

9 金属組織試験の画像処理による自動化

寺山 朗, 間山清和, 岩谷 稔

Metallographic Analysis for Steels by means of Image Processing

TERAYAMA Akira, TOIYAMA Kiyokazu, IWATANI Minoru

Physical properties of the engineering materials are greatly affected by their microstructure. In the metallic materials, the structural properties such as grain size and amount of inclusions are important indicators for the mechanical properties. Image processing has high potential to enhance the metallographic analysis of the metallic materials because it can improve not only accuracy but also work efficiency.

This research investigated automation of the metallographic analysis on the steels by developing the metallographic analysis software programmed in Python. By applying the software, the efficiency of those metallographic analyses was significantly improved.

キーワード：金属組織, 画像処理, 顕微鏡写真, 非金属介在物, 結晶粒度

1 結 言

鉄鋼材料をはじめとする金属材料の諸特性は金属組織に大きく影響を受ける。金属組織を評価する方法として、JIS(Japan Industrial Standard, 日本産業規格)には、顕微鏡写真から組織を評価する幾つかの方法が規定されている。例えば、この評価に対応した市販ソフト¹⁾を使うならば画像処理により自動で迅速に結晶粒度等を評価することができ、効率的かつ安定的に人の主観によらない定量評価が可能である。更に近年では AI により材料等級を判定させるサービスも始まっている²⁾。しかし、市販ソフトの内部でどのような処理がされているのか不明であり、また、個別の要望に応じた細かいカスタマイズも難しい。一方で、最近は無料で使用できる画像処理ライブラリが充実しており、専門家でなくても容易に画像処理に取り組める環境が整ってきた。これらを活用して金属組織評価できる自前のプログラムコードを作成すれば、処理の内容について理解を深めることができ、またカスタマイズにも対応できると考えられる。

本報では、JIS に規定される 2 通りの金属組織評価試験を対象として、Python により画像処理コードを作成し、作業を自動化することを試みた。

2 鉄鋼材料の清浄度評価

工業分野で利用される鉄鋼材料の組織中には、不純物として微量の非金属介在物が存在する。その非金属介在物の量を調査する方法として、JIS に非金属介在物の顕微鏡試験方法 (JIS G 0555) が規定されてい

る。本節では介在物のカウントを画像処理によって自動で行うことを目的とした。

2.1 点算法による非金属介在物の顕微鏡試験方法 (JIS G 0555)³⁾

被検面を鏡面研磨したのち、被検面積 30 mm²の範囲内でランダムな 60 視野を金属顕微鏡にて 400 倍で撮影し、撮影した 60 枚の写真に縦と横各 20 本の格子線を引き、格子点に重なる介在物の数をカウントし、式(1)により清浄度 d (%) を求める。

$$d = \frac{n}{p \times f} \times 100 \quad \dots (1)$$

p : 視野内の総格子点数, f : 視野数 (通常は 60)

n : f個の視野における全介在物で占められる格子点数

図 1 に鉄鋼材料の顕微鏡組織写真の一例を示す。図 1 (a) の中央付近を横切る細い線が硫化物系の非金属介在物である。写真に縦横 20 本の格子線を引いたものを図 1 (b) に示す。このように非金属介在物と重なる格子点の数を画像処理により自動でカウントし、同様の作業を視野の異なる 60 枚についても行う。

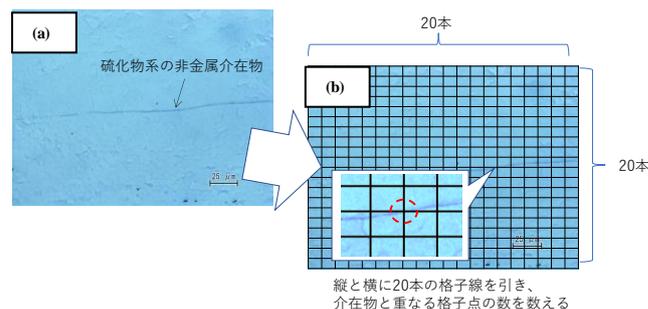


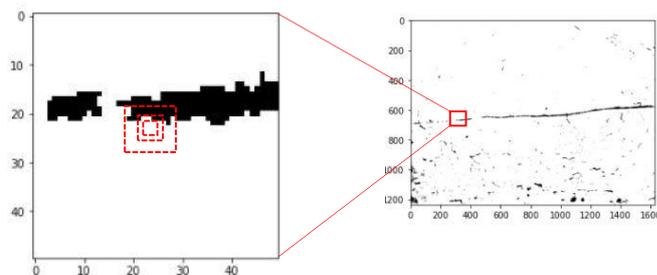
図 1 非金属介在物の顕微鏡試験方法

2.2 清浄度判定のための画像処理の手順

図2に画像処理の流れを示す。まず顕微鏡写真を60枚収納したフォルダから1枚ずつ画像を読み込む。その後、介在物が黒色となるよう二値化処理する。二値化画像について、20×20の格子点に相当する座標(図3に点で示す位置)が黒となる数をカウントする。介在物が格子点と重なるところは丸印で表示し、同様の操作をフォルダ内の60枚に行って処理済み画像は別フォルダへ保存することとした。最後に60枚分の介在物で占められる格子点を合計し、前出の式(1)から清浄度を計算した。なお、これら一連の画像処理はOpenCVライブラリを活用してプログラムを作成した。

2.3 格子線太さが清浄度に及ぼす影響

JISでは顕微鏡の接眼鏡に格子線を持つガラス板を挿入して目視で介在物と重なる格子点をカウントすることが明記されているが、格子線の太さについては規定されていない。図4に二値化処理画像を部分的に拡大した写真を示す。左の拡大図の中に赤い点線で示す同心正方形は、小さい方からそれぞれ3×3、5×5、10×10ピクセルの大きさである。3×3ピクセルの大きさの格子点であったなら介在物と重ならないが、5×5及び10×10ピクセルの格子点の場合は介在物と重なることになる。このように、格子線の太さを変えると格子点の占有する面積も変わるので、同じ画像でも結果が異なることが予想される。よって、格子線の太さが清浄度に及ぼす影響について調べた。図5に顕微鏡写真60枚を使い、画像処理により格子線の太さを変えて清浄度を求めた結果を示す。



図中の赤い点線の四角は小さいほうから3×3ピクセル、5×5ピクセル、10×10ピクセル

図4 二値化処理画像の拡大図

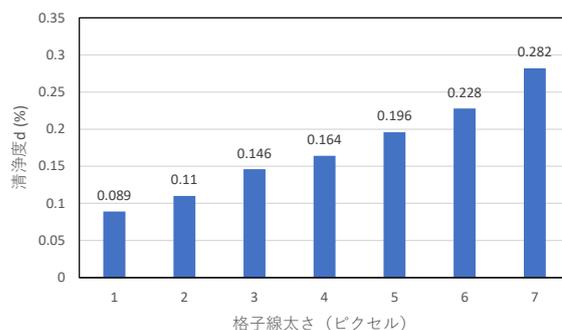


図5 格子線の太さ(ピクセル数)が清浄度に及ぼす影響

格子線が太いほど清浄度 d は高くなる傾向がみられる。同じ顕微鏡写真から手作業で清浄度を求めた場合、 $d60 \times 400 = 0.16\%$ であった。画像処理と手作業の相関を取れば、画像処理の4×4ピクセルの格子線を用いた場合が手作業で求めた清浄度とほぼ等しくなることが分かった。なお、89 mm × 127 mm サイズの画像で評価する場合、この4ピクセルでは約0.3 mmの太さの線を引いたことに相当する。

作成した画像処理プログラムを使って60枚の顕微鏡写真を画像処理して清浄度を求めた場合と、60枚の写真から目視で介在物と重なる格子点の数をカウントした(人手で同じ作業をした)場合の作業時間を比較した。画像処理は約20秒で処理できたのに対して、手作業では約30分を要した。画像処理による自動化によって大幅な作業時間の短縮が可能となった。

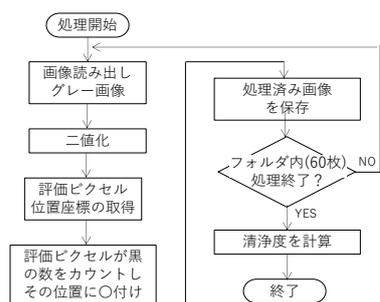


図2 清浄度評価の画像処理の流れ

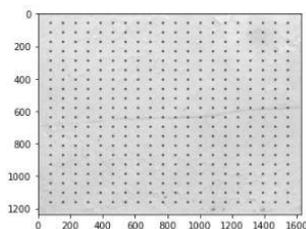


図3 格子点



図6 処理画像の一例 (図中の○部分は介在物と重なった点)

3 鉄鋼材料の結晶粒度判定

鉄鋼材料は結晶粒の大きさがその材料特性に大きく影響する。JIS G 0551 結晶粒度の顕微鏡試験方法では、結晶粒度の測定方法が規定されている。この方法では鏡面研磨・腐食により結晶粒界が現出した鉄鋼断面粒界の数をカウントして算出する。本作業を画像処理により自動化することを目的とした。

3.1 鋼 - 結晶粒度の顕微鏡試験方法 (JIS G 0551)⁴⁾

鏡面研磨された被験面を腐食して結晶粒界を現出させる。その後、**図7**に示す測定線(3つの同心円または4本の直線のどちらか)を顕微鏡写真に重ねて当該パターンと交差する結晶粒界の数 P をカウントする。通常は観察倍率 100 倍で、この同心円または交差する4直線の合計長さは 500 mm とする。試験線の長さを L として、測定線上の 1mm 当たりの平均捕捉数 N_L 及び結晶粒内を横切る試験線の1結晶粒当たりの平均線分長 l は次の式(2)及び(3)で算出する。

$$N_L = \frac{P}{L} \dots (2)$$

$$l = \frac{1}{N_L} \dots (3)$$

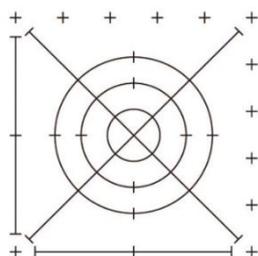


図7 粒度測定用の測定線

これら N_L と l を結晶粒数と各変数の関係表⁵⁾にあてはめ、粒度番号 G を求める。通常は少なくとも5視野について N_L を求めて平均化するが、本報では1視野のみを画像処理で自動化した。

3.2 結晶粒度判定のための画像処理の流れ

図8に画像処理の流れを示す。まず評価対象となる画像を読み込み、結晶粒界が黒色となるよう二値化処理する。**図9(a)**に評価対象として用いた鉄鋼のフェライト画像(山本化学工具研究社の標準顕微鏡組織⁵⁾)を示す。**図9(b)**にはこれを二値化処理した画像を示す。二値化後はフィルタリング処理を行う。測定線である同心円上のピクセル座標を計算し、その座標が黒色であった場合には結晶粒界が交差しているものと判定し、画像中に丸印をつける。丸印の数をカウントして式(2)及び(3)から N_L と l を求めた。

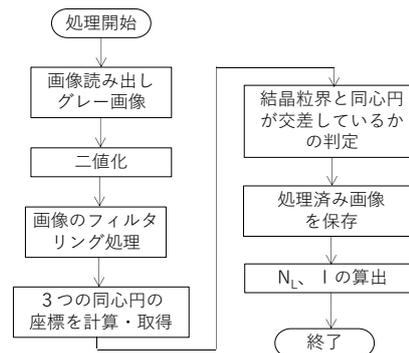


図8 結晶粒度判定の画像処理の流れ

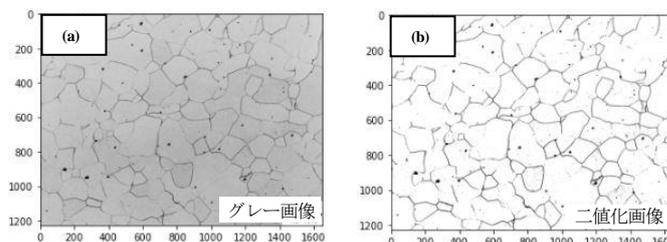


図9 結晶粒度判定の評価対象画像

3.3 フィルタリング処理

二値化処理した画像を拡大して見ると、結晶粒界の他に小さなエッチピットやノイズと思われる黒色点が多数確認された。よって、一定サイズ以下のエッチピットやこれらノイズを除去するためにフィルタリング処理を行った。OpenCV の dilate 関数を使い、フィルタ窓のパラメータを最適化することで、**図10**に示すように小さなエッチピットやノイズを除去し、結晶粒界を際立たせることができた。

3.4 結晶粒界と測定線の交差判定

二値化画像において、測定線の座標のピクセル値が黒だった場合は結晶粒界と交差したと判定する。前述のフィルタリング処理によって結晶粒界は 10 ピクセル程度の太さになっているため、ある閾値を超えて黒エッチピット、ノイズなど

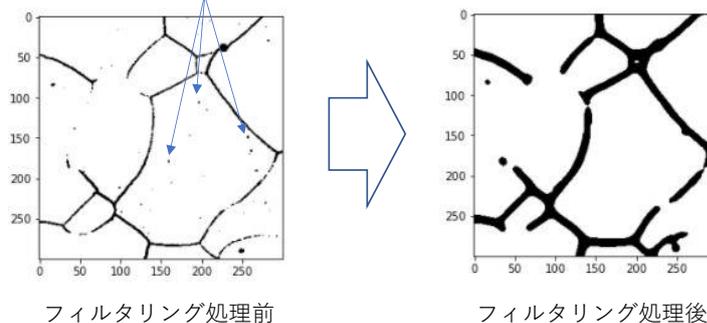


図10 フィルタリング処理前後の画像(拡大図)

色が連続する場合のみを結晶粒界と交差したと判断させることとした。しかし、**図 11(a)**に示すように結晶粒界と測定線の交差角度が小さく、両者の接触長が長い場合には誤って実際よりも多数の接触判定する不具合が発生した。このため、結晶粒界の判断基準のピクセル数に上限を設定し黒色が連続して一定値を超える場合は一本の結晶粒界と判断させることで、**図 11(b)**に示すように適切に結晶粒界を検出できた。

測定線(同心円状の3つの円と結晶粒界が交差するところに○をつけている)

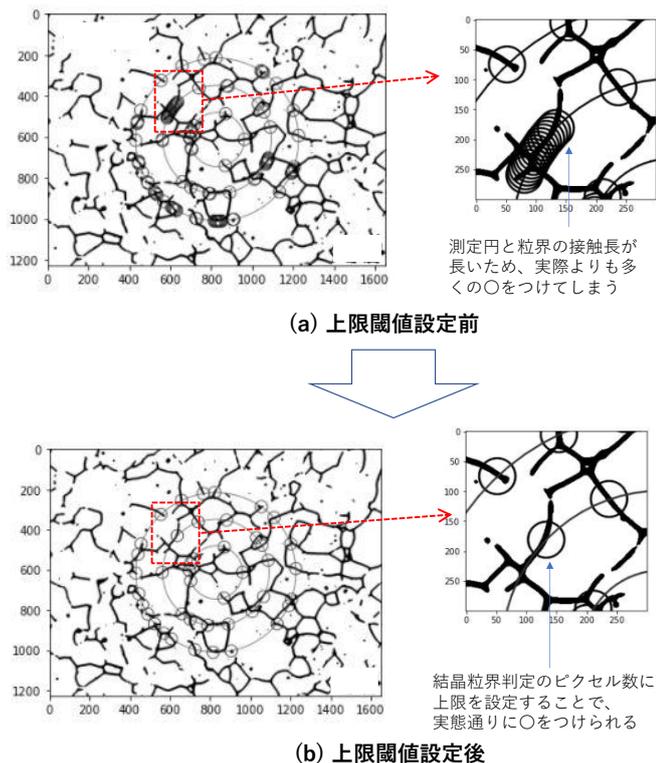


図 1 1 結晶粒界と測定線の接触判定

なお、今回の評価対象画像を画像処理して得られた結晶粒度番号は、FG-5₍₁₎(フェライト結晶粒度 5, $N_L: 17.2$, $I: 0.058$)であった。JISによると、結晶粒度標準図と組織写真を目視で比較して結晶粒度を判定することもできる。評価対象画像と粒度番号 5.0 の結晶粒度標準図を目視で比較した結果、両者の粒度は類似しており、画像処理結果は適正であるといえる。

4 結 言

JIS に規定されている金属組織の評価方法である清浄度試験及び結晶粒度試験を画像処理で自動化した。どちらも手作業で算出した場合とほぼ同等の結果が得られた上、作業時間を大幅に短縮できた。実用に際しては二値化の閾値など若干のパラメータチューニングが必要であるが、自動化により測定結果の安定化が図られ作業効率が向上できることが示唆された。

謝 辞

当該内容は R3 年度 DX トライアル事業により実施した。関係者に謝意を表す。

文 献

- 1) 例えば, inotech.co.jp/inotechquest/
- 2) <https://www.spinex-marketplace.toshiba/ja/services/metalspector-ai>
- 3) JIS ハンドブック鉄鋼 I ,(2010)868-869.
- 4) JIS ハンドブック鉄鋼 I ,(2010)800-830.
- 5) “標準顕微鏡組織”, 山本化学工具研究社,16.