



Title	フェライト質球状黒鉛鑄鉄の生長にともなう黒鉛相の変化
Author(s)	相馬, 詢; Sōma, Makoto; 長岡, 金吾 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 115, 35-46
Issue Date	1983-07-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41803
Type	departmental bulletin paper
File Information	115_35-46.pdf



フェライト質球状黒鉛鑄鉄の生長にともなう黒鉛相の変化

相馬 詢 長岡 金吾

(昭和58年3月31日受理)

Changes of Graphite Phase in Grown Ferritic S. G. Cast Iron

Makoto SÔMA and Kingo NAGAOKA

(Received March 31, 1983)

Abstract

As to the growth theory of cast iron some workers insist on an explanation by graphitization of carbides in cast iron, although the present authors have attributed the micro-structural changes of graphite to the irreversible migration of graphite brought about by during heating and cooling. Doubtlessly it is difficult to explain a linear growth of more than 10% by a simple expansion of cast iron due to the graphitization of the limited amount of pearlite.

In this investigation, s. g. cast iron pre-ferritized completely by annealing was repeatedly heated between 950°C and 600°C in vacuum with the condition of no growth by the graphitization of pearlite or carbide and changes of graphite phase were analyzed with the quantitative metallography to prove the irreversible migration of graphite followed by growth.

The total number of graphite particles increased and the ratio of the number of small sized graphite below 10 μm increased and furthermore the small sized graphite was enlarged gradually by cyclic heatings. The shape of the frequency distribution curve of graphite changed from the type with two peaks to the continuous J-type curve.

The above results clarify the validity of the theory of the irreversible graphite migration and elucidate the relation between the graphitization phenomenon and the growth.

1. 緒 言

鑄鉄を高温で繰返し加熱・冷却すると、体積の不可逆的膨張、すなわち生長 (Growth) が生じ、機械的性質が低下する。この原因については古くから酸化説、黒鉛化説、ガス説、き裂説その他が提唱された¹⁻⁶⁾ が、生長現象を統一的に説明しうる理論は得られていない。著者の一人は、球状黒鉛鑄鉄の生長に伴う黒鉛組織の変化の観察⁷⁾ および熱膨張曲線の理論解析⁸⁾ により、黒鉛と基質の間の不可逆的炭素移動に着目する新たな生長機構⁹⁾ を導出し、それが一般的理論として展開しうることを示唆した。

すでに著者らは理論の実証を目的とする種々の実験を行い、球状黒鉛鑄鉄の生長現象についてはじゅうぶん満足しうる結果を得た¹⁰⁾。特に、走査電顕と XMA による破面における生長に伴う

黒鉛の再分布および黒鉛相の空孔化の確認¹¹⁻¹³⁾と粒子計数器による定量解析に基づく黒鉛相の変化の追跡は¹⁴⁾、黒鉛の不可逆移動による生長理論に重要な根拠を与え得たと考えられる。

しかし、生長した鑄鉄の顕微鏡組織に観察される黒鉛相の変化は、生長理論の黒鉛化説⁹⁾の観点からも説明しうるとする指摘がある。これは定性的論議の域を出ないものではあるが、生長現象の研究の歴史的過程からみて、無視しえないと考えられる。本研究では、生長に伴う黒鉛相の変化を改めて定量組織学的手法¹⁵⁾によって解析した。そのために実験の試料にあらかじめ熱処理によって基質をフェライト化した球状黒鉛鑄鉄を用いるとともに、加熱・冷却後の基質もフェライト化し、パーライトの黒鉛化が直接介在しない条件で繰返し加熱による熱膨張試験を行った。一方、生長試験と同じ条件で加熱・冷却した試料の顕微鏡組織における黒鉛相の変化を粒子解析器(Q.T.M.)を用いて、黒鉛粒数、粒径および面積、粒度分布等について、定量的に測定し、解析された結果を、黒鉛不可逆移動説⁹⁾の立場から考察するとともに、著者らの生長機構の統一理論としての可能性について検討した。

2. 実験方法

実験に使用した球状黒鉛鑄鉄は低周波炉で溶解し、マグネシウム処理した後、キールブロック(25×40×250)に鑄込んだもので、化学組成を Table 1 に示した。鑄造のままの顕微鏡組織は Fig. 1-(a) に示すように基質にパーライトが現われているから、生長実験の前にフェライト化焼なましを施し、Fig. 1-(b) に示すように基質を完全にフェライト化した。

試料のフェライト化焼なましは、Fig. 2 に示す熱サイクルの二段加熱保持の黒鉛化焼なましである。黒鉛化の完了を判断するために図に示す直径23mmの丸棒試験片の両端に直径3mmの耐熱鋼片を打込み、長さの変化を測定した。

Table 1 Chemical Compositions of S. G. Cast Iron (%)

T.C	G.C	C.C	Si	Mn	P	S	Mg
3.53	3.05	0.48	3.07	0.17	0.058	0.009	0.030

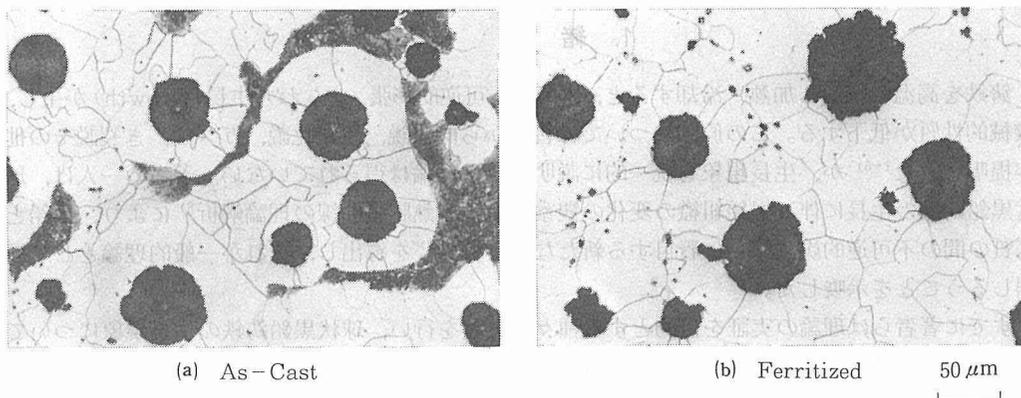


Fig. 1 Optical Microstructures of S. G. Cast Iron

二段焼なましによる線膨張は0.68%で、その後変態点の下の温度に再加熱したが長さの変化がなかった。焼なまし後の球状黒鉛鑄鉄 (Fig. 1-(b)) の基質中にパーライトの黒鉛化によると思われる黒鉛の小粒が認められ、既存の黒鉛球の輪かくが複雑になった。尚、二段焼なましによる線膨張0.68%は、鑄造のままの化合炭素量0.48%から計算される膨張量に比べて大きい¹⁶⁻¹⁷⁾。その原因には、フェライト化焼なましの950°Cまでの加熱に生長の条件 (空孔の生成と再析出) が含まれるほか、高い素のフェライト¹⁸⁾に含まれる炭素の黒鉛化などが推量される。

繰返し加熱による生長実験には、基質を完全にフェライト化した鑄鉄の中心部から削り出した直径5mm、長さ35mmの丸棒 (Fig. 3) を用い、Fig. 4に

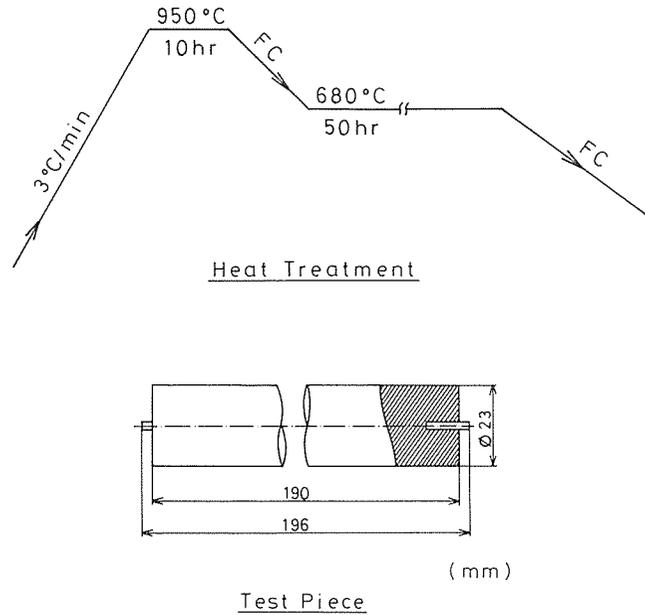


Fig. 2 Heat Treatment and Test Piece for Annealing of S. G. Cast Iron

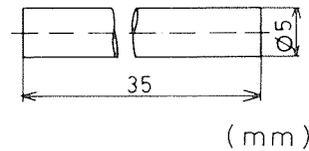


Fig. 3 Test Piece for Growth Test in Vacuum

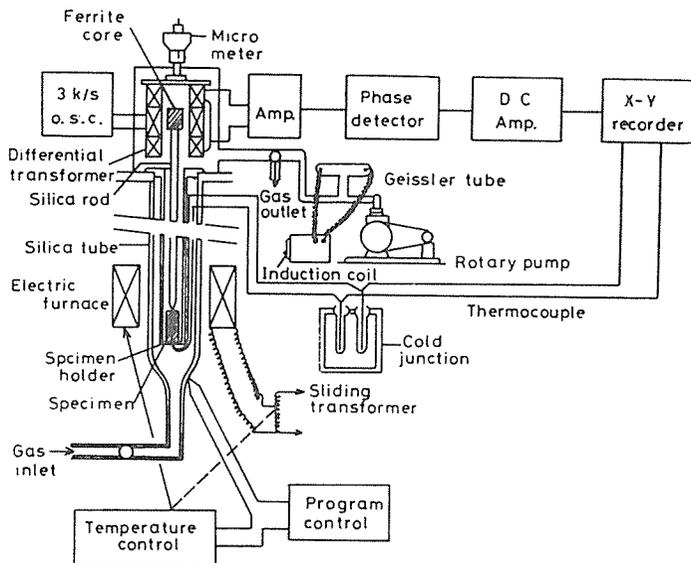


Fig. 4 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

示すたて型の熱膨張試験装置によって真空中で加熱・冷却を繰返した。真空度は 3×10^{-3} mm Hg である。生長実験の熱サイクルは Fig. 5 に示すごとくで、950°C と 600°C の間で加熱・冷却を繰返した。

生長実験は線生長 2% までの加熱・冷却を繰返した後に 680°C に 10hr 保持して黒鉛化を確認し、室温まで冷却した。つづいて試験片を再加熱し 4% 生長まで加熱・冷却を繰返した後、前と同様に 680°C - 10hr 保持を経て実験を終了した。

生長実験の熱膨張試験装置の炉内の石英管中に Fig. 6 に示す寸法の試験片を 2 個装入し、膨張

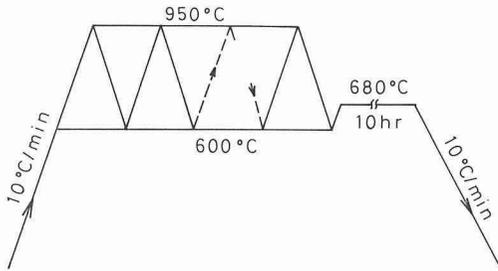


Fig. 5 Growth Test in Vacuum

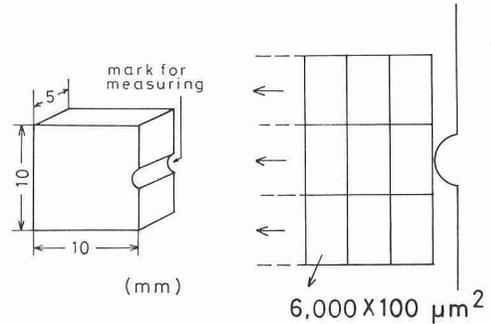


Fig. 6 Test Piece for Metallographic Analysis and Measuring Positions

試験片と同じ条件で加熱した。そして 1 個について顕微鏡組織を観察し、他の 1 個については硬度および比重を測定した。観察および測定は鑄造のまま、フェライト化、生長 2% および 4% について行った。

黒鉛相の定量分析は光学顕微鏡に装着した粒子計数器 LUZEX 450 (日本レギュレーター社製) を用いて行った。Fig. 7 は装置の外観である。測定条件は Table 2 に示すごとくで、30 視野について、黒鉛粒数、面積率および粒径のオーバーサイズ個数の測定を行った。

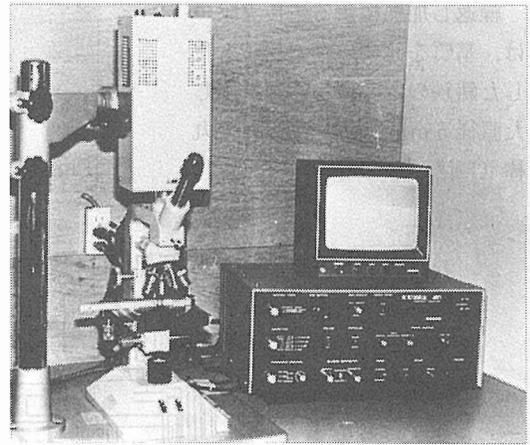


Fig. 7 Appearance of Particle Analyzer

3. 実験結果

3.1 熱膨張曲線

Fig. 8 は予め基質をフライト化した球状黒鉛鑄鉄の 950°C と 600°C の間で繰返し加熱した熱膨張曲線であり、12 回の加熱で 2%、(600°C) の線生長が生じた。その後、680°C で 10hr 保持したが、図に示すように膨張がなく、黒鉛化が完了していることが知られた。室温まで冷却した後測定した生長は 2.13% であった。

熱膨張曲線の形状は加熱において変態収縮の生じない連続変化を示し、冷却では変態域で幾分膨張の傾向を示すが、全体的に単純な曲線である。このような形状はフェライト質球状黒鉛鑄鉄の特徴¹⁹⁾であり、冷却変態で少量のパーライトの生成が推量されるが、600°C までの冷却の間に

Table 2 Conditions for Measuring Graphite Phase

Particle Analyzer	LUZEX 450
Optical Microscope	UNION Co. ME-Type
Magnification of Objective	X 10
Area of Visual Field for Measurement	6,000 X 100 μm^2
Number of Visual Field	30 (continuous)
Items of Measurement	Total Number of Graphite Particle, Fractional Area of Graphite and Over-size Count

完全フェライト化すると考えられる。繰返し加熱に伴って一サイクルごとの生長量は減ずるが、総膨張量および収縮量にも変化が認められ、生長量の低下は主としてオーステナイト域の膨張量の漸減に対応した。

真空中で2%生長した鑄鉄を再び繰返し加熱し4%まで生長させた場合の熱膨張曲線をFig. 9に示した。実験後の室温における生長量は4.12%であった。この場合も680°Cで10hr加熱保持した状態で、長さに変化が生じなかった。

熱膨張曲線の形状は2%生長までの場合とほとんど同じであるが、冷却変態における膨張傾向が消失した。また、加熱と冷却の長さの変化が生長量3%を越えると明らかに小さくなり、オーステナイトの見かけの熱膨張率が低下した。一サイクルごとの生長も次第に減じ、2%から4%までの2%の生長が15回で達成された。

3.2 顕微鏡組織

線生長2%および4%の球状黒鉛鑄鉄の顕微鏡組織をFig. 10およびFig. 11に示す。Fig. 10は腐食せず、Fig. 11は腐食を施した状態である。Fig. 10の鑄造のままおよび基質のフェライト焼なました比べると、生長による球状黒鉛の形状の変化は明りようであり、その程度は生長に従って顕著である。倍率の高いFig. 11では球状黒鉛から発達する突起状の黒鉛および基質中の独立位置における粒状小黒鉛の生成と生長に伴う肥大が著しい。これらはともに著者らが黒鉛の

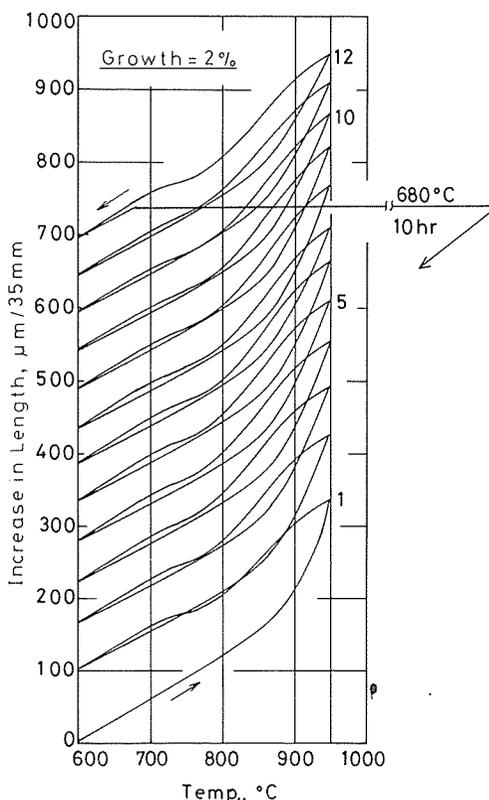


Fig. 8 Dilatometer Curve indicating 2% Growth

再分布と認識する黒鉛相の変化である¹¹⁾。真空中の繰返し加熱で、加熱前後の基質がフェライトであるから、生長に伴う黒鉛相の変化は加熱・冷却の過程のみに起因する変化と言える。

3.3 生長率

あらかじめ基質をフェライト化した球状黒鉛鉄を、950℃と600℃の間を繰返し加熱し、12回の加熱で2.13%生長し、さらに15回の加熱によって4.12%の生長に達した。平均生長率は2%までが0.18%/回、2%から4%までが0.13%/回である。

3.4 比重, 硬度

生長によって鉄の比重が Fig.12に示すごとく低下した。鑄造のままで比重7.09が、基質のフェライト化で6.90になり、2%生長で6.53、4%生長で6.16に低下した。これは比体積の増加の平均6%に相当するが、線生長2%と良い対応を示す値である。硬度(HRB)も Fig.12に示すごとく生長によって低下し、鑄造のままでHRB 90、フェライト化後に78が、2%生長で60、4%生長で36になった。

球状黒鉛鉄の生長による比重等の変化は、その内部に単純に空孔が生じ、繰返し加熱によるその拡大が見かけの体積増加をもたらすという単純な変化を推量させるものである。

3.5 黒鉛面積率, 黒鉛粒数

粒子計数器 LUZEX 450で測定した試料の顕微鏡組織における黒鉛面積率は Fig.12に示すごとく、30視野の平均値で鑄造のままで11.4%、フェライト化が14.2%、2%生長が14.5%、4%生長が14.9%であった。一方、黒鉛粒数は鑄造のままで平均113.5個/mm²、基質をフェライト化した状態で126.8個/mm²、生長2%で176.6個/mm²、生長4%で223.6個/mm²に増加した。

生長に伴う黒鉛面積率および黒鉛粒数の増加は、黒鉛相の定性的変化と球状黒鉛鉄の場合に一般に観察されるが、この実験に用いた鉄は Fig.12に示すように、黒鉛粒数の増加がきわめて著しく、本来生長量と相関が強いと考えられる黒鉛面積率の変化が低率であった。これは粒子計数器 LUZEX 450による測定値に誤差が大きかったためと推量されるが、その原因は細粒黒鉛の増加および黒鉛形状の複雑化にある。これは、標準偏差の増大からも推量された。

Fig. 13は粒径の異なる黒鉛の粒数の変化を粒径差10μmごとに測定した結果である。粒径10μm以下の黒鉛粒はフェライト化した状態で、6,000×100μm²の視野で30視野測定した合計が671個/18mm²であるが、生長2%で約2倍の1,292個/18mm²、生長4%で2.5倍の1,701個/18mm²に増加した。粒径10~20μm および20~30μmの黒鉛も生長とともに増加したが、増加の程度は粒径が大きいくほど低い。粒径が30μmより大きい黒鉛は粒径60μmまでがその数を減じ、80μmを

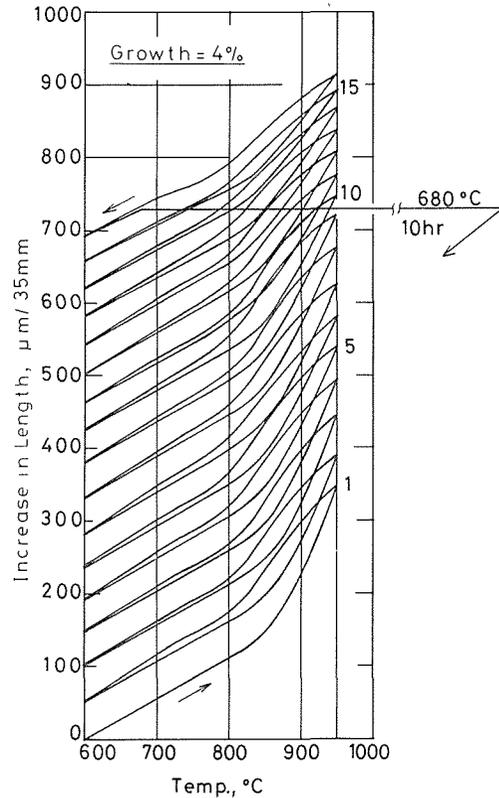


Fig. 9 Dilatometer Curve indicating more 2% Growth after the first Growth of 2%

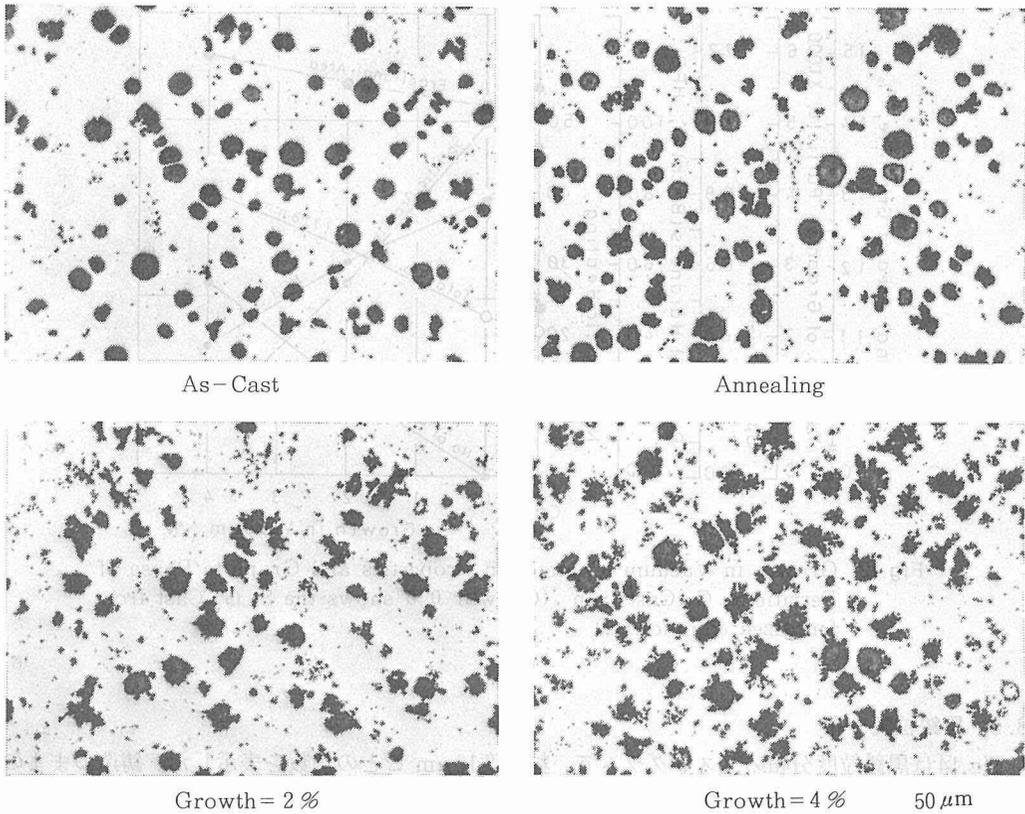
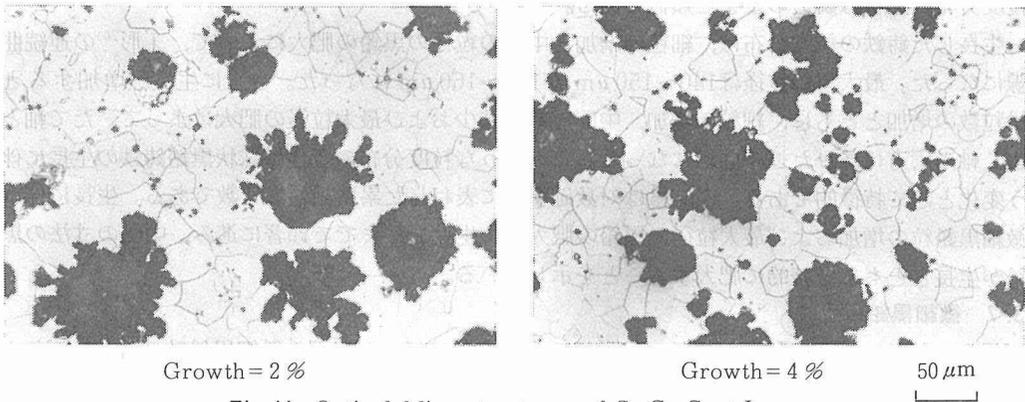


Fig.10 Optical Microstructures of S. G. Cast Iron (No Etched)

Fig.11 Optical Microstructures of S. G. Cast Iron
(Etchant: 3% Nital)

越える黒鉛は数を増した。その程度は粒径が大きいほど低下した。これらの変化は特に $30\mu\text{m}$ から $80\mu\text{m}$ の黒鉛が生長に伴って肥大したことを示す。

粒子計数器による黒鉛面積率の測定は、大きな黒鉛粒の肥大に対しては信頼性が高いと考えられるが、微細な黒鉛数が著しく増加する場合には面積率の測定値に誤差が加わるものと考えられる。また、粒子計数器 LUZEX 450の性質は黒鉛相の輪かくが複雑に変形するこの実験に対し黒鉛面積の測定に適当な性能を有していない。

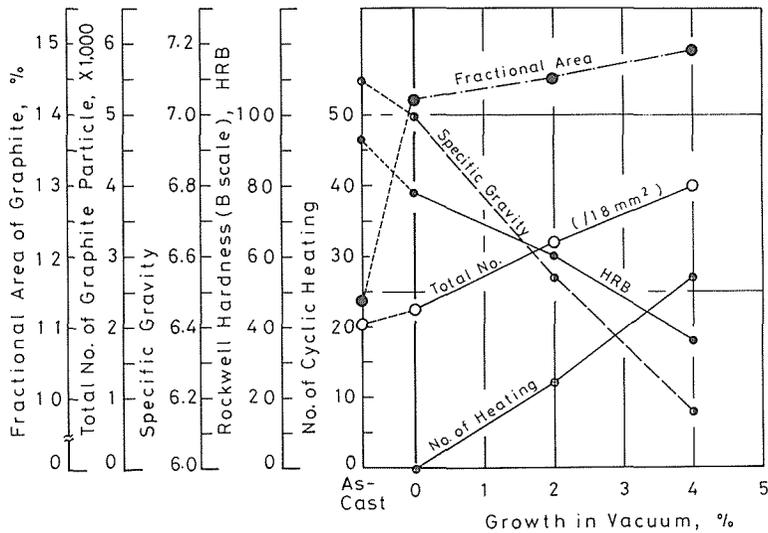


Fig.12 Growth in Vacuum—Changes in Properties and Graphite Phase of Ferritic S. G. Cast Iron (Growth 0% shows the S. G. Cast Iron ferritized completely.)

3.6 黒鉛粒度分布

Fig.14は黒鉛粒度分布のヒストグラムで、粒径度 $10\mu\text{m}$ ごとの個数を表示した。鑄造のままの鑄鉄では $10\mu\text{m}$ 以下の粒径の黒鉛が最も多く、次に $30\sim 40\mu\text{m}$ の粒径が極大になる粒度分布である。フェライト化処理によって $10\mu\text{m}$ 以下の黒鉛が増加し、 $30\sim 40\mu\text{m}$ の黒鉛の粒数が低下するが、粒度分布の形状は鑄造のままと類似である。

生長した鑄鉄の粒度分布は、細粒の増加と中間の粒径の黒鉛の肥大によって、J形²⁰⁾の連続曲線になった。最大黒鉛粒径は $140\sim 150\mu\text{m}$ が $150\sim 160\mu\text{m}$ になった。さらに生長が増加すると総粒数の増加とともに、細粒の増加、中間粒数の減少および最大粒径の肥大によって、たて軸とよこ軸の両方に伸びた連続曲線になった。このような粒度分布の変化は球状黒鉛鑄鉄の生長に伴う変化として特徴的である。Fig.15は対数確率紙に表わした累積相対粒度数である。生長に伴う微細黒鉛粒の増加および最大粒径の黒鉛の肥大が、生長2%までで顕著に進み、中間の寸法の黒鉛が生長とともに継続的に肥大することを示している。

3.7 微細黒鉛の生成

繰返し加熱による球状黒鉛鑄鉄の黒鉛相の変化として $10\mu\text{m}$ 以下の微細黒鉛粒の著しい増加が測定され、生長が進むにつれて肥大することが明らかになった。さらに、これを微細黒鉛の生成と肥大として確かめるために粒径寸法 $2\mu\text{m}$ ごとのオーバーサイズカウントを行い、生長に伴う粒数の変化を測定した。Fig.16は微細黒鉛粒の粒度ヒストグラムである。

粒子計測による $2\mu\text{m}$ 以下の粒径の黒鉛を新たに生成した黒鉛粒とみなすならば、生長2%で黒鉛粒が1.9倍になり、生長4%で2.4倍に増加した。また、粒度分布曲線の $2\mu\text{m}$ 以下の側は黒鉛の生成を示すと同時に、 $10\mu\text{m}$ の側が黒鉛粒の生長に伴う肥大を表わしている。

Fig.17は粒径ごとの黒鉛粒の生長に伴う粒数の増加倍率を示す。 $2\mu\text{m}$ 以下の黒鉛粒変化が、それ以上の粒径の黒鉛粒の変化と異なる傾向を表わす。また、黒鉛粒径が大きいほど粒数の増加が著しい。これらは、黒鉛粒の生成と微細黒鉛粒の肥大を表わすと考えてよいであろう。

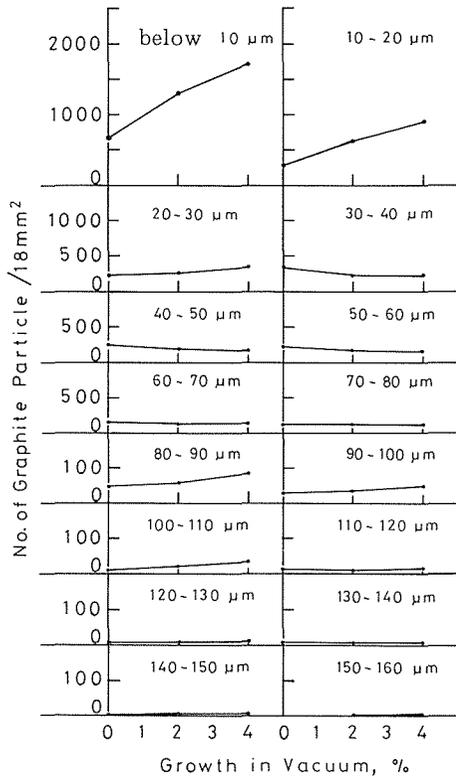


Fig.13 Changes in Number of Graphite Particle with Growth for every $10\mu\text{m}$ dia.

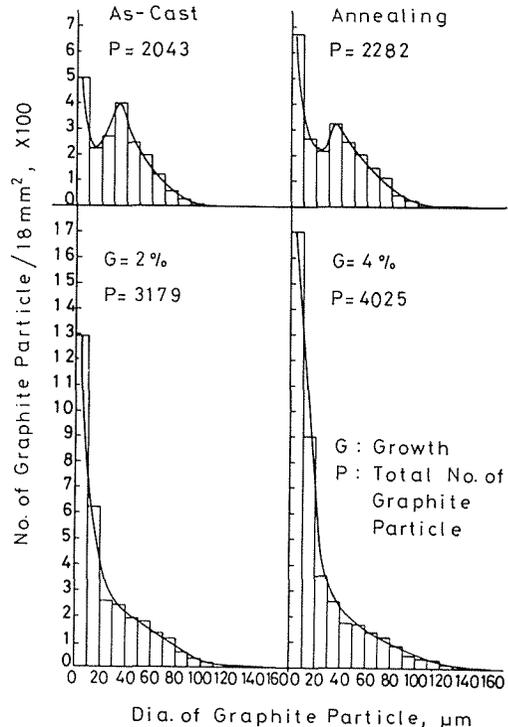


Fig.14 Histogram of S. G. Cast Iron with Growth

4. 考 察

球状黒鉛鑄鉄を真空中で 950°C と 600°C の間を繰返し加熱し、4%まで生長させた鑄鉄の黒鉛相の変化を粒子計数器 LUZEX 450 を用いて黒鉛面積率および粒数、粒度について定量的に解析した。その目的は生長した球状黒鉛鑄鉄の顕微鏡組織に定性的に観察される黒鉛相の変化として黒鉛粒数の増加と黒鉛粒の肥大を、著者らの提唱する黒鉛の不可逆移動による生長機構⁹⁾に従って理解することである。この場合に、黒鉛相の変化が鑄鉄におけるパーライトまたは炭化物の黒鉛化現象²¹⁾として説明できる可能性があり、古くからの生長理論としての黒鉛化説³⁾が提唱されていることを考慮しなければならない。したがって、この研究ではフェライト質の球状黒鉛鑄鉄を試料に用い、あらかじめ黒鉛化焼なましを施すとともに、生長試験の加熱・冷却の前後の基質が完全にフェライトになる条件で実験を行った。すなわち、炭化物またはパーライトの単純な黒鉛化による膨張を排除した条件で鑄鉄の生長が観察されたと言えよう。

もちろん、熱膨張曲線 (Fig. 8) によれば冷却変態の形状から基質にパーライトの生成が推量されたが、冷却中に分解したことが 680°C における保持中に膨張の生じなかったことによって確かめることができた。生長が進むに従って冷却変態のパーライトの生成が熱膨張曲線 (Fig. 9) で確かめ難くなるが、生長はさらに継続した。

著者らが提唱した生長機構では加熱における黒鉛相の空孔化と冷却における黒鉛の再分布析出を鑄鉄の生長サイクルとするものである。したがって、炭化物またはパーライトの黒鉛化は、黒

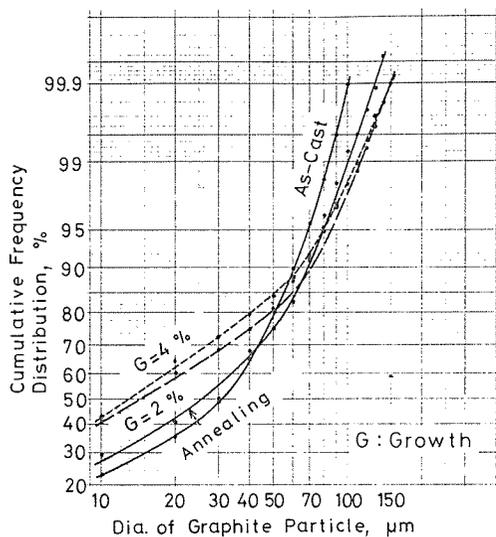


Fig.15 Relation between Dia. of Graphite Particle and Cumulative Frequency Distribution

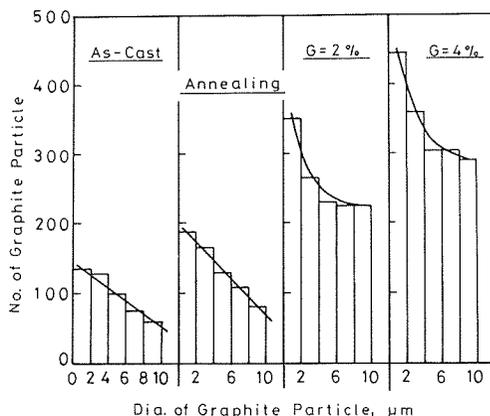


Fig.16 Histogram of S. G. Cast Iron with Growth below 10 μm dia.

鉛の再分布過程としてきわめて重要である。しかし鑄鉄に含まれる有限量の炭化物の黒鉛化による膨張単独では、線生長10%を越える不可逆膨張¹⁰⁾を説明することはできない。著者らは、加熱・冷却の繰返しごとに冷却変態でパーライトが生じ、これが黒鉛化することによって生長が継続すると考える。したがって、黒鉛化現象は黒鉛不可逆移動説に吸収されるから、独立の黒鉛化説³⁾は生長理論として成り立たないのである。この研究において基質を完全にフェライト化(黒鉛化)して生長実験を行ったが、その生長率が2~4%の生長に対して平均0.18%/回~0.13%/回で、比較的高い生長を示した¹⁰⁾。これは黒鉛化を増すことによって生長が増大することを意味するが、黒鉛不可逆移動説では移動炭素量の増加として理解することができる。

球状黒鉛鑄鉄の生長に伴う黒鉛相の変化の定量解析を黒鉛面積率の黒鉛粒数、粒度について測定したが、面積、粒数の増加および粒度分布の変化にすでに報告した結果¹⁴⁾と同じ傾向が得られた。しかし、この研究では使用した粒子計算器LUZEX 450の性能に限界があり、特に黒鉛面積率については生長との間に定量的解析に満足できる信頼性が得られなかった。すなわち、この研究では生長率が比較的大きく、顕微鏡組織の黒鉛粒数の増加がきわめて著しかったから、黒鉛面積の測定に誤差が大きくなったものと考えられる。また、黒鉛球の輪かくが著しく複雑化することも、面積の測定を不正確にするものと言えよう。これに対して、黒鉛粒数の測定はチェックマーク(フラッグ)が表示される信頼性の高い方法であった。

この研究に用いた球状黒鉛鑄鉄は鑄造のままで黒鉛粒数が平均113.5個/mm²であり、どちら

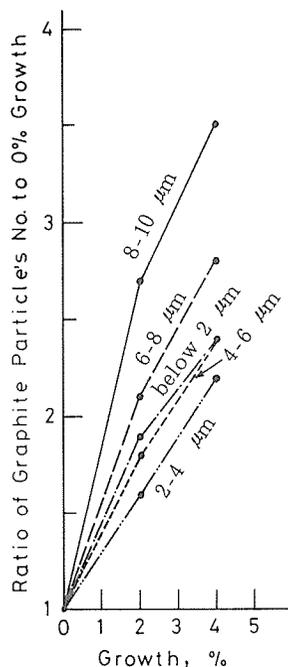


Fig.17 Increasing Tendency of Graphite Particles No. below 10 μm with Growth

かと言えば粗粒である。黒鉛の約24%, 27.7個/mm²が10 μ m以下である。基質を黒鉛化焼なましによってフェライト化することによって黒鉛粒数が126.8個/mm²に増加し, 10 μ m以下が約29%, 37.3個/mm²になった。すなわち総個数の増加割合よりも微小黒鉛のそれの方が大きかったが, 基質のパーライトおよび炭化物の黒鉛化によることが顕微鏡的にも明らかであった。

生長2%で黒鉛粒数が約1.4倍の176.6個/mm²に増加し, その40.6%, 71.8個/mm²が10 μ m以下であった。また生長4%で黒鉛粒数がフェライト化の1.76倍, 223.6個/mm²に増加し, その42.3%, 94.5個/mm²が10 μ m以下であった。このような黒鉛粒数の増加と微小黒鉛の比率の増加は, 生長に伴って新たな黒鉛が生成することを示すものである。これを確かめるために, 粒径10 μ m以下の黒鉛について粒径差を2 μ mとして粒度の変化を調べた結果は, 同様に2 μ m以下の黒鉛粒の増加が顕著であり, 生長に伴う黒鉛粒の生成を確かめることができた。

一方, 生長に伴って顕微鏡組織に観察される黒鉛粒の最大径が大きくなり, フェライト化の最大粒径140~150 μ mが, 生長2%および4%で150~160 μ mになった。中間の粒径の黒鉛の粒数では, 80~90 μ mより大きい黒鉛と30 μ mより小さい黒鉛が増加した。このような変化は黒鉛粒の生長に伴う肥大を示すが, 肥大の傾向に粒径の影響があるものと考えられる。粒度分布曲線は, 細粒から粗粒までならかな連続曲線になった。

球状黒鉛鑄鉄の生長に伴う粒度およびその分布の定量測定によって, 微小黒鉛が生成し繰返し加熱によって逐次肥大することが明らかになった。これは著者らの鑄鉄の生長が黒鉛の再分布を伴って進行するとする理論を支持すると言える。最大粒径が大きくなるのは黒鉛が既存の黒鉛を核としてその表面の近くに再分布するためであり, 基質中に新たに生じた独立の再分布黒鉛粒もその後の繰返し加熱の間に同様に肥大する。

黒鉛粒度の解析によって確かめられた黒鉛の再分布も広義の鑄鉄における黒鉛化現象である。しかし, これには必ずしも炭化物の熱分解を要しない。オーステナイトからの黒鉛の直接的析出でじゅうぶんである。したがって, 従来の生長理論における黒鉛化膨張に依存する黒鉛化説は成立しない。

球状黒鉛鑄鉄の生長に伴う黒鉛の再分布が, 粒子解析器による黒鉛粒度の定量解析によって黒鉛粒の増加と肥大として明確にすることができた。残念ながら, この研究では黒鉛面積率の変化を定量的に生長に結合することができなかったが, その理由は生長率の大きなフェライト質の球状黒鉛鑄鉄の生長が, 著しい黒鉛粒数の増加に依存したことによる測定誤差にあると考えられる。すでに, パーライト質の生長率の小さい球状黒鉛鑄鉄では, 黒鉛面積率と生長の間にかなりよい定量的関係が解析されている。したがって, 球状黒鉛鑄鉄に対する著者らの生長理論の妥当性はじゅうぶん高いものと言ってよいであろう。

著者らは黒鉛の不可逆移動による生長機構を球状黒鉛鑄鉄に限らず一般的にねずみ鑄鉄の生長にまで適用することを意図している。この研究では, 真空中で生長実験を行ったが, 球状黒鉛鑄鉄とねずみ鑄鉄の最も重要な差異は生長における加熱ふん囲気的感受性である。したがって, 球状黒鉛鑄鉄に対して確かめることのできた生長理論は, 基本的にねずみ鑄鉄に適用しうるものであり, 研究の方向としては加熱ふん囲気の影響によって, 黒鉛の不可逆移動がどのように, どの程度の影響を受けるかにしぼられる。その意味でこの研究を球状黒鉛鑄鉄を対象に進めてきた著者らの生長理論の研究の最終段階に位置づけたいと思う。

5. 結 言

著者らは, 球状黒鉛鑄鉄の生長による黒鉛相の変化から, 黒鉛の不可逆移動による生長機構を

導き、その統一理論としての可能性を追及し続けた。すでに、加熱ふん囲気の影響を無視できる球状黒鉛鑄鉄の生長について、黒鉛相の空孔化と再分布を実証とする生長理論を提唱している。この研究では、その終段として粒子計数器を用いてフェライト質球状黒鉛鑄鉄の生長に伴う黒鉛の再分布を定量解析し、従来の黒鉛化説³⁾に基づく定性的論議を排除し、黒鉛化現象と生長の関係を明らかにした。得られた結果は次のごとくである。

- 1) 炭化物またはパーライトの黒鉛化による膨張を排除した条件でフェライト質の球状黒鉛鑄鉄を真空中で繰返し加熱をすると、比較的大きな生長率で不可逆膨張、すなわち生長 (Growth) が生じた。
- 2) フェライト質球状黒鉛鑄鉄の生長に伴う黒鉛相の定量測定により、黒鉛粒数の増加が明らかになったが、特に微小黒鉛 (10 μm 以下) の増加傾向が著しかった。これは新たな黒鉛の生成を示す。また、微小黒鉛は逐次肥大した。
- 3) 生長に伴って黒鉛粒の最大径が大きくなったが、これは黒鉛がき存の黒鉛を核としてその表面の近くに再分布するためである。
- 4) 生長に伴って黒鉛総粒数が増加するとともに、細粒の増加、中間粒数の減少および最大粒径の肥大によって黒鉛粒度分布曲線はたて軸とよこ軸の両方に伸びた連続曲線になった。
- 5) 粒子計数器 LUZEX 450 による黒鉛面積率については、生長との間に定量的解析に満足できる信頼性が得られなかった。これは生長率が大きく、黒鉛粒の増加がきわめて著しかったこと、さらに黒鉛球の輪かくが著しく複雑化したために、黒鉛面積の測定に誤差が大きくなったものと考えられる。
- 6) フェライト質球状黒鉛鑄鉄の生長に伴う黒鉛相の変化の定量組織学的解析の結果、著者らの黒鉛の不可逆移動説を支持する結果が得られたとともに、黒鉛化説に基づく定性的論議を排除して、黒鉛化現象と生長との関係を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) A. E. Outerbridge: Trans. A. I. M. E., 35 (1905), p. 223.
- 2) H. F. Rugey & H. C. H. Carpenter: Journ. Iron & Steel Inst. II, (1909), p. 29.
- 3) J. H. Andrew & R. Higgins: Journ. Iron & Steel Inst. II, 112 (1925), p. 167.
- 4) 大河内, 佐藤: 東大工学部紀要, 10 (1920), 3, p. 53.
- 5) C. Benedichs & Löfquist: Journ. Iron & Steel Inst. I, (1927), p. 603.
- 6) 菊田: 東北大理科報告, 11 (1922), p. 17.
- 7) 長岡: 鉄と鋼, 39 (1953), p. 1250.
- 8) 長岡, 荻原: 鉄と鋼, 53 (1967), 2, p. 131.
- 9) Kingo Nagaoka: AFS Cast Metals Research Journal, (1969), 9, p. 145.
- 10) 相馬, 長岡: 鑄物, 43 (1971), 2, p. 108.
- 11) 長岡, 相馬: 鑄物, 49 (1977), 12, p. 26.
- 12) 相馬, 長岡: 鑄物, 54 (1982), 12, p. 15.
- 13) Friedrich Riedl: Praktische Metallographie, VI (1968), p. 495.
- 14) 相馬, 長岡: 鑄物, 投稿中.
- 15) 牧島邦夫訳: 計量計態学 (1972), p. 227, 内田老鶴圃新社.
- 16) J. W. Grant: Foundry Trade Journal, Sept. (1953), 3, p. 281.
- 17) H. T. Angus: Cast Iron II (1976), p. 215, Butterworths & Co. Ltd.
- 18) 日本鑄物工業会編: 鑄鉄の材質 (1975), p. 234, コロナ社.
- 19) 長岡: 北海道立工業試験場報告, 165 (1961), 3, p. 72.
- 20) 佐藤: 推計学の手ほどき (1977), p. 101, 南江堂.
- 21) 日本金属学会編: 新版材料篇 鑄鉄 (1963), p. 26.