



高機能鑄鉄への期待

“鑄物”としての鑄鉄は、はるか古代から作られ、利用されてきた素材である。現在でもさまざまな工業製品に使われているだけでなく、その機能を洗練し、先端の素材としても注目されている。それら高機能鑄鉄の現状と、課題について述べる。

鑄鉄とは何か

鑄鉄は、鋼と同じく鉄と炭素の合金である。鋼に比べて炭素の含有量が高く、金属学上は、炭素含有量(重量比)が2.14～6.67%あるものを鑄鉄とする。ただし実用上は最大4.6%程度までの合金が、特に4.2～4.3%付近を中心に融点が高い(純鉄の融点1530℃に対して、1200℃程度)ため、鑄造に適している。

このため、鑄鉄は鑄造製品(鑄物)の材料として古くから用いられ、その歴史は紀元前まで遡ることができる。鑄型として木型などの原型から転写した砂型を用いる「砂型鑄造」は歴史が古く、現在でも工芸品や少量生産品などに使われる。自

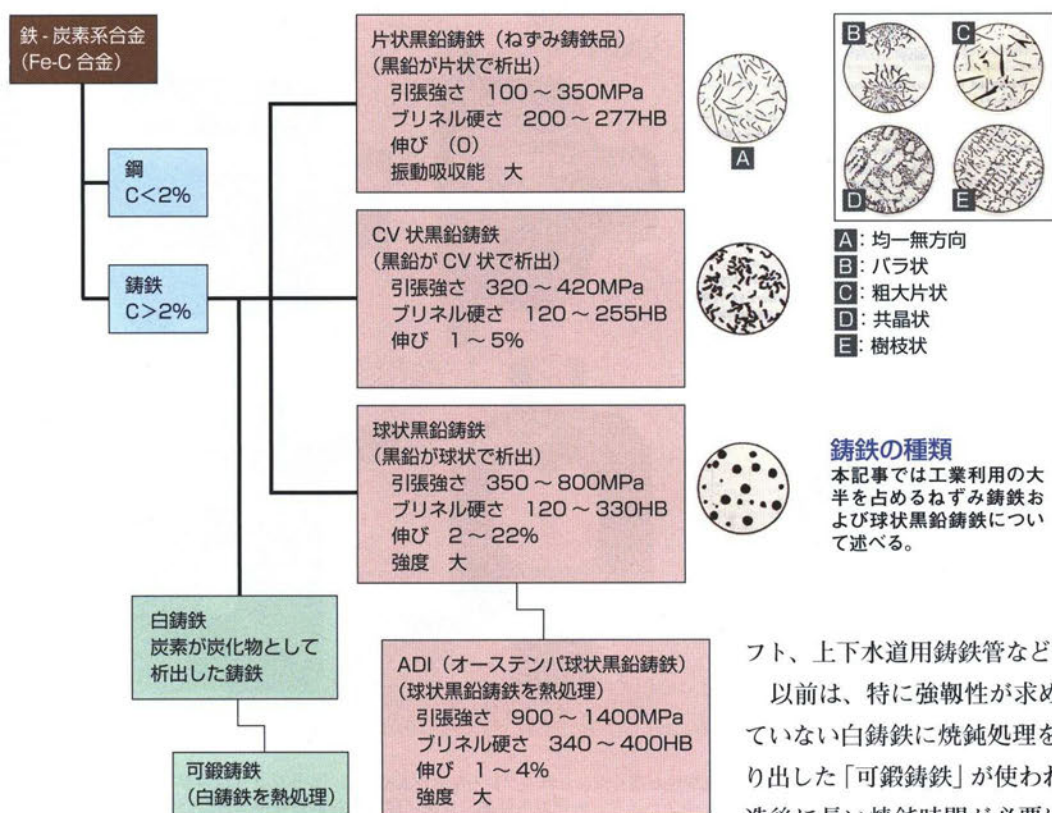
動車用エンジンのシリンダブロックなどの大量生産品には、「金型鑄造」が主に使われる。

鑄鉄は炭素の含有量が高いため、通常は組織内に炭素が黒鉛(グラファイト)の形で析出する。黒色の微細な黒鉛が多量に存在しているために、破断面は肉眼では灰色を呈することになる。その色から、これを「ねずみ鑄鉄」と呼ぶ。

一方、急冷した場合や炭素含有量が比較的低い場合などは、炭素が黒鉛でなく炭化物(セメントライト、 Fe_3C)として析出する。これをチル化と呼ぶ。チル化した鑄鉄は、黒鉛組織がないために破断面が白く、「白鑄鉄」と呼ばれる。

工業的に利用される鑄鉄はほとんどが、黒鉛組織を含むねずみ鑄鉄であり、現在、わが国では年間で約500万トンが製造されている。白鑄鉄は強度は非常に高いものの、その半面もろいため、鉄鋼圧延用のローラー表面など、ごく限られた用途に使われているのみである。

日本国内での鑄鉄の用途は、輸送用機械分野、特に自動車部品としての利用が約50%を占め、その他産業機械や上下水道用鑄鉄管、工芸品などにも使われている。例えばその振動吸収性能に着目し、オーディオ機器用のインシュレーター(アブソーバー)としても用いられるなど、新たな用途も開発されている。



分布しているものが最も好ましい(付図中のA型)。

球状黒鉛鑄鉄は、黒鉛が球状化しているために破断が起きにくく、片状黒鉛鑄鉄に比べ引張強さ、耐衝撃性などに優れる。一方で振動吸収能や熱伝導性、耐摩耗性、鑄造性など、鑄鉄がもともと持つ長所が少なくなる。そのため、片状黒鉛鑄鉄に比べると用途は限定されるものの、その特長を活かして、自動車のクランクシャ

フト、上下水道用鑄鉄管などに使用されている。

以前は、特に強靱性が求められる用途には、黒鉛が析出していない白鑄鉄に焼鈍処理を施すことで微細な黒鉛組織を作り出した「可鍛鑄鉄」が使われていた。しかし可鍛鑄鉄は、鑄造後に長い焼鈍時間が必要になり、コストも高くなる。鑄放しのままで使える低コストの球状黒鉛鑄鉄の製造法が確立されて以降は、ほとんどが球状黒鉛鑄鉄に取って代わられた。

片状黒鉛鑄鉄、球状黒鉛鑄鉄ともに、黒鉛を取り巻く基体組織は、黒鉛に接した部分にできる軟らかいフェライトと、フェライトとセメンタイトの共晶組織である硬いパーライトから成る。鑄鉄に求められる「強さ」にも、「引張強さ」と「耐衝撃性」の2要素があるが、パーライトが多ければ引張強さに優れ、フェライトが多ければ耐衝撃性が向上する。そこで、例えば球状黒鉛鑄鉄の場合、建築資材の継ぎ手など引張強さの必要なものはパーライト組織を多く、上下水道用鑄鉄管のように耐衝撃性が必要なものはフェライト組織を多くしたものをを用いる。

片状黒鉛鑄鉄、球状黒鉛鑄鉄それぞれの特長を列記すると、次のようになる。

【片状黒鉛鑄鉄】

JIS規格での強度(引張強さ)は100~350MPaで脆く、伸びはほぼ0だが、以下のような性能に優れる。

- ・振動吸収性能
- ・切削性
- ・熱伝導性
- ・耐摩耗性
- ・鑄造性

【球状黒鉛鑄鉄】

JIS規格での強度(引張強さ)は350~800MPaで、伸びは2~22%。以下のような性能に優れる。

鑄鉄の組織

ねずみ鑄鉄中の黒鉛は、一般に平たい片状に析出するが、製造条件によっては黒鉛が凝集し塊状や球状を呈する。その黒鉛組織の形態は、片状から球状まで、I型からVI型までに分類される(本号269ページ、堀江皓氏解説の図1参照)。

工業的には、古くからI型(片状黒鉛鑄鉄)が主に使われてきた。しかし、1947年に製造法が確立したことにより、VI型(球状黒鉛鑄鉄、もしくはダクタイル鑄鉄)も利用されるようになってきた。黒鉛が析出するという意味ではVI型も「ねずみ鑄鉄」の一種と考えることができるが、一般に「ねずみ鑄鉄」といった場合にはI型を指し、VI型は「球状黒鉛鑄鉄」と分けて呼ぶことが多い。JISにおいても、片状黒鉛鑄鉄を「ねずみ鑄鉄品」、球状黒鉛鑄鉄を「球状黒鉛鑄鉄品」と規定している。

黒鉛は鉄と比べて、その強度は約20MPaと非常に弱い。析出した黒鉛は、組織内の空洞や割れとほぼ同等の寄与をするため、鑄鉄に力が加わると黒鉛を起点に破断する。これが「鑄鉄は割れやすい」と言われる理由である。

片状黒鉛鑄鉄の黒鉛は、製造条件によって樹枝状に析出したり、大きさにバラツキが出たりすることがある。この形状や大きさが、鑄鉄そのものの強度性能に大きく関わってくる。性能的には、黒鉛片がひとつひとつ独立し、無方向で均一に

片状黒鉛鑄鉄

耐摩耗性、熱伝導性



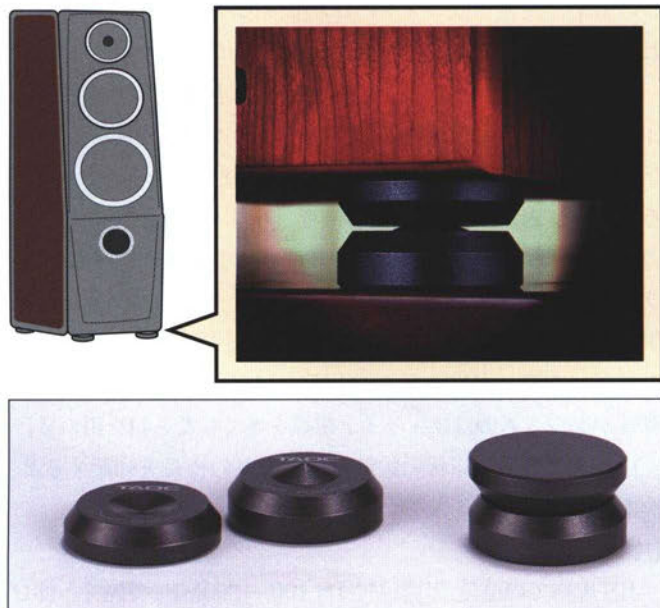
球状黒鉛鑄鉄

強度 (引張強さ)



鑄鉄の特長と適用製品

鑄鉄の利用として最も大きな比率を占める自動車用部品の例。例えば耐摩耗性、熱伝導性が高く求められるブレーキドラムやブレーキディスクローターには片状黒鉛鑄鉄 (ねずみ鑄鉄) が、強度 (引張強さ) が求められるシャフトローターやデファレンシャルケースなどの駆動系部品には主に球状黒鉛鑄鉄が使われている。(アイシン高丘株式会社)



制振性を生かした鑄鉄製品

軟らかい黒鉛組織を多く含むねずみ鑄鉄は、振動吸収性能に優れる。これを利用し、オーディオ用スピーカー装置のインシュレーター (防振用台座) も作られている。この製品では、制振性能を高めるため、特に片状の黒鉛組織を大きくした「高炭素片状黒鉛鑄鉄 (ハイカーボン鑄鉄)」が使われている。(アイシン高丘株式会社)

- ・引張強さ
- ・伸び
- ・耐衝撃性

現在、広く利用されている鑄鉄はほとんどが片状黒鉛鑄鉄

と球状黒鉛鑄鉄だが、最近になって、片状と球状のほぼ中間であるCV鑄鉄 (Compacted Vermicular Graphite Cast Iron、III型) の普及も始まっている。Vermicular (ヴァミキュラ) はイモムシの意味で、黒鉛が小さくイモムシのような形状にまとまっていることから名付けられている。

CV鑄鉄の利用が進んだのは、黒鉛析出の工程管理技術がさらに進んだことにより、意図的に中間状態を作り出すことが容易になったためである。CV鑄鉄は片状ほどではないが熱伝導性と減振性に優れ、強度も比較的高いので、ブレーキ、エンジン部品、エキゾースト・マニホールドなどの自動車部品や制振材料として導入されている。

鑄鉄に期待される「高機能化」

鑄鉄は急冷するほどチル化の度合いが増え、固くもろくなる。このため鑄鉄製品は薄肉化が難しく、「重く、もろい」というのが鑄鉄の最大の欠点となっていた。必要な強度を確保しようとすれば厚く重くなり、軽量化のために薄くすればもろさが露呈してしまうためである。

工業用素材としての鑄鉄の最大の用途となっている自動車では、軽量化が非常に大きなテーマとなっている。一般に、自動車は「重量が1%軽減されれば、燃費も1%向上する」と言

われており、特に原油高が進む現在、軽量化の重要性もさらに増してきているといえる。商用車の場合、軽量化すればその分荷物の積載量を上げることできる。また一方でカーナビゲーションや、ITS (高度道路交通システム) に関連した諸装備など、車の搭載機器もなお増加傾向にあるので、その分の軽量化も必要になる。

自動車の中でも大きな重量比を占めているのが、例えばシリンダブロックなどの駆動系や足回りの鑄造部品である。例えば、20トン車の場合で、シリンダブロックは約380kgある。これらの部品の薄肉化が可能になれば、軽量化の効果は大きい。

単純には、組織内の“割れ”に相当する黒鉛片を少なくすれば強度は上がる。特に片状黒鉛鑄鉄の場合は、黒鉛片の形状が均一・無方向で、しかも1片ごとの大きさが小さいことが望ましい。

しかし単純に黒鉛片を少なくして引張強さを向上させた場合、それに比例して硬さも上がるため、切削加工性が悪くなり、コストが上がるという難点もある。単に強度を上げるだけでなく、加工性を損なわないことも鑄鉄の高機能化における課題のひとつである。すなわち、「チル化させることなく、硬さを抑えつつ引張強さを上げる」に、工業材料としての鑄鉄の可能性をさらに広げる期待がかかっている。

高機能化へのアプローチ

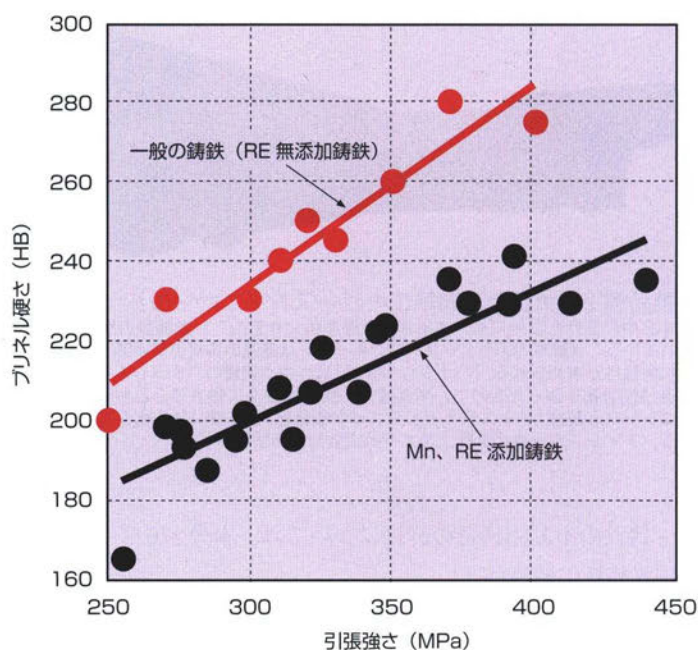
現在行われている高機能化へのアプローチの代表的な例を挙げる。

▼希土類元素添加

片状黒鉛鑄鉄では、単純に黒鉛片を減らして強度を上げると硬さも上がり、加工性が損なわれるという難点がある。しかし、最近の研究により、鑄鉄中に希土類元素 (RE) やマンガンなどの合金元素を加えることで、チル化を抑制しつつ組織を微細化し、高強度でありながら切削性が良好な鑄鉄が得られるようになってきている (グラフ参照)。

従来、チルのない肉厚10mm以下の鑄鉄を製造することは困難といわれてきた。特に球状黒鉛鑄鉄では、片状黒鉛鑄鉄よりもいっそうチル化の傾向が強いため、薄肉化はさらに困難であった。

チル化を抑えつつ薄肉の球状黒鉛鑄鉄を得るには、鑄鉄中の黒鉛粒数を増加することが有効である。そこで、鑄鉄溶湯中に希土類元素を添加し、黒鉛析出の核として作用させる (接種) ことで、薄肉でチルが発生しない強靱な球状黒鉛鑄鉄の開発が進められている。



希土類元素・マンガン添加による強度向上

鑄鉄において、引張強さを上げると硬さも上がるため、加工性が損なわれ脆くなる。しかし希土類元素 (RE)、マンガン (Mn) を添加することで、無添加の鑄鉄に比べブリネル硬度を低く抑えたまま、引張強さを上げることが可能になる。(堀江皓・岩手大学教授)

最近、自動車の衝突時の安全性確保を主目的に、強度の強い高張力鋼 (高マンガン鋼) が自動車ボディ用鋼板として多用されている。このため、車体のプレス工程で発生するスクラップ鋼も、含有マンガン量が増加傾向にある。チル化を促進するマンガンを多く含むスクラップ鋼は、一般的には鑄鉄材料には不適である。しかし希土類元素を添加する場合には、マンガンが逆に鑄鉄を強靱化する働きを助けるため、脱マンガンの必要がない。

希土類元素による鑄鉄のチル化抑制、高マンガン鋼板屑を利用した鑄鉄製造については、本号269ページ、堀江皓氏の解説に詳しい。

▼半凝固鑄造

融解の温度を10℃以内に制御することにより (1150℃前後)、固液共存状態に保ちつつ鑄造を行うのが半凝固鑄造である。

すでにアルミ製造などでは実用化が進んでいる技術だが、近年の温度制御技術の向上により、鑄鉄においても可能となった。

半凝固鑄造では、片状黒鉛鑄鉄、球状黒鉛鑄鉄ともに内部品質の安定、組織の微細化を図ることが可能になる。これは、強度ほか材料の基本的性能の向上につながる。また、比較的低温で鑄造を行うことになるため、エネルギーの節約、型に対する負担減少にもなる。



製品例：バナジウム鑄鉄エキゾーストマニホールド

本文中にあげた以外にも、さまざまな機能強化を目的とした鑄鉄の開発が行われている。自動車のエキゾーストマニホールドは高温の排気ガスが通るため、特に耐熱性が求められる。「バナジウム鑄鉄」は、主に適量のバナジウムを添加、高温特性改善を図ったもので、高温強度、熱疲労寿命に優れるとともに、従来のニレジスト鑄鉄（オーステナイト系ニッケル鑄鉄）より低コスト化を実現している。（アイシン高丘株式会社、スズキ株式会社共同開発）

鑄鉄の半凝固鑄造の詳細については、本号276ページ、滝田光晴氏の解説に詳しい。

▼ADI

近年では、球状黒鉛鑄鉄に熱処理の一種であるオーステンパ処理を加えたADI (Austempered Ductile Iron、オーステンパ球状黒鉛鑄鉄)の利用も進められている。

ADIは1950年代初め、球状黒鉛鑄鉄に対する各種熱処理の実験のなかで、オーステンパ処理（800～900℃のオーステナイト化域まで加熱した後、200～350℃程度に急冷し、組織をベイナイト化する処理）をしたものが固くねばりがあり、高強度で耐摩耗性のある材料となったことで注目されるようになった。機械的性質が鋼に近く、熱処理も容易であることから、自動車部品、建設機械部品などで使われる例が増えてきている。

通常の鑄鉄は、低コストであることが大きなメリットである。ADIは熱処理のコストがかかるため、「鑄鉄のわりにコスト高」と判断されて、これが普及の妨げとなっている。しかし材料としての性能は高く、今後さらに性能、加工性が向上していけば、鋼など他材料に対する競争力も上がり、利用が広がるものと思われる。

また、前述の希土類元素添加や半凝固鑄造と組み合わせ、組織が微細化した球状黒鉛鑄鉄をADIの元素材として使うことで、一層の性能向上ができると期待されている。実際に、希土類元素添加によって組織を微細化した球状黒鉛鑄鉄をオーステンパ処理し、JIS規格上の最高強度である800MPaを越える1100MPaの強度を持つADIも開発されており、これを使った建築用鉄筋継手もすでに製品化されている。

▼複合化による高機能化

鑄鉄それ自体を高強度化する一方で、複合化による高機能化の研究開発も進められている。その一例が「鑄包み工法」による異種材料との接合である。

異種材料との接合を行う場合、溶湯の温度があまりに高いと芯材が完全に溶融し、鑄包み材と一体化してしまう。逆に低温すぎると、単に機械的接合のみになり接合強度

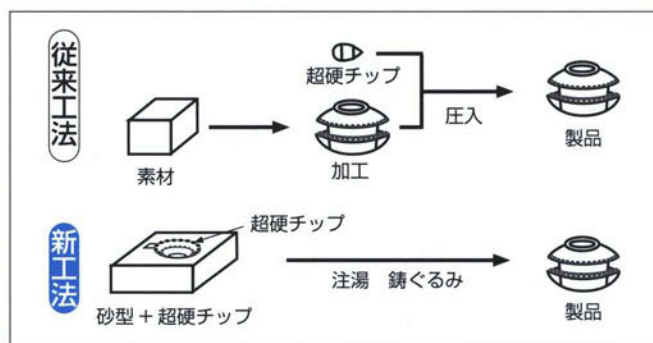
が不足する場合がある。芯材の材料特性を活かし、かつ十分な接合強度を得るためには、材の表面のみが溶融し鑄包み材と溶着するか、溶融しないまでも鑄包み材との間に相互拡散が生じ、拡散接合するのが望ましい。特に近年、材料特性の研究、鑄造の温度管理の技術が進んだことで、この鑄包み工法も、さらに可能性が広がりつつある。

複合化の利用例として実用化が進んでいるものに、トンネル掘削機先端のローラービット（カッターコーン）がある。もともとこれは、すでに成型された母材に「刃先」である超硬チップを銀ロウ付けするのが一般的だった。しかしこの場合、母材にチップをはめ込む穴を加工する手間が必要で、しかも使用中にチップが脱落することもあった。現在では、母材を球状黒鉛鑄鉄として「鑄包み工法」により超硬チップと一体成型することで、耐久性が高く、かつ製造コストの低いローラービットが作られるようになってきている。鑄型に超硬チップをあらかじめセットし、これに球状黒鉛鑄鉄の溶湯を流し込むことで溶湯とチップが融着して接合が起こる。

鑄鉄は、はるか昔から利用され、現在でも重要な鑄造用材料として広く用いられている。しかし、単にレガシーな材料・技術ではなく、さまざまな研究開発の試みにより高機能化を図り、先端の素材としても大きな可能性を持っていると言える。

〔取材・文＝川畑英毅〕

取材協力・写真提供＝堀江皓氏（岩手大学教授）、滝田光晴氏（名古屋大学准教授）、アイシン高丘株式会社



鑄包み工法

トンネル掘削機に使われるローラービットの製法。成型済みの母材にチップを植え込んで作るのが従来の方法だが、鑄型にチップをセットし、鑄包み工法で製作することで、耐久性の向上、コスト低減が見込める。