

◇論文◇

AIを活用した自動検鏡システムの開発

Development of Automated Microscopy System for Belite Using AI and Image Processing

金 田 涼*, 山 口 麻衣子*,
細 川 佳 史**

KANEDA, Ryo*; YAMAGUCHI, Maiko*;
HOSOKAWA, Yoshifumi**

要 旨

クリンカー鉱物の組織形態や光学的特性は、その製造過程で受ける熱履歴により変化し、熱履歴はクリンカー鉱物の水和活性にも影響を与える。したがって、クリンカー組織の顕微鏡観察で得られる情報は、製造条件の推定や品質制御の指標として有用であり、プロセス・品質制御の両面において重要である。一方、顕微鏡観察による評価は観察者の目視判断に依存するため、一定精度の観察には高度な技術と経験が求められ、単位時間当たりの測定量にも限りがある。そのため、実製造におけるオンライン適用が難しい。そこで、人工知能（AI）と画像処理を活用した、熱履歴の自動分析システムを開発した。本論文では、異なる熱履歴を受けたクリンカーを対象に、顕微鏡技術者と本システムによる評価結果の比較を行った。その結果、本システムでは焼成条件によるビーライトの組織形態や光学的特性の変化を、顕微鏡技術者と同等の基準で評価可能であることが示された。

キーワード：クリンカー，検鏡，熱履歴，AI

*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

Cement Chemistry Group, Cement & Concrete Research Laboratory, Research & Development Division

**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

Manager, Cement Chemistry Group, Cement & Concrete Research Laboratory, Research & Development Division

ABSTRACT

The microstructure and optical properties of clinker minerals are strongly influenced by the thermal history during kiln firing, which affects their hydration reactivity. Therefore, microscopic observation of clinker microstructure provides essential information for both process optimization and quality control. However, conventional microscopic evaluation relies on visual inspection by skilled technicians, requiring significant expertise and limiting the amount of observation per unit time. This makes online analysis in industrial production difficult. To address these issues, an automated microscopy system using Artificial Intelligence (AI) and image processing techniques has been developed. This paper presents a comparison between evaluations conducted by a microscopy technician and the automated system for clinker samples produced under different firing conditions. The results demonstrate that the system is capable of evaluating belite grain size and color with a level of accuracy comparable to that of a microscopy technician.

Keywords : *Clinker, Microscopy, Thermal history, DX*

1. はじめに

セメント製造における熱履歴とは、キルン内に原料が投入され、液相生成を含む化学反応を経てクリンカーとして排出されるまでに受ける温度の履歴のことを言う。クリンカー鉱物の組織形態および光学的特性は熱履歴を反映して変化するため、これらを観察することで、高温であるために直接の観察が難しいキルン内部の様子を推定することが可能である^{1) 2)}。また、熱履歴はクリンカーの水和反応性にも影響を与え、セメント物性とも密接に関係することが知られている^{1) 2) 3)}。このように、クリンカーの熱履歴は、製造プロセスおよび品質管理の両面で重要な指標の一つといえる。クリンカーの熱履歴評価手法としては、偏光顕微鏡観察に基づく Ono's method (以下、小野法) が広く知られている¹⁾。本手法では、エーライトおよびビーライトの組織形態や光学的特性から熱履歴を段階的に評価し、評価した熱履歴からセメントの 28 日強さの予測が可能である。また、特別な分析装置を用いず顕微鏡のみで行える点も有用である。

一方、近年のセメント製造では原料の多様化が進み、原料の化学組成や鉱物組成など、品質に影響を及ぼす因子の数は膨大かつ複雑化している。そのため、単一の指標による品質予測は難しく、複数の評価項目から品質の予測や制御を行う必要がある。実際に、近年のセメント工場では、鉱物組成や化学組

成、粉末度といった、複数の特性分析をオンライン化し、高頻度の分析で得られた膨大なデータの数値解析により品質予測を行うなど、その品質管理技術は高度化している⁴⁾。このような背景のもと、従来の顕微鏡観察に基づく熱履歴評価は、評価結果が観察者の技術に依存し、一定精度の評価を維持するためには高度な技術や経験を要する点や、単位時間当たりの測定量に限りがある点で、実製造におけるオンライン適用が困難であるという課題を有する。そこで本研究では、顕微鏡観察による熱履歴評価を自動化し、実製造プロセスへの適用を可能とすることを目的として、AI および画像処理技術を用いた検鏡分析システムの開発を試みた。小野法の評価対象鉱物のうち、エーライトは試料調製過程で自形が損なわれやすく自動判別が困難であることから、本研究の第一段階では比較的形態保持性に優れるビーライトに着目した。本報では、AI を活用した自動検鏡システムの構成および、その評価結果を顕微鏡技術者による評価結果と比較した検討内容について報告する。

2. AI検鏡システムの開発

AI 検鏡システムの構成を Fig. 1 に示す。本システムでは、従来の顕微鏡観察手法を AI と画像処理技術により代替し、(1) 粒子画像の取得工程、(2) 粒子の判別工程、(3) 粒子の評価工程、の 3 工程により分析を行う。各工程の詳細について以下に示す。

(1) 粒子画像の取得工程

粒子画像の取得工程では、セメントまたはクリンカー試料中に含まれる粒子画像の撮影を行う。画像の取得にはフローイメージング顕微鏡(FlowCam8000, 横河電機株式会社製)を使用した。装置の模式図を **Fig. 2** に示す。装置内部には、測定試料を導入する流路を備えた石英セル(撮影方向深さ $100\mu\text{m}$)、20 倍対物レンズ、解像度 $1920 \times 1200\text{pixel}$ ・最大フレームレート 60fps のカラーカメラが搭載されている。測定には、プレーン比表面積が $3000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度に粉砕したセメントまたはクリンカー試料を用い、ジヨードメタン(鹿特級, 関東化学), ブロモホルム(97.0+, 富士フイルム和光純薬)の混合溶媒に分散させて懸濁液を調整した。混合溶媒は、粒子表面の観察を容易にすることを目的として、ビーライトの屈折率(約 1.70)¹⁾と同等となるようジヨードメタンとブロモホルムを体積比で 3:1 に混合した溶媒を使用した。調整した懸濁液を 0.03 ml/min の流量

で石英セル内に通液し、20 倍対物レンズ付きのカメラで 20 分間撮影を行った。得られる粒子には、クリンカー鉱物や、石膏、石灰石などの混合材、さらにそれらの粉砕片等が含まれ、1 試料当たり 100,000 枚以上の大量の画像が取得される。本工程では、AI による判別工程の負荷を低減するため、取得画像に対して事前の予備選別を行った。粉砕により生じる破片は、楕円形状であるビーライト粒子と比較して角張った形状であり、輝度が小さく、粒子サイズが小さい等の特徴を示す。これらを除くため、粒子サイズ、円形度、輝度、エッジ勾配に基づくフィルタリングを行った。フィルタリングの条件を **Table 1** に示す。これにより、ビーライト粒子と大きく特徴の異なる粒子のみを予備選別し、100,000 枚以上の粒子画像を 2,000~3,000 枚程度まで絞り込んだ。

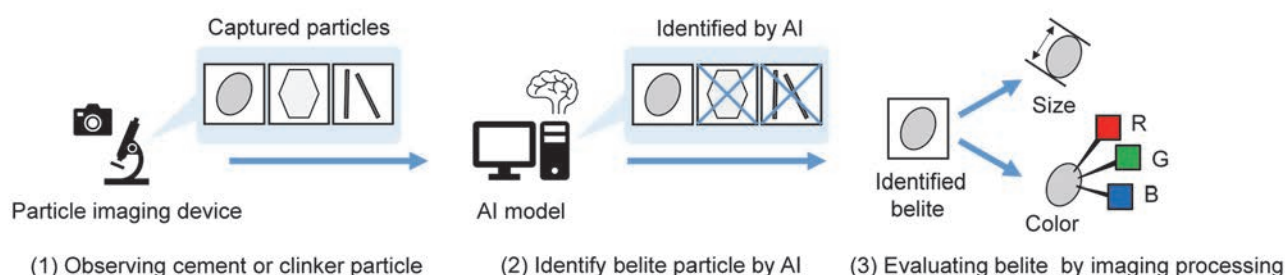


Fig.1 Configuration of AI microscopy system
(AI 検鏡システムの構成)

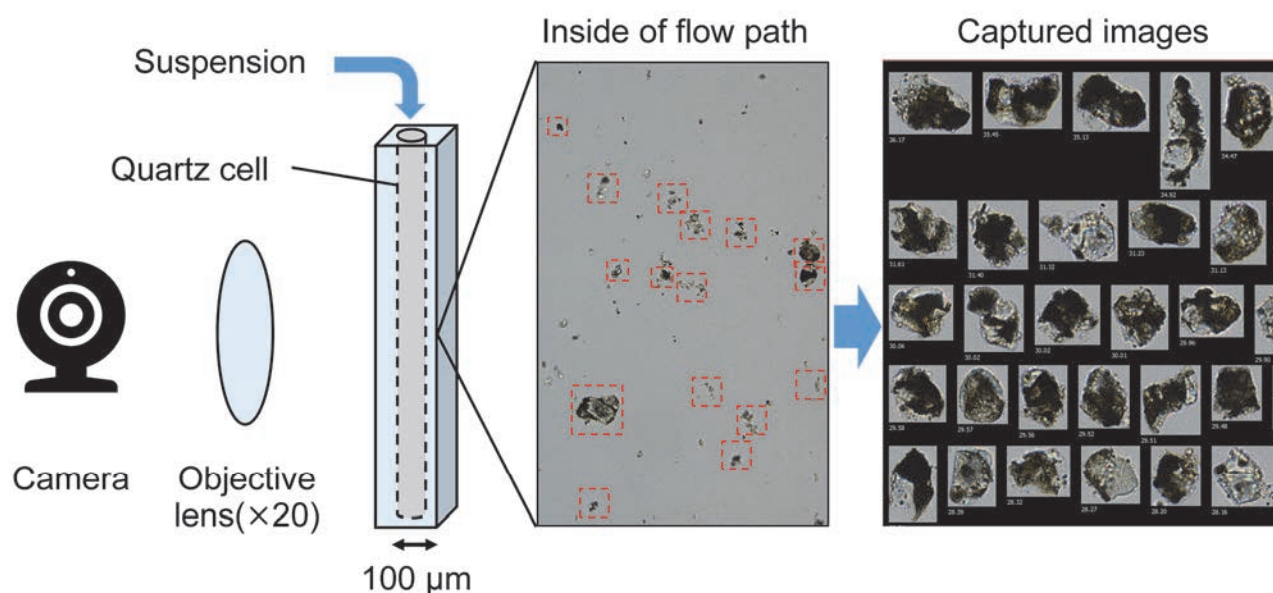


Fig.2 Mechanism of particle imaging device
(粒子画像取得装置の機構)

Table 1 Filtering parameter and setting value for pre-sorting
(予備選別におけるパラメーターおよび基準値)

Filtering parameter	Setting value	Filtering Purpose
Particle diameter	10-100 (μm)	Remove fine particle fragments
Circularity	0.92-1.00 (-)	Remove angular particles
Edge gradient	110.00-200.00 (Intensity/pixel)	Remove out-of-focus images
Intensity	80.00-200.00 (-)	Remove particle fragments

(2) 粒子の判別工程

粒子の判別工程では、(1)で得られた粒子群から、評価対象である粒子のみをAIにより自動判別する。(1)で得られる粒子は、(i)ビーライト単相の粒子、(ii)ビーライトではあるが他の粒子片の付着や粒子の欠けにより評価に適さない粒子、(iii)エーライトや石膏などのビーライト以外の粒子、の3種類に分類され (**Fig. 3**)、本工程では (i)のみを評価対象とした。AIモデルの構築には、画像処理ライブラリ (HALCON, MVTec 社製)⁵⁾を使用し、粒子画像の収集、粒子特徴量の学習・検証の手順で行った。粒子画像の収集では、実機設備で製造されたクリンカーを対象に、(1)と同様の手順で収集した318,893枚の粒子画像を用いた。これらの試料は、データの多様性確保の面から、小野法による技術者評価が異なる7点のクリンカー試料とした。収集した画像は、技術者により評価対象の粒子 (**Fig. 3**, (i))と、評価対象外の粒子 (**Fig. 3**, (ii), (iii))に分類され、AIモデルの学習・検証工程における教師データとして利用した。学習工程では、深層学習 (ディープラーニング)により教師データの粒子特徴の抽出と分類学習を行った。AIモデルの検証には交差検証⁶⁾を採用し、3分割した教師データのうち2セットを学習データ、1セットを検証データとして、組合せを入れ替えて

全データの検証を実施した。最終的に構築したAIモデルは、技術者による判別結果に対して95%以上の一致率を示した。

(3) 粒子の評価工程

粒子の評価工程では、AIにより判別された(i)のビーライト単相粒子を対象に、画像処理を用いた色調および粒径の評価を行った。評価は1試料中に含まれる、AIが判別したすべてのビーライト粒子に対して行い、それらの平均値を試料の代表値とした。色調の評価では、画像を二値化し、輝度差からビーライト表面の付着物等の不要領域を除去した後、残存領域の色調を平均化して算出した。色調は、RGB、およびHSVカラーモデル⁷⁾に基づき数値化した。ここで、RGBカラーモデルは、電子画像の色を0~255の256階調で表した光の三原色の各要素(R:赤, G:緑, B:青)の比率で表現するものである。また、HSVカラーモデルは、色相(H)、彩度(S)、明度(V)に変換したものである。粒径の評価では、粒子画像の輪郭に外接する矩形の長辺、短辺の長さをそれぞれ、ビーライトの長径、短径として数値化する。矩形の辺の長さは、直径が既知である球形粒子の画像を(1)に記載の手順で分析し、電子画像の1画素あたりの長さを算出することで求めた。

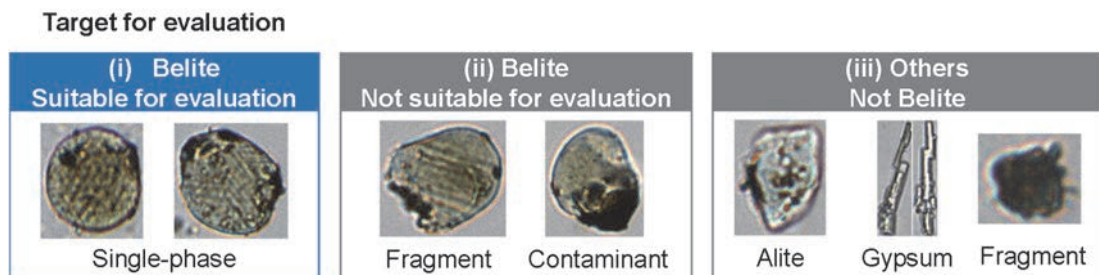


Fig.3 Types of particles captured at imaging process
(粒子画像の取得工程で撮影される粒子の種類)

3. 実験概要

3.1 従来法との評価結果の比較

AI 検鏡システムによる評価の妥当性を検証するため、本システムおよび技術者が従来法に基づき評価した、ビーライトの粒形・色調の比較を行った。検証は、粒子判別を行う AI モデルの学習用試料を対象に行った。AI 検鏡システムによる評価は、2. に記載の手順により行い、AI により評価対象として判別された粒子群の粒形・色調を画像処理により数値化した。技術者による評価は、Table 2⁸⁾ に示す小野法の評価基準に基づき行い、顕微鏡観察により得られたエーライト、ビーライトの組織形態や光学的特性から、それに紐づく熱履歴を4段階で評価した。評価結果は、中間評価も含め1～4の数値に換算し、AI 検鏡システムにより数値化されたビーライトの粒形、および RGB, HSV とそれぞれ比較を行った。Table 3 に、評価対象であるクリンカー試料の、技術者による評価結果を示す。

3.2 高温保持時間の異なるクリンカーの評価

AI 検鏡システムによる焼成条件の検証のため、技術者と AI 検鏡システムによるビーライト粒形の評価結果の比較を行った。検証には、電気炉を用いて異なる焼成条件で合成した4点のクリンカー試料を使用した。クリンカーは、目標組成(Table 4)となるよう工業原料、および SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaCO_3 , MgO , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , K_2CO_3 の特級試薬を混合し、ペレット状に成型後、焼成を行うことで合成した。焼成は Fig. 4 に示す通り、ペレットを 1000°C で30分間仮焼き後、 1550°C で焼成を行い、室温で冷却することで行った。 1550°C における保持時間は、5, 30, 60, 90 分の4水準とした。焼成後のクリンカーは、ブレン比表面積が $3000 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ となるようタングステン製の振動型ディスクミルで粉碎を行い、測定用の試料とした。AI 検鏡システムによる分析は各試料につき2回行った。

Table 2 Four observation terms of Ono's method
(小野法における評価項目)

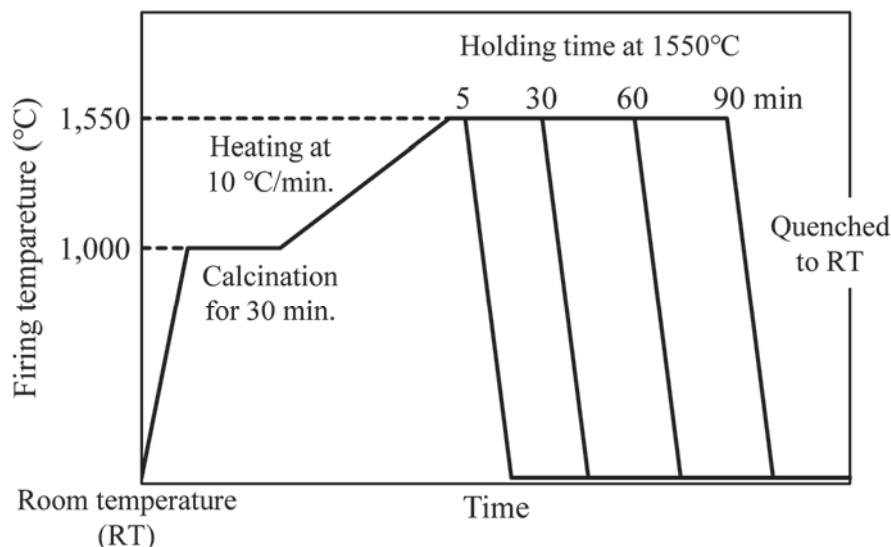
Burning condition related to the term Terms of observation	Observation result (Grade)			
	Excellent (4)	Good (3)	Average (2)	Poor (1)
Heating rate	Rapid	←	→	Slow
Size of Alite	15-20	29-30	(25)30-40	40-60(120)
Maximum temperature	High	←	→	Low
Birefringence of Alite	0.010-0.008	0.007-0.006	0.006-0.005	0.005-0.002
Keeping time at the maximum temperature	Long	←	→	Short
Size of Belite	(20)25-40(60)	(15)20-40	(10)15-20	5-
Cooling rate	Rapid	←	→	Slow
Color of Belite	Clear	Feint yellow	Yellow	Amber

Table 3 Evaluation result of clinker sample for learning of AI model
(AI モデルの学習に用いたクリンカー試料の評価結果)

Sample	Evaluation by Ono's method (Grade / Evaluation results)			
	Size of Alite	Birefringence of Alite	Size of Belite	Color of Belite
A	2.25 (30)40-60	3.00 0.007-0.006	4.00 20-30(40)	1.50 Umber-Yellow
B	3.75 20-30(40)	2.50 0.006	2.50 (10)15-30	2.00 Yellow
C	2.25 30-40(60)	3.75 0.007(8)	4.00 (25)30-40(60)	2.00 Yellow
D	3.75 20-30(40)	3.25 0.007(8)	2.25 15-20(25)	2.75 Yellow-Feint Yellow
E	3.75 20-30(40)	3.25 0.007(8)	2.50 10-25	3.00 Feint Yellow
F	3.00 30-40	4.00 0.008	3.00 (15)20-30	3.50 Feint Yellow-Clear

Table 4 Target composition for test clinker
(試験クリンカーの目標組成)

Modulus			Chemical composition		Mineral composition (Bogue)			
HM	SM	IM	SO ₃	MgO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1.97	2.82	0.80	0.51	0.87	46.8	34.6	2.1	14.5

Fig.4 Firing conditions of test clinkers in an electric furnace
(試験クリンカーの電気炉における焼成条件)

4. 結果と考察

4.1 従来法との評価結果の比較

本システムによるビーライト色調および技術者による冷却速度の評価結果の関係を **Fig. 5~7** に示す。技術者による冷却速度の評価結果に対して、画像処理により数値化された RGB, HSV 値の間には、相関係数 0.9 以上 ($p < 0.05$) の有意な相関が確認された。

ビーライトはその焼成過程において、高温では六方晶系の α 相を維持し、冷却過程において斜方晶系の α'_H , α'_L 相、単斜晶系の β 相へと転移する⁹⁾。ビーライトの色調は、この転移温度域での冷却速度を受けて変化することが知られており、急冷では無色透明の結晶となるが、徐冷されると相転移と同時に固溶不純物のコロイド析出が起こり黄濁する。これにより、冷却速度に応じてビーライトの色調はこはく色、黄色、薄黄、透明と変化することが知られている。また、冷却速度はビーライトの相組成や結晶性にも影響を与え、急冷であるほど高温安定相の含有率は増加し³⁾、 β 相の結晶化度が低下することで、水和活性が高くなる¹⁰⁾。そのため、小野法においてはクリンカーの冷却速度および水和活性の指標とし

てビーライトの色調をこはく色、黄色、薄黄、透明の4段階で評価を行う。画像処理により得られた RGB 値、および明度は、技術者による小野法に基づいた色調評価に対して正の関係が得られた。また、RGB の階調はいずれの試料においても $R \geq G > B$ の、RGB カラーモデルにおける赤～黄色領域の関係を維持したまま変化した。これより、画像処理により数値化されたビーライト粒子の色調は、小野法による評価が高くなるにつれ、赤～黄色傾向を維持したまま明度が増加したことを示す。この傾向は小野法におけるビーライト色調の評価基準と整合すると解釈でき、画像処理を活用することで技術者による目視評価と同等の基準によりビーライトの色調を評価可能であると考えられる。

本システムによるビーライト長径および技術者による高温保持時間の関係を **Fig. 8** に示す。画像処理により測定したビーライト長径は、技術者が評価した高温保持時間が長いほど、大きくなる傾向を示した。小野法において、ビーライトの粒形は焼成時の高温保持時間の指標とされ、最高温度付近での保持時間が長いほど、ビーライトの粒成長が促進され、ビーライトの平均粒径が大きくなることが知られて

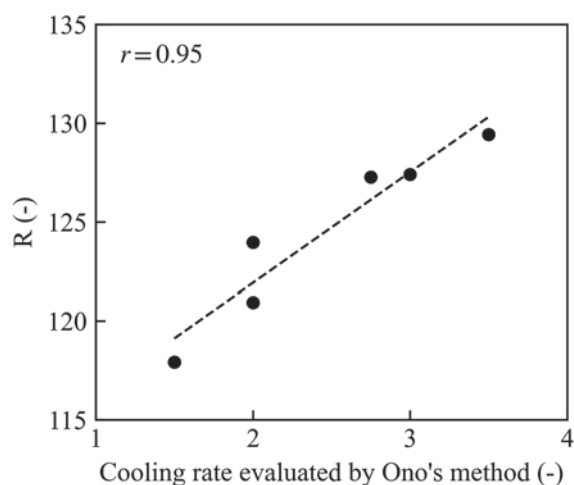


Fig.5 Relationship between cooling rate and R
(冷却速度と R 値の関係)

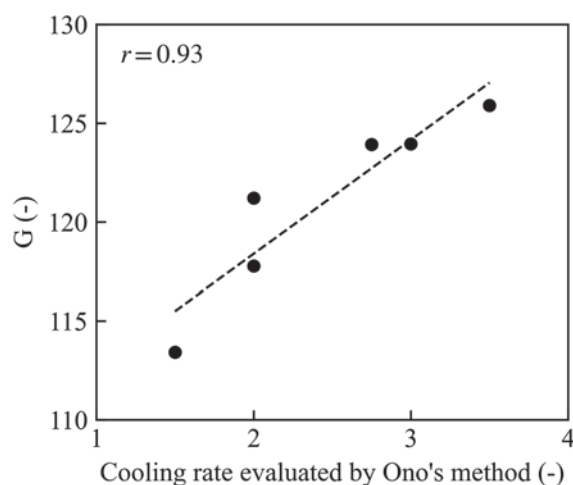


Fig.6 Relationship between cooling rate and G
(冷却速度と G 値の関係)

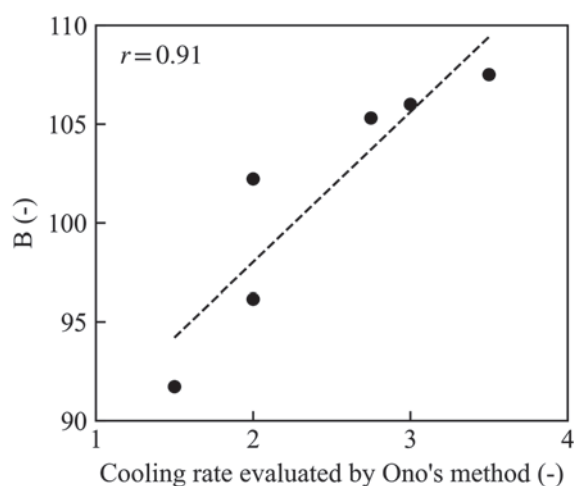


Fig.7 Relationship between cooling rate and B
(冷却速度と B 値の関係)

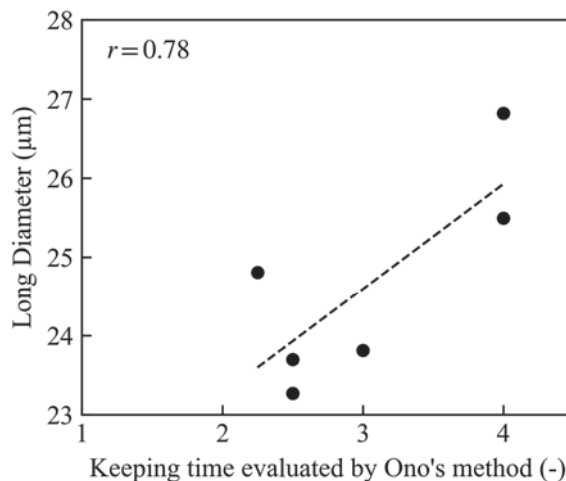


Fig.8 Relationship between keeping time evaluated by Ono's method and Long diameter
(高温保持時間と長径の関係)

いる¹¹⁾。本システムにより測定したビーライト長径の変化は、小野法における評価と整合する結果であると考えられた。

本システムによるビーライト長径は、ばらつきはあるものの技術者による昇温速度、冷却速度の評価結果に対しても一定の傾向が得られた。これらの関係を Fig. 9, 10 に示す。小野法において、昇温速度はエーライトの粒径、冷却速度はビーライトの色調により評価される指標であるが、技術者による昇温速度、および冷却速度が速いほど、本システムによるビーライト長径は小さくなる傾向を示した。本結果について、昇温速度、冷却速度がともに速い試料は、焼成条件が急熱急冷である短炎傾向であると推測され、最高温度付近の保持時間が減少することで

ビーライト長径が減少傾向を示したものと推察された。

これらの結果より、本システムにより評価したビーライトの色調・粒径は、技術者の目視評価の結果、およびそれらから推測される熱履歴の評価結果と整合すると考えられた。また、従来の評価手法では色調を段階的に評価するのに対して、本手法では連続的な数値として評価可能であり、色調変化をより定量的に評価可能であることが期待される。一方、測定手法間で評価の傾向にばらつきも見られ、小野法においてはビーライト粒子全てではなく、観察視野内で確認されたビーライト粒子の粒径を目測し、最頻値周りの粒径範囲を Table 2 の評価項目にあてはめ判定する一方、本システムでは、抽出したビーラ

イト粒子全体の粒径の平均値を算出しており、こうした粒径の評価方法の相違が一因となっているものと考えられた。加えて、ビーライト色調・粒径に影響する因子として、熱履歴以外にもビーライトへ固溶する微量成分の影響等も考えられるため、より広範囲の特性を持つクリンカー試料の測定を行い、影響因子の整理など追加の検証が必要である。

4.2 高温保持時間の異なるクリンカーの評価結果

本システムにより測定したビーライト長径・短径と、焼成時の 1550 °Cにおける保持時間の関係を Fig. 11, 12 に示す。本システムにより測定したビーライトの長径・短径は、保持時間が長いほど大きく

なる傾向が見られた。本システムによる測定結果は、焼成の最高温度域におけるビーライトの粒成長を反映した結果であると考えられる。2回測定における測定値のばらつきは平均して 1.5 μm 程であり、高温保持時間 5~30 分、および 60~90 分における長径変化は、ばらつきの範囲内であるが、平均値ではわずかな増加がみられた。一方で、高温保持時間 30~60 分における長径・短径の変化は測定によるばらつきを考慮した場合にも有意な差がみられ、本システムで測定したビーライトの長径・短径は 20~40 μm の範囲で変動した。クリンカーの焼成過程において、ビーライト結晶が 15~30 μm に成長する時間はクリンカーが焼成帯を通過する時間と同程度であると考

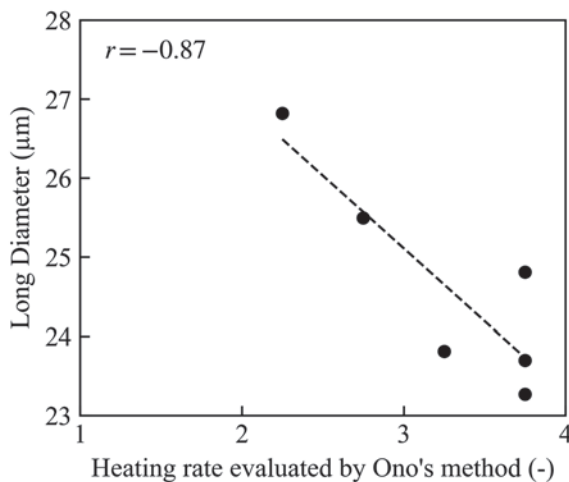


Fig.9 Relationship between Heating rate evaluated by Ono's method and Long diameter
(昇温速度と長径の関係)

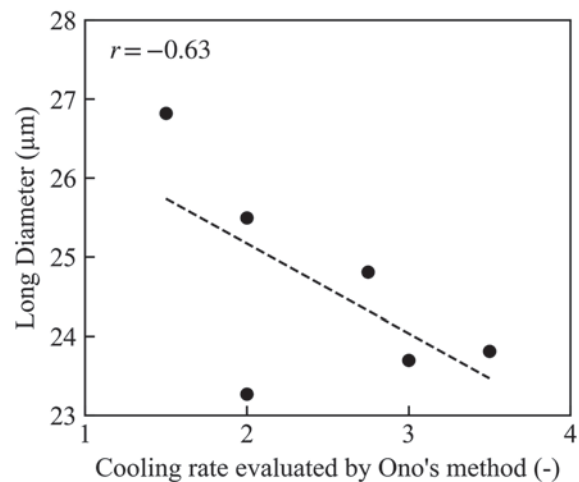


Fig.10 Relationship between Cooling rate evaluated by Ono's method and Long diameter
(冷却速度と長径の関係)

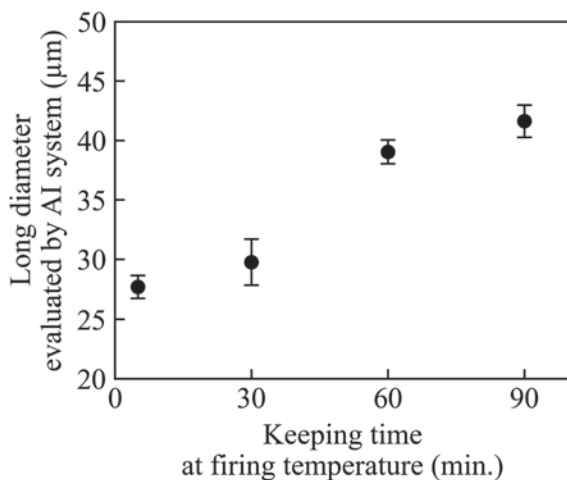


Fig.11 Relationship between keeping time at the firing temperature and long diameter
(高温保持時間と長径の関係)

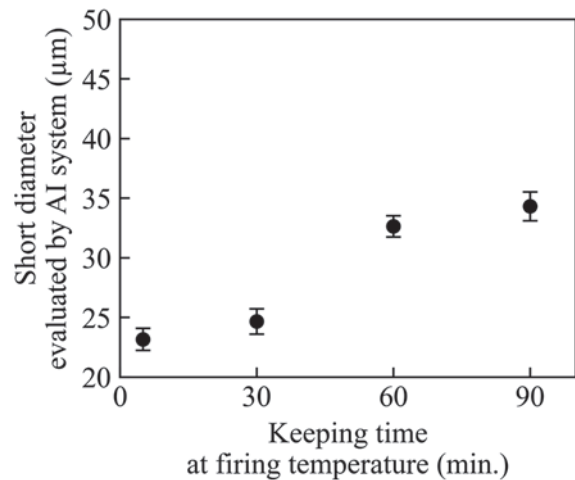


Fig.12 Relationship between keeping time at the firing temperature and short diameter
(高温保持時間と短径の関係)

えられており¹⁰⁾, 小野法における評価範囲は 5~40 μ m を主な対象としている. 本試験における長径・短径の変化はこれらの範囲内に含まれることから, 本システムでは, ビーライト長径の評価結果から, 実製造設備においてクリンカーが受けた焼成帯の通過時間を推定できる可能性が考えられる.

5. ま と め

クリンカーの熱履歴はセメントの製造工程においてプロセス・品質制御の両面で重要な評価指標である. そこで, AI と画像処理を活用することで, 顕微鏡によるビーライト評価の自動分析システムを開発した. 本システムの開発および評価結果から得られた結論を以下にまとめる.

1. AI 検鏡システムの開発

- 懸濁液に分散した試料粒子を筒状のセル内を通過させ, 連続的に撮影を行うことで, 顕微鏡による観察工程を代替した. これにより, 20 分当たり 100, 000 枚以上の粒子の観察(撮影)が可能となった.
- 撮影した粒子を, 技術者が評価対象であるビーライト単相の粒子とそれ以外の粒子に分類したデータセットを教師データとして AI の学習を行うことで, 粒子判別を行う AI モデルを作成した. 作成した AI モデルは, 技術者による分類結果に対して 95%以上の一致を示した.

2. 色調・粒径の評価

- 本システムにより評価したビーライトの色調評価結果は, 技術者の小野法に基づく評価結果と相関係数 0.9 以上の高い相関が見られた. また, 本システムにより評価したビーライト色調は, 技術者が評価した冷却速度の速い試料ほど, 赤~黄色傾向を維持したまま明度が増加する傾向を示し, 小野法における判別基準と整合する結果であると考えられた.
- 1550℃における保持時間を変化させ焼成したクリンカーのビーライト粒径を本システムにより評価した. 本システムにより評価したビーライトの長径は, 保持時間の増加に伴い増加する傾向が見られた. 本結果は, 高温におけるビーライトの粒子成長の影響を反映した結果であると考えられた.

以上の結果より, AI 検鏡システムでは, 冷却速度や高温保持時間等の製造条件の差異によるビーライトの光学的特性や組織形態の変化を連続的な数値として評価が可能であり, 従来法と比較してより定量的な熱履歴評価が可能であると考えられた. 一方で, ビーライト色調・粒径に影響する因子として, 熱履歴以外にもビーライトへ固溶する微量成分の影響等も考えられるため, より広範囲の特性を持つクリンカー試料の測定を行い, 影響因子の整理など追加の検証が必要である.

参 考 文 献

- 小野吉雄. 小野メソッド: ポルトランドセメントクリンカーの顕微鏡観察と焼成条件の推定. 秩父小野田. 1995.
- 市川牧彦. セメントの強さ, 色に関連したクリンカー構成鉱物のキャラクターとプロセス条件. 名古屋工業大学, 1997, 博士論文.
- 新島 瞬, 大野麻衣子, 黒川大亮ほか. 製造条件が C₂S 固溶体の水和活性に与える影響. セメント・コンクリート論文集. 2014, 68, p. 96-102.
- 大野麻衣子, 黒川大亮, 平尾 宙. セメントの品質を製造時に予測する: 太平洋セメント品質予測システム(TQPS)の開発. セメント・コンクリート. 2015, (816), p. 8-11.
- MVTec Software. MVTec HALCON Progress Edition. Version 23.11, 2023-11-15. <https://www.mvtec.com/products/halcon>, (accessed 2026-03-18)
- Ron Kohavi. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. IJCAI'95: Proceedings of the 14th international joint conference on Artificial intelligence. 1995, 2, p. 1137-1143.
- Martin Loesdau, Sébastien Chabrier, Alban Gabillon. Hue and Saturation in the RGB Color Space. Image and Signal Processing (Lecture Notes in Computer Science, 8509). Springer, 2014, p. 203-212.
- 日本セラミックス協会. セラミックスのキャラクターリゼーション技術 第 2 版. 1991, p. 261-265.
- 福田功一郎. セメントクリンカー鉱物の結晶化学と間隙液相の結晶分化作用. 日本結晶学会誌. 2011, 53(1), p. 81-85.

- 10) 小野吉雄. クリンカー鉱物の各種結晶および形態変化. 無機マテリアル. 1995, 2(258), p. 383-392.
- 11) 一坪幸輝. セメントクリンカーの焼結機構について. 太平洋セメント研究報告. 2009, (157), p. 61-70.