

## 論文 点過程統計量と電気伝導率にみる遷移帯の存在の可能性

吉川 峻生\*1・内藤 大輔\*1・五十嵐 心一\*2

**要旨:** コンクリート中の未水和セメント粒子の分散性を点過程統計量により評価し、骨材の壁効果が及ぼす影響をランダム性の観点から定量評価した。また、厚さの異なるコンクリート供試体の電気伝導率を測定し、遷移帯のパーコレーションによる連続経路の形成がコンクリートの物質透過性に及ぼす影響を考察した。結果、セメント粒子はセメントペーストマトリックス内にランダムに分布しており、壁効果により排他的な分布を示すような特徴は確認されなかった。また、電気伝導率は供試体厚さに依存せず様な値を示した。コンクリート系材料における物質透過性の相違を遷移帯の存在のみに帰着することは適切ではないようである。

**キーワード:** 遷移帯, 壁効果, 点過程統計量, 電気伝導率, パーコレーション

### 1. 序論

コンクリートの耐久性はセメントペースト相の毛細管空隙ネットワークにおける物質移動現象の影響が支配的であり、セメントペーストマトリックスにおける微視的構造の把握はコンクリートの耐久性を論ずる上で非常に重要である。物質透過性に関して既往のセメント系材料の透水試験結果より、コンクリートはセメントペーストやモルタルに比べ透水性が大きくなることが知られている。しかし、骨材が不透性で透水経路は毛細管空隙ネットワークに限られると考えるならば、理論上はコンクリートの透水性は小さくなるはずである。この理論と事実の相違については、コンクリートの骨材-セメントペースト界面におけるセメント粒子の充填が不足した多孔質領域の存在から説明されることが多く、この領域は遷移帯 (ITZ: Interfacial Transition Zone) と呼ばれている。

遷移帯領域においては、骨材の壁効果 (wall effect) により粗大セメント粒子は骨材に接近できないとされ、コンクリートの物質拡散のシミュレーションによるモデル解析においてもこれを考慮している。例えば、セメントペースト領域にセメント粒子をランダムに発生させる際、骨材界面に境界条件を定めることで骨材近傍の粒子を除去し、遷移帯における疎な粒子配置を再現している。このようにコンクリートの物質移動特性を評価する上で遷移帯の存在を前提とした解析例は多い<sup>1),2)</sup>。

遷移帯の存在を実験的に確認できたとする研究もあり、例えば、Winslow<sup>3)</sup>らは W/C=0.40 のモルタルの骨材体積率を 0~55%まで変化させ、水銀圧入法により細孔径分布を測定している。その結果、骨材体積率が 48%を超えると細孔径分布が急激に変化することを指摘し、これは骨材量の増加により骨材粒子の周囲に形成されていた遷移帯同士が連結するパーコレーションが生じ、連続し

た移動経路が形成されるためと主張している。

一方で、Diamond<sup>4)</sup>は同じ配合のモルタルに対して反射電子像を用いた画像解析によってセメント粒子と空隙の分布を詳細に調べている。コンクリート中のセメントペースト相を骨材表面から 10 $\mu$ m 間隔の帯状領域に区切り各領域における空隙率を求め、従来の概念的に説明されるような遷移帯は存在しないと主張している。

セメント系材料における ITZ の存在を物質透過性と空隙のパーコレーションに関連付ける実験的な評価法として、電気泳動法に基づく電気伝導率測定法が挙げられる<sup>5)</sup>。電気泳動法は、供試体に電圧を負荷することにより電解溶液中のイオンが電極に移動する現象を利用しており、供試体中の空隙量のみでなく、その系における連続性も評価可能である<sup>6)</sup>。コンクリートの電気伝導率はセメントペーストマトリックス中の毛細管空隙構造に依存するので<sup>7)</sup>、遷移帯が存在する場合には、そのパーコレーションによる連続移動経路の形成が電気伝導率に影響を及ぼすと考えられる。

本研究においては、ITZ が未水和セメント粒子 (以降はセメント粒子と略記) の初期充填に起因した領域であることを考慮し、若材齢のコンクリート中のセメント粒子の分布に着目した。点過程としてセメント粒子の分散特性を評価し<sup>8)</sup>、骨材の壁効果がセメント粒子の分布に及ぼす影響をランダム性の変化の観点から論ずる。また、電気伝導率試験により評価されるコンクリートの物質透過性をセメント粒子の空間分布の特徴と関連付けながら考察し、ITZ の存在について論ずることを目的とする。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および供試体の作製

セメントには普通ポルトランドセメント (密度:

\*1 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)

\*2 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 コンクリートの配合

W/C	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	AE減水剤 (cc/m <sup>3</sup> )	AE助剤 (cc/m <sup>3</sup> )
0.5	41.9	175	350	1011	729	3500	1400

3.15g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 3310cm<sup>2</sup>/g) を使用し, 細骨材に川砂(密度:2.61g/cm<sup>3</sup>), 粗骨材には川砂利(密度:2.60g/cm<sup>3</sup>, 最大骨材寸法: 25mm) を用いた。目標空気量およびスランプは, それぞれ 4.5±1.5%, 15±2cm とした。コンクリートの配合を表 - 1 に示す。また, JIS R 5201 に基づき, 水セメント比0.50のセメントペースト, セメント砂比1:2のモルタルおよびコンクリートの円柱供試体(直径100mm, 高さ200mm) を作製した。打ち込み後24時間にて脱型し, 所定材齢まで20℃の水中養生を行った。

## 2.2 反射電子像の取得と画像解析

材齢 24 時間にて供試体中央部から薄片試料を切り出し, エタノールに 24 時間浸漬して内部水分との置換を行った。さらに, t-ブチルアルコールとの置換を行った後, 凍結真空乾燥を行い, 真空樹脂含浸装置を用いてエポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後, 耐水研磨紙を用いて骨材とペーストマトリックス相の境界が鮮明に観察できるまで注意深く研磨し, ダイヤモンドスラリーによる仕上げ研磨を行った。試料表面にカーボン蒸着処理を施し, 反射電子像観察試料を得た。走査型電子顕微鏡観察にてセメントの水和度およびセメント粒子の分布の正確な評価が可能で, かつなるべく広視野の観察が行えることを意図して<sup>9)</sup>, 観察倍率 200 倍にてセメントペーストおよびコンクリートの反射電子像を無作為に 30 枚取得した。このとき, 1 画像は 1148×1000 画素からなり, 1 画素は 0.55μm に相当する。

取得した反射電子像(図 - 1(a)) に対し, グレースケールに基づく 2 値化処理を施し, セメント粒子を抽出した。また, コンクリートの反射電子像において, 骨材をグレーレベルによって自動的に識別することは困難である。このため本研究においては注意深く観察を行いグレースケールと表面のテクスチャ, 寸法を総合的に考慮して目視により骨材相を抽出した。骨材相を減算したセメ

ントペーストマトリックス領域画像に対し, グレースケールに基づく 2 値化処理を施し, セメント粒子の 2 値画像を取得した(図 - 1(b))。このとき, 画像解析ソフトウェアによりセメント粒子の点密度λおよび重心点座標を算出し(図 - 1(c)), それぞれの位置ベクトル $\mathbf{x}_i$ を点過程 $X_r = \{\mathbf{x}_i; i = 1, \dots, n\}$ とした。

## 2.3 間引き過程としての解析方法

### (1) セメントペースト相の特性化

コンクリート中のセメントペースト領域はその形状が任意に変化するランダム領域と考え, その空間分布を共分散 C(r)により特性化した。ペースト領域を P, 距離離れた 2 点を  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  とするとき確率を Pr と表記すれば

$$C(r) = Pr\{\mathbf{x}_1 \in P, \mathbf{x}_2 \in P\} \quad (1)$$

と定義される。ここに,  $r = |\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2|$  である。

### (2) セメント粒子の分散性評価

コンクリートのセメント粒子の分散性を評価するため, 点過程 $X_r$ を用いて, 式(2)より K 関数を求めた。

$$\hat{K}(r) = \frac{1}{\lambda^2} \sum_{i \neq j} \frac{1(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| \leq r)}{s(x)} \quad (2)$$

ここに,  $1(\cdot)$  は( )内が真であれば 1, 偽であれば 0 を与える指示関数であり,  $s(x)$  はエッジ補正係数である。

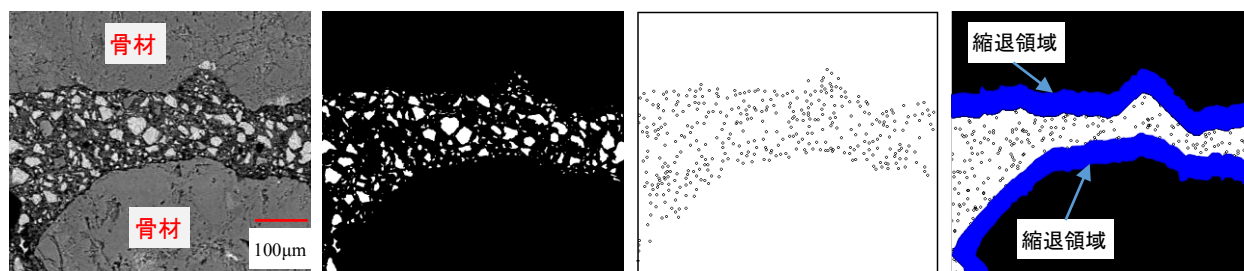
### (3) セメントペーストから間引かれた過程での K 関数

セメントペースト供試体のセメント粒子の分布を点過程 $X_b$ とし, その K 関数 $K_b$ を求めた。ここで, コンクリートの点過程 $X_r$ が基本となるセメントペースト供試体の点過程 $X_b$ からコンクリートの骨材位置にある点が消去され, ペースト領域 P にある点だけが残存したときの点過程 $X_p$ を再現しているならば,  $X_r = X_b \cap P$  と表される。このとき, 残存した点過程 $X_p$ の K 関数 $K_p$ は, セメントペースト領域 P の共分散 C(x)および面積率 p と, 基となる K 関数 $K_b$ を用いて式(3)により求められる。

$$K_p(r) = \frac{1}{p^2} \int_0^r C(x) dK_b(x) \quad (3)$$

## 2.4 シミュレーションによる分散性評価

K 関数は観察領域全体を解析対象とするため, セメントペーストと骨材の 2 相構造を成すコンクリートにおいては, セメント粒子の分散可能な領域は骨材により制限



(a) 反射電子像の例

(b) セメント粒子 2 値画像

(c) セメント粒子点場画像

(d) 縮退領域とランダム点の発生

図 - 1 セメント粒子の反射電子像から点過程への変換例

され、必然的に関数値は強い凝集性を持つ場合の分布となる。ゆえに、コンクリートにおけるセメント粒子のランダム性は、観察視野全体を点の分散可能領域としたポアソン分布との単純な比較から評価することはできない。そこで、抽出したコンクリート中の骨材画像を用いて、骨材の補集合空間であるセメントペースト領域に対し、シミュレーションにより実際のコンクリート中のセメント粒子とペーストマトリックスにおける点密度が等しくなるよう点をランダムに発生させた。発生させた点をコンクリート中のシミュレーションによるセメント粒子の点過程 $X_S$ とみなし、シミュレーションにおける K 関数 $K_S$ を算出した。

### 2.5 L 関数の 95%信頼区間

L 関数は、放物線を描く K 関数を式(4)により直線表示へ変換することで、関数値の相違を視覚的に理解しやすい関数である。

$$\hat{L}(r) = \sqrt{K(r)/\pi} \quad (4)$$

2.4にて K 関数 $K_S$ を求めたときと同様の手順により、シミュレーションにおける L 関数 $L_S$ を求めた。この試行を各骨材画像に対し 200 回繰り返すことで標本値を求め、L 関数の 95%信頼区間を算出した。

### 2.6 遷移帯を含まない領域での分散性評価

観察対象とするコンクリート中の骨材 - セメントペーストマトリックス界面は練り混ぜ過程を経て形成されたものである。このことを考慮して、骨材界面から厚さ  $20\mu\text{m}$  および  $50\mu\text{m}$  の範囲を遷移帯と仮定し<sup>10)</sup>、セメントペーストマトリックス領域を遷移帯領域相当分だけ縮退させた(図 - 1(d))。この実際のコンクリート画像からの縮退後の領域内におけるセメント粒子の点密度 $\lambda$ と K 関数 $K_r$ を求め、さらに、2.3 および 2.4 と同様の手順により間引き過程における K 関数 $K_p$ およびシミュレーションによる K 関数 $K_S$ を算出した。

### 2.7 電気伝導率の測定

JSCE-G571 および ASTM C 1202 に準拠し、電気泳動法による測定を行った。材齢 1, 7, 28, 91 日にて供試体から直径 100mm, 厚さ 50, 25, 12.5mm の円盤型試料を切り出し、円周面上にエポキシ樹脂を塗布し、樹脂の硬

化後に 24 時間の真空飽水処理を施した。その後、セル溶液として  $0.3\text{mol/l}$  の水酸化ナトリウム溶液を用い、直流電源によりセメントペーストでは 15V, モルタルとコンクリートでは 30V の電圧を負荷した。通電開始 15 分後の電流値を測定し、式(5)より電気伝導率 $\sigma$ を算出した。

$$\sigma(\mu\text{S/cm}) = (I \cdot L)/(V \cdot A) \quad (5)$$

ここに、I は電流値 (amps), L は供試体厚さ (cm), V は電圧値 (V), A は供試体の投影面積 ( $\text{cm}^2$ ) である。なお、材齢 1 日の試料においては、脱型後ただちに切り出しおよび樹脂の塗布を行い、毛細管空隙の完全飽和状態を仮定して、電気伝導率の測定を行った。

### 2.8 コンクリート断面画像取得および骨材抽出

電気伝導率試験終了後にコンクリート供試体を切断し、切断面を研磨した。その後、スキャナを用いて等倍の断面画像を取得した。このときの解像度は 2000dpi とし、1 画素は  $10.6\mu\text{m}$  に相当する。試料断面に対して 1% フェノールフタレイン水溶液による呈色を施し、原画像と呈色画像の差分処理により骨材相およびセメントペーストマトリックス相を抽出した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 コンクリート中のセメント粒子の分布

図 - 2 にセメントペースト供試体におけるセメント粒子の K 関数 $K_b$ を示す。 $K_b$ は完全なランダム分布であるポアソン分布の K 関数と完全に一致している。

図 - 3(a)にコンクリート中のセメント粒子の K 関数を示す。なお、図中には骨材を含めた全視野を対象とした完全ランダム分布のときの K 関数を黒実線にて示している。セメントペーストからの間引き過程として再現した K 関数 $K_p$ と実際のコンクリートの分布の K 関数 $K_r$ と比較すると(図 - 3(a))、セメント粒子の分散領域が骨材により制限されるため、予想通りセメント粒子はランダム分布よりも大きな関数値を示し、関数は凝集した配置にある。遷移帯の厚さ程度の数  $10\mu\text{m}$  の距離範囲においては、実際の分布と間引き過程は完全に一致し、このような近傍距離では、セメントペースト中にて確認できた完全ランダムな分布が再現されていることになる。距離

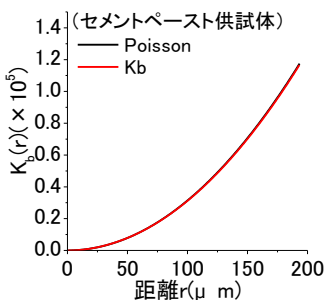


図 - 2 セメント粒子の K 関数

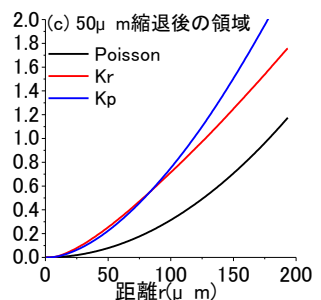
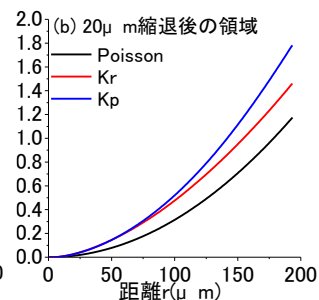
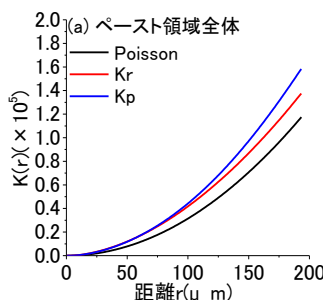


図 - 3 セメントペーストからの間引き過程におけるセメント粒子の K 関数

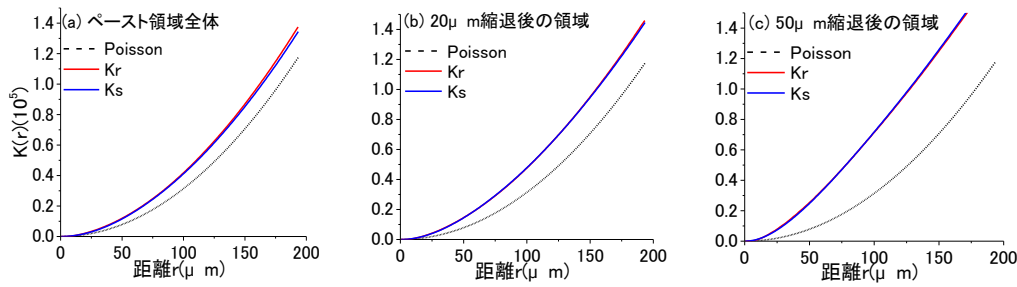


図 - 4 シミュレーションにおけるセメント粒子の K 関数

100 $\mu\text{m}$ を超えると、実際のコンクリート中のセメント粒子はより凝集性の緩和された粒子配置を示している。

図 - 3 (b), (c) に遷移帯仮定領域を縮退させたときの、セメントペーストマトリックス領域におけるコンクリート中のセメント粒子の K 関数 $K_r$ および間引き過程での K 関数 $K_p$ を示す。より多くの距離を縮退させた方が関数としてはより凝集側に分布するが、縮退領域のセメントペーストマトリックスにおいても、実際のコンクリート中のセメント粒子の分布は間引き過程として表されたランダム分布よりも凝集性の小さい分布を示す。また、距離の小さい範囲において両者は一致している。すなわち、遷移帯に相当する領域を含む距離 100 $\mu\text{m}$  の範囲において、実コンクリート中のセメント粒子の分布は、ランダム過程であるセメントペースト供試体の点過程 $X_b$ からランダムに点を間引いた過程として再現されたことになる。換言すれば、遷移帯相当領域の有無にかかわらず、粒子の空間分布に特徴的な差異は存在しないと考えられる。また、100 $\mu\text{m}$ を超える距離においては、実コンクリートの K 関数は間引き過程よりも凝集性が緩和されたランダム分布に近い分布を示しており、これは、骨材のせん断作用によりセメント粒子のフロックが破壊されたことで、セメント粒子の分布がよりランダムな状態に近づいたためと考えられる。

図 - 4 は基本とするセメントペースト供試体からの点の間引きではなく、得られた反射電子像中のセメントペースト領域内のみランダムに点を発生させるシミュレーションにより求めたセメント粒子の K 関数 $K_s$ を、実際のコンクリート中の分布の K 関数 $K_r$ と比較して示した

ものである。実際の K 関数 $K_r$ およびシミュレーションによる K 関数 $K_s$ は各領域において完全に一致している。よって各領域におけるランダム性の特徴は、シミュレーションにより簡単に再現できるといえる。

図 - 5 に実際のコンクリートにおける L 関数シミュレーションの 95%信頼区間を示す。実コンクリート中のセメント粒子は大きさを有するため、距離 10 $\mu\text{m}$ 程度の範囲において他点は存在できず関数は横軸に対して切片値を持つ。しかし、それ以降の一般的に遷移帯厚さと定義される距離を含む範囲においては、いずれの L 関数も関数値は信頼区間内に収まっている。このことから、実コンクリート中のセメント粒子の分布は、セメントペースト領域にランダムに点を発生させた過程として再現され、遷移帯相当領域にて点密度が有意に小さくなっているような特徴は存在しないと考えられる。また、逆に ITZ にて点密度が小さくなるならば、バルクセメントペースト領域にて点密度の高い領域が存在しなければならないことになるが、そのような分布の変動も図 - 5 に示したランダム分布の変動には現れていない。つまり、セメント粒子の充填を制限された領域内での点過程としてとらえたとき、実コンクリート中のセメントペーストマトリックスにおいて、セメント粒子はランダムに分布し、セメント粒子が骨材の壁効果により充填が不足し、粒子が排他的な分布を示すような特徴は存在しない。このことは、単純に点密度からも推察される。表 - 2 は実際のコンクリート中のセメントペーストマトリックス中のセメント粒子の点密度を示している。遷移帯として仮定した厚さ相当を縮退させてもセメント粒子の点密度に有意な

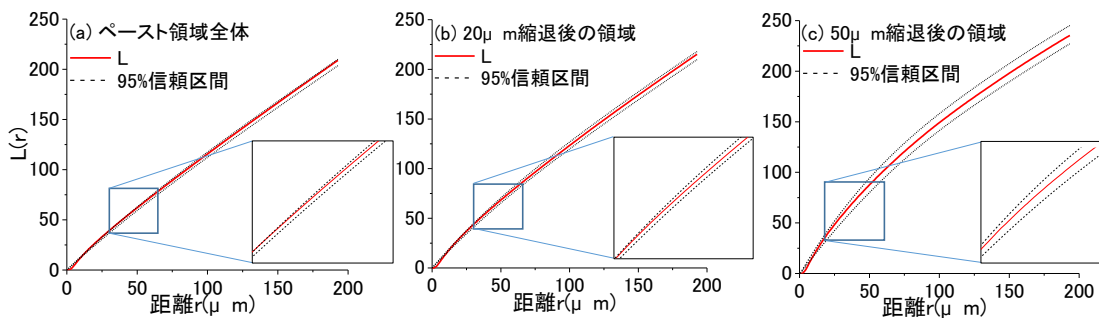


図 - 5 L 関数における 95%信頼区間

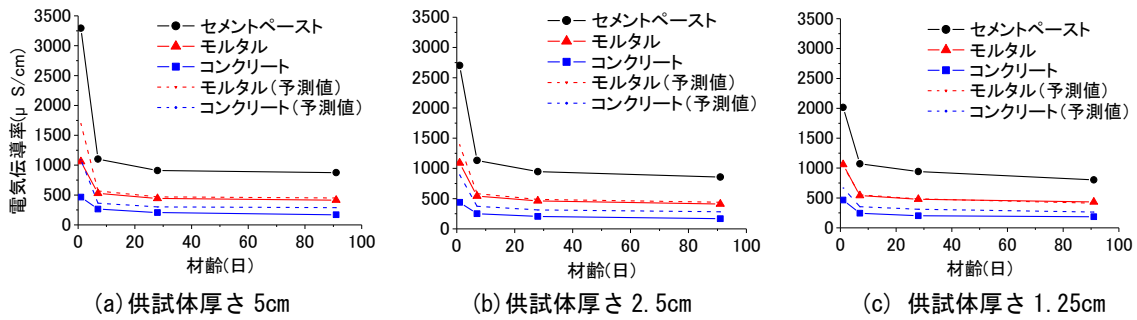


図 - 6 各供試体厚さにおける材齢に伴う電気伝導率の変化

表 - 2 セメント粒子の点密度

	点密度(個/μ m <sup>2</sup> )
ペースト領域全体	0.00424
20μ m縮退後の領域	0.00422
50μ m縮退後の領域	0.00414

差は認められない。

### 3.2 電気伝導特性の変化

図 - 6 にセメントペースト、モルタルおよびコンクリートの電気伝導率の材齢に伴う変化を示す。また、モルタルおよびコンクリートの電気伝導率は、セメントペーストの電気伝導率を基にして、単純に骨材（細骨材および粗骨材）体積率相当だけ希釈した値になると考えたときの予測値を破線にて示している。いずれの供試体においても、材齢の進行にともなう変化の傾向は同様であり、電気伝導率は材齢 1 日にて最も高い。水和の進行にともない毛細管空隙構造が緻密となり材齢 7 日にて急激に低下し、以降は緩やかな減少傾向にある。モルタルに比べ、骨材を多く含むコンクリートの電気伝導率の値は小さく、透過相であるセメントペースト領域と伝導経路である毛細管空隙ネットワークの減少を反映していると考えられる。実際のモルタル、コンクリートの電気伝導率は、ともに予測値を下回っており、その差はコンクリートの方が大きい。Winslow ら<sup>3)</sup>によると骨材率が 48%を超えると遷移帯の連結による連続移動経路が形成され始めるが、モルタル（骨材率 48%）に比べ遷移帯のパークレーションにより伝導性が向上しやすいと推測されるコンクリート(骨材率 67%)の電気伝導率は予測値を大きく下回っている。遷移帯体積率が大きく、溶液中のイオンの移動がより確保されていると推測されるコンクリートにて、希釈率相当値を下回る低い電気伝導率を示したことは遷移帯の存在を前提とするならば、明らかに矛盾した結果といえる。

図 - 7 はモルタルおよびコンクリートの電気伝導率を比較して示したものである。モルタルの電気伝導率に供試体厚さによる変化はみられない。遷移帯による連続経路の形成は骨材率 48%程度からとするならば、モルタル（骨材率 48%）においては連続経路が形成されていない可能性がある。しかし、連続経路が確実に存在すると考

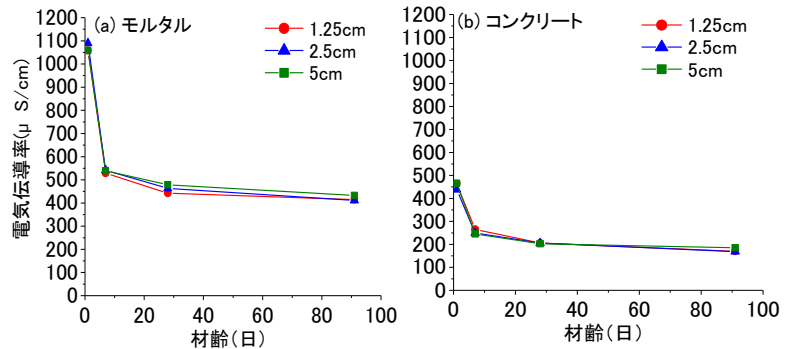
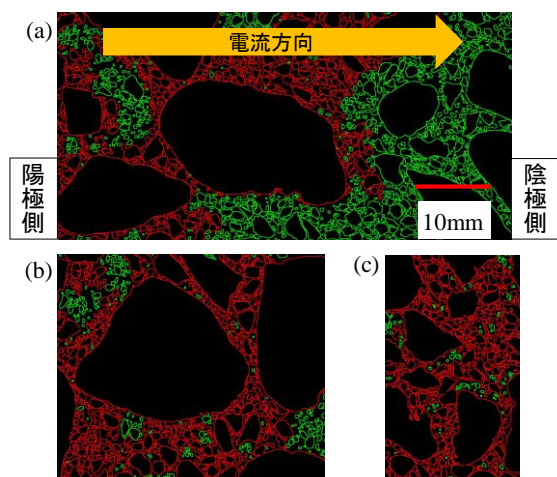


図 - 7 モルタルとコンクリートの電気伝導率の比較

えられるコンクリート（骨材率 67%）においても各供試体厚さ間に偏差を超えた有意な差は認められず、各供試体の変動係数も最大で 0.1 程度であった。また、内川ら<sup>1)</sup>は遷移帯の形成は材齢 3 日より始まり、材齢 7 日にて遷移帯中の大径の空隙量は最大となると報告しているが、材齢 7 日における電気伝導率測定においても、供試体の厚さ変化による電気伝導率の差はモルタル、コンクリートともに他の材齢と同程度である。以上のことより、電気伝導率測定において遷移帯が卓越した電気伝導経路となるような様子は認められず、一般的に認められた概念である遷移帯のパークレーションによる透過性の増大とは必ずしも一致しない結果であることは明らかである。

2.7 にてスキャナ画像より抽出されたコンクリート中の細骨材および粗骨材に対して遷移帯として一般的に想定される厚さに相当する厚さ 50μm の膨張処理を行った。この骨材膨張処理画像と元の骨材抽出画像を重ね合わせ、その差分を遷移帯とみなした。膨張処理過程において遷移帯同士が結合した場合、画像処理ソフトウェア上では、結合した領域は同一のクラスターとして識別される。全クラスターより、電気伝導率測定における陽極側の表面に存在するクラスターを選別し、これをパークレーションクラスターとして遷移帯の連続領域とみなした。50μm の膨張処理にて得られた連続領域の例を図 - 8 に示す。厚さ 5cm の供試体において供試体を貫通した連続経路は存在しない。粗骨材最大寸法と同等の厚さである 2.5cm の供試体では貫通した経路が現れ始め、供試体厚さが薄くなるほど、ペーストマトリックスにおける連続経路の線密度は増大している。遷移帯が存在するならば薄い供



(a) 供試体 5cm (b) 供試体 2.5cm (c) 供試体 1.25cm

図-8 遷移帯抽出画像(緑色:遷移帯領域 赤線:連続経路)

試体ほど連続経路が電気伝導率に及ぼす影響は顕著に現れると考えられる。しかし、図-7にて前述した通り、電気伝導率は供試体厚さに依存せず一様な値を示しており、セメント系材料における物質移動特性の相違は、単純に遷移帯の存在のみからは説明されないと思われる。

#### 4 結論

コンクリート中のセメント粒子に対し、点過程統計を用いて、骨材の壁効果がセメント粒子の分散特性に及ぼす影響をランダム性の観点から評価し、コンクリートの物質透過性と関連付けながら考察することで、骨材周囲のITZの存在について論じた。本研究にて得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 遷移帯に相当する領域を含む距離 100 $\mu$ m の範囲において、実コンクリート中のセメント粒子の分布は、ランダム過程であるセメントペースト供試体の点過程 $X_b$ からランダムに点を間引いた過程として再現され、空間分布に特徴的な差異は存在しない。
- 2) 実コンクリート中のセメント粒子の配置は、シミュレーションによりセメントペースト領域にランダムに点を発生させた過程として再現される。
- 3) 遷移帯に相当する領域の有無にかかわらず、実際のコンクリート中のセメント粒子はランダムに分布し、点密度からもセメント粒子が骨材の壁効果により充填が不足し、粒子が排他的な分布を示すような特徴は認められない。
- 4) モルタルに比べ骨材体積割合が大きく、物質透過性が大きくなると推測されるコンクリートにて、電気伝導率は希釈率相当値を下回る低い値を示し、遷移帯を前提としたパーコレーションによる透過性の増大とは必ずしも一致しない結果を得た。

- 5) コンクリート供試体の厚さが薄くなるほど、ペーストマトリックスにおける遷移帯の連続経路の線密度は増大するが、電気伝導率測定において連続経路が卓越した伝導経路として影響を及ぼすような特徴は確認されなかった。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、日本学術振興会科学研究費補助金(課題番号 15K14013, 五十嵐心一)の交付を受けた。

#### 参考文献

- 1) Garboczi, E.J. and Bentz, D.P.: Digital Simulation of the Aggregate-Cement Paste Interfacial Zone in Concrete, *Journal of Materials Research*6, pp.196-201, 1991.
- 2) 加藤佳孝, 魚本健人: 数値解析による骨材表面に存在する遷移帯特性の評価に関する研究, *土木学会論文集*, Vol.46, No.641, pp.77-86, 2002.2
- 3) Winslow, D.P. and Cohen, M.D.: Percolation and pore structure in mortars and concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.24, No.1, pp25-37, 1994.
- 4) Diamond, S.: Concrete Porosity Revisited, *Materials Science of Concrete Special Volume, The Sidney Diamond Symposium*, pp.3-23, 1998.
- 5) Nokken, M.R. and Hooton, R.D.: Using pore parameters to estimate permeability or conductivity of concrete, *Materials and Structures*, Vol.41, No.1, pp.1-16, 2008.
- 6) Katz, A.J., Thompson, A.H.: Quantitative prediction of permeability in porous rock, *Physical review B*, Vol.34, No.11, pp.8179-8181, 1986
- 7) 内藤大輔, 五十嵐心一, 柴山舞: セメントペーストの電気伝導率と粗大毛細管空隙空間構造の対応, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.30, No.1, pp.561-566, 2008.
- 8) Stoyan, D., Kendall, W.S. and Mecke, J.: *STOCHASTIC GEOMETRY and APPLICATIONS*, 2nd ed., JOHN WILEY&SONS Ltd, 1995.
- 9) Mouret, M., Ringot, E. and Bascoul, A.: Image analysis: a tool for the characterisation of hydration of cement in concrete – metrological aspects of magnification on measurement, *Cement and Concrete Composites*, Vol.23, No.2-3, pp.201-206, 2001
- 10) 川村満紀: *コンクリートの材料科学*, 森北出版株式会社, 1996.
- 11) 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介: 硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討, *コンクリート工学論文集*, Vol.4, No.2, pp.1-8, 1993.7