

論 説

# 鑄鉄の組織と機械的性質

平 塚 貞 人\*



## 1. はじめに

鑄鉄は、我が国では2020年には、年間約300万トン生産されている重要な鑄造用構造材料である。その生産量の63.7%は輸送機械用（自動車用、鉄道用、船舶用など）、23.7%が一般・電気機械用（産業機械器具用、建設機械用、金属工作・加工機械用、電気機械用など）、7.8%が鑄鉄管、残り4.7%がその他用（継手、厨房品、工芸品など）として使用されている<sup>1)</sup>。

図1にカヤバ株式会社製ショベル・ミニショベル用油圧機器の一例<sup>2)</sup>を示す。小型油圧ショベルのコントロールバルブのボディは、鑄鉄製である。

鑄鉄と鋼はともに鉄 (Fe) と炭素 (C) から構成されるFe-C系合金である。鑄鉄と鋼の違いは、それぞれのC含有量で区別されている。C含有量が約2mass%（以下mass省略）までが鋼、それ以上が鑄鉄として分類されている。実用鑄鉄のC含有量は3～4%と多く、さらにケイ素 (Si) が1～3%程度含有されているので、鑄鉄はFe-C-Si系合金として扱われている。C含有量が2%を越えるとCは黒鉛としてFe中に現れる。したがって、鑄鉄は種々の形状の黒鉛と鋼が組み合わせられた複合材料と見なすこともできる。

鑄鉄は鋼に比べてC含有量が高いため、凝固温度（融点）が著しく低く、流動性が良い。また、凝固時に黒鉛が晶出することで体積膨張が起こり、凝固収縮が少なく、つまり引けが少なく、鑄造しやすい材料である。さらに、黒鉛の存在と高Siであるため、振動吸収能、切削性、耐摩耗性、熱伝導性、耐食性、耐酸化性などの工業的に優れた特性を有している。

本稿では、鑄鉄の特性に影響を及ぼす鑄鉄の組織と機械的性質について論説する。

## 2. 鑄鉄の組織

鑄鉄の組織は溶湯の化学組成、凝固条件や熱処理などによって大きく変化する。鋼は凝固後、圧延などの塑性加工や熱処理が施されるので、凝固組織はそれほど問題にされないが、鑄鉄はほとんどの場合鑄放し状態で使用されるので、凝固組織は極めて重要である。鑄鉄の組織は黒鉛組織及び基地組織に大別され、鑄鉄の機械的性質、物理的・化学的性質はこの両組織の組み合わせに大きく依存している。

### 2.1 黒鉛組織

図2は鑄鉄中に現れる黒鉛形態を分類したもので、1962年アメリカにおける国際鑄物会議技術委員会にて提案された分類図である<sup>3)</sup>。

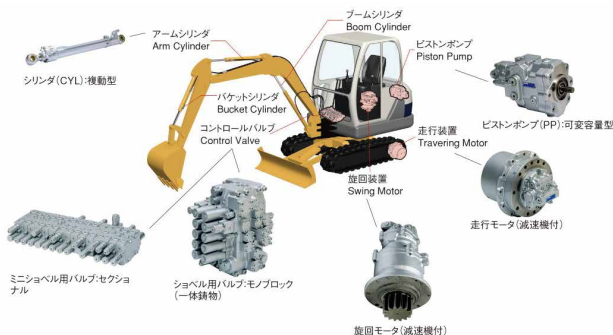


図1 ショベル・ミニショベル用油圧機器の一例

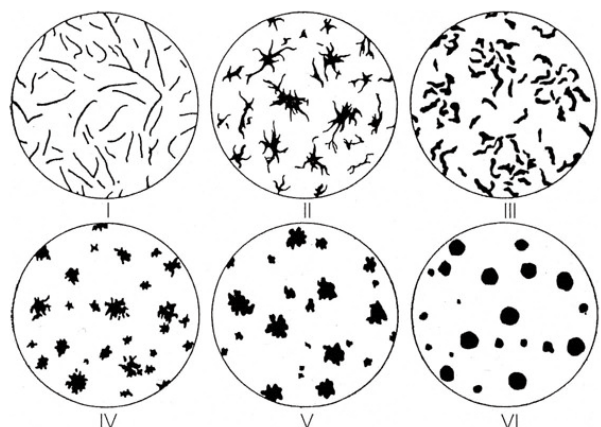


図2 黒鉛形態の分類

\*岩手大学 教授 鑄造技術研究センター

形態Ⅰは、片状黒鉛で、片状黒鉛鑄鉄はこの黒鉛が現れた鑄鉄でJIS規格 (G5501) ではねずみ鑄鉄品として分類している。形態Ⅱは、球状黒鉛鑄鉄を製造した場合にマグネシウム (Mg) などの黒鉛球状化剤が過剰に添加されたときに現れやすい先端の尖った黒鉛である。形態Ⅲは、黒鉛球状化剤が不足したときに現れる擬片状黒鉛であり、CV黒鉛鑄鉄はこの黒鉛が現れた鑄鉄である。形態Ⅳは、可鍛鑄鉄や黒鉛鋼に現れる塊状黒鉛である。形態Ⅴは、球状に近い擬球状黒鉛である。形態Ⅵは、完全な球状黒鉛で、球状黒鉛鑄鉄に多く現れる黒鉛組織である。これらの黒鉛形態の中でⅡ～Ⅵまでの形態は鑄鉄の中ではほとんどの場合常に均一で、無秩序な分布を示す。しかし、形態Ⅰの片状黒鉛は鑄鉄の化学成分、溶解履歴及び凝固時の冷却速度などの影響を受けて変化するので、図3に示すようにASTM A247では、A型からE型までの形態に分類している。A型は無秩序で均一な分布で、片状黒鉛鑄鉄では最も望ましい分布である。B型はバラ状黒鉛と呼ばれている。C型は過共晶成分の場合で、粗大な初晶黒鉛が現れたものである。D型は共晶状黒鉛と呼ばれ、チタン (Ti) を添加した溶湯や過冷された溶湯に現れやすい黒鉛である。E型は樹枝状晶間けき黒鉛と呼ばれる黒鉛分布である。

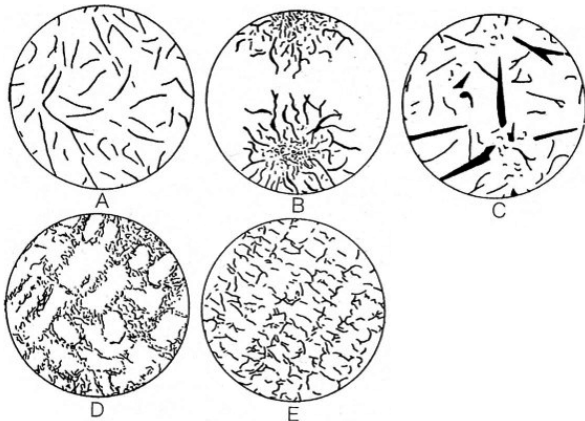


図3 片状黒鉛の分布状態 [ASTM A247]

## 2.2 基地組織

鑄鉄の基地組織は凝固時の冷却速度及び合金元素含有量や熱処理によって変化する。ここでは代表的な3つの基地組織を記述する。

### (i) フェライト

$\alpha$ -Feあるいは $\alpha$ 固溶体とも呼ばれ、極微量のCを含み、密度7.9、引張強さ200～400MPa、ブリネル硬さHB90～150程度の体心立方晶の軟質Feである。鑄鉄中のフェライトはSiを固溶しているので、シリコ・フェライトと呼ばれ、Si量が多いほど引張強さ、硬さは大きくなる。

### (ii) セメントイト

Fe原子3個とC原子1個で構成された斜方晶の化合物で、密度7.7、ブリネル硬さHB550である。鑄鉄組織の中で最も硬く、脆い組織である。

### (iii) パーライト

準安定系共析変態でオーステナイトはフェライトとセメントイトに分解 (変態) するが、この両相は立体的に板状に交互に重なって生成し、光学顕微鏡下では層状、縞状に見える。密度7.8、引張強さ800～900MPa、ブリネル硬さHB200～240程度の極めて強靱な組織である。

球状黒鉛鑄鉄では、通常図4に示すようにブルスアイ組織と呼ばれるフェライトとパーライトが共存している組織となっている。

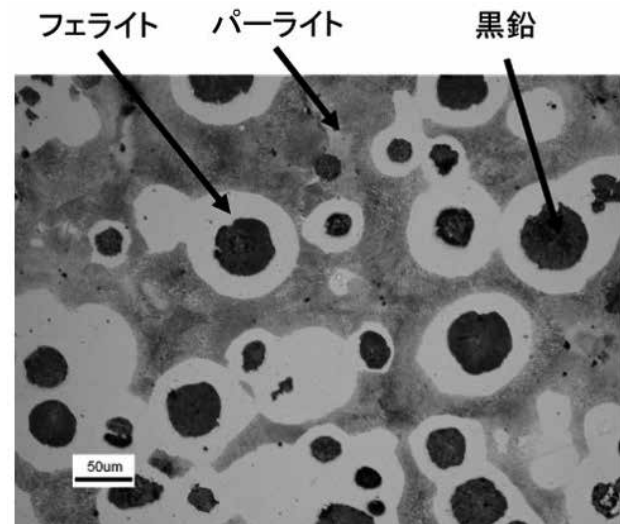


図4 球状黒鉛鑄鉄のブルスアイ組織

## 3. 鑄鉄の機械的性質

材料の引張強さ、硬さ、伸び、疲労強度などの機械的性質を総称して、広義の「強さ」あるいは「強度」という。これらはいずれも「変形と破壊による抵抗の尺度」である。

金属材料の強度はその組織によって決まる。鑄鉄の場合も強度は、黒鉛組織と基地組織、その他の組織に支配される。

### 3.1 片状黒鉛鑄鉄の強度

黒鉛の引張強さは20MPa程度であって、基地に比べて極めて小さい力で破壊する。このため、鑄鉄の強度は黒鉛を除いた基地部の強度とその形態、連続性で決まる。

細かいA型あるいはE型黒鉛が高強度を実現する。長いA型やB型、C型の黒鉛は、基地の連続性が低いために低強度である。

図5は、片状黒鉛鑄鉄の基地が延性的な場合(a)と

脆性的な場合(b)の引張荷重での破壊の進行の模式図である<sup>4)</sup>。(a)の基地が延性的な場合は、基地部の延性き裂、部分的な破断が多数生じ、黒鉛片沿いにこれらが連結することによって破壊が進行する。

一方、(b)の基地が脆性的な場合は、黒鉛片端からの脆性き裂の発生と伝播で破壊が進行する。

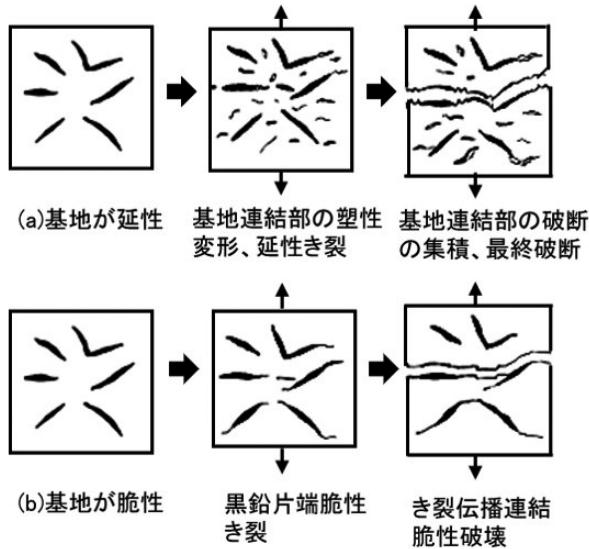


図5 片状黒鉛鑄鉄の引張破壊の進行

図6に片状黒鉛鑄鉄の応力-ひずみ曲線を示す<sup>5)</sup>。曲線は連続的に湾曲した形状で、明瞭な降伏挙動を示さない。片状黒鉛鑄鉄では、0.2%降伏点(耐力)を求めても意味がなく、0.05%などより小さいひずみによる耐力を定義する必要がある。

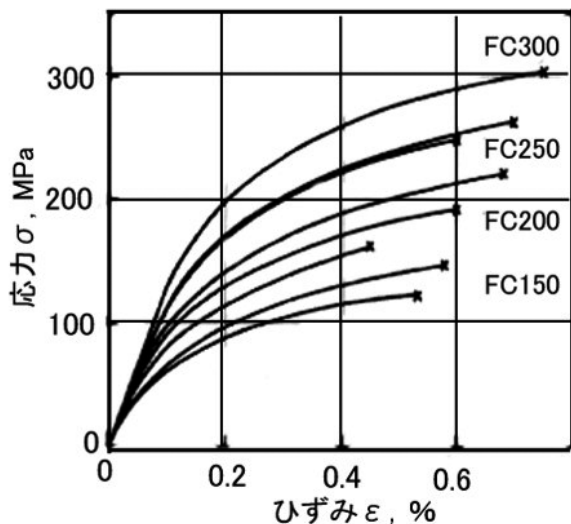


図6 片状黒鉛鑄鉄の応力-ひずみ曲線

### 3.2 球状黒鉛鑄鉄の強度

球状黒鉛鑄鉄では基地部の連続性が片状黒鉛の場合よりはるかに高い。また、球状化率が一定以上(お

おむね0.7以上)であれば、連続性の程度は黒鉛の僅かな形状(球状化率)や寸法の差によってほとんど変化しない。

図7は、球状黒鉛鑄鉄の基地が延性的な場合(a)と脆性的な場合(b)の引張荷重での破壊の進行の模式図である<sup>6)</sup>。

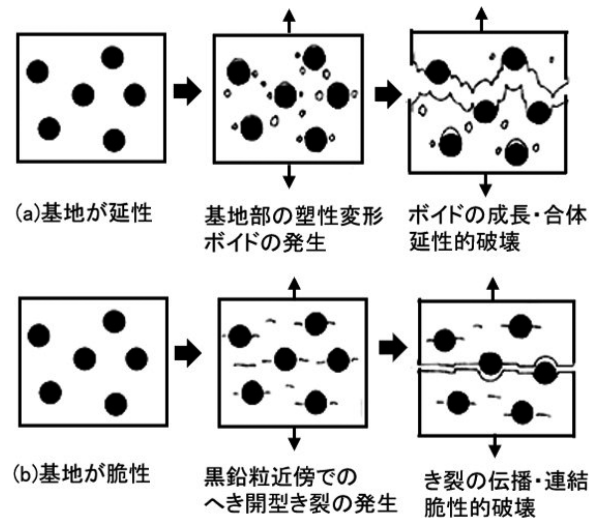


図7 球状黒鉛鑄鉄の引張破壊の進行

(a)の基地が延性的で十分に塑性変形を伴う場合、黒鉛粒近傍に生じたき裂が変形の進行に伴ってポイドとなる。また、基地内の粒界部、介在物のまわりにもポイドが生じる。これらがお互いに連結、合体して最終的に破断に至る。

破壊の経路は、近傍の最も近接した、あるいは最も大きな黒鉛粒などの弱い部分をジグザクにたどることになる。

(b)の基地が脆性的な場合、黒鉛粒近傍に生じたへき開型のき裂が成長し、最終破断はき裂の急速伝播によって生じる。

図8に、球状黒鉛、CV(芋虫状)黒鉛及び片状黒鉛鑄鉄の引張強さとCE値の関係を示す<sup>7)</sup>。片状黒鉛鑄鉄の強度はCE値により大きく変化するが、球状黒鉛鑄鉄の引張強さはCE値にほとんど依存しないこと、CV(芋虫状)黒鉛鑄鉄は、両者の中間となることがわかる。これは、片状黒鉛鑄鉄の強度は、基地の連続性(基地が分断されずに連続する割合)すなわち黒鉛片の形態や分布状態に大きく依存しているからである。しかし、球状黒鉛鑄鉄では球状黒鉛(体積率で約10%)が互いに独立、分散しているので、残りの90%が基地であるので、基地の連続性は片状黒鉛鑄鉄に比べてはるかに大きい。そのため球状黒鉛鑄鉄では基地組織に大きく依存し、CE値にはほとんど影響されないことになる。

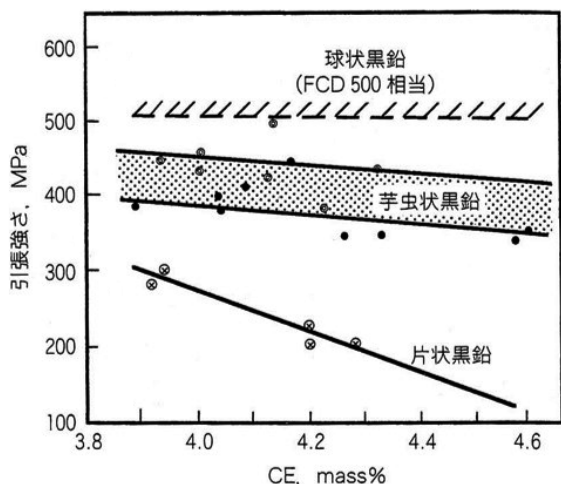


図8 各種鋳鉄の引張強さに及ぼすCE値の影響

図9に、基地組織が異なる4種類の球状黒鉛鋳鉄の応力-ひずみ曲線を示す<sup>8)</sup>。曲線1はフェライト基地、曲線2はフェライト+パーライト基地（ブルスアイ組織）、曲線3はパーライト基地、曲線4はベイナイト基地のオーステンパ球状黒鉛鋳鉄（ADI）である。曲線1のフェライト基地の場合、大きな伸びを示す。曲線2、3になるに従ってパーライト面積が増加するので、応力-ひずみ曲線全体は高応力側に移動する。

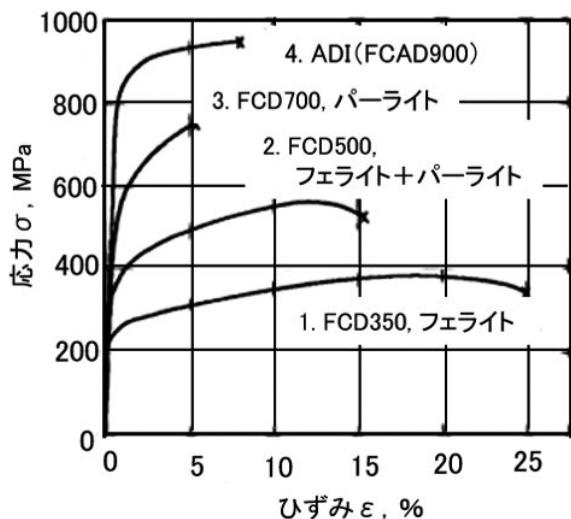


図9 球状黒鉛鋳鉄の応力-ひずみ曲線

図10に、球状黒鉛鋳鉄のパーライト面積率と引張強さ、伸びの関係を示す<sup>9)</sup>。パーライト面積率が増加すると引張強さは増加し、伸びはパーライト面積率が少し増えると急激に減少し、その後、緩やかな減少傾向を示す。

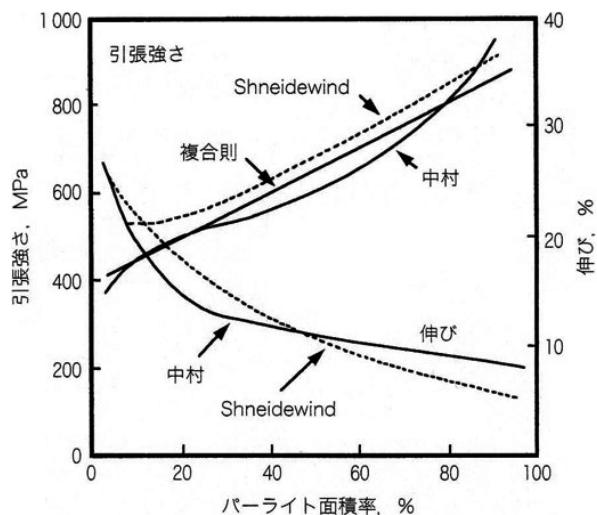


図10 球状黒鉛鋳鉄のパーライト面積率と引張強さ、伸びの関係

#### 4. おわりに

鋳鉄は、黒鉛と鋼が組み合わされた複合材料と見なすことができる。また、鋳鉄の強度は黒鉛組織と基地組織、その他の組織に支配されている。

片状黒鉛鋳鉄の強度は、第1に黒鉛片の形態つまり黒鉛片間の基地の連続性が影響し、第2に基地組織が影響している。

一方、球状黒鉛鋳鉄の基地の連続性は片状黒鉛鋳鉄に比べてはるかに大きい。そのため球状黒鉛鋳鉄の強度は、基地組織に大きく依存することになる。

鋳鉄の機械的性質、物理的・化学的性質は、黒鉛組織及び基地組織を制御することにより優れた特性を発現するので、組織制御された高強度・高機能鋳鉄は、様々な用途の工業製品への適用が期待される。本稿がそのための一助となれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 令和2年の素形材産業年報：素形材62（2021）8
- 2) KYB油圧機器総合案内（詳細版）カタログ（建設機器・産業車両・農業機械・産業用）
- 3) A.B. Everest: Trans. Amer. Foundrym. Soc., 70（1962）210
- 4) 野口徹：鋳造工学, 77（2005）794
- 5) 野口徹：鋳造工学, 76（2004）333
- 6) 原田正治, 野口徹：球状黒鉛鋳鉄の強度評価, アグネ技術センター（1999）52
- 7) 日本鋳造工学会編：鋳造工学便覧（丸善）（2002）254
- 8) 原田正治, 野口徹：球状黒鉛鋳鉄の強度評価, アグネ技術センター（1999）50
- 9) 中村幸吉, 炭本治喜：鋳物, 39（1967）480