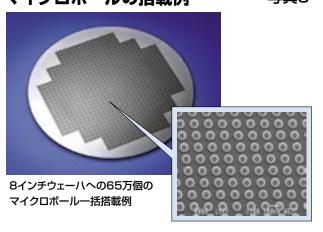


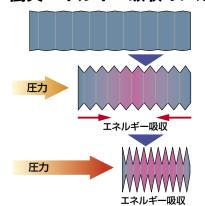
#### マイクロボールの搭載例

#### 写真3

#### 衝突エネルギー吸収のメカニズム

図6





衝突時のエネルギーを吸収 しやすくするため、高強度鋼 材に等間隔で凹みをつけ、 高速衝突時には、提灯のジャ バラのように均等にエネルギ ーを吸収しながら潰れる構造 が考案されている。