

画像処理を用いた球状黒鉛鑄鉄組織の定量化に関する研究

岡山職業能力開発短期大学校 天 野 隆
 桑 野 亮 一
 野 村 龍 司

Research on the fixed quantization of the ductile iron organization using image processing

Takashi AMANO, Ryouichi KUWANO, Ryuji NOMURA

要約 金属材料における機械的性質の計測方法は、引張り試験機や、硬さ試験機等による直接的試験が一般的である。近年、これら直接的試験の種々の負担を軽減するために、金属組織が持つ固有パラメータより、間接的に機械的性質を予測するという方法が研究されてきている。機械的性質を予測する前段階として、固有パラメータを定量的に評価することは必要不可欠である。本研究においては、金属として視覚的特徴が顕著にみられる球状黒鉛鑄鉄を取り上げ、画像処理を用いることにより、主組織の比率、含有黒鉛の形状を定量的に算出し、評価した。画像処理アルゴリズムに関して、主組織の一つであるフェライトは、濃度の相違により抽出し、残りの黒鉛とパーライトは、形状の相違により区別し、それぞれ抽出した。その結果、主組織の比率、および黒鉛の球状化率の定量化が可能となった。今後は、本システムを用いることにより、間接的に金属材料の機械的性質を算出するシステムに発展させる予定である。

I はじめに

現在、金属材料における機械的性質（引張り強さ、硬さ等）を計測する方法は、引張り試験機や、硬さ試験機等による直接的な試験が主である。この場合、試験に使用するテストピースの製作、試験を実施するための時間、労力は、多くの負担を要する。

近年、これら負担を軽減するために、金属組織の比率、形状等から、間接的に機械的性質を予測する研究が多くなされている⁽¹⁾。この方法であれば、前述のような負担は不要となる。しかし、一方では、比率、形状等の固有パラメータの定量化、および固有パラメータと機械的性質の相関の具現化をする必要がある。ここで、本研究においては、まず、固有パラメータの定量化に着目した。

一般に、金属組織を評価するときは、金属表面に対し、研磨・腐食等の処理をおこない、顕微鏡で観察し、評価する。このときの評価は、観察した人間の定性的判断に委ねられる。したがって、定量的な評価をおこなうには、別の方法が必要となる。

定量的な方法としては、磁気、超音波、画像処理等を用いた方法が挙げられる⁽²⁾。磁気による方法では、材料が強磁性体のみに限られるが、組織の表面層を評価する方法として、多く用いられる。超音波による方法では、センシング部の制御を厳密におこなわなければならないが、材料の内部まで計測することが可能であり、3次元的な評価する場合有効である。画像処理による方法では、照明条件、画像サイズや解像度に伴った処理時間の増加、カメラセッティング等の煩雑さが挙げられるが、材質を問わず取り扱うことが可能であ

る。また、対象となる材料の組織に視覚的な特徴がある場合、他の方法と比較して、一度に多くの情報（形状、色、比率等）が取得可能である。

本研究で用いる材料には、含有組織の視覚的特徴が顕著に見られる球状黒鉛鑄鉄を用いたため、視覚的なセンシングに優れた画像処理を選択した。さらに、画像処理アルゴリズムを考慮することにより、画像処理を用いて球状黒鉛鑄鉄を定量化する従来の方法⁽³⁾⁽⁴⁾に比べ、作業の煩雑さを軽減することが可能となった。以上を踏まえて、球状黒鉛鑄鉄の主な組織の比率、形状等が定量的に求められたので報告する。

II 球状黒鉛鑄鉄の視覚的特徴

球状黒鉛鑄鉄の主な組織は、黒鉛・パーライト・フェライトである⁽⁵⁾。図1に、研磨・腐食処理後の球状黒鉛鑄鉄組織を示す。実験には、腐食処理（ナイトル腐食液にて4秒間腐食）後、ブルズアイといわれる、球状黒鉛がフェライト地中に孤立している状態の試料のみを選択した。外見上、黒色かつ円形、黒色かつ複雑形、灰色の素地の3部分に分けられる。順に、球状黒鉛、パーライト、フェライトが、それぞれ大部分を占める。各組織の特徴から、球状黒鉛、パーライトの2組織とフェライトは、色（濃度）で識別可能である。したがって、画像処理においては、比較的容易に識別可能といえる。しかし、球状黒鉛とパーライトにおいては、色（濃度）のみの判別では困難である。そこで、この両者においては、形状で識別する方法を選択した。

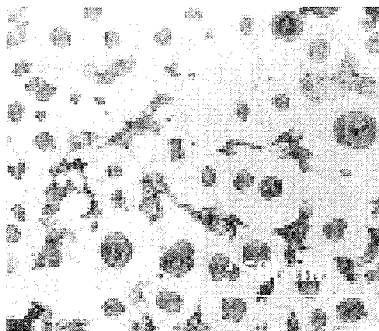


図1 球状黒鉛鑄鉄組織（腐食後）

III 画像処理を用いた従来の評価方法

画像処理を用いた従来の方法⁽³⁾⁽⁴⁾を述べる。まず、腐食前に顕微鏡画像を画像処理し、黒鉛のみを抽出す

る。次に、腐食後、再度画像処理し、黒鉛とパーライトを抽出する。最後に、二度目に抽出した黒鉛とパーライトの混合組織から、黒鉛を差し引くという過程でおこなわれている。理由としては、次のとおりである。まず、腐食前には、黒鉛は大部分が黒色、フェライトとパーライトは大部分が灰色にみられる。一方、腐食後に、パーライトは黒色に変化する。このことから、腐食前は、フェライト地中に黒鉛のみ、腐食後は、図1に示すとおり黒鉛・パーライトが存在した状態となる。したがって、腐食前に黒鉛のみ抽出し、腐食後にパーライトと黒鉛を抽出して黒鉛分を差分する方法により、黒鉛とパーライトをそれぞれ抽出することが可能となる。この場合、主に画像の濃淡処理のみでおこなうことができ、画像処理アルゴリズムは簡易なものとなる。しかし、一度目と二度目に画像処理をおこなう領域は、必ず一致しなければならない。そのためには、金属組織に対して何らかのマーキングをする必要がある。また、二度目の画像処理の際、マーキングを検索する必要があり、過程が煩雑なものとなる。

そこで、本研究では、腐食後に一度の画像処理で各組織比率を抽出する方法を検討し、画像処理アルゴリズムを構築した。これより、画像処理アルゴリズムは複雑となったが、過程の煩雑さは軽減可能となった。

IV 画像処理システム

1 ハードウェア

画像処理システムを図2に示す。まず、球状黒鉛鑄鉄の組織画像（倍率×200）を、金属顕微鏡に取り付けられたCCDカメラにて撮影する。次に、コンピュータに内蔵された画像処理ボードに画像を取り込み、処理をおこなっている。処理中の画像は、モニターによって確認している。画像処理ボードは、縦横512×512ドット、256階調のモノクロ画像用を使用した。

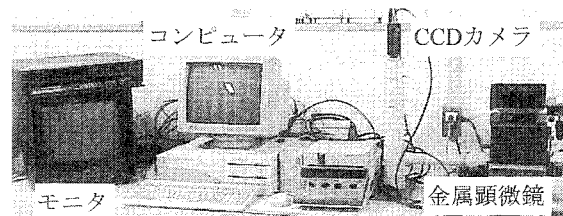


図2 画像処理システム

2 ソフトウェア

全体としては、Basic言語にて記述している。ただ

し、コンピュータ内のメモリ操作が頻繁に必要な部分である、画像取込、フィルタ処理、2値化処理等は、Basic言語では処理時間が増大することから、アセンブラで記述し、Basicルーチン上で呼び出している。

V 画像処理アルゴリズム

1 全体的な流れ

画像処理アルゴリズムを、図3に示す。前処理としては、画像取込、平滑フィルタ処理、濃度ヒストグラム解析、2値化処理をおこなっている。2値化処理時のしきい値設定に関しては、濃度ヒストグラムにおよそ双峰性がみられることから、ヒストグラムの谷点をしきい値と設定している⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

まず、2値画像を基にラスタ走査⁽⁹⁾し、各画素について濃度を識別する。白ならばフェライトとして抽出する。次に、黒ならば連結している画素群の外周を追

跡し、最外周を周囲長として算出する。さらに、連結している画素が皆無になるまで追跡し、面積を算出する。ここで、周囲長と面積の比（複雑度とする。）を算出する。式(1)より複雑度C、周囲長l、面積A、半径rとおくと、真円のときC=1となる。

$$C = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{l^2}{A} = \frac{4\pi^2 r^2}{4\pi \cdot \pi r^2} = 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

したがって、形状が円形に近ければ1に近似する。実際には、C=1を中心として範囲を設定し、範囲内であれば円形、範囲外であれば円形以外と識別している。また、円形であれば黒鉛として抽出する。最後に、全画素を濃度識別した後、パーライトを算出し、各組織の比率を算出する。なお、図4～6および表1に、それぞれ原画像、2値化後の画像、外周追跡の画像、各組織比率の算出結果を示す。

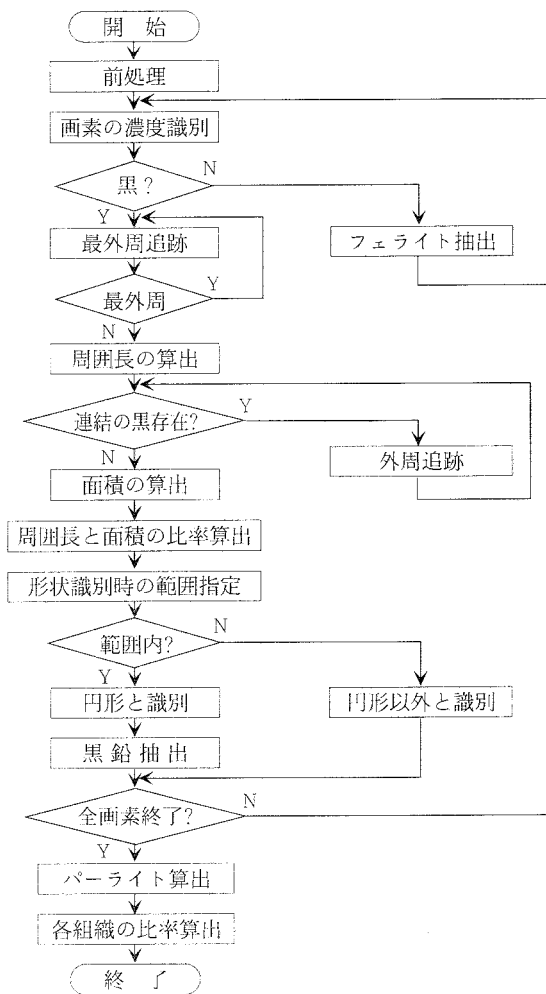


図3 画像処理アルゴリズム

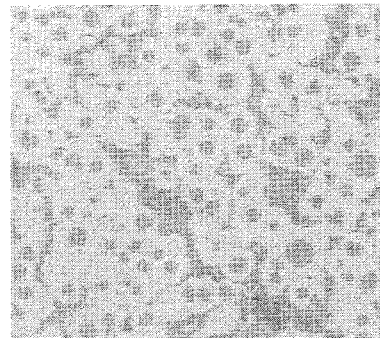


図4 原画像

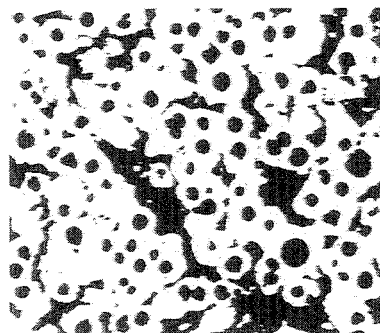


図5 2値化後の画像

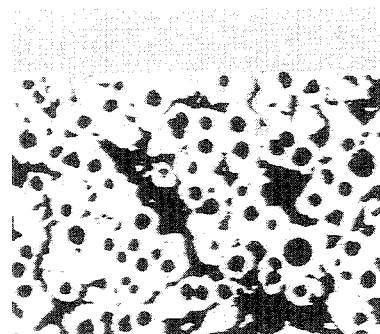


図6 外周追跡中の画像

表1 組織比率 単位[%]

黒鉛	フェライト	パーライト
10.29	66.46	23.24

2 しきい値設定方法

(1) 球状黒鉛鑄鉄の濃度ヒストグラム

図7に、濃度ヒストグラムの一例を示す。ヒストグラムの濃度値が100付近をピークとした部分は、視覚的には黒に近い部分を示す領域であり、黒鉛やパーライトが該当する。また、濃度値が150付近をピークとした部分は、白に近い部分を示す領域であり、フェライトが該当する。図7に示すように、ヒストグラムはおおよそ双峰性を示した。

しかし、球状黒鉛鑄鉄の組織画像においては、研磨・腐食等の処理、金属顕微鏡の光量、絞り等の調節の度合いに関係して、図4に示すように、高いコントラストの画像を得ることが困難であった。故に、しきい値を設定するためのヒストグラムの明確な谷が出現しなかった。

(2) 手入力によるしきい値設定

図7より、ヒストグラムの谷付近である濃度値が120~130の範囲をしきい値マージンとし、マージン内の濃度値を1区切り毎に、手入力でしきい値を設定した。それぞれにおいて2値化処理おこない、各組織の

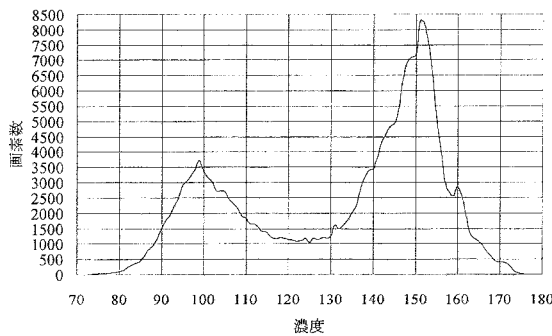


図7 濃度ヒストグラム

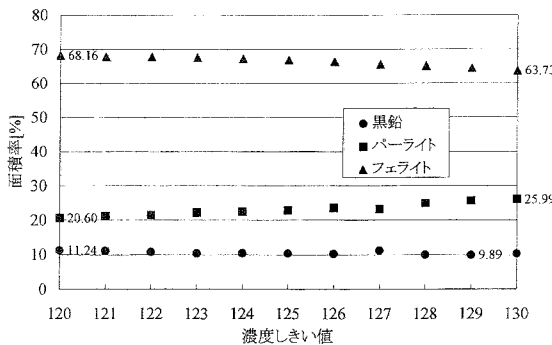


図8 濃度しきい値と各組織比率の関係

比率を算出した。結果を、図8に示す。図8より、黒鉛、パーライト、フェライトの最大値と最小値の差はそれぞれ、1.35、5.39、4.43[%]であった。パーライト、フェライトの差が、比較的大きく現れた理由として、次に述べる。パーライトは、微視的にはフェライトとセメントタイトの層状組織である。本実験では、金属顕微鏡の倍率を200倍としており、この倍率においては層状にはみられず、黒鉛よりも濃度値が高い均一組織としてみられた。このため、パーライト領域の画素の濃度値は、しきい値マージン付近に多く存在し、しきい値の設定に影響を受けやすいと考えられる。

前述したように、組織比率の最大差約5[%]であることから、結果に大きく影響を与えることがないと判断した。したがって、手入力によりしきい値を設定した場合は、しきい値マージン内から選択した。

(3) 自動しきい値設定

前述した手入力によるしきい値設定に関しては、簡易的にしきい値が設定できる。しかし、対象画像の状態や、撮像条件が変化した場合は、毎回観察者が濃度ヒストグラムを見ながら設定しなければならず、効率がよくない。そこで、自動的にしきい値を設定する方法が求められる。この自動しきい値設定に関しては、各種方法が提案されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

例えば、Pタイル法は、画像中のある対称図形の面積率が既知である場合は、よく用いられる。しかし、本研究に用いている画像中のいずれの図形(組織)も未知であるため、この方法は用いることが難しい。また、大津方法⁽¹⁰⁾は濃度ヒストグラムが双峰性を示した場合を含め、広く平らな谷がみられる場合や、単峰性を示す場合に関しても、良好なしきい値が設定できる方法として標準的である。しかし、計算過程が複雑であり、本研究に用いた画像はおおよそ双峰性を示すことから、さらに簡易的な独自の方法を検討した。

そこで、本研究では図7のようなヒストグラムにおける双峰間に着目した。その間に最小二乗法により曲線を近似し、曲線の固有パラメータからしきい値を決定する方法を考案した。また、計算過程を簡素化するために曲線として、2次曲線を選択した。したがって、2次曲線の軸をしきい値に設定した。なお、図7のヒストグラムより、低い濃度および高い濃度の画素数のピークをそれぞれ第1ピーク、第2ピークとした。

具体的な解法について、以下に示す⁽¹¹⁾。式(2)を近似曲線である2次式とする。

$$y = ax^2 + bx + c \quad \dots\dots\dots (2)$$

式 (3) より、各濃度における偏差の 2 乗の総和 z を求める。 n_0 、 n 、添え字の i は、それぞれ第 1 ピーク濃度値、第 2 ピーク濃度値、ピーク間の各濃度値となる。

$$z = \sum_{i=n_0}^n (y_i - ax_i^2 - bx_i - c)^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

式 (3) より、 a 、 b 、 c についてそれぞれ偏微分し、0 とおく。ただし、 $\sum = \sum_{i=1}^n$ とする。

$$\frac{\partial z}{\partial a} = \sum 2(y_i - ax_i^2 - bx_i - c)(-x_i^2) = 0 \quad \dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial z}{\partial b} = \sum 2(y_i - ax_i^2 - bx_i - c)(-x_i) = 0 \quad \dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial z}{\partial c} = \sum 2(y_i - ax_i^2 - bx_i - c)(-1) = 0 \quad \dots\dots (6)$$

上式 (4) (5) (6) より、整理して、

$$\sum x_i^2 y_i - a \sum x_i^4 - b \sum x_i^3 - c \sum x_i^2 = 0 \quad \dots\dots (7)$$

$$\sum x_i y_i - a \sum x_i^3 - b \sum x_i^2 - c \sum x_i = 0 \quad \dots\dots (8)$$

$$\sum y_i - a \sum x_i^2 - b \sum x_i - nc = 0 \quad \dots\dots (9)$$

上式 (7) (8) (9) を解き、 a 、 b 、 c の値をそれぞれ求める。

$$x = -\frac{b}{2a} \quad \dots\dots\dots (10)$$

求めた a 、 b の値を式 (10) に代入し、求められた値をしきい値と設定した。結果、図 7 におけるしきい値は、125 となった。

3 外周追跡

外周追跡方法として、従来からの主流である画素中心追跡型アルゴリズムを用いた。本方法では、画素中

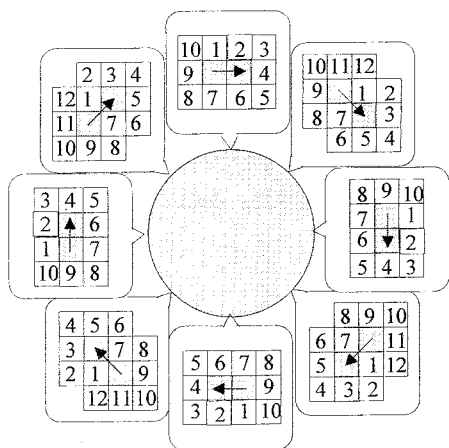


図 9 外周追跡方法

心座標を基準としているため、画素中心から、周囲までの距離分の誤差は発生するが、アルゴリズムは簡易的なものとなる。図 9、10 に、外周追跡方法および画素中心間距離の算出方法を示す。

図 9 中の数字は近傍画素の検索順であり、外周追跡方向に応じて、検索順を場合分けをしている。なお、図 9 中矢印の終点を基準として、検索を開始している。また、図 10 においては、連結性に応じて、画素中心間距離を幾何学的に求め、3 種類に場合分けしている。

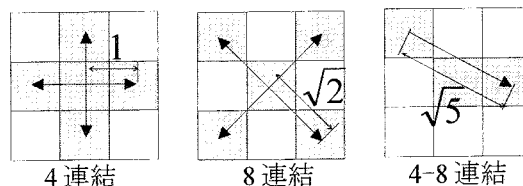


図 10 画素中心間距離の算出方法

4 黒鉛とパーライトの識別

本研究では、前述のように黒鉛とパーライトを形状の相違により識別している。なお、円形のは大部分が黒鉛、円形以外の複雑なものは大部分がパーライトということ的前提としている。また、4 または 8 連結で連結している黒の画素群を図形とよんでいる。

例えば、熟練者が画像中の任意図形に対して、黒鉛とパーライトを識別する場合を考える。このとき、既存のサンプルと照合し、過去に識別した経験から判断、識別するという方法が一般的である。このとき、両者を識別しにくい図形においては、熟練者の経験や、人間の曖昧さにより、的確に識別されることが多い。しかし、画像処理を用いて識別を自動的におこなう場合は、この識別しにくい図形が問題となる。

ここで、本研究では複雑度と黒画素数の関係に着目し、識別しにくい図形を識別する方法を考案した。図 5 より、円形に近い黒鉛と複雑な形状であるパーライトは、大部分が視覚的に識別可能である。定量的に言えば、黒鉛は複雑度が 1 に近似し、パーライトは近似しないと考えられる。また、前述した識別しにくい図形は、複雑度が黒鉛とパーライトの中間に存在し、図形数も少数であり、その図形を構成する黒画素数も少ないと考えられる。図 11 に任意の視野における複雑度と黒画素数の関係を示す。複雑度が 1 付近のデータは、黒鉛領域の画素である。また、複雑度が 2.5 付近のデータは、パーライト領域の画素である。なお、2.53 以上のデータは、便宜上全て 2.53 に含んでいる。図 11 より、黒鉛とパーライトのデータは、明らかに識別でき、かつその中間部分の画素数は少ないことがわかる。

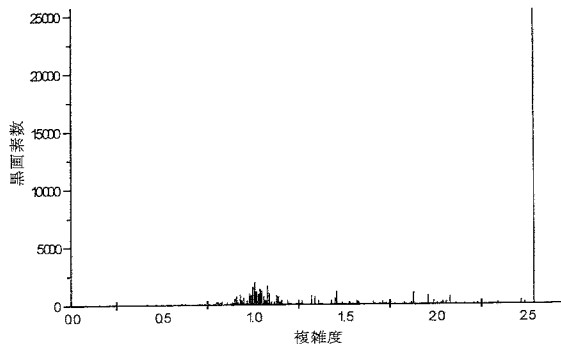


図11 複雑度と黒画素数の関係

次に、図11より複雑度1を基準として、1からどの範囲までを黒鉛と認識するのか決定する必要がある。ここで、図11において、複雑度0.7~1.3間を拡大した図を図12に示す。この0.7~1.3間のデータを回帰分析した結果、平均値 $\mu = 1.03$ 、標準偏差 $\sigma = 0.13$ の正規曲線に近似可能であった。したがって、本研究では、両側棄却域を5[%]として $\mu - 1.96\sigma \leq C \leq \mu + 1.96\sigma$ の範囲内であれば、黒鉛と決定する方法を選択した⁽¹²⁾⁽¹³⁾。なお、図12に示す本データにおいては、0.78~1.28の範囲としている。

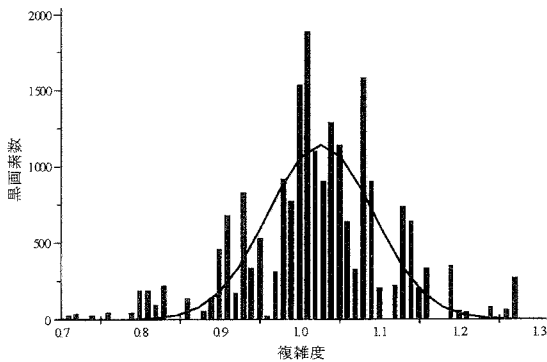
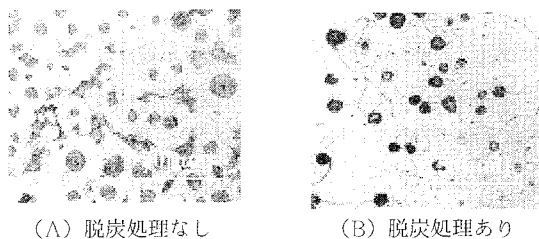


図12 複雑度と黒画素数の関係 (0.7~1.3)

VI 実験結果

1 本システムによる各組織の定量化

球状黒鉛鑄鉄の顕微鏡写真を図13 (A) (B) に示す。比較検討しやすいよう、(B) には脱炭処理をおこなっている。また、算出された組織比率を表2に示す。



(A) 脱炭処理なし (B) 脱炭処理あり

図13 顕微鏡写真(×200)

表2 組織比率 単位[%]

	黒鉛	フェライト	パーライト
A	12.1	71.7	16.2
B	5.9	92.2	2

2 本システムと熟練者による評価の比較

図14に、本システムと熟練者(鑄物の溶湯、砂の試験、管理を5年経験)により算出したフェライト比率の比較を示す。なお、この熟練者が、通常黒鉛を除き比率を算出しているため、本システムもそれに準じた。したがって、パーライト、フェライトのみのデータにより比率を算出したことから、図14にはフェライトのみを図示している。また、この熟練者の場合は、5%区切りで算出している。図14より、最大9%の差がみられた。現在、この熟練者が携わっている現場も含め、生産現場においては、熟練者による算出結果を基に、金属組織を評価していることが多い。したがって、熟練者を確保できない現場においては、本システムを有効利用できる。また、熟練者の存在する現場では、熟練者自身の評価を確認するシステムとして利用できると考えている。

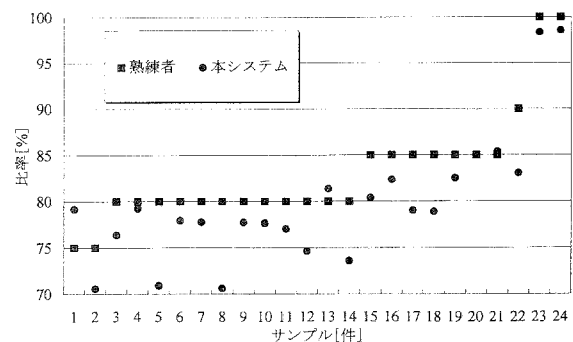


図14 本システムと熟練者により算出したフェライト比率の比較

VII おわりに

本研究においては、画像処理を用いて、球状黒鉛鑄鉄の主な組織の比率、形状等が定量的に求めることができた。これによる効果、課題について述べる。

1 効果

(1) 球状黒鉛鑄鉄の各組織比率および黒鉛球状化率の自動測定

本システムを用いることにより、定量的に自動測定が可能となった。また、従来の画像処理を用いた方法に比べ、手順の煩雑さが軽減された。

(2) 球状黒鉛鑄鉄の強度予測

球状黒鉛鑄鉄の各パラメータが定量化されたことにより、機械的性質との相関から、間接的に材料強度が予測可能なシステムの構築につながる。

(3) 熟練者の代替

前述したように、熟練者を確保できない現場においては、本システムが熟練者の代替役となる。

2 課 題

(1) 画素中心間距離の算出

画素中心間距離に関しては、4、8連結の画素間における幾何学的な距離で算出している。この方法は、アルゴリズムは簡易的なものとなるが、微小領域においては誤差が大きいという欠点がある。微小領域は除去処理等を実行する研究⁽³⁾⁽¹⁴⁾もあるが、微小領域でも誤差を抑えるアルゴリズムを検討している。

(2) 形状識別

フェライト地中において、完全孤立の状態にない黒鉛を抽出する際、周囲の組織も包括して抽出してしまう問題がある。したがって、抽出の前処理として黒鉛やパーライトの領域を完全孤立させることを検討している。

謝 辞

本研究にご協力して下さいました、(株) ヒルタ工業、(株) 武田鑄造をはじめ、岡山県金属プレス工業会の皆様方に厚く御礼申し上げます。また、当短期大学校卒業生の川添真利氏には、研究に関する多大なる協力を感謝いたします。

[参考文献]

- (1) 梅本実、鉄鋼材料の組織から機械的性質を予測する手法の現状と課題、鉄と鋼、81号、1995年、P157-166
- (2) 加藤光昭、非破壊検査のおはなし、日本規格協会、1995年、P11-21
- (3) 渋谷康彦、大川薫、球状黒鉛鑄鉄における金属組織からの材質評価への画像処理技術の応用研究、埼玉県工業技術研究所研究報告、1991年、P44-46
- (4) 渋谷康彦、大川薫、球状黒鉛鑄鉄における金属組織からの材質評価への画像処理技術の応用研究、埼玉県工業技術研究所研究報告、1992年、P28-29
- (5) 草川隆次他、特殊鑄鉄鑄物、日刊工業、1968年、P45-111

- (6) 安居院猛、長尾智晴、画像の処理と認識、昭晃堂、1998年、P11-17
- (7) 安居院猛、中嶋正之、画像情報処理、森北出版、1999年、P128-132
- (8) 高木幹雄、下田陽久、画像解析ハンドブック、東京大学出版会、1991年、P502-505
- (9) 畦津明仁、基礎からの映像信号処理、CQ出版、1989年、P9-28
- (10) 大津展之、判別および最小2乗基準に基づく自動しきい値設定法、電子通信学会、1980年、P349-356
- (11) 小林龍一、相関・回帰分析入門、日科技連、1988年、P1-12
- (12) 谷口修、堀込泰雄、計測工学、森北出版、1990年、P4-11
- (13) 田畑吉雄、やさしい統計学、現代数学社、1998年、P40-74
- (14) 石島健治、伊藤利秋、画像情報処理システムによる金属素材の定量化に関する研究(第1報)、栃木県工業技術センター研究報告、1990年、P37-41