

AIを活用したセメント・クリンカー検鏡の自動分析システム

太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所セメント化学グループ 金田 涼
 太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所セメント化学グループ 山口 麻衣子
 太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所セメント化学グループ 長谷川 舞帆
 太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所セメント化学グループ 三石 清華
 太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所セメント化学グループリーダー 細川 佳史

1. はじめに

セメント産業では、焼却灰や下水汚泥などのリサイクル原料をクリンカーの原料代替として大量に受け入れつつセメントを製造、供給している。一般に、リサイクル原料は成分が一定でないことから、安定した品質でセメントを製造するためには高度な品質管理技術が求められる。太平洋セメントグループでは、製造したセメント・クリンカーの特性値を自動で分析しデータ収集を行うオンライン分析システムや、それらの分析データからニューラルネットワークにより物性の予測を行う太平洋品質予測システム(TQPS®)の活用など、徹底した品質管理体制のもとセメントを製造している。現在でも、これらの品質管理技術に加え、AIやIoTを利

活用した新規の品質管理技術の開発に取り組んでいる。その中で、品質管理の強化のみでなく、製造操作の最適化にもつながる新規の分析項目として、AIと画像処理技術を活用したクリンカー熱履歴の自動分析システムを開発した。

本稿では、開発したAIによるクリンカー検鏡の自動分析システムについて紹介を行う。

2. クリンカーの熱履歴

セメントの中間製品であるクリンカーにおいて、キルンに投入された原料が液相生成などの化学反応を経て、クリンカーの状態でキルンから排出されるまでに受けた温度の履歴を熱履歴と呼ぶ。クリンカー鉱物の組織形態や光学的特性は、

原料の化学組成や熱履歴を反映して変化するため(図-1)、クリンカー鉱物の組織形態を観察することで、高温であるために観察が難しいキルン内部の状態が推定可能である。また、クリンカーの熱履歴は鉱物の活性とも相関があることが知られており、セメントの強さや凝結などの物性と密接な関係がある。このように、クリンカーの熱履歴はセメントの製造工程において重要な評価指標であり、分析を定常的に行うことで、クリンカーの焼成工程から最終的なセメント製品の物性までを考慮した効率的な製造操作が可能となる。

3. 従来の熱履歴の評価手法

クリンカー熱履歴の評価手法としては、Ono's method(以下、小野法)が広く知

表-1 小野法による評価項目

検鏡項目	4点評価	焼成条件の推定
エーライトの結晶径	AS	昇温速度
エーライトの複屈折	AB	最高温度
ビーライトの結晶径	BS	保持時間
ビーライトの色調、(複屈折)	BC	冷却速度

各項目は1～4点に区分評価し、次式により28日圧縮強さ(旧JIS)を推定している。
 $F(28d) = 258.07 + 5.23AS + 20.67AB + 3.41BS + 22.22BC$ (Kgf/cm²)
 圧縮強さ300～450Kgf/cm²の範囲で、推定標準偏差は17Kgf/cm²である。

られている。本手法では、偏光顕微鏡により観察したクリンカー鉱物の組織形態や光学的特性を4段階で評価し、セメントの28日強さを予測する¹⁾。小野法による評価項目を表-1に示す。

本手法は、偏光顕微鏡のみで行えるという利点はあるものの、目視によるクリンカー鉱物の観察・評価が技術の基盤であるため、単位時間当たりに測定できるサンプル数に限りがあることや、原料組成が多様化した現在では測定に高度な技術や経験が求められる。そのため、一定精度かつ定常的に分析を行うことは難しい。そこで、AIと画像処理技術を活用することで、従来のクリンカーの顕微鏡観察フローを自動化した分析システムを開発した。

4. AIによる自動分析システムの概要

小野法による顕微鏡観察では、クリンカー鉱物のうちエーライト、ビーライトをそれぞれ分析対象としているが、エーライト結晶は粉砕により破壊されやすく、粒子形態の観察面に課題があるため、システム開発の第一段階としてビーライト粒子の粒径・色調のみを分析対象としたシス

テムを構築した。

技術者による顕微鏡観察のフローでは、鉱物の観察に適した屈折率となるよう調整した溶媒に粉末試料を分散させ、観察用の懸濁液を作成する。次に、調整した懸濁液を顕微鏡により観察し、得られた像の中から分析対象であるクリンカー鉱物を判別して、その粒径・色調を目視により評価する。AIを活用した検鏡の分析システムでは、技術者が実施していたこれらのフローを複数の装置により自動化している。本分析システムの概略図を図-2に示す。また、各装置の役割について以下に示す。

■試料調整装置

本装置では、顕微鏡観察フローのうち、試料調整を行う。従来の顕微鏡観察と同様に、観察に適した屈折率となるよう分注・混合した溶媒に粉末試料を分散させる操作を、ロボットアームとピペットを搭載した装置により自動で行う。

■粒子画像取得装置

本装置では、顕微鏡観察フローのうち、

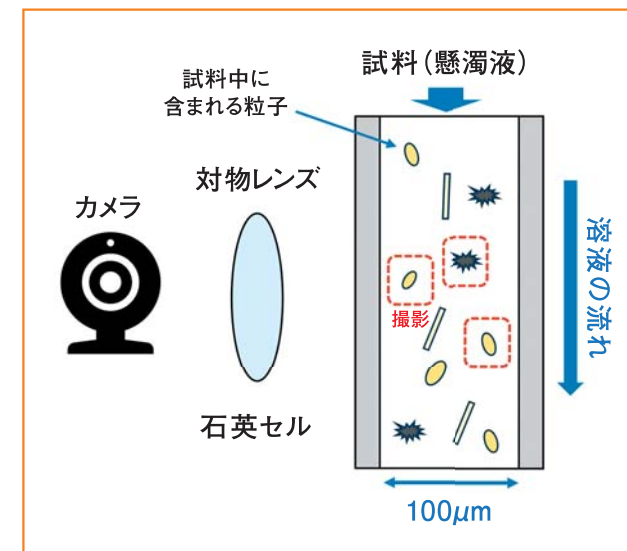


図-2 粒子画像取得装置内部の様子

クリンカー鉱物の観察を行う。

装置内部に設置された幅100μmの流路内に、試料調整装置で調整した懸濁液を流通させ、流路内を流れる粒子をカメラにより撮影することで、試料中に含まれる粒子の画像を収集する(図-3)。収集される粒子の画像は、測定条件にも依存するが1試料当たり数十万枚以上と非常に多量である。そのため、観察対象粒子の特徴量に合わせたフィルタリングを行い数千枚程度まで画像数を減らすことで、後工程に当たるAIによる粒子判別処理の負荷を低減している。

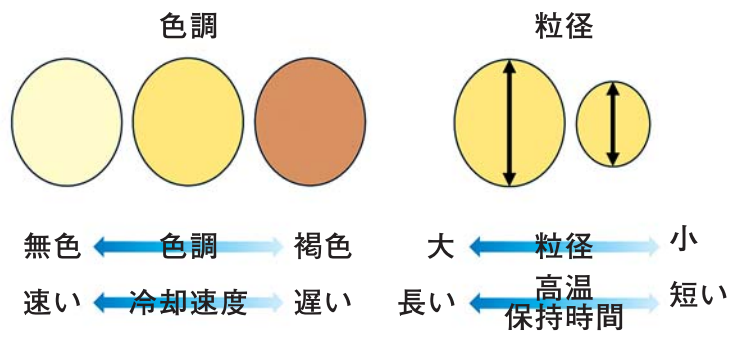
■AIアプリ

AIアプリでは、AIによる観察対象粒子の判別と、画像処理による鉱物の粒径・色調評価を行う。

粒子画像取得装置で収集された粒子



(a) クリンカー研磨試料の観察図



(b) 熱履歴によるビーライトの色調・粒形変化

図-1 熱履歴の差異によるクリンカー鉱物の組織形態変化

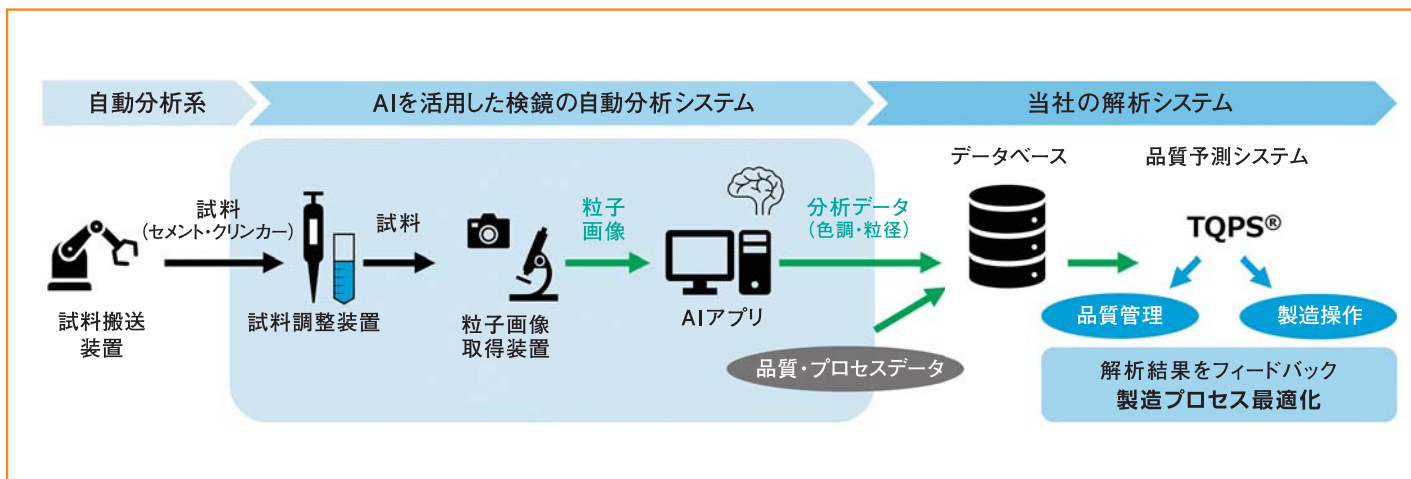


図-3 AIを活用した検鏡の自動分析システムの概要

画像には、分析対象であるビーライト粒子以外にも、間隙質の付着や粉碎時の欠けにより観察に適さない粒子や、エーライトや石膏等のビーライト以外の鉱物も含まれる(図-4)。そのため、ビーライト粒子の粒径・色調を評価するためには、観察対象であるビーライト粒子のみを判別する必要がある。アプリでは、技術者と同等の判別基準を学習したAIモデルにより、観察対象である粒子のみを判別している。AIモデルの学習には、特徴の異なる試料の分析により得られたおよそ32万枚の粒子画像を、技術者が分析対象とそれ以外に仕分けを行い、これらの特徴量を学習させることで顕微鏡技術者の判別基準を学習している。このように学習を行ったAIモデルについては、同じデータセットを対象に、技術者による粒子判別結果と比較することで判別精度の検証を実施している。ここで、判定結果の差異が大きい場合には、学習用画像の追加や技術者による判別基準の精査を行うことで精度の向上を図っている。最終的に作成されたAIモデルでは、技術者による粒子の判別結果と比較して95%以上の一致を示し、技術者と同等に観察対象であるビーライト粒子の判別が可能であることを確認した。

画像処理によるビーライト粒径の評価では、AIが抽出した粒子画像について、背景の輝度の差異からビーライト粒子の

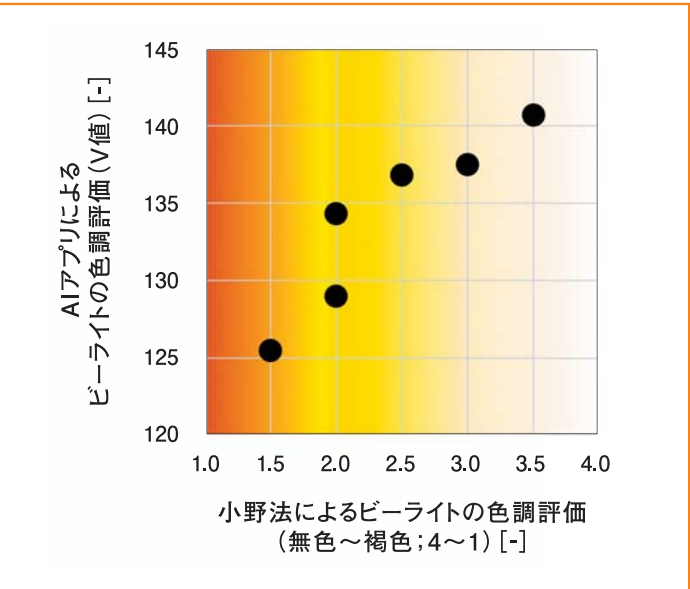


図-5 AIアプリと小野法によるビーライトの色調評価の比較



図-4 セメント・クリンカー試料中に含まれる粒子の種類

輪郭を認識し、輪郭に外接する矩形の長辺・短辺をビーライト粒子の長径・短径として評価する。色調の評価では、電子画像の色を赤 (Red)、緑 (Green)、青 (Blue) の比率で表現するRGBカラーモデル、およびそれらを色相 (Hue)、彩度 (Saturation)、明度 (Value) に変換したHSVカラーモデルに基づき評価を行う。このように、本システムにおいてはビーライトの粒径・色調を数値として評価することが可能である。

特徴の異なる実機製造品のクリンカー試料を対象とした評価では、AIアプリにより出力した色調評価と、小野法に基づいた技術者による色調評価には高い相関が見られ(図-5)、AIによる判別と画像処理技術により技術者と同等に鉱物の評価が可能であることも確認できている。また、クリンカーの焼成条件の差異を本分析システムにより評価可能であるか、

電気炉により作製したクリンカーによるラボスケールの評価も実施している。クリンカー焼成時の、最高温度における保持時間を変化させた場合の評価結果を図-6に示す。試料は、工業原料と市販の高純度試薬を混合し、電気炉により最高温度1,550℃で焼成することで作製した。ここで、最高温度での保持時間を5、30、60、90分と変化させた4水準を調整した。これらの試料について、本分析システムにより各2回測定を行い、得られたビーライト長径それぞれの平均値を高温保持時間に対してプロットした。図より、高温保持時間が増加するに伴いビーライト長径が大きくなる傾向が確認できる。これは、ビーライトの生成温度以上の高温における保持時間が長くなることで、結晶成長が促進されたためであると考えられる¹⁾。これにより、熱履歴の変化による組織形態の変化をAIと画像処理を活用した分

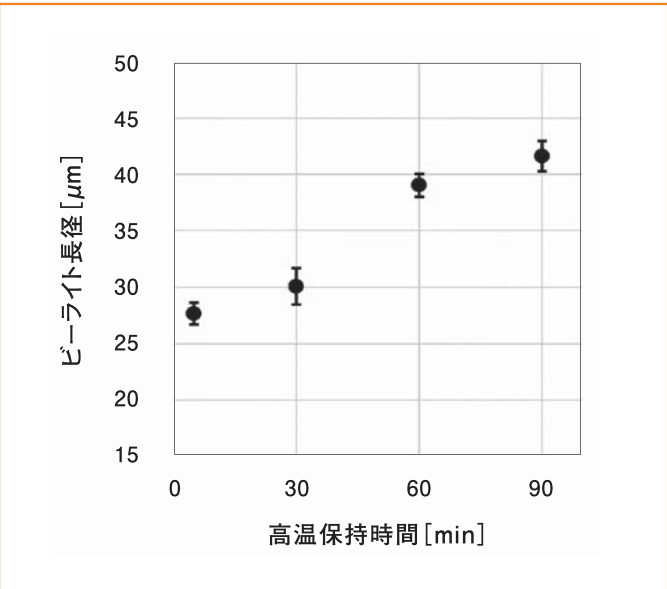


図-6 焼成時の高温保持時間によるビーライト長径の変化

析システムにより評価可能であると考えられる。また、従来の技術者による評価では、鉱物の観察結果を4段階で評価しているのに対し、本分析システムではビーライト粒子の粒径や色調を数値として評価しており、熱履歴による鉱物の組織形態や光学的特性の変化をより細分化し、定量的な評価が期待できる。

その一方で、従来の顕微鏡観察手法では、顕微鏡による観察視野内に含まれる代表的な粒子の特徴量を基に評価するのにに対し、本分析システムではAIにより判別された全てのビーライト粒子の粒径・色調の平均値を算出し評価している。また、本分析システムではビーライトのみを分析対象としていることなど、従来の顕微鏡観察手法と厳密には観察対象および方法が異なる点もある。その他にも、小野法が開発された当時と現在では、リサイクル原料の使用による原料組成の多様化や、焼成設備の進化により製造条件が異なることも考慮し、熱履歴とクリンカー鉱物のキャラクター変化との関係をより詳細に検討していく必要がある。

現在は、ビーライトを対象とした分析システムの開発が完了し、当社工場への試験導入を進めている(写真-1)。今後は、試験導入により得られた実機での熱履歴分析データを活用したデータ解析や、焼成条件を変化させたクリンカーによるラボスケールでの検討を進める。これにより、製造プロセス操作によるクリンカー特性の変化、および品質への影響を相互

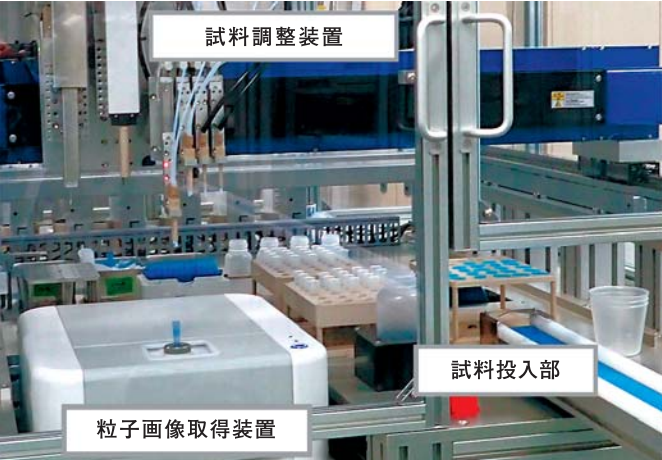


写真-1 試験導入中の検鏡の自動分析システム

に確認しつつ、最終的なセメント製品の物性を考慮した省エネかつ低炭素な製造操作へ貢献できるよう技術開発を進める。

5.おわりに

クリンカーの熱履歴は、製造時の焼成条件を反映して変化し、セメント物性とも相関があるため、セメントの製造工程、および品質の両面で活用が期待される重要な評価指標である。AIと画像処理を活用し、従来の熱履歴評価手法を自動化した分析システムを開発することで、これまでは困難であった一定精度かつ高頻度での熱履歴評価を可能とした。その一方で、小野法が開発された当時と比較し原料組成の多様化や焼成設備の進化など、前提とされる条件も変化しており、熱履歴とクリンカー鉱物のキャラクター変化との関係をより詳細に検討していく必要がある。また、現行の分析システムではビーライトのみを対象としているが、装置改造や分析フローの更新によりエーライトの光学的特性の分析についても検討を進めていく予定である。

これらの検討を進めることで、将来的には、本分析システムにより得られた分析データを太平洋品質予測システム(TQPS®)等の品質管理技術へ組み込み、セメント製造工程のさらなる高度化が期待される。

【参考文献】

- 1) Yoshio Ono, Ono's method : fundamental microscopy of portland cement clinker, Chichibu Onoda Cement Corp., 1995
- 2) 大門正機, 浅賀喜与志, 小野吉雄: セラミックスのキャラクターゼーション技術, セラミックス21 No. 11, 1986
- 3) 下田孝: セメント製造技術の系統化調査, 国立科学博物館技術の系統化調査報告, Vol.23



かねだ・りょう



やまぐち・まいこ



はせがわ・まほ



みついいし・さやか



ほそかわ・よしふみ

【著者略歴】
1995年 株式会社太平洋コンサルタント入社
(現 太平洋セメント株式会社)入社
現在 同社研究開発本部セメント・コンクリート研究所セメント化学グループ
博士(工学)