



## 入門講座

鉄鋼材料を作り込む計測技術－1

# 表面品質の計測技術

Technology for Surface Quality Measurement

大重貴彦

Takahiko Oshige

JFE スチール (株)

スチール研究所 計測制御研究部

主任研究員

## 1 はじめに

表面品質の計測技術は、製品の表面欠陥と表面性状を中心とした表面の品質保証に関する技術であり、お客様にも直接関係する重要な技術である。表面品質の保証をするための計測を行う上では、特に光学系が重要であり、具体的にどのような項目について検討する必要があるかについて解説を行う。

## 2 表面欠陥の検査

お客様との表面欠陥に関する取り決めは、目視判定されたサンプルをもとにやりとりされることが多く、検査方式も画像方式が基本となる。

### 2.1 撮像方式

製品表面を撮像する機器として、主にエリアカメラ（2次元カメラ）とリニアアレイカメラ（ラインセンサカメラ）とがある（図1）。

エリアカメラは、いわゆるテレビカメラのように、2次元に配列された撮像素子により画像化された2次元画像信号を周期的に撮像、出力するカメラである。一方、主に産業用に

用いられるリニアアレイカメラは、1次元に配列された撮像素子により、同時に撮像されるのは1次元状の領域であるが、それを測定対象の一定距離移動毎に撮像し、2次元状に並べることにより2次元画像を取得する方式である。（これは、紙送り式のファックス機を思い出すとイメージしやすい。）

どちらの方式を採用するかは、後述する様々な設計事項を考慮して決定する必要がある。

### 2.2 光学系

正しく検査を行うためには、いずれの撮像方式の場合でも光学系の検討が重要である。当然のことながら、適切な光学系は、検査を行いたい対象に大きく依存する。欠陥の区分と光学配置の一般論については、表1のような整理がされている<sup>1)</sup>。

まず、欠陥に凹凸がなく、色の濃淡による輝度差の場合、光学配置における投受光角の影響は一般的に小さく、目視に近い濃淡画像が得られる。

一方、欠陥に凹凸がある場合には、欠陥を構成する面は一般に様々な傾きを有する微小斜面の集まりとなっている。それぞれの微小斜面は、その斜面の角度に対し、照明の投光角（入射角）と同じ受光角（反射角）となる方向に配置されたカメラで明るく観察され、そこからずれた角度で暗く観察され

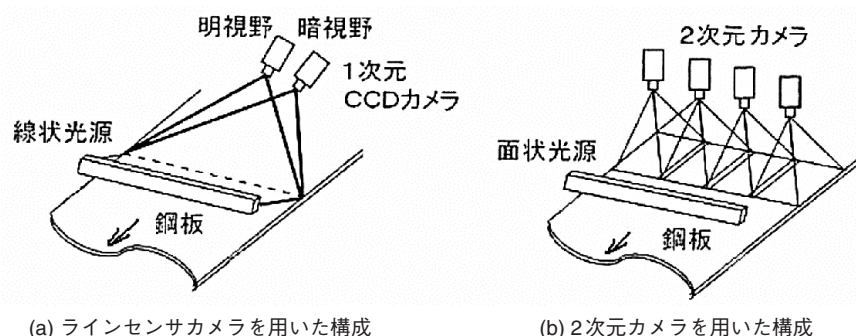


図1 撮像方式の比較<sup>1)</sup>

表1 表面欠陥の性状区分と見え方の特徴<sup>1)</sup>

| 欠陥性状の区分 | 欠陥画像の生成要因                      | 光学配置<br>(CCD方式の場合)   | 見え方の特徴<br>(正常部とのコントラスト)                                       |
|---------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------|
| (A) 濃淡系 | 色の濃淡による輝度差<br>(カラーの場合は色差)      |                      | 目視に近い濃淡<br>投受光角度依存 小さい                                        |
| (B) 凹凸系 | 光の反射角度による輝度差                   |                      | ①光が反射する角度では<br>明るく見える<br>②光が反射しない角度では<br>暗く見える<br>投受光角度依存 大きい |
| (c) 粗さ系 | 表面の拡散性、鏡面性による輝度差<br>(反射率の角度分布) |                      | 鋼板の鏡面性が高い場合<br>・正反射では明るく見える<br>・拡散反射では暗く見える<br>投受光角度依存 大きい    |
| (d) 複合系 | 上記要素の複合による輝度差                  | 光学配置、波長域等により見え方は千差万別 |                                                               |

る。なお、このときの角度は、鋼板面を基準とした角度ではなく、欠陥を構成する斜面を基準とすることに留意が必要である。従って、欠陥を構成する微小斜面の中で、どの角度の斜面に注目するかによって、選定すべき投受光角は変化する。

このように、様々なタイプの欠陥を検出するためには、同一視野を2つの光学条件(例えば、照明1台に対し、正反射(明視野)、拡散反射(暗視野)の2台のカメラを配置するなど)で検査し、それらの検出結果を複合的に用いることもよく行われる。

また、光学条件を考える上で、カメラの視野内の位置によって、照明からの投光角及びカメラへの受光角が変化するため、そのばらつきを考慮しておく必要がある。リニアアレイカメラの場合、少なくとも表1における紙面内では光学条件が揃っているため、エリアカメラと比べると、一般的には投受光角のばらつきは小さい傾向にある。

## 2.2 画素数

近年のお客様のご要求の厳格化、および、撮像素子の細密化により、撮像素子1個あたりの画素数はどんどん大きくなるようになってきている。

例えば、エリアカメラは、表2のような信号仕様のものが使用可能になっている。

一方、リニアアレイカメラも一列に並んでいる画素数が、512、1024 (1K)、2048 (2K)、4096 (4K)、8192 (8K)、…など、同様に微細化が進んでいる。

ただし、エリアカメラ、リニアアレイカメラともに、主にレンズ口径との関係において撮像に使える面積はほぼ決まってしまうため、画素数が多くなるということは、1画

表2 エリアカメラの仕様

| 仕様   | 画素数<br>(水平×垂直) |
|------|----------------|
| VGA  | 640×480        |
| XGA  | 1024×768       |
| SXGA | 1360×1040      |
| UXGA | 1620×1220      |
| ...  | ...            |

素あたりの面積が小さくなっていることに注意が必要である。そのため、画素数の多い撮像素子を用いた場合には、画像の分解能が小さくできるメリットはある一方で、画素の面積に比例して受光量が低下するため、撮像のためには照明の光量をより多く確保しなければならないという課題が生じることもある。

## 2.3 レンズの選定

図2のように、距離aの位置にある大きさAの被写体を距離bにある撮像素子で撮像したときの像の大きさがBであったとする。レンズ焦点距離はfとする。このとき、ニュートンの結像公式

$$xx' = -f^2$$

が成立することが知られている。ここで、xは、物体側焦点F<sub>1</sub>から対象までの距離、x'は像側焦点F<sub>2</sub>から撮像素子までの距離である。ここで、図2の座標は右向き及び上向きを正と定義する。すなわち、

$$A > 0, a < 0, x < 0$$

$$B < 0, b > 0, x' > 0$$

である。

ここで、光学倍率Mは、

$$M = \frac{B}{A} = \frac{b}{a} = \frac{f}{x} = -\frac{x'}{f}$$

で与えられる。これによりどのような焦点距離 ( $f$ ) のレンズを用いて、どのくらいの距離 ( $x$ ) で撮像すると光学倍率がどのくらいになるかが凡そ計算できるので、撮像素子の1画素のサイズから対象上の分解能を計算したり、撮像素子の全体サイズから対象上の視野サイズを計算したりすることができる。

また、レンズを使用する上では、レンズの絞り (F値) の設定も重要である。一般に、絞りを1クリック開けると (F値を1メモリ小さい値にすると) 受光光量が2倍になるが、一方で、対象上で前後にどれだけずれてもピントが合うかを示す被写界深度が小さくなったり、視野端の光量が視野中心に比べて低下したりというデメリットもある。受光光量が許せば、絞りは閉じて (大きなF値で) 使用する方が望ましい。

## 2.4 露光時間

製造ラインにおける製品など移動体を測定する場合には、露光時間の選定も重要である。基本的には、撮像周期で決定される1周期分の時間だけ露光するので、対象が移動すると、対象のぶれが観測されることになり、対象が静止しているときに比べ、空間分解能が低下することになる。

エリアカメラの場合、1周期が33msec (撮像周波数30Hz) のカメラを基本として、それより高速のカメラも多種販売されており、撮像周波数数万～数百万Hzのいわゆる高速度カメラまで、価格、性能など千差万別である。

撮像周期は早くなくても、露光時間を制限して、対象のぶれをなくしたいということもある。そのような場合は、①シャッターの利用、②ストロボ照明の利用が考えられる。

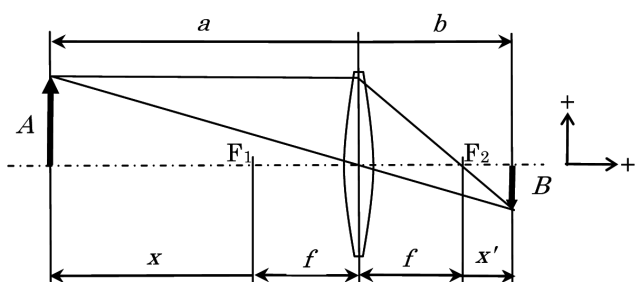


図2 レンズ光学系

シャッターは、電子シャッターが一般的であり、撮像周期内のうちの短時間の露光が実現できる。また、ストロボ照明は、撮像周期内に発光するようタイミングを制御した  $\mu$ s オーダーの発光により実質的な撮像時間を短くする方法である。

## 2.5 カメラ感度・ゲイン

カメラによっても、感度 (同一の受光光量に対してどの程度の信号を出力するか) に差がある。撮像素子自体の感度によるものもあるし、その後のアンプ等回路系によるものもある。また、アンプゲイン等の設定を可変にすることにより、感度を変更できるカメラもある。

ただし、ゲインを大きくすることは、電気ノイズも大きくなることに留意が必要である。一方、銅板を撮像対象にした場合は、表面地合によるノイズが電気ノイズよりもずっと大きいことも多く、影響の小さい範囲内でゲインを上げれば実用上問題とならないこともある。

## 2.6 その他光学条件

### ①カラー情報

対象の色情報を利用することも時として有効である。

エリアカメラの場合、かつては、ダイクロイックプリズム (波長分割プリズム) で、入射光をR (Red) ・G (Green) ・B (Blue) の波長帯ごとに分割し、視野合わせされた3つの撮像素子で撮像する「3板式カラーカメラ」が主流であったこともある。ただし、現在は、バイヤー方式といわれる隣り合う画素で異なる色のフィルタを通して撮像する方式 (図3) が主流であり、安価ではあるものの、厳密には同じ位置の情報の波長情報を取得することができないことに留意する必要がある。

一方、リニアアレイカメラにも、カラーカメラとして、同じく、プリズム方式、バイヤー方式のものが存在する。

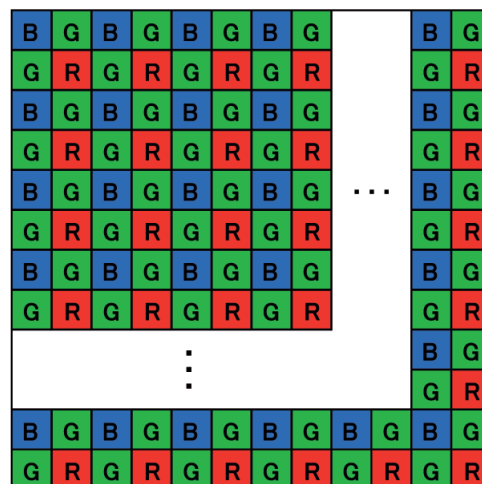


図3 バイヤー方式カラーカメラ撮像素子配列例

## ②偏光

偏光を使うことにより新たな情報が付加され、有効な場合もある。例えば、対象表面の反射の違いから対象物を判別したり<sup>2)</sup>、過検出の抑制を行ったり<sup>3)</sup>することに使われたりする例がある。

## 2.7 照明光量の見積

以上述べたように、光学系の設計をする際の各種事項は、受光光量に直接影響を与えるため、どのような条件を採用するか、また、その際に撮像に必要な受光光量が確保できるかどうか、大きなポイントとなる場合もある。

表3に光量に影響する項目を整理した。使用可能な照明の光量が前提とはなるが、その制約の中で、各項目を設計していく必要がある。また逆に、各項目を設計した上で、照明光量が不足している場合、集光効率を改善したり、無駄になっている光を有効活用したりなど照明側の工夫・開発が必要になることもある。また、近年次々と大光量の光源が開発されてきており、時間が解決するという側面もある。

## 2.8 画像処理<sup>4)</sup>

光学系の設定によりよいS/Nの画像が得られたら、欠陥を異常部として検出する等のための画像処理が必要である。鉄鋼製品の自動検査においては、一般に下記ステップにて処理が行われる。

### (1) エッジ検出

銅板検査の場合、カメラの視野に対し、検査対象の銅板の幅は一般的には製品ごとに変化する。そのため、撮像された画像から製品のエッジ（幅方向の端部）を検出し、その内側を検査範囲として画像処理することが必要である。

### (2) シェーディング補正

表面検査装置は、フィルムや紙など他のシートの検査（ウェブ検査）でも共通して用いられるが、鉄鋼製品の場合、製品表面の反射率むらや、金属特有の反射の指向性により、画像に全体的に明るさのむらがあることが多い。そのため、各種フィルタ処理にて、むらをなくして検査対象の正常部が基準値になるよう補正される。

### (3) 二値化

シェーディング補正が行われ、基準値に対し正負の信号に規格化された信号は、予め決められた閾値により二値化され、異常部の候補が検出される。

その際、二値化の前に、想定した形状の疵の信号には影響を与えずに細かい地合のノイズを低減する平均化フィルタ（例えば、鉄鋼製品の場合は長手方向に延ばされる欠陥が多いため、長手方向に平均化するフィルタなど）を適用することも行われている。また、フィルタを用いない場合や、複数

表3 光量に関する設計項目

| 光量に影響する項目  | 影響の仕方                                                       |
|------------|-------------------------------------------------------------|
| 光学角度条件     | 一般的には正反射から角度をずらすほど受光光量は低下する。                                |
| その他光学条件    | 波長を限定したり、偏光を用いたりすると受光光量が低下する。                               |
| 撮像素子       | 画素の面積に比例した受光光量となる。                                          |
| 撮像時間       | 対象が移動している場合には、撮像時間を長くすると、像のブレが生じる。                          |
| レンズ絞り(F 値) | 被写界深度の点では絞った方が有利。レンズ絞りを1段階開けると、受光光量は約2倍となる。                 |
| カメラ感度・ゲイン  | カメラのアンプゲインを上げると電気ノイズが大きくなる。ただし、対象の地合ノイズが大きい場合は影響見られない場合もあり。 |

のフィルタを用いた場合の複数種類の画像に対し、別々の閾値により二値化することも行われている。

### (4) ラベリング・特徴量算出

二値化された画像に対し、一般的な画像処理と同様ラベリング処理を行い、そのラベルに対して、シェーディング補正後の画像から各種特徴量の算出を行う。特徴量は、幅、長さ、面積など形状に関するものや、信号ピーク値、信号積分値など信号に関するものなど様々な量があり、市販の表面検査装置では数十から数百種類以上に及ぶ。

また、前述したように、正反射、拡散反射の2台のカメラを用いる場合には、2台のカメラの視野を厳密に位置合わせし、正反射カメラの特徴量、拡散反射カメラの特徴量、両者を組み合わせた特徴量を用いることも行われる。

## 2.9 欠陥判定<sup>4)</sup>

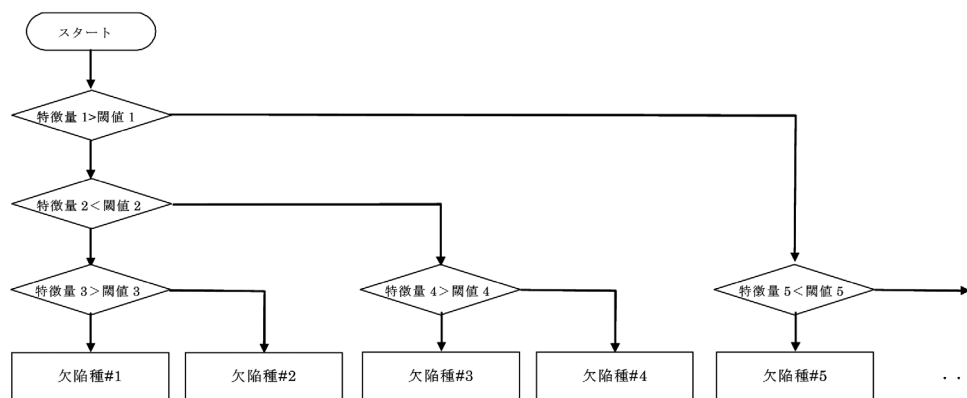
これまでの画像処理により得られたラベル情報とそれに対応する特徴量を用い、欠陥種類・程度の判定処理を行う。この処理は、例えば図4に示すように、各ラベルの各種特徴量を予め定義したIF-THENルールを構築することにより実現されている。すなわち、このルールが、検出したラベルを工場オペレータと同じように欠陥種類・程度を判定できるかどうかを決める重要な役割を果たしている。

このルールは、検出された相当数のラベル1つ1つに対し目視により欠陥種類・程度を定めたものを教師データとし、それが正しく判定されるように作成されなければならない。

ルール作成については、人手を介さずに自動で作成する要求は高く、例えば、表面検査装置のシステム上で画像を目視判定することにより作成された「欠陥ライブラリ」を用いて、自動でルールを作成するいろいろな取り組みがなされている<sup>5,6)</sup>。

また、近年急速に進展しているAI技術を利用した技術開発



図4 欠陥判定処理例<sup>4)</sup>

も進められている<sup>7)</sup>。

### 3 表面性状の計測

製品として管理すべき表面性状としては、表面粗さ、光沢度、各種膜厚などがある。

各種膜厚については、蛍光X線、吸光分光式などがオンライン／オフラインとも一般に用いられている。その他表面粗さ、光沢度、については、一部オンライン装置の開発事例<sup>8,9)</sup>はあるが、オフライン測定が一般的である。測定法についてはJISで規定されており<sup>10,11)</sup>、それに準拠した方式が用いられている。

### 4 おわりに

鉄鋼プロセスで必要とされる表面品質の計測技術について解説した。誌面の都合上、基本的なことを中心とした記載となっており、実際には、種々工夫のあるシステムが可能であり、ニーズに合わせたシステムを設計・利用することが重要である。

### 参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会：鉄鋼便覧第5版, 5 (2014), 81.
- 2) 風間彰, 大重貴彦：計測自動制御学会論文集, 47 (2011) 12, 591.
- 3) 大重貴彦, 大野紘明, 腰原敬弘, 橋向智弘, 杉浦寛幸：CAMP-ISIJ, 30 (2017), 776.
- 4) 大重貴彦：計測と制御, 55 (2016) 3, 228.
- 5) 黒崎篤：紙パ技協誌, 61 (2007) 9, 1070.
- 6) 梅垣嘉之, 大重貴彦, 風間彰：CAMP-ISIJ, 29 (2016), 230.
- 7) 芦田強, 和佐泰宏, 岡本陽：CAMP-ISIJ, 30 (2017), 147.
- 8) 浅野有一郎, 塩住基仁, 栗田邦夫, 矢部直, 守屋進：鉄と鋼, 70 (1984), 1095.
- 9) 守屋進, 館野純一, 虎尾彰, 市川文彦：第32回計測自動制御学会学術講演会, (1993), 165.
- 10) JIS B 0601：製品の幾何特性仕様 (GPS) —表面性状：輪郭曲線方式—, 日本規格協会, (2001)
- 11) JIS Z 8741：鏡面光沢度—測定方法, 日本規格協会, (1997)

(2018年1月8日受付)