

展望・総説・総論

球状黒鉛鑄鉄における切欠き強度の新たな評価方法（1）

池田 朋弘*・野田 尚昭†・佐野 義一‡

1. はじめに

鑄造は、溶融金属を型へ流し込み、凝固させて目的の形状を得る技術であり、複雑形状の部品を経済的に大量生産できる。鑄鉄は、代表的な鉄系の鑄造材料であり、産業革命頃より機械部品に採用され始め、その機械的性質の向上が図られるようになった¹⁾。当時の鑄鉄は、鉄基地中に片状の黒鉛を有し、鉄鋼材料などと比較して脆かったことより、強度や靱性の向上のための研究が行われた。そして、1940年代の後半に片状黒鉛を球状化することに成功し、球状黒鉛鑄鉄が発明された^{2),3)}。球状黒鉛鑄鉄は、高強度かつ高靱性でありながら、鑄造により低コストで自由な形状を実現できるため、機械構造用材料として急速に世界へ普及し、日本にも1950年代初めに技術導入された⁴⁾。初期の球状黒鉛鑄鉄品は、強度不足による破損事故が頻発したようであり⁵⁾、世間に対して球状黒鉛鑄鉄は脆いという印象を与えた可能性がある。しかしながら、合金成分の最適化や黒鉛性状の改善、製造技術の向上が進み、高品質を安定して確保できるようになり、この問題は克服されている⁵⁾。機械系の研究者や技術者による調査・研究に注目すると、多くの製品設計上重要な知見が得られており、例えば、1980年代から1990年代後半は、(社)日本機械学会材料力学部門内に、「球状黒鉛鑄鉄の強度評価に関する研究会（主査：西谷弘信 九州大学名誉教授）」および「先進鑄造材料の強度評価に関する研究会（主査：原田昭治

九州工業大学名誉教授)」が設立され、特に疲労特性など、球状黒鉛鑄鉄の強度特性が明確化された⁶⁾。このような努力により、球状黒鉛鑄鉄の強度特性に対する認識が進み、設計が最適化されたことが、自動車分野などでの利用促進に大きく寄与したと考える。図1.1に示すように、球状黒鉛鑄鉄の生産量は、年間約百数十万トン有するまでに成長し、産業を支える重要な素材となっている^{7),8)}。

一方で、近年における生産量の推移はほぼ横ばいの傾向にある^{7),8)}。このことについては、鑄造による自由形状の利点や経済性に加え、良好な強度特性などを有することや、海外での適用状況を考えると、球状黒鉛鑄鉄はより多く使用されて生産量が増加してもおかしくない。その実現のためには、球状黒鉛鑄鉄本来の強度特性を明らかにして理解を深めていくことが肝要と考える。そこでここでは、球状黒鉛鑄鉄の強度設計上必要とされる工学的な正しい認識が進んでいない切欠き材の強度を中心に、最近の著者らの研究に基づく知見を紹介し、参考に供したい。

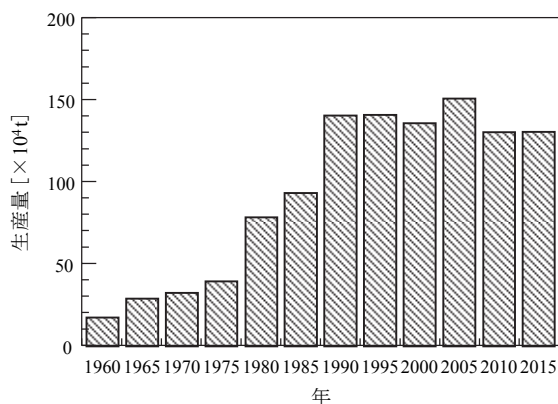


図 1.1 球状黒鉛鑄鉄の近年の生産量推移^{7),8)}

* 日之出水道機器株式会社 R&D 総合センター
(Tomohiro Ikeda)

† 九州工業大学 大学院工学研究院
機械知能工学研究系 教授
(Nao-Aki Noda)

‡ 九州工業大学 大学院工学研究院
機械知能工学研究系
(Yoshikazu Sano)

2. 球状黒鉛鑄鉄の引張強度・疲労強度

鑄鉄の引張強さをはじめとする機械的特性には、黒鉛の形状が大きく影響する。鑄鉄の黒鉛形状は、球状化元素等の微量元素の含有量によって著しく変化するが、典型的な黒鉛形状として、片状(片状黒鉛鑄鉄)、芋虫状(CV黒鉛鑄鉄)、球状の黒鉛(球状黒鉛鑄鉄)がある。工業的に球状黒鉛鑄鉄と定義されるものは、球状の黒鉛が組織写真で観察した際に80%以上存在するものを指す⁹⁾。

一般的に広く用いられている球状黒鉛鑄鉄(フェライト-パーライト基地球状黒鉛鑄鉄)は、図2.1に示すように、黒鉛および基地組織のフェライト、パーライトで構成される。このフェライトとパーライトは凝固時に生成したオーステナイト

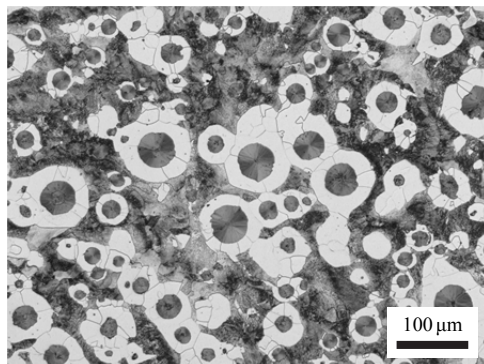


図 2.1 代表的なフェライト-パーライト基地球状黒鉛鑄鉄の組織

(γ)相が冷却過程で $\gamma \rightarrow$ フェライト+黒鉛, または $\gamma \rightarrow$ パーライト(フェライトとセメンタイト微細層状混合組織)に固相変態することにより生じ、

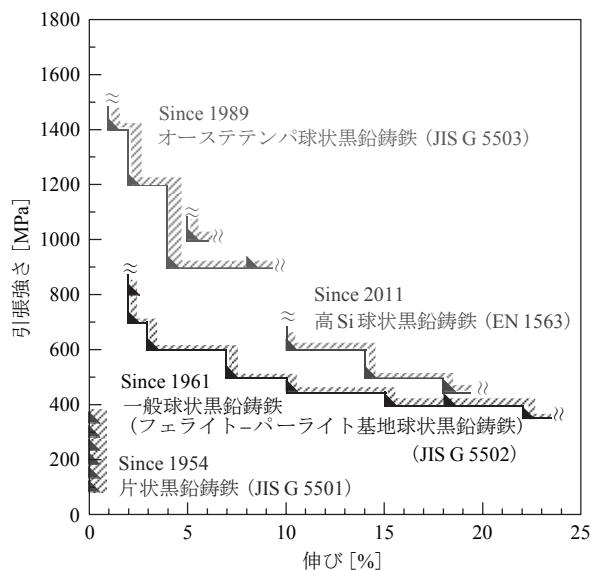
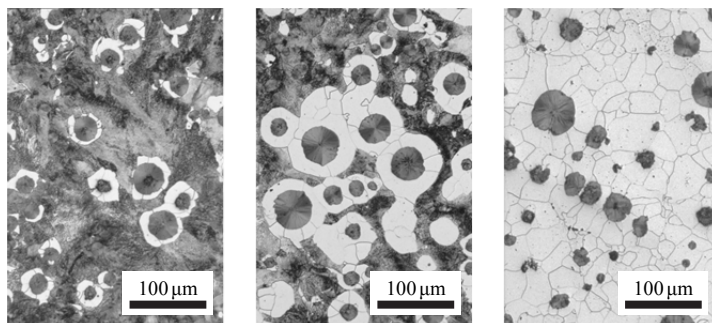


図 2.2 球状黒鉛鑄鉄の規格の例(引張強さと伸び)

その比率は、化学成分や冷却速度により変化する。基地組織中のフェライトとパーライトの比率は、機械的性質に大きく影響するため、要求に応じた様々な強度特性を得ることができる⁹⁾。JIS G 5502では、図 2.2 に示すように 800 MPa に及ぶ高強度・低伸びから 350 MPa 程度の低強度・高伸びまで幅広く材料が規格化されている。球状黒鉛鋳鉄は、更なる強靱化も可能である。オーステンパ球状黒鉛鋳鉄は、球状黒鉛鋳鉄にオーステンパ熱処理を施し、1000 MPa 以上の引張強さが実現できる⁹⁾。近年では、欧州を中心に Si 量を通常の 2.0~2.7% よりも高めた固溶強化型高 Si フェライト基地球状黒鉛鋳鉄 (Solid solution strengthened ferritic spheroidal graphite cast iron) が開発され、構造部材への適用が検討されている^{11)~16)}。この高 Si 球状黒鉛鋳鉄は、同強度のフェライト-パーライト基地球状黒鉛鋳鉄と比較して高延性である¹⁷⁾。なお、高 Si 球状黒鉛鋳鉄は、黒鉛化助長元素の Si 量が 3.0~4.3% と高いため、製品全体がフェライト基地となり易く、図 2.3 に示すように、従来のフェライト-パーライト基地球状黒鉛鋳鉄と比較して、肉厚変動が大きい製品の部位毎 (番号で 1~19 で表示) の機械的性質のばらつきを小さくすることができる¹⁵⁾。加えて、

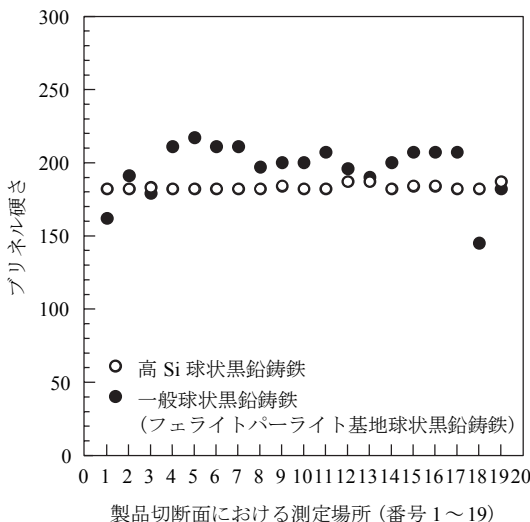


図 2.3 高Si球状黒鉛鋳鉄及びフェライト-パーライト基地球状黒鉛鋳鉄の製品部位毎のブリネル硬さ¹⁵⁾

切削性も従来と比べて良好であることが報告されている¹⁵⁾。以上のような利点より、新材料として期待され、国内と異なり、すでに EN 規格では、引張強さ 450 MPa から 600 MPa までの 3 段階の材質が規格化されている¹⁸⁾。

球状黒鉛鋳鉄の疲労強度に関しては、球状黒鉛鋳鉄には直径約 20~50 μm の球状黒鉛が多数 (面積割合で 10% 程度) 分布しており、これらが繰返し応力に対して欠陥として作用する。高サイクル疲労強度に及ぼす球状黒鉛の影響に関して、フェライト-パーライト基地球状黒鉛鋳鉄において回転曲げ疲労試験を行い、黒鉛の存在は、基地部と同等のフェライト-パーライト組織を有する鋼よりも疲労限度を低下させると結論付けた報告がある¹⁹⁾。また、フェライト基地球状黒鉛鋳鉄と同程度の硬さの鋼板について平面曲げ疲労試験を行った結果でも、疲労限度は球状黒鉛鋳鉄よりも鋼材の方が若干高い^{20), 21)}。

ところで、鋼構造物の多くは溶接によって組み立てられており、溶接部では応力集中や残留応力の影響で疲労強度が低下し、橋梁等長年供用された構造物には溶接部からの疲労き裂が進展したものが多数あり、社会的問題になっている。球状黒鉛鋳鉄品は鋳造により形状を自由に成形できるため溶接を必要とせず、溶接部を含む鋼構造物よりも疲労の観点から利点があることは、あまり知られていない。過去に実体部品の疲労試験において、球状黒鉛鋳鉄品が優れた疲労強度を有することも紹介されている⁵⁾。

以上で述べたことは、球状黒鉛鋳鉄の引張強さや疲労強度などの強度設計に必要な不可欠な特性に関しての一部分であるが、これまでに各種機械的特性とその影響因子に関しては様々な研究がなされており、明らかにされている。その蓄積により、球状黒鉛鋳鉄品の強度設計、疲労設計が行われている。一方、鋼構造物としての疲労強度との比較等、未解決の部分も残されている。

3. 球状黒鉛鋳鉄の製品開発における近年の課題

球状黒鉛鋳鉄は、機械的性質の他に、鋳造性や切削性、耐摩耗性、制振性、熱伝導性などにも優

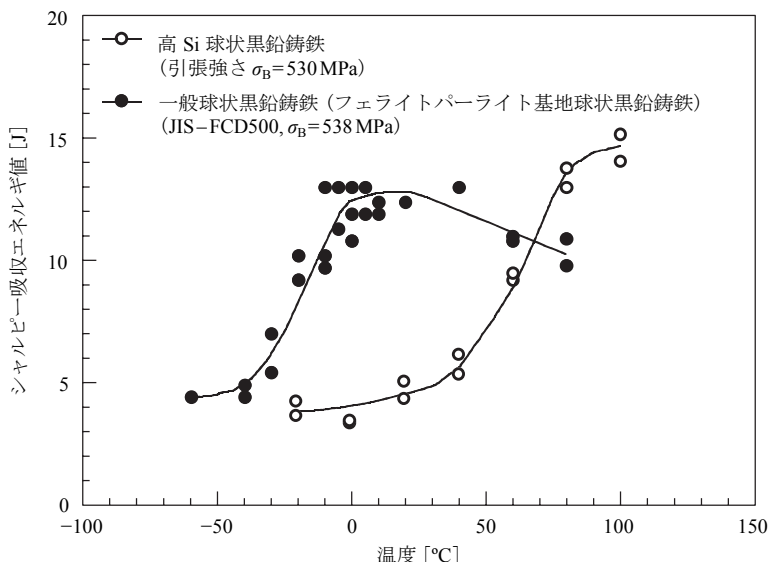


図 3.1 高 Si 球状黒鉛鋳鉄およびフェライト-パーライト基地球状黒鉛鋳鉄のシャルピー衝撃試験結果¹⁷⁾

れ、機械構造用材料としての利点が多いため、自動車分野や産業機械分野、鉄道分野などで多く用いられている⁷⁾。最近では、風力発電分野や土木・橋梁分野での用途に向けた製品開発が進められている^{11), 12), 22), 23)}。しかしながら、新用途への実用化においては、未だにユーザ、中でも設計技術者が球状黒鉛鋳鉄に対して脆いという危惧を抱いている。球状黒鉛鋳鉄は、鋳鋼などと比較して遷移温度が低いという特徴を持つにも関わらず、シャルピー吸収エネルギー値が比較的低いため、このことがもたらす先入観が大きな原因である。

また、前述した高 Si 球状黒鉛鋳鉄においても、類似した問題がある。材料中の Si 量の増加は、各種強度評価試験において延性-脆性遷移温度を高温側に移動させることが知られている^{24), 25)}。

図 3.1 に、高 Si 球状黒鉛鋳鉄のシャルピー衝撃試験結果を同強度のフェライト-パーライト基地球状黒鉛鋳鉄と比較して示す¹⁷⁾。高 Si 球状黒鉛鋳鉄では、遷移温度が上昇し、常温から低温側において、従来材よりもシャルピー吸収エネルギー値が低くなっていることが分かる。この点が懸念され、高 Si 球状黒鉛鋳鉄を適用した製品は未だに限定的である。

以上のように、球状黒鉛鋳鉄の新用途や新材料

および代替材料の実用化において、工業的に行われるシャルピー衝撃試験により、設計技術者や使用者が一発破壊（中でも脆性破壊）に対して危惧を抱く場合がある。しかしながら、シャルピー衝撃試験の吸収エネルギー値や試験方法の力学的意義は曖昧であり、シャルピー衝撃試験を設計強度評価法として用いることには、その妥当性に疑問が持たれてきた。一発破壊（中でも脆性破壊）に対し、実際の設計を考慮した実用的観点からの強度評価により、構造用材料としての安全性と適用範囲を明示することが必要不可欠である。今回はこの点に関して詳細を述べるとともに、本研究の目的と重要性について論じる。

参考文献

- 1) 日本鑄造工学会鑄物の科学史研究部会：鑄物の技術史，昭和プリント（1997）p.219.
- 2) H. Morrogh and W.J. Williams：“Graphite formation in cast irons and in nickel-carbon and cobalt-carbon alloys”，*Journal of Iron and Steel Institute*, 155（1947）p.321.
- 3) A.P. Gagnebin, K.D. Millis and N.B. Pilling：“Ductile cast iron - a new engineering material”，*The Iron Age*, 163（1949）p.77.
- 4) 中江秀雄：「鉄鑄物の技術系統化調査」，かはく技術史大系（技術系等価調査報告書），共同研究編 第6集（2013）p.37.

- 5) 矢野 満：「球状黒鉛鑄鉄部品の信頼性試験とその結果」, 鑄造工学, 77, 9 (2005) p.641.
- 6) 原田昭治, 小林俊郎, 野口 徹, 鈴木秀人, 矢野満：球状黒鉛鑄鉄の強度評価, アグネ技術センター (1999) p.ii, 24, 61, 250.
- 7) 経済産業省大臣官房調査統計グループ：「経済産業省生産動態統計年報 鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編」(2015) p.155.
- 8) 永島 昂：「戦後日本の銑鉄鑄物産業の展開と中小専門鑄物メーカー」, 中央大学経済研究所年報, 48 (2016) p.271.
- 9) 日本規格協会：JIS ハンドブック 鉄鋼 I JIS G 5502 (2001) 球状黒鉛鑄鉄品 (2013) p.1880.
- 10) 日本規格協会：JIS ハンドブック 鉄鋼 I JIS G 5503 (1995) オーステンパ球状黒鉛鑄鉄品 (2013) p.1894.
- 11) P. Mikolezic and G. Geier：“SiWind – Development of materials for offshore wind power plants of the multi megawatt range”, Casting Plant & Technology, 2/2015 (2015) p.8.
- 12) C. Bleicher, R. Wagener, H. Kafmann and T. Meiz：“SiWind – New material for offshore wind energy tubines”, GIESSEREI FORSCHUNG/International Foundry Research, 2/2015 (2015) p.30.
- 13) R. Laker：“Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron ISO 1083/JS/500–10 Provides Superior Consistent Properties in Hydraulic Rotators”, China Foundry, 6, 4 (2009) p.343.
- 14) R. Laker：“Paradigm Shift in Revised EN 1563 (GJS) Enables Improved Properties and Production Economy in Both As-Cast and Austempered (ADI) States”, Abstracts of NEWCAST Forum (2011) p.42.
- 15) H. Löblich：“Werkstoff- und Fertigungstechnische Grundlagen der Herstellung und Anwendung von hoch Silizium-haltigem Gusseisen mit Kugelgraphite”, Schlussbericht der Forschungsstelle(n), IGF-Vorhaben Nr. 41 EN (2012) p.1.
- 16) H. Löblich and W. Stets：“Die Einführung non mischkristallverfestigtem Gusseisen mit Kugelgraphit in die Industrie-eine Erfolgsstory”, Proc. Deutscher Gießereitag 2013 und 5.NEWCAST Forum (2013) p.14.
- 17) 梅谷拓郎, 池田朋弘, 須浦直之, 芦塚康佑, 根本 嵩, 高田洋吉, 大城桂作：「高 Si フェライト基地球状黒鉛鑄鉄の引張強さ, 疲労強度, 衝撃強さ」, 鑄造工学, 86, 1 (2014) p.36.
- 18) British Standards Institution：EN1563 (2011) Founding-Spheroidal graphite cast iron (2011) p.11.
- 19) 加藤容三, 中野典彦：「回転曲げを受ける球状黒鉛鑄鉄の微小き裂発生および進展挙動」, 機械学会論文集 (A 編), 50, 457 (1984) p.1565.
- 20) 塩田俊雄, 夏 青, 松岡 敬：「フェライト地球状黒鉛鑄鉄と極低炭素鋼における微小き裂発生と成長挙動」, 鑄物, 61, 2 (1989) p.85.
- 21) 松岡 敬, 塩田俊雄, 小松眞一郎：「球状黒鉛鑄鉄における疲労き裂進展挙動およびき裂長さ分布に及ぼす黒鉛の影響について」, 機械学会論文集 (A 編), 56, 526 (1990) p.1371.
- 22) 国土交通省：「平成 27 年度中間評価・革新的研究調査 (FS) 評価結果 (平成 25, 26, 27 年度採択分) 道路政策の質の向上に資する技術研究開発 研究状況報告書 (2 年目の研究対象)」(2016) p.1.
- 23) 山口栄輝, 飛永浩伸, 梅谷拓郎, 村山 稔：「鑄鉄床板の開発」, 橋梁と基礎, 51, 8 (2017) p.38.
- 24) 永井恭一, 岸武勝彦, 大和田野利郎：「フェライト球状黒鉛鑄鉄の衝撃破壊特性に及ぼすけい素量の影響」, 鑄物, 58, 5 (1986) p.350.
- 25) 永吉英昭, 安田 久, 今西幸平：「球状黒鉛鑄鉄品の衝撃特性に及ぼすけい素量の影響」, 鑄造工学, 68, 6 (1996) p.506.