



入門講座

鉄鋼の日本工業規格-8

鋳鉄鋳物は安定系共晶反応を伴って凝固する

—ねずみ鋳鉄品 (FC) / 球状黒鉛鋳鉄品 (FCD) —

Cast Iron Castings Solidify Through a Stable (Graphite-austenite System) Eutectic Reaction

—Gray Cast Iron Castings (FC) / Spheroidal Graphite Cast Iron Castings (FCD) —

旗手 稔

Minoru Hatate

近畿大学
工学部 機械工学科
教授

1 はじめに

鋳鉄が使用されてきた歴史は古く、約2500年前に中国で農機具が大量に生産されたことに遡る¹⁾。この技術が我が国に伝わり、農業の発展（農機具）、仏教の布教（仏具や仏像）、食生活の改善（鍋や釜）などに関わってきた。鋳鉄の大量製造を可能にしたのは16世紀以降であり、世界遺産として著名な「アイアンブリッジ」は18世紀における鋳鉄鋳物を象徴的に物語っている²⁾。我が国ではアイアンブリッジに約100年遅れて鋳鉄橋（例えば、兵庫県朝来市の神子畑橋など）が作られた。このように1770年代の産業革命による工業の近代化に伴い、さらに第一次世界大戦を契機に蒸気機関及び内燃機関の主要部品を供給する基盤産業の発展に、鋳鉄は重要な役割を演じてきた³⁾。ねずみ鋳鉄は高強度化技術が発展するなか、黒鉛形状が片状のままでは延性に乏しく、強靱化は望めない課題があった。それは白鋳鉄を熱処理して塊状黒鉛にする可鍛鋳鉄で対処されてきたが、鋳放しで球状黒鉛を得ることに成功したのは戦後間もない1947年（イギリスのMorroghらによるCeの添加）と1948年（アメリカのGagnebinらによるMgの添加）のことであり³⁾、球状黒鉛鋳鉄の歴史は約70年である。

2 鋳鉄の用途（JIS規格）

2014年の鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計によると、鋳鉄鋳物、鋳鋼、可鍛鋳鉄、鋳鉄管（インフラ整備に欠かせない上下水道の管と継ぎ手）、精密鋳造品、銅・銅合金、アルミニウム鋳物、ダイカストで構成される全鋳造品の生産量の約70%は鋳鉄品（鋳鉄鋳物：62.6%と鋳鉄管：6.5%と可鍛鋳鉄：0.8%）

で占められ、ねずみ鋳鉄と球状黒鉛鋳鉄を併せた鋳鉄鋳物の市場は約7100億円であった。鋳鉄鋳物は種々の工業的用途に供給される構造部材であり、図1に最近における鋳鉄鋳物生産量の推移を示す。生産量の64%は自動車用（シリンダーブロック、シリンダーライナー、クランクシャフト、カムシャフト、マニホールド、ターボチャージャーハウジング、サスペンションアーム、ステアリングナックル、ブレーキディスクローター、ブレーキドラムなど）が占め、次いで産業機械器具用（各種ケーシング、圧延用ロールなど）、一般・電気機械用（冷凍機圧縮機用部品、各種電気用モーターカバー）、輸送機械用（建設機械用シリンダーブロック・トランスミッションケース・バルブボディ・アクスルハウジング・リンク・カラー・油圧制御部品など、船舶用シリンダーヘッド・シリンダージャケットなど、鉄道車両用ブレーキ部品、農業機械用部品、射出成形機部品、各種軸受ブロックなど）、その他の鋳鉄鋳物（マンホール蓋、景観鋳物、鉄瓶・鉄鍋など）、

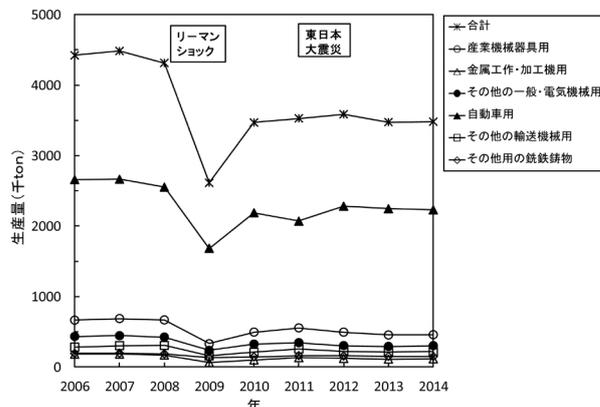


図1 最近における鋳鉄鋳物の生産量の推移

金属工作・加工機械用（各種工作機械ベッド・定盤など）³⁾の順となる。銑鉄鑄物を構成するねずみ鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄の用途を表1に示す。銑鉄鑄物の生産量は62%がねずみ鑄鉄、38%が球状黒鉛鑄鉄の比率であり、両者とも62~64%が自動車用である。生産量に占める割合は大きく相違しないが、ねずみ鑄鉄は優秀な振動減衰能を有するために金属加工・工作機械用への用途が多い。鑄鉄鑄造品に関するJIS規格の分類を表2に示す。鑄鉄品のほとんどの規格は強度や伸びなどで規定されている材質規格であるが、オーステナイト鑄鉄品は化学組成による成分規格であり、鉄系低膨張鑄造品は熱膨張係数の違いで分類されている。

3 鑄鉄の共晶凝固（黒鉛組織）と共析変態（基地組織）

鑄鉄は炭素鋼と同じFeとCを主要元素とする鉄鋼材料であるが、大きく相違する点はCの含有量である。鑄鉄に含まれるC量は炭素鋼より多く、Fe-C系2元系平衡状態図における「オーステナイト中のCの固溶限以上」となる。オーステナイト中の固溶限を超えてCが含有すると、その鑄鉄溶湯は図2のFe-C2元系複平衡状態図に示すように、「共晶反応を伴って凝固する」ことが必然的に起こる。Feの融点は1536°Cであり、C量が増加するに従って（図中のE点→B点へ）、約4.3%Cの共晶点まで、Cは1%あたり約90°CもFe-C系合金の融点を下げる効果をもたらす。同時に、Cは溶湯の粘性を下げ流動性を良好にする効果⁴⁾と凝固時における黒鉛の晶出に伴う膨張⁵⁾と併せて、鑄鋼よりも鑄鉄溶湯が鑄造性に優れる。Fe-C系の状態図は「複平衡」、すなわち2つの共晶凝固形

態が起こり得る。1153°Cで起こる図の実線で示した黒鉛-オーステナイト（ γ ）安定系共晶凝固と1147°Cで起こる図の破線で示したセメンタイト-オーステナイト（ γ ）準安定系共晶凝固であり、それぞれ（1）、（2）式下記の共晶反応となる。ここで、他の研究者⁶⁻⁸⁾と同様に、熱力学的に安定である前者を実線、後者を破線とし、これまでの習慣⁹⁾とは異にした。

黒鉛共晶（安定系）：
液相（L）→黒鉛 + オーステナイト（ γ ）……………（1）

セメンタイト共晶（準安定系）：
液相（L）→セメンタイト（ Fe_3C ） + オーステナイト（ γ ）……………（2）

鑄鉄には一般に、Siが1~3%含有しているのでFe-C-Si3元系状態図によって考える必要があるが、Fe-C2元系合金の解釈がそのまま使えるように、以下のような方法が適用される。共晶組成C量の4.3%を覚えておき、（3）式からSiによる共晶点の移動を考慮したCE値（炭素当量）を求め、CE値が4.3%より大きい、小さいかで、Siを含む溶湯が亜共晶組成か、過共晶組成かを判断する。図2の横軸C量をCE値に置き換えると、各Si量における断面の状態図として簡易的に想定し、概略を掴むことができる。

$$CE \text{ 値} (\%) = C (\%) + 1/3 \cdot Si (\%) \dots\dots\dots (3)$$

鑄鉄溶湯が黒鉛共晶に従って凝固するとねずみ鑄鉄または球状黒鉛鑄鉄となり、セメンタイト共晶に従って凝固するとレデブライト組織を有する白鑄鉄となる。これら鑄鉄の代表的な組織を図3に示す。両共晶が混在して凝固するとまだら鑄鉄と

表1 製品別生産量（2012年）

製品別	ねずみ鑄鉄		球状黒鉛鑄鉄		
	生産量(千t)	割合(%)	生産量(千t)	割合(%)	
一般・電気機械	産業機械器具用	274.9	12.4	221.2	16.1
	金属工作・加工機械用	112.6	5.1	10.8	0.8
	その他一般・電気機械用	198.2	9.0	106.9	7.8
輸送機械	自動車用	1,416.9	64.1	865.3	62.8
	その他用	145.4	6.6	77.3	5.6
	その他	61.2	2.8	95.9	7.0
合計	2,209.3	100	1,377.4	100	

表2 鑄鉄のJIS規格による分類と黒鉛形状及び主な基地組織

名称	JIS規格	JISの記号	黒鉛形状	主な基地組織
ねずみ鑄鉄品	G5501	FC	片状黒鉛	フェライト/パーライト
球状黒鉛鑄鉄品	G5502	FCD	球状黒鉛	フェライト/パーライト
オーステン/球状黒鉛鑄鉄品	G5503	FCAD	球状黒鉛	ベイナイト
低温用厚肉フェライト球状黒鉛鑄鉄品	G5504	FCD300LT	球状黒鉛	フェライト
CV黒鉛鑄鉄品	G5505	FCV	CV黒鉛	フェライト/パーライト
オーステナイト鑄鉄品	G5510	FCA	片状黒鉛	オーステナイト
		FCDA	球状黒鉛	オーステナイト
鉄系低熱膨張鑄造品	G5511	FCLE	片状黒鉛	オーステナイト
		FCdle	球状黒鉛	オーステナイト
ダクタイル鑄鉄鑄鉄管	G5526	D, DPF	球状黒鉛	フェライト/パーライト
ダクタイル鑄鉄異形管	G5527	DF	球状黒鉛	フェライト/パーライト
可鍛鑄鉄品	G5705	FCMW	無黒鉛	フェライト/パーライト
		FCMB	塊状黒鉛	フェライト
		FCMP	塊状黒鉛	パーライト

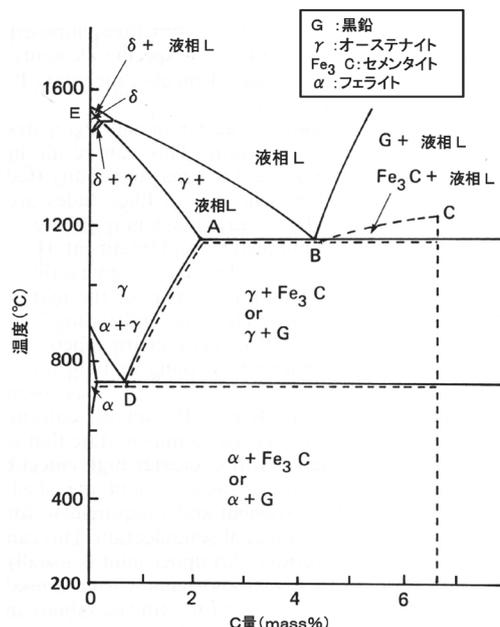


図2 Fe-C2元系複平衡状態図

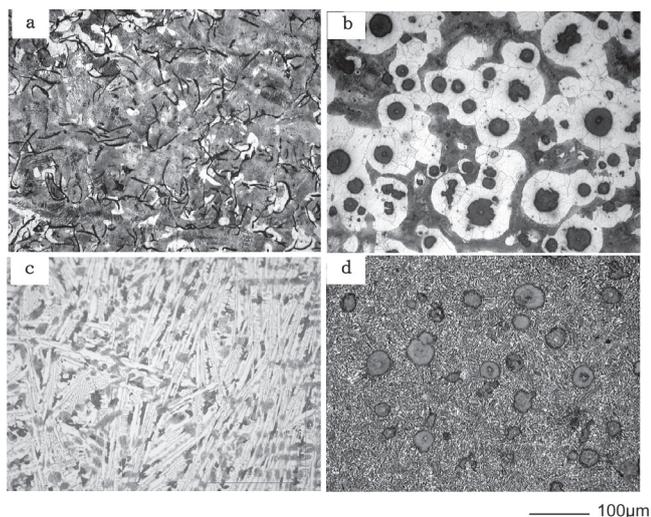


図3 各種鑄鉄の代表的な組織
(a: ねずみ鑄鉄, b: 球状黒鉛鑄鉄, c: 白鑄鉄, d: オーステンパ球状黒鉛鑄鉄)

なる。白鑄鉄及びまだら鑄鉄ではセメントイト共晶凝固を伴うので、いわゆるチル (chill) の発生が起こり、一般の鑄鉄鑄物では欠陥の対象となる。チル化の最も大きな要因は冷却速度が大きいことであり、薄肉鑄物になって冷却が速くなるとチルし易くなる。溶湯が鑄型に鑄込まれると、実際には状態図の平衡温度よりいくらか過冷して共晶凝固が起こる。この過冷現象には物理的な過冷と組成的な過冷がある。物理的な過冷の度合いは鑄物肉厚によって必然的に決定され、組成的な過冷は溶湯の化学組成によって決まるので、溶湯を黒鉛共晶凝固させるための化学組成を選定する合金設計がなされる。

チル化傾向の基本的な考え方は、Fe-C-X3元系合金の鑄鉄溶湯中の共晶凝固に及ぼすX元素の影響^{1,10)}を評価することであり、① 溶湯中における溶鉄へのCの溶解度に及ぼす効果、② 両共晶凝固温度に及ぼす効果及び③ 両共晶の成長速度に及ぼす効果をX元素について総合的に検討する。ここでは、黒鉛共晶凝固温度とセメントイト共晶凝固温度の差はFe-C2元系合金では6℃ (=1153-1147)であり、Fe-C-X3元系合金におけるX元素の効力はこの差を拡げる黒鉛化促進元素なのか、狭める黒鉛化阻害元素なのかで現れ、②の指標を考えてみる¹¹⁾。

香川ら¹²⁾の研究結果によると、黒鉛化促進元素のSiは黒鉛共晶の固液間における平衡分配係数 (k_s) が1.55であり、溶鉄中より γ 中に固溶し易く、黒鉛共晶平衡温度 (ΔT_s) を約10℃上げ、セメントイト共晶平衡温度 (ΔT_m) を約3℃下げ、両共晶凝固の温度幅を拡げる働きがある。Siは他の元素と比較しても黒鉛化の効果が強力である。一方、黒鉛化阻害元素として知られるCrは k_s が0.48であり、 γ 中より溶鉄中に溶解し易く、 ΔT_s を約10℃下げ、 ΔT_m を約5℃上げるので、セメントイト凝固し易くする。FeよりCとの親和力が強い炭化

物生成元素の k_s は1より小さく、Crと同様に黒鉛化阻害元素として作用する。

基地組織は共析変態で決定され、共晶凝固終了時の γ 中におけるCは共析変態までの冷却過程では共析組成まで低下 (図2のA点→D点) し、そのCの減少分だけ、共晶で晶出した黒鉛の周囲に2次黒鉛として析出する (黒鉛を太らせることとなる)⁸⁾。鑄鉄にはSiが含有しているため、このSiは共析までの冷却時に黒鉛の析出を促進させると同時に、黒鉛周辺における基地のフェライト化を促す効果を示し、鑄放し状態における普通鑄鉄の組織は図3 (a), (b) のように、黒鉛とフェライトとパーライトで構成される。

鑄鉄の高強度化には基地のパーライト化が有効であり、早ばらし (共晶凝固終了から共析変態開始までに鑄型を解砕する) 処理の適用、また肉厚が大きい鑄造品では共析変態で安定してパーライト化を促進させる元素が添加される¹³⁾。さらに高強度化するには基地をベイナイトやマルテンサイトにする必要がある。マルテンサイトより靱性に優れているベイナイト (鑄鉄ではSiを含むのでベイニティック・フェライトといい、残留オーステナイトを含めてオースフェライトともいう) 基地にした図3 (d) に示したオーステンパ球状黒鉛鑄鉄 (JIS G5503) が実用に供されている。熱処理はSi量が多いことを考慮すれば、鋼材と同様に基地組織を変化させて要望する特性を得るが、添加元素の決定、すなわち合金鑄鉄は合金鋼の考え方と基本的に相違する。たとえば、鉄鋼材料の耐食性を向上させるために有効な元素であるCrは、前述のように黒鉛化阻害元素であり、ステンレス鋼と同じように適用できない。ただし、積極的にCrを多量に添加して耐摩耗性を追求する白鑄鉄 (高Cr系鑄鉄、最近では球状炭化物鑄鉄^{3,14)} が開発されている) が必要となる特別な用途もある。凝固時における黒鉛化の問題と希望する材質を得るための基地組織の決定との両者を十分に検討した上で、添加元素は選定される。さらに、鑄鉄製造現場では溶解原料である鋼スクラップ (例えば、高張力鋼による高MnやBなど、鋼材の多様化) から混入する元素の影響も考慮して溶製しなければならない社会的背景が存在することも否めない。

4 鑄鉄の分類と性質

鑄鉄の代表であるねずみ鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄におけるJIS規格について記載する。ここでは別鑄込み供試材による機械的性質を抜粋した。鑄造品の信頼性を確保するために、最近では本体付き供試材による機械的性質の保証も重要視されている。その点についてはそれぞれのJIS規格の内容を参照されたい。

表3 ねずみ鑄鉄品のJIS規格 (G 5501)

種類の記号	引張強さ	硬さ
	N/mm ²	HB
FC100	100以上	201以下
FC150	150以上	212以下
FC200	200以上	223以下
FC250	250以上	241以下
FC300	300以上	262以下
FC350	350以上	277以下

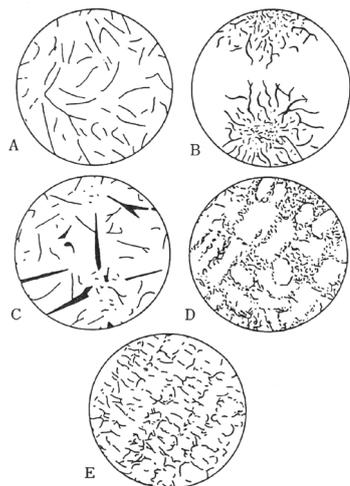


図4 片状黒鉛の分類 (ISO規格)

4.1 ねずみ鑄鉄品 JIS G 5501

ねずみ鑄鉄のJISはFC (Ferrous Casting) で表示され、表3のように規格化されている。黒鉛組織は図4のように分類され、それぞれの特徴をまとめると以下ようになる。

- A型黒鉛：片状黒鉛が均一に分布しており、その配列には方向がない。
- B型黒鉛：バラ状に分布する。
- C型黒鉛：片状黒鉛が均一に分布するところに、自由に晶出した粗大な初晶黒鉛 (キッシュ黒鉛) が混在する。
- D型黒鉛：細かい共晶状黒鉛が樹枝状晶の間隙を埋める形で分布し、黒鉛の配列に方向性はない。
- E型黒鉛：小さい片状黒鉛が樹枝状晶の間に沿って、その間隙を埋める形で分布するので、黒鉛の配列にやや方向性がある。

ねずみ鑄鉄に晶出する黒鉛はそれぞれ独立しているのではなく、顕微鏡で観察される視野における個々の黒鉛は図5に示すように内部連結しており¹⁵⁾、立体的には共晶セルを形成して存在する。この共晶セルの大きさは数百μm～数mmであり、この集合体がねずみ鑄鉄を形成する。これらの晶出する黒鉛を低C量で低Si量、すなわち低CE値から高CE値の順に

顕微鏡で観察される組織

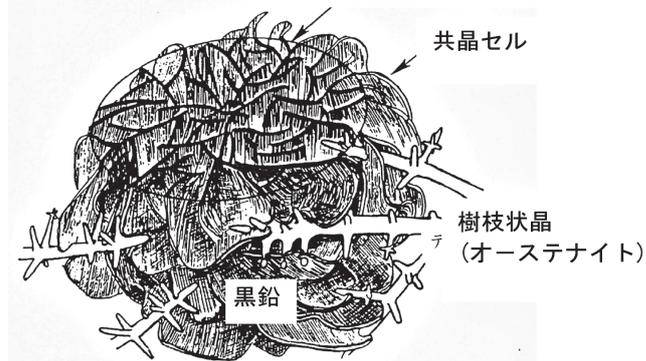


図5 共晶セルの立体模式図

並べると、D型、E型、B型、A型、C型となり、C型黒鉛は過共晶組成で現れるが、それ以外はほぼ亜共晶組成である。晶出する黒鉛の大きさも上とほぼ同様の順である。ねずみ鑄鉄の強度は低CE値にして黒鉛を細かく分布させ、基地をパーライトにした方が高くなる。しかし、完全にD型黒鉛を均一に分布させるにはかなりの制約される条件 (冷却速度が一定でかつ大きい、またはTiの添加など) を要する。このD型黒鉛を有する鑄鉄の製造方法を確立し、加工性が良好で、かつ高強度が必要な自動車部品に適用された例もある¹⁶⁾。化学組成及び鑄込む鑄造品の肉厚などの条件が決まれば、ねずみ鑄鉄で最良の強度及び良好な切削性を得るにはA型黒鉛を均質に晶出させることが肝要である。そのため、実用的にはねずみ鑄鉄溶湯に接種 (Fe-Si系やCa-Si系合金など) が施されて鑄込まれる。すなわち、接種処理は共晶セルの数を増加させてチル化を低減させ、共晶セル内に分布する黒鉛をA型にし、成熟度や比較硬さが良好な材質にするために行われる¹⁾。

4.2 球状黒鉛鑄鉄品 JIS G 5502

球状黒鉛鑄鉄のJISはFCD (Ferrous Casting Ductile) で表示され、表4のように規定されている。引張強さが350～800 N/mm²以上、伸びが2～22%以上であり、炭素鋼に匹敵する材質特性を有する。球状黒鉛鑄鉄を溶製するには溶湯に黒鉛球状化剤 (一般にはFe-Si-Mg系でREやCaを含む合金³⁾) を添加する処理を施した後、接種を行う。この接種効果は薄肉では黒鉛粒数の増加によるチル化防止、厚肉では2段で接種するなど後述する黒鉛球状化不良の防止に寄与する。黒鉛形状の分類を図6に示す。この図は黒鉛球状化率を測定するときに使用され、100倍の顕微鏡組織でV及びVIの黒鉛粒数が全黒鉛粒数に対する割合 (%) を5視野測定し、その平均値が80%以上を必要とする。6種の黒鉛形状は以下のように分類される。

- I : 片状黒鉛
- II : スパイク状黒鉛 (spiky graphite)
- III : 擬片状黒鉛 (quasi-flaky graphite)
- IV : 焼戻し炭素 (temper carbon)
- V : 塊状黒鉛 (granular graphite)
- VI : 球状黒鉛

III~Vの {これらの芋虫状の黒鉛をCV (compacted vermicular) 黒鉛と称する} 及びVIの黒鉛が混合して分布するCV黒鉛鑄鉄はねずみ鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄の両者の中間的な材質に対する工業的な設計要求を担うことから、2013年にJIS化 (G 5505) された。白鑄鉄を黒鉛化焼なまし熱処理によってIVまたはVの塊状黒鉛にした黒心可鍛鑄鉄 (JIS G5705) もあり、Iの片状黒鉛を含まないことが規定されている。この6種類の黒鉛のほかに、過共晶組成の球状黒鉛鑄鉄溶湯で初晶黒鉛が溶湯中に浮上すると全体的には球状の黒鉛であるが、その内部には放射状に溶鉄が入り込んだ雪状黒鉛あるいは爆裂状黒鉛が晶出することもある。

厚肉球状黒鉛鑄鉄ではIIIの擬片状がさらに微細化したチャッキー黒鉛が晶出することもあり、靱性を大きく低下させるので、セオリーダクタイトという考え方で対処して製造されている例もある¹⁷⁾。この厚肉球状黒鉛鑄鉄のJISは1992年に

G 5504で規定され、2005年には原子力用使用済核燃料等輸送・貯蔵 (キャスク) の要件として化学組成の範囲、低温での衝撃値と破壊靱性値が追加された。福島原発のデブリ収納容器を含め、今後、使用済核燃料は増加の一途を辿るため、この分野における球状黒鉛鑄鉄の適用は不可欠となり、重要な用途を担う素材として重宝されることも視野に入れて開発されていくことが予想される¹⁸⁾。

4.3 鑄鉄の強度特性を決定する黒鉛の効果

球状黒鉛鑄鉄の強度がねずみ鑄鉄のそれより高いのは黒鉛形状の違いによるものであるが、ねずみ鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄に応力が負荷されたときに、片状黒鉛と球状黒鉛ではそれぞれの黒鉛先端における応力集中の度合いが異なり、いわゆる黒鉛の内部切欠き効果¹⁹⁾ が片状黒鉛では球状黒鉛より著しく大きいことだけでは両者の強度特性の差は説明しきれない。

球状黒鉛鑄鉄に晶出する球状黒鉛は図7のように、Cの六方環が中心から周囲に向かってねじれながらc軸方向へ層状に積み重なって成長し²⁰⁾、その大きさは一般には平均10μmから60μm程度である。一方、ねずみ鑄鉄に分布する片状黒鉛はc軸と垂直のa軸方向に優先的に成長して、図4に示したように激しく枝分れをしながら数mmにも及ぶ共晶セルを形成する。黒鉛の形状のみが違うことだけでなく、こういったことを考慮すると、鑄鉄の強度は基地の有効断面積 (Aef) を導入すると説明できる。黒鉛自身の強度は約20 N/mm²、基地のフェライト

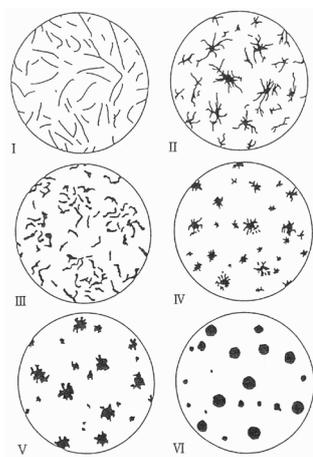


図6 黒鉛形状の分類 (ISO規格)

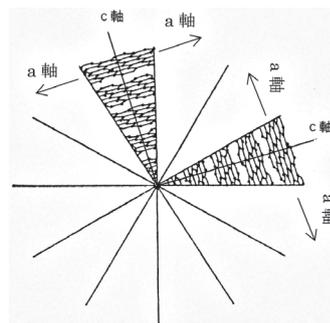


図7 球状黒鉛の内部構造

表4 球状黒鉛鑄鉄のJIS規格 (G 5502)

種類の記号	引張強さ N/mm ²	0.2% 耐力 N/mm ²	伸び %	シャルピー吸収エネルギー			硬さ HB	備考 主要基地組織
				試験温度 °C	3個の平均 J	個々の値 J		
FCD350-22	350以上	220以上	22以上	23±5	17以上	14以上	150以下	フェライト
FCD350-22L	350以上	220以上	22以上	-40±2	12以上	9以上	150以下	フェライト
FCD400-18	400以上	250以上	18以上	23±5	14以上	11以上	130~180	フェライト
FCD400-18L	400以上	250以上	18以上	-20±2	12以上	9以上	130~180	フェライト
FCD400-15	400以上	250以上	15以上	—	—	—	130~180	フェライト
FCD450-10	450以上	280以上	10以上	—	—	—	140~210	フェライト
FCD500-7	500以上	320以上	7以上	—	—	—	150~230	フェライト+パーライト
FCD600-3	600以上	370以上	3以上	—	—	—	170~270	パーライト+フェライト
FCD700-2	700以上	420以上	2以上	—	—	—	180~300	パーライト
FCD800-2	800以上	480以上	2以上	—	—	—	200~330	パーライト又は 焼戻しマルテンサイト

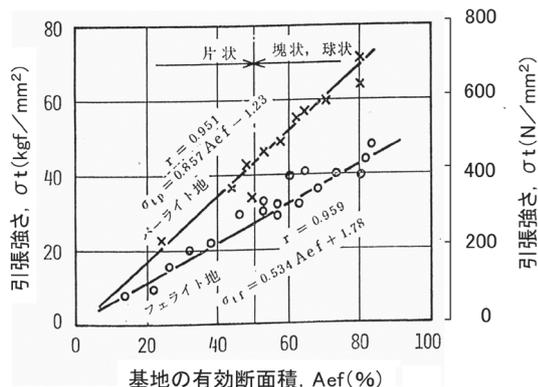


図8 基地の有効断面積 (Aef) と鑄鉄の引張強さとの関係

及びパーライトの強度はそれぞれ300 N/mm²、800 N/mm²であり、各種の鑄鉄に応力が加わって破壊に至るまでに基地の連続性がどれだけ絶たれて破壊し、引張強さにどの程度の基地が有効に働いたかを有効断面積で表現すると、図8²¹⁾に示すように、鑄鉄の引張強さは基地の有効断面積で整理できる。ねずみ鑄鉄では低C、低Siにして基地の有効断面積を大きくしてパーライト基地すれば高強度化に有効となる。

また、ねずみ鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄との材質的に大きく相違するのは強度だけでなく、ねずみ鑄鉄はほとんど伸びを伴わない脆性的な破壊様式をとるが、一方球状黒鉛鑄鉄は伸びを伴う延性的な破壊様式を呈する。図9²²⁾に示すように、黒鉛球状化率と引張強さはほぼ直線関係が認められるが、伸びは黒鉛球状化率が80%を境にした変化となる。球状黒鉛鑄鉄はJISの規定において、球状化率が80%以上を必要とすることも納得できる。CV黒鉛鑄鉄の範囲では球状化率が変化しても、伸びの値は大きく変化しないこともわかる。

5 おわりに

鑄鉄に対する設計要求はますます厳しくなり、JIS規格を単に満足するだけでは他の材料への代替化が危惧される。鑄造技術で成形できるメリットを最大限に活かし、同時に高ヤング率、高強度かつ高靱性などへの要望に対応することが課題となる。亜共晶組成で基地の強化を図ることやNi、Cuなどを添加した合金設計によって、高ヤング率化や高強度・高靱性を有する鑄放し球状黒鉛鑄鉄の新たな開発が進んでいる。ねずみ鑄鉄では400 N/mm²を超える強度特性、さらに切削性の向上など、現状の材質を改善する研究も実施されている。

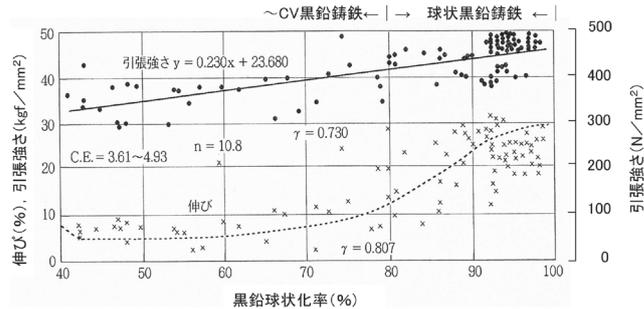


図9 黒鉛球状化率と引張強さ、伸びとの関係

参考文献

- 1) 中村幸吉監修：鑄鉄の科学，日本鑄物工業会，(2005)
- 2) 石野亨：金属の旅，小峰書店，(2005)
- 3) 中江秀雄監修：新版 鑄鉄の材質，日本鑄造工学会，(2012)
- 4) 木口昭二，佐藤博之，加山延太郎：鑄物，50 (1978)，8.
- 5) 香川明男，中村尚人，木口昭二，長田雅史：鑄物，67 (1995)，112.
- 6) R.Elliott：Cast Iron Technology, Butterworths, (1988)
- 7) H.Okamoto監修：Phase Diagrams of Binary Iron Alloys, ASM, (1993)
- 8) 中江秀雄：新版 鑄造工学，産業図書，(2008)
- 9) 西澤泰二：状態図・七話，アグネ技術センター，(2015)
- 10) 鹿取一男，牧口利貞，阿部喜佐男，中村幸吉：鑄造工学，コロナ社，(1978)
- 11) 井川克也 編集，岡本平 著：鑄造凝固，日本金属学会，(1992)
- 12) 香川明男，岡本平：鑄物，57 (1985) 113
- 13) 井川克也，喜多新男，草川隆次，新山英輔，松本弘：球状黒鉛鑄鉄の基礎と応用，丸善，(1992)
- 14) 球相材料研究会編：京都発新材料の開発 球状炭化物材料，日刊工業新聞社，(2006)
- 15) H.Morrogh：The British Foundrymen L III (1960) 32.
- 16) 北川鉄工所：素形材，56 (2015) 1, 6.
- 17) 糸藤春喜：素形材，45 (2004)，13.
- 18) 電力中央研究所：電力中央研究所報告・研究報告 N11027, (2012)
- 19) 日本金属学会編：金属材料の強度と破壊，丸善，(1964)
- 20) H.Morrogh and W.J.William：JISI, 155 (1947)，326.
- 21) 塩田俊雄，小松眞一郎：鑄物，49 (1977)，602.
- 22) 森田志郎，尾崎良平，藤田忠男：鑄物，40 (1968)，296.

(2015年6月23日受付)