

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 1 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560482

研究課題名（和文）コンクリートの内部構造のマルチスケールな空間統計量と巨視的材料物性の対応

研究課題名（英文）Multiscale spatial statistics for the internal structure and their relation to macroscopic properties in concrete

研究代表者

五十嵐 心一（IGARASHI SHIN-ICHI）

金沢大学・環境デザイン学系・教授

研究者番号：50168100

研究成果の概要（和文）：観察レベルの異なるコンクリート画像の評価に空間統計学の概念を導入し、画像内の幾何学的特徴の空間分布状況を定量的に評価した。また、その空間分布とコンクリートの物性の関係を検討した。各レベルにて認められる空間構造に関する空間統計量は、コンクリートの巨視的な物性、特に物質透過性との間に良好な相関性を有する。また、その相関性とポゾラン反応性の進行との対応から、鋳物質混和材系における耐久性改善は、より微細な空隙の連続性の低下（経路遮断）から説明できるようである。

研究成果の概要（英文）：In order to quantitatively evaluate characteristic structures in concrete at different observation levels, spatial statistics such as the second order stereology function were obtained from images. There existed good correlations between the statistics and macroscopic properties of concrete, especially a transport property. Furthermore, taking account of the relationship between the correlations and the pozzolanic reaction, improvement of durability in concrete with blended cements can be explained by discontinuity of fine pores smaller than the resolution.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：微視的構造，反射電子像，空間統計学，2次のステレオロジー，粒子過程，点過程，配合推定

1. 研究開始当初の背景

セメント系材料の反射電子像の画像解析法は四半世紀も前に提案され、コンクリートの微視的構造の定量評価手法としてその有用性が認められてきた。しかし、これまでの間、画像解析法において用いられてきた評価

パラメーターとしては、いわゆる一次量と称される面積率を求める場合がほとんどであり、その大小関係のみが巨視的な物性との関連で論じられるに過ぎなかった。しかし、例えばコンクリート中の空隙構造のように、体積率が同等であってもその空間分布（連続性、凝集性、寸法分布）が異なれば、コンクリー

トの物性も大きく異なりうることは古くから知られていた。特に、コンクリートの耐久性に関わる物質移動特性を考える場合、空隙の量だけではなくその連続性が重大な要因であることが指摘されていた。

そこで、対象とする特徴の総量だけでなく空間内での分布状況の相違を定量的に評価し、それらが具体的にコンクリートの巨視的な物性とどのように対応するのかを明確にすることが必要とされていた。また、そのような空間構造までを考慮したより高レベルの画像解析法を確立することは、コンクリートの様々な物性発現機構の理解のみならず、近年の喫緊の課題である既存コンクリートの劣化度診断や現存性能評価を目的とした画像診断法の構築の基礎となるものと期待された。

2. 研究の目的

本研究においては、骨材や空隙等の位置に関する空間構造の情報に着目し、空間統計学の基本である点過程や粒子過程のモデルを適用して、コンクリートの特徴的な内部構造を定量的な評価指標で表すことを目的とする。特に、コンクリートの診断や調査においては、汎用的なスキャナーやデジタルカメラレベルから電子顕微鏡レベルまで、様々な観察レベルの画像が取得されることを考慮し、それぞれの観察レベルにおいて有意な特徴量が何であるかを明らかにし、粒子過程および点過程統計理論を用いてそれらを統一的に評価するシステムを開発することに重点をおく。さらに、そのようにして取得されたコンクリート材料の空間統計量や空間構造の特徴と、コンクリートの強度発現および耐久性との対応を明らかにし、空間統計学を背景とするコンクリートの画像診断法の構築のための基礎となる情報を提示することを目的とする。

3. 研究の方法

マクロ、メゾ、ミクロの各観察レベルに対応するものとして、一般的なスキャナーおよびデジタルカメラ、光学顕微鏡(実体顕微鏡、蛍光顕微鏡)、走査型電子顕微鏡のそれぞれを使用して、各観察レベルの画像を取得した。それらの画像に対して、グレースケール情報や色情報などを用いて二値化を行い、観察対象とする構成相(毛細管空隙、未水和セメント粒子、水酸化カルシウム、反応生成物固体相、骨材、マトリックスなど)を抽出した。その抽出された構成相の二次元画像に対して、一次のステレオロジーパラメーターである面積率を評価することに加えて、空間統計学の概念を導入して、粒子過程もしくは点過

程としての空間統計量を求めた。主として求めた統計量は以下のとおりである。

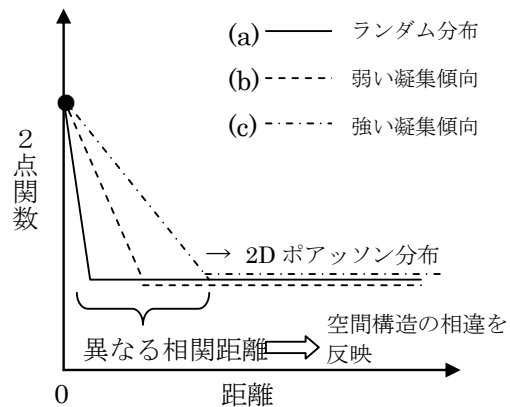


図-1 2点相関関数の相違

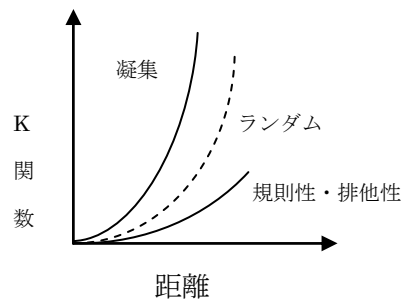


図-2 K関数による評価

- ① 2点相関関数
- ② 2点間経路相関関数(パス関数)
- ③ 最近傍距離関数
- ④ 接触分布関数
- ⑤ K関数
- ⑥ ペア相関関数
- ⑦ マーク付相関関数

図-1 および図-2 にそれぞれ、粒子過程および点過程の代表的な二次のステレオロジー関数分布とその分布から得られる情報を模式的に示す。これらの関数を、各観察レベルの画像中の構成相について求め、各構成相の空間内分布の特徴を、距離を変数とする関数分布によって定量的に表した。また、それぞれの空間統計量(空間分布に関する関数)には、その関数分布を代表し、巨視的な物性と対応するとされる様々なパラメーター(相関距離、一次モーメントなど)が定義されており、それらのパラメーターの評価も併せて行った。

マクロな物性として、セメントペーストおよびコンクリートの強度、弾性係数および電気伝導率を求め、配合や材齢および養生条件などの変化にともなう関数分布およびその

分布から求められたパラメーターの変化との対応を明らかにした。さらにそれらの対応を物性発現メカニズムの観点から考察し、画像情報として得られた構成相の空間分布の相関性の有用性について論じた。また、実コンクリート構造物の診断業務において要望の多いコンクリートの配合推定に関して、画像情報からこれを推定する方法を提案しその適用性を検討した。

4. 研究成果

(1) 巨視的なレベルの画像情報から

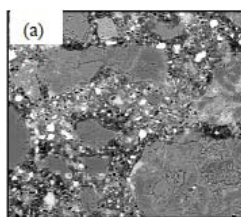
骨材の存在による組織への不均質性の導入を空間統計量により評価し、電気伝導特性との相関性を検討した。図-3にモルタルマトリックス中に観察された多孔質領域（ポーラスパッチ）の例を示す。得られた主な結果は以下の通りである。

- ① 骨材周囲の遷移帯が物質移動経路に及ぼす影響は明確ではなく、ペーストマトリックスの屈曲性の影響も認められない。よって、物質移動はバルクセメントペースト相自身の微視的な特性に強く影響を受ける。
- ② 骨材の混入により、マトリックス中に非常に多孔質な領域（ポーラスパッチ）が形成され、これはITZとは異なる特徴を持つ。また、この領域は物質移動特性に影響を及ぼすと考えられる。
- ③ 骨材の使用により導入されるポーラスパッチは、その一方で、骨材の存在により連結することが妨げられている。骨材によるポーラスパッチの分布の制限が、電気伝導率の著しい変化を妨げる。

(2) 中間レベルの画像情報から

実体顕微鏡および蛍光顕微鏡を使用し、細骨材粒子の分布の特徴と断面情報からの粒度分布の推定を行った。また、自己収縮抑制のための内部養生法に用いられる超吸水性ポリマー粒子（Super Absorbent Polymer: SAP、膨潤後の直径最大 500 μm 程度）のセメントマトリックス内での分布を空間統計量により評価し、巨視的な自己収縮抑制効果との対応に関する検討を行った。得られた主な結果は以下の通りである。

(a)



(b)

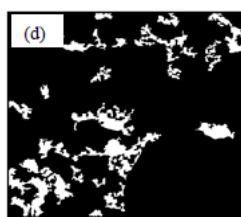


図-3 ポーラスパッチの画像処理による抽出：(a) BEI (b) ポーラスパッチの二値画像

- ① 二次のステレオロジー関数により、モルタル中の細骨材粒子の分布に関する RVE (Representative Volume Element) 寸法が示された。また、エッジ抽出法を用いれば、骨材は適切に抽出され、その二次元画像から、骨材の三次元粒度分布も推定可能である。
- ② 確率に基づいて、二次元画像から細骨材と粗骨材を区分する方法を示した。
- ③ SAPの空間分布に関する特徴的な距離と自己収縮特性の対応から、水分移動距離（SAPの影響範囲）は高々200 μm 程度であると考えられる。
- ④ 自己乾燥を補償する量として必要SAP量を配合設計した場合、粒子間隔は水分到達可能距離（影響範囲）よりも広く、SAPにより保護されない領域が存在する。
- ⑤ SAPの空間分布特性が同様でも、自己収縮抑制効果には相違を生じる。粒径の大きなSAP粒子を使用した方が自己収縮抑制効果は大きくなる傾向が認められた。このことより、SAP粒子の吸水能（内部養生効果）が粒子寸法に依存することが示唆された。

(3) 微視的なレベルの画像情報から

電子顕微鏡画像（反射電子像：BEI）の画像解析を主たる研究手段として、水和反応およびポゾラン反応の進行にともなう組織形成過程を空間統計量の変化として評価した。また、その空間統計量と電気伝導に関する考察を行い、以下のような結果を得た。

- ① セメントの水和反応および微視的構造形成過程の汎用的なシミュレーションツールである CEMHYD3D が、画像情報と同じ空間構造を再現することは理論上不可能であることを指摘した。したがって、シミュレーション結果が実際に観察された電子顕微鏡像の特徴を反映するという考え方は正しくなく、このシミュレーションツール CEMHYD3D は、構造の再現ではなく別の目的で使用されるべきである。
- ② 点過程統計量はセメントの水和反応過程の特徴を理解するのに有効な手段であり、水セメント比の相違により毛細管空隙空間点の分布構造の変化の傾向が異なることが示された。
- ③ 粗大毛細管空隙は物質の連続した移動経路になりうる。しかし、水セメント比が著しく低下した場合は、物質移動特性を粗大毛細管空隙の空間構造だけで理解することはできない。
- ④ 分解能以下の毛細管空隙構造も物質透過性に深く関与するが、電気伝導率と粗大毛細管空隙の特徴との対応から、直接観察できない微細毛細管空隙の連続性

も、空隙率の増加関数であることが示された。

- ⑤ 鉱物混和材の種類による電気伝導率の変化を、毛細管空隙の空間構造の特徴から説明することが可能である。また、微細毛細管空隙の連続性が混和材の種類により異なること、および普通セメント系よりも連続性が低くなることが示唆され、このことが混和材系における耐久性改善に寄与する。
- ⑥ シリカフェームを混入した系において、ポズラン反応の進行にともない水酸化カルシウム粒子の点過程に凝集傾向が現れた。このことは、水酸化カルシウムの空間構造がランダムな間引き過程として変化するのではなく、選択的な変化をともなう過程であることを示す。
- ⑦ 選択的間引き過程と分割過程を併用することにより、材齢の進行にともなうセメントペースト中の毛細管空隙構造を点過程として再現することが可能である。シミュレーションと実組織の点パターンの比較を図-4に示す。
- ⑧ 点過程統計量を用いることでポズラン反応や水酸化カルシウムの生成と消失を定量的に評価しうる可能性が見いだされ、電気伝導性の低下を点過程からとらえることの可能性を確認できた。
- ⑨ 反射電子像中において、水酸化カルシウム相のグレーレベルヒストグラムのピーク位置の理論値からのずれに着目し、このずれを微細な毛細管空隙の存在によるものと仮定した。このずれの量と Powers のモデルと組み合わせることに

よって水セメント比を推定する方法を示した。また、この方法により推定したセメントペーストの水セメント比は、実際の配合上の値とよく一致した。

(4) 実コンクリート構造物から採取したコア供試体の性能診断に向けて

- ① 実コンクリートコアにおける中性化の進行にともなう組織変化を、反射電子像の画像解析により定量的に評価することが可能である。粗大な毛細管空隙径の範囲においても空隙構造は変化し、特に、粗大な毛細管空隙の中でも径の小さい側の空隙構造が変化し、このことは従来の水銀圧入法で確認された結果とも一致する。
- ② 未水和セメントが比較的多量に存在するような材齢初期に生じた損傷は、再養生により治癒し、電気伝導度は回復する。しかし、力学的特性の回復は望めない。また、回復が認められる場合において、治癒しうるひび割れの残存セメント粒子からの距離は高々 $15\mu\text{m}$ 程度と考えられる。
- ③ 材齢数 10 年を経た実コンクリート構造の表層部から採取したコア供試体の組織は非常に乱れている。ひび割れの発生以外に、成分溶出や締固め不足が原因と考えられる大きな空隙が存在している。また、水セメント比推定の基本となる水酸化カルシウムも表層部ではほとんど観察されず、グレーレベルのシフト量を求めることはできない。
- ④ コンクリートの維持管理手法の中に空間統計学に裏付けられた画像解析法を導入するためには、代表領域を考え直す必要性があり、そのためには低倍率の反射電子像の利用について検討する必要がある。

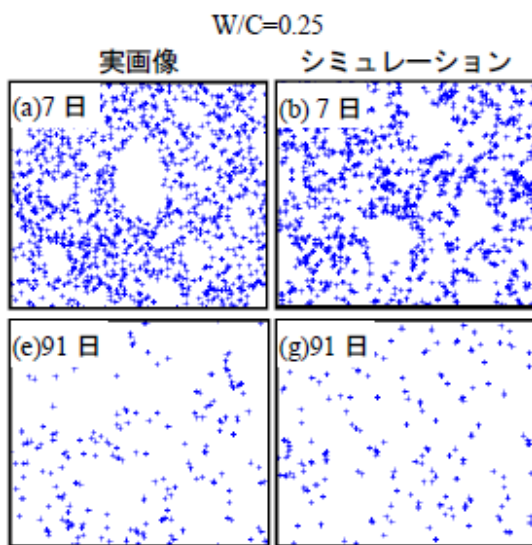


図-4 実画像中の毛細管空隙重心点とシミュレーションの点パターンの比較 (W/C=0.25 普通セメントペースト)

(5) 総括

マルチスケールにて取得された画像に対して空間統計量を求める手法を確立した。粒子過程、点過程いずれを仮定しても、得られた空間統計量はコンクリートやセメントペーストの巨視的な物性、特に耐久性に関連付けられる物質透過性との間に相関性を見出すことができた。また、相関性を考慮することにより、実際に画像としては観察できない分解能以下の空隙構造に関しても考察が可能であり、混和材混入系の耐久性改善効果を経路の連続性の程度から説明することが可能であった。これより、本研究にて開発した画像解析法は、組織解明に関してより詳しい有用な情報を与えるもので、コンクリートの性能評価や材料設計に役立つ手法であることが示されたと考えている。

その一方において、実コンクリート構造物から採取したコア供試体のように、著しい劣化を生じている場合や、施工に起因する不均質性を有する場合は、これまでの組織形成過程を対象としてきた画像解析法を適用することは困難である。この点に関しては今後の検討課題とするが、低倍率の画像でも有用な情報を引き出しうることは確認できた。よって実務への還元を念頭においた今後の研究展開の一つとして、低倍率画像の積極的な利用を考えるべきである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

- ① 石田聡史, 五十嵐心一, 小池祐輝: 若材齢からの中性化の進行がコンクリートの物性に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No. 65, pp. 282-289, 2012 (査読有)
- 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 (査読有)
- ③ 石田聡史, 五十嵐心一: 消石灰モルタルとセメントモルタルの中性化にともなう組織変化の特徴, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 623-628, 2011 (査読有)
- ④ 小池祐輝, 五十嵐心一: 混和材の混入が水酸化カルシウムの空間分布に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 581-586, 2011 (査読有)
- ⑤ 柴山舞, 五十嵐心一: モルタル中の不均質な多孔質領域が電気伝導率に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 83-88, 2011 (査読有)
- ⑥ Giang Hoang Dang, 五十嵐心一: グレーレベルのシフト量に着目した硬化セメントペーストの水セメント比の推定, セメント・コンクリート論文集, No. 64, pp. 211-218, 2011 (査読有)
- ⑦ 小池祐輝, 五十嵐心一: 点過程シミュレーションによる粗大毛細管空隙空間構造の再現, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 563-568, 2010 (査読有)
- ⑧ 内藤大輔, 五十嵐心一, 柴山舞, 大地正紘: 鉱物質混和材の混入による硬化体組織形成過程の変化がペーストの電気伝導特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 149-154, 2010 (査読有)

- ⑨ 柴山舞, 五十嵐心一, Dang Giang Hoang: モルタル中に形成される不均質な多孔質領域の特徴, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 113-118, 2010 (査読有)
- ⑩ 内藤大輔, 五十嵐心一, 柴山舞: シリカフェーム混入セメントペーストにおける電気伝導性と粗大毛細管空隙構造の関係, セメント・コンクリート論文集, No. 63, pp. 370-377, 2010 (査読有)
- ⑪ 荒金延明, 五十嵐心一, 小池祐輝: 空間分布特性から見た超吸水性ポリマーの内部養生効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 449-454, 2010 (査読有)
- ⑫ Igarashi, S., Chen, W., and Brouwers, H. J. H.: Comparison of observed and simulated cement microstructure using spatial correlation functions, Cement and Concrete Composites, Vol. 31, No. 9, pp. 637-646, 2009 (査読有)
- ⑬ 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. 31, No. 1, pp. 901-906, 2009 (査読有)
- ⑭ Giang Hoang Dang, 五十嵐心一, 内藤大輔: コンクリート画像からの骨材相の抽出と粒度分布の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 2065-2070, 2009 (査読有)
- ⑮ 小池祐輝, 五十嵐心一, Giang Hoang Dang: 点過程統計量による粗大毛細管空隙空間構造の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 721-726, 2009 (査読有)
- ⑯ 柴山舞, 五十嵐心一, 内藤大輔: 骨材の空間構造の変化がモルタルの電気伝導率に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 91-96, 2009 (査読有)

以上の論文のうち、下記の論文に対して表彰を受けた。

- 論文番号③, ⑤: 第 33 回コンクリート工学講演会年次論文奨励賞 (2011. 7)
論文番号⑪: 第 32 回コンクリート工学講演会年次論文奨励賞 (2010. 7)
論文番号⑬, ⑭, ⑮: 第 31 回コンクリート工学講演会年次論文奨励賞 (2009. 7)

[学会発表] (計 30 件)

- ① 横田光一郎, 五十嵐心一: 超吸水性ポリマーの内部養生効果に関する基礎研究, 平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会, 2012 年 3 月 8 日, 信州大学 (長野県)
- ② 桑原寛司, 五十嵐心一: 超吸水性ポリマ

- 一による内部養生がセメントペーストの中性化に及ぼす影響, 平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会, 2012 年 3 月 8 日, 信州大学 (長野県)
- ③ 石田聡史, 五十嵐心一: 若材齢からの中性化の進行が微細組織の形成に及ぼす影響, 平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会, 2012 年 3 月 8 日, 信州大学 (長野県)
- ④ 渡辺晋吾, 五十嵐心一: けい酸塩系表面含浸材によるセメントペーストの組織変化に関する研究, 平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会, 2012 年 3 月 8 日, 信州大学 (長野県)
- ⑤ 石田聡史, 五十嵐心一: セメントおよび消石灰ペーストの中性化にともなう組織変化に関する基礎的研究, 土木学会平成 23 年度全国大会 (四国) 第 66 回年次学術講演会, 2011 年 9 月 7 日, 愛媛大学 (愛媛県)
- ⑥ 石田聡史, 五十嵐心一: 自己治癒を目的とした中性化促進養生がコンクリートの物性に及ぼす影響, セメント系材料の自己治癒に関するシンポジウム, 2011 年 6 月 9 日, 東京大学生産技術研究所 (東京都)
- ⑦ Hoang, D.G., Igarashi, S.: Determination of water-cement ratio of hardened cement paste based on the estimation of under-pixel porosity for constituent phases identified BY SEM-BSE image analysis, 2nd International Conference on Durability of Concrete Structures ICDCS2010, 2010.11.25, (北海道)
- ⑧ Igarashi, S. and Koike, Y.: EVALUATION OF CAPILLARY PORE STRUCTURES IN CEMENT PASTES USING SPATIAL POINT PROCESS STATISTICS, International RILEM Conference on Material Science (MatSci), 2010.9.6, Aachen (Germany)
- ⑨ 小池祐輝, 五十嵐心一: 等空隙量下での粗大毛細管空隙空間構造の相違と強度発現の関係, 土木学会平成 22 年度全国大会 (北海道) 第 65 回年次学術講演会, 2010 年 9 月 3 日, 北海道大学 (北海道)
- ⑩ 柴山舞, 五十嵐心一: モルタル内部の不均質な多孔質領域の形成に関する一考察, 土木学会平成 22 年度全国大会 (北海道) 第 65 回年次学術講演会, 2010 年 9 月 3 日, 北海道大学 (北海道)
- ⑪ Igarashi, S., Aragane, N. and Koike, Y.: EFFECTS OF SPATIAL STRUCTURE OF SUPERABSORBENT POLYMER PARTICLES ON AUTOGENOUS SHRINKAGE BEHAVIOR OF CEMENT PASTE, International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete, 2010.8.16, Lyngby (Denmark)
- ⑫ 柴山舞, 五十嵐心一: 不均質な空隙空間構造が電気伝導率に及ぼす影響, 平成 22 年度土木学会中部支部研究発表会, 2011 年 3 月 4 日, 中部大学 (愛知県)
- ⑬ 五十嵐心一: セメントペーストの反射電子像の分解能が語るシナリオ, 第 64 回セメント技術大会, 2010 年 5 月 27 日, ホテルメトロポリタン (東京都)
- ⑭ Igarashi, S. and Yoneyama, Y.: Quantitative Evaluation of Spatial Microstructure in Cement Pastes by Second-order Stereology, Concrete Life' 09, International RILEM Workshop on Concrete Durability and Service Life Planning, 2009.9.8, Haifa (Israel)
- ⑮ Dang Giang Hoang, 五十嵐心一: 画像解析による骨材の粒度分布の推定に関する基礎研究, 土木学会平成 21 年度全国大会 (九州) 第 64 回年次学術講演会, 2009 年 9 月 4 日, 福岡大学 (福岡県)
- ⑯ 内藤大輔, 五十嵐心一, 柴山舞: 高温養生によるセメントペーストの電気伝導特性の変化と粗大毛細管空隙空間構造の対応, 土木学会平成 21 年度全国大会 (九州) 第 64 回年次学術講演会, 2009 年 9 月 4 日, 福岡大学 (福岡県)
- ⑰ 柴山舞, 五十嵐心一, 内藤大輔: 骨材の混入によるセメントペースト相の空間構造の変化の定量評価, 土木学会平成 21 年度全国大会 (九州) 第 64 回年次学術講演会, 2009 年 9 月 3 日, 福岡大学 (福岡県)
- ⑱ 小池祐輝, 五十嵐心一: 水和反応にともなう残存未水和セメント粒子の点過程統計量の変化, 土木学会平成 21 年度全国大会 (九州) 第 64 回年次学術講演会, 2009 年 9 月 4 日, 福岡大学 (福岡県)

なお, 下記の学会講演に対して表彰を受けた.

論文⑩に関連した講演: 2009 年第 63 回セメント技術大会優秀講演賞 (講演者: 内藤大輔)
講演⑫: 2011 年平成 22 年度土木学会中部支部優秀研究発表賞 (講演者: 柴山舞)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

五十嵐 心一 (IGARASHI SHIN-ICHI)
金沢大学・環境デザイン学系・教授
研究者番号: 50168100