

## 論文 空間統計量による気泡の空間分布の定量評価

吉川 峻生\*1・古東 秀文\*2・室谷 卓実\*3・五十嵐 心一\*4

**要旨:** セメントペースト供試体断面の低倍率画像に現れた気泡に対し、空間統計学に基づく2次のステレオロジーの概念を適用し、気泡組織の定量評価を試みた。その結果、画像解析を用いて取得した低倍率画像内の気泡に対しても、各種関数は気泡の合泡などによる空間分布特性の変化を反映していることが示された。また、2点相関関数および接触分布関数は気泡間隔係数の特性を関数値に反映していると考えられ、従来の空間構造の定量的な評価への関連づけが可能と思われる。さらに、各種関数より、気泡間隔係数が同程度の値を示す試料同士であっても、その空間構造は異なる可能性があることが明らかとなった。

**キーワード:** 粒子過程統計量, 気泡間隔係数, 2点相関関数, 構造距離, 接触分布関数

### 1. 序論

硬化コンクリート中の気泡構造を明らかにすることは、コンクリートの耐凍害性を評価する上で非常に重要である。その評価手段として、ASTM C 457に規定される Powers<sup>1)</sup>の気泡間隔係数が広く用いられてきた。しかし、肉眼による顕微鏡測定に多大な労力と時間を要することから、実務においてはフレッシュ時の空気量試験の結果をもって気泡間隔係数の条件は満足していると思なすことが多い。近年では、硬化後のコンクリート断面を簡便に測定可能であるとの理由から、画像解析法が注目されており、気泡組織の評価への導入が積極的に検討されてきた。その結果、画像解析により硬化コンクリート中の気泡組織や気泡パラメータに関して多くの重要な知見が得られており<sup>2),3),4)</sup>、コンクリートの気泡間隔係数を簡便に測定する方法も提案されてきた。しかし、ここで評価される気泡間隔係数は気泡の規則的な立方体配置を仮定し、気泡間の距離を算出した値に基づくものであり、実際の気泡分布構造の幾何学的特徴、もしくは距離を表した値ではないことに留意すべきである。

一方、画像解析により気泡組織を測定し、従来の気泡間隔係数に加えて各種気泡パラメータを用いた耐久性の評価を検討している事例もある。例えば、坂田ら<sup>5)</sup>は画像解析による気泡の測定から、気泡組織と耐久性指数の相関についての分析を行い、配合条件によっては気泡間隔係数の値が同程度であっても気泡分布が大きく異なり、気泡間隔係数と耐久性指数の相関が得られないことを報告している。また、径 0.15mm 未満の気泡割合が増大するほど、コンクリートは高い耐久性指数を示すことを明らかにしている。さらに、硬化後のコンクリートとフレ

ッシュ時における空気量の変化には、凝結過程におけるブリーディングによる気泡の破泡や合泡の現象が影響している可能性があり、使用するセメントや混和材料の種類によって空気量の変化割合が異なることも報告している。以上のことから、コンクリートの耐久性評価には気泡間隔係数のみでは十分ではなく、実際の気泡の分布特性を定量的に評価することが重要であると考えられる。

気泡組織の特徴の画像からの定量的な評価は、確率論的な根拠に基づいて、2次元断面より得られる情報から3次元空間における特徴を推定するステレオロジーの考え方を背景としている。特に、気泡は球状であることから粒子として分布を表すことに妥当性を有し、また断面寸法から粒度分布や粒子個数などの情報を得ることも比較的容易である。さらに、近年の画像解析技術の発展と2次のステレオロジーの考え方が認識されるにともない、仮想的な距離ではなく実際の距離を評価するための数値解析法も提案されている<sup>6),7),8)</sup>。しかし、これをより簡便な手法として確立するにはいたっておらず、また検討事例も限られるようである<sup>8)</sup>。

本研究では気泡組織の基本的な空間統計量を得ることを目的とし、骨材による分布制限を受けないセメントペースト供試体に対し、主として粒子過程統計量を用いて空間構造の評価を行った。さらにこのとき、低倍率で取得した供試体断面画像内の気泡に対して各種関数の適用を行い、気泡組織の差異の評価の可能性から、低倍率画像への適用の有用性について論ずることを目的とした。

### 2. 実験概要

#### 2.2 使用材料および配合

\*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

\*2 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

\*3 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

\*4 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工) (正会員)

表-1 各試料の名称および混和剤量

| 水セメント比 | 名称            | AE減水剤量<br>(C×%) | AE助剤量<br>(C×%) | フロー値 |
|--------|---------------|-----------------|----------------|------|
| 0.4    | Ref           | -               | -              | 195  |
|        | AE0.05        | 0.05            | -              | 203  |
|        | AE0.10        | 0.10            | -              | 213  |
|        | AE0.25        | 0.25            | -              | 222  |
|        | AE0.50        | 0.50            | -              | 249  |
|        | AE0.25-助剤0.01 | 0.25            | 0.01           | 228  |
|        | AE0.25-助剤0.02 | 0.25            | 0.02           | 227  |
| 0.45   | Ref           | -               | -              | 228  |
|        | AE0.25        | 0.25            | -              | 259  |
|        | AE0.50        | 0.50            | -              | 288  |
|        | AE0.25-助剤0.01 | 0.25            | 0.01           | 263  |
|        | AE0.25-助剤0.02 | 0.25            | 0.02           | 267  |

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm<sup>3</sup>，比表面積 3310cm<sup>2</sup>/g）を使用した。セメントペーストの水セメント比は 0.40 および 0.45 とした。混和剤としてリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分とする AE 減水剤および、アルキルエーテル系陰イオン活性剤を主成分とする AE 助剤を使用し、添加量を変化させることによって空気量を変化させた。JIS R 5201 に準じて恒温室（20℃，相対湿度 60%）にてセメントペーストを練り混ぜ、エアメーターを用いて空気量を測定した。その後、40mm×40mm×160mm の角柱供試体を作製した。打ち込み後 24 時間にて脱型し、材齢 7 日まで水中養生（20℃）を行った。作製したセメントペーストの名称、混和剤の量およびフロー値を表-1 に示す。

## 2.2 試料作製および画像取得

養生後に供試体から厚さ 10mm 程度の板状試料を切り出し、切断面の研磨を行った。研磨後、試料断面を黒色インクにより着色し、乾燥後に白色粉末（炭酸カルシウム微粉末、粒径範囲 12~13μm）を気泡に充填させた。その後、スキャナを用いて等倍の断面画像を取得した。本研究では、簡便性を考慮し各試料の画像取得枚数を 10 枚とした。このときの解像度は 1200dpi とし、1 画素は 21.2μm に相当する。なお、試料の縁部では均一な呈色がなされない領域が存在する可能性があるため、試料中心部から 30mm×30mm の範囲を観察領域とした。

## 2.3 画像解析

画像解析ソフトを用いて、2.2 にて取得した画像に対し、モノクロ変換を行った。その後、平滑化フィルター処理によりノイズを除去し、グレースケールに基づく 2 値化処理によって気泡の 2 値画像を得た。抽出した気泡の 2 値画像から気泡面積率を算出し、ステレオロジーの考え方にに基づきこれを気泡体積率とした。なお、気泡径の範囲は 30μm 程度以上であることから<sup>9)</sup>、30μm 以下の白色部は気泡以外の凹凸に起因するものとしてこれを除去した。以下の関数によって気泡分布の評価を行った。

### (1) 円相当径による粒度分布

各気泡を面積の等価な円に置き換え、それらの円を気泡径の順に並び替え、円相当径による粒度分布とした。

### (2) 気泡間隔係数

使用する供試体がセメントペーストであることから、気泡間隔係数は空気量に対するセメントペースト量の割合が大きい場合（セメントペースト量/空気量(P/A)>4.33）に相当する。このとき気泡間隔係数は式(1)によって求められる。

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[ 1.4 \sqrt[3]{\frac{P}{A} + 1} - 1 \right] \quad (1)$$

ここに、 $\alpha$  は気泡の比表面積、 $P$  はセメントペースト割合、 $A$  は空気量である。本研究では、画像解析法を用いているので、空気量  $A$  および比表面積  $\alpha$  は画像解析から求めたものを用いた。

### (3) 2 点相関関数

2 点相関関数は、ある一定長さ  $r$  の線分をランダムに画像上に落とししたとき、その線分の両端が着目相上に載る確率を表す関数である。着目相を  $P$  とし、線分の両端の点  $x_i (i = 1, 2)$  に関して式(2)のような指示関数を定義する。

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 & (x_i \in P) \\ 0 & (x_i \notin P) \end{cases} \quad (2)$$

$x_i \in P$  である確率を  $P\{I(x_i) = 1\}$  とすると、任意の長さの線分の両端  $x_1, x_2$  がセメントペースト相に載る確率は、 $P\{I(x_1) = 1, I(x_2) = 1\}$  で与えられ、これより 2 点相関関数  $S(r)$  は式(3)にて定義される。

$$S(r) = \langle I(x_1)I(x_2) \rangle = P\{I(x_1) = 1, I(x_2) = 1\} \quad (3)$$

ここに  $r = |x_1 - x_2|$  は 2 点間距離を表し、 $\langle \rangle$  は期待値を意味する。また、関数値の初期値 ( $S(0)$ ) は着目相の体積率を表し、 $r = 0$  における関数値の初期勾配は比表面積を反映し、勾配の絶対値が大きいほど比表面積は大となる。距離  $r$  が大きくなるにしたがって関数値は減少し、理論上は体積率の自乗値に収束する。関数が最初に自乗値と交わるまでの距離は、その空間構造を特徴づける構造距離と呼ばれる。

### (4) 2 点間直線経路相関関数（パス関数）

2 点相関関数を拡張して考えると、線分の両端だけでなく線分全体が同一相上に載る確率を求めることができる。2 点間直線経路相関関数は、着目相内の直線的な連続経路の有無とその距離を強く反映した関数であり、その定義は式(4)のように定義される。

$$S_L(r) = \langle I(x_1) \cdots I(x_j) \cdots I(x_n) \rangle \\ = P\{I(x_1) = 1, \dots, I(x_j) = 1, \dots, I(x_n) = 1\} \quad (4)$$

ここに、点  $x_j$  は始点  $x_1$ 、終点  $x_n$  を結ぶ直線状の点であり、 $|x_n - x_1| = r$  である。

2 点相関関数と同様に関数の初期値 ( $r = 0$ ) は着目相の体積率を表す。関数値は距離の増加にともない減少していくが、同一距離における関数値は 2 点相関関数に比べて小さくなる。また、ある程度距離が増加すると、線

分全体が着目相に載ることは不可能となるため、関数値は0に収束する。

### (5) 接触分布関数

接触分布関数は、点過程 $X = \{x_i; i = 1, \dots, n\}$ が与えられたとき、画像内の任意の点 $u \in W \setminus X$ から最も近い点 $x_i \in X$ までの距離に関する確率関数であり、その定義を式(5)に示す。

$$H(r) = P\{N(b(u,r)) > 0\} \quad (5)$$

ここに $b(u,r)$ は点 $u$ を中心とする半径 $r$ の円であり、 $N(B)$ は領域 $B \subset W$ 中にある点の数である。接触分布関数はその定義から気泡間隔係数と類似の概念であると考えられる。そこで、本研究においては、気泡粒子を点過程の点の凝集体とみなし、気泡粒子を $s$ として画像上にランダムに点 $u \notin s$ を落とす。その点から画素を単位として $r$ を変化させながら気泡表面までの最短距離を求め、接触分布関数として評価した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 画像から得られた気泡の情報

表-2 に画像から得られた気泡の情報を示す。フレッシュ時に空気量試験により求めた空気量と、硬化後の気泡体積率には差が生じている。この原因としては、打ち込みの際に気泡が損失したことや画像分解能以下の微細な気泡が存在していることなどが考えられる。また、水セメント比 0.40 に比べ 0.45 の気泡の残存率が比較的低い値を示していることから、気泡の破泡などによる損失にはフレッシュ特性が関係していることを示唆している。気泡体積率の変動は両水セメント比においてそれほど大きくなく、低倍率で画像を取得しても、気泡に関して十分な情報が得られると考えられる。気泡個数は AE 減水剤の使用量に比例して増加しており、エントレインドエ

アが連行されていることが確認できる。また、AE 助剤を 0.01% 添加すると、空気量は大きく変化していないが、気泡個数はさらに増加し、平均気泡径は小さくなっている。これは、AE 助剤が比較的微細な径の気泡を連行する傾向にあることを示している。しかし、AE 助剤使用量 0.02% において、平均気泡径は増大し、セメントペースト領域に占める気泡の割合が増加したことで、気泡粒子の分散可能領域が制限され、気泡同士の結合が生じやすくなったためと考えられる。

図-1 に取得したセメントペースト中の気泡の画像の例を示す。マイクロスコープによって取得した拡大画像(図-1(b))より、炭酸カルシウム微粉末は直径が数 $10\mu\text{m}$ 程度の気泡にも充填されていることが確認でき、さらに、AE 助剤添加量の増加により、空気量および気泡粒子数が増加していることが画像から目視にて確認できる(図-1(a), (c), (d))。

### 3.2 気泡の粒度分布

図-2 に正規化した累積面積率で表した気泡の粒度分布を示す。AE 減水剤を添加した試料は、混和剤を使用していない試料と比較し初期勾配が大きくなっており、エントレインドエアの連行により約 $250\mu\text{m}$ 以下の微細な径の気泡割合が増大したことが確認できる(図-2(a), (c))。しかし、AE 減水剤を 0.50% 添加した試料では、添加量 0.25% の試料に比べ約 $500\mu\text{m}$ 以上の気泡の割合が増大しており(図-2(a), (c))、セメントペースト領域における気泡同士の結合が生じているものと推測される。AE 助剤を添加した試料では、粒度分布の形状が大きく変化しており、添加量の増加とともに粗大な気泡の割合が増大し、メジアン径は大きくなっている(図-2(b), (d))。さらに、添加量 0.01% と 0.02% を比較すると 0.02% では微細な気泡割合が減少しており(図-

表-2 気泡の情報

| 水セメント比                  | 0.40 |        |        |        |        |                   |                   |      | 0.45   |        |                   |                   |  |
|-------------------------|------|--------|--------|--------|--------|-------------------|-------------------|------|--------|--------|-------------------|-------------------|--|
|                         | Ref  | AE0.05 | AE0.10 | AE0.25 | AE0.50 | AE0.25-<br>助剤0.01 | AE0.25-<br>助剤0.02 | Ref  | AE0.25 | AE0.50 | AE0.25-<br>助剤0.01 | AE0.25-<br>助剤0.02 |  |
| 空気量(%)                  | 2.4  | 3.3    | 3.4    | 4.9    | 6.4    | 6.0               | 8.5               | 3.5  | 4.9    | 6.2    | 5.8               | 9.5               |  |
| 硬化後の気泡体積率(%)            | 1.0  | 1.9    | 2.1    | 3.5    | 4.4    | 3.7               | 7.3               | 1.2  | 3.0    | 3.7    | 3.5               | 6.9               |  |
| 気泡体積率の変動係数(%)           | 0.13 | 0.15   | 0.05   | 0.06   | 0.12   | 0.04              | 0.06              | 0.11 | 0.08   | 0.09   | 0.10              | 0.09              |  |
| 残存率(%)                  | 41.7 | 56.6   | 63.1   | 72.2   | 69.0   | 62.0              | 85.9              | 34.2 | 62.1   | 59.9   | 60.1              | 72.9              |  |
| 気泡個数(個)                 | 417  | 723    | 806    | 1824   | 2193   | 2601              | 2758              | 463  | 1686   | 1797   | 2420              | 2313              |  |
| 平均気泡径( $\mu\text{m}$ )  | 123  | 135    | 138    | 120    | 118    | 100               | 126               | 134  | 117    | 122    | 96                | 129               |  |
| 気泡間隔係数( $\mu\text{m}$ ) | 558  | 451    | 432    | 298    | 276    | 250               | 251               | 540  | 307    | 301    | 258               | 273               |  |

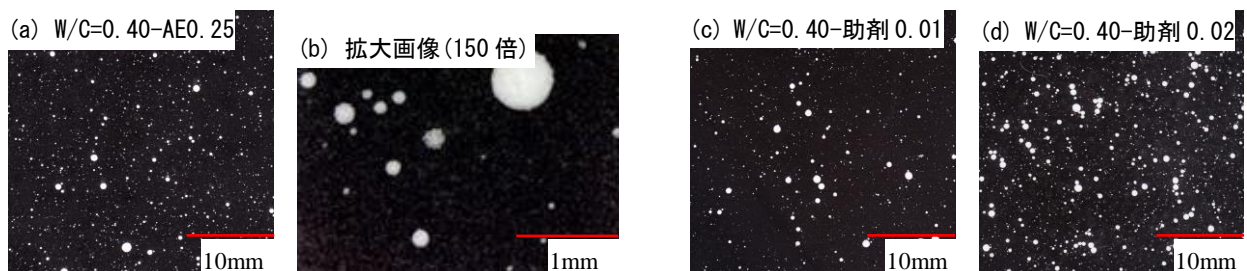


図-1 セメントペースト中の気泡の画像(W/C=0.40)

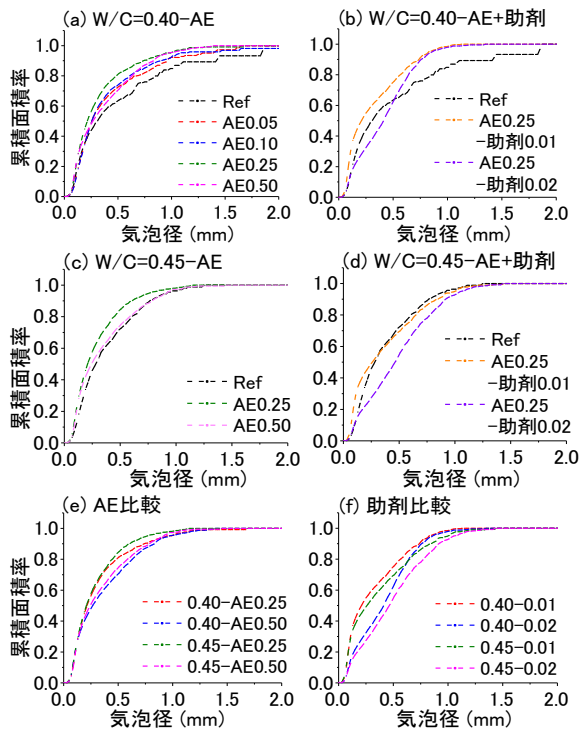


図-2 累積面積率で表した気泡の粒度分布

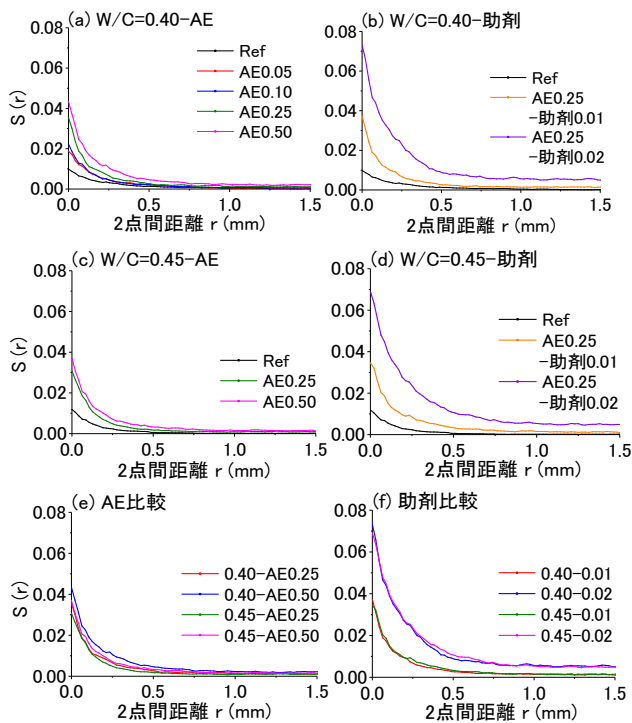


図-3 気泡の2点相関関数

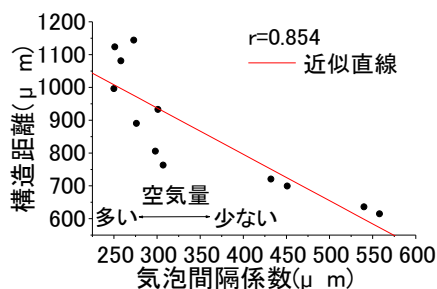


図-4 気泡間隔係数と構造距離の相関

2 (b), (d)), 気泡の合泡によって径の大きな気泡個数が増加していると考えられる。以上より、断面画像から視覚的に理解できる定性的な認識は、粒度分布の定量的な評価と一致するといえる。また、AE 減水剤を添加した試料を水セメント比 0.40 と 0.45 で比較すると、0.45 の方が約 700 $\mu\text{m}$  以上の粗大な気泡割合が、小さくなっている (図-2 (e))。また、AE 助剤を添加した試料と比較すると、水セメント比 0.40 の試料の方が約 250 $\mu\text{m}$  以下の気泡割合が大きく、約 700 $\mu\text{m}$  以上では 0.45 での割合が大きくなっている (図-2 (f))。これは、気泡粒子密度 (単位面積当たりの気泡粒子個数) が増大するほど気泡の合泡が生じやすくなるが、その程度はセメントペーストのフレッシュ性状に影響を受けるためと考えられる。

### 3.3 2点相関関数

図-3 に着目相を気泡としたときの2点相関関数を示す。いずれの試料においても、関数の初期値は気泡の体積率とほぼ一致している。図-3 (a) および (c) に示すように、初期勾配の変化には、AE 減水剤によってエントレインドエアが連行されたことで、空気量および比表面積が増大したことが表れている。また、統計的な変動のため明確に定めることは困難であるが、関数の傾きに変化が認められなくなる点として定めた構造距離は、エンラップトエアのみが含まれる場合は、0.5~0.7mm 程度である。エントレインドエアが連行されると空気量の増加にともない構造距離は増大すると判断される (図-3 (b), (d))。ここに、構造距離は対象とする2点の相関性がランダム分布よりも大きな正の相関を示す範囲であり、この範囲が大きくなることは分布特性に多様性が現れ、分布を特徴づけるためにはより広い範囲の観察が必要であることを意味する。つまり、気泡の結合により粗大な径の気泡が領域内で観測されるなどの空間構造の変化が、関数値として反映されたと考えられる。また、両水セメント比における収束値は AE 減水剤と AE 助剤どちらの場合においても大きな差はなく、混和剤量が等しければ、空間分布を特徴づける構造距離は水セメント比によって大きく変化していない (図-3 (e), (f))。これは、気泡の合泡および破泡が、観察領域全体でランダムに発生しているためと思われる。

図-4 に2点相関関数において勾配変化が認められなくなる値として定めた構造距離と気泡間隔係数の相関を示す。両者には負の相関がみられる。これは、前述のようにエントレインドエアの連行によりセメントペースト中の気泡個数が増加すると、任意の位置から近距離にて気泡を見出せることになるが、分布には多様性が現れるようになり、不偏的な評価のため観察により広い視野が必要となることを示している。今回用いた試料においては、構造距離は大きくても 1mm 程度であり、本研究では

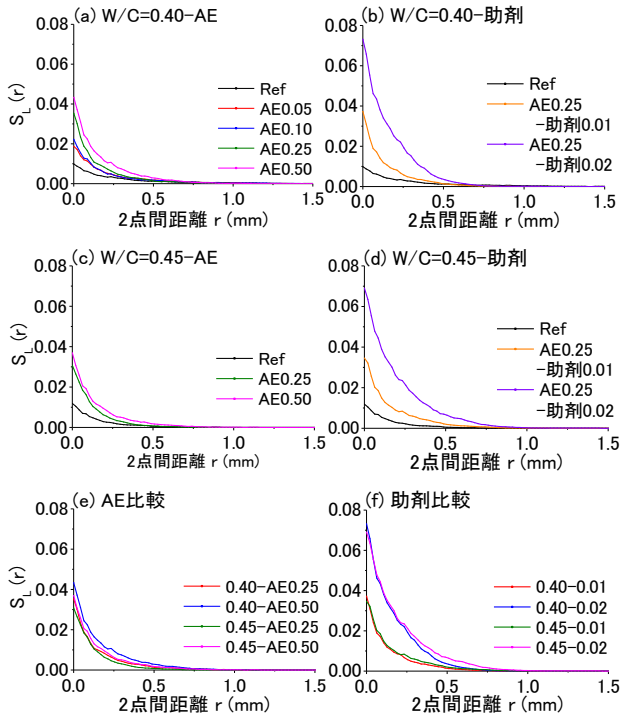


図-5 気泡の2点間直線経路相関関数

30mm×30mmの範囲を観察領域としている。よって視野としては十分な大きさを観察していたと判断される。

### 3.4 2点間直線経路相関関数（パス関数）

図-5に気泡を着目相としたときの2点間直線経路相関関数を示す。図-5(a), (b), (c), (d)より、空気量の増加にともない気泡が直線的に連続性を持つ確率は大きくなっている。また、収束距離は、空気量の増大とともに大きくなる傾向が認められる。このことは、確率としては小さくてもより大きな気泡が存在することを示し、気泡の結合を反映しているものと考えられる。特に、AE助剤を0.02%使用した試料では気泡が直線的な連続経路を有する確率が大きくなって現れており（図-5(b), (d)）、気泡の合泡による気泡径の増大を関数値として再現しているものと考えられる。さらに、助剤を0.02%添加した水セメント比0.40と0.45の試料を比較すると（図-5(e), (f)）、関数の収束値が0.45の方が大きい。これは、高水セメント比となるほど気泡同士の結合が生じやすくなるためと考えられる。

### 3.5 接触分布関数

図-6に任意点から気泡表面を見出す確率である接触分布関数を示す。図-6(a)および(b)より、両水セメント比において、空気量および気泡個数の増加にともない関数の収束距離が短くなっている。これは、混和剤の添加によって気泡密度が増大し、気泡間距離が短くなったことで、セメントペーストマトリックス中の任意の点からより近距離にて気泡を見出せるようになるためである。また、AE助剤を0.02%使用した試料の収束距離が最も短

いことから、この関数は気泡個数の増加とそれに伴う気泡の合泡を強く反映していると考えられる。

図-7に接触分布関数の収束距離と気泡間隔係数の関係を示す。両者には正の相関性が見られ、セメントペースト相の任意地点から気泡表面までの距離を求めることは、気泡間距離を求めることと類似した特性であると理解される。以上より、接触分布関数は予想通り気泡間隔係数の特性を関数値として反映していると考えられ、従来の気泡構造の定量的評価法との対応づけが可能と思われる。

図-8に接触分布関数を頻度分布として示す。図-8(a)および(b)より、混和剤によりエントレインドエアが連行されると、気泡粒子密度の増大とともに確率の分布範囲は狭まり、最頻値を示す距離も短くなる。このことから、エントレインドエアはセメントペースト相内の任意の位置から近距離にて気泡表面を見出す確率を高めることは明らかである。また、AE助剤を添加した試料の最頻値までの距離と気泡間隔係数に着目すると、AE助剤の添加により気泡間隔係数が増大する（表-2）のに対し、最頻値までの距離は短くなっている（図-8）。これより、気泡表面に関する接触分布関数は、気泡間隔係数の仮想空間配置による評価とは異なる変化傾向も表す特性値であると考えられる。また、スキャナによって取得した低倍率の画像であっても空気量の変化にともなう空間分布の特徴の変化が現れていることにもなり、低倍率

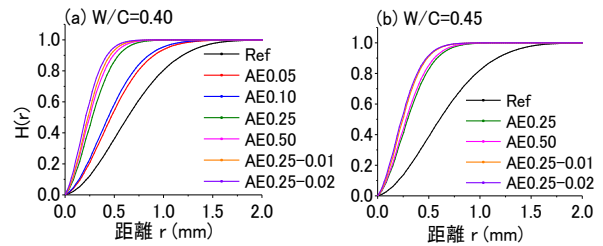


図-6 接触分布関数

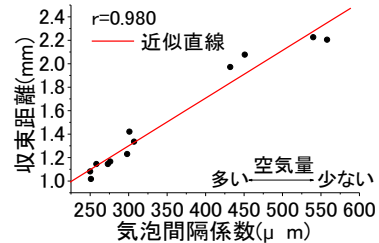


図-7 収束距離と気泡間隔係数の相関

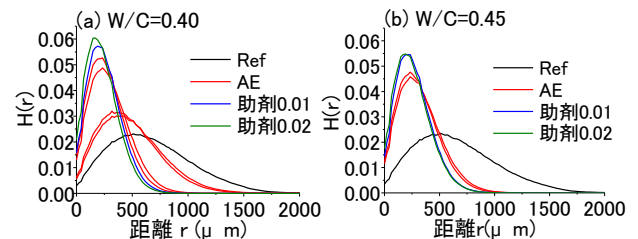


図-8 接触分布関数の頻度分布

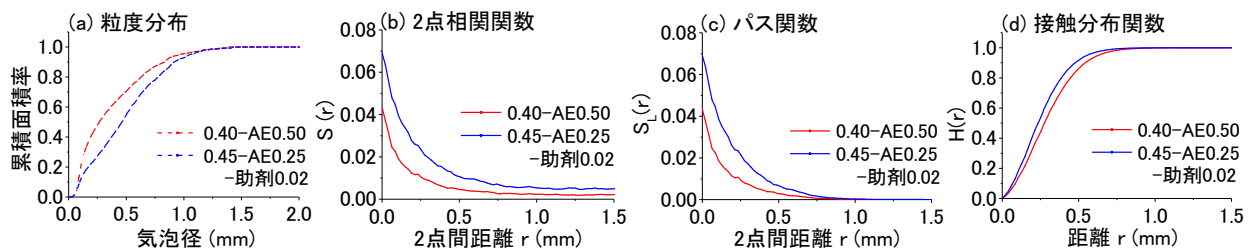


図-9 同程度の気泡間隔係数での各関数の比較

画像でも気泡分布の特性化および評価に対して有用な情報を与えると考えられる。

### 3.6 同程度の気泡間隔係数での各関数の比較

気泡間隔係数が同程度の値を示した W/C=0.40-AE0.50 (気泡間隔係数 276 $\mu$ m) と W/C=0.45-AE0.25-助剤 0.02 (気泡間隔係数 273 $\mu$ m) の試料において気泡の空間分布構造を比較する。図-9 に各種関数を示す。図-9(a)より、気泡間隔係数の値が同程度であっても粒度分布は大きく異なり、その勾配から助剤 0.02%の試料は 500 $\mu$ m 以上の気泡割合が大きいと判断される。また図-9(b)より、2点相関関数での初期値(気泡体積率)は助剤 0.02%の方が大きく、収束距離も大きいことから、前述のように助剤 0.02%の気泡を空間分布には多様性がより大きく現れていることになる。気泡内に直線的な経路が存在する確率も助剤 0.02%の方が大きく(図-9(c))、気泡の結合により粗大な気泡個数が増加していることが理解される。接触分布関数の収束値も、助剤 0.02%の方が小さく、気泡個数と平均気泡径の差が関数値に反映されていると考えられる(図-9(d))。以上のことより、低倍率の画像であっても2次のステレオロジーに基づく空間統計量により実際の気泡の空間構造の相違をより敏感に表すことが可能であり、気泡を示す評価法として有用であると考えられる。

## 4. 結論

セメントペースト内における気泡の空間構造を粒子過程とみなし空間統計量の関数による評価を行った。本研究にて得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 気泡粒子密度が増大すると気泡の空間構造は気泡同士の結合などにより変化し、その分布特性には多様性が現れると考えられる。
- (2) 2点間直線経路相関関数は、気泡の合泡による連続性の増大を反映していると考えられる。
- (3) 2点相関関数および接触分布関数は、気泡間隔係数の特性を関数値に反映し、従来の定量評価値への関連付けが可能と思われる。
- (4) 低倍率画像内の気泡に対し、各種関数はその気泡組織の差異を反映しており、低倍率画像への空間統計

量の適用は有用であると考えられる。

- (5) 気泡間隔係数の値が同程度であっても、気泡分布特性は異なることを、空間統計の概念を用いることにより定量的に評価できた。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C), 課題番号: 24560564)の交付を受けた。ここに記し謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Powers, T.C. : The air requirement frost-resistant concrete. Proceedings of the highway Research Board, 29, pp.184-211, 1949
- 2) 仁木孟伯, 地頭菌博, 原田克己: 画像解析装置を用いた硬化コンクリート中の気泡組織測定方法について, セメントコンクリート論文集, Vol.39, pp.141-145, 1985
- 3) 小長井宣生, 大橋猛, 根本任宏: 気泡断面積測定による硬化コンクリートの気泡パラメータ解析理論, 土木試験所月報, No.396, 1986.5
- 4) 鮎田耕一, 桜井宏, 田辺寛一郎: 硬化コンクリート気泡組織の照度差による画像解析, 土木学会論文集, Vol.13, No.420, pp.81-86, 1990
- 5) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学: コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.1, pp.25-47, 2012.1
- 6) Snyder, K., Natesaiyer, K. and Hover, K.: The Stereological and Statistical Properties of Entrained Voids in Concrete : A Mathematical Basis for Air Void System Characterization, Materials Science of Concrete VI (eds. S. Mindess an J.Skalny), The American Ceramic Society, pp.129-214, 2001.
- 7) Lu, B. and Torquato, S.: Nearest-Surface Distribution Function for Polydispersed Particle Systems, Physical Review A, Vol.45, No8, pp.5530-5544, 1992
- 8) Dequiedt, A.-S., et al : Distances between air-voids in concrete by automatic methods, Cement and Concrete Composites, Vol.23, No.2-3, pp.247-254, 2001
- 9) 川村満紀: 土木材料学, 森北出版株式会社, 1996