

## 画像解析を用いた球状黒鉛鑄鉄の黒鉛球状化率の評価方法

青木 隆謙<sup>\*1</sup>, 旗手 稔<sup>\*2</sup>, 信木 関<sup>\*2</sup>

### Evaluation Method of Graphite Nodularity in Spheroidal Graphite Cast Iron Using Image Analysis

Takanori AOKI<sup>\*1</sup>, Minoru HATATE<sup>\*2</sup> and Tohru NOBUKI<sup>\*2</sup>

The mechanical and physical properties of spheroidal graphite cast iron are strongly influenced by the graphite shape when matrix structure is the same. Therefore, the measurement of graphite nodularity, which evaluates the roundness of graphite, is a very important evaluation standard. Recently, image processing technology has been developed and inexpensive image processing software is on the market, so it is often used. However, it is note that the measurement method for image processing differs depending on the software. Furthermore, the method of calculating the graphite nodularity using image analysis has some problems.

Therefore, examined the difference in measured values caused by image processing software and established a measurement method that doesn't cause human error.

Key word : graphite nodularity, image analysis, JIS G 5502, spheroidal graphite cast iron

#### 1. 緒言

一般に、球状黒鉛鑄鉄は晶出した黒鉛の周囲をフェライトが取り囲み、残りの鉄基地にパーライトが析出することから、ブルズアイ(Bull's eye)という、いわゆる雄牛の目を模した組織で構成される。そのため、黒鉛を球状に晶出させれば、引張強さや0.2%耐力及び伸びなどの機械的性質や、熱伝導率や電気抵抗及び熱膨張係数や内部摩擦などの物理的性質はフェライトとパーライトの体積割合に強く依存する。ここでいう球状黒鉛とは、形状がJIS規格(JIS G 5502)の黒鉛球状化率(以下、球状化率とする)が80%以上を有し、晶出した黒鉛は個々に独立して分散していることが必要であると定義される。このため、球状化率の測定は球状黒鉛鑄鉄を製造する上で非常に重要な項目であり、JISで正確に定義されているが、球状黒鉛鑄鉄品のJISが1961年に制定されて以来、その測定方法も修正されている経緯がある<sup>(1)</sup>。

現行のJIS規格には

(a)倍率は100倍とし、5視野について形状の分類を黒鉛粒の形状分類図(図1)に基づいて行う。

(b)1.5mm(実際の寸法15 $\mu$ m)以下の黒鉛及び介在物は、対象としない。

(c)黒鉛粒の形状分類図の形状V及びVIの黒鉛粒数の全黒鉛粒数に対する割合(%)を求め、その平均値を黒鉛球状化率とする。

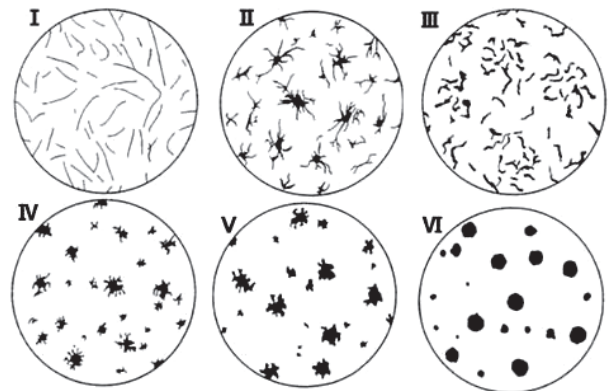


図1 黒鉛粒の形状分類図

(d)画像処理によって算出する場合には、(a)～(c)に準じて行う。と定義されている。

近年ではPCやイメージセンサが発展し、比較的容易に画像解析を行う環境を整えることが出来るため、画像解析によって球状化率を解析する方法が一般的になりつつある。画像解析を用いることで目視による評価と比較して測定誤差を減らすことができる一方で、各解析ソフトや処理条件によって算出される値は大きく変動してしまうこともある。

<sup>\*1</sup>近畿大学大学院システム工学研究科

<sup>\*2</sup>近畿大学工学部機械工学科

<sup>\*1</sup> Graduate School of Systems Engineering, Kindai University

<sup>\*2</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kindai University

例えば、画像解析を用いて球状化率を算出する際は、図1の形状Ⅰ～Ⅳと形状Ⅴ～Ⅵの2種類に分類する閾値をソフト内で設定する必要があるが、この閾値について規格では触れられていないため、解析ソフトや解析を行う技術者によって統一した評価ではなく、経験的な感覚に任せられる現状がある。また、平本<sup>(2)</sup>らは黒鉛粒数に及ぼすレンズ倍率や解析から除外する黒鉛の最大直径（以下、アンダーカット直径とする）やイメージセンサの違いが黒鉛粒数の解析値に及ぼす影響を調査した結果、解像度（単位は画素/mmとする）によって黒鉛粒数の解析値が変動し、最大直径が7μm以下の黒鉛粒を対象としたときに解像度の影響が顕著になると報告している。

鉄の物理的及び機械的性質に及ぼす影響は黒鉛粒数よりも球状化率の方が大きく、解像度とアンダーカット直径の関係を整理しておくことはJIS規格の盲点であり、喫緊の課題であるといえる。

本研究では、画像解析を用いて球状化率を算出する際に黒鉛粒の形状分類図の形状Ⅰ～Ⅳと形状Ⅴ～Ⅵを分類する閾値の決定方法と、解像度とアンダーカット直径が球状化率に及ぼす影響を調査した。

2. 実験方法

2.1 黒鉛形状の評価方法

黒鉛球状化率の評価方法として、①面積率法、②形状係数法<sup>(3)</sup>、③JIS G 5505のCV鋳鉄における球状化率算出方法（以下、CV法とする）<sup>(4)</sup>がある。

まず、黒鉛形状の評価に際して、図2の各球状化率算出の定義図に示すように、ある黒鉛の外接円の面積をSo、黒鉛の面積をS、黒鉛の最大直径をLm、黒鉛の外周長をLとして定義した。①面積率法による球状化率は、黒鉛の面積(S)と黒鉛の最大長(Lm)を直径とする外接円の面積(So)を測定しその面積比を求め、面積率法による球状化率をS' [%]とすると(1)式となる。

$$S' = \frac{S}{S_0} \times 100 [\%] \tag{1}$$

②形状係数法は対象とする黒鉛の面積(S)と外周長(L)を測定し、形状係数(K)を求める。形状係数は $K=S/L^2$ で表し、黒鉛が真円の場合は $S=\pi r^2, L=2\pi r$ であり真円の形状係数 $K_0=1/(4\pi)$ となるのでこの方法による球状化率 $K'$

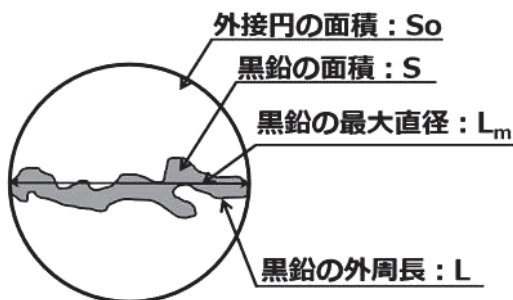


図2 各球状化率を算出する黒鉛の定義図

は(2)式で算出される。

$$K' = \frac{K}{K_0} \times 100 = 4\pi K \times 100 [\%] \tag{2}$$

③CV法は黒鉛が球状からCV状へ変化する連続性を踏まえて、球状黒鉛鋳鉄品とCV黒鉛鋳鉄品との間で整合性を持つように策定された算出方法である。算出方法は、丸さ係数R (=S/So) を算出した後、表1に示したように6種類の黒鉛クラスに分類し、各クラスの黒鉛粒子の粒数割合に各クラスの形状係数(η) を乗じた値で得られ、CV法による球状化率R' は(3)式で算出される。

ここで、分類した黒鉛クラスⅠ～Ⅵは図1の形状Ⅰ～Ⅵに相当する。

$$R' = \frac{0.00n_1 + 0.05n_2 + 0.20n_3 + 0.40n_4 + 0.90n_5 + 1.00n_6}{n} \times 100 \tag{3}$$

n: 全黒鉛粒数

n<sub>1</sub>: クラスⅠに分類された黒鉛粒数

n<sub>2</sub>: クラスⅡに分類された黒鉛粒数

n<sub>3</sub>: クラスⅢに分類された黒鉛粒数

n<sub>4</sub>: クラスⅣに分類された黒鉛粒数

n<sub>5</sub>: クラスⅤに分類された黒鉛粒数

n<sub>6</sub>: クラスⅥに分類された黒鉛粒数

表1 丸さ係数における黒鉛の分類と形状係数

黒鉛区分	丸さ係数 (R)	形状係数 (η)
クラスⅠ	0.00 ≤ R ≤ 0.10	0.00
クラスⅡ	0.10 ≤ R ≤ 0.20	0.05
クラスⅢ	0.20 ≤ R ≤ 0.30	0.20
クラスⅣ	0.30 ≤ R ≤ 0.55	0.40
クラスⅤ	0.55 ≤ R ≤ 0.85	0.90
クラスⅥ	0.85 ≤ R ≤ 1.00	1.00

以上の3つの球状化率算出方法を用いて黒鉛形状を評価した。

2.2 解析条件及び手順

画像解析には、「画像解析ソフトA像くん Ver. 2.5(旭化成エンジニアリング)」と「黒鉛球状化率測定 Ver. 3(日鉄テクノロジー)」の2種類のソフトを使用し、図1の形状分類図を取り込んだ。取り込み時の解像度は画像解析ソフトA像くん Ver. 2.5、球状化率測定 Ver. 3共に、1170画素/mmであった。取り込んだ画像を処理ソフト内の自動二値化機能を用いて二値化処理し、黒鉛形状の評価を行った。得られた黒鉛形状の評価結果から形状Ⅰ～Ⅳと形状Ⅴ～Ⅵを識別できる閾値を決定した。なお、形状分類図中の端で切れている黒鉛と黒鉛粒径が15μm以下の黒鉛粒は解析から除外した。

閾値を導出した後、画像の解像度が球状化率に与える影響を調査するために、黒鉛形状の異なる4種類の黒鉛粒(後述する図9参照)について解像度(大きさ)を変動さ

せて球状化率に与える影響を調査した。さらに、アンダーカット直径が球状化率に与える影響を調査するために、黒鉛形状及び粒数の異なる実際の組織写真6種類を解析し、アンダーカット直径を 15 $\mu\text{m}$ から 1 $\mu\text{m}$ ずつ小さくしていく、球状化率がどのように変化するかを確認した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 解析ソフトの違いによる球状化率測定結果の相違

A像くん Ver. 2.5 と球状化率測定 Ver. 3 を用い、図 1 に示した黒鉛粒の形状分類図の形状Ⅲを解析し、面積率法による球状化率と形状係数法による球状化率の関係を図 3 に示す。図中には黒鉛粒数と黒鉛総面積をそれぞれ併記した。両手法による球状化率を比較すると、解析ソフト及び条件が球状化率に与える影響は少ない結果となったものの、球状化率測定 Ver. 3 の形状係数法による球状化率が A 像くん Ver. 2.5 よりやや高めに算出された。また、黒鉛粒数は A 像くん Ver. 2.5 が 58 個であるに対し、球状化率測定 Ver. 3 が 57 個と A 像くん Ver. 2.5 の方が多めに測定された。一方、黒鉛総面積は、A 像くん Ver. 2.5 が 24301 $\mu\text{m}^2$  であるのに対して、球状化率測定 Ver. 3 は 34268 $\mu\text{m}^2$  であり、球状化率測定 Ver. 3 の方が高めに測定された。これは図 4 に示すように、二値化処理時の解像度の違いと、膨張処理/縮退処理の違いによるものと考えられる。解像度が高い場合の方が元の形状に近い形状が二値化後も得ることが出来る<sup>(2)</sup>。膨張処理が行われた際は、画素中に一部でも黒鉛粒が含まれていれば黒鉛として判定され元の黒鉛粒よりは一層分大きくなる。一方、収縮処理が行われた際は画素中を黒鉛が満たしていなければ黒鉛として判定されず、元の黒鉛粒よりは一層分小さくなり、黒鉛形状によっては、本来は 1 つの黒鉛粒を 2 つの黒鉛粒として判別してしまう。

このように、球状化率測定 Ver. 3 は黒鉛の面積を膨張処理が施されることによって、大きめに測定し、その結果と

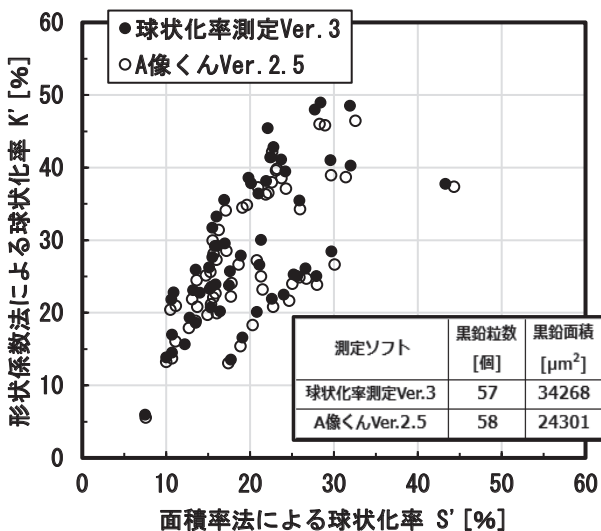


図 3 面積率法による球状化率と形状係数法による球状化率の関係 (形状Ⅲ)

して図 3 に示したように、やや球状化率が高めに算出される傾向となる。使用する画像処理ソフトや解析方法によって解析結果に違いが発生するので注意が必要である。

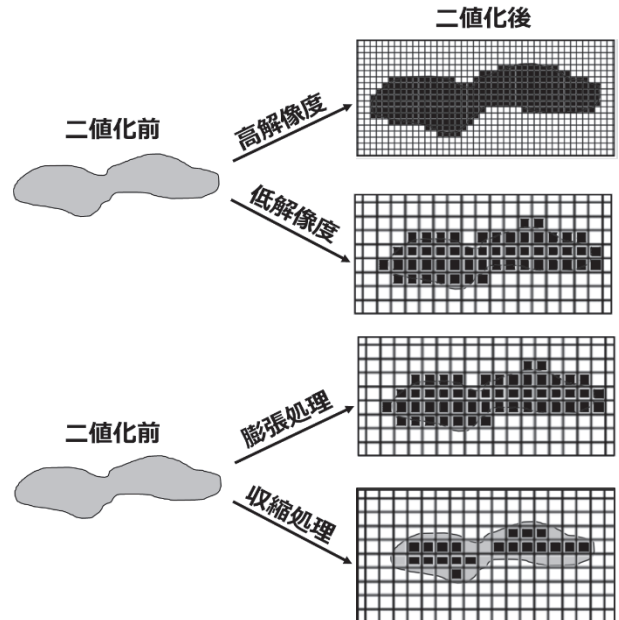


図 4 解析条件の違いによる処理結果の違い

#### 3.2 形状Ⅰ～ⅣとⅤ～Ⅵの識別する閾値の導出

以下の実験では A 像くん Ver. 2.5 を用いて実験を行った。図 5 に図 1 の形状分類図のすべての形状を画像処理測定し、形状係数法による球状化率と面積率法による球状化率の関係を示す。両算出法の関係は、正の相関関係にあるものの、両者の球状化率の乖離は大きく、形状ⅡとⅣにおいては面積率法が、形状ⅠとⅢとⅥでは形状係数法が高めに解析結果が出る事が分かる。図 6 の各形状の球状化率分布範囲をみると、形状係数法、面積率法共に各形状を明確に区分することはできておらず、図中に点線で囲った形状係数法が球状化率 15.1%～50.2%の間で、面積率法が球状化率 31.7%～55.3%の間で重なっており、分布の重なりが大きい形状係数法は閾値の導出には不向きであると考えられる。

また、表 2 に示した CV 法による各黒鉛クラス分類と球状化率においては、形状Ⅰを除いた各形状において 2～3 の黒鉛クラスが混在している。また、CV 法において、丸さ係数 R が 0.55 以上の場合クラスⅤ及びⅥに当てはまるが、実際の解析結果では形状Ⅴにおける黒鉛クラス分類は、クラスⅣに分類された黒鉛粒が 12 個、クラスⅤに分類された黒鉛粒が 5 個となっているので、CV 法の丸さ係数による黒鉛粒の分類を根拠とする、すなわち表 1 に示したように丸さ係数 0.55 以上を形状ⅤとⅥと定義することは実際の分類図の解析結果と一致しておらず、JIS 規格に準拠した算出方法であるとは言えないと考えられる。

ここで、形状係数法と面積率法において、形状Ⅰ～Ⅳと形状Ⅴ、Ⅵを識別できる閾値を定めることができないかをさらに検討するために、各算出法で形状Ⅳ及び形状Ⅴにお

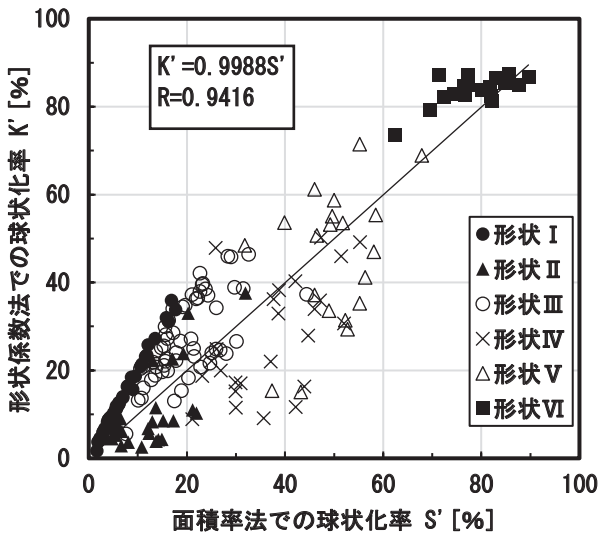


図5 形状係数法による球状化率と面積率法による球状化率の関係

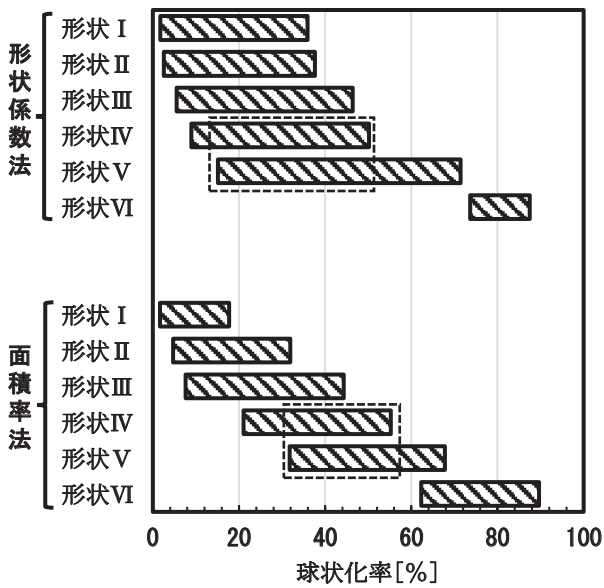


図6 各形状の球状化率分布範囲

表2 CV法による各黒鉛クラスのカテゴリと球状化率

形状分類	解析結果						球状化率 R' [%]
	I	II	III	IV	V	VI	
形状 I	19	0	0	0	0	0	0.0
形状 II	7	10	3	0	0	0	5.5
形状 III	1	28	20	3	0	0	12.7
形状 IV	0	0	8	15	0	0	33.7
形状 V	0	0	0	12	5	0	54.7
形状 VI	0	0	0	0	17	2	91.1

ける各黒鉛の球状化率と黒鉛面積の関係を確認した。図7に形状係数法及び面積率法による球状化率と黒鉛面積率の関係を示す。形状係数法の場合、黒鉛面積が同程度のものを比較すると、形状IVの球状化率が低めに、形状Vの球状化率が高め算出され、形状IVと形状Vを明確に分類することができる。しかし、破線で示した形状IVと形状Vの閾値は、黒鉛面積が  $500 \mu\text{m}^2$  以下の領域では45%程度であるが、黒鉛面積が増加するに従って球状化率は減少し、黒鉛面積が  $2000 \mu\text{m}^2$  以上の領域では10%程度と、閾値を黒鉛面積によって大きく変動させないと識別できない。一方、面積率法の場合では、形状係数法と比較して、明確には形状IVと形状Vを分類できていないが、形状Vの面積率法での球状化率の最小値である31.7%から形状IVの面積率法での球状化率の最大値である55.3%の領域に含まれる黒鉛粒の面積率法での球状化率の平均をとると45.6%となり、図7中に白抜きでプロットした黒鉛粒以外は形状IVと形状Vをほぼ正確に識別できる。図8に形状IVと形状V中で面積率法での球状化率45.6%を閾値とした際に分類できない黒鉛粒を丸印で囲って示した。目視による定性的な分類を試みたが、形状IVと形状Vどちらに分類するべきか判断がつかない。特に形状V中の丸印で囲った黒鉛は球状黒鉛とするにはあまりにも形状が崩れており、これらの黒鉛は形状IVにするべきである。むしろJIS規格の形状分類図の形状Vに採用されている問題点として指摘したい。このことから、これらの黒鉛粒は閾値の決定には考慮する必

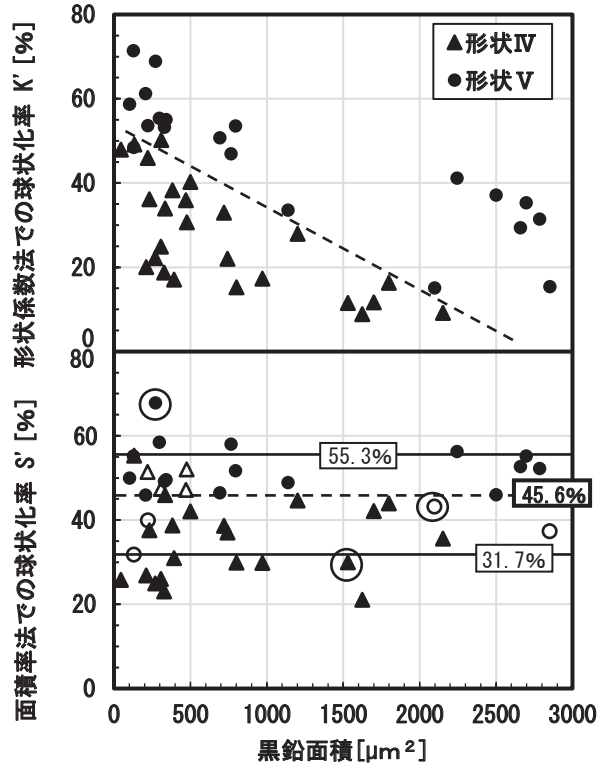


図7 形状係数法及び面積率法による球状化率と黒鉛面積の関係

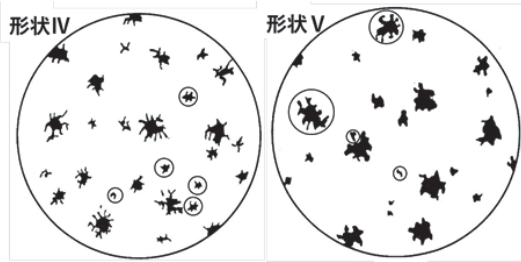


図8 面積率法での球状化率45.6%を閾値とした際に分類できない黒鉛粒

要がないと判断した。

すなわち、画像解析を用い現行のJIS規格に準拠した球状化率( $R_{JIS}$ )の算出方法は(4)式で求められる。面積率法によって個々の球状化率を測定し、45.6%以上の球状化率を有する黒鉛粒がJIS規格の形状分類図の形状V及び形状VIとなる。

$$R_{JIS} = \frac{S' \leq 45.6\% \text{以上の黒鉛粒数}}{n} \times 100[\%] \quad (4)$$

$R_{JIS}$ : JIS規格に準拠した球状化率[%]

$S'$ : 面積率法での球状化率

$n$ : 全黒鉛粒数

### 3.3 球状化率に及ぼす解像度とアンダーカット直径の影響

図9に解像度が球状化率に及ぼす影響を調査するために用いた黒鉛粒を示す。黒鉛Aは完全な球形を有した黒鉛を想定した形状、黒鉛B～Cは図7中の黒丸で囲った黒鉛粒を形状分類図から選定した。解像度が333画素/mmの場合における面積率法での球状化率はそれぞれ、黒鉛Aが98.9%、黒鉛Bが68.0%、黒鉛Cが44.1%、黒鉛Dが32.4%であった。これら4種類の黒鉛粒で、アスペクト比が一定になるように黒鉛粒径を約10～300画素の間で7段階変動するように画像の大きさを変化させた。

図10に面積率法による球状化率と黒鉛粒径(画素)の関係を示す。黒鉛Aは解像度の低下に伴い、球状化率が低下していくのに対して、黒鉛CとDは解像度の低下に伴い、球状化率は上昇する傾向が、黒鉛Bは解像度が変化しても球状化率はほとんど変化しない。解像度が低下していくと、各黒鉛形状において黒鉛粒を構成している画素数は低下していき、極限まで画素数を低下させていくと黒鉛粒は1つの画素で構成されることになる。例えば、1つの画素の一片が1cmであると仮定した場合、黒鉛の面積の解析結果は1cm<sup>2</sup>となり、その外接円の面積は1.57cm<sup>2</sup>となるため、面積率による球状化率は(1/1.57)×100=63.7%となる。そのため、解像度が高く、元の黒鉛粒の形状を十分に再現できている状態で、面積率法による球状化率が63.7%以上の黒鉛粒は解像度の低下に伴い、球状化率は63.7%まで低下していき、逆に63.7%以下の黒鉛粒は解像度の低下に伴い球状化率は63.7%まで上昇する結果が導かれる。

本研究で導出した球状化率の算出方法(4)式は図10中に点線で示した面積率法での球状化率が45.6%を閾値と

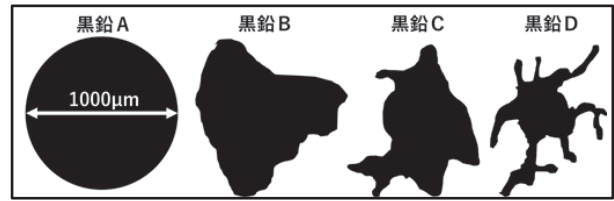


図9 解像度の影響の調査に用いた黒鉛粒

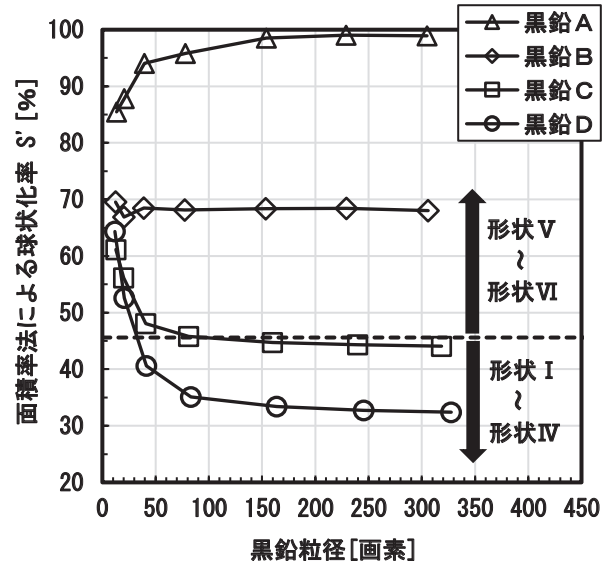


図10 面積率法による球状化率と黒鉛粒径(画素)の関係

し、形状I～IVと形状V～VIを識別しているため、同一の視野で同一の黒鉛粒を対象とした場合には、面積率法での球状化率が45.6%以上を有した黒鉛粒の解像度は球状化率の値に影響を及ぼすことはない。しかし、面積率法での球状化率が45.6%以下の場合には解像度が低下により、球状化率が63.7%まで上昇する傾向を示す。すなわち、(4)式を用いた球状化率の算出値は解像度の低下によって、上昇していくこととなる。

この影響を解析値から除外するためには、組織写真を撮影及び取り込む際の解像度によって適切なアンダーカット直径を設定する必要がある。図10の結果からアンダーカット直径を設定すると黒鉛粒径が40画素以上の黒鉛粒であれば解像度の影響をあまり受けなくなる。しかし、JIS規格に記載されているように15µmをアンダーカット直径とした場合に必要な解像度は40/0.015=2667画素/mmとなり、実際にレンズ倍率100倍でこの解像度以上が得られる解析環境が整えることは困難である。

そのため、追加実験として図11に示す実際の組織写真を用いてアンダーカット直径を種々変動させ、式(4)の球状化率にどのように影響を及ぼすか調査した。図中にアンダーカット直径を15µmとしたときの球状化率( $R_{JIS}$ )の測定結果を併記した。画像の大きさは3072×2048画素とし、解像度は2670画素/mmで取り込んだ。取り込んだ画像は解析ソフト内の自動二値化機能を用いて二値化した。輝度分布の影響<sup>2)</sup>をなるべく少なくするために、

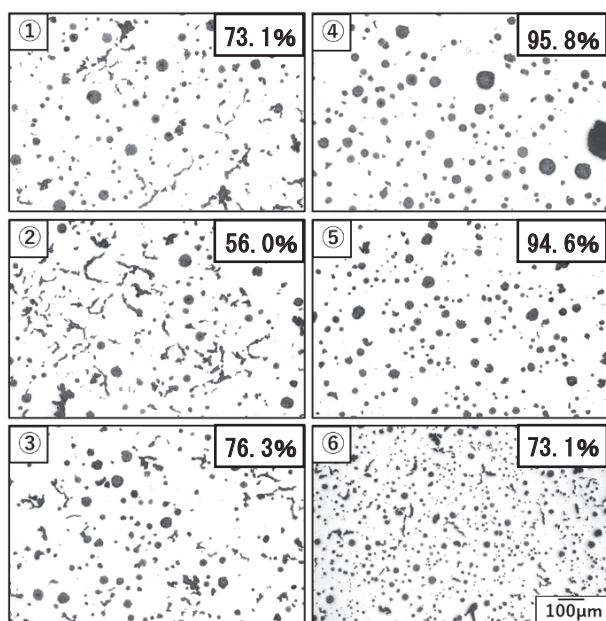


図 11 実際の黒鉛粒の組織写真

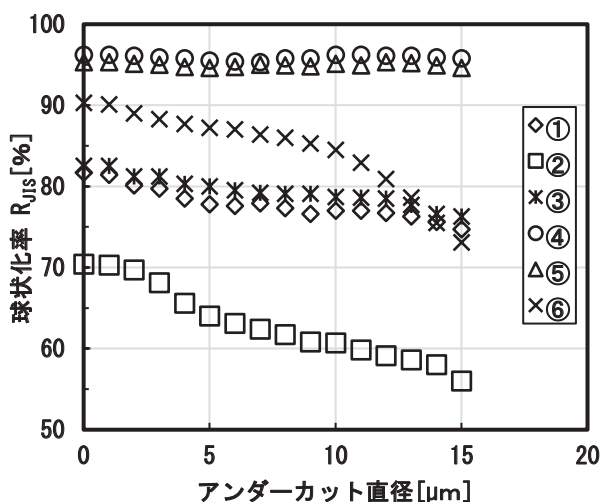


図 12 球状化率とアンダーカット直径の関係

8ビットカラーで256階調のうち最も輝度の低い値を90、高い値を190となるように輝度を調節して画像を取り込んだ。輝度の最も低い値は黒色の黒鉛組織であり、最も高い値は白色の基地組織を意味している。輝度の測定にはアメリカ国立衛生研究所で開発された画像処理用フリーソフトウェア ImageJ 1.45を用いた。また画像端で切れている黒鉛粒は解析から除外した。

図12に球状化率とアンダーカット直径の関係を示す。アンダーカット直径を大きくしていくと球状化率が低下する傾向がある。これは、先に述べたように、球状から崩した形状の黒鉛が多く含まれると、少ない画素数で構成されている黒鉛粒の球状化率は高く算出されることに起因する。○印と△印で示した組織④と組織⑤の試料における球状化率はアンダーカット直径の影響がほとんど見られ

ない。

アンダーカット直径によって球状化率が変動する挙動は当然ながら取り込んだ組織写真ごとに異なるため、一概にアンダーカット直径を設定することはできない。例えば、組織⑥のような黒鉛粒径が小さな試料はアンダーカット直径を小さめに設定しなければ、正確な球状化率を算出することが出来ないだろう。そのため、試料の溶製条件と組織写真撮影時の解像度、画像処理時の解像度などの解析条件を考慮してアンダーカット直径を設定し、その都度、明記しておくことが重要である。また、アンダーカット直径を小さく設定する場合や、黒鉛粒径が極端に小さい試料の組織の解析を行う場合は、組織写真を撮影する時のレンズ倍率を100倍よりも高倍率に設定するなどして、解像度の影響を除外する必要があるだろう。

#### 4. 結論

- (1) 画像解析ソフトによって二値化処理時の画素数及び処理条件によって、球状化率の測定結果は相違する。
- (2) 黒鉛粒の形状分類図の形状Ⅰ～Ⅳと形状Ⅴ～Ⅵを識別する方法として、面積率法での球状化率が45.6%以下を形状Ⅰ～Ⅳ、以上を形状Ⅴ～Ⅵとして分類でき、この分類方法をもとに球状化率を算出することで、JIS規格に準拠した球状化率を正確に測定することができる。
- (3) 解像度によって球状化率は大きく変動し、正確に黒鉛形状を再現するには、最低でも黒鉛粒径が40画素以上で構成された黒鉛粒を対象としなければ、正確な球状化率を算出することはできない。
- (4) アンダーカット直径を小さくすると球状化率は上昇する傾向がある。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、解析ソフト「黒鉛球状化率測定 Ver. 3」並びに試料を提供していただいたヨシワ工業株式会社様に心より感謝申し上げます。

#### 参考文献

- (1) 中村幸吉, 球状黒鉛鉄品の JIS 改正について, 鋳物 59, 5, 254, 1987
- (2) 平本雄一 他, 球状黒鉛鉄の黒鉛粒数測定値に及ぼす画像解析の影響, 鋳造工学 91, 7, 403, 2019
- (3) 草川隆次 他, 球状黒鉛鉄の基礎と応用, 丸善株式会社, 35, 1992
- (4) JIS G 5505, C V 黒鉛鉄品 (第1版), 2013