

## 論文 水和反応の進行にともなうセメント粒子の点過程特性値の変化

永川 彰悟\*1・五十嵐 心一\*2

**要旨：**水セメント比が 0.50 のセメントペーストの電子顕微鏡像中にて同定された未水和セメント粒子を点過程とみなして、点密度の材齢の進行にともなう変化を明らかにした。また、点密度は観察倍率に影響を受けることを考慮して、異なる倍率にて画像を取得してその点密度の変化を論じた。その結果、面積情報を持たない点であっても点密度がセメント量と対応することが明らかとなった。また、異なる観察倍率間でのセメント粒子点密度の相違のランダムな点過程の分割への帰着が示唆されたが、水和進行の詳細かつ定量的な点過程シミュレーションとその検証のためには、少量混合材の粒度に関する情報が必要である。

**キーワード：**点過程, ランダム分布, 点密度, 水和反応, 石灰石微粉末, ロジラムラー分布, DeHoff 式

## 1. 序論

コンクリートの性能評価から長寿命化対策の提案へと、一連の手順を体系化することが喫緊の課題である今日にて、コンクリートの劣化原因や現有性能を推定する組織検査(岩石学的調査:Petrography)は、その重要性を増している。この検査を組織観察レベルと使用機器の観点でみると、初めの近接目視による判断から実体顕微鏡を用いた数倍から数 10 倍程度の低倍率での表面や研磨面の観察へ、そこから必要に応じて例えば ASR 検査にて採用される薄片作製と偏光顕微鏡観察へ、さらに高倍率の観察として金属顕微鏡や電子顕微鏡を用いた観察へと進む。しかし、一般実務では実体顕微鏡観察 (~70x) や偏光顕微鏡観察 (~50 x) レベルの低倍率の観察結果をもとに、変状原因の推定とそれに対する長寿命化対策が提案されることが多い。

組織検査法の一連の手順は例えば ASTM C856<sup>1)</sup>に規定されており、観察対象としては粗骨材、細骨材、セメントペーストマトリックス、空隙が挙げられる。このうち、セメントペーストマトリックスは、コンクリートの変状の原因となる有害物質の侵入経路であり、また変状の発生部位であって、性能や劣化原因判断の最大のヒントとなるひび割れの発生場所でもある。よって、検査の観察対象となる場合はきわめて多く、ASTM C856 ではセメントペーストの色や硬さ、中性化の程度や空隙の状況の他に、未水和セメントもしくは混和材などの結合材粒子の組成、量、寸法および分布が観察項目として挙げられている<sup>2)</sup>。

従来、これらの結合材粒子を低倍率の光学顕微鏡で観察するには透過光観察が必要なため、コンクリートの薄片を作製してきた。しかし、せっかく薄片作製という高度な試料作製を行っているにも関わらず、実際の一般的な組織検査で定量評価を実施することは多くなく、評価

対象の粒子の有無や相対的な量の多寡に言及して、定性的な判断を行ってきた。その場合の判断の根拠は基本的に経験に負うところが大きく、例えば前述の ASTM C856 では、コンクリート組織検査に関する経験として 5 年以上有することを要求している。換言すれば、最も多用されてきた一般的な組織検査法では、中低倍率観察像を定性的に判断するだけで、定量化の導入による高度化の余地が残されたままということになる。

組織検査にて経験則に加えて定量的な評価と判断指標を採り入れるとしたら、現在では画像解析を用いるのが現実的な手段である。従来の中低倍率の実体顕微鏡や偏光顕微鏡像でも、取得した画像に信頼できるフリーの画像解析ソフトウェアを適用すれば、高度な設備を有する研究機関でなくても、評価したい対象物の寸法や量を簡単に評価できる。これに対して、例えばワーカビリティや品質、配合および施工に関わっている結合材粒子空間分布の評価が要求される場合は、寸法や量の評価に比べると高度な解析が必要となる。この点に関して著者ら<sup>3)</sup>は、画像内の評価対象物の空間分布を、距離を変数とする関数にて表す 2 次のステレオロジー量を評価に用いることを提案してきた。その 2 次のステレオロジー量評価の中でも、評価対象粒子を点に置き換える点過程法は分布の評価や変化のシミュレーションが極めて容易で、かつその解析ソフトウェアが自由に利用できる環境が整っている<sup>3)</sup>。結合材粒子は中低倍率画像でも容易に識別できる相であり、また、低倍率であることは試料調整が簡単かつ広視野が確保されることを意味する。その結果として、分布構造の定量化により高度な評価が可能となる一方で、少ない試料数での判断を可能にし、コンクリートの組織検査法の合理化も期待される。

そこで本研究においては、セメントの水和反応の進行にともなう未水和セメント粒子の点過程のパラメーター

\*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

\*2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博 (工) (正会員)

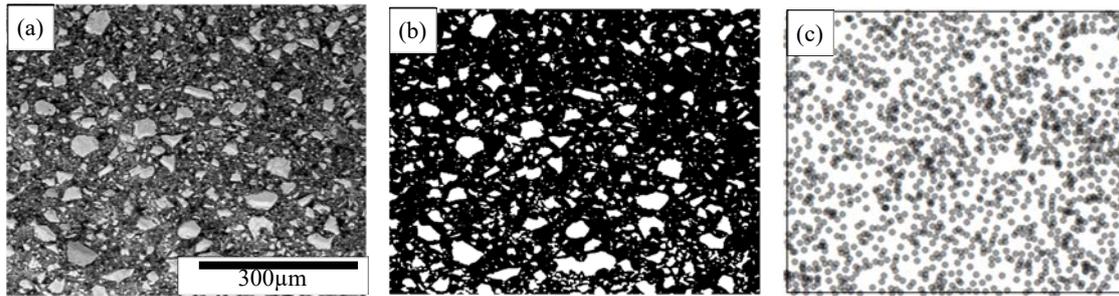


図-1 反射電子像から点過程への変換: (a) 反射電子像 (b) セメント粒子 (白色) を抽出した 2 値画像 (c) 点過程

の変化を明らかにすることを目的とする。特に 2 次元の点過程の最も基本的なパラメーターである点密度が、粒子を点で代表させているために面積情報を持たなくとも、未水和セメント量を反映する可能性について、従来の画像解析法で評価される未水和セメント面積率との対応の観点から考察する。さらに、一般に仮定される分布のランダム性の実証に基づき、組織調査にて用いられる様々な倍率の観察像における分布の特徴を、ランダム過程の重ね合わせとして評価することの妥当性について論ずる。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

使用したセメントは普通ポルトランドセメント(密度:  $3.15\text{g/cm}^3$ , 比表面積:  $3310\text{cm}^2/\text{g}$ )である。JIS R5201 に従って水セメント比が 0.50 のセメントペーストを練混ぜ、円柱供試体(直径 50mm, 高さ 100mm)を作製した。セメントペースト打ち込み後 24 時間にて脱型し、所定材齢まで  $20^\circ\text{C}$  の水中養生を行った。

### 2.2 反射電子像取得

低倍率から高倍率までのセメント粒子観察を一つの器械で行えることを考慮し、走査型電子顕微鏡を用いた。所定材齢にて、ブリージングの影響を考慮して常に供試体高さの中央、中心部から厚さが約 10mm の薄板試料を切り出した。エタノールに 24 時間浸漬して水分との置換を行い、引き続きエタノールと t-ブチルアルコール混合割合を順次変化させた混合液に浸漬して、エタノールを t-ブチルアルコールに置換した。その後、凍結真空乾燥により試料を乾燥し、低粘度エポキシ樹脂を含浸させた。エポキシ樹脂の硬化後、耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを用いて表面を注意深く研磨して、表面に金-パラジウム蒸着を施して電子顕微鏡観察用試料とした。

所定材齢にて、観察倍率 50, 200, および 500 倍にて研磨面の反射電子像を、無作為に 30 箇所にて取り込んだ(図-1)。それぞれの像は  $1148 \times 1000$  画素からなり、観察倍率 50, 200 および 500 倍に対して、1 画素の 1 辺の長さはそれぞれ約  $2.2\mu\text{m}$ ,  $0.55\mu\text{m}$  および  $0.22\mu\text{m}$  であ

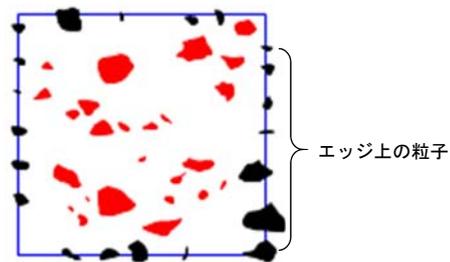


図-2 エッジ効果の模式図(視野内粒子: 赤色, エッジ上粒子: 黒色は一部分が視野内にあるだけで 1 点と計数される)

る。取り込んだ画像に対してノイズ除去等の 1 次フィルター処理を行った後、単一閾値法を適用してグレースケール上の閾値が目視判断とほぼ一致するようにして 2 値化を行い、セメント粒子を抽出した(図-1(b))。

### 2.3 セメント粒子の画像解析と点過程への変換

#### (1) 水和度の決定

低次元の特徴量から高次元の特徴量を推定するステレオロジーの基本則(長さ率  $L_L$  = 面積率  $A_A$  = 体積率  $V_V$ )に基づき、セメント粒子の面積率を未水和セメント体積率に等しいとして、次式により水和度  $\alpha$  を求めた。

$$\alpha = 1 - \frac{V_{Ct}}{V_{C0}} \quad (1)$$

ここに、 $V_{C0}$  は初期(配合上)のセメント体積率、 $V_{Ct}$  は反射電子像中の未水和セメント体積率である。

#### (2) 点過程変換とエッジ補正

抽出された未水和セメント粒子に関して、画像解析により個数および個々の粒子の円相当径および重心位置の座標  $\mathbf{x}_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) を求め、それらの粒子群を重心位置の点の集合とする点過程  $X = \{\mathbf{x}_i; i = 1, \dots, n\}$  に変換した(図-1(c))。なお、2 次元面内に観察された粒子分布を単純に点過程に変換した場合、視野(W)の四辺(エッジ)に交わる粒子は、真の重心位置が視野外にあって点過程の要素とすべきではない視野内粒子片も、1 つの点  $\mathbf{x}_i \in X$  として計数される(図-2)。このエッジ効果を以下のよう手順にて補正した。

セメント粒子を抽出した 2 値画像を用いて、所定の長

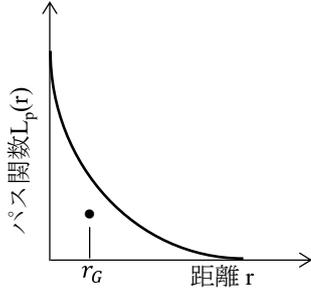


図-3 パス関数から粒子代表距離  $r_G$  の決定

長さ  $r$  の線分をランダムに配置したときに、線分全体がセメント粒子相  $C$  上に載る確率を表す直線経路相関関数 (以後、パス関数と称す)  $L_p(r)$  (式(2)) を求めた。

$$L_p(r) = P\{x_1 \in C, \dots, x_i \in C, \dots, x_n \in C\} \quad (2)$$

ここに、点  $x_i (i = 1, \dots, n)$  は線分の両端点  $x_1$  と  $x_n$  を結ぶ直線上の点であり、このときパス関数の変数である線分の長さは  $r = |x_n - x_1|$  である。パス関数は粒子の連続性 (粒子寸法) を反映し、この関数と縦横軸に囲まれた領域の重心位置を求め、その  $r$  座標値を粒子寸法を代表する長さ  $r_G$  とした (図-3)。前述のステレオロジーの基本則に基づき、未水とセメント面積率  $A_A$  はエッジ4辺の長さの和に対するセメント粒子横断線分長の和の比  $L_L$  に等しいとした (式(3))。また、エッジ4辺が横切る粒子弦長は  $r_G$  の一定長さであるとして、エッジ上の粒子数を決定した (式(3))。セメント粒子画像中の粒子のうち、エッジ周辺部の点が視野内外どちらに計数されるべきであるかの確率は等しいとして、エッジを横切る粒子数の 1/2 を差し引いて、視野内の総点数  $N$  を求めた。この総点数を視野面積  $|W|$  で除し、点密度  $\lambda_A (= N/|W|)$  を求めた。

$$A_A = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{l} = \frac{kr_G}{l} = L_L \quad (3)$$

ここに、 $l$  は視野  $W$  の周縁4辺の長さの和、 $l_i$  はエッジ4辺を横切る個々の粒子 ( $i = 1, \dots, n$ ) の横断長さである。また、 $k$  は長さ  $r_G$  の一定の横断長さを仮定したときに、エッジ4辺に載るセメント粒子個数である。

## 2.4 点過程のランダム性の確認

### (1) K 関数

2.3にて求めた点過程  $X$  に対して以下の K 関数  $K(r)$  を求めた。また、同じ点密度の完全ランダム分布 (定常ポアソン過程) の K 関数と比較することによって、ランダム性を判断した。

$$K(r) = \frac{1}{\lambda_A^2} \sum_{i \neq j} \frac{\mathbf{1}(|x_i - x_j| < r)}{s(x)} \quad (4a)$$

$$s(x) = ab - \frac{x(2a+2b-x)x}{\pi} \quad (4b)$$

$$x = |x_i - x_j| \quad (4c)$$

ここに、 $\mathbf{1}()$  は  $()$  内为正であれば 1 を与え、偽のとき 0 を与える指示関数である。また、 $s(x)$  はエッジ補正係数で、 $a, b$  は長方形観察領域の辺長である。

### (2) L 関数

各倍率の画像にて得られた点密度  $\lambda_A$  から定まる点を 2 項点過程として観察領域内にランダムに発生させるシミュレーションを行った。そのシミュレーションにより得られた点過程の K 関数を (1) と同様の手順にて求めた。求められた K 関数から、式(5)にて定義される L 関数を求めた。

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} \quad (5)$$

この所定の点密度のランダム過程の L 関数を求めるシミュレーションを 200 回繰り返し、その 95% 信頼区間を決定した。

## 2.5 セメント粒子の粒度分布の近似と個数減少のシミュレーション

画像中にて観察される未水とセメント粒子の個数は、粒子の寸法に強く影響を受け、大きな粒子ほど観察面に現れる確率は高くなる。単位体積当たりの粒子数  $N_V$  と観察面に現れた粒子の単位面積当たりの粒子数  $N_A (= \lambda_A)$  の間には DeHoff 式 (式(6)) が成り立つ<sup>4)</sup>。

$$N_A = E[H]N_V \quad (6)$$

ここに、 $E[H]$  は観察面に垂直な方向への粒子の投影高さの期待値である。左辺は画像にて実測できるセメント粒子数から容易に求められる。

右辺の各項の値を計算するために水和反応の進行にともなう粒子径の減少および粒子消失に関するシミュレーションを行った。セメントの初期粒度分布はセメント共同試験報告<sup>5)</sup>の風ふるい法と網ふるい法の結果を参考にして、ロジラムラー分布にて近似した。近似した粒度分布を図-4に示す。また、セメント粒子は球状である

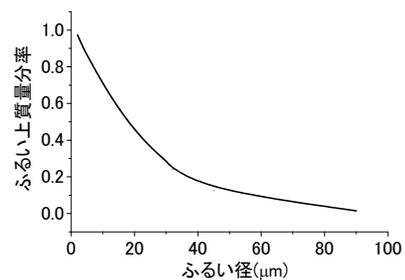


図-4 ロジラムラー分布を仮定したセメント粒子径分布

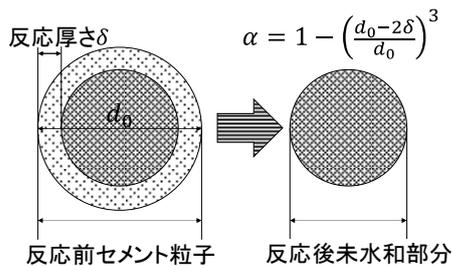


図-5 球仮定したセメント粒子表面の反応厚さと水和度

と仮定し、粒子径に関わらず水和反応は粒子表面から一様に進行し、未反応粒子核は水和の進行にともない減少するとした。粒子の初期径を  $d_0$ 、表面の反応厚さを  $\delta$  とすると、水和度  $\alpha$  は以下のように定義される (図-5)。

$$\alpha = 1 - \left( \frac{d_0 - 2\delta}{d_0} \right)^3 \quad (7)$$

初期のセメント粒度分布を所定の階級幅の粒子径  $d_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) に分割し、その階級に含まれる粒子数  $N_i$  を求めた。反応厚さ  $\delta$  を仮定してその分だけ粒子径を減少させ、その都度球状を仮定していたセメント粒子の各階級の粒子径および粒子数の減少を計算した。これを繰り返し、所定の水和度に達したときの粒度分布および各階級の粒子径の粒子数を求めた。この粒子数から、単位体積当たりの粒子数  $N_V$  および平均径  $E[H]$  を求めた。なお、使用セメント中には石灰石微粉末 (密度  $2.7\text{g/cm}^3$ ) が 5% 含まれていると仮定し、その粒度分布はセメント粒子と同様であると仮定した。この石灰石微粉末は不活性であるとして、その粒子径および各階級の粒子数は材齢が経っても変化しないと仮定した。よって、仮定した反応厚さ相当の粒子径の減少および水和度は、セメント粒子だけの変化によってもたらされるとした。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 材齢の進行にともなうセメント粒子数の変化

##### (1) 点密度の変化

図-6 は材齢の進行にともなう水和度の変化を示したものである。材齢 7 日まで水和度は顕著に増大するが、

それ以降は水和の進行は緩やかになり、材齢 28 日以降の変化は小さい。図-7 は同じく点密度の変化を示したものである。点密度は材齢の進行とともに減少し、材齢 7 日までの減少割合が大きく、その後はやや緩やかな減少となる。図-6 と図-7 より、点密度は水和度と逆対称的な変化をしているようである。図-8 は点密度と水和度の関係を示したものである。両者の間には負の相関を示すような対応関係が存在し、実際、水和度の定義 (式 (1)) に用いられるセメント体積率 (=セメント面積率) とは図-9 に示すように強い相関性を有する。

セメント粒子分布を単純な点過程で表現した場合には、従来の画像解析で求めてきた面積に関する情報を持たない<sup>6)</sup>。よって、一般にステレオロジーの観点からは、点密度からその系内の評価対象粒子の量を単純に推定することはできない。しかし、図-6~9 の結果を見ると、セメントペーストにおいては未水和セメント粒子数を、水和進行もしくは未水和セメント量を反映したパラメーターと見なしてよいと思われる。

##### (2) セメント粒子減少のシミュレーション

上述のとおり、未水和セメント粒子数と未水和セメント量の間には線形的な対応があり、これよりセメントのように、粒子内に反応速度の異なる相が存在して水和により表面が凹部を作ったとしても、1つの粒子が平面 (観察面) 内にて複数の点として計数される影響はないことを示し、粒子の大小にかかわらず表面から一様に水和反応が進んで、粒子の未水和部分は徐々に縮小していくと仮定してよいことを示す。

図-10 は以上の一様収縮の考え方にに基づき、初期のセメント粒度分布をロジックラムラー分布にて仮定し、各材

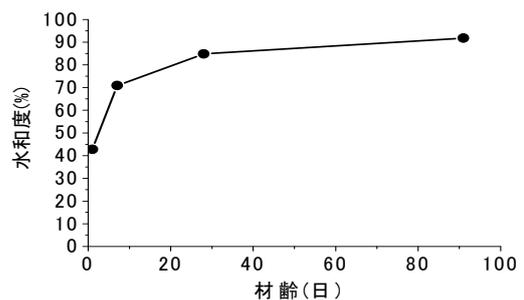


図-6 水和度の変化

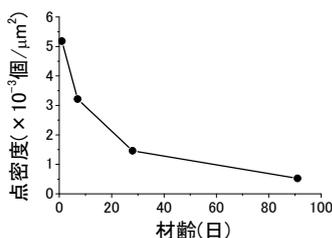


図-7 点密度の変化

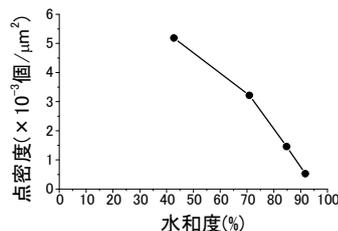


図-8 点密度と水和度の対応

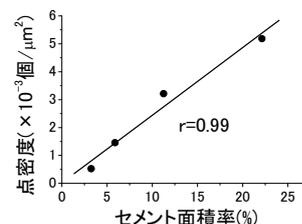


図-9 点密度とセメント面積率の対応

齢におけるセメントの水和度に一致するまで球状仮定したセメント粒子未水和部分を縮小させるシミュレーションを行ったときの点密度と観察された点密度を比較したものである。材齢1および7日までの早期においては、シミュレーションの点密度と画像にて観察された点密度はほぼ一致している。DeHoff式は成り立っているように見える。また、材齢の進行にともなう減少傾向も類似していて、単純な一様収縮シミュレーションであっても、長期材齢にて水和の進行が緩速化する様子も現れている。図-11に両者の相関を示すが、類似の減少傾向であったため、見かけ上良好な相関性が存在するようである。しかし、長期材齢における点密度の絶対値には明確な差異があり、シミュレーションにて未水和セメント体積の減少を適切に表すことはできていない。この理由についてはさらなる検討を要すが、一つの理由として石灰石微粉末の存在が考えられる。本シミュレーションにおいては、少量混和材として含まれている石灰石微粉末の量および粒度分布が明らかではないため、いずれの粒子径においても同一の質量割合にて石灰石微粉末が含まれると仮定した。普通ポルトランドセメントの製造過程にて、石灰石が少量混入される場合には、セメントクリンカーと石灰石は混合粉碎される<sup>7)</sup>。一般に石灰石はセメントクリンカーよりも柔らかいため、混合粉碎される場合には、石灰石粉体はセメントクリンカーの粉体よりも細くなる<sup>8)</sup>。そして、石灰石の密度がセメントクリンカーよりも小さいので、個数を考えた場合には微細な石灰石粒子が多量に存在することになる。セメントの水和が進行し

てもそれらの粒子は残存することになるので、水和によりセメント粒子が減少していくと、全体の粒子数に対する石灰石粒子の割合は大きくなる。一方、反射電子像中にてそれを同定する場合、セメント粒子よりも微細で、かつ平均原子番号がセメントよりも小さい石灰石は検出されにくい。このため、長期材齢において石灰石粒子数の割合が大きくなる影響が強く現れ、シミュレーションと画像内の計数に差を生じたことが考えられる。したがって、点過程としての取り扱いの長所であるシミュレーションの容易性を生かして、水和反応の進行を定量的に評価したり、未水和セメント量およびその配置から組織検査結果の判断を行うためには、石灰石微粉末の取り扱いについてさらに検討が必要である。

### 3.2 観察倍率とセメント粒子数の対応

上述のようにセメント粒子点密度が水和反応の進行を反映しているのは明らかであるが、これを画像から計数して進行の定量評価を行おうとする場合には、その粒子数が観察倍率によって変化することを考慮しなければならない。図-12は材齢1日の画像から求めた点密度と水和度が、観察倍率によりどのように相違するかを示している。観察倍率500倍と200倍の材齢1日のプロットは、水和度、点密度とともにほぼ一致している。水和度は反射電子像中の未水和セメント粒子面積率から求められ、Mouretら<sup>9)</sup>は未水和セメント面積率は観察倍率200倍以上であれば正しく評価できることを示している。図-12はそれを確認すると同時に、ステレオロジー指標として次元の低い点密度においてもそれが成り立つことを示し

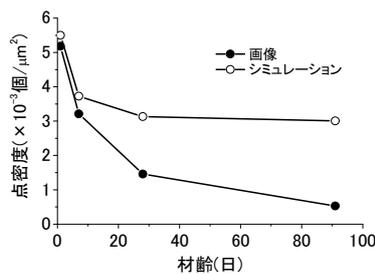


図-10 点密度の計数値とシミュレーションの材齢にともなう変化

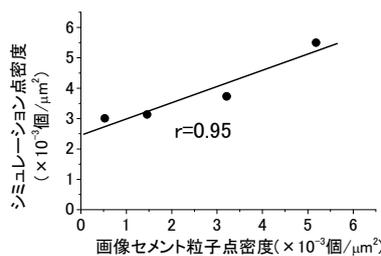


図-11 シミュレーションの点密度と画像点密度の相関性

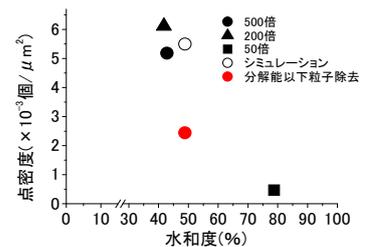


図-12 観察倍率による点密度の相違 (材齢1日)

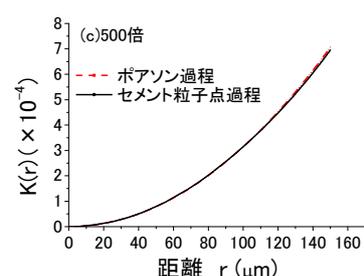
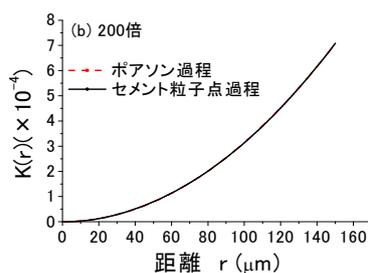
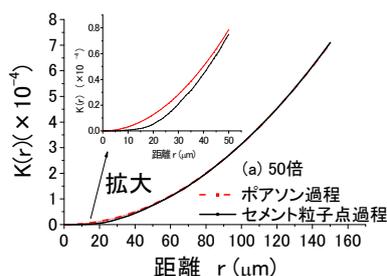


図-13 各倍率におけるセメント粒子のK関数 (材齢1日)

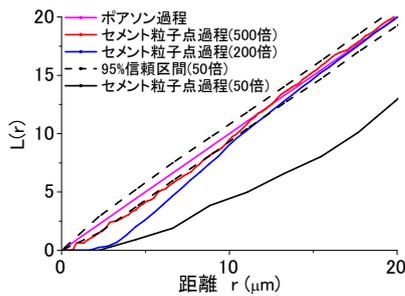


図-14 セメント粒子のL関数とシミュレーションの信頼区間

ている。これに対して、一般の組織検査法の観察レベルである50倍では、材齢1日にて水和度が著しく高く、セメント粒子数も少ない。低い分解能のために微細な粒子を抽出していないことは明らかである。

図-13に各観察倍率におけるセメント粒子のK関数を示す。200および500倍においては、未水和セメント粒子は完全ランダム点過程（ポアソン過程）とみなせるようであるが、50倍では、短距離の範囲にてランダム過程との相違がみられる。図-14に短距離範囲の各倍率でのL関数および50倍の点密度を用いたシミュレーションの信頼区間を示す。倍率の増大とともにL関数は短距離にて信頼区間内にプロットされるようになり、ランダム過程に収束する。倍率が増大すると、空間内に新たにランダムに点が同定されて、その点を加えても再びランダムな点過程を形成していることを示す。このことは逆に、低倍率の組織検査のセメント粒子は、点密度の高いランダムな点過程からランダムに点を削除した過程であったことを示唆する。実際、図-12の点密度の結果に関して、材齢1日の200倍、500倍画像で求めた水和度とほぼ一致する反応厚さのシミュレーション結果（図-12白抜き○）から50倍画像の分解能以下の粒子を削除し、体積点密度 $N_V$ および平均径 $E[H]$ を改めて計算してDeHoff式から点密度 $N_A$ を求めると、図中の赤実丸プロットになる。高倍率の分布をほぼ再現していたシミュレーションに比べ、点密度は大きく低下する。これより倍率の異なる組織検査におけるセメント粒子分布の相違は、ランダムな点過程にランダムに点を加減する重ね合わせおよび間引きシミュレーションにより再現できる可能性が示唆されるが、精度の向上にはさらなる検討が必要である。

#### 4. 結論

セメントペースト中の未水和セメント粒子の空間分布を点過程とみなし、その変化について論じた。本研究にて得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) セメント粒子点密度はセメント体積率と相関し、水和の進行にともない減少する。
- (2) セメントの初期粒度分布をロジックラムラー近似し、

表面からの反応厚さを徐々に増大させるシミュレーションでは、早期材齢の点密度とよく一致するが、長期材齢では画像計数値とは一致しない。

- (3) 点過程にて水和進行を評価するには、石灰石微粉末が残存する傾向に関して、その粒度分布を含めてさらに検討が必要である。
- (4) セメント粒子はランダム点過程としてシミュレーションが可能で、観察倍率による点密度の相違は、画像分解能に応じて点過程を分割して考え、ランダムに点を加減する処理に帰着する可能性を指摘した。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり、太平洋セメント(株)平尾宙博士より助言を賜った。また、研究の一部に対して日本学術振興会科学研究費補助金（課題番号15K14013）の交付を受けた。ここに記し謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) ASTM C856-14:Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete, 2014
- 2) 内藤大輔, 五十嵐心一, 柴山舞:セメント硬化体中の毛細管空隙空間構造と電気伝導率の対応, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.67, No.3, pp.462-473, 2011
- 3) Baddeley, A. and Turner, R.: spatstat; An R Package for Analyzing Spatial Point Patterns, Journal of Statistical Software (<http://www.jstasoft.org/>), Vol.12, No.6, pp.1-42, 2005
- 4) DeHoff, R. T. and Rhines, F. N.: Determination of number of particles per unit volume from measurements made on random plane sections: the general cylinder and the ellipsoid, Transactions AIME, No. 221, pp. 975-982, 1961
- 5) 2015-OC セメント共同試験報告, セメント協会, 2016
- 6) Stoyan, D., Kendall, W.S. and Mecke, J.: Stochastic Geometry and its Applications, 2nd Edition, John Wiley and Sons, 2008
- 7) 矢野信, 持永忠, 田代克志, 山下暁正: プロセスシミュレーターを用いたセメントプロセスモデルの開発, 東ソー研究・技術報告, Vol.44, pp.23-30, 2000
- 8) Taylor, H.F.W: Cement Chemistry, 2nd edition, Thomas Telford, 1997
- 9) Mouret, M., Bascoul, A. and Escadeillas, G.: Study of the degree of hydration of concrete by means of image analysis and chemically bound water, Advanced Cement-based Materials, Vol.6, No.3-4, pp.109-115, 1997