

カラーおよび透過画像解析による 製鉄由来粉塵の分類と定量化

Classification and Quantification of Suspended Dust from Steel Plants by Using Color and Transmission Image Analysis

梅垣 嘉之 UMEGAKI Yoshiyuki JFE スチール スチール研究所 計測制御研究部 主任研究員 (副課長)
風間 彰 KAZAMA Akira JFE スチール スチール研究所 副所長
福田 義徳 FUKUDA Yoshinori JFE テクノリサーチ 計測技術本部 受託開発部 主査 (副部長)・博士 (工学)

要旨

画像解析による製鉄由来粉塵の分析システムを開発した。本分析システムは、粉塵のカラー画像を取得し、色情報に基づいて、粉塵に含まれる粒子を抽出し、粒子を黒、赤、白の3色に分類する。また、各色の粒子量や粒度分布を測定する。粒子の抽出や分類における閾値調整を自動化したことで、迅速かつ作業者に依存しない分析が可能となった。本システムは JFE スチールの製鉄所において有効な粉塵飛散防止策の計画および実施に役立てられている。

Abstract:

A system that analyzes suspended dust from steel plants has been developed. The analysis system takes color images of the dust, extracts particles included in the dust from the image based on the color information and classifies the particles into three color types, black, red and white. The system ultimately measures the amount of the dust particles and the particle size distribution for each color type. The system has an automatic adjustment scheme of the thresholds for the extraction and classification of the dust particles, enabling the analysis of the dust faster and operator-independent. The system has contributed to the planning and execution of the efficient preventive measures against the dust scattering in JFE steel's steel plants.

1. はじめに

JFE スチールでは「すべての事業活動における環境負荷低減」を環境方針に掲げており、そのための技術開発や設備投資を積極的に行なっている。粉塵飛散対策はその一項目であり、原料ヤードでの散水、防塵フェンスの設置、集塵機の設置や集塵能力の向上、構内の清掃や道路散水など、さまざまな対策を行なって粉塵飛散防止に努めている¹⁾。

効果的な粉塵飛散防止対策を講じるためには、対策前の現状分析および対策後の効果確認が重要である。すなわち、粉塵の分析・測定を行ない、対策すべき粉塵の種類や発生量を評価することが重要である。製鉄由来の粉塵には、コークス、石炭、鉄鉱石、焼結鉱、スラグ、石灰といった複数種類の粒子がある。また、実際に観測を行なうと製鉄に由来しない珪砂などの一般の砂塵も含まれている。粉塵の捕集は通常、観測地点において粘着テープを大気中に暴露するか広口の容器を設置して行なっている。捕捉した粉塵サンプルについては、観測地点より回収後、粉塵粒子の種類、

粉塵量、粒度分布 (どれくらいの大きさの粒子がどのくらいの割合で含まれているか) について測定や分析を行なう。特に、粒子種別ごとの粉塵量を知ることは粉塵発生源と飛散ルートを特定するために重要である。粒子種別ごとの粉塵量を測定するために、従来光学顕微鏡観察法を多く用いてきた。本手法は粉塵粒子を、顕微鏡を通して目視で観察し、コークスや石炭を黒粒子、鉄鉱石や焼結鉱を赤粒子、スラグや石灰を白粒子として3色に分類した上で色種別ごとに粒子数をカウントするという手法である。本手法は熟練度を必要とするものの、粒子の色分類と各色粒子の粉塵量測定を一度に実施できる点が長所である。しかしながら、目視であるため測定結果は測定者に依存し、ばらつくことがある。また、本手法では粉塵発生源からの距離を推定するために重要である粒度分布の評価は難しいので、たとえばレーザー回折式の粒度分布測定装置など他の手段を併用することがある。一方、粉塵粒子の画像が得られる場合には、粒度分布の測定方法として画像処理が多く用いられる²⁾。画像処理で行なう場合、画像中の粒子領域の抽出、各粒子のサイズ測定、粒度分布の計算というステップで行なわれる。最初のステップ以外は大抵の応用例において共通しているが、

2014 年 9 月 19 日受付

最初のステップ、すなわち粒子領域の抽出については適用対象に応じてカスタマイズが必要である。製鉄由来の粉塵粒子に適用する場合、画像の背景から粒子領域を分離するとともに粒子領域を粒子種別ごとに分類する必要がある。

本開発の目的は、熟練度を必要とせず、迅速かつ測定者によって結果がばらつくことがない、粒子種別ごとの粒度分布測定を実現することである。本論文では、自動的に粉塵粒子を分類し定量化する画像処理手法および分析システムを示す。

2. 画像処理手法³⁾

2.1 カラー画像の取得と RGB から YCrCb への変換

本手法は基本的に光学顕微鏡観察法において人の目で行っていた作業を画像処理に置き換えたものである。つまり、画像処理により粉塵の顕微鏡観察画像から粉塵粒子を抽出して3色に色分けし、色ごとに粉塵を測定するというのが本手法の流れである。

まず、粉塵の顕微鏡観察画像を取得する。粉塵が付着した粘着テープを用意し、上方からリング状照明で照明して、カラー CCD (電荷結合素子) カメラで拡大撮影して、カラー画像を取得する。図1にカラー画像の例を示す。画像中には粉塵粒子のさまざまな色と背景の空色、すなわち、粘着テープの色が見える。粘着テープの色は、後述する粒子の抽出が行ないやすいように、白粒子より暗く、黒粒子や赤粒子よりも明るくなるように選択した。

次に、色表現の変換を行なう。本手法では、画像処理は基本的に YCrCb 色空間上で実行される。YCrCb 色空間では、輝度 Y と色差 Cr および Cb によって色が表現される。輝度は色相に関係なく色の明るさを示している。また、色差の値は色相の情報を有していて、 Cr は色の赤み、 Cb は青みを示す。一方、カラー CCD カメラで撮影して得られる画像中の画素の色は RGB 色空間上で表現されている。RGB 色空間では光の三原色である赤 R 、緑 G 、青 B の混色として色が

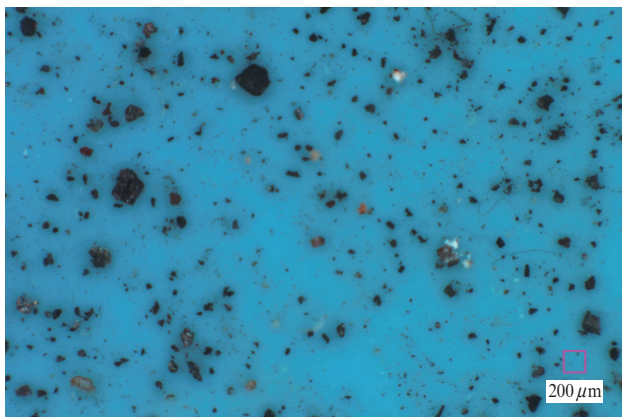


図1 粘着テープに付着した粉塵の顕微鏡画像³⁾
Fig. 1 Microscopic image of dust on adhesive tape³⁾

表現される。YCrCb と RGB は相互に変換可能であり、次式に従って RGB から YCrCb に変換を行なう。

$$Y = 0.29891 \times R + 0.58661 \times G + 0.11448 \times B \dots (1)$$

$$Cb = -0.16874 \times R - 0.33126 \times G + 0.50000 \times B \dots (2)$$

$$Cr = 0.50000 \times R - 0.41869 \times G - 0.08131 \times B \dots (3)$$

赤粒子、黒粒子、白粒子を見分ける上で YCrCb 色空間は RGB 色空間よりも扱いやすい。まず、白粒子と暗い粒子(黒粒子と赤粒子の両方)の違いは主に明るさであるから、輝度 Y によって両者を見分けられる。次に、暗い粒子の中で赤粒子を黒粒子と見分ける判断基準の一つは、赤みがあることである。この判断基準はおおよそ Cr が正で Cb が負であることである。RGB と YCrCb は相互変換可能であるから RGB を使っても等価な判断基準は表現可能である。しかし、変換式 (1)~(3) から分かるように、 R 、 G 、 B の3値の線形和で表現される条件式を考えなければならず、理解しにくい。

2.2 カラー画像からの粒子抽出

本ステップでは粉塵粒子をカラー画像から抽出する。ここで、カラー画像における背景の輝度 (Y) の平均値は画像取得時にレンズの絞りを使得概ね所定値になるように調

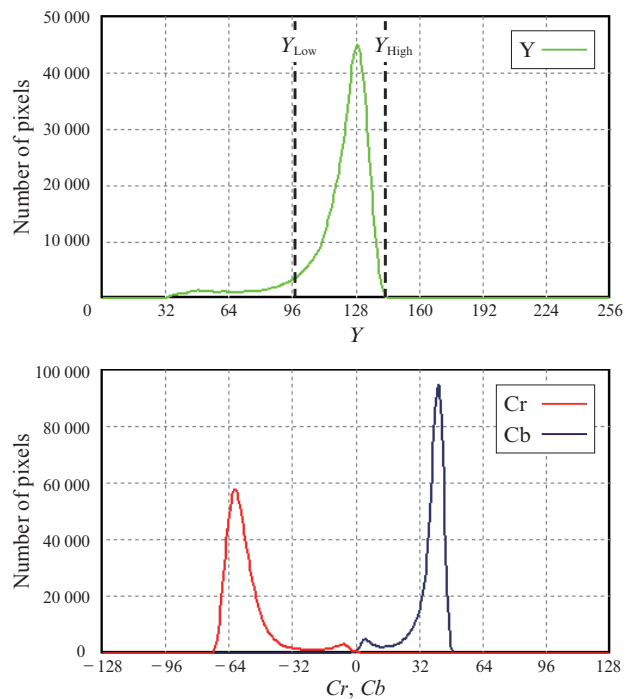


図2 図1の画像における YCrCb 値のヒストグラム³⁾
Fig. 2 Histogram of YCrCb values in image of Fig. 1³⁾

整されていることを前提とする。この調整は画像の輝度プロファイルを画面で確認しながら行なうことで容易に実現できる。図2は図1の画像例について計算したYCrCb値のヒストグラムである。YCrCb色空間における背景色の分布は各ヒストグラムの最も高いピーク付近に集中している。Y値の分布は、画像取得時に背景輝度を調整しているため、毎回ほぼ同じ範囲にピークを示す。ゆえに、背景に属する画素は次の条件によって粒子に属する画素と区別することができる。

$$Y_{Low} < Y < Y_{High} \dots\dots\dots (4)$$

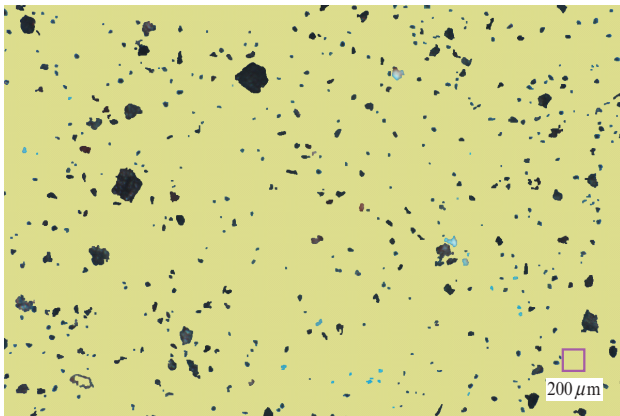


図3 図1の画像の背景（薄黄色で表示）を除去した画像³⁾

Fig. 3 Image obtained by removing background (Represented by light-yellow) from image of Fig. 1³⁾

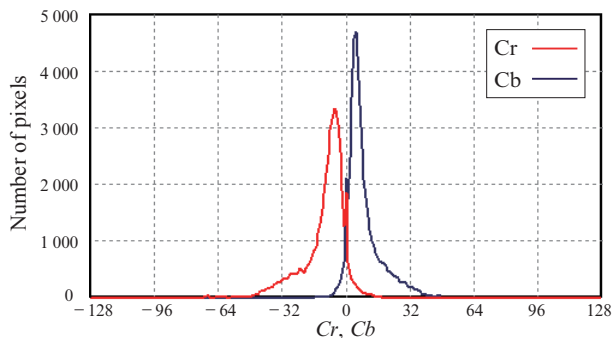
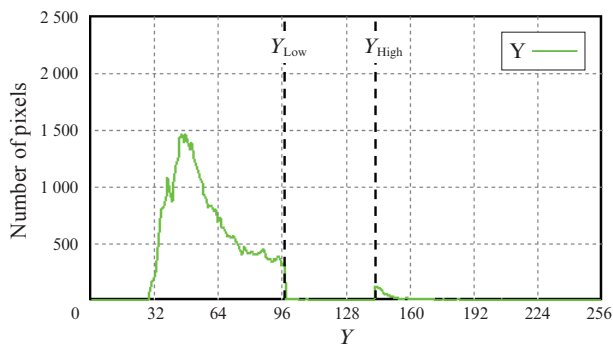


図4 図3の画像における粒子領域だけのYCrCb値ヒストグラム³⁾
 Fig. 4 Histogram of YCrCb values only in area of particles in image of Fig. 3³⁾

ここで Y_{Low} と Y_{High} は適当な閾値であり、図2上側のグラフにおいて2本の縦破線で示した。この条件式(4)を満たす画素を除去することで、粒子の周縁部を除く背景領域を除去できる。粒子の周縁部は粒子を照明することで生じる影により輝度Yの値が少し小さくなっているため、 Y_{Low} を下回る部分がある。詳細は省くが、このような残りの背景領域については、さらに追加の処理を行なうことで完全に除去する。図3に図1の入力画像から背景領域を除去した結果を示す。図4は図3の残りの領域について算出したYCrCb値の分布を示すヒストグラムであり、図2に示した背景領域も含む分布とは重なっていない。このように背景を除去した後、各粒子の領域を残りの領域から検出する。

2.3 粒子色の分類

入力画像から粒子を抽出した後、粒子を黒粒子、赤粒子、白粒子の3色に分類する。まず、粒子色を分類する前に、各粒子領域に含まれる画素を黒、赤、白の3色に分類しておく。次に粒子領域に含まれる画素の色の配分などによって粒子色を決定するが、基本的には粒子内の支配的な画素

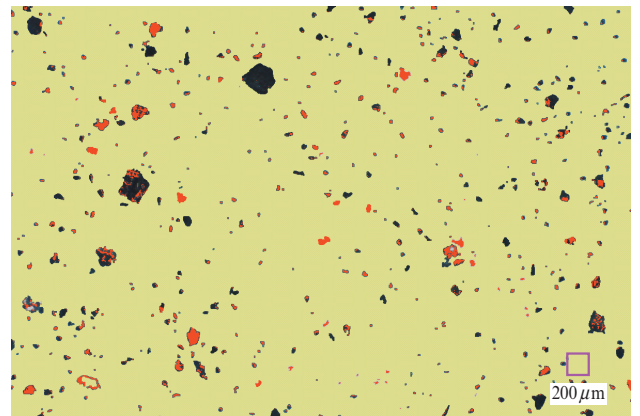


図5 画素の色を決定した結果³⁾

Fig. 5 Results of determination of pixel colors³⁾

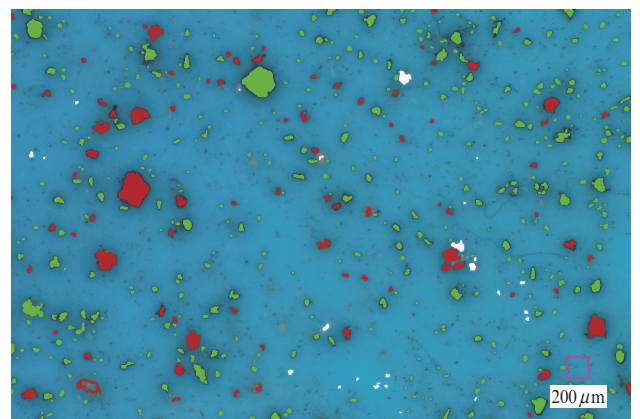


図6 粒子色を決定した結果³⁾ (黒粒子は緑で表示)

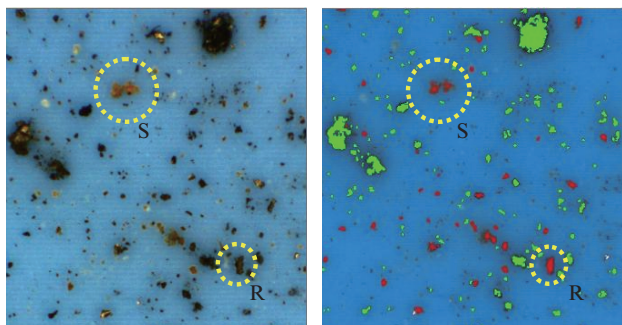
Fig. 6 Result of determination of particle colors³⁾ (Black particles are painted by green.)

の色によって決定する。図5に画素の色を決定した結果、図6に粒子色を決定した結果を示す。白の画素は、主にあるしきい値より大きいY値を持つ画素として定義する。このしきい値は背景色のY値の平均値にあるオフセット値を加えた値に設定する。このしきい値を T_y とすれば、 $Y > T_y$ なる画素が白の画素と決定される。一方、赤と黒の画素は、白い画素と判定されなかった画素について、主に Cr 値と Cb 値を各々対応したしきい値と比較して決定する。この場合のしきい値は、粒子領域内の Cr 値および Cb 値の平均値に各々オフセット値を加えた値に設定する。それらしきい値を T_{Cr} および T_{Cb} とすれば、 $Cr > T_{Cr}$ かつ $Cb < T_{Cb}$ なる画素が赤い画素、そうでなければ黒い画素と決定される。このように平均値に基づいてしきい値が自動的に設定されるので、照明の小さな変動は相殺され、誰が解析してもほぼ同じ結果が得られる。

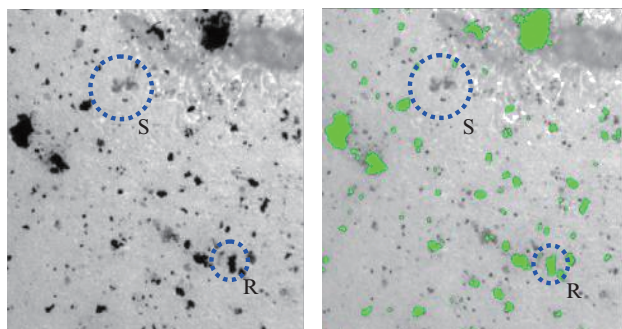
なお、ここに示した画素の色および粒子色の分類方法は基本的な方法であり、実際には種々の工夫を加えて分類精度を向上させている。

2.4 透過画像を用いた珪砂の除外

捕捉された粉塵には製鉄由来でない珪砂も含まれている。



(a) Color image of dust on tape lighted from above (Particle S is silica sand, and particle R is ore.)
(b) Result of classification of particles in (a) into three color types (Black particles are painted by light green.)



(c) Transmission image of the same dust as (a)
(d) Result of detection of opaque particles in (c) (Opaque particles are painted in light green.)

図7 透過画像を用いた珪砂の除外³⁾

Fig. 7 Exclusion of silica sand by using transmission image³⁾

珪砂の色は赤や白であるため、カラー画像上で珪砂を赤粒子や白粒子と見分けるのが難しい。珪砂を製鉄由来の粒子と見分けるため、カラー画像に加えて、粉塵をバックライトで照明して得られる画像（以下、透過画像）を用いる。透過画像はモノクロであるが、上方から照明した粉塵の画像を撮影するのに用いたのと同じカラーカメラを用いてカラー画像を得た後、数式(1)に従ってモノクロ画像に変換すればよい。珪砂の主成分は石英なので、可視光や近赤外光がある程度透過する性質を持つ。この性質を利用して、所定のしきい値より高い輝度を有する粒子を半透明粒子として再分類する。この処理の例を図7に示す。図7(a)のカラー画像中にある粒子SとRは図7(b)に示すようにいずれも赤粒子として分類されている。一方、粒子Sは図7(c)に示した透過画像中では半透明で、図7(d)に示した透過画像をしきい値処理して不透明粒子を検出した結果では検出されていない。ゆえに、粒子Sは半透明粒子、すなわち珪砂と識別される。

3. 分析システム³⁾

粉塵の画像を取得し、上述の方法により画像処理する新しい分析システムを開発した⁴⁾。開発した分析システムの装置構成は図8に示すようにPC、USB接続のカラーCCDカメラ、単焦点レンズ、接写リング、RGBカラーLED（発光ダイオード）のリング照明、バックライト付きのステージで構成した。CCDカメラとレンズの間に挿入される接写リングにより粉塵の拡大像を得ることが可能である。また、画像処理を行ない、結果を出力するソフトウェアを開発し、PCに組み込んだ。

本システムを使った分析手順は次のとおりである。始めに、粉塵が付着した粘着テープを準備する。粉塵は観測地点において粘着テープを大気中に暴露して捕捉する。このとき粘着テープを、粘着面を外側にしてパイプに巻きつけるようにして観測地点に設置する。このようにすることで、粉塵の付着位置から粉塵がどの方向から飛来したのかが分かる。粘着テープは各観測地点より回収した後、真っ直ぐにしてテープをガラスやアクリルなどの透明な板上に貼り付け、ステージの上に置く。次に、粘着テープをLEDリング照明

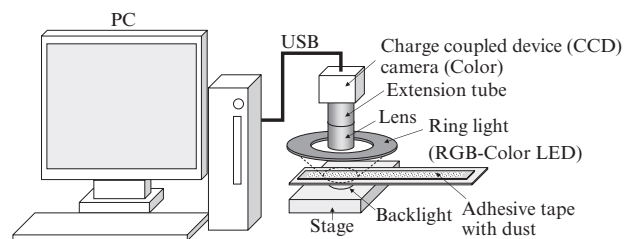


図8 分析システム³⁾

Fig. 8 Analysis system of dust on adhesive tape³⁾

で上方から照らして粉塵粒子のカラー画像を撮影する。続けて、照明をLEDリング照明からバックライトに切り替えて透過画像を撮影する。カラー画像と透過画像のペアが得られると、分析システムは2枚の画像を自動的に分析して、粉塵粒子の抽出と色分類（3色および半透明）を行なう。また、各粒子の大きさ（粒子面積および粒径）や色種別ごとの粒子数も測定する。カラー画像と透過画像の撮影と解析を8つの粉塵飛来方位（北、北東、東、南東、南、南西、西、北西）に対応した粘着テープ上の8ヶ所について繰り返す。

最後に、統計処理した結果がグラフとチャートに出力される。結果は分類された粉塵について色種別ごと、飛来方位ごと、粒径ごとに算出された粒子数と面積を含んでいる。一連の操作と処理は開発したソフトウェアによって容易に実行することができる。人が行なうべき作業は粉塵画像の撮影だけで、それ以外はしきい値調整も含めて自動的に画像処理により分析が行なわれる。

4. 分析結果³⁾

開発した分析システムを使用して粉塵が付着したテープを分析した。8方位のカラー画像と透過画像を順に撮影し分析した。全画像の撮影と分析を10分以内で行なうことができた。図9に全方位について撮影した画像と、それらを分析して粉塵粒子を3色および半透明に分類した結果の画像を示す。また、統計的結果を図10に示す。図9および図10は開発したソフトウェアによる出力イメージの一例でもある。図9の画像全体を見ることで、粉塵を捕捉した粘着テープの様子、たとえば粒子の量や色を一目で確認することができる。また、上段のカラー画像と下段の画像処理結果を比較することにより、各粒子が何色に判定されたかも分かる。また、図10(a)は粒子の色種別ごとのレーダーチャートであり、観測期間における各方位からの飛来粉塵量を定量的に把握することができる。さらに、図10(b)は特定の色種別に分類された粒子についての飛来方位ごとの粒度分布であり、粉塵に含まれる粒子の主な粒径を把握することができ

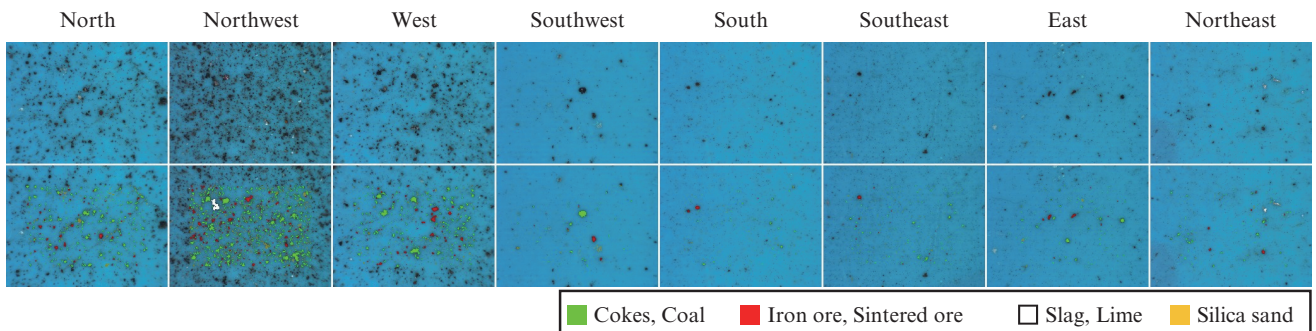
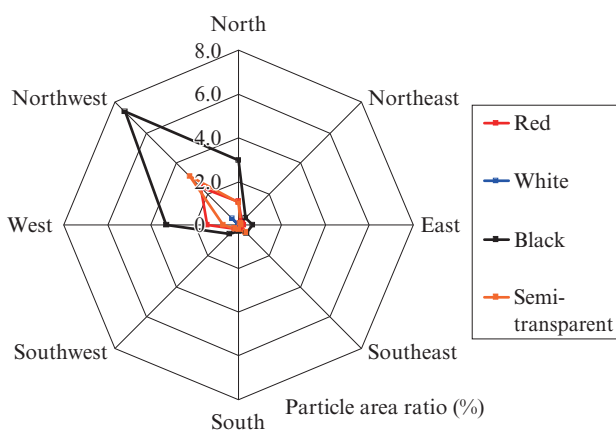
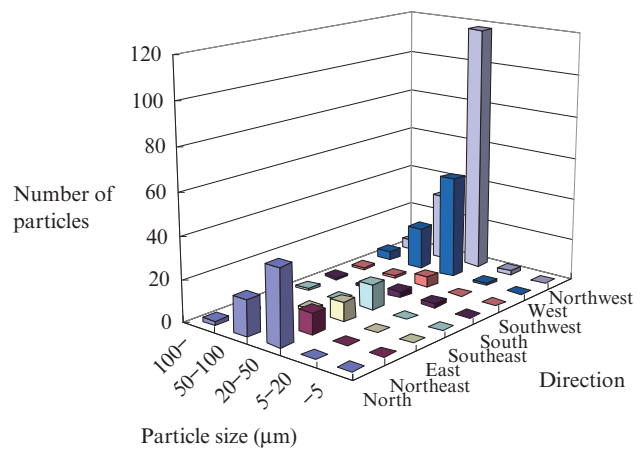


図9 8方位の撮影画像（上段）と色種別分類結果（下段）³⁾

Fig. 9 Raw images (Upper row) and result images (Lower row) of color type classification for eight directions³⁾



(a) Radar chart showing the particle area ratio for each direction and particle color calculated from the images in Fig. 9



(b) Particle size distribution of the red particles for each direction calculated from the images in Fig. 9

図10 統計データの出力例³⁾

Fig. 10 Example of statistical data output by the analysis system³⁾

る。これらの結果は同時に数値データとしても出力される。

本分析システムを使って得られた結果は、粉塵の発生源と飛散ルートの把握に役立てられている。たとえば、粉塵発生源の推定、各粉塵発生源が降下粉塵量に及ぼす影響度合いの評価、風速が粒度分布に与える影響の評価などである。観測期間中の風速などの気象条件と分析結果を比較したり、同気象条件下での粉塵飛散シミュレーションと比較したりすることで各種の評価を行なっている。また、粉塵飛散防止対策後の評価にも分析装置は役立てられている。

5. おわりに

製鉄由来の粉塵粒子をカラー画像と透過画像の分析により自動的に分類し定量化する技術および分析システムの開発について述べた。

- (1) 粉塵が付着した粘着テープを上方から照明して撮影したカラー画像より粉塵粒子を抽出し、黒、赤、白の3色に分類する。粒子の抽出、粒子の色分類はYCrCb値に基づいて行なう。色分類のための閾値はYCrCb値の平均値に基づき自動的に調整されるので、属人性が排除され、短時間で分析が可能である。
- (2) 製鉄に由来しない珪砂は、その光の透過性に着目して、バックライトで照明して撮影した透過画像を用いて排

除する。これにより、製鉄に関する粒子についての測定精度が向上できる。

- (3) 粉塵粒子の個数や面積を色種別、飛来方位、粒径ごとに算出した統計データを取得可能である。得られたデータは、粉塵発生源と飛散ルートの特定、さらに、効果的な粉塵飛散防止策の計画および実施に役立てられている。

参考文献

- 1) 小倉滋, 手塚宏之, 弓手崇生, 田村望. JFE 技報. 2013, no. 32, p. 1-7.
- 2) たとえば, Mora, C. F.; Kwan, A. K. H.; Chan, H. C. Cement and Concrete Research. 1998, vol. 28, no. 6, p. 921-932.
- 3) Umegaki, Y.; Kazama, A.; Fukuda, Y. Proc. of SPIE. 2014, vol. 9217, p. 92170G.
- 4) 梅垣嘉之, 風間彰, 塩原幸光, 土場英一郎, 中川雄嗣, 橋本邦俊. 材料とプロセス. 2012, vol. 25, no. 1, p. 348.



梅垣 嘉之



風間 彰



福田 義徳