

Comparison of air void parameters in concrete evaluated by spatial point process and linear traverse methods

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-01-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00056514

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博 士 論 文

点過程法とリニアトラバース法によって
求めたコンクリートの気泡特性値の
比較に関する研究

金沢大学大学院

自然科学研究科 環境デザイン学専攻

学籍番号 1824052009

氏名 室谷 卓実

主任指導教員名 五十嵐 心一教授

提出年月 2019年 6月

点過程法とリニアトラバース法によって求めたコンクリートの 気泡特性値の比較に関する研究

第1章 序論

1.1 概説	2
1.2 論文の構成	8

第2章 空間統計量とシミュレーション概説

2.1 序論	12
2.2 点過程統計量	15
2.2.1 概要	15
2.2.2 点密度(λ)	16
2.2.3 K関数およびL関数	16
2.2.4 最近傍距離分布関数(G関数)	18
2.2.5 メディアン距離	20
2.2.6 接触分布関数(F関数)	21
2.2.7 最近傍距離分布関数と接触分布関数の関係	22
2.2.8 気泡間隔特性値	23
2.3 確率統計における区間推定とモンテカルロ・シミュレーション	23
2.3.1 仮説検定とシミュレーションによる区間推定	23
2.3.2 点過程統計量における偏差の有意性判定	26
2.3.3 モンテカルロ・シミュレーションによる空間分布の再現判定	27
2.3.4 特定の領域のみへのモンテカルロ・シミュレーション	28

第3章 汎用ソフトウェアの適用によるコンクリート中の 気泡分布評価と再現シミュレーション

3.1	序論	30
3.2	使用材料	32
3.3	供試体の配合および作製	32
3.3.1	セメントペースト供試体の作製	32
3.3.2	モルタル供試体の作製	34
3.3.3	コンクリート供試体の作製	35
3.4	画像取得および画像解析手順	36
3.4.1	スキャナーによる画像取得	36
3.4.2	セメントペーストの画像解析手順	37
3.4.3	モルタルおよびコンクリートの画像解析手順 (RGB 情報による解析)	38
3.5	統計解析ソフト「R」による点過程統計量の算出	39
3.6	気泡間隔係数の測定	40
3.7	結果および考察	41
3.7.1	コンクリート中の気泡の空間分布の再現	41
3.7.2	気泡間隔特性値の有用性評価	44
3.8	結論	48

第4章 観察倍率の異なるコンクリート断面画像中の気泡分布特性の比較

4.1	序論	52
4.2	使用材料, 供試体の配合および作製	55
4.3	リニアトラバース法にて求められる平均弦長からの点密度の計算	56
4.4	結果および考察	57
4.4.1	リニアトラバース法が仮定する気泡空間構造	57
4.4.2	点過程としての気泡の空間分布	59
4.4.3	リニアトラバース法にて等倍率を想定したときの気泡数と気泡間隔係数	61
4.4.4	リニアトラバース法と点過程としての計測にて測定される 気泡分布のランダム性の対応	63

4.5 結論	65
--------	----

第5章 リニアトラバース法と点過程法を同一画像情報に適用して評価した 気泡間距離特性値の比較

5.1 序論	68
5.2 使用材料, 供試体の配合および作製	69
5.3 画像取得および画像解析手順	70
5.3.1 ASTM リニアトラバース法による計測	70
5.3.2 点過程統計量の算出	71
5.4 結果および考察	72
5.4.1 気泡量の相違	72
5.4.2 気泡間隔係数と気泡間隔特性値の比較	72
5.4.3 弦数密度と点密度の対応	74
5.4.4 低倍率画像情報との対応	76
5.5 結論	77

第6章 異なる計測方法による気泡特性値の相違と変動

6.1 序論	80
6.2 使用材料, 供試体の配合および作製	83
6.3 画像取得および画像解析手順	83
6.4 代表体積要素の計算	83
6.5 結果および考察	84
6.5.1 リニアトラバース法の検出気泡数の増加にともなう特性値の変化	84
6.5.2 面積法の解析対象領域面積の変化にともなう気泡特性値の変化	86
6.6 結論	88

第 7 章 結論

謝辭 99

参考文献 101

第 1 章

第 1 章

序 論

1.1 概説

コンクリートの構成相として骨材とセメントペーストおよび気泡が挙げられる。このうち気泡は体積率としては他に比べてかなり小さいが、コンクリートのフレッシュ特性、強度や物質透過性および凍結融解抵抗性など様々な物性に関わる重要な構成相である。よって、この構造を評価することはコンクリートの物性を理解するうえで重大な意味を持つ。特に耐凍害性の評価においては、空気量、気泡間隔係数¹⁾などの気泡パラメータを測定することで凍害による劣化の可能性を判定しており、気泡と凍害の結びつきは大きい。中でも気泡間隔係数は凍結融解抵抗性と非常に深い関係のあることが実験的に確認されており、気泡間隔係数が 250 μm 以下になると耐凍害性が向上することがわかっている。そのため、耐凍害性評価において、気泡間隔係数を測定することが重要とされている。

コンクリート中の気泡組織評価は ASTM C457²⁾に規定される目視による顕微鏡観察によって行われてきた。ASTM C457に規定される気泡組織評価方法には、リニアトラバース法と修正ポイントカウント法の2つがある(図 1-1)。リニアトラバース法は着目相の体積率比とその相を横切るランダムな線(図中赤線)の長さの比率(線比率)とが等しいという考え方に基づく測定方法であり、線解析とも呼ばれる(図 1-1(a))。一方、修正ポイントカウント法はランダムにばらまいた点(図中赤点)が着目相上に載る数の比率と、その相の体積比率が等しいという点解析の考え方に基づいている(図 1-1(b))。しかし、高い精度の解析結果を得るためには多くの気泡数の計測を要し、また目視観察であったため、従来の

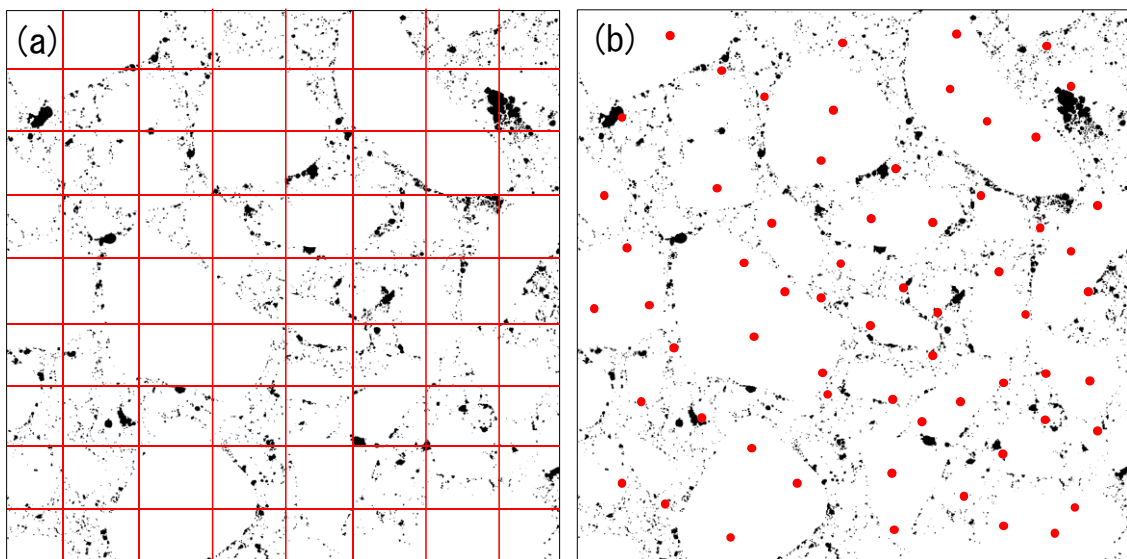
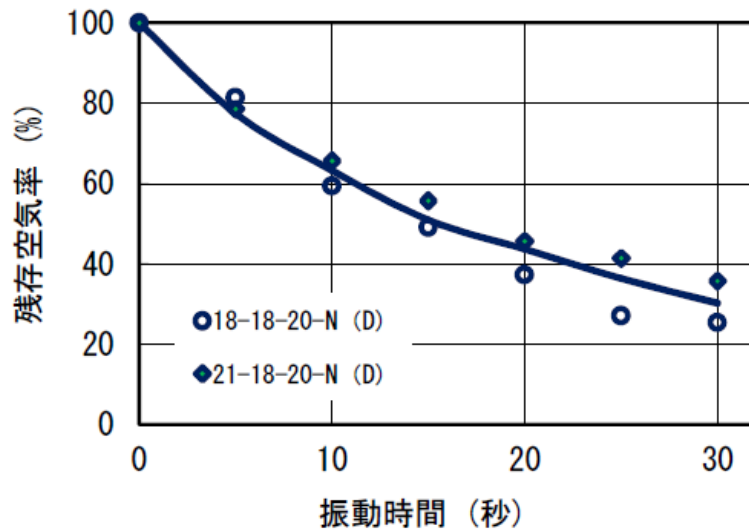


図 1-1 気泡観察手法の模式図

(a) : リニアトラバース法, (b) : 修正ポイントカウント法

図 1-2 振動による空気量の減少⁴⁾

測定方法では測定者の負担が非常に大きかった。一方で、気泡パラメータの一つである空気量はフレッシュ時にエアメーターを用いて簡便に測定することができるうえに、気泡間隔係数と良好な関係があることがわかっている³⁾。そのため、気泡観察を行わずに、簡便に測定できるフレッシュ時の空気量を測定することで、コンクリートの耐凍害性のおおよその判定を行うのが普通である。しかし、コンクリート中の空気は打ち込みから締固めの間に損失することもあり（図 1-2）⁴⁾ ⁵⁾、フレッシュ時の空気量だけで耐凍害性を評価することが必ずしも適切とは言えない場合もあることが指摘されている⁵⁾ ⁶⁾。そのため、耐凍害性の評価において、硬化後のコンクリート中の気泡観察は依然として重要な評価手段であることに変わりなく、測定者の労力の軽減が求められていた。

近年では、コンピュータの技術が向上したことにより、画像解析法を用いた評価が行われるようになってきている。これを気泡観察に適用すれば、肉眼による顕微鏡観察に要した労力が著しく軽減することが可能となる。気泡組織評価方法における画像解析法の適用に関しては、小長井ら⁷⁾がその理論的根拠を明確にした。さらに、従来の点解析（修正ポイントカウント法）や線解析（リニアトラバース法）の代わりとなる方法として、面積解析の原理を応用した新しい画像解析法（面積解析法）を提案し、その基礎理論を体系化した。これにより、画像解析法による気泡組織評価が明確となった。一方、画像解析においては対象を適切に抽出して 2 値化することが前提であることから、画像内の気泡部分の識別抽出を行う手法についての検討も行われてきた^{8)~10)}。また、太田ら¹¹⁾は画像解析法を用いた気泡組織の測定を自動で行うことができる自動画像解析システムを開発し（図 1-3）、従来法と比べて大幅な省力化および測定精度の向上を可能とした（図 1-4(a)）。さらに、面積解析の理論に基づいて気泡パラメータの計算が可能であると報告している（図 1-4(b)）。このよ

第1章

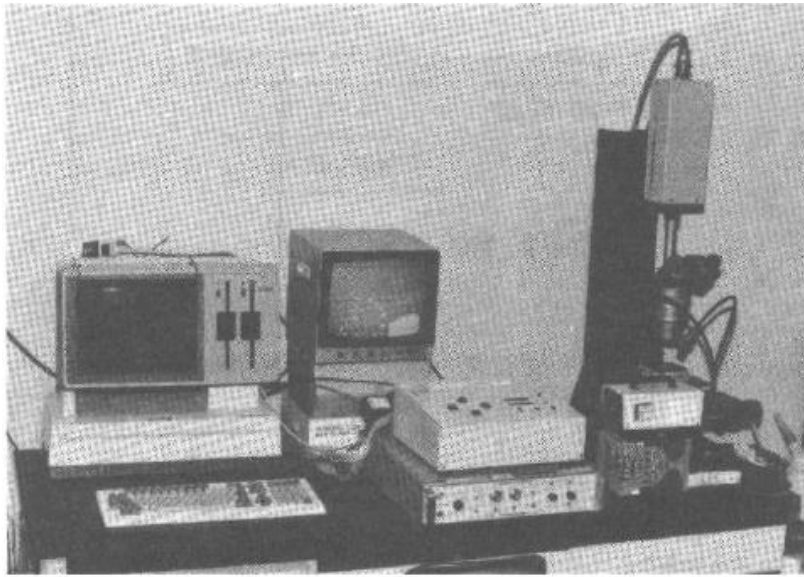


図 1-3 自動画像解析装置¹¹⁾

(a)		従来法 ASTM C-457	画像解析法 100 視野	(b)	
1 試料あたりの 測定時間		3~4 時間 *1 4~6 時間 *2	0.5 時間		
変動 係数	空気量 (フルン)	25%	16%		
	空気量 (A E)	19%	5%		

	修正ポイントカウント法		画像解析法	
	空気量 (%)	\bar{L} (μ)	空気量 (%)	\bar{L} (μ)
プレーン	1.5	280	1.2	254
AE	3.5	170	2.2	132

*1 : ASTM リニヤトラバース法による
*2 : ASTM 修正ポイントカウント法による

図 1-4 従来法と画像解析法の比較¹¹⁾

(a) : 測定時間・精度の比較, (b) : 気泡パラメータの比較

うに、画像解析法の適用によりコンクリート中の気泡観察に要する測定者の労力は著しく改善されている。しかし、これらの測定方法の改善のほとんどは ASTM C457 の手順の改善であり、測定手順においては規定された画像の取得とそれを自動的に処理する高価な機器やソフトウェアが必要である。これに対して、近年では高画質なデジタルカメラや高解像度のフラットベッドスキャナが安価で入手できるようになり、これらを用いてより省力化された手順にて従来と同様の評価パラメータを得ようとする研究が行われるようになってきている^{12), 13)}。例えば、Zalocha ら¹³⁾はマイクロ스코プによって取得した低倍率画像やフラットベッドスキャナによって取得した等倍率画像を用いて気泡パラメータの測定を行い、いずれの画像取得機器を用いても気泡パラメータの値に大きな差はないと報告している。

第 1 章

表 1-1 マイクロスコープとスキャナーにて得られた気泡パラメータの差¹³⁾

	\bar{L}	α	A	A ₃₀₀
Maximum difference	0.02	5	1.2	-0.02
Minimum difference	-0.04	-2	-0.97	-1.41
Average difference	-0.0008	1.2	-0.03	-0.64
Correlation coefficient	0.914	0.975	0.971	0.847

表 1-1 にマイクロスコープとスキャナーにて得られた気泡パラメータの差を示す。気泡間隔係数 \bar{L} における測定法による差は最大でも 0.02mm であり，両測定機器による差は大きくないことがわかる。

以上のように，コンピュータ技術の一般化，普及にともないコンクリート中の気泡構造評価は安価で簡便化されつつある。しかし，気泡組織評価が容易になり画像からより高度な情報も取得できるようになったにも関わらず，気泡の粒度分布を無視し実際の空間分布とは異なる分布のパラメータである気泡間隔係数を求める場合が多い。気泡間隔係数は気泡がすべて同一寸法の球で存在し，それが規則的な立方体格子点に配置された状態を仮定している。そして，セメントペーストマトリックス領域の任意の点が最寄りの気泡表面から最も遠い位置にあるときの平均的な距離を表すものであり，実際の空間分布とは異なる。また，近年では，気泡間隔係数が同程度であっても気泡径分布が異なり，特に中庸熟フライアッシュなどの混和材を混入したコンクリートでは，耐久性指数との相関が得られない

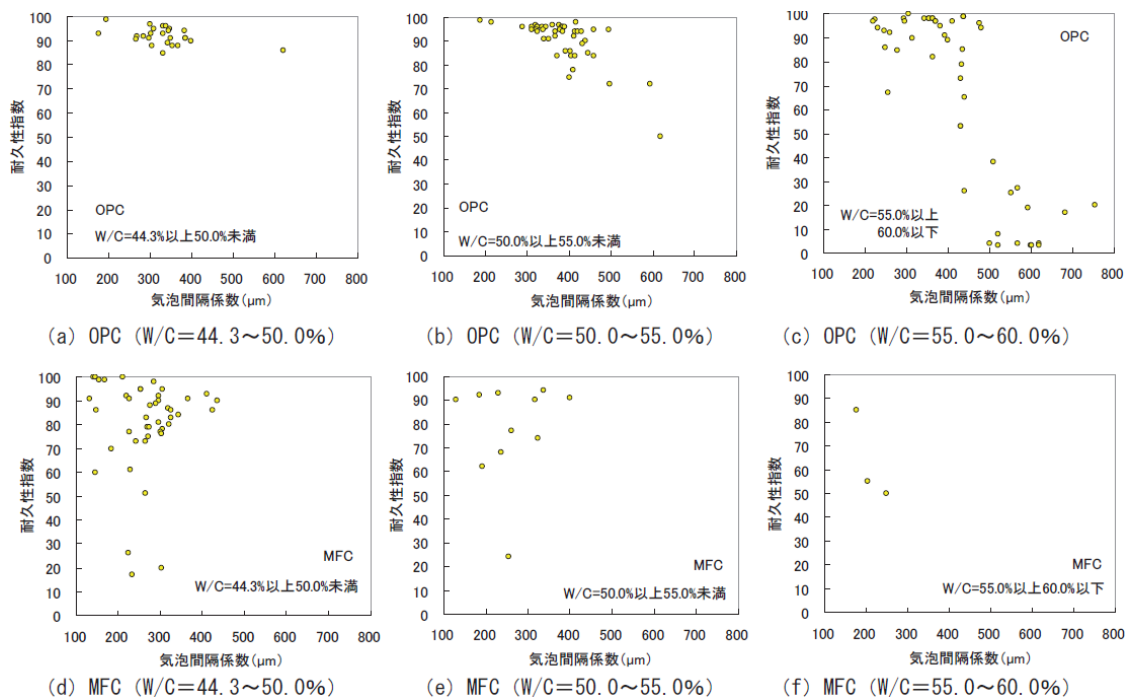


図 1-5 OPC と MFC の気泡間隔係数と耐久性指数の関係¹⁴⁾

第1章

という報告もある¹⁴⁾。図1-5に普通コンクリート（OPC）と中庸熱フライアッシュコンクリート（MFC）の気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す¹⁴⁾。普通コンクリートにおいては気泡間隔係数が大きいほど耐久性指数が小さくなる傾向がみられるが、フライアッシュコンクリートにおいては、気泡間隔係数が300 μm 以下であっても耐久性指数が小さい事例が見られ、両者の相関が見られないことがわかる。さらに、高強度コンクリートにおいて、気泡間隔係数が250 μm 以下で耐凍害性を有すると判断されても、コンクリートの養生環境によっては耐凍害性が著しく低下するという報告もあり¹⁵⁾、気泡間隔係数が必ずしも耐凍害性と対応しない例がある。そのため、硬化までに変動する空気量や仮想分布から得る気泡間隔係数だけではなく、実際のコンクリート中の気泡分布の特徴を評価することは重大な意義を有すると考えられる。近年、空間データの数理モデリングが多くの分野で活発に研究が進められるようになると、これを用いてコンクリート中の気泡の実際の分布をより合理的に適切に評価しようとする研究が進められている。例えばSnyder¹⁶⁾はこれまでに提案されているいくつかの気泡間隔評価式に関して数値解析によりその妥当性を検討している。しかし、この数値解析においては骨材の存在を無視しており、実際のコンクリート中の気泡間の距離との対応は明確ではない。

コンクリート中にて気泡が存在する領域はセメントペーストマトリックス相であり、この相の形状や大きさは当然のことながら骨材量や骨材寸法の影響を受ける。よって、実際のコンクリート中の気泡の空間分布や距離特性値を把握するためには、骨材による存在の制限と空間分布のランダム性の両者を考慮する必要がある。これを比較的簡単に行える手段として点過程の考え方がある。これに従うならば、個々の気泡を点に置き換えることにより気泡の空間分布は点過程となり、分布のランダム性や点間距離を確率論に裏付けられた定量的な値として簡単に求めることができる。しかし、現在までにコンクリート中の気泡に点過程の考え方を適用して、実際のコンクリート中の気泡の空間分布を評価した研究例は少ないようである。その要因の一つとして、点過程統計量の計算が高度であり、計算には独自のプログラム開発が必要となることが挙げられる。しかし、現在ではインターネットに一般公開されており無償で入手できる統計解析ソフト「R」¹⁷⁾に、点過程統計量の計算やグラフ化を行えるパッケージが提供されている¹⁸⁾。これを用いれば誰でも容易に点過程統計量の計算が可能となる。

古東らは早くから点過程の考え方の有用性に着目し、コンクリート中の気泡に点過程理論を適用し、点過程統計量の一つである最近傍距離分布関数から代表値を定義し、その代表値から平均気泡半径を引いた値を気泡間隔特性値と定義して気泡間隔係数との対応を検討している^{19)~21)}。この気泡間隔特性値は実際の気泡分布から気泡間隔に関する代表値を定義しており、気泡間隔係数に代わる耐凍害性評価の指標になる可能性を示唆している。し

表 1-2 ASTM 法と点過程法の計測の対応表

評価法 使用画像	ASTM法		点過程法
	リニアトラバース法の 気泡間隔係数	面積法の 気泡間隔係数	気泡間隔特性値
低倍率画像 (スキャナー画像)		(a)	(b)
高倍率画像 (顕微鏡像)	(c)	(d)	(e)

かし、いずれの特性値もスキャナーで取得した低倍率画像に基づいて計測、提案されており、ASTM C457に規定された条件を満足するような高倍率画像に対する検討はなされていない。表 1-2 に気泡間距離特性の対応に関する検討を整理して示す。古東らは上述のように i) 硬化コンクリートの低倍率気泡画像を用いて、ASTM C457 の一部手順の改良版である面積解析法⁷⁾により求めた気泡間隔係数 \bar{L} と点過程法の気泡間隔特性値 L' の比較 ((a)と(b)の比較)²²⁾、を行っている。しかし、ii) ASTM C457 の手順に従って高倍率観察下にてリニアトラバース法を実施して求めた気泡間隔係数 \bar{L} と、同じコンクリートの低倍率画像を別途取得し、それに点過程理論を適用して求めた気泡間隔特性値 L' の比較 ((c)と(b)の比較)、ASTM C457に規定された倍率で取得した全く同一の顕微鏡像について、リニアトラバース法で求めた気泡間隔係数 \bar{L} と点過程理論を適用して求めた気泡間隔特性値 L' の比較 ((c)と(e)の比較)を行ってはならず、その異同および対応は明らかではない。例えば、ASTM C457の規定では径 10 μm の気泡を同定できるレベルの高倍率画像を要求しており、そのためには 50 倍以上の倍率にて気泡観察を行うことを要求している。そのような画像では気泡数はスキャナー画像に比べて微細な気泡が検出されるため著しく増大する一方で、観察視野は小さく制限される。この場合、視野内の気泡分布は骨材の存在に強く影響されることになり、気泡分布のランダム性はスキャナー画像とは大きく異なることも考えられる。

本研究においては、気泡間隔特性値に関して未実施の比較を行うことを主な目的とする。すなわち、ASTM C457 のリニアトラバース法による気泡間隔係数と、古東らが定義した気泡間隔特性値の対応を、観察倍率が異なる場合、および ASTM C457 の規定を満足する高倍率画像間で比較した場合について、明らかにすることを目的とする。これにより点過程理論を用いて気泡間隔特性値を計測する手法（点過程法と称す）の、ASTM C457に規定された気泡観察方法に代わる耐凍害性評価手法としての妥当性について論ずる。

1.2 論文の構成

本論文は、本章を含めて全7章にて構成される。

第2章「点過程統計量とシミュレーション概説」においては、気泡の空間分布を確率過程とみなし、これを点過程として評価する際に用いる各種ステレオロジー量、統計量の考え方および計算方法について述べる。さらに、本研究で用いた偏差の有意性判定の概要について記述し、シミュレーションを用いた有意性判定手法についても述べる。

第3章「汎用ソフトウェアの適用によるコンクリート中の気泡分布評価と再現シミュレーション」においては、汎用統計解析ソフトウェア「R」を用いてコンクリート中の気泡の空間分布評価および再現を試みる。これにより、一般に入手できるソフトウェアを用いて、安価で信頼性の高い気泡構造の解析が簡単に行えることを示す。さらに、耐凍害性の判断に関して多くの実績がある気泡間隔係数も、「R」にて提供されるパッケージを用いたシミュレーションによって簡単に推定できることを示す。これらにより、汎用ソフトウェアの導入が気泡系の評価の労力を著しく低減し、点過程法が実務へも十分適用可能な方法であるとして提案する。

第4章「観察倍率の異なるコンクリート断面画像中の気泡分布特性の比較」においては、低倍率画像中の気泡の空間分布や気泡間隔特性値と、ASTM C457の規定に従ってより高倍率にて表面を観察した結果として得られる気泡分布や気泡間隔係数との対応を考察する。つまり、表1-1における(b)と(c)の対応について明らかにする。

第5章「リニアトラバース法と点過程法を同一画像情報に適用して評価した気泡間距離特性値の比較」においては、ASTM C457の規準を満足する品質を持った高精細画像を取得し、これに点過程法を適用して気泡間隔の評価を行う。その評価値と従来の規準に従って求めた気泡間隔係数を比較し、点過程法の気泡間隔評価としての有用性について検討する。つまり、表1-1における(c)と(d)と(e)及び(b)と(e)の対応について明らかにする。

第6章「異なる計測方法による気泡特性値の相違と変動」においては、リニアトラバース法と面積解析法、および点過程法で評価される気泡特性値に関して、計測方法間での相違と対応について検討した。そして、気泡間隔係数に関わる個々の計測値の変動を、標本としての気泡数や体積代表の大きさの観点から考察する。

第1章

第7章「結論」においては、本研究の成果をまとめ、結論を述べている。
上記の各章に対するフロー図を、図1-6に示す。

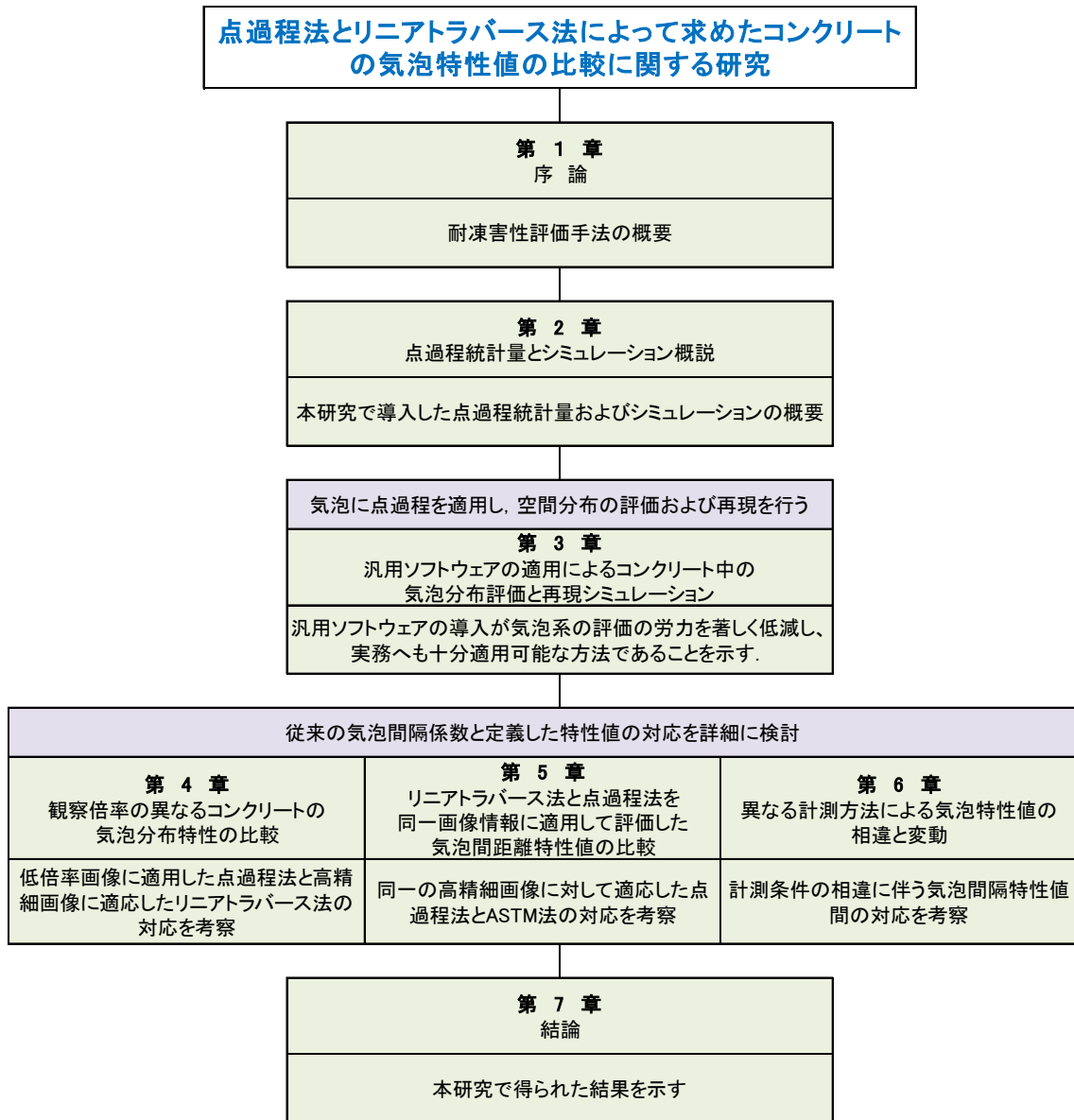


図1-6 本論文のフロー図

第 1 章

第2章

第2章

点過程統計量とシミュレーション概説

2.1 序論

コンクリートはセメント、骨材、空隙（気泡）で構成される材料であり、多くの細孔を含んでいる材料である。コンクリートの強度や耐久性はこの細孔の構造によって変化する。つまり、コンクリートの物性はその微視的構造に影響される。そのため、コンクリートの耐久性を評価するためには、コンクリートの細孔構造を観察し、その特徴とコンクリートの物性との関係を明らかにすることが重要となる。

コンクリートの物性は「量」と「分布」から評価することができる。例えば、コンクリートの強度や耐久性はコンクリートがどのくらい緻密であるかによって変化する。つまり、空隙量（空気量）や未水和セメント粒子の量によって評価することができる。空気量はエアメーターを用いて簡単に計測することができるが、未水和セメント量は空気量のように簡便には計測できず、主に電子顕微鏡による反射電子像を対象とした画像解析によって^{23), 24)}、画像に現れた未水和セメントの量を求める²⁵⁾。このとき、2次元の断面画像から求めた「量」を単純にコンクリート全体の特徴量として評価していいのかという問題がある。換言すると、コンクリート全体の特徴量を断面画像から推定することができるのだろうかということである。単純に考えると2次元断面画像と3次元コンクリート供試体は次元が異なるため、2次元情報から3次元情報を推定することは難しいと思われるが、画像内に現れた特徴から供試体全体における特徴量を推定する手法が確立されており、それは確率論を根拠とするステレオロジー^{26)~28)}の考え方である。ステレオロジーとは、2次元断面に現れた特徴から3次元における特徴量を合理的に推定する学問分野である。特にモデルベースのステレオロジーはコンクリート組織の定量評価に用いられており、Delesseの式（式(2-1)）が基本原理となる。

$$V_V = A_A \quad (2-1)$$

式(2-1)は2次元断面に現れた着目粒子の面積率が3次元空間内の着目粒子の体積率に等しことを表している。これはステレオロジーの基本式であり、着目粒子が等方性、一様、ランダムな条件を満足することを前提としている。Delesseの提案の後、Rosival²⁹⁾およびGlagoley³⁰⁾、Thamson³¹⁾がより簡単に体積率を評価する式を提案し、式(2-2)に示すように面積率 A_A は長さ率 L_L 、もしくは点の割合 P_P に等しいことを示した。

$$V_V = A_A = L_L = P_P \quad (2-2)$$

第2章

ここに、 V_V ：着目粒子の体積率
 A_A ：着目粒子の面積率
 L_L ：着目粒子の長さ率
 P_P ：着目粒子の点の割合

式(2-2)では、2次元断面に走査線を引いたとき、全走査線長さに対する着目粒子を横切った部分の長さの和の比および、観察対象面内に点を配置したときの全点数に対する着目粒子内に載った点数の和の比が、面積率や体積率に等しいことを示している。これらの関係式はコンクリート材料科学の分野において気泡組織評価に用いられているのは前述のとおりであり、それぞれ前述のリニアトラバース法および修正ポイントカウント法として ASTM C457 にその手順が記載されている。

式(2-2)のような体積率や面積率、線分率や点率は1次のステレオロジー量と呼ばれ、その中でも面積率はコンクリートの組織評価で長年用いられてきた。つまり、コンクリート中の気泡の断面画像から得られる気泡の面積率から3次元空間中の気泡の体積率が推定できることになる。この1次のステレオロジー量が前述の「量」による物性評価の際に用いられてきた。一方、1次のステレオロジーでは着目粒子の「量」を評価することはできるが、着目粒子がどのような「分布」をしているかは評価することはできない。図2-1に面積率が同じ粒子の模式図を示す。図2-1(a)のように粒子がランダムに分布している場合や、図2-1(b)のように粒子同士が凝集して分布している場合でも、1次のステレオロジー量である面積率としては、両者は同じであるとみなされ、粒子の分布の違いは1次のステレオロジー量からは判断できない。「分布」による評価はコンクリートの耐凍害性を評価するうえで非常に

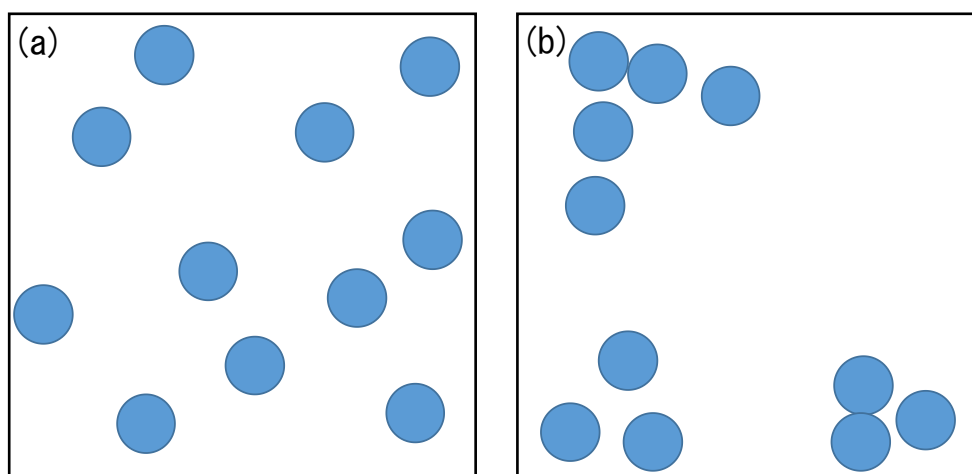


図 2-1 面積率が同じ粒子の模式図

(a)：ランダム分布，(b)：凝集分布

第2章

重要であると考えられる。コンクリートの耐凍害性にはコンクリート中の気泡が関わっており、気泡が適切な間隔で存在していることが重要である。換言すれば、気泡の空間分布がコンクリート耐凍害性評価には重要となる。このように、コンクリートの細孔構造や空間分布を評価するためには画像から得られる特徴量から2次のステレオロジー量を求める必要がある。2次のステレオロジーはある着目する幾何学的特徴がお互いにどれぐらいの距離を離れて存在するとか、着目粒子が全体に均質に分布している、もしくは互いに凝集し合うように分布しているなど、目視で判断できる分布の特徴を数学的に表現、評価できる統計量である。一般には、2次元平面に現れた特徴の相対的な位置関係、分布の評価に用いられ、評価対象が面積を有する場合（粒子過程）と面積を持たない場合（点過程）がある（図2-2）。特に点過程統計量は着目粒子を面積を持たない点とみなすため、確率に裏付けられた定量的な値として着目粒子の分布状態や点間距離などを簡単に評価することができる。

さらに、着目粒子を点とみなして評価することの利点として、シミュレーションによる再現が容易であることが挙げられる。対象領域の1次のステレオロジー量に対応する数の点をランダムに発生させるシミュレーションを行い、実際の着目粒子の分布との比較を行うことによって、評価対象の分布がシミュレーションで再現できる分布であったのか否かを決定できる。シミュレーションによる空間分布再現が可能であれば、例えば気泡においては、気泡間の距離を再現することができ、気泡間隔係数の再現や高い耐凍害性を有する気泡分布パターンの模索など、有用な知見が得られると期待される。

本章では、2次元画像から着目粒子（本研究では気泡、骨材、セメントペーストマトリックス）を抽出したうえで、その粒子の幾何学的特徴や空間構造を定量的に評価するために用いた点過程統計量について説明する。さらに、点過程において適用できる点発生シミュレー

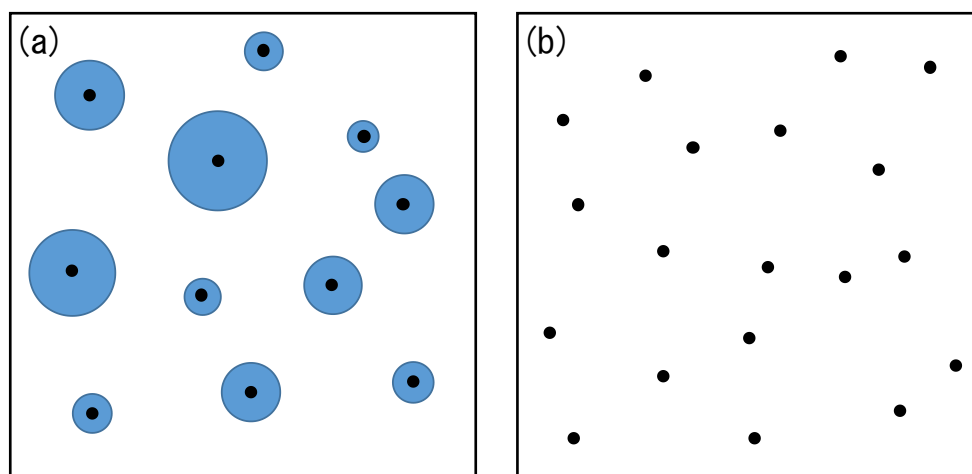


図2-2 粒子過程と点過程の模式図

(a) : 粒子過程, (b) : 点過程

ションについてもその基本手法について説明を加える。

2.2 点過程統計量^{32)~34)}

2.2.1 概要

点過程統計量とは、観察視野 W においてランダムに分散している点過程 X 内の点 x_i に関して、距離を変数としてその分布の特徴を定量化し、点の空間分布特性を評価する2次のステレオロジーに関する統計量である。点過程統計量は、現在多くの分野で用いられている。例えば、地震工学では地震発生データに基づく地震活動の空間分布解析、都市工学ではGPSで得られた交通解析、また、生態学分野では森林の植生分布の解析などが挙げられる。これら点過程の分析では、対象相を点と見なした配置そのものに特性値を持つことが多い。点の配置の分布パターンの代表は、特定の場所に凝集することなく規則性も持たない「ランダム分布」、特定の場所周辺に凝集する「凝集分布」、また、一定間隔ごとに均等の分布をする「規則分布」がある。特に、ランダム分布は、点間同士の関係性で相互作用を持たない特徴がある。点過程統計量で用いられる関数の多くは、点の配置の分布がランダムであるかどうかを点間同士の相互作用や依存性の関係を用いて検証を行っている。図2-3に示すように領域 W 内に点 x_i が分布する状態を考え、これを2次元の点過程 $X = \{x_i : i=1, 2, \dots, n\}$ とする。この点過程に対して以下の特性値および関数を定義する。

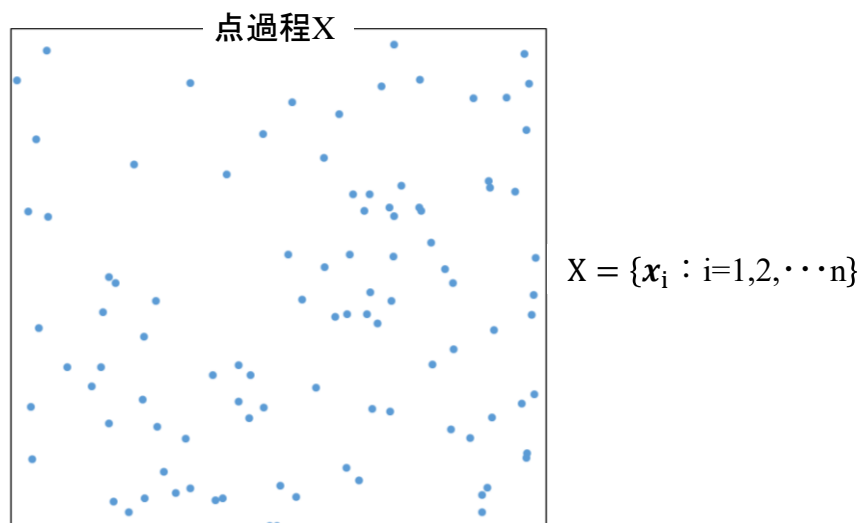


図2-3 点過程の模式図

2.2.2 点密度 (λ)

点過程統計量における基本的なパラメーターとして、単位面積当たりの点の個数を表す点密度 λ_A がある。観察領域 W 内にある点 $(x_i \in X)$ に関して、点の個数 $N(W)$ を領域面積 $A(W)$ で除して求める (式(2-3))。

$$\lambda_A = \frac{N(W)}{A(W)} \quad (2-3)$$

点過程統計量を扱う際、 $A(W)$ が一定であれば、その分布は点個数 $N(W)$ に左右されるため、点密度は総数の比較だけでなく、 $N(W)$ に依存しない正規化された相対的な計算結果を得るためにも使用される。

2.2.3 K 関数および L 関数

K 関数とは、観察視野に分布している点 $x_i \in X$ に関して、距離を変数としてその分布パターンを定量化し、点の分布特性を評価する点過程統計量の関数の 1 つである。任意の点から半径 r の円を描き、その円内に存在する他の点個数の期待値を反映する。点密度 λ_A で正規化されているため、点の個数に関わることなくそのランダム性を判定することができる。K 関数は式(2-4)によって求められる³⁵⁾。

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

$$K(r) = \pi r^2 \quad (\text{完全ランダム分布の時の K 関数})$$

ここに、 $\mathbf{1}()$ は $()$ が真であるときに 1、偽のときは 0 を返す指示関数である。また、 $s(x)$ はエッジ補正の項であり、式(2-5)により与えられる。

$$s(x) = ab - x(2a + 2b - x) / \pi \quad (2-5)$$

$$x = |x_i - x_j|$$

ここに、 a 、 b は観察領域の辺長を表す。

第2章

エッジ補正係数とは、2次元断面に対して点過程を適用する場合、その画像の縁の影響（エッジ効果）を補正するために用いる係数である。また、本関数で用いたエッジ補正係数は Ohser の方法と呼ばれるものである。これは点の位置に関係なく、点の間隔のみで定まる式を使用しているため、厳密な計算方法に比べて容易に算出することができる補正法である。

図 2-4 に主な点の分布パターン例を示す。図 2-4 は観察領域を 1000mm×1000mm とし、その領域内に 100 個の点を各分布パターンに配置した。点の分布はランダム分布（図 2-4(a)）、凝集分布（図 2-4(b)）、規則分布（図 2-4(c)）の大きく 3 つに分けられる。K 関数はこの 3 つの分布パターンを、関数値の完全ランダム分布の値からの偏差として判定することができる。

図 2-5 に図 2-3 の点座標から求めた K 関数を示す。図中の黒破線は、点が完全ランダム分布に相当する K 関数を示し、調べようとしている点の分布パターンがランダムに分布している場合（図 2-5(a)）、その K 関数は完全ランダム分布の時の K 関数とほぼ一致する（図



図 2-5 主な点の分布パターン

(a) ランダム分布, (b) 凝集分布, (c) 規則分布

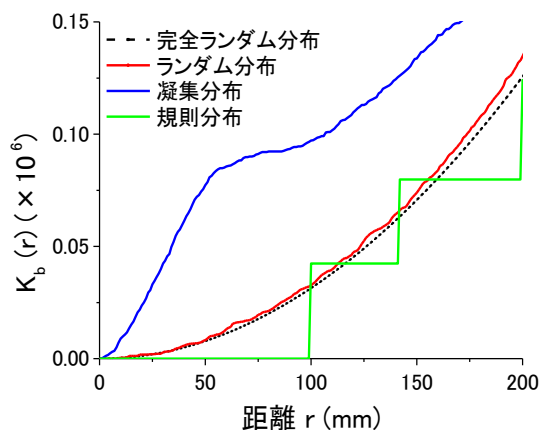


図 2-6 K 関数

第2章

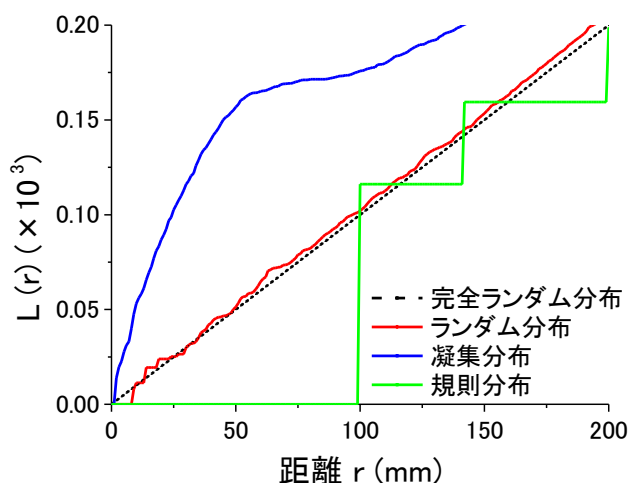


図 2-7 L 関数

2-6(赤線)). 観察視野内に存在する点同士が近接し凝集配置している場合(図 2-5(b))は, K 関数はランダム分布よりも大きな値となる(図 2-6(青線)). 一方, ある程度の間隔を有した規則配置の場合には(図 2-5(c)), 黒破線で示したランダム分布よりも K 関数値は小さくなる(図 2-6(緑線)).

K 関数のグラフを視覚的に理解しやすくするために, 式(2-4)を直線表示へと変換し, 関数値の相違を明確化したものに L 関数がある. L 関数は式(2-6)により与えられる.

$$L(r) = \sqrt{K(r)/\pi} \quad (2-6)$$

$$L(r) = r \quad (\text{完全ランダム分布のときの L 関数})$$

図 2-7 は図 2-5 の点座標から求めた L 関数を示したものである. グラフが示す特徴は K 関数と同様であり, 図中の黒破線はランダム分布の L 関数を示している. また, K 関数と同様に, ランダム分布の場合は黒破線とほぼ一致し(図 2-7(赤線)), 凝集分布を示す場合はランダム分布の上方に位置し(図 2-7(青線)), 規則分布の場合はランダム分布の下方に位置するため(図 2-7(緑線)), 空間分布特性の評価が可能である.

2.2.4 最近傍距離分布関数(G 関数)

最近傍距離分布関数とは, 点過程の点 $x_i \in X$ から距離 r 離れた位置に最近傍点 $x_j (i \neq j)$ を見出す確率であり, これを観察視野内の点個数に対する累積確率で表したものである. 図 2-8 に最近傍距離分布関数の定義のイメージ図を示す.

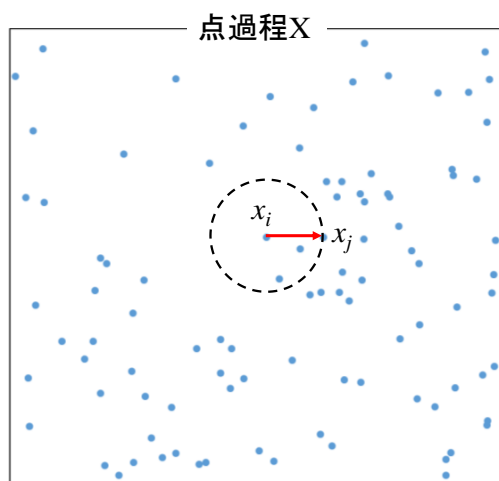


図 2-8 最近傍距離分布関数の定義のイメージ図

全ての点 x_i の座標を基にして、各点ごとの最近傍点までの距離 s_i を計算し、エッジ効果を考慮した Hanisch 法を用いて、最近傍距離分布関数 $G(r)$ を式(2-7)により求めた。

$$G(r) = \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{1}(s_i \leq r) \cdot \mathbf{1}(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^N \mathbf{1}(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)} \quad (2-7)$$

$$G(r) = 1 - \exp(-\lambda_A \pi r^2) \quad (\text{ランダム分布のときの最近傍距離分布関数})$$

ここに、 s_i は最近傍距離、 b_i は各点 x_i から画像縁までの最短距離である。また、 $\mathbf{1}()$ は $()$ が真であるときに1、偽のときは0を返す指示関数である。 $w(s_i)$ はエッジ補正係数であり、前述の s_i を半径とする領域だけ縮退させた観察領域面積の逆数である。観察視野 W の辺長を x , y とすると、式(2-8)により与えられる。

$$w(s_i) = \{(x - 2s_i) \cdot (y - 2s_i)\}^{-1} \quad (2-8)$$

図 2-9 に最近傍距離分布関数から得られる曲線を示す。図中の黒破線は観察視野内に存在する点配置が完全ランダム分布を形成する場合の最近傍距離分布関数値を表す。ランダム分布の場合は黒破線とほぼ一致し (図 2-9(赤線))、完全ランダム分布よりも上側に関数が示された場合は凝集分布となり (図 2-9(青線))、下側に現れた場合は規則分布となる (図 2-9(緑線))。また、関数値 1.0 は確率関数で表される最近傍距離分布関数の収束値 (収束距離) であり、この収束距離以上の距離においては、必ず他点を見つけることができることを示している。ランダム分布のときの関数値との偏差によって分布特性を判断することができるが、分布特性は K 関数および L 関数においても評価することが可能である。そこで、

第2章

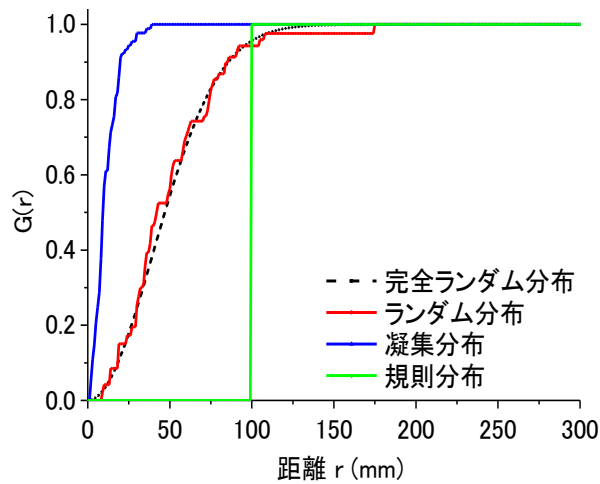


図 2-9 最近傍距離分布関数の模式図

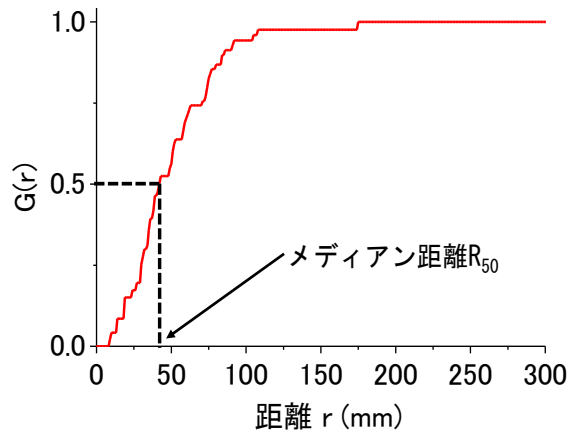


図 2-10 最近傍距離分布関数とメディアン距離の関係

最近傍距離分布関数からは点過程に基づく点の距離特性を評価することとした。

2.2.5 メディアン距離¹⁹⁾

最近傍距離分布関数を代表する特性値として本研究においては累積確率分布で表された距離の第2四分位点(メディアン)の距離をメディアン距離 R_{50} と定義した。メディアン³⁶⁾とは、距離 r のデータを大きさの順に並べたとき、ちょうど真中に位置する観測値のことであり、中央値とも言う。式(2-8)の最近傍距離分布関数に関して、メディアン距離 R_{50} を表すと図 2-10 のようになる。

また、ランダム分布での最近傍距離分布関数は、式(2-9)のように示される。

$$G(r) = 1 - \exp(-\lambda\pi r^2) = 0.5 \quad (2-9)$$

2.2.6 接触分布関数 (F 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 $u \in X$ 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(2-10)に示す。また、ランダム分布での接触分布関数は、式(2-11)のように示される。

$$F(r) = P\{N(b(u,r)) > r\} \quad (2-10)$$

$$F(r) = 1 - \exp(-\lambda_A \pi r^2) \quad (2-11)$$

ここに、 $b(u,r)$ は点 u を中心とする半径 r の円であり、 $N(b(u,r))$ はその円の中にある点過程 X の点数である。

接触分布関数を図 2-11 に示す。関数の初期値($r=0$)は 0 であり、距離の増加にともない関数値が 1.0 に収束する性質を持つ。

2.2.7 最近傍距離分布関数と接触分布関数の関係

最近傍距離分布関数は点過程 X 中の点から距離 r の位置の点の存在確率である(図 2-8)。一方、接触分布関数は点過程 X ではない任意点 u を点過程 X 中に 1 つランダムに落とし、

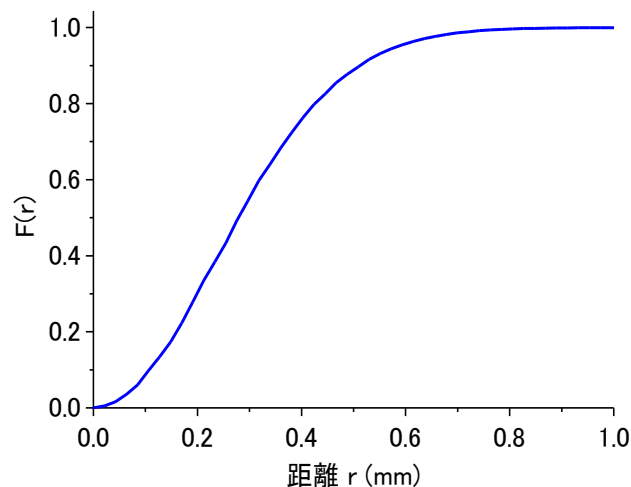


図 2-11 接触分布関数

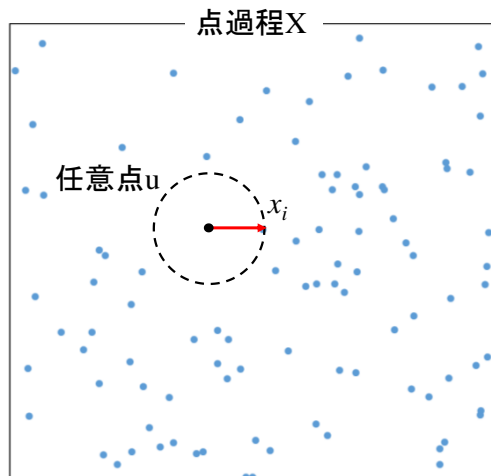


図 2-12 接触分布関数の定義のイメージ図

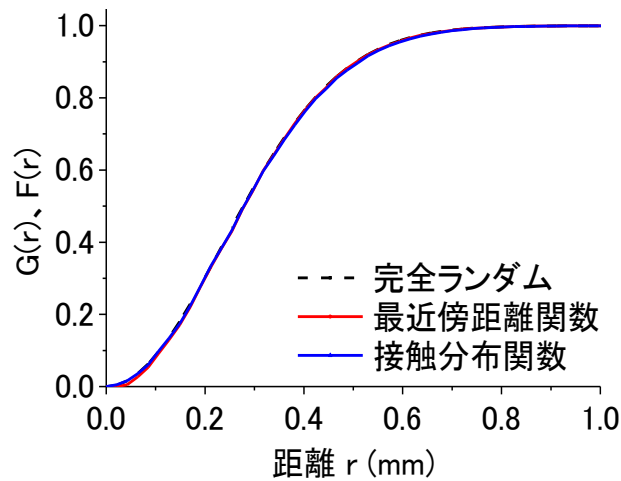


図 2-13 ランダム分布の場合の最近傍距離分布関数 $G(r)$ と接触分布関数 $F(r)$

その点から距離 r の位置の点の存在確率である (図 2-12)。最近傍距離分布関数と接触分布関数は分布がランダム分布であれば一致する。これは式(2-7)と式(2-11)の完全ランダムの場合の両関数の式からも明らかである³⁷⁾。つまり、ランダム分布の点過程に点を 1 つ追加したとしても分布のランダム性が崩れるわけではないということである。図 2-13 に汎用統計解析ソフト「R」を用いて、観察領域全体にランダムに点を発生させた分布の最近傍距離分布関数と接触分布関数を示す。両者は一致していることから、点がランダムに分布しているのであれば両関数は一致することがわかる。

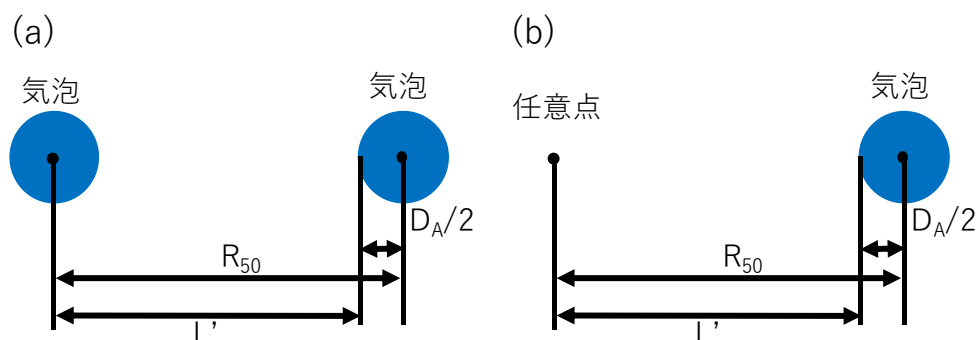


図 2-14 メディアン距離 R_{50} と気泡間隔特性値 L' の模式図

(a) : 最近傍距離分布関数の場合, (b) : 接触分布関数の場合

2.2.8 気泡間隔特性値^{19), 20)}

最近傍距離分布関数から求めたメディアン距離 R_{50} と画像解析にて取得した平均気泡径 D_A から気泡間隔特性値 L' を求めた。気泡間隔特性値 L' は式(2-12)にて示される。

$$L' = R_{50} - \frac{D_A}{2} \quad (2-12)$$

図 2-14 にメディアン距離 R_{50} と気泡間隔特性値 L' の模式図を示す。最近傍距離分布関数の定義によれば、気泡間隔特性値 L' はある気泡重心点から R_{50} 離れたところに存在する気泡表面までの距離とみなせる(図 2-14(a))が、前述のように、気泡がランダムに分布しているのならば、最近傍距離分布関数と接触分布関数は同値であるとみなせるため、気泡間隔特性値 L' はある任意の点から R_{50} 離れた気泡表面までの距離ともみなすことができる(図 2-14(b))。

2.3 確率統計における区間推定とモンテカルロ・シミュレーション

2.3.1 仮説検定とシミュレーションによる区間推定

画像から得られる気泡の空間分布には気泡の特性が含まれており、得られる特性値には、当然ある程度の変動が含まれる。よって、気泡を点で代表させたとき、気泡が少ないときは点密度も小さくなり、そのような点密度が小さい分布データでは、変動が大きくなること

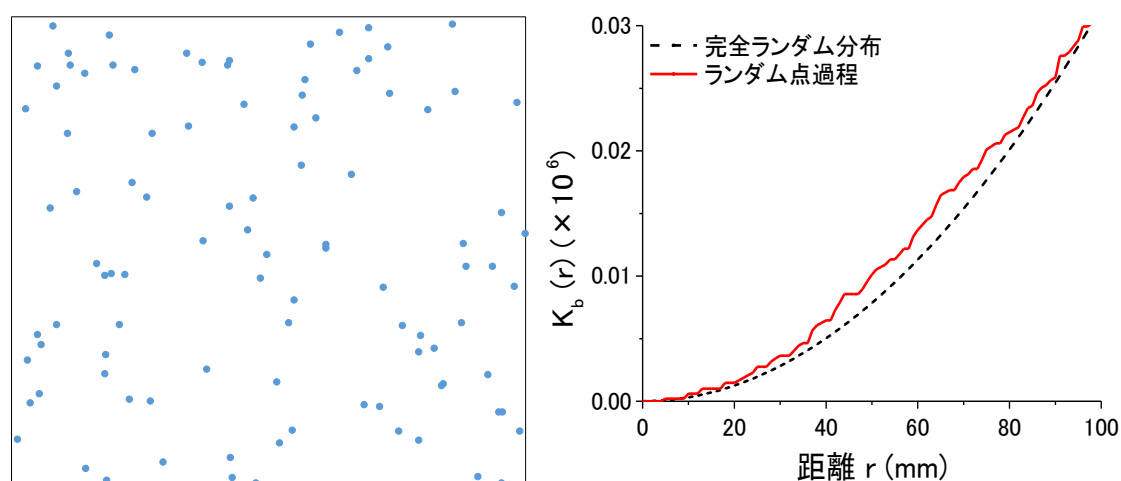


図 2-15 ランダムに点発生させた点過程と K 関数

予想される。したがって、ある配合について気泡を表す点の K 関数および L 関数が得られたとき、それが完全ランダム分布との間に関数値の差を生じることになるが、この差が単純に統計的な変動の範囲とみなされるのか、または有意な差であるのかを判断する必要がある。図 2-15 に同じ点数をランダムに発生させるシミュレーションを行って得られた点過程と K 関数を示す。このようにランダムに点を発生させたとしても完全ランダム分布の K 関数値と差が見られる。つまり、ランダムに点を発生させたとしても関数値には変動がみられ、完全ランダム時の関数値と差があるという理由から単純にランダムではないと判断することはできない。この差が有意な差かどうかを判断する方法として、仮説検定^{38), 39)}とシミュレーションによる 95%信頼区間 (区間推定)⁴⁰⁾がある。仮説検定とは自らの考えが正しいかを仮説を立てて、手元のデータを用いて検討することである。95%信頼区間とは母平均が 95%の確率で存在する区間を意味する。以下に仮説検定と区間推定の概要を、例を挙げて述べる。

事例として、気泡断面画像 10 枚から距離 r での L 関数値の平均 $\bar{x}(r)$ が得られたとする。しかし、同じ距離 r での完全ランダム分布の時の L 関数値 $\bar{\mu}(r)$ と差が見られた。この場合、その差は有意な差であり気泡はランダム分布ではないと判断されるのか、その差はばらつきの範囲内であり、ランダム分布であると判断されるのかをモンテカルロ・シミュレーション ($n=199$ 回) により検討することとした。

まず、仮説検定を行うにあたり、仮説を立てる。仮説は帰無仮説と対立仮説があり、帰無仮説では自分の主張とは逆の仮説を立てる。今回は帰無仮説を「気泡はランダム分布である ($\bar{x}(r)$ が 95%信頼区間内に存在する)」とし、対立仮説を「気泡はランダム分布ではない ($\bar{x}(r)$ が 95%信頼区間の外側に存在する)」とした。

有意水準 α は 0.05 とする。一般的に標本数 $m(=n+1)$ が十分多い場合、大数の法則と中心

第2章

極限定理が適用できる^{38)~40)}. 大数の法則とは確率変数 X_1, X_2, \dots, X_n が互いに独立で、平均 $E(X_i)=\mu$, 分散 $V(X_i)=\sigma^2$ とした場合, m を十分大きくするとこれらの標本平均 \bar{X} は期待値 $E(\bar{X})=\mu$ に限りなく近づくとする考えである. 一方, 中心極限定理とは大数の法則をより精密にした考えで, 確率変数 X_1, X_2, \dots, X_n が互いに独立で, 平均 $E(X_i)=\mu$, 分散 $V(X_i)=\sigma^2$ とした場合, m を十分大きくするとこれらの標本平均 \bar{X} は期待値 $E(\bar{X})=\mu$, 分散 $V(\bar{X})=S^2/m$ の正規分布に近似的に従うという考えである. 特に, 標本平均 \bar{X} を標準化した確率変数 Z は式(2-13)で表され, 期待値 $E(Z)=0$, 分散 $V(Z)=1$ の標準正規分布に近似的に従うとみなせる. ただし, S^2 は標本平均であり, 標本数 m が十分多い場合には S^2 は高い精度で σ^2 を推定していると考えられる.

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sqrt{\frac{S^2}{m}}} \quad (2-13)$$

確率変数 Z が標準正規分布に従う場合, 確率 $P_Z(=0.95)$ は式(2-14)となる.

$$P_Z(-1.96 \leq Z \leq 1.96) = 0.95 \quad (2-14)$$

式(2-14)に式(2-13)を代入し, μ が中心になるように変換すると式(2-15)得られる.

$$P_Z\left(\bar{X} - 1.96 \sqrt{\frac{S^2}{m}} \leq \mu \leq \bar{X} + 1.96 \sqrt{\frac{S^2}{m}}\right) = 0.95 \quad (2-15)$$

このときの式(2-16)が母平均 μ の 95%信頼区間となる.

$$\left(\bar{X} - 1.96 \sqrt{\frac{S^2}{m}}, \bar{X} + 1.96 \sqrt{\frac{S^2}{m}}\right) \quad (2-16)$$

これを今回の例に適用すると, \bar{X} に標本平均 $\bar{\mu}(r)$ を, S^2 に標本分散 $s(r)^2$ を, $m(=n+1)=200$ 代入する (式(2-17)).

$$\left(\bar{\mu}(r) - 1.96 \sqrt{\frac{s^2}{200}}, \bar{\mu}(r) + 1.96 \sqrt{\frac{s^2}{200}} \right) \quad (2-17)$$

この95%信頼区間（式(2-17)）に断面画像から得られたL関数値 $\bar{x}(r)$ が含まれるかどうかで偏差の有意性を判定する。例えば、 $\bar{x}(r)$ が95%信頼区間に含まれなかった場合、気泡はランダム分布であるという帰無仮説が棄却されて、偏差は有意な差であると判定され、気泡はランダム分布ではないとされる。逆に、 $\bar{x}(r)$ が95%信頼区間に含まれる場合、気泡はランダム分布であるという帰無仮説が棄却されず、偏差はランダムのばらつきの範囲内であると判定され、気泡はランダム分布であると判断される。

2.3.2 点過程統計量における偏差の有意性判定^{18),41)}

2.3.1にて仮説検定と区間推定の概要を述べたが、前述で述べた事例はある標本値に対する偏差の有意性を判定するものであり、本研究では点過程統計量（関数）に対して適用しようとしている。換言すると、距離rにおける関数値すべてに対して有意性判定を行うことになり、多大な労力を要す。そこで、関数に対して偏差の有意性判定を行う場合は、モンテカルロ・シミュレーションを用いる。試料より得られた点密度と同じ点密度に相当する点数をランダムに発生させる。発生させた点過程に対して偏差が見やすいL関数を計算する。この過程を199回繰り返し⁴¹⁾、完全ランダム分布のL関数を含めて計200回のL関数を求め、関数値の上下5番目（両側検定における95%信頼区間に関して、 $200 \times 2.5\% = 5$ ）の値をプロットすることで95%信頼区間を決定した⁴²⁾。モルタルやコンクリート中の気泡の分布を表

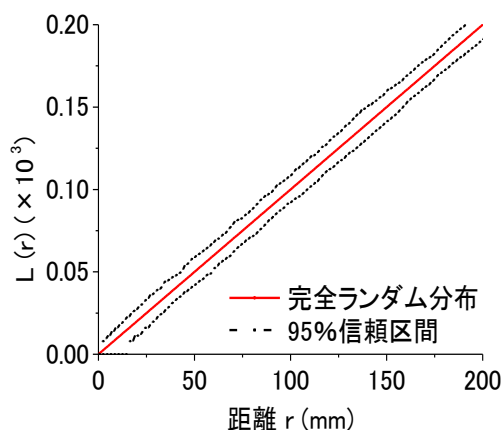


図 2-16 L関数の95%信頼区間図

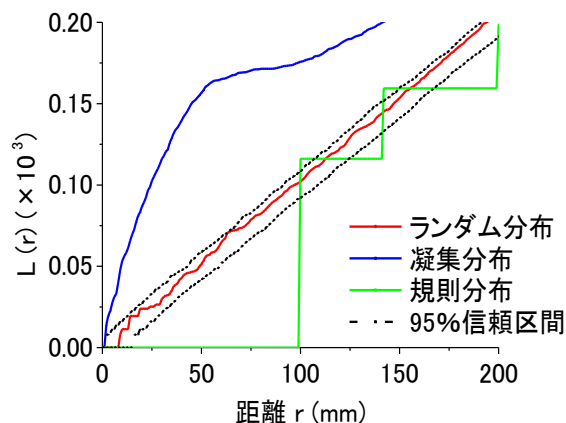


図 2-17 L関数の分布特性

第2章

す関数が 95%信頼区間内に入る場合は、前述のようにランダムに点を発生させる場合に起こり得るばらつきと考える。これに対してこの区間以外に L 関数が存在する場合、その点過程はランダム分布で無いと判断した。

図 2-16 に完全ランダムな L 関数と、1000×1000 の領域に点を 100 個ランダムに発生させるモンテカルロ・シミュレーションを行った結果の 95%信頼区間を示す。ランダムに点を発生させたとしても、図 2-16 のようにばらつきがあることがわかる。図 2-17 に図 2-7 に 95%信頼区間をプロットしたものを示す。図 2-17 のように得られた L 関数値が 95%信頼区間内であれば (図 2-17(赤線))、この分布はランダム分布と判定される。一方、前述のように L 関数値が 95%信頼区間を上側にある場合 (図 2-17(青線)) は、凝集分布と判定される。逆に下側にある場合 (図 2-17(緑線)) は、規則性分布と判断される。

2.3.3 モンテカルロ・シミュレーションによる空間分布の再現判定

2.3.2 の有意性判定において、95%信頼区間内の分布はランダム分布であると判断される。換言すると、着目する粒子がランダム分布であるならば、点をランダムに発生させるモンテカルロ・シミュレーションを行うことでその分布を再現できることを意味する。そこで、点発生シミュレーションを K 関数と最近傍距離分布関数にも適用させ、有意性判定と同時に空間分布再現の判定を行った。図 2-18、図 2-19 に K 関数と最近傍距離分布関数に 95%信頼区間をプロットしたものを示す。いずれも凝集分布と規則分布の関数値に関しては 95%信頼区間を外れており、両者の分布は再現できないことになる。一方、ランダム分布の関数値は 95%信頼区間内に入っていることから、再現することができると判断される。また、最近傍距離分布関数は点間距離を反映する統計量であることから、ランダム分布であれ

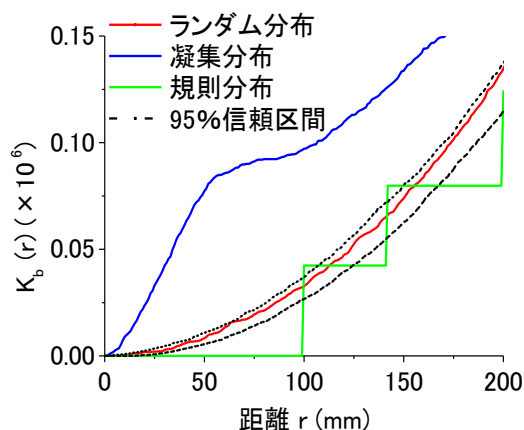


図 2-18 K 関数の分布特性

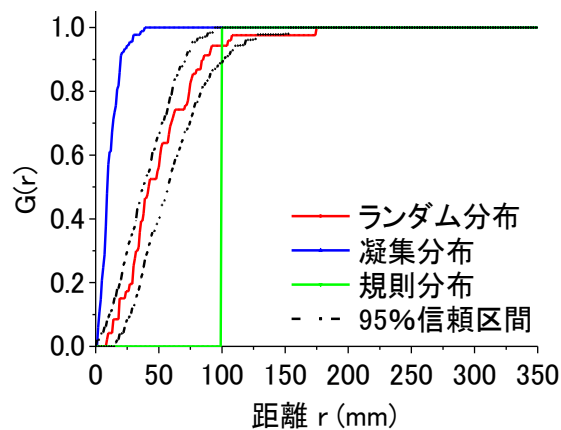


図 2-19 最近傍距離分布関数の分布特性

ば、空間分布だけではなく点間距離も再現することができると判断される。

2.3.4 特定の領域のみへのモンテカルロ・シミュレーション

2.3.3 のような点発生シミュレーションによる分布再現は着目粒子がランダムに分布していれば可能ということになる²⁰⁾。しかし、モルタルやコンクリートのように骨材が存在する場合、着目粒子が骨材により分布を制限されることが予想される⁴³⁾。そこで、骨材以外のセメントペーストマトリック領域のみに点をランダムに発生させるシミュレーションを行う。画像解析で取得した骨材の2値化画像を汎用統計解析ソフト「R」に読み込み、骨材以外のセメントペーストマトリック領域に点を発生させるシミュレーションを行い、各種統計量の95%信頼区間を求めた。図2-20にK関数を例としてセメントペーストマトリック領域に点を発生させるシミュレーションから求めた95%信頼区間を模式的に示す。コンクリート中の気泡は骨材の影響で凝集分布を示すが、95%信頼区間も同様に凝集分布で示される。この場合、95%信頼区間内であれば、骨材は着目粒子をランダムに制限しているだけに過ぎず、セメントペーストマトリック領域で見ればランダムに分布していると判断される。換言すると、実際に着目粒子が存在する領域のみに点を発生されるシミュレーションを行えば、その分布を再現できることになる。

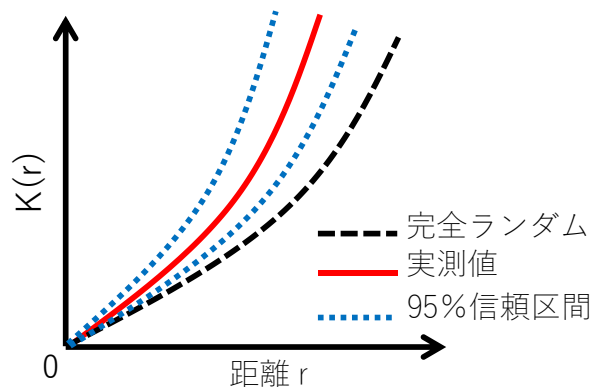


図 2-20 特定の領域に点発生シミュレーションを行った場合の K 関数の模式図

第3章

汎用ソフトウェアの適用によるコンクリート中の 気泡分布評価と再現シミュレーション

3.1 序論

コンクリートは異なる相で構成される多相材料であり，その中で空気は体積割合で数%程度と構成する相の中で最も小さい。しかし，凍結融解抵抗性はもとよりワーカビリティや強度特性，さらには物質透過性にも影響を及ぼし⁴⁾，フレッシュ時から硬化後の特性，耐久性とコンクリートの物性に継続して関わる重要な分散相である。多相材料における分散相の材料全体の物性への関わりは，その量と分布状況に左右されるが，コンクリートの耐凍害性付与機構を一義に考えた場合には，空気量よりも気泡間の距離が重要とされ，これは凍結可能な水分が最寄りの気泡まで移動できることによって，耐凍害性が確保されているという基本的な考え方に基づいている。換言すれば，水分が移動可能な距離内に最寄りの気泡が存在するように空気を連行しなければならない²⁾。気泡間の距離を仮想的に反映した特性値が，Powers が提案した気泡間隔係数であり，これはコンクリート中の気泡が同一寸法で規則的に配置された空間分布を仮定している。図 3-1 に気泡間隔係数を求めるために Powers によって仮定された気泡の空間分布構造を模式的に示す。仮定された気泡の空間分布とは，セメントペースト上に様々な寸法の気泡が存在する実際の空間分布配置を (図 3-1 (a))，同一径の気泡が立方体の中心に配置されているような規則的配置として仮定している (図 3-1 (b))。この配置は，同一径の気泡が立方体の格子点に規則的に配置されているような配置に置き換えることができる (図 3-1 (c))。この配置において，気泡表面からセメントペースト中の点に至る最大距離が気泡間隔係数 \bar{L} となる。立方体の1辺の長さは，セメントペーストの容積率 P，硬化コンクリートの空気量 A，気泡個数 N を用いて $\sqrt[3]{(P+A)/N}$ として表せる¹⁴⁾。以上のように，気泡間隔係数はその仮想分布から得られる値であり，実際の気泡分布を反映した値ではない。

気泡間隔係数が仮想的な気泡分布から得られる値にも関わらず耐凍害性評価の指標として約 70 年間も計測され続けた理由として，算出の際に空気量及びセメントペースト容積が

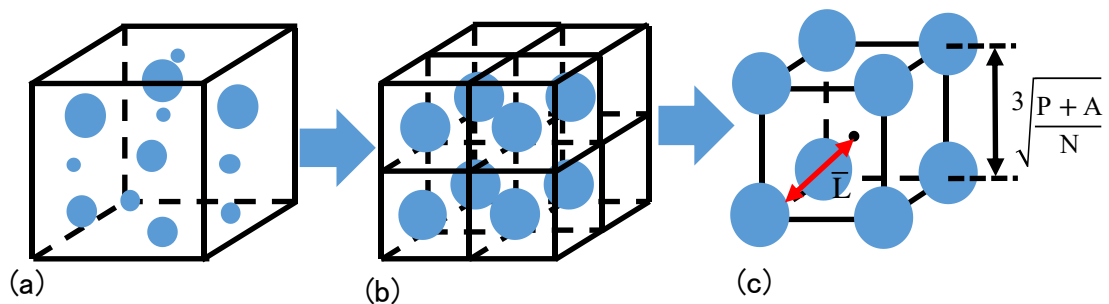


図 3-1 Powers の気泡間隔係数を求めるための気泡配置

(a) : 実際の気泡配置, (b) : 規則配置, (c) 気泡間隔係数の空間配置

第3章

考慮されていることおよび、気泡間隔係数が耐久性指数と関連付けることができるという長年の実績があるためであると考えられる。しかし、前述のように坂田ら¹⁴⁾は中庸熟フライアッシュセメントを用いたコンクリートでは気泡間隔係数と耐久性指数の相関が得られないと述べており、気泡間隔係数が耐凍害性と関連付けられない事例も存在する。一方で、コンクリート中の気泡の粒度分布と凍結融解抵抗性の対応についても報告しており、気泡径 150 μm 未満の空気量が 0.55%有していれば、十分な凍結融解抵抗性が得られると述べている。以上のことから、実際の分布や粒度を無視した気泡間隔係数を過信するのではなく、実際の気泡の粒度分布や空間分布の特徴を把握し、気泡間隔係数が耐凍害性と関連付けられない事例の原因説明や、気泡間隔係数に代わる特性値を提案することが、コンクリートの耐久性評価の精度向上に資すると考えられる。

実際の空間分布を評価する点過程の考え方では、測定対象を大きさの持たない点とみなす。測定対象を点とみなせば点の分布を直感的に理解しやすく、点と点の距離や分布が容易に求められる。測定対象を点に置き換え点過程解析を行うことで、例えば以下の問題を検証することが可能となる。

- 1) 点はその調査領域内に均一に分散しているのか
- 2) 点密度は何かの変数に依存しているのか
- 3) 点はランダムなのか、そうでないのか
- 4) 凝集している、もしくは反発しているとする根拠はあるのか
- 5) 点の分布パターンは自分が考えている仮説にあっているのか、いないのか
- 6) 自分が行った空間統計解析の信頼性はどれくらいなのか

特に 6)は点過程として取り扱う上での大きな利点であり、解析結果の考察の信頼性を、点をランダムに発生させるシミュレーションで裏付けることができる。

コンクリート中の気泡の配置はコンクリートを練り混ぜて硬化することで決定するが、コンクリート中の骨材に気泡は存在することはできず、断面を観察した場合、気泡はセメントペーストマトリックス内のみ存在し、気泡の配置は骨材の配置に影響を受けているように思われる。これは点発生シミュレーションによって検証可能であり、例えば、点を発生させる領域内に点を発生させない領域(障害物)を何か所かランダムで配置し、その領域以外に点を発生させるシミュレーション⁴⁵⁾を行えば、障害物が点の配置に与える影響を評価することが可能である。両者に差異が見られない場合は、点は発生可能な領域内においてランダムに配置されていると判断される。換言すると、障害物以外の領域に点をランダムに発生させることでその分布を再現できることとなる。

第3章

一方で、点過程統計量の計算やシミュレーションの実行には従来高度なプログラム開発が必要とされた。これがコンクリートの空間構造への点過程評価手法の普及の妨げの一因になっていると思われる。しかし、現在では汎用統計解析ソフトウェア「R」が登場し、誰でも容易に高度な計算およびシミュレーションが可能となっている。そこで本章においては、高度な画像解析を一般的に行えるようにすることを意図し、気泡を点過程として取扱いながら、汎用統計解析ソフトウェア「R」を用いてすべての空間統計量の計算を行う。これにより、一般に入手できるソフトウェアを用いて、安価で信頼性の高い気泡構造の解析が簡単に行えることを示す。さらに、気泡の2次元画像の点過程に対して定義された気泡間隔特性値 L' と、従来用いられてきた3次元を想定した気泡間隔係数との対応を「R」にて提供されるパッケージを用いたシミュレーションによって明らかにし、汎用ソフトウェアによる点過程評価手法が気泡系の評価に有用な方法であるとして提案することを目的とする。

3.2 使用材料

セメントには普通ポルトランドセメント（密度： 3.15g/cm^3 ，比表面積： $3310\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用し、骨材には手取川産の川砂（密度： 2.60g/cm^3 ，吸水率： 2.05% ）および川砂利（密度： 2.60g/cm^3 ，吸水率： 1.81% ，最大骨材寸法： 25mm ）を用いた。混和剤には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 剤を用いた。また、ポリカルボン酸エーテル系の高性能減水剤を使用した。

3.3 供試体の配合および作製

3.3.1 セメントペースト供試体の作製

セメントペースト供試体は $W/C=0.40$ とした。AE 減水剤（原液）および AE 剤（原液）の量を変化させ、計 6 種類の流動性および空気量の異なる供試体を作製した。JIS R 5201 に準じてセメントペーストを練り混ぜ、フロー測定を行った（図 3-2）。その際、過度のブリーディングやそれによる材料分離がないことを確認している。また、小型エアメーター（図 3-3）を用いて空気量を測定し、その後 $40\text{mm}\times 40\text{mm}\times 160\text{mm}$ の角柱型枠（図 3-4）に打ち込んだ。打ち込み後 24 時間にて脱型し、材齢 7 日まで水中養生（ 20°C ）を行った。作

第3章

製したセメントペースト供試体の名称，配合および得られたフレッシュ特性を表 3-1 に示す。

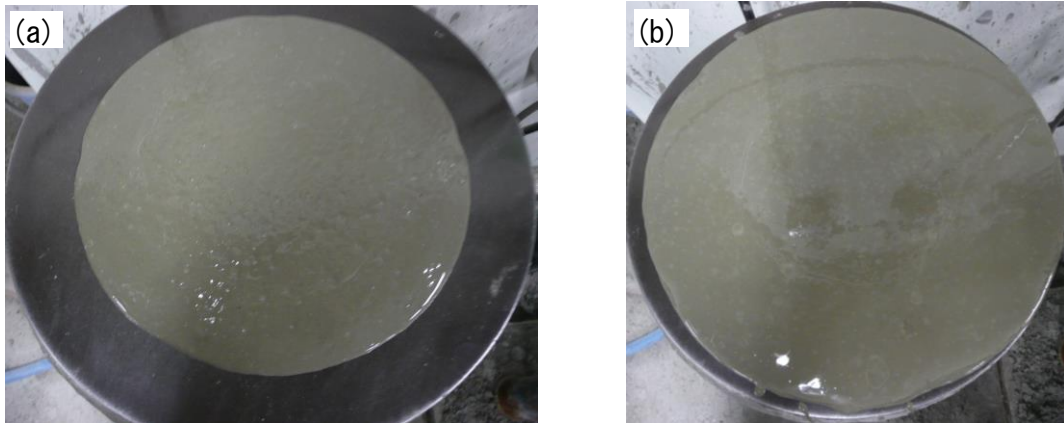


図 3-2 フロー試験結果の例

((a) ワーカブルなセメントペースト，(b) ワーカブルではないセメントペースト)

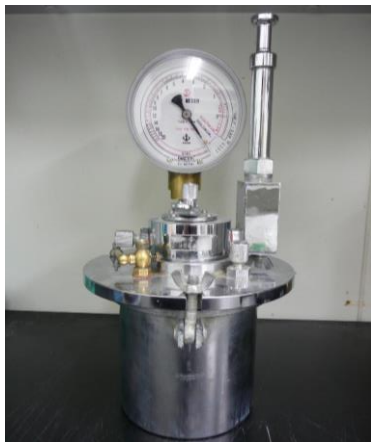


図 3-3 小型エアメーター

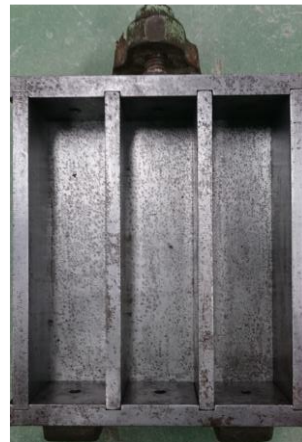


図 3-4 角柱型枠 (40mm×40mm×160mm)

表 3-1 セメントペーストの名称，配合および得られたフレッシュ特性

名称	W/C	AE減水剤量 (C×%)	AE剤量 (C×%)	フロー (mm)	空気量 (%)
CP1-①	0.40	-	-	195	2.4
CP1-②		0.10	-	213	3.4
CP1-③		0.25	-	222	4.9
CP1-④		0.50	-	249	6.4
CP1-⑤		0.25	0.01	228	6.0
CP1-⑥		0.25	0.02	227	8.5

3.3.2 モルタル供試体の作製

モルタル供試体は W/C=0.40, C:S=1:1 と 1:2 とした。高性能減水剤を用いてモルタルがワーカブルな状態になるようにした。AE 剤（原液）の量を変化させ 3 種類の空気量の異なる供試体を作製した。JIS R 5201 に準じてモルタルを練り混ぜ、フロー測定を行った（図 3-5）。フロー値は 200mm 程度を目標とし、事前に高性能減水剤量を変化させてモルタルを作製し、フロー値が 200mm 程度になるような高性能減水剤量を決定した。また、過度のブリーディングやそれによる材料分離がないことを確認した。小型エアメーターを用いて空気量を測定し、その後 40mm×40mm×160mm の角柱型枠に打ち込んだ。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。作製したモルタル供試体の名称および配合を表 3-2 に示す。



図 3-5 フロー試験結果の例

(a) ワーカブルなモルタル, (b) ワーカブルではないモルタル

表 3-2 モルタルの名称, 配合および得られたフレッシュ特性

名称	W/C	C:S	高性能 減水剤量 (C × %)	AE 剤量 (C × %)	フロー (mm)	空気量 (%)
M1-①	0.40	1:1	0.1	-	198	2.0
M1-②				0.06	197	5.5
M1-③				0.1	198	7.2
M2-①	0.40	1:2	0.45	-	202	5.7
M2-②				0.002	217	8.6
M2-③				0.006	218	11

3.3.3 コンクリート供試体の作製

コンクリート供試体は W/C=0.40 と W/C=0.55 とした。AE 減水剤（4 倍希釈）は基準量（セメント質量に対して 0.25%）とし、AE 剤（100 倍希釈）の量を変化させ 3 種類の空気量の異なる供試体を作製した。JIS R 5201 に準じてコンクリートを練り混ぜ、スランプ測定を行った。その後、エアメーター（図 3-6）を用いて空気量を測定し、100mm×100mm×400mm の角柱型枠（図 3-7）に打ち込んだ。打ち込み後 24 時間にて脱型し、材齢 7 日程度水中養生（20℃）を行った。作製したコンクリート供試体の名称、示方配合および得られたフレッシュ特性を表 3-3 に示す。



図 3-6 エアメーター



図 3-7 角柱型枠（100mm×100mm×400mm）

表 3-3 コンクリートの名称、示方配合および得られたフレッシュ特性

名称	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				単位量 (cc/m ³)		測定結果	
					W	C	G	S	AE 減水剤	AE 剤	スランプ (cm)	空気量 (%)
C1-①				2.5±0.5			1033	686		438	13.0	2.8
C1-②	0.40	39.9	15±2	4.5±0.5	175	438	1002	665	4380	876	17.0	5.0
C1-③				7.0±0.5			963	639		5256	16.0	7.2
C2-①				2.0±0.5			1045	785		-	17.0	1.7
C2-②	0.55	42.9	15±2	4.5±0.5	175	318	1008	754	3180	636	16.5	4.0
C2-③				9.0±0.5			941	707		3816	17.0	9.0

3.4 画像取得および画像解析手順

3.4.1 スキャナーによる画像取得

養生終了後、各供試体から厚さ 10mm 程度（コンクリートの場合は 15mm 程度）の板状試料を切り出し、耐水研磨紙を用いて切断面の研磨を行った。その後、ブローアを用いて研磨面の水分を素早く飛ばした。そして、フラットベッドスキャナを用いて試料断面のカラー画像を取得した（図 3-8 (a)）。さらに、セメントペースト相と同色の骨材を抽出するために、試料の研磨面に対して 1%フェノールフタレイン水溶液の噴霧を行い、セメントペースト相の染色を行った。呈色後、余分な水分をブローアで飛ばし画像を取得した（図 3-8 (b)）。画像を取得後、研磨面を黒色インクまたは黒色フェルトペンで塗り潰した。その後、気泡を白色粉末（本研究では炭酸カルシウム粉末、粒径範囲 12~13 μm ）で充填した。充填後、試料表面に残った余分な粉末を筆または乾いた自分の指で丁寧に除去し、白黒画像を取得した（図 3-8 (c)）。本研究では簡便性を考慮して、取得する画像枚数は 10 枚とした（気泡の面積率や気泡個数の変動係数を求め、ばらつきが小さかったため）。セメントペーストおよびモルタルにおいては解像度を 1200dpi とし、1 画素は約 21.2 μm に相当する。なお、ブリーディングの影響で試料の縁部では黒色インクの均一な染色がなされない領域が存在する場合があるため、中心から 30mm \times 30mm の領域を解析領域とした⁴⁶⁾。また、コンクリートにおいては解像度を 847dpi とし（コンクリートは観察面が大きいので 1200dpi では画像の容量が大きくなり、簡便とは言えない）、1 画素は約 30 μm に相当する。解析領域は中心から 60mm \times 60mm の領域とした。ただし、この領域は体積代表領域よりも十分に大きいことを確認している⁴⁷⁾。

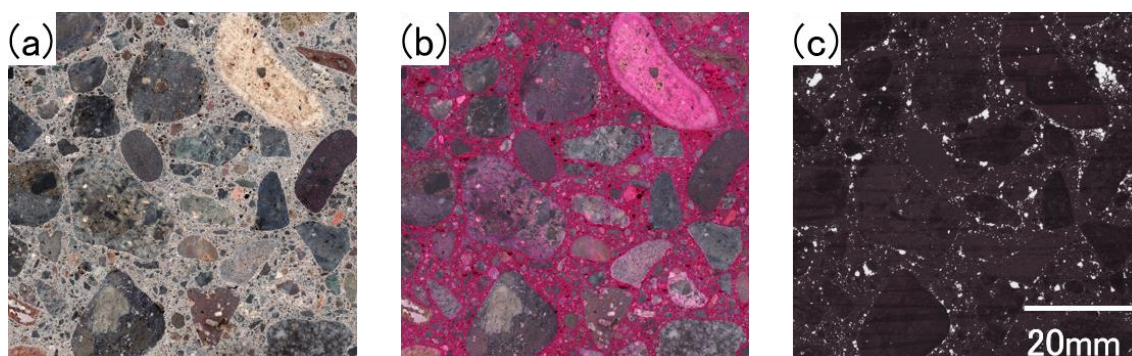


図 3-8 取得した画像の例（コンクリート）

(a) : 原画像, (b) : フェノールフタレイン呈色画像, (c) : 白黒画像

3.4.2 セメントペーストの画像解析手順

セメントペーストにおいては、骨材が存在しないので、気泡の白色画像のみを取得した。取得した白黒画像（図 3-9(a)）に対して、モノクロ変換を行った。その後、平滑化フィルタ一処理を2回行ってノイズを除去した後、エッジ鮮鋭化処理（ラプラシアンフィルタ）を1回行ってグレースケールに基づく2値化処理（TOKS法1，鮮明度255）を行い、気泡の2値画像を取得した。さらに、目視で判断できた未抽出箇所のみに対して手動補正を施した。また、AE剤にて連行される気泡径の範囲はおおよそ30~250 μm であること⁴⁸⁾および、ステレオロジーの観点から多くの微細な粒子がすべて大きな球の端面の切断による円形断面として一斉に特定の断面に現れたとは考えられないことから、30 μm 以下白色部は気泡以外の表面凹凸部もしくはその他の空隙であると判断しこれを除去した。残された白色部が気泡であると考え、これを気泡の2値画像とした（図 3-9(b)：本来の2値画像は抽出した着目相は白、それ以外は黒で表示されるが、白黒画像と区別がつかなくなるので、白黒反転させて載せることにした）。取得した気泡の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。さらに、画像解析ソフトウェアの機能を用いて、気泡の重心点位置座標を求め、これを位置ベクトル \mathbf{x}_i とみなして点過程 $X=\{\mathbf{x}_i; i=1, \dots, n\}$ とし

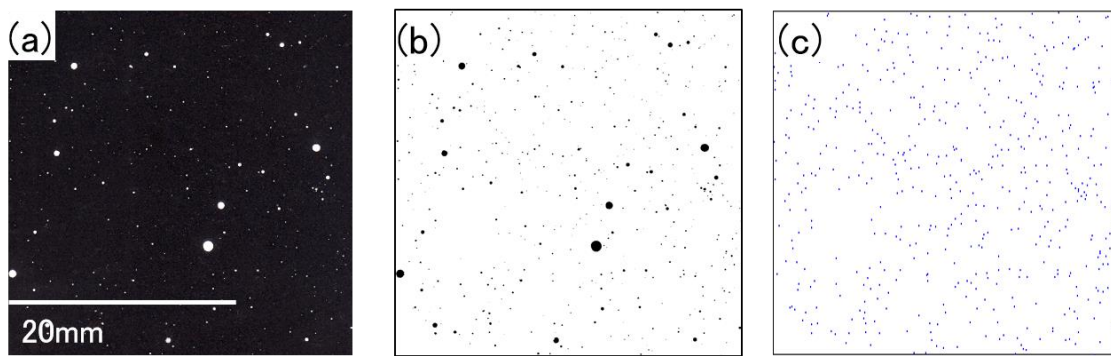


図 3-9 セメントペースト中の気泡の画像例

(a)：白黒画像，(b)：2値化画像，(c)：点過程

表 3-4 画像解析から得られた気泡に関する特性値（セメントペースト）

W/C	0.40					
配合名称	CP-①	CP-②	CP-③	CP-④	CP-⑤	CP-⑥
点密度 ($/\text{mm}^2$)	0.46	0.89	2.02	2.43	2.89	3.06
平均気泡径 (μm)	123	138	120	118	100	126
硬化後の気泡体積率 (%)	1.0	2.1	3.5	4.4	3.7	7.3

た (図 3-9(c)). 表 3-4 に解析から得られた気泡に関する特性値を示す.

セメントペーストは骨材がないため, 気泡の抽出は比較的簡単である. しかし, モルタルおよびコンクリートは骨材が気泡の分布に与える影響を評価するため, 骨材の 2 値画像が必要となる. そのため, セメントペーストとは少し異なる方法で骨材および気泡の 2 値画像を取得する必要がある.

3.4.3 モルタルおよびコンクリートの画像解析手順 (RGB 情報による解析)⁴⁹⁾

3.4.1 にて取得した断面画像 (図 3-10(a)), フェノール呈色画像 (図 3-8(b)) および白黒画像 (図 3-10(c)) からそれぞれ青成分, 緑成分および赤成分を加算した画像を取得した (図 3-10(a), (b), (c)). これらの RGB 情報を持つ画像を重ね合わせることにより, 骨材相, セメントペースト相および気泡をそれぞれ異なる色で表示したカラー画像²⁴⁾を得た (図 3-10(d)). 重ね合わせた画像中における骨材色は様々であるため, 明度および色度に対して解析時に示される濃度ヒストグラムから閾値を設定することで目的とする骨材粒子の 2 値

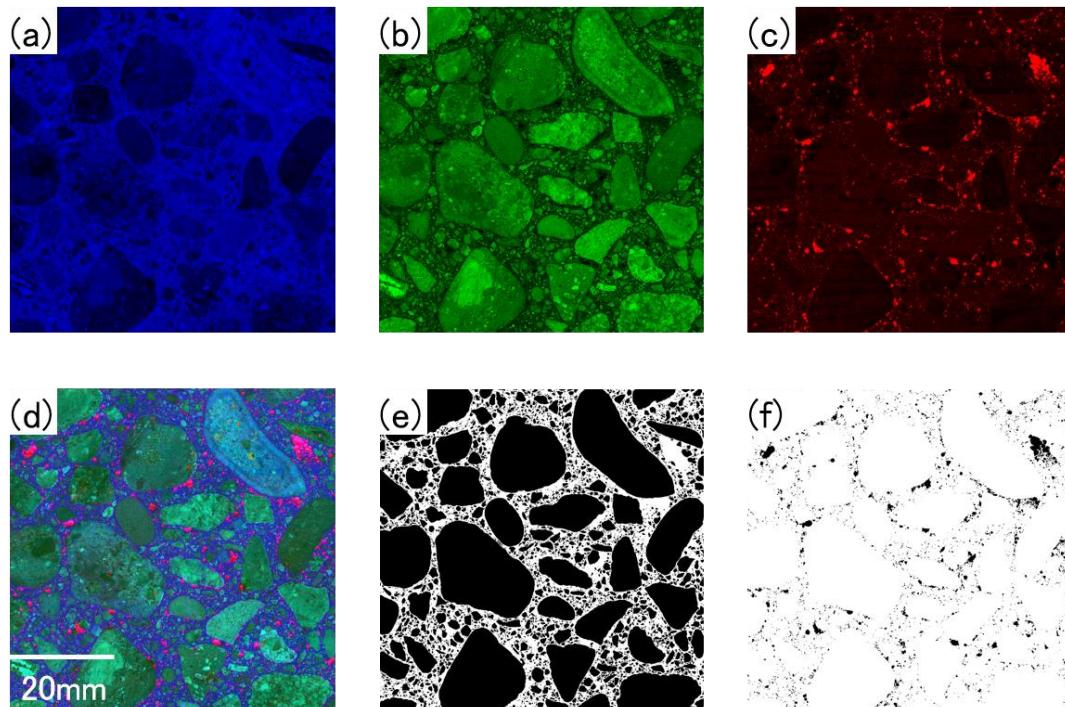


図 3-10 RGB 画像による骨材および気泡の抽出手順例 (コンクリート)

(a) : 青成分抽出画像, (b) : 緑成分抽出画像, (c) : 赤成分抽出画像

(d) : RGB 画像, (e) : 骨材の 2 値化画像, (f) : 気泡の 2 値化画像

第3章

表 3-5 画像解析から得られた気泡に関する特性値 (モルタル)

W/C	0.40			0.55		
配合名称	M1-①	M1-②	C1-③	C2-①	C2-②	C2-③
点密度 (/mm ²)	0.60	2.18	2.91	0.83	1.66	2.80
平均気泡径 (μm)	144	145	142	175	158	157
硬化後の気泡体積率 (%)	1.6	5.3	6.6	4.7	6.5	9.5

表 3-6 画像解析から得られた気泡に関する特性値

W/C	0.40			0.55		
配合名称	C1-①	C1-②	C1-③	C2-①	C2-②	C2-③
点密度 (/mm ²)	1.00	1.36	2.30	0.58	1.10	1.55
平均気泡径 (μm)	124	131	133	131	156	171
硬化後の気泡体積率 (%)	2.0	3.0	5.2	1.6	3.9	7.8

画像を得た。最終的に目視で判断できた未抽出箇所に対して手動補正を施し、骨材粒子の2値画像とした(図 3-10(e))。また、気泡については、白黒画像に対して 3.4.2 と同様の方法で気泡の2値画像を取得した。このとき、骨材中の隙間に詰まった白色粉末も抽出されるため、画像間演算の減算(気泡の2値画像-骨材の2値画像)を行い、骨材上の白色部分を除去した。また、3.4.2 と同様な理由から 30μm 以下の白色部を除去した。残された白色部が気泡であると考え、これを気泡の2値画像とした(図 3-10(f))。この2値画像に対して気泡面積率を画像解析により求め、気泡体積率とした。さらに、個々の気泡の重心点座標 $x_i(i=1, \dots, n)$ を求め、これを気泡の位置ベクトル x_i とみなし、気泡を点で代表させた点過程 $X=\{x_i; i=1, \dots, n\}$ とした。表 3-5, 表 3-6 に画像解析から得られた気泡に関する特性値を示す。

3.5 統計解析ソフト「R」による点過程統計量の算出^{17), 18), 41), 50)~52)}

画像解析により取得した気泡の重心位置座標データ $x_i(i=1, \dots, n)$ を統計解析ソフト「R」に読み込み、点過程パッケージ「spatstat」¹⁸⁾ を使用して以下の点過程統計量の計算およびシミュレーションを行った。

- 1) K 関数：パッケージ内の Kest 関数を用いて計算した。

第3章

- 2) L 関数：パッケージ内の Lest 関数を用いて計算した。
- 3) 最近傍距離分布関数：パッケージ内の Gest 関数を用いて計算した。

3.6 気泡間隔係数の測定¹⁾

ASTM C457 に従って気泡間隔係数 L を式(3-1)，式(3-1)より求めた。

$$L = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{A} + 1} - 1 \right] \quad (P/A \geq 4.342) \quad (3-1)$$

$$L = \frac{P}{A\alpha} \quad (P/A \leq 4.342) \quad (3-2)$$

ここに，A は気泡の体積率で全トラバース長に対する気泡弦長和の比から求められる。p はセメントペースト容積比で，気泡体積率と同様全トラバース長に対する全セメントペースト横断長の比により求められる。また， α は気泡の比表面積であり，リニアトラバース法により計測する場合には式(3-3)として得られる⁷⁾。

$$\alpha = \frac{4}{\bar{l}} \quad (3-3)$$

ここに， \bar{l} ：平均弦長

一方，気泡画像を用いて画像解析によりそれらを求める場合，気泡体積率（面積率）は一般的な画像解析手順によって直接求められる。また，比表面積 α も弦長測定を行うことなく画像解析にて求められる。図 3-11 に示すように半径 R の球が任意の位置 t にて切断されるとき，切断位置の確率密度関数 $f(t)$ は 図 3-11 (b) のような一様分布になる⁵³⁾。気泡断面の平均面積 \bar{a} は式(3-4)のように計算され，結果として比表面積 α は式(3-5)にて与えられる⁷⁾。よって，これも画像解析の一般的な粒子計測の手順だけで，直接かつ簡単に求めることができる。

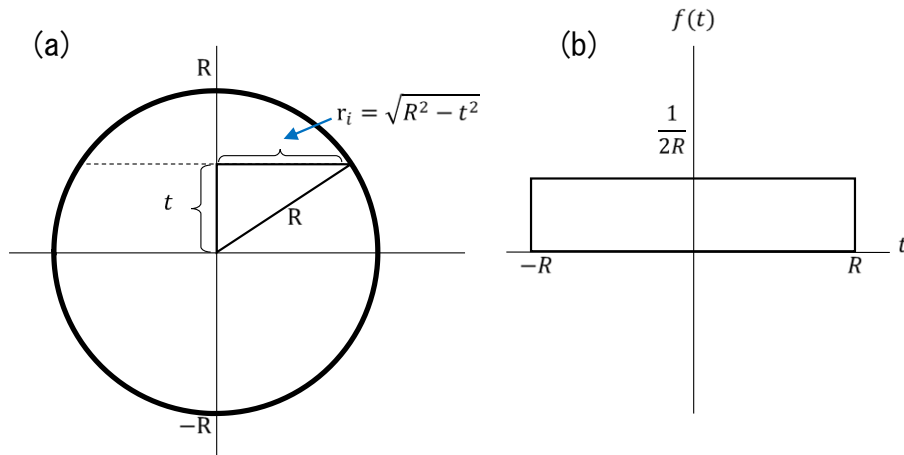


図 3-11 任意の位置 t で切断した断面の半径 r_i (a) および確率密度関数 $f(t)$ (b)

$$\bar{a} = \int_{-R}^R \pi(R^2 - t^2) \frac{1}{2R} dt = \frac{2}{3} \pi R^2 \quad (3-4)$$

$$\alpha = \frac{4\pi R^2}{\frac{4\pi}{3} R^3} = \frac{3}{R} = \frac{3}{\sqrt{\frac{3\bar{a}}{2\pi}}} = \sqrt{\frac{6\pi}{\bar{a}}} \quad (3-5)$$

以上の 2 つの手順にて求められる気泡間隔係数について、前者をリニアトラバース法による気泡間隔係数、後者を面積解析法による気泡間隔係数と称して区別することにする。

3.7 結果および考察

3.7.1 コンクリート中の気泡の空間分布の再現

図 3-12 は硬化コンクリート中の気泡点密度と空気量の関係を示したものである。いずれの水セメントにおいても、両者の間には非常に良好な正の相関が見られる。また、AE 剤量を増やして空気量を著しく増大させた配合を除いて、一般的な空気量の範囲で考えるならば、水セメント比によらず両者の関係は一つの近似式で表せるようにも見える。前述のように、ステレオロジーにおいて、2次元断面に現れた粒子（気泡）の個数を3次元空間内の粒子の数に直接関連付けることはできない⁵⁴⁾。しかし図 3-12 の結果からは、気泡を点過程とみなした場合、断面に現れた気泡の個数はコンクリート中の空気量と対応すると考えてよいようである⁵⁵⁾。また、逆に著しく空気量を増大させると、気泡の合併などを生じて気泡個

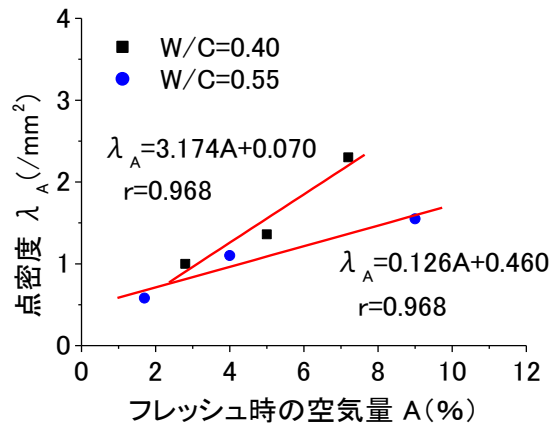


図 3-12 点密度とフレッシュ時の空気量の関係

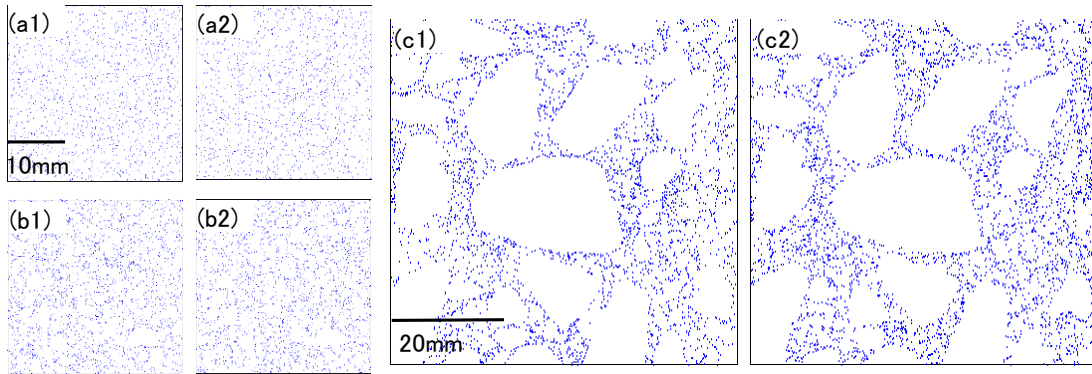


図 3-13 実際の点過程 X_C と再現した点過程 X_R

(a:セメントペースト, b:モルタル, c:コンクリート, 1: X_C , 2: X_R)

数が減少するため⁵⁶⁾, 空気量が9%程度と大きくても点密度が小さくなる気泡系を形成したと考えられる。

図 3-13 に実際の供試体中の気泡の点過程 X_C と汎用統計解析ソフト「R」を用いたシミュレーションにより再現した点過程 X_R の一例を比較して示す. 両者の個々の気泡位置は完全に一致していないが, 点過程としての分布パターンが両者で大きく異なるようには, 目視からは感じられない. また, 実際のモルタルおよびコンクリート中には骨材が存在するため, 気泡が存在しない領域が見られる. 一方で, シミュレーションで得られた点過程においても, そのような領域が存在し, 骨材が存在し気泡の分布が制限されていると考えられるモルタルおよびコンクリート中の気泡の分布パターンは再現されているようである.

図 3-14 は実際の供試体中の気泡の L 関数と 199 回の点発生シミュレーションにより発生させた点過程の L 関数の 95%信頼区間を示したものである. いずれも距離の小さい範囲 (0.3mm 程度以下) では, 実際の気泡分布の L 関数値は信頼区間を下回っている. よって, 実際の分布は, このような短距離範囲にて点過程としては規則性 (反撥性) 分布ということに

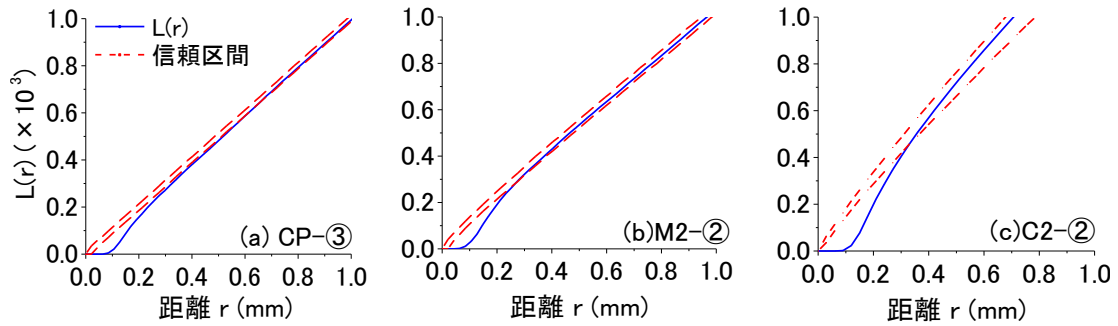


図 3-14 気泡の L 関数の一例

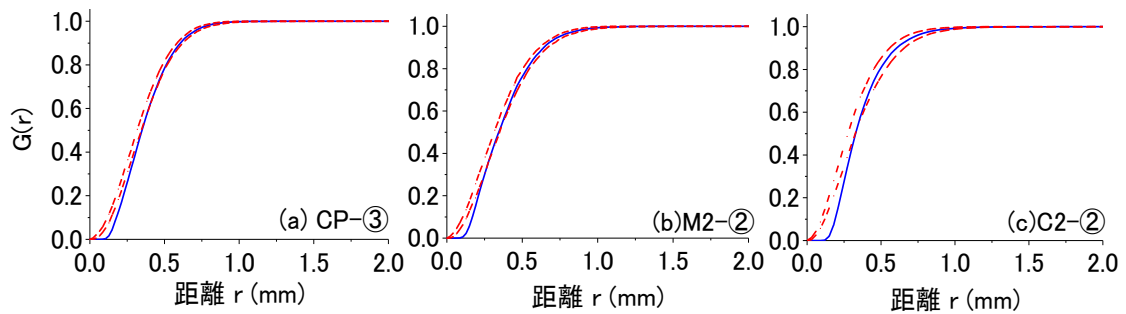


図 3-15 気泡の最近傍距離分布関数の一例

なり，完全ランダム過程という帰無仮説は棄却される．これは，シミュレーションでは大きさを持たない点をランダムに発生させているため，自身が大きさを有する実際の気泡では近接できないような近距離であっても，他点が配置される場合があるためである．一方，それ以降の長距離範囲では信頼区間内に実際の分布が入っている．よって，気泡の存在可能領域であるセメントペーストマトリックス領域のみに点をランダムに発生させるシミュレーションを行えば，短距離範囲にてシミュレーションの一致性は高くはないが，平均気泡径の約 2 倍程度以上の距離では，骨材の有無に関わらず気泡分布は再現されていると判断される．つまり，骨材が存在したとしても気泡の存在可能領域がランダムに制限されるだけであり，セメントペーストマトリックス領域に着目すれば，ある距離以上では気泡は互いに影響し合うことなくランダムに分布しているのと同じ状態が再現されていると考えられる⁵⁶⁾．

図 3-15 は実際の供試体中の気泡分布 X_c の最近傍距離分布関数と，「R」を用いて発生させたランダム点パターン（2 項点過程）の 95%信頼区間を示したものである．L 関数同様，実際の気泡の最近傍距離関数とシミュレーションにより求めた気泡分布の 95%信頼区間を示す．L 関数と同様に短距離範囲にて信頼区間を下回る範囲が存在しており，気泡間距離にも気泡径の影響が現れている．しかし，この場合も同様に，それ以降の長距離範囲では信頼区間の範囲内である．特に，分布の中央値である累積確率が 0.5 に対応する距離（メディアン距離）では，実際の気泡分布は信頼区間内にプロットされているようである．

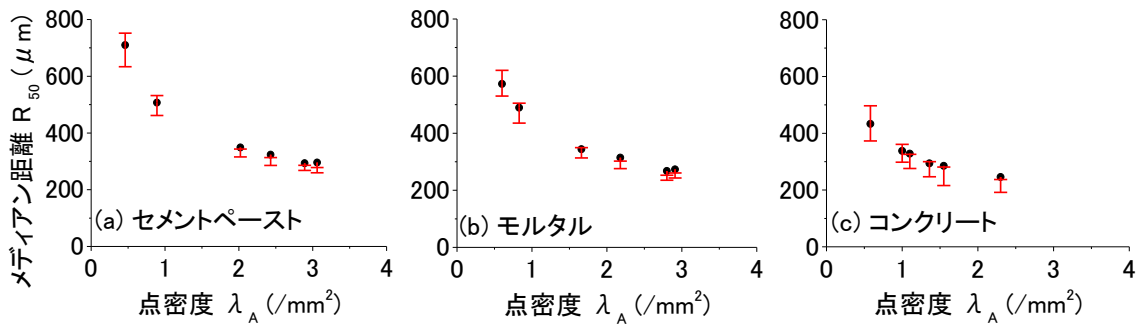


図 3-16 実際の気泡分布から求めたメディアン距離とシミュレーションによる 95%信頼区間値の対応

図 3-16 に実際の供試体中の気泡分布の最近傍距離分布関数の中央値から求めたメディアン距離と、シミュレーションにより再現した分布の 95%信頼区間値の対応を示す。いずれも気泡点密度が大きくなるとメディアン距離も短くなっており、メディアン距離は気泡個数と対応していることがわかる。また、その距離は点密度が大きくなると信頼区間値の上限付近の値を示すようになり、気泡径を無視していることの影響が認められる。しかし、その場合でも信頼区間から外れる程度はかなり小さい。よって、この場合でもシミュレーションによって単純にセメントペーストマトリックス領域にランダムに点を発生させれば、実際の供試体中の気泡間の距離を再現できると考えてよいと思われる。

3.7.2 気泡間隔特性値の有用性評価

メディアン距離と平均気泡径から得られる気泡間隔特性値 L は 2 次元分布から得られる特性値である。一方、一般に用いられる気泡間隔係数 \bar{L} は気泡の立方体格子配置を仮定したとき、セメントペーストの任意点から最寄りの気泡粒子表面までの最遠距離の平均値 (図 3-1) であり、3 次元の距離特性値である。よって、両者を直接関連付けることはできない。しかし、分散している粒子形状と平均径を仮定すれば、2 次元で観察された粒子数と 3 次元における粒子数の関係づけが可能になり、距離に関する特性値を求めることができる。3 次元空間に分布する粒子が凸 (粒子内の任意の 2 点を結ぶ線分全体がその粒子内に入っている) である場合、単位体積当たりの粒子数の期待値 N_V と単位面積当たりの粒子数の期待値 N_A との間には、断面に垂直な方向への粒子の平均投影高さ $E[H]$ (図 3-17) を用いると、DeHoff and Rhines 式と称される式(3-6)の関係がある⁵⁷⁾。対象とする粒子は本研究では気泡なので球と仮定でき、平均投影高さ $E[H]$ を平均気泡径 D_V を用いて書き換えることができる (式(3-7))。

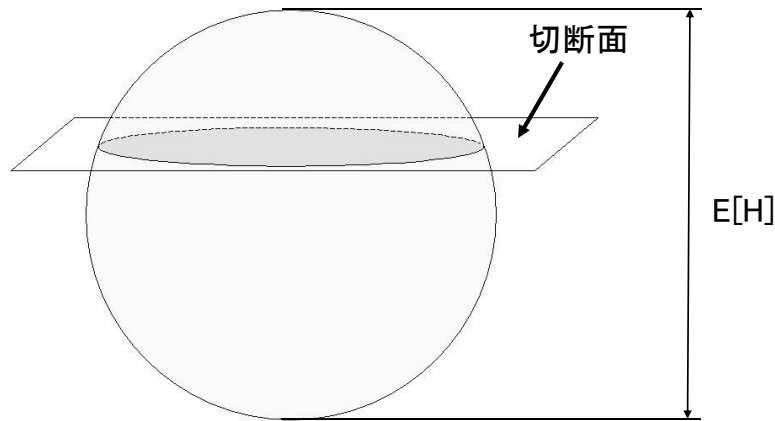


図 3-17 断面垂直方向の粒子投影高さ

$$N_A = E[H]N_V \quad (3-6)$$

$$N_A = D_V N_V \quad (3-7)$$

ASTM C457 においても採り入れられていることを考慮して、2次元の気泡平均径 D_A と式(3-7)の3次元の平均径 D_V は等しいとする。また、気泡間隔係数 \bar{L} は、気泡はセメントペーストマトリックス領域のみに存在することに対応して、セメントペースト体積率 P と空気量 A を用いて定義していることから(式(3-1), 式(3-2)), 気泡点密度 λ_A をセメントペーストマトリックス領域の面積率 (=体積率) p で除すことにより、コンクリート中のセメントペーストマトリックス領域における点密度 N_A が λ_A/p として与えられることになる。すると、3次元空間における気泡点密度を $\lambda_V (=N_V)$ と書くことにすると、セメントペーストマトリックス単位体積当たりの気泡個数である λ_V は式(3-8)で与えられる。

$$\lambda_V = \frac{\lambda_A}{pD_A} \quad (3-8)$$

λ_V の逆数は点 1 個が占有する立方体の体積とみなすことができるので、その立方体の対角線の 1/2 を $R_c/2$ とすると、その対角線半長は三平方の定理を用いて式(3-9)で表される。

$$\frac{R_c}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \sqrt[3]{\frac{1}{\lambda_V}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \sqrt[3]{\frac{pD_A}{\lambda_A}} \quad (3-9)$$

また、気泡間隔係数 \bar{L} は気泡の立方体格子配置を考えたときの立方体対角線から平均気泡径を引いた距離の 1/2 と等しい。よって、これに倣って立方体の対角線から2次元平均気泡径

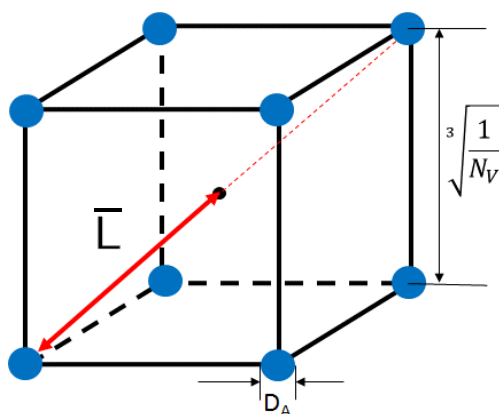


図 3-18 立方体格子点配置における 3 次元点密度の関係

D_A を引いた値を $1/2$ にすれば, ASTM C457 の定義する気泡間隔係数(最近傍粒子までの最遠距離)と同義の距離を求めていることとなる. よって, この 2 次元の点過程情報から DeHoff-Rhines 式を仮定して求めた気泡間隔 L_D は式(3-10)で表されることになる.

$$L_D = \frac{R_c - D_A}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \sqrt[3]{\frac{pD_A}{\lambda_A}} - \frac{D_A}{2} \quad (3-10)$$

図 3-18 に $D_A = D_V$ と L_D , \bar{L} の関係を模式的に示す.

図 3-19 は ASTM C457 の定義に基づく気泡間隔係数 \bar{L} と, 気泡をランダム点過程とみなしたときの最近傍距離の中央値から求めた気泡間隔係数に対応する距離 L_D の関係を示したものである. \bar{L} と L_D の値はほぼ一致している. よって, 2 次元点密度 λ_A から定まる気泡数と 2 次元平均気泡径 D_A を用いて求めた気泡間隔距離 L_D を ASTM C457 に定義される気泡間隔

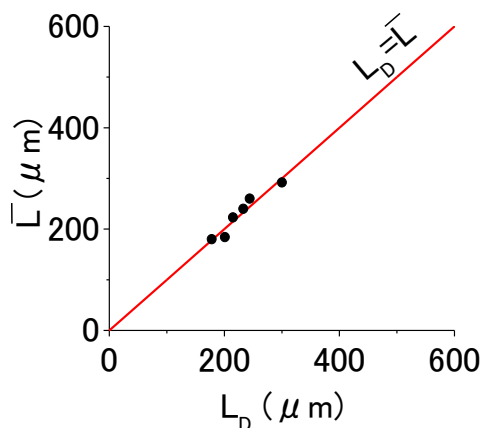


図 3-19 \bar{L} と L_D の関係

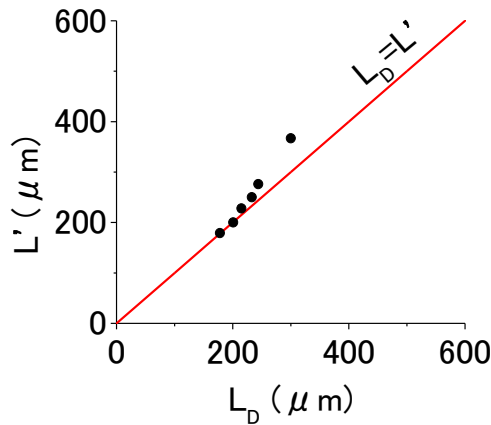


図 3-20 L' と L_D の関係

係数 \bar{L} と同義であるとして、 L_D を \bar{L} とみなすことが可能であると思われる。

図 3-20 は実際の気泡構造の気泡間隔特性値 L' と点過程から求めた気泡間隔係数に対応する距離 L_D の関係を示したものである。点密度が大きくなり気泡間距離が短くなるにつれて、両者の差が小さくなっている。これは、点密度が増加することによってセメントペーストマトリックス全体に気泡が空間的に均質に分布するようになり、コンクリート中の気泡の分布の局所的な変動性が小さくなるためと考えられる。すなわち、点密度が大きくなると、2次元空間にランダムに分布していた点の平均的な点間距離が、完全な均質配置である気泡間隔係数を定義する立方体格子配置の対角線の $1/2$ に近づくことを示唆すると考えられる。このことを確認するために、気泡点数を順次変化させて「R」を用いてセメントペーストマトリックスに仮想的な点過程を発生させるシミュレーションを行い、その都度最近傍距離分布関数を求めた。シミュレーションの対象とするコンクリートとして、一般的な空気量を有しているコンクリート (C2-②) を選択した。そのセメントペーストマトリックスに対して点密度 λ_A を変化させながら、それぞれ 199 回の 2 項点過程としてのシミュレーションを行った。そして、その点過程の最近傍距離分布関数から求められるメディアン距離 R_{50} と λ_A を変化させて得られる立方体対角線の半長 $R_c/2$ との比較を行った。

図 3-21 にメディアン距離と立方体対角線の半長 $R_c/2$ を点密度に対してプロットした結果を示す。点密度が小さい場合には両者の差は大きいですが、点密度が大きくなるとその差はかなり小さくなる。たとえば図 3-12 から一般的に適量とされる空気量が 3~7%の時の硬化後の気泡点密度は約 $0.8\sim 2.2$ 個/ mm^2 であり、その範囲でのメディアン距離と対角線半長の差は高々 $30\mu\text{m}$ (1 画素) 程度でしかない。以上より、2次元ランダム分布を代表する値として定義したメディアン距離は、気泡間隔係数を定義する立方体対角線の半長に相当する距離に近づく性質を持つことがシミュレーションにより確認されたことになる。

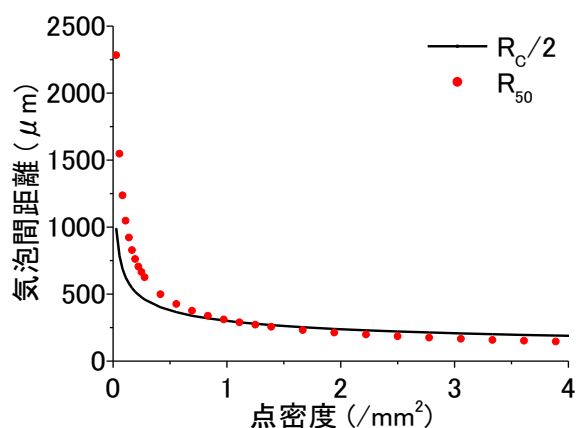


図 3-21 シミュレーションによる R_{50} と $R_c/2$ の一致性

3.8 結論

本章では、特別な装置や解析プログラム等を使用することなく、汎用統計解析ソフトウェア「R」を用いてコンクリート中の気泡の特徴の評価、再現を行った。さらに、実際の気泡の2次元ランダム分布から得られる特性値であるメディアン距離と、気泡間隔係数が想定する3次元規則配置との対応を、既成の単純なシミュレーション結果に基づいて検討した。その結果、その点間距離特性値が気泡間隔係数と関連付けられ、気泡間隔係数も推定できるなど、汎用ソフトウェアの使用が画像解析の高度化において非常に有用であることを示した。その他、本章で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 汎用統計解析ソフト「R」を用いたセメントペーストマトリックス領域への点発生シミュレーションによって、セメントペースト、モルタルおよびコンクリート中の気泡はいずれも気泡が存在できるセメントペーストマトリックス領域にランダムに分布していることが確認された。
- (2) コンクリート中の気泡は「R」を用いたセメントペーストマトリックス領域への点発生シミュレーションによってランダム性および気泡間距離を再現することが可能である。
- (1) 気泡を球として平均径を仮定すれば、点過程から推定した3次元での気泡間隔距離 L_D と従来の気泡間隔係数 \bar{L} は同義と判断され、値も一致する。
- (2) 点過程として最近傍距離分布関数から得られるメディアン距離は、点密度の増大とと

第3章

もに、気泡間隔係数の定義される立方体対角線の半長に近づくことがシミュレーションによって確認された。

- (3) 一般的な空気量の範囲では、メディアン距離と気泡間隔係数の定義される立方体対角線の1/2の距離との差は非常に小さい。よって、メディアン距離に基づいて簡単に決定できる気泡間隔特性値 L' は気泡間隔係数 L 同様の気泡構造を表すパラメーターになり得ると考えられる。
- (4) 汎用ソフトウェア「R」を用いたコンクリート中の気泡の空間分布評価は可能であり、点過程統計量による空間分布評価および点過程シミュレーションは今後、実務へも十分適用可能な従来手法に代わる簡易手法となり得ると示唆された。

第 3 章

第4章

観察倍率の異なるコンクリート断面画像中の 気泡分布特性の比較

4.1 序論

コンクリートへの AE 剤による空気連行に関して、耐凍害性を獲得するメカニズムから、空気量よりも気泡間の距離が重要であることは共通の認識である⁵⁸⁾。また、フレッシュ時に測定される空気量と硬化コンクリート中の気泡量が異なり得ることも古くから指摘されてきた⁵⁸⁾。このため、耐凍害性の判断のためには、硬化コンクリート中の気泡を観察し、気泡量だけでなく気泡粒子間の距離の簡便かつ合理的な評価が必要となる。耐凍害性の判断指標のひとつで、気泡粒子間の距離を規則配置に置き換えて得られる特性値が気泡間隔係数である。気泡間隔係数の測定手法は ASTM C457 に規定されるリニアトラバース法と修正ポイントカウント法が主である。規則配置を仮定する場合の気泡間距離は、自明なことながら、同じ体積率であってもその系に存在する気泡の個数に左右される。よって、ASTM C457 の一連の計測手順において最も注意すべき点として、走査線上の気泡の数を遺漏なく計数することの重要性が規定中にて言及されている。微細な気泡として寸法が 10 μm の気泡を識別できなければならないという要求から、最低でも 50 倍の観察倍率にてコンクリート表面を走査することが要求されている。

一方、欧州の規準である EN 480-11⁵⁹⁾も ASTM C457 の手順とほぼ同様の手順が採用されている。ただし、リニアトラバース法が推奨されていて、修正ポイントカウント法はリニアトラバース法と同等の精度が確保できるならば用いていい方法と位置付けられている。また観察倍率としては 100 倍が要求されていて、ASTM C457 より高い精度での観察を求めていることになる。ASTM C457 にせよ EN 480-11 にせよ、それらの顕微鏡像、すなわち拡大観察された像の気泡構造から得られる気泡間隔係数は、コンクリートの耐凍害性の評価やより効果的な混和剤の開発において貴重な知見をもたらしてきた。しかし、例えば高精細像の観察を要求するほど、供試体表面の前処理に高度な仕上げが必要となり、また、一連の計測を手動にて行うとすれば多大な労力と熟練を要する。よって、ASTM C457 の手順は日常のコンクリートの品質管理手段としてルーチンワーク的に実行できる性能評価手段にはなりにくい面があることも指摘されてきた。

1980 年代以降の汎用コンピューター普及と画像データの取得、解析法の発展にともない、ASTM C457 に規定された計測の実施にともなう作業労力の軽減も図られてきた。表面観察に関しては気泡の自動識別技術が確立され、現在では顕微鏡と標準的な自動解析ソフトウェア付のパーソナルコンピューターがセットになった計測機器として、国内外にて広く普及している⁶¹⁾。これにより、気泡計測作業は容易化かつ高精度化され、オペレーターによる計測値の変動も小さくなっている。しかし、このような作業改善がなされてはいても、基本的には ASTM C457 に規定された計測をオペレーターによるバイアスを可能な限り排除し

で、簡単かつ正確に行えるようにしているのであって、気泡分布、特に気泡間隔を特性化するパラメータとして、気泡間隔係数を求めていることに変わりはない。

一方、近年では点過程理論をコンクリート中の気泡に適用した評価が行われ、セメントペースト中の気泡はランダムに分布されていること⁶²⁾や、モルタルおよびコンクリート中の気泡は骨材の存在によって気泡の分布が制限されていることが明らかになった^{56)、63)}。さらに、気泡間隔係数に代わる実際の気泡分布から得られる気泡間隔特性値 L' を提案し、従来の気泡間隔係数に代わる特性値になることを目的としていくつかの検討がなされている^{19)、20)、64)}。図 4-1 に低倍率画像から求めた気泡間隔特性値と気泡間隔係数を示す⁶⁴⁾。図のように気泡間隔特性値と気泡間隔係数に非常に良好な相関関係が見られ、数値の差も大きくはない。図 4-2 に気泡間隔係数および気泡間隔特性値とスケーリング試験の対応を示す⁶⁴⁾。気泡間隔特性値はスケーリング量とも非常に良好対応が見られ、気泡間隔係数を用いた場

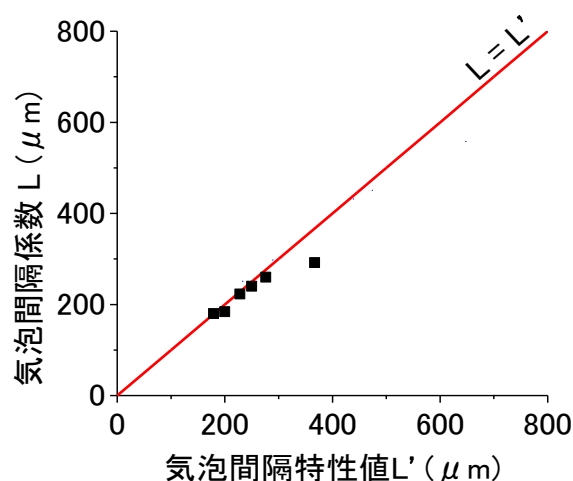


図 4-1 気泡間隔特性値と気泡間隔係数の関係⁶⁴⁾

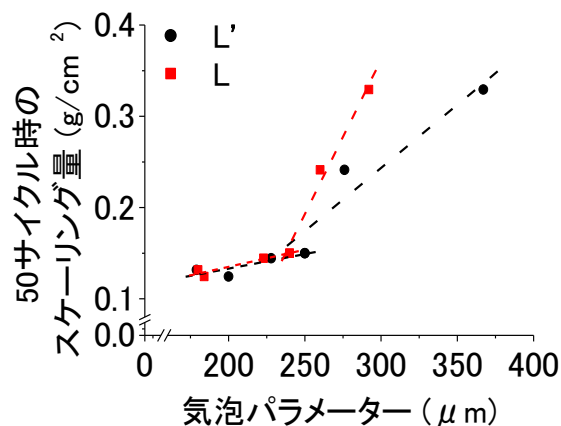


図 4-2 気泡間隔特性値と気泡間隔係数の関係⁶⁴⁾

合と同様の判断ができそうである。以上のように、気泡間隔特性値は気泡間隔係数に代わる特性値となり得ると期待されている。

第3章では、気泡解析のために高度な解析用プログラムの開発や数値解析テクニックの修得は不要であって、信頼できるフリーソフトウェアである「R」にて提供されるパッケージ¹⁸⁾を用いれば、簡単に気泡空間構造の解析を行うことができることを示した。また、作業時間が著しく短いことも特長であり、この点からも実務への導入の可能性が高いことを述べた。これらの成果は、スキャナーで取得した低倍率画像に対して、点過程としての取り扱いにより求めた特性値と、その同じ画像に対して ASTM C457 の定義に基づく気泡量と気泡間隔係数を求めた場合の距離特性の同値性を主張しているのである。しかし、前述のように気泡観察では 50 倍以上の高倍率での計測が ASTM C457 により規定されており、低倍率画像から得られた気泡分布に関する知見は、ASTM C457 の手順に従った計測結果と比較したものではなかった。すなわち、ASTM C457 に規定された観察倍率にてコンクリート表面を観察し、逐次計数していくという従来の手順に基づいて得られた気泡量や気泡間隔係数との一致性を主張するものではなかった。

前述のように、コンクリート中の気泡観察では狭い視野で 10 μm 程度の気泡を識別できなければならず、これを満足する画像を取得することは可能だが、それを ASTM C457 に規定された面積に対応する数を取得するとなるとかなりの労力を要し、必ずしも実践的とは言えない。一方、既往の研究のように、市販のスキャナーで得られる低倍率画像（1 画素あたり 30 μm 程度）を 10 枚程度計測して得られた気泡構造が、ASTM C457 に規定される倍率および分解能にて得られた気泡構造と対応することが示唆されれば、気泡観察における労力はかなり軽減され、気泡構造の把握はより実用的になると期待される。そこで本章においては、低倍率画像中の気泡を点過程として評価して得られる空間構造や距離特性値⁶³⁾と、ASTM C457 の規定に従ってより高倍率の画像に対して求められた気泡配置や気泡間隔係数の対応を明らかにすることを目的としている。特に、全く異なる気泡の空間分布と異なる幾何学特性を想定して両者の対応を検討することの意味に注意し、倍率の相違による気泡粒子の同定と空間分布のランダム性の現れ方の観点から、低倍率画像の気泡分布構造を点過程として定量的に評価することの有用性について論ずる。

4.2 使用材料，供試体の配合および作製

本章にて使用したコンクリートは，日本コンクリート工学会研究委員会「コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会 TC141A（委員長：濱幸雄室蘭工業大学教授）」評価ワーキンググループにて実施された硬化コンクリートの気泡組織計測に関わるラウンドロビン試験に用いられたものである⁵⁸⁾。委員会活動にて作製した模擬構造体作製のレディミクストコンクリートを使用して，円柱供試体（直径100mm，高さ200mm）を作製している。そのコンクリートに使用された材料およびコンクリートの配合を表4-1，表4-2にそれぞれ示す。コンクリートの目標スランプは土木用配合 SL8 の $8\pm 2.5\text{cm}$ と建築用配合 SL18 の $18\pm 2.5\text{cm}$ の2種類であり，空気量はともに4.5%以上を目標としている。実際にフレッシュ時にて計測されたスランプ値と空気量（A）を表4-2に併せて示す⁵⁸⁾。

表 4-1 コンクリートの使用材料

材料名	摘要
水	上澄水 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$
セメント	普通ポルトランドセメント密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材 (3種類を混合して使用)	砕砂1 表乾密度 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ ，FM=3.00 山砂 表乾密度 $2.58\text{g}/\text{cm}^3$ ，FM=2.00 砕砂2 表乾密度 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ ，FM=3.0
粗骨材	碎石 最大寸法20mm 表乾密度 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ ，実積率60.0
混和剤	AE減水剤（標準形）（主成分：リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩） AE剤（主成分：変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤）

表 4-2 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	S/a (%)	目標スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)						フレッシュ性状	
					W	C	S	G	AE減水剤 (C.wt%)	AE剤 (C.wt%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
SL8	55	48.4	8 ± 2.5	4.5~	167	304	881	950	1.1	0.002	10	6.7
SL18	55	49.3	18 ± 2.5	4.5~	185	337	860	894	1.1	0.002	19.5	6.3

表 4-3 ラウンドロビン試験結果

	配合	空気量 (フレッシュ) (%)	空気量 (硬化) (%)	トラバー ス全長 (mm)	全弦 長 (mm)	気泡数 (個)	平均 弦長 (mm)	気泡個数 密度 (個/mm)	気泡間隔 係数 (mm)
全機関平均	SL8	6.7	6.1	2555	155	944	0.165	0.37	0.178
	SL18	6.3	6	2549	154	775	0.2	0.3	0.228
代表機関	SL8	-	5.8	2468	142	935	0.152	0.38	0.174
	SL18	-	6.2	2432	151	778	0.194	0.32	0.212

打ち込み後 24 時間にて脱型し、14 日間の水中養生 (20°C) が行われた。代表研究機関にて厚さ 20mm 程度の円板を供試体中央部から切り出し、表面研磨を行っている。その後、ラウンドロビン試験参加機関にその試料が送付され、同一試料にて ASTM C457 のリニアトラバース法を用いて気泡計測が行われている。5 研究機関、8 名の技術者により実施された気泡計測結果の平均値と、そのうちの代表研究機関 1 つの実測結果を表 4-3 に併せて示す⁶⁵⁾。なお、本ラウンドロビン試験において用いられたコンクリートの粗骨材の最大寸法は表 4-1 に示すように 20mm である。ASTM C457 の規定によれば、最大寸法 19mm のときは走査面積 71cm² 以上、トラバース全長 2286mm 以上が要求され、最大寸法 25mm ではそれぞれ 77cm² 以上、2413mm 以上が必要とされる。参加各研究機関では、切り出した円板の上下 2 断面を用い、またトラバース線間のピッチを細かく取るなどして、この規定を満足するようにして気泡計測が行われている^{58) 65)}。以降、本章での結果および考察は表 4-3 の全機関平均および代表機関のデータを使用して論ずる。

本章ではこのラウンドロビン試験にて用いられた 2 つのコンクリート供試体の提供を受け、中央部に近い側から厚さ 10mm 程度の薄板をそれぞれ 5 枚ずつ切り出し、これを気泡観察試験体とした。なお、画像取得および画像解析手順は第 3 章 3.3 と同様の手順にて行った。さらに、点過程統計量の計算および気泡間隔係数の計算は第 3 章 3.4 および 3.5 と同様の手順にて行った。

4.3 リニアトラバース法にて求められる平均弦長からの点密度の計算

リニアトラバース法では気泡を単一寸法球 (直径 D_V) の集合と考えている。コンクリートの断面にて規定の走査線全長になるように、複数の走査線のあるピッチで複数引いたとき、気泡を横切る長さの平均値 (平均弦長 \bar{l}) と単一寸法の気泡球の半径 R との間には、次式の関係がある⁷⁾。

$$\bar{l} = \frac{4}{3}R \quad (4-1)$$

すると、気泡の直径 D_V は $1.5\bar{l}$ となり、この寸法の気泡球が多数存在して、全空気量体積 V_A に達している状態を仮想的に考えている。単位体積のコンクリート中に存在する気泡数を n とすれば、

$$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{1.5\bar{l}}{2}\right)^3 n = V_A \quad (4-2)$$

よって、コンクリートのペースト率 $p(\%)$ のとき、セメントペーストマトリックス単位体積当たりの気泡数 N_V は、次式にて与えられる。

$$N_V = \frac{n}{pV_c + V_A} \quad (4-3)$$

ここに、 V_C はコンクリートの体積であり、 $V_A/V_C=A$ である。気泡が単一寸法の直径 D_V の球であることを考え、DeHoff & Rhine 式 (第 3 章式(3-6))⁵⁹⁾を用いると、単位体積当たりの気泡数 N_V から、単位面積当たりの気泡数 N_A 、すなわち気泡点密度 λ_A が求められる。

$$N_A = E[H]N_V \quad (3-6)$$

ここに、 $E[H]$ は切断面に垂直な方向への粒子の平均投影高さであり、単一寸法球を考える場合には、 $E[H]=D_V$ となる (第 3 章式(3-7))。

4.4 結果および考察

4.4.1 リニアトラバース法が仮定する気泡空間構造

表 4-4 にリニアトラバース法の平均弦長と空気量の評価値から計算される単一寸法の気泡球の個数密度を示す。コンクリート SL8 ではセメントペースト 1mm^3 中に直径が約 0.23mm の気泡球 29 個が規則的に配置、充填されているとする仮想的な空間構造に置き換えられて

表 4-4 リニアトラバース法が想定する気泡空間の特性

配合	平均弦長 \bar{l} (mm)	気泡直径 D_V (mm)	気泡個数密度	
			N_V (個/mm ³)	N_A (個/mm ²)
SL8	0.152	0.228	29	6.61
SL18	0.194	0.291	13.6	3.95

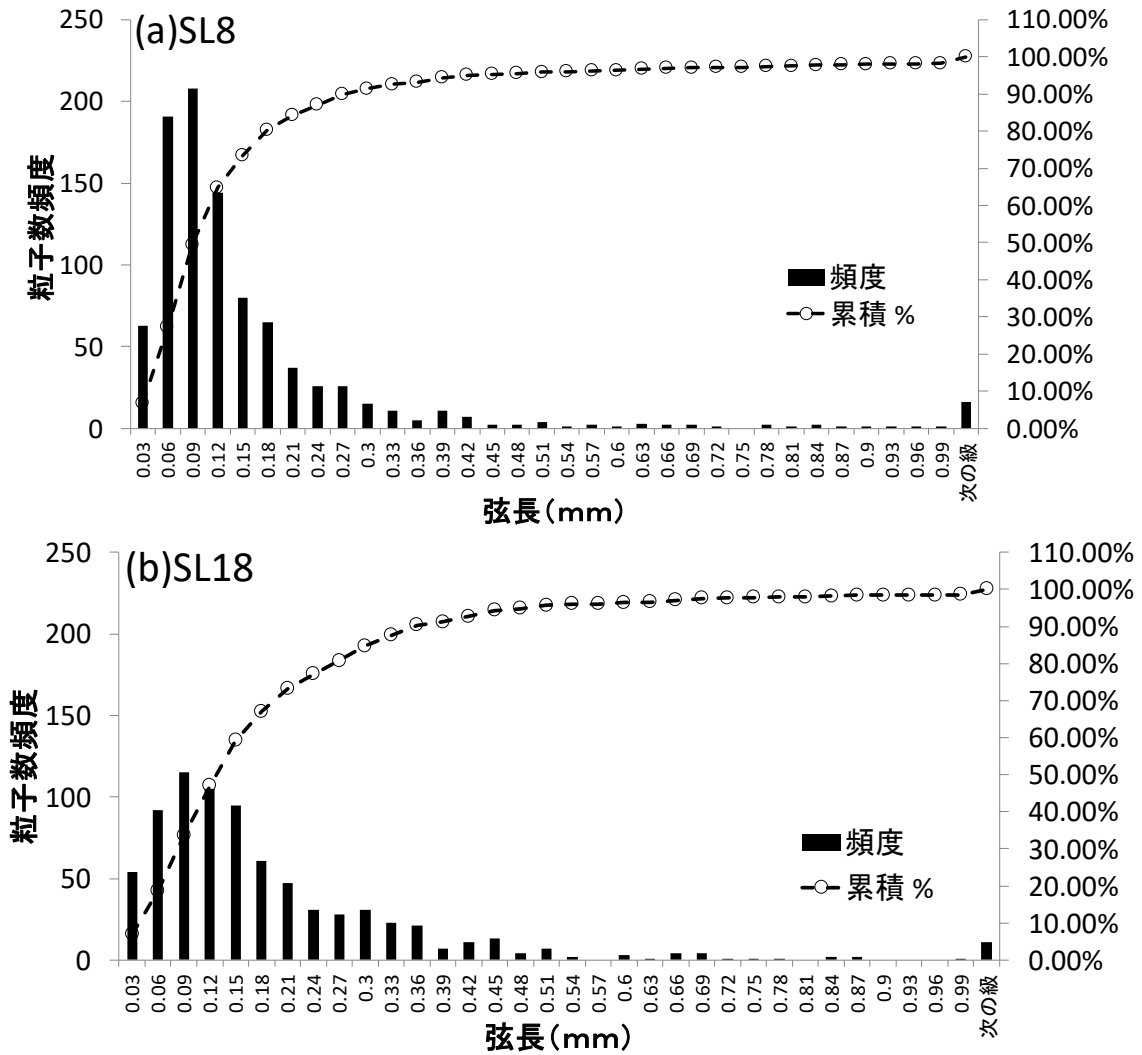


図 4-3 弦長分布ヒストグラムと累積弦長分布曲線

(a) SL8 (b) SL18

いることになる。一方、コンクリート SL18 では想定する気泡径が約 28%大きくなり、これにともなって単位体積当たりの気泡数は約 1/2 程度にまで大きく減少している。また、表 4-2 および表 4-3 に示したように、硬化コンクリート中の空気量として計測された値の差は

高々0.1～0.4%しかなく、両コンクリート中にはほぼ同程度の空気量が連行されているが、気泡の個数には大きな差があることになる。よって、両コンクリートにおいてほぼ同量の気泡体積を実現しているが、気泡組織としては大きく異なることを、仮想的な気泡球の格子配置の相違として考慮していることになる。

図 4-3 はそれぞれのコンクリートにて計数された弦長分布を示したものである。両コンクリートとも最頻階級は 0.06mm～0.09mm の区間であるが、コンクリート SL8 の方が狭い弦長範囲に集中する傾向が認められ、全体としてより小さい気泡球の集合により気泡構造が形成されていることを示している。しかし、その一方において、平均弦長から求められた単一寸法の気泡球の直径よりも大きな弦長が、両コンクリートにおいて多数観察され、個数としては 10%程度にも達する。ある弦長はその長さ以上の直径を持つ球が任意の位置で切断された場合にしか生じない。また、平均弦長に基づいて求めた単一寸法球の直径以上の大きさの弦長の和を考えたとする、その弦長和の全弦長和に対する割合はいずれのコンクリートにおいても 50%程度にも達する。よって、単一寸法球系では想定されない大きな気泡が、実際の気泡構造中の空気量として大きな割合を占めることになり、この空気量相当分が小さな気泡に換算されて個数に反映されていることになる。換言すれば、ASTM C457 の気泡間隔係数の計算では気泡数が重要な要因になるが、その計算値に基づき仮定される気泡の数は、実際の気泡分布とは全く異なることを示している。

4.4.2 点過程としての気泡の空間分布

図 4-4 に等倍のスキヤナー画像にて同定された気泡の点過程としての最近傍距離分布関数を示す。両コンクリートとも距離が～300 μ m 程度までは気泡自身の大きさがあるために、気泡重心点が互いに近寄ることはできない。そのため、完全にランダムな分布であるポアソン過程を表す関数の下方に最近傍距離分布関数はプロットされ、気泡組織としては規則配置（反撥性配置）とみなされる。しかし、この距離範囲を過ぎると骨材の影響が現れ、凝集側の分布を示す。また、関数値はコンクリート SL8 の方が大きくなっており、最近傍点をより近くに見出す確率が高いことを示す。このことは、リニアトラバース法の結果にて SL8 の気泡の方が小さくかつ個数が多いこととも矛盾しない。

表 4-5 にスキヤナー取得画像中の点過程として評価したときの気泡の特性を、一覧にして示す。低倍率の画像からの評価値であるため、表 4-4 の値の取得条件に比べると画像分解能は低くなる。これより、微細な気泡は同定されないことが予想されたが、実際に計測された空気量はリニアトラバース法の計測結果よりも大きくなっている。点密度にて示される

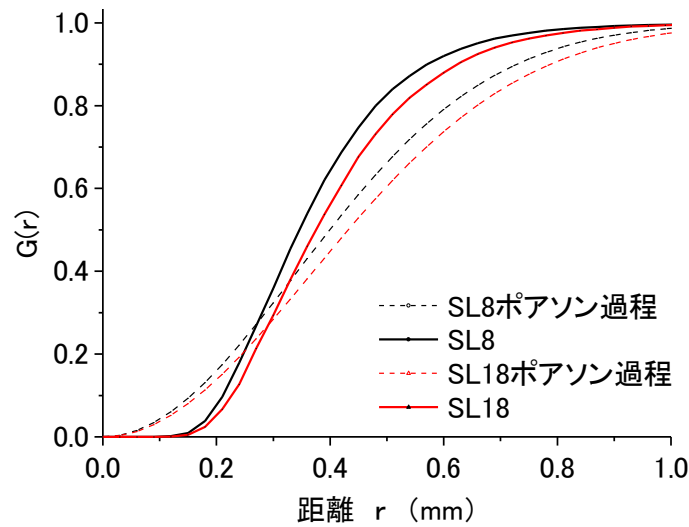


図 4-4 気泡の最近傍距離分布関数

表 4-5 点過程として求めた気泡特性

配合	空気量A (%)	点密度 λ_A (個/mm ²)	平均気泡径 D_A (mm)	メディアン距離 R_{50} (mm)	気泡間隔特性値 L' (mm)	気泡間隔係数 L (mm)
SL8	6.8	3.48	0.178	0.346	0.257	0.233
SL18	6.7	2.93	0.205	0.375	0.272	0.254

気泡個数と気泡径の大小関係も表 4-4 と同様であり、観察倍率が異なっても、全体としてコンクリート SL8 の方が小さい気泡が多数存在する系であることが点過程の特徴としても表れている。なお、2次元断面に現れた円の平均気泡径は、リニアトラバース法が仮定する単一球寸法よりも小さくおよそ 70%程度の大きさである。

図 4-5 に点過程として評価された気泡の距離特性値 (表 4-5) とリニアトラバース法の気泡間隔係数の全機関平均値 (表 4-4) との対応を示す。明らかに、気泡を点過程としてみなして求めたいずれの距離特性値も、リニアトラバース法の気泡間隔係数よりも大きい。しかし、画像解析による面積法にて求めた気泡間隔係数とリニアトラバース法の気泡間隔係数の差は、コンクリート SL8 と SL18 でそれぞれ 0.055mm および 0.026mm と画素にして 1~2 画素程度でしかなく、その大小関係もリニアトラバース法のそれと一致している。また、点過程として考えたときの距離特性値 L' は、気泡が完全ランダムに分布しているときは²⁰⁾、最近傍距離分布関数と球状接触分布関数 (点過程に属さない任意の点から点過程の点までの距離を表す確率関数) との同値性³²⁾から、セメントペースト中の任意点から気泡表面までの距離を表し、気泡間隔係数と同じ物理的意味を持つ。このことは、第 3 章にてシミュレーションによって得られた結果と矛盾しない。さらに、この L' の値と面積法にて得られた気

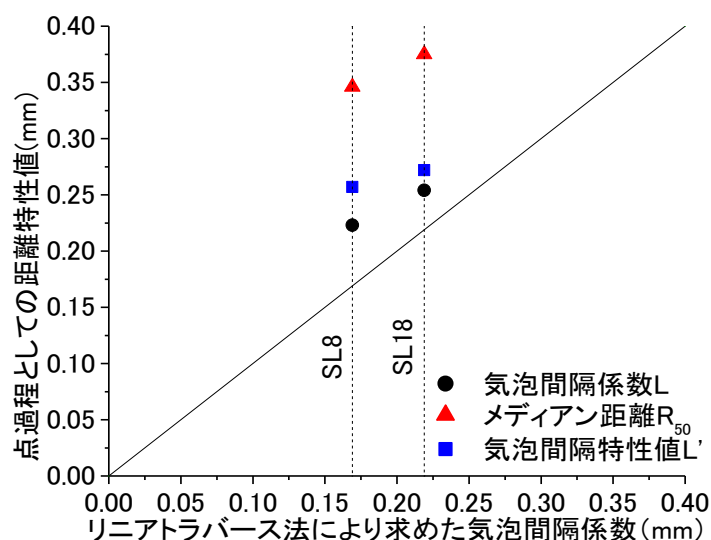


図 4-5 リニアトラバースと点過程法の距離特性値の対応

泡間隔係数との差も高々0.020mm程度である。また、点過程統計量から得られたメディアン距離とリニアトラバース法の気泡間隔係数の差は、コンクリート SL8 と SL18 のいずれにおいても大きいですが、大小関係は一致している。メディアン距離に平均気泡径を考慮した気泡間隔特性値ではその差は小さくなり、その差は、コンクリート SL8 と SL18 でそれぞれ 0.079mm および 0.044mm と画素にして 2 画素程度である。大小関係もリニアトラバース法のそれと一致している。気泡間隔係数は立方体格子の対角線の半長に気泡半径を引いた値であり、気泡径が考慮されている。一方、点過程統計量から得られる特性値も気泡径を考慮することでその値が気泡間隔係数値に近づくことが確認された。このことは点過程統計量から得られる特性値にも気泡間隔係数と同様に気泡径を考慮する必要性を示唆している。

4.4.3 リニアトラバース法にて等倍率を想定したときの気泡数と気泡間隔係数

図 4-5 に示した対応において、点過程としての評価では、気泡の分布はランダムであり、気泡の大きさは 2 次元断面内の円相当径の平均値で代表させている。一方、リニアトラバース法では、気泡の大きさは単一寸法球を仮定し、それが立方体格子状に配置した状態を考えている。よって、想定している空間構造が全く異なることになり、したがって気泡間距離も一致することはないと考えられる。しかし、2つの方法にて得られた特性値間に明確な対応が確認できるならば、長年の実績を有する気泡間隔係数との相互参照が可能になり、点過程の特性値はコンクリートの耐凍害性判断のパラメータとして用いることができると期待される。実際、図 4-5 の結果では大小関係が一致しているので、相互に矛盾のない対応の存在を予想させる。

表 4-6 30 μm 以下の弦長を計数しないリニアトラバース法による気泡空間の特性値

配合	平均弦長 \bar{l} (mm)	気泡直径 D_V (mm)	気泡間隔係数 L (mm)	気泡個数密度	
				N_V (個/ mm^3)	N_A (個/ mm^2)
SL8	0.161	0.242	0.18	24	5.81
SL18	0.207	0.311	0.234	11.3	3.43

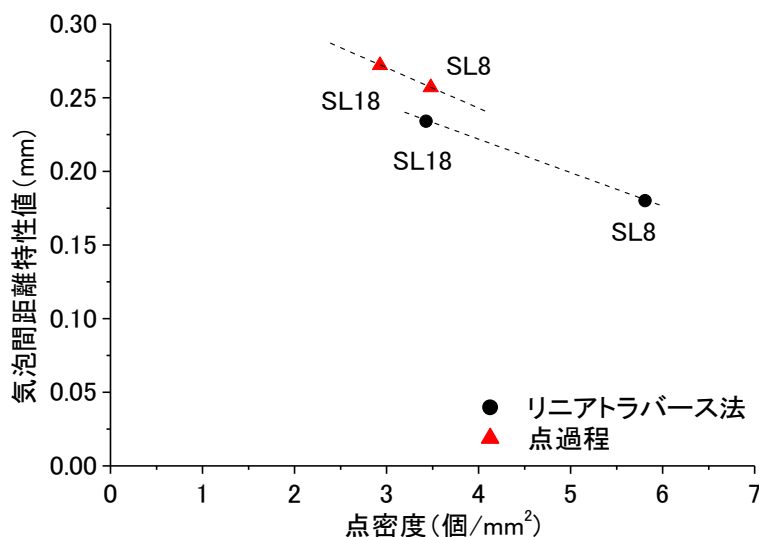


図 4-6 スキャナー取得と同じ低倍率を想定した場合の気泡数と距離特性の対応

本研究におけるスキャナーを用いた画像取得では、分解能が約 0.030mm であり、図 4-3 に示したようにリニアトラバース法による観察では、個数としては全観察弦長の約 7% の気泡が 0.030mm 以下である。したがって、もしスキャナー取得条件と同様の等倍観察を顕微鏡観察にて行ったとすれば、これらの弦長が観察されないことになり、その分だけ気泡体積、気泡個数は減少することになる。

表 4-6 に実測データにて、0.030mm 以下の弦長の気泡を減数したときの気泡空間の特性値を示す。全数を考慮した場合（表 4-3, 表 4-4）に比べて、平均弦長と気泡球の直径は大きくなり、気泡間隔係数も大きくなる。しかし、分解能の低下にともなう気泡数の減数を考慮したとしても、個数密度は表 4-5 に示した実際に観察された点密度よりも依然として大きい。

図 4-6 に同じ倍率（分解能）を想定したときの、気泡間距離特性値と点密度の対応を示す。点密度の範囲はリニアトラバース法と点過程法では大きく異なる。しかし、耐凍害性の判断に関して重要な特性と考えられる距離特性に着目すると、その変化率は両者にてほぼ等しい。点密度 1 の変化に対する距離特性値の変化は、リニアトラバース法の気泡間隔係数で 0.027mm/個、点過程の特性値 L で 0.023mm/個である。このことは、スキャナーにより簡

単に取得できる等倍の画像にて同定された気泡個数の変化が、従来の気泡間隔係数の決定における単一寸法の気泡数の変化と対応することを示すと考えられる。前述のように、リニアトラバース法においては、想定している気泡球よりも大きな気泡が多く存在しても、それをより小さい単一寸法の気泡へと置き換えて、同じ体積になるように換算して全体の気泡数が決定される。このため、実際の気泡数よりも多くの気泡数を仮定することになり、これが表 4-5 および図 4-5 の気泡数の増大として計数されることになる。しかし、そのような仮想的な個数を考えた系の気泡数の変化にともなう距離特性の変化、すなわち気泡間隔係数の変化が、ランダムな点過程の距離特性と対応することを示している。つまり、低倍率画像にて観察される点過程としての気泡数は、従来の気泡間隔係数を決定する系における気泡数と同等に気泡間距離特性を変化させると考えてよいようである。低倍率画像中にて点として視認される気泡の数が、そのままリニアトラバース法にて想定する気泡数と同等の指標になることは、気泡数の大小から直感的に気泡間隔係数と関連付けて気泡組織を判断することが可能となることを示唆し、実務上の簡便で有用な特性であると考えられる。

4.4.4 リニアトラバース法と点過程としての計測にて測定される気泡分布のランダム性の対応

リニアトラバース法では、気泡量と単一寸法の気泡球の気泡個数が決定された後、気泡間の距離特性を考える。このときには、気泡のランダムな分布特性は無視され、立方体格子状の規則配置に置換される。一方、点過程としての取り扱いでは、気泡の位置はそのまま評価され、ランダムな分布は距離を確率変数とする最近傍距離分布関数により考慮されている。したがって、気泡の空間分布や気泡間距離をランダム性の反映という視点で、両者を直接比較することできない。しかし、実際のリニアトラバース法の計測手順においては、気泡がランダムに存在することに関する物性値は記録として残される。リニアトラバース法における気泡分布のランダム性は、単位走査線長当たりの気泡数として報告されている。この値は走査線上にて気泡に出会うという事象を確率過程と考えたときの 1 次元のポアソン分布のパラメータであり、点過程としての取り扱いでは、そのパラメータを 2 次元のポアソン分布に拡張した点密度 λ_A が対応するパラメータになる⁶⁶⁾。

表 4-7 にポアソン分布のパラメータである 1 次元の気泡個数密度と、2 次元点過程の点密度を対比して示す。コンクリート SL8 が SL18 に比べて気泡径が小さく、気泡間隔係数が小さくなることは、1 次元ポアソン過程では単位走査線長当たりの気泡個数密度の増大として表れている。また全弦長を計数した場合も 0.030mm 以下の弦長を無視した場合も、両コン

表 4-7 ポアソン分布パラメータの比較

配合	リニアトラバース法		点過程
	全弦長を計数 (個/mm)	30 μ m以下の 弦長を無視 (個/mm)	2次元点密度 (個/mm ²)
SL8	0.38	0.35	3.48
SL18	0.32	0.3	2.93
SL18/SL8	0.84	0.86	0.84

クリートのポアソン分布のパラメータの比には大差はなく、SL18にて気泡に遭遇する事象がSL8よりもまれな現象であることを示す。一方、2次元の点密度について同様にパラメータの比を求めると0.84となり、リニアトラバース法の計測におけるパラメータ比とほぼ一致している。すなわちリニアトラバース法にて走査したときのランダム性と気泡発生頻度の差として示される2つのコンクリートの気泡系の空間分布の相違は、点過程としての取り扱いにおいて観察倍率は異なっても、スキャナー画像中の2次元画像内にて計数される気泡発生頻度差として相似的に評価できているようである。

コンクリート中の気泡は、図4-4に示したように参照空間（観察視野）として骨材を含めた全断面を考えれば、ポアソン分布ではない。しかし、セメントペーストマトリックスを参照空間とした場合には、気泡は完全にランダムに分布しているとみなせる²⁰⁾。よって、リニアトラバース法と本研究にて提案している点過程法の相違は、気泡を1次元のポアソン過程として評価するか2次元のポアソン過程としての評価を行うかの相違であって³²⁾、上述の同じパラメータ比が得られることは、気泡がランダムに分布していてそれらが適切に評価される限り、それらから得られる両者の特性値は相互参照でき、大小関係は保持されることを示している。リニアトラバース法とスキャナー観察では分解能が異なり、後者においては微細な気泡が同定されない。よって、点過程として考えた場合、スキャナー観察の点過程は元になる気泡の点過程の一部の点を間引いた（除去した）過程ということになる。そのようにして間引かれた後の点過程がランダム分布特性を有し、コンクリートSL8とSL18のランダム分布のパラメータ比が保持されていたことは、点を除去する条件である0.030mm以下の弦長を間引くという操作が、すべての点に関して一定割合の生存確率を考える単純な間引き（p-thinning）と等価であったことを示している³²⁾。すなわち、リニアトラバース法の倍率にて2次元観察ができていれば得られていたであろう点密度を λ_b とすると、両コンクリートともある割合pで気泡が残存した結果である $p\lambda_b = \lambda_A$ の点密度を持つ点過程がスキャナー画像中の気泡系ということになる。前述のように、0.030mm以下の弦長数が全体の7%

程度と大きくはなかったことから生存率 p は高いと考えられ、さらにランダム性が存在していた。よって、気泡のスキャナー画像を取得してその特性化を行うことは、ポアソン過程の分割という性質を用いて⁶⁷⁾、元となる過程の特徴を大きな割合で再現できる間引き後の過程の特性値を求めることになり、結果としてリニアトラバース法と矛盾しない結果を与えていると考えられる。

本研究にて述べた点過程としての評価法は、画像取得後の一連の手順の遂行において、作業時間を含めても高々数分にて一試料の評価が可能である。一方、リニアトラバース法は熟練技術者が手動で実施した場合で数時間、自動計測装置を用いた場合でも数10分を要するようである⁶³⁾。点過程法がリニアトラバース法と矛盾しない実用手段たりえることを考えたとすれば、この点においても優位な評価手段になりえるようにも思う。よって、今後より多くのデータを蓄積してリニアトラバース法の結果との対応を統計的な根拠をもとに明確にしていくことができれば、簡便な気泡分布評価法や耐凍害性判断指標の確立につながるものと考えられる。

4.5 結論

ASTM C457に規定されたリニアトラバース法と著者らが提案してきた低倍率画像を用いた点過程としての評価法を同じコンクリート試料に適用して、気泡空間分布および気泡間の距離特性を評価し得られた特性値間の対応を検討した。その結果、両手法で評価された結果が示す気泡構造に矛盾はなく、気泡の分布がランダムである限り、同等な結果を与えることが示された。本章により得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) リニアトラバース法の結果にて気泡間隔係数を求める気泡配置空間では、仮定される気泡球よりも大きな気泡の存在が相当数存在する。このため、計算上想定する気泡個数密度は、実際に断面にて観察される気泡個数密度よりも大きい。
- (2) リニアトラバース法の弦長分布測定結果に対して、等倍率観察を想定して気泡数を減数したとしても、気泡個数密度は実際の観察個数密度よりも大きく、大径の気泡を小径気泡に置き換えることの影響は大である。
- (3) 点過程として評価した気泡間隔特性値は、観察倍率と仮定される気泡寸法が異なっても、リニアトラバース法の気泡間隔係数との差は大きくはなく、配合による大小関係

も一致する.

- (4) リニアトラバース法にて計数される気泡密度の変化に対する気泡間隔係数の変化の割合は、点過程としての点密度の変化にともなう気泡間特性値の変化割合と等しい。よって、断面にて視認される気泡数は気泡間距離を考える上で有意な特性と考えてよい。

- (5) リニアトラバース法にて計測される気泡分布の1次元ランダム特性は、気泡を点過程とみなした2次元ランダム特性にて同様に再現されている。観察倍率と計数法が異なっても、コンクリート中にて気泡がランダムである限り、点過程法の結果はリニアトラバース法の結果の間引き過程として得られるようであり、両者は矛盾することはないと考えられる。

第 5 章

リニアトラバース法と点過程法を同一画像情報に適用して
評価した気泡間距離特性値の比較

5.1 序論

コンクリートの耐凍害性評価に Powers が提案した気泡間隔係数が採用されてから約 70 年経過するが、耐凍害性との対応があるという長年の実績から、気泡間隔係数をより簡単に計測できることを主眼においた研究が行われてきた。一方で、報告例は少ないが、気泡間隔係数のような規則配置ではなく実際の気泡分布から耐凍害性と対応できる指標の提案を試みがある。例えば、Lu ら⁶⁸⁾は気泡を粒子と表現し、従来の気泡間隔係数のような単一径ではなく、実際の気泡径分布を考慮した式を提案している。しかし、これらの報告の多くは骨材の配置を考慮していない。実際のコンクリート中の気泡は骨材の存在によってその分布を制限されている⁵⁶⁾。実際のコンクリート中の気泡の距離を把握するためには骨材の存在は無視できないと考えられる。

前章まで述べてきた点過程法では、気泡径は平均径で代表させるが、気泡間隔係数の手順では単一気泡径を仮定してはいない。また、分布のランダム性をそのままにした状態で評価していて、気泡間距離は 2 次元の確率過程の値として定義している。気泡間隔係数の定義のような格子配置などを仮定しないので、実際の気泡分布により近い状態で、気泡間の距離特性値を求めていることになる。さらに、その方法により求めた低倍率画像中の気泡間隔特性値が、その画像について求められる気泡間隔係数と線形的に対応する^{19), 20), 64)}。

一方、気泡観察とそれにとまなう距離特性の評価を、コンクリートの岩石学的検査 (Petrography) と見た場合、コンクリートの耐凍害性に関わる特徴を観察できていることが前提で、適切な倍率下で観察した気泡分布を評価することが基本となる。しかし、低倍率画像を用いた場合には、ASTM C457 が注意を喚起しているような例えば 10 μm 程度の微細な気泡を計数してはいない。換言すれば、同じコンクリートであっても、ASTM C457 に基づいて観察される気泡空間分布と、低倍率画像中のそれは異なる。点過程法の考え方そのものは、空間に分布する点群を確率過程として評価する一手法であるので、観察倍率に関わらず点群さえあれば適用できる。しかし、評価の対象である気泡分布構造が倍率によって見え方が変化するのであれば、ASTM C457 の規準に則って求めた気泡分布に対しても点過程法を適用し、気泡間隔特性値 L' と従来の気泡間隔係数 L との対応を明確にしておくことが、点過程法による評価の普遍性を示すという点で重大な意義を有する。

点過程法による気泡間隔特性値 L' に関する研究においては、スキャナーで取得した低倍率気泡画像に対して、点過程法の気泡間隔特性値 L' と ASTM C457 の一部手順の改良版である面積解析法⁷⁾により求めた気泡間隔係数 L を測定し、両者の比較を行った。第 3 章では、スキャナーで取得した気泡の空間分布を、汎用ソフトウェア「R」を用いて簡便に評価および再現を試み、点過程の適用が容易であることを示した⁶⁹⁾。第 4 章では、ASTM C457 の手

第5章

順に従って高倍率観察下にてリニアトラバース法を実施して求めた気泡間隔係数 \bar{L} と、同じコンクリート供試体から低倍率画像を別途取得し、それに点過程法を適用して求めた気泡間隔特性値 L' の比較を行った⁷⁰⁾。その結果、両手法で評価された結果が示す気泡構造に矛盾はなく、気泡の分布がランダムである限り、同等な結果を与えることが示された。しかし、これらは気泡間隔特性値と気泡間隔係数を低倍率画像から計測したのも同士での比較および、低倍率画像から計測した気泡間隔特性値と ASTM C457 に規定された倍率および手順で取得した気泡間隔係数を比較したものである。つまり、リニアトラバース法および点過程法を ASTM C457 に規定された高倍率画像に対して適用していない。よって両手法を ASTM C457 の規定を満足する高倍率画像に対して適用し対応を考察することは、点過程法の有用性を評価するうえで有意義であると考えられる。

本章では、ASTM C457 に規定された条件を満足するように顕微鏡像について、リニアトラバース法と点過程法を適用し、気泡間隔係数 \bar{L} と点過程法で求めた気泡間隔特性値 L' の比較を行うこと目的とする。所定の配合のコンクリートについて、ASTM C457 に規定された条件を満足する精細画像データ（高倍率顕微鏡像）を用い、気泡の空間分布の特徴を空間統計量の観点から明らかにする。さらに、その画像に対してリニアトラバース法（自動法）と面積解析法を実施して得られた気泡間隔係数 \bar{L} と、点過程法による気泡間隔特性値 L' との比較を行う。また、同じ断面の低倍率画像を取得して気泡間隔特性値 L' を同様に求め、高倍率画像にて求めた気泡間隔特性値 L' との比較を行い、簡便に気泡間隔を評価する方法としての点過程法の妥当性について論ずる。

5.2 使用材料，供試体の配合および作製

セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）を使用した。細骨材は大井川水系陸砂（表乾密度：2.58 g/cm³，吸水率：2.22%），粗骨材には青梅産砂岩碎石（表乾密度：2.66 g/cm³，吸水率：0.52%，最大骨材寸法：20mm）を使用した。また、JIS A6204 の I 種適合の変性ロジン酸化物系の AE 剤を使用した。コンクリート供試体（100mm×100mm×400mm）打ち込み後 24 時間にて脱型し、材齢 21 日まで水中養生（20℃）を行った。使用したコンクリートの配合を表 5-1 に示す。

表 5-1 コンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	目標 スランプ (cm)	設計 空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					フレッシュ 時空気量 (%)
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤 (C.wt%)	
50	45	10±2	3.0	165	330	813	1027	0.004	3.7
50	45	10±2	4.5	165	330	797	1003	0.007	5.0
50	45	10±2	6.0	165	330	779	982	0.01	6.5

5.3 画像取得および画像解析手順

5.3.1 ASTM リニアトラバース法による計測

所定材齢にて供試体から 100×100×30mm 程度の板状試料を切り出し、その表面を精細研磨した後に洗浄および乾燥を行った。研磨面中央部 (60×60mm) を計測対象領域とし、高精度 CCD カメラを用いて研磨面のグレースケール高精細画像を取得した。なお、画像取得の際は、対象領域を 11×11=121 個の小分画 (1 分画は約 6.14mm×6.14mm, 2048 画素×2048 画素, 分解能は 3μm) に分割して取得した。それらの個々の分画画像取得時にて、順光と斜光照射を繰り返し行い、陰影の差分により気泡を自動的に抽出した。取得した分画画像および自動検出された気泡の 2 値化抽出の例を図 5-1 に示す。また、一部の気泡は分画画像の周縁上に存在していて、全断面が現れていないものが認められる。しかし、本解析においては、このような気泡数は全気泡数に比べて小さく、トラバース線で走査される確率も高くないと判断し、エッジ補正等を行っていない。同定された気泡について骨材上の凹

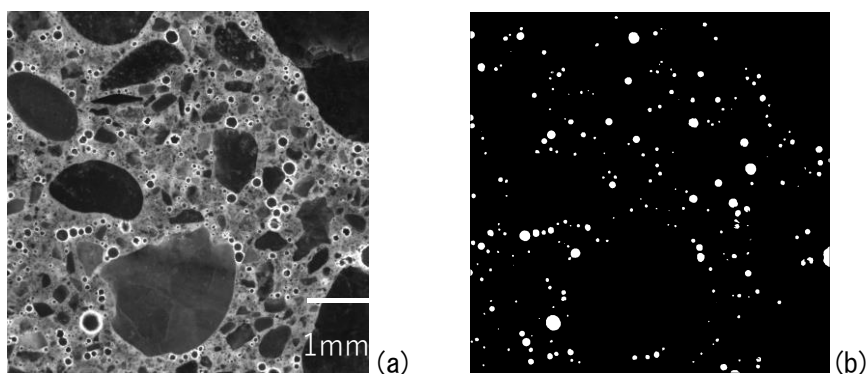


図 5-1 小分画高精細画像と気泡の抽出

(a) 原画像 (b) 気泡を抽出した 2 値画像

第 5 章

部などの誤抽出を補正し、残った気泡の数、個々の径 (D_i : 円相当径) およびその中心座標 $x_i(i=1, \dots, j, \dots, n)$ を画像解析より求めた。

リニアトラバース法の最大骨材寸法によって規定される最小トラバース長を満足するように、1 分画内のトラバース線の本数 4 本を最小数とした。さらに気泡検出数を増やすことを意図して、これを 8, 12 および 16 本と変化させた。よって 121 分画での全トラバース長は、画素寸法を基に換算すると、それぞれ約 2970, 5940, 8920mm および 11890mm である。各分画内にてトラバース線の数で分画全体を代表させるようにしてトラバース線の間隔を適当に調整して 2 値化画像上に配置し、画像解析によって各トラバース線上の気泡数および気泡弦長を自動計測とした。トラバース線を配置する試行の繰り返し数は 5 回とした。また、円相当径で 2mm 以上の空隙部分はエントレインドエアアールではないと判断して、これを横断する弦は計数から除いた。

5.3.2 点過程統計量の算出

5.3.1 にて取得した 121 分画画像を重なりのないように並べて貼り合わせ (図 5-2(a)), 解析対象領域全体とした。各気泡の重心を空間点とみなし、その座標 $x_i(i=1, \dots, j, \dots, n)$ の集合を点過程 $X = \{x_i; i=1, \dots, n\}$ とした。点過程 X に対して、第 3 章 3.4 と同様の手順で点過程統計量を求めた。

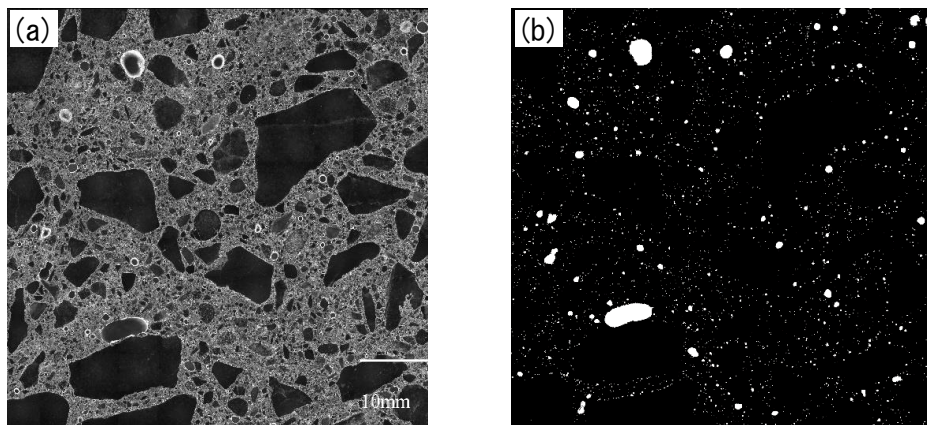


図 5-2 取得した画像の一例

(a) : 高精細画像, (b) : 2 値化画像

5.4 結果および考察

5.4.1 気泡量の相違

図 5-3 はフレッシュおよび硬化コンクリートの空気量の測定結果を示したものである。硬化コンクリート中の空気量はフレッシュ時の測定空気量よりも小さく、リニアトラバース法で求めると約 1.2~1.6%程度小さくなっている。面積解析法で空気量を求めると、空気量はさらに小さく評価され、フレッシュ時の計測値よりも 2.0~2.5%程度小さな値が得られている。このような空気量の低下は、分解能の制限による微細気泡の非検出の影響に加えて、コンクリートの打込みと締固め中の損失によると考えられる。目標空気量 3.0%の配合のコンクリートにおいては、硬化後の空気量は2%以下となり、エントラップトエア－相当の空気しか導入されていなかったことになる。

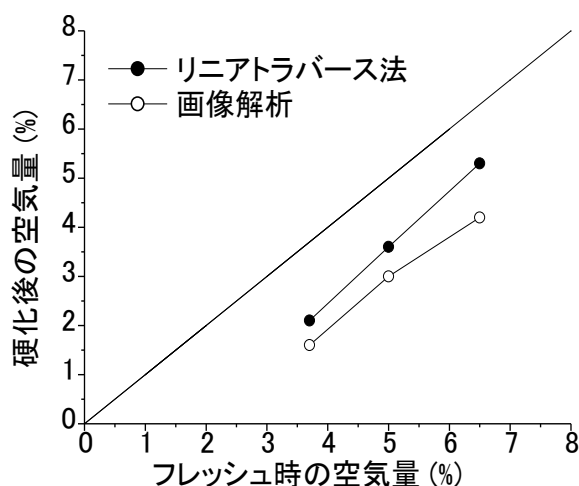


図 5-3 フレッシュおよび硬化コンクリートの空気量の比較

5.4.2 気泡間隔係数と気泡間隔特性値の比較

図 5-4 は気泡の最近傍距離分布関数を示したものである。気泡自身の大きさがあるため、短距離内には他の気泡の中心は存在できない。そのため、関数値はいずれの配合でも最大で約 10 μ m 程度の横軸切片値を持っている。距離 100 μ m 程度までは各空気量の関数間に大きな差は認められない。しかし、空気量が増すと気泡個数が増え、短距離にて最近傍点を見出す確率は高くなる。そのため、その後は空気量の多い配合ほど短距離にて関数値が大きくなる。また、必ず最近傍点を見出せることを意味する累積確率 1 の距離はより短距離

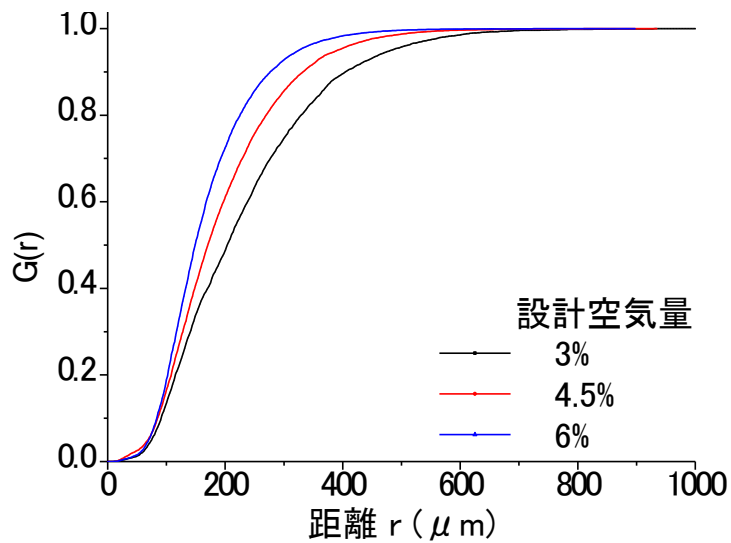


図 5-4 コンクリート中の気泡の最近傍距離分布関数

になって、関数は早く収束している。

図 5-5 はリアトラバース法と面積解析法にて求めた気泡間隔係数 \bar{L} と点過程法にて求めた気泡間隔特性値 L' の対応を示したものである。空気量 3.0%の配合では、リアトラバース法による気泡間隔係数は約 280 μm と大きく、一般に推奨される値の上限に近い値である。リアトラバース法により求めた気泡間隔係数は常に気泡間隔特性値よりも大きな値を示し、特に空気量 3.0%のコンクリートではその差は約 100 μm と大きい。しかし、設計空気量が大きくなると気泡間隔係数と気泡間隔特性値の差は小さくなり、約 50 μm 程度にまで減少している。これに対して、式 (3-7) を使用して面積解析法にて気泡間隔係数を求めた場合は、気泡間隔係数 \bar{L} と気泡間隔特性値 L' の関係は等値線の近傍にプロットされ、その差は最も大きな場合でも高々 10 μm 程度である。よって、両者はほぼ一致しているとみなしてよいと思われる。

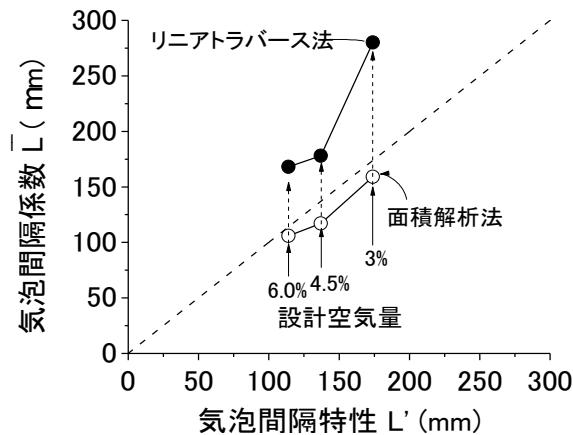


図 5-5 気泡間隔係数 \bar{L} と気泡間隔特性値 L' の対応

表 5-2 異なる方法で得られた気泡数

画像	解析法	得られた気泡情報	設計空気量 (%)		
			3	4.5	6
高精細CCDカメラ (高画質)	リニアトラバース法	気泡数	359	779	1013
		弦数密度 (/mm)	0.131	0.284	0.369
	画像解析	気泡数	7604	14719	18959
		点密度 (/mm ²)	2.11	4.09	5.27
スキャナ画像 (低画質)	画像解析	気泡数	5611	6300	8288
		点密度 (/mm ²)	1.56	1.75	2.30

リニアトラバース法にて気泡間隔係数を求める場合、ASTM C457 においては骨材寸法に応じた最小トラバース長が規定されている。本研究において採用したトラバース長約 2750mm は、最大骨材寸法 37.5mm のときのトラバース長 2540mm をも上回るもので、最大骨材寸法 20mm のコンクリートとしては十分な長さである。しかし、表 5-2 に示すように、トラバース線上にて計数された気泡数は設計（目標）空気量 3.0% の場合では 359 個で、最も空気量の多い 6% の配合でも 1000 個程度である。一方、画像解析にて気泡間隔係数を求めた場合、最も空気量の少ない空気量 3.0% の配合で約 7600 個、6% の配合は 19000 個の計数に基づいて計算されている。Snyder ら⁷¹⁾は気泡の計数とリニアトラバース法にて求められる各気泡パラメーターの関係について詳細に検討している。彼らは気泡数としては約 1000 個以上が計数されれば、気泡間隔係数の変動係数は±2%程度で、それ以上計測数を増やしても大きな変化はなく、ほぼ一定の変動係数を示すと報告している。このことを基準に考えると、図 5-5 の結果には、必要トラバース長の規定は満足していたとしても、リニアトラバース法の計測では気泡数が十分であったとは言えない計測も含まれている。十分な計数とされる 1000 個程度の気泡同定ができているときの気泡間隔係数と気泡間隔特性値との差は小さい。その一方において、面積解析法で気泡間隔係数を求めた場合は気泡数の条件を十分に満足していて、点過程法の気泡間隔特性値は、それらのより信頼性の高い計測結果に基づいて計算された気泡間隔係数の値と一致していたことになる。

5.4.3 弦数密度と点密度の対応

上述のように、ASTM C457 のリニアトラバース法に則って計測を行うとき、その取得に細心の注意が要求される重要なパラメーターは、トラバース線上にて計数される気泡数である。この値の大小によって、気泡間隔係数の算出に仮定される単一寸法の気泡球の直径が決定され、また、その球が多数存在することによって全空気量に到達すると考えるので、

第5章

結果としてセメントペーストマトリックス全体に仮想的に格子状配置する気泡数も決定される。このときの立方体格子対角線長が気泡間隔係数に対応する距離となるので、気泡間隔係数も同時に決定されていることになる。この気泡数が重要であることは ASTM C457 中においてもトラバース線上の単位長さ当たりの密度（弦数密度）に関して、耐凍害性付与の目安になる値として 315 /m として言及されている。これに従うならば、表 5-2 に示したように、空気量 4.5%の配合も、フレッシュ時の空気量計測では一般的に必要とされる空気量の条件を満足しているが（表 5-1）、弦数の要求を必ずしも満足しない気泡系になっているという判断もできる。

以上のことはトラバース線上にて気泡に出会うというランダム事象の確率を表すパラメーターが重要であることを意味し、それは単位トラバース長当たりの弦数として、1次元のプロブである直線を用いて得られる計数パラメーターによって表される。これに対して、点過程法ではそれを単位面積という 2次元のプロブを用いて評価した点密度が、任意の位置にて気泡が存在する確率を表し、ランダムな分布特性の評価のパラメーターとなる。

図 5-6 に弦数密度と点密度の対応を示す。両者の間には極めて良好な相関性が存在している。よって、トラバース線を顕微鏡下において、それに載った気泡弦長を逐次記録するという労力を要する作業を、単純に全体の気泡個数を求める作業に置き換えたとしても、従来法のトラバース線にて検出される気泡の確率過程としての存在のランダム性は、点密度に線形的に反映されているとみなせる。換言すれば、リニアトラバース法の計測にて仮定していた気泡と遭遇する確率のランダム性が、次元の異なるプロブを用いて^{22),69)}、改めて確認できたことにもなる。

参照空間内にある気泡のような粒子の計数は、一般的な画像解析ソフトの基本機能であり、点密度の計測は容易に行える。また、前述のように点過程法の距離特性値は、より多くの標本数に基づいて決定された信頼性の高い気泡間隔係数とほぼ等しい。すなわち、点過程

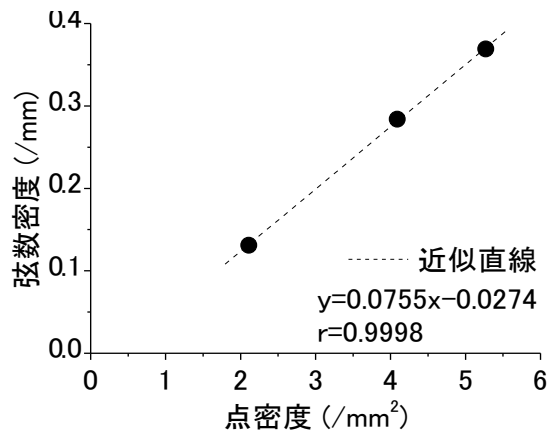


図 5-6 弦数密度と点密度の対応

法は従来取得されてきた気泡情報と矛盾しない実際の気泡系の直接的な評価値を与え、また、その値も同程度であるので、結果として気泡間隔特性値と気泡間隔係数は相互に参照できることになる。すなわち、点過程として処理することで気泡間隔特性値が簡単に得られ、ひとたびそれが得られれば、多くの研究実績や実測データに裏付けられている気泡間隔係数と同様な判断基準に基づいて耐凍害性が評価できることになり、その意義は大きいと思われる。

5.4.4 低倍率画像情報との対応

上述においては高精細画像を取得して求めた気泡寸法と気泡座標から気泡間隔係数と気泡間隔特性値を求め、それらを比較した。これに対して、画像取得をもっと簡素化して気泡間隔係数および気泡間隔特性値を求め、それが ASTM C457 の規定を満足する条件にて求めた気泡間隔係数と相関するのであれば、両者の校正関係を明確にしさえすれば、気泡構造評価はより簡単になりうると期待される^{22),69)}。実際これまでも、市販のスキナーを用いて気泡の低倍率画像を取得し、その中の気泡分布評価を行うことは少なからず検討されてきている¹³⁾。図 5-1、図 5-2 に示したように高精細の小分画面画像およびそれを連結した解析領域全体像では、画像分解に対応して直径が数 μm の気泡も検出され画像ファイル上に記録される。これに対してスキナー画像は目視上では明確な差異は識別できなくとも(図 5-2)、等倍観察でかつ画像分解能も低いために、微細気泡は検出されず、気泡数は大きく減少している(表 5-2)。

図 5-7 にスキナー画像中の気泡の気泡間隔係数と気泡間隔特性値(図 5-7 (a))、および高精細画像の気泡間隔特性値とスキナー画像の気泡間隔特性値の対応(図 5-7 (b))を示す。微細な気泡を検出できないために、平均気泡径や最近傍距離は大きくなる。その結果としてスキナー画像から求めた気泡間隔係数も気泡間隔特性値も、図 5-5 の高倍率の観察に基づいて求めた結果と比較すると、距離の大きい側へとプロットは移動している(図 5-7 (a))。しかし、気泡間隔特性値の方が気泡間隔係数よりもやや大きくなる傾向は、高倍率下で気泡を同定した場合と同様であり、その差も約 1 画素、 $30\mu\text{m}$ 程度の差に過ぎない。一方、図 5-7 (b) のように観察倍率が異なる場合は、検出される気泡数の影響が強くなるので、気泡間隔特性値間の相違は $50\sim 100\mu\text{m}$ と拡大する。また、異なる倍率間での気泡間隔特性値間の線形的な対応が認められない。表 6-1 に示したように、スキナー画像を用いて検出された気泡数は、空気量 3.0%と 4.5%で大きな差が認められず、空気量の変化にとともなう気泡数の変化割合の傾向が他とは異なる。気泡数、すなわち点過程で考えた場合に

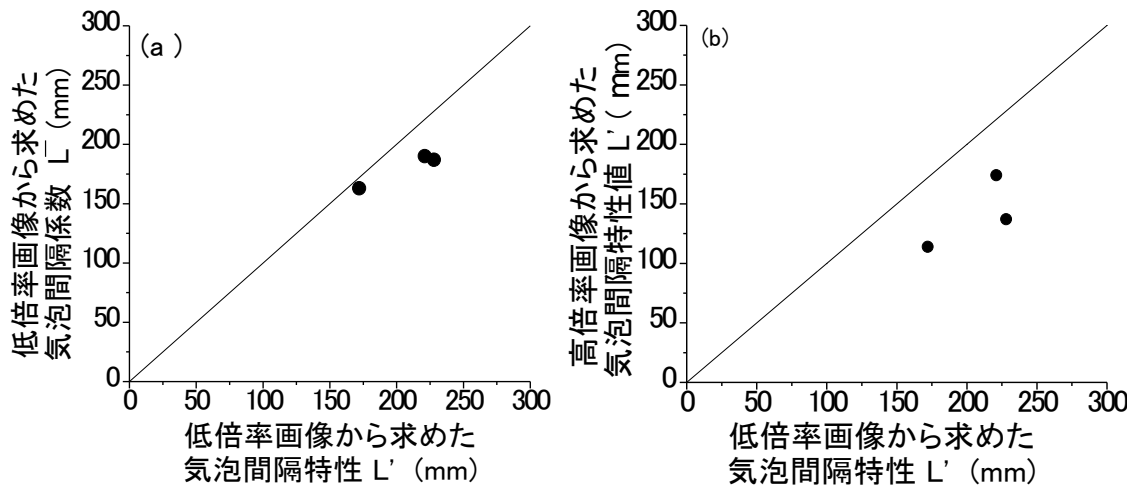


図 5-7 気泡間距離特性値の対応

(a) : 低倍率画像から得られた気泡間隔係数 L と気泡間隔特性値 L' の対応

(b) : 倍率の異なる画像から得られた気泡間隔特性値 L' の対応

は点密度は空気量に比例し、点密度が空気量を反映することが指摘されている^{22),74)}。しかし、図 5-7 (b)ではそのような線形対応が認められていない⁷⁰⁾。また、低倍率での気泡観察ではある寸法以下の微細な気泡を計数しないと考える、高倍率画像からスキャナ分解能以下の気泡を削除し、スキャナ像と高精細画像から点を減数した気泡構造を比べても、両者の空間分布構造は必ずしも一致しないという報告もある⁷²⁾。やはり、低倍率での気泡観察ではスキャナ分解能以下の微細な気泡が計数されないことが、高倍率における気泡空間構造との相関性に影響を与えていると考えられる。一方で、同じ倍率の場合、点過程法による気泡間隔特性値 L は気泡間隔係数と対応することが確認された。よって、気泡検出法の影響を含め、観察倍率の違いによる気泡数の減数が高倍率における気泡空間構造との相関性に及ぼす影響について明確にすることができれば、低倍率画像を用いて気泡間隔特性値 L' を求める手法が、簡便な耐凍害性評価手法になりうると考えられる。そして、簡易な機器を用いて容易に取得できる低倍率画像を用いた場合における点過程法の適用範囲を明らかにしていくことも重要と思われる。

5.5 結論

空気量を変化させたコンクリート中の気泡の高精細画像を取得し、ASTM C457 のリニアトラバース法に基づく気泡間隔係数の評価を行った。それと同じ画像を用いて、著者らがこれまで低倍率画像では有用であることを主張してきた点過程法を適用し、求められた気

第5章

泡間隔特性値と気泡間隔係数の対応について検討した。さらに、評価手法の簡易化を目的として、低倍率の画像を用いたときの評価値と高精細画像の評価値の相関性を調べた。本章にて得られた主な結果は、以下の通りである。

- (1) 高精細画像にて抽出された気泡に対してリニアトラバース法と面積解析法を適用して気泡間隔係数を求めると、両者の値は必ずしも一致せず、面積解析法の方が小さな値を与える。
- (2) 気泡群を点過程と見なしたときの気泡間隔特性値は、標本数の観点から、より信頼性が高いと考えられる面積解析法により求めた気泡間隔係数とほぼ一致する。
- (3) 気泡分布のランダム性を表す基本パラメーターである1次元の気泡弦数密度と2次元の気泡点密度の間には良好な相関性が存在する。
- (4) 簡易な評価を目的としてスキャナー像を用いると、微細な気泡を検出しないために、気泡間距離特性は大きく評価される。その場合であっても、気泡間隔係数と気泡間隔特性値の差は $30\mu\text{m}$ 程度である。
- (5) 高倍率と低倍率の画像を用いて求めた気泡間隔特性値を比較すると、最大で $100\mu\text{m}$ 程度の差が認められ、両者の間には線形的な対応が認められない。気泡検出法の影響を含め、観察倍率の違いによる気泡数の減数が高倍率における気泡空間構造との相関性に及ぼす影響について明確にすることができれば、低倍率画像を用いて気泡間隔特性値 L' を求める手法が、簡便な耐凍害性評価手法になりうると考えられる。

第6章

異なる計測方法による気泡特性値の相違と変動

第6章

6.1 序論

コンクリート中の気泡観察は顕微鏡による観察が主流であり、コンピューター技術の向上にともない顕微鏡観察における測定者の労力の改善のための装置開発が行われた。一方、コンピューター技術の向上は画像の高精細化をもたらし、コンクリート断面画像を取得し断面画像中に現れた気泡を観察する画像解析法が提案されて久しい。現在では様々な自動解析装置が開発され、測定者の労力は著しく改善されている。

その他にも新たな測定手法を用いて気泡組織評価が行われてきた。例えば、濱ら⁷³⁾は浮力法を用いて気泡径分布や気泡間隔係数を簡便に求めている。浮力法による気泡の測定方法は、まず硬化前のフレッシュコンクリートにウェットスクリーニングを行い採取したモルタルを測定装置(図6-1)下のグリセリン水溶液中に注入し、攪拌する。攪拌するとモル

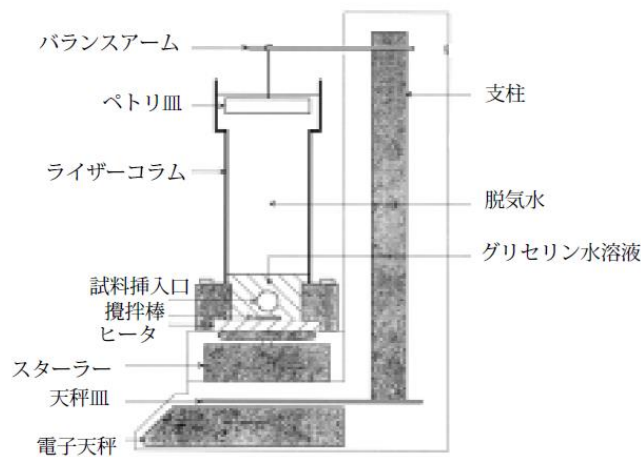


図 6-1 浮力法測定装置の概要⁷³⁾

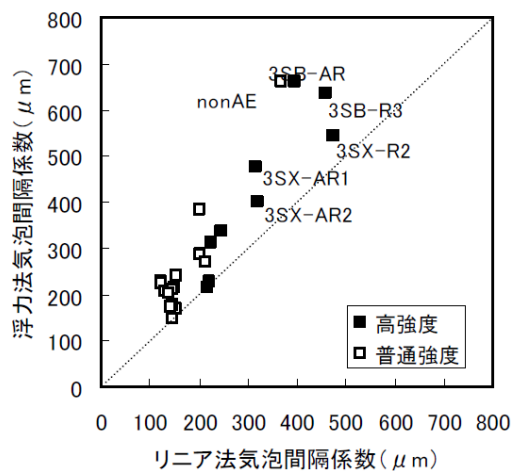


図 6-2 浮力法とリニアトラバース法による気泡間隔係数の対応⁷³⁾

第6章

タル中に含まれている気泡が脱気水中を上昇する。上昇した気泡がライザーコラム上部に取り付けたペトリ皿に到達するまでの時間から気泡径分布や気泡間隔係数を求めることができる。この浮力法はリニアトラバース法との比較が行われ、浮力法にて求めた気泡間隔係数はリニアトラバース法にて求めた気泡間隔係数より大きな値を示すが、相対的な対応が得られたことが確認されている（図 6-2）⁷³⁾。

杉山ら⁷⁴⁾は X 線 CT 法によって空隙径分布や気泡間隔係数を求める手法を提案している。X 線 CT 法は非破壊検査技術として用いられており、物体の内部構造を物体を破壊せずに可視化することが可能である。さらに、X 線 CT スキャナによる撮影画像の数値データである CT 値を用いて、画像を定量的に解析することが可能である。例えば、天明ら⁷⁵⁾は X 線 CT 法をコンクリートに適用し、空隙とモルタル、モルタルと骨材の境界となる境界 CT 値（しきい値）を求めて、コンクリートの構成材料を定量化している。X 線 CT 法による気泡の測定方法は、まずコンクリート供試体から X 線 CT により 199 層の断面画像を撮影し、それらを重ね合わせることで 3 次元空隙画像を取得する（図 6-3）⁷³⁾。この 3 次元空隙画像から得られる情報から空隙径分布および気泡間隔係数を算出している。この手法では従来の 2 次元断面画像ではなく、3 次元画像から気泡情報を取得できることが特徴である。さらに、コンクリート中のひび割れに X 線 CT 法を適用して、ひび割れ損傷の特徴を定量評価した報告もあり⁷⁶⁾、気泡以外への適用も可能である。

このように、コンクリート中の気泡を測定する手段はコンピューター技術の向上により多様化している。しかし、新たに提案されている手法のほとんどは ASTM C457 の手順を改善しているに過ぎず、また観察領域や測定回数などを具体的に規定されているわけではない。さらに、ASTM C457 においても作業や計測手順に関して必ずしも詳細に規定されていない。自動計測については規定の本文中にて言及されているが、その計測に

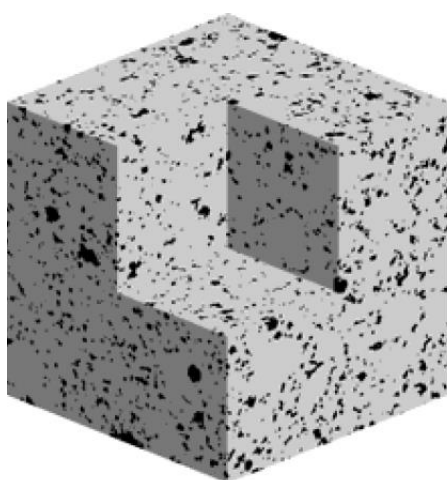


図 6-3 X 線 CT 法にて得られたコンクリート中の空隙の 3 次元 2 値化画像⁷⁴⁾

第6章

画像解析を用いた場合の具体的な手順に関する記述はない。例えば、リニアトラバース法を実施する場合には、最大骨材寸法に応じた最小観察領域の大きさや最小のトラバース長が規定されている。しかし、計測対象を弦ではなく気泡の個数や面積とすることに関して、解析対象とすべき領域の具体的な大きさなどは明らかではない。

セメントペースト体積率が配合等により既知である場合、画像解析であっても気泡間隔係数を決定するのに求めるべき重要な値は気泡体積率と気泡比表面積である。リニアトラバース法（リニアトラバース法）においては、前者は規定された全トラバース長に対する気泡を横切った弦長和の比から、後者は平均弦長から決定される。画像内の気泡が同定されて個々の気泡面積が利用できる場合でも、リニアトラバース法の手順に従い1画素幅のトラバース線を画像上に設定して、弦長計数を行うことは可能である。しかし、一般には、前者は2値化抽出された気泡の画素数の計数から、後者は断面に現れた気泡断面の直径や平均面積から求める方（以後、面積解析法と称す）がより直接的で簡単である^{71,72)}。また、この面積解析法を用いるならば、プログラミング等の専門知識は必ずしも必要ではなく、一連の計数作業を一般的な画像解析ソフトウェアの基本機能だけで行うことも可能であることは前述のとおりである。

気泡を点に置き換えて実際の気泡分布から気泡間距離を、従来の気泡間隔係数に代わる特性値として評価する点過程法を用いると、実際の気泡分布を代表する値として得られる気泡間隔特性値は、面積解析法によって求めた気泡間隔係数とほぼ等しい。しかし、第4章にて述べたように点過程法の結果はリニアトラバース法のそれとやや差があり、特に空気が少ない場合において、リニアトラバース法により求めた気泡間隔係数との差が大きくなる傾向がある⁷²⁾。

画像としては一般的な2次元の同一画像を用いて同じ特性値を求めていながら異なる結果が得られるというのは、画像からの計測や評価を汎用的な手段として導入していくうえで、その適用性上の大きな問題になりうる。また、不均質材料であるコンクリートの画像から計測を行うことを、標本抽出による母集団特性の推定とみなすならば、手法に対応した適切な標本の大きさとしての画像寸法（解析領域）を考える必要がある。評価の対象とする画像内の特徴が異なるので、解析対象とすべき領域は必ずしもリニアトラバース法と同じとは限らず、面積解析法ではどの範囲の画像を取得すべきかなど、具体的な手順を明確にしていくことも必要である。

本章においては、リニアトラバース法と面積解析法、および点過程法で評価される気泡特性値に関して、計測方法間での相違と対応について明らかにする。そして、気泡間隔係数に関わる個々の計測値の変動を、標本としての気泡数や観察領域の大きさの観点から論ずることを目的とする。

第6章

6.2 使用材料，供試体の配合および作製

本章における使用材料，配合および作製は第5章5.2に準ずる。

6.3 画像取得および画像解析手順

本章における画像取得および画像解析手順は第5章5.3.1に準ずる。

6.4 代表体積要素の計算

気泡特性評価を不均質分布を持つ母集団から抽出した標本による母集団特性の推定とみなすとき，どの大きさの寸法の標本をいくつ抽出するかで，推定値は異なりうる。この寸法以上の領域が母集団の不均質性を再現するのに十分な情報を持つ，もしくはこれ以上の領域に拡大すると，推定しようとしている特性値の誤差（変動係数）が予め設定していた値よりも小さくなると考えられる最小体積を代表体積要素 V_{RVE} と称される⁷⁸⁾。評価しようとする物性に対して代表体積要素が実験により求められない場合は，画像演算により求める，もしくは統計的に求めることができる⁷⁹⁾。本研究では後者の方法を用いることとし，画像分画数を増大させたときの標本誤差に対する変動係数を求めた。なお，本研究においては，対象は2次元断面であるので，以後，代表面積要素と称す。抽出する画像分画の大きさに対する代表面積要素を Kanit ら⁷⁸⁾の提案に基づき式(6-1)および(6-2)により求めた。

$$V_{RVE} = \frac{4(1-A)A^2}{nA\varepsilon^2} \quad (6-1)$$

$$A_2 = \frac{D_A^2(V) \cdot V}{A(1-A)} \quad (6-2)$$

ここに，A：空気量

N：標本数

ε ：相対誤差

A_2 ：計測された空気量の分散に関する値

$D_A^2(V)$ ：分画画像 V の計測の空気量の分散

第6章

式(6-1)より、推定の要求精度を高くすると、抽出された標本の変動が大きい場合には、より広い範囲の観察が必要であることがわかる。本研究においては、相対誤差 0.1 までを許容するものとし⁸⁰⁾、標本数は一般的なコンクリート組織の画像解析の実務上の作業負荷と本研究における分画数を考慮して、画像枚数を 9 枚とした。121 枚の分画中、抽出する分画数を 1 から 81 (縦横 1×1 から 9×9 分画からなる正方形領域) まで変化させた。それぞれの分画数にてランダムに領域を 9 箇所抽出して、その分画領域内の気泡分布に関する特性値とそれらの標本分散を求めた (図 6-4)

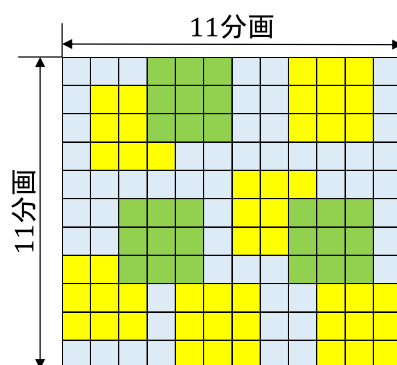


図 6-4 面積解析法の解析対象領域からの分画抽出例
(3×3 分画, 9 箇所のランダム抽出)

6.5 結果および考察

6.5.1 リニアトラバース法の検出気泡数の増加にともなう特性値の変化

表 6-1 はリニアトラバース法、面積解析法の計測結果と点過程法にて求めた気泡間隔特性値を合わせて示したものである。ASTM C457 の規定を満足するトラバース線数 4 本 (トラバース長 2971mm) の気泡間隔係数を面積解析法と比べると、空気量が小さいほど両者の

表 6-1 気泡計測結果一覧

トラバース線数/分画	空気量A(%)			平均弦長(μm)			比表面積α(/mm)			気泡間隔係数L(μm)		
	3.0%	4.5%	6.0%	3.0%	4.5%	6.0%	3.0%	4.5%	6.0%	3.0%	4.5%	6.0%
4	1.3	2.6	3.2	105	101	101	38.2	39.7	39.6	231	163	149
8	1.3	2.6	3.2	103	101	100	38.8	39.6	40.1	225	162	147
12	1.2	2.6	3.2	102	103	100	39.2	38.9	40.2	227	165	147
16	1.3	2.6	3.2	102	101	100	39.2	39.7	40.2	225	162	147
面積解析法	1.3	2.6	3.2	-	-	-	52.6	53.3	52.0	166	121	113
点過程法	-	-	-	-	-	-	-	-	-	174	137	114

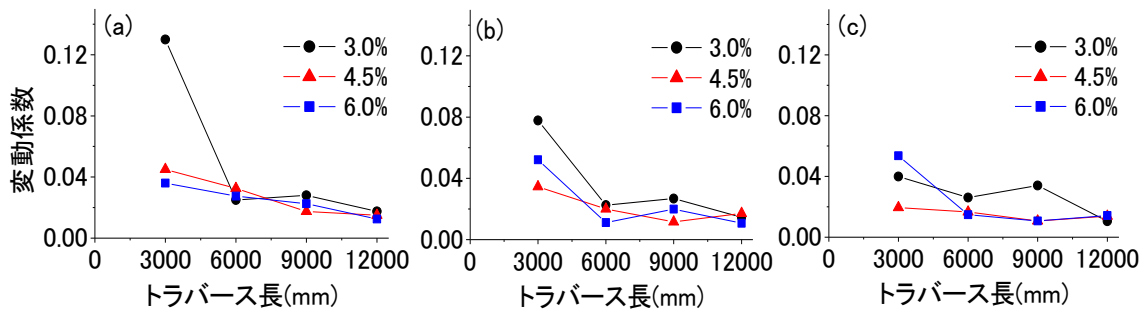


図 6-5 トラバース長の増大ともなう各特性値の変動係数の変化

(a) : 空気量, (b) : 平均弦長および比表面積, (c) : 気泡間隔係数

差が大きくなる傾向があり、空気量 3% の配合では $65\mu\text{m}$ の差がある。Snyder ら⁷¹⁾は、空気量が小さくて気泡数が少ない場合には、計測結果の変動が大きいことをシミュレーションによって示し、計測の信頼性を向上させるためにトラバース長を規定以上に大きくとることを勧めている。そして、検出弦数が 1000~3000 個程度になるようにすると、信頼区間 95% で実際の空気量との誤差 10% 以内での推定が可能であると指摘している。実際にトラバース長を増大させたときの各特性値の計測値の変動係数を図 6-5 に示す。いずれの空気量の配合においても、トラバース長を増大させることによる変動係数の低下は明らかである。特に、1 分画当たりのトラバース線数を 4 本から 8 本に増大させることによる低下割合が大きく、かつ空気量が少ない 3.0% の配合にてその傾向が顕著である。しかし、表 6-1 の結果に示すように、トラバース長を増大させて計測値の変動が小さくなくても、計測結果および気泡間隔係数はほとんど変化しない。よって、リニアトラバース法と面積解析法で求めた気泡間隔係数の相違は、比表面積の差に帰着することになる。

比表面積は計測される弦長や面積の平均値により決定され、このとき気泡の計数値が重要なパラメーターとなる。リニアトラバース法では、トラバース線の位置によって影響を受ける弦数が平均値の計算に用いられる。しかし、リニアトラバース法の根拠となるステレオロジーにおいて、この弦数はステレオロジー量間の関係式に含まれる基本ステレオロジー量ではない。一方、面積解析法では面内にて実際に現れている気泡の実数を用い、これはステレオロジーの一つの基本量でもある。よって、異なる統計的背景を持つ数で除すという平均値取得操作が、評価値としての比表面積に及ぼす影響に関して、さらに検討する必要があると思われる。

6.5.2 面積解析法の解析対象領域面積の変化にともなう気泡特性値の変化

図 6-6 は面積解析法にて観察領域の大きさを変化させたときの各特性値の変動係数を示したものである。観察領域を拡大することによる各特性値の変動係数の低下は明らかである。設計空気量 3%, 4.5 および 6% の各配合にて空気量の計測にて変動係数 0.1 まで許容するとすれば、いずれの配合も分面数 25 (5^2 枚, 観察領域約 940mm^2) 以上の領域を観察しなければならない。比表面積は空気量よりも変動係数は小さく変化していて、いずれの配合も分面数 9 (3^2 枚, 観察領域約 340mm^2) 以上の領域を観察すれば、許容誤差以下となる。空気量はその分面内に占める骨材領域の大きさに強く影響を受けるため、観察領域が小さい場合の変動係数は大きくなったものと考えられる。一方、比表面積は空気量が少なくても、特定の寸法の気泡だけが現れるようなことはなく、個々の分面内での気泡の粒度分布に大きな偏りはなかったと考えられる。その結果として、比表面積は領域間の局所的な変

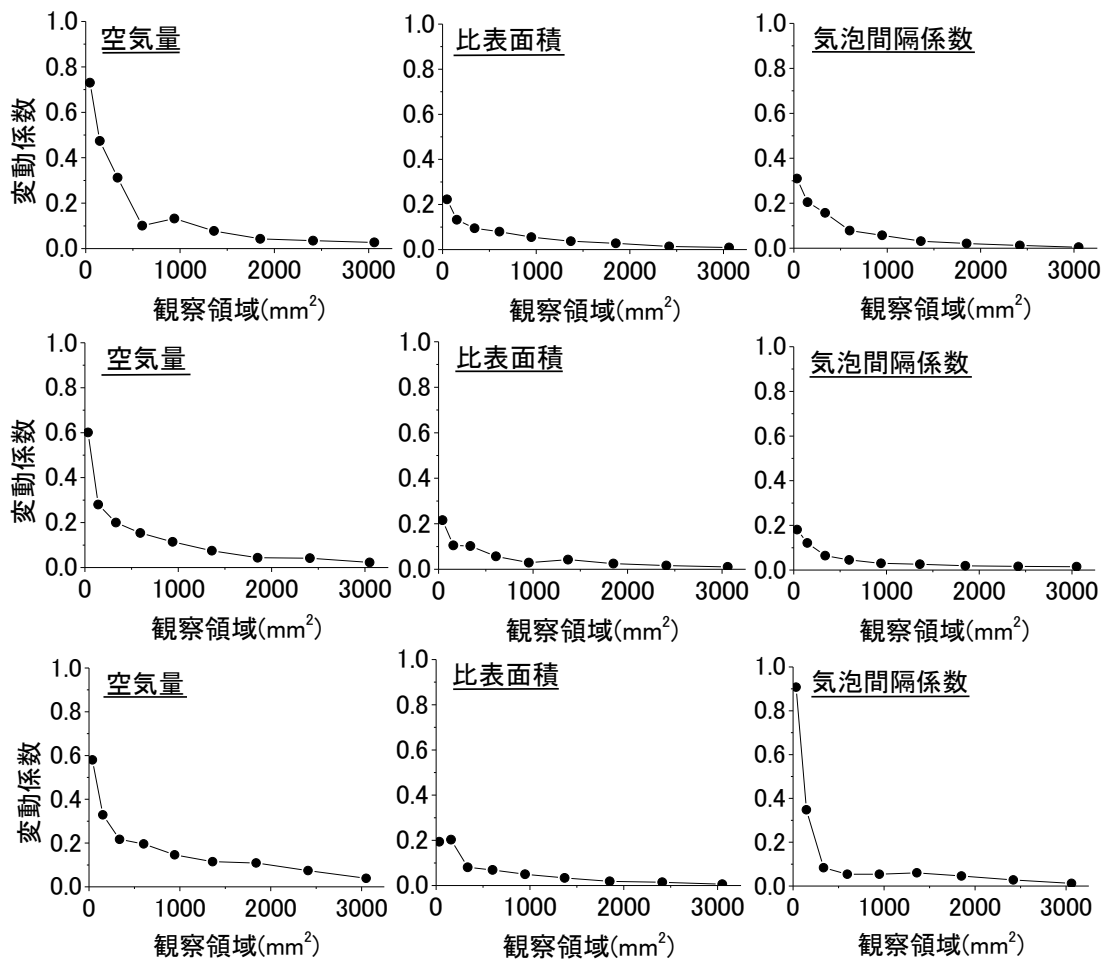


図 6-6 観察領域の拡大にともなう各特性値の変動係数の変化

上段 3.0%, 中段 4.5%, 下段 6.0%

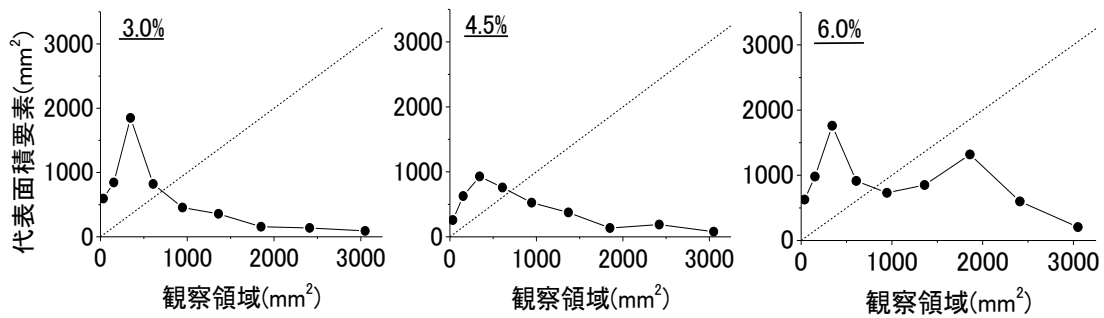


図 6-7 観察領域と代表面積要素の関係

動が小さく、より均質な性質を持つ特性値として得られているようである。以上の特性値を用いて計算される気泡間隔係数では、空気量 3% の配合では分画数 16 (4^2 枚, 観察領域約 600mm^2), 4.5% と 6% の配合では分画数 9 (3^2 枚, 観察領域約 340mm^2) 以上の領域を観察すれば許容誤差以内の推定が可能ということになる。このとき、最も気泡数の少ない 3% の配合でも計数される気泡数は約 1100 個程度であり, Snyder らの指摘⁷¹⁾と矛盾しない。

図 6-7 は空気量に関する代表面積要素の大きさを示したものである。抽出する観察領域面積が小さい範囲では、観察領域を拡大していくと代表面積要素も大きくなるが、その後、観察領域の拡大とともに徐々に低下する傾向を示す。このとき、観察領域面積が小さい範囲では、代表面積要素は観察面積よりも大きい。よって、面積解析法にて気泡特性を求めようとするとき、標本数 9 個にて所定の精度で推定するにはもっと広い領域を観察しなければならないことになる。しかし、観察領域 940mm^2 (分画数 5^2 枚) 以上であれば、空気量に関わらず代表面積要素の大きさを上回る。よって、面積解析法としては一辺が約 30mm 程度以上の領域を観察することにすれば、本研究の画像数 9 枚で所定の誤差内で推定できることになる。このように小領域で評価が可能になることは、一連の作業にて画像ファイル容量の低減をもたらすことを意味し、画像解析を実施するうえからも有用と判断される。

図 6-8 は観察領域面積を変化させたときの気泡点密度の変動係数を示したものである。図 6-6 と類似の傾向が認められ、観察領域面積の増大とともに変動係数は低下する。観察領域 940mm^2 (分画数 5^2 枚) 以上になると、変動係数は 0.1 程度以下になりその後の観察領域の増大にともなう変化は小さい。一方、図 6-9 は空気量と点密度の関係を示したものである。両者には強い相関があり、点密度は空気量を反映していると思わせる。また、図 6-6 および図 6-8 に示したように誤差の収束傾向が一致することから、面積解析法と点過程法では代表体積領域も同程度であると判断される。さらに、両手法では同じ気泡個数情報と面積情報を用いている。以上のことが、両手法にて評価される気泡間隔係数がほぼ一致することに関係していることが考えられる。

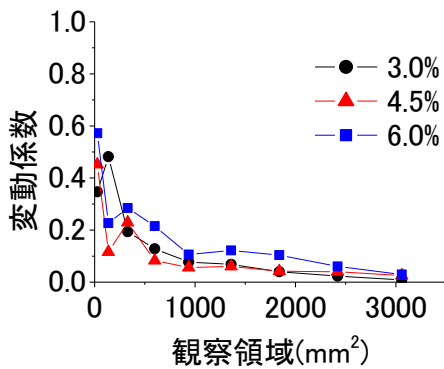


図 6-8 観察領域の拡大にともなう点密度の変動係数の変化

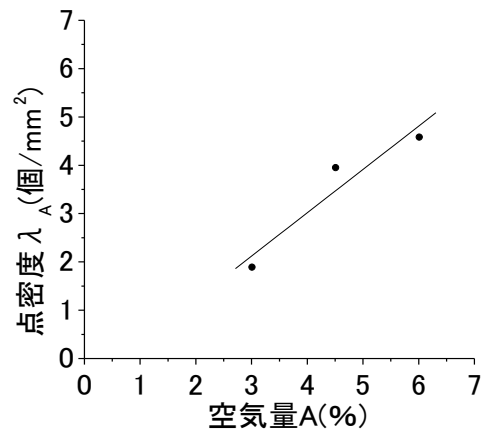


図 6-9 気泡の点密度と空気量の関係

6.6 結論

空気量を変化させたコンクリートの気泡特性を、リニアトラバース法、面積解析法および点過程として評価し、気泡間隔係数に関わる各特性値の変動を解析領域の大きさおよび気泡数との対応から検討した。本章にて得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) トラバース長を増大させると各特性値の変動係数は低下するが、それらの平均値はほとんど変化しない。
- (2) リニアトラバース法と面積解析法の気泡間隔係数の差異は気泡比表面積の相違に帰着する。両者において計数された個数で除すという平均を得る操作の背景についてさらに検討を要する。
- (3) 面積解析法にて気泡分布を評価する場合、代表面積要素の観点から分画数 25 枚（約 940mm²）以上を観察すれば、変動の大きい空気量でも、標準誤差 10%以下の推定が可能である。また、このときの気泡数はリニアトラバース法で計数すべきとして推奨されてきた気泡数と矛盾しない。
- (4) 点過程法を用いる場合も分画数 25 枚を観察すれば、基本パラメーターである点密度の標準誤差も 10%以下で推定される。
- (5) 面積解析法と点過程法における気泡特性値の一致性には、両者が同じ気泡情報を用い

第6章

ることに加え，代表面積要素の大きさも一致することが関係していると考えられる．

第6章

第 7 章

第 7 章

結 論

第7章

本研究では、汎用統計解析ソフト「R」を使ってコンクリート中の気泡の空間分布を評価し、気泡の空間構造の評価に点過程理論を適用することの有用性を評価した。また、気泡の2次元画像の点過程に対して定義された気泡間隔特性値 L' と、従来用いられてきた3次元を想定した気泡間隔係数 L との対応を「R」にて提供されるパッケージを用いたシミュレーションによって明らかにし、汎用ソフトウェアによる点過程評価手法が気泡系の評価に有用な方法であるとして提案した。さらに、気泡間隔特性値を測定する点過程法が気泡間隔係数に代わる耐凍害性評価手法としての有用性を評価した。

まず、ASTM C457の規定に従ったリニアトラバース法にて求めた気泡間隔係数と、スキャナーにて取得した低倍率画像に面積解析法および点過程法を適用して求めた気泡間隔係数および気泡間隔特性の対応を評価した。

次に、高精細 CCD カメラによる高精細画像画像にリニアトラバース法および点過程法を適用して、気泡間隔係数と気泡間隔特性値を求め量特性値の比較を行った。同様にスキャナーによる低倍率画像から求めた気泡間隔特性値との比較も行った。

最後に、リニアトラバース法と面積解析法、および点過程法で評価される気泡特性値に関して、計測方法間での相違と対応について評価した。そして、気泡間隔係数に関わる個々の計測値の変動を、標本としての気泡数や観察領域の大きさの観点から評価した。

本研究において得られた主な結果を、以下にまとめ本論文の結論とする。

第1章「序論」では、コンクリート中の気泡観察の歴史について述べ、それらの問題点から本研究の意義について述べた。

第2章「点過程統計量とシミュレーション概説」では、本研究で用いた点過程統計量について基本的な意味について説明した。さらに、点発生シミュレーション手法について説明した。

第3章「汎用ソフトウェアの適用によるコンクリート中の気泡分布評価と再現シミュレーション」では、コンクリート中の気泡の空間分布の定量評価に点過程理論を適用することの有用性を、汎用統計解析ソフト「R」を用いて評価した。また、気泡間隔特性値と気泡間隔係数との対応関係を「R」を用いたシミュレーションによって明らかにし、汎用ソフトウェアによる点過程評価手法が気泡系の評価に有用な方法であることを示した。主な結論は以下の通りである。

(1) 汎用統計解析ソフト「R」を用いたセメントペーストマトリックス領域への点発生シ

第7章

シミュレーションによって、セメントペースト、モルタルおよびコンクリート中の気泡はいずれも気泡が存在できるセメントペーストマトリックス領域にランダムに分布していることが確認された。換言すると、「R」を用いたセメントペーストマトリックス領域への点発生シミュレーションによってコンクリート中の気泡のランダム性および気泡間距離を再現することが可能である。

- (2) 最近傍距離分布関数から得られるメディアン距離は、空気量の増大とともに気泡間隔係数の定義される立方体対角線の半長に近づくことがシミュレーションによって確認され、2次元画像の点過程に対して定義された気泡間隔特性値 L' と、従来用いられてきた3次元を想定した気泡間隔係数 \bar{L} の対応が明らかとなった。
- (3) DeHoff-Rhines 式を適用して点過程から推定した3次元での気泡間隔距離 L_D と従来の気泡間隔係数 \bar{L} は同義と判断され、値も一致することが確認された。
- (4) 最近傍距離分布関数から得られるメディアン距離は、点密度の増大とともに、気泡間隔係数の定義される立方体対角線の半長に近づくことがシミュレーションによって確認された。
- (5) 一般的な空気量の範囲では、メディアン距離と気泡間隔係数の定義される立方体対角線の $1/2$ の距離との差は非常に小さい。よって、メディアン距離に基づいて簡単に決定できる気泡間隔特性値 L' は、気泡間隔係数 \bar{L} 同様の気泡構造を表すパラメーターになり得ることが示唆された。
- (6) 汎用ソフトウェア「R」を用いたコンクリート中の気泡の空間分布評価は可能であり、点過程統計量による空間分布評価および点過程シミュレーションは今後、実務へも十分適用可能な従来手法に代わる簡易手法となり得ると考えられる。

第4章「観察倍率の異なるコンクリート断面画像中の気泡分布特性の比較」では、ASTM C457 に規定されたリニアトラバース法と気泡間隔係数に代わる気泡間隔特性値を求める点過程法を、同じコンクリート試料に適用して気泡空間分布および気泡間の距離特性を評価し、得られた特性値の対応を検討した。主な結論は以下の通りである。

- (1) リニアトラバース法の結果にて気泡間隔係数を求める気泡配置空間では、仮定される

第 7 章

気泡球よりも大きな気泡の存在が相当数存在する。このため、計算上想定する気泡個数密度は、実際に断面にて観察される気泡個数密度よりも大きく、実際の気泡分布とは全く異なることが示された。

- (2) リニアトラバース法の弦長分布測定結果に対して、等倍率観察を想定して気泡数を減数したとしても、気泡個数密度は実際の観察個数密度よりも大きく、径の大きな気泡を径の小さな気泡に置き換えることの影響は大きいと思われる。
- (3) スキャナーで取得した画像に点過程として評価したときの気泡特性は、リニアトラバース法にて得られた気泡特性と大小関係が一致する。
- (4) 点過程として評価した気泡間隔特性値は、観察倍率と仮定される気泡寸法が異なっても、リニアトラバース法の気泡間隔係数との差は小さく、配合による大小関係も一致する。よって、リニアトラバース法によって得られる気泡間隔係数と点過程法にて得られる気泡間隔特性値は矛盾しないようである。
- (5) リニアトラバース法にて計数される気泡密度の変化に対する気泡間隔係数の変化の割合は、点過程としての点密度の変化にともなう気泡間特性値の変化割合と等しく、断面にて視認される気泡数は、気泡間距離を考える上で有意な特性値であると考えられる。
- (6) リニアトラバース法にて計測される気泡分布の 1 次元ランダム特性である気泡個数密度は、気泡を点過程とみなした 2 次元ランダム特性である点密度にて同様に再現されている。よって、観察倍率と計数法が異なっても、コンクリート中にて気泡がランダムに分布している限り、点過程法の結果はリニアトラバース法の結果の間引き過程として得られるようであり、両者は矛盾することはないと考えられる。

第 5 章「リニアトラバース法と点過程法を同一画像情報に適用して評価した気泡間距離特性値の比較」では、コンクリート中の気泡の高精細画像を取得し、リニアトラバース法に基づく気泡間隔係数の評価を行った。それと同じ画像を用いて点過程法を適用し、求められた気泡間隔特性値と気泡間隔係数の対応について検討した。さらに、評価手法の簡易化を目的として、低倍率の画像を用いたときの評価値と高精細画像の評価値の相関性を調べた。主な結論は以下の通りである。

第 7 章

- (1) 高精細画像にて抽出された気泡に対してリニアトラバース法と面積解析法を適用して気泡間隔係数を求めると、両者の値は必ずしも一致せず、面積解析法の方が小さな値となる。一方、気泡を点過程と見なしたときの気泡間隔特性値は、標本数の観点から、より信頼性が高いと考えられる面積解析法により求めた気泡間隔係数とほぼ一致することが確認された。
- (2) 気泡分布のランダム性を表す基本パラメーターである 1 次元の気泡弦数密度と 2 次元の気泡点密度の間には非常に良好な相関性が存在し、リニアトラバース法の計測にて仮定していた気泡と遭遇する確率のランダム性が、次元の異なるプローブを用いて確認された。
- (3) 簡易な評価を目的としてスキャナー画像を用いると、微細な気泡を検出しないために、気泡間距離特性は大きく評価される。その場合であっても、気泡間隔係数と気泡間隔特性値の差は $30\mu\text{m}$ 程度であるが、高倍率と低倍率の画像を用いて求めた気泡間隔特性値を比較すると、最大で $100\mu\text{m}$ 程度の差が認められ、両者の間には線形的な対応が認められなかった。今後、気泡数が少ない系にて微細な気泡を同定できないことが、気泡空間分布の特徴抽出と気泡間距離評価に及ぼす影響についてさらに検討する必要があると考えられる。

第 6 章「異なる計測方法による気泡特性値の相違と変動」では、空気量を変化させたコンクリートの気泡特性を、リニアトラバース法、面積解析法および点過程法により評価し、気泡間隔係数に関わる各特性値の変動を解析領域の大きさおよび気泡数との対応から検討した。主な結論は以下の通りである。

- (1) トラバース長を増大させると各特性値の変動係数は低下するが、それらの平均値はほとんど変化しない。
- (2) リニアトラバース法と面積法の気泡間隔係数の差異は気泡比表面積の相違に帰着する。両者において計数された個数で除すという平均を得る操作の背景についてさらなる検討が必要である。
- (3) 面積解析法にて気泡分布を評価する場合、代表面積要素の観点から分画数 25 枚（約 940mm^2 ）以上を観察すれば、変動の大きい空気量でも標準誤差 10%以下の推定が可能

第 7 章

である。また、このときの気泡数はリニアトラバース法で計数すべきとして推奨されてきた気泡数と矛盾しない。さらに、点過程法を用いる場合も分画数 25 枚を観察すれば、基本パラメーターである点密度の標準誤差も 10%以下で推定されることが確認された。

- (4) 面積解析法と点過程法における気泡特性値の一致性には、両者が同じ気泡情報を用いていることに加え、代表面積要素の大きさも一致することが関係していると考えられる。

以上が、本研究で得られた主な結論である。コンクリート中の気泡の空間分布評価に汎用統計解析ソフト「R」を用いることにより、点過程統計量の計算が非常に簡単に行うことが可能であること、シミュレーションによる空間分布および距離特性の再現が可能であることを示した。このことは気泡の空間分布の定量評価に「R」を用いることの有用性および実用性の向上に資するものである。また、気泡間隔係数と気泡間隔特性値が測定方法および画像取得倍率の異なる場合での対応を考察し、値の一致性は必ずしも得られなかったが、大小関係などの対応関係が確認された。表 7-1 に本研究で得られた対応関係をまとめたものを示す。低倍率画像と高倍率画像に対してそれぞれ求めた気泡間隔特性値は本研究では対応関係が得られなかった。しかし、距離特性値の大小関係に矛盾はなく、耐凍害性の判断に齟齬を生じることはない。また、気泡間隔係数のような仮想系ではなく、実際の距離を評価しているという点において、点過程法および気泡間隔特性値はより合理的であるこ

表 7-1 本研究にて得られた対応関係一覧

		リニアトラバース法の 気泡間隔係数		面積解析法の 気泡間隔係数		点過程法の 気泡間隔特性値	
		高倍率画像 (顕微鏡像)	低倍率画像 (スキャナー画像)	高倍率画像 (顕微鏡像)	低倍率画像 (スキャナー画像)	高倍率画像 (顕微鏡像)	
リニアトラバース法の 気泡間隔係数	高倍率画像 (顕微鏡像)	/	対応	対応	対応	対応	
	低倍率画像 (スキャナー画像)			(1)	対応	(2)	
面積解析法の 気泡間隔係数	高倍率画像 (顕微鏡像)				(3)	対応	
点過程法の 気泡間隔特性値	低倍率画像 (スキャナー画像)					対応せず	
	高倍率画像 (顕微鏡像)						

第7章

とに異論の余地はないと思われる。

これらの内容に基づき、今後の展望として以下の展開が考えられる。

- (1) 凍結融解抵抗性評価に点過程法による気泡間隔特性値を適用させ、耐凍害性評価に点過程法を適用することの有用性評価
- (2) フライアッシュ等の混和材を混入したコンクリート中の気泡の空間分布の定量評価および気泡間隔特性による耐凍害性評価
- (3) 点過程法の規格化のために観察領域および測定枚数の検討

点過程法にて求める気泡間隔特性値は気泡間隔係数と対応関係があることは明らかであり、今後、より多くの標本を用いて、両者の対応および本研究にて示した評価法の信頼性を高めることにより、点過程法は従来法、すなわち長年にわたって国際的なデフォルト評価法であったリニアトラバース法に代わる耐凍害性評価手法になり得ると確信する。

第 7 章

謝辭

謝辭

謝辞

本研究を行うにあたり、日本コンクリート工学会研究委員会「コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会」委員長濱幸雄室蘭工業大学教授より、ラウンドロビン試験データの使用を快諾いただきました。また、同委員会北海道総合研究機構建築研究本部北方建築総合研究所谷口円博士より解析用コンクリート試料、詳細試験データの提供、および試験データに関する助言を賜りました。さらに、(株)八洋コンサルタント、田中章夫博士および白石聖氏より ASTM 法の気泡計測結果および高精細画像データの提供、および ASTM 自動解析法に関する助言を賜りました。ここに記し、深甚の謝意を表します。

参考文献

参考文献

参考文献

- 1) Powers, T. C. : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Vol.29, pp.184-211, 1949.
- 2) ASTM C457/C457M-12: Standard Test Method for Microstructural Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, 2012.
- 3) 笠井芳夫：コンクリート総覧，技術書院，1998.
- 4) 高橋和雄：コンクリート製品の振動による空気量の減少について，農業土木学会論文集，第143号，pp.69-77，1989.
- 5) 坂本久史，松岡克明，井上進作，横井克則：内部振動による締固めがコンクリート中の空気量および耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1054-1059，2014.
- 6) 三浦律彦，芳賀孝成，中根淳：空気量，気泡分布，細孔分布が高強度コンクリートの他耐凍結融解性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.1，pp.679-684，1990.
- 7) 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，pp.2-8，1986.
- 8) 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.
- 9) 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，No.420，Vol.13，pp.81-86，1990.
- 10) 西山孝，前川慎喜，日下部吉彦，中野綿一：シリノアクリレートによる硬化コンクリート中の気泡組織の染色と観察，セメント・コンクリート論文集，Vol.42，pp.212-214，1988.
- 11) 太田利隆，大橋猛，小長井宣生，根本任宏：自動画像解析システムを用いた硬化コンクリートの気泡パラメータの測定方法について，コンクリート工学年次論文集，Vol.8，No.0，pp.389-392，1986.
- 12) 安部洋平，青木正雄，辻厚志，中村良太：硬化コンクリートの気泡組織分布判定に関する研究，農業土木学会全国大会講演要旨集，pp.572-573，2005.
- 13) Zalocha, D. and Kasperkiewicz, J. : Estimation of structure of air entrained concrete using a flatbed scanner, Cement and Concrete Research, Vol.35, pp.2041-2046, 2005.
- 14) 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.35-47，2012.
- 15) 三高信吾ほか：高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす気泡間隔係数・気泡径分布の影響，日本建築学会学術講演概要集，pp.1141-1142，2005.

参考文献

- 16) Snyder, K. A. : A Numerical Test of Air Void Spacing Equations, *Advanced Cement Based Materials*, Vol.8 , No.1, pp.28-44, 1998.
- 17) 舟尾暢男, 高浪洋平 : データ解析環境「R」, 株式会社工学社, 2005
- 18) Baddeley, A., Turner, R. : spatstat : An R Package for Analyzing Spatial Point Patterns, *Journal of Statistical Software*, Vol.12, Issue6, 2005.
- 19) 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一, 吉川峻生 : 気泡の空間分布構造の距離に関する特徴量と気泡間隔係数との対応, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.37, No.1, pp.841-846, 2015.
- 20) 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一 : モルタルの低倍率画像から得られる気泡間隔特性値と気泡間隔係数の対応, *セメント・コンクリート論文集*, Vol.69, pp.395-402, 2016.
- 21) 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一, 山本瑞希 : コンクリート中の気泡の点過程としての特徴量と凍結融解抵抗性の対応, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.38, No.1, pp.987-992, 2016.
- 22) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一 : 点過程としての硬化コンクリート中の気泡の空間分布の評価と気泡間隔の簡便な推定法の提案, *土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)*, Vol.73, No.1, pp.36-49, 2017.
- 23) 五十嵐心一 : 細孔構造の可視化 (画像データからの細孔情報の抽出), *コンクリート工学*, Vol.53, No.5, pp.388-393, 2015..
- 24) Scrivener, K.L. and Pratt, P.L.: Back-scattered electron images of polished cement sections in scanning electron microscope, *Proceedings of 6th International Conference on Cement Microscopy*, New Mexico, pp.145-155, 1984.
- 25) 五十嵐心一, 渡辺暁央, 川村満紀 : 反射電子像の画像解析によるセメントの水和度の推定と強度に関する一考察, *コンクリート工学論文集*, Vol.14, No.2, pp.23-23, 2003.
- 26) Reed, M. G. and Howard, C. V. : *Unbiased Stereology Three-Dimensional Measurement in Microscopy 2nd Edition*, BIOS Scientific Publishers, 2005.
- 27) 三平 和雄 : ステレオロジー概説[i], *繊維と工業*, Vol.4, No.5, pp.262-267, 1971.
- 28) 三平 和雄 : ステレオロジー概説[ii], *繊維と工業*, Vol.4, No.6, pp.297-305, 1971.
- 29) Rosiwal, A.: *Über geometrische Gesteinsanalysen. Ein einfacher Weg zur ziffermabigen Feststellung des Quantitätsverhältnisses der Mineralbestandteile gemengter Gesteine*, *Verhandlungen der Kaiserlich-Königlichen Geologischen Reichsanstalt Wien*, pp.143-175, 1898.
- 30) Glagolev, A.A. : On geometrical methods of quantitative mineralogic analysis of rocks, *Trans. Inst. Econ. Min.*, Vol.59, pp.1-47, 1993.

参考文献

- 31) Thomson, E. : Quantitative microscopic analysis, Journal of Geology, Vol.38, pp.193-222, 1930.
- 32) Stoyan, D., Kendall, W. S. and Mecke, J. : STOCHASTIC GEOMETRY and its APPLICATIONS, 2nd Edition, JOHN WILEY & SONS Ltd, 1995.
- 33) 島谷健一郎: 点過程による樹木分布地図の解析とモデリング, 日本生態学会誌, Vol.51, No.2, pp.87-106, 2001.
- 34) Ripley, B.D.: The second-order analysis of stationary point processes, Journal of Applied Probability, Vol.13, pp.255-266, 1976.
- 35) Ohser, J.: On estimators for reduced second moment measure of point processes, Math. Operationsf. Statist., ser. statist, Vol.14, pp.63-71, 1983.
- 36) Ripley, B.D.: Analyses of nest spacings, Statistics in Ornithology (Eds. Morgan, B.J.T. and North, P.M.) Springer Lecture Notes in Statistics, 29, Springer-Verlag, Berlin, pp.151-158, 1985.
- 37) Illian, J., Penttinen, A., Stoyan, H. and Stoyan, D.: Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point patterns, John Wiley & Sons, 2008.
- 38) 涌井 良幸, 涌井 貞美 : 図解 使える統計学, 株式会社 KADOKAWA, 2015.
- 39) 古賀 弘樹 : 一段深く理解する確率統計, 森北出版株式会社, 2018.
- 40) 太田 靖, 宿久 洋 : 教養のための統計入門, 実教出版株式会社, 2016.
- 41) Baddeley, A., Rubak, E. and Turner, R.: Spatial Point Patterns, Methodology and Applications with R, CRC Press, 2016.
- 42) Ripley, B. D. : Spatioal Statistics, John Wiley & Sons, 2004
- 43) 横田 光一郎, 五十嵐 心一 : 骨材粒子が超吸水性ポリマーの凝集性に及ぼす影響 コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.592-597, 2013.
- 44) Neville, A.N.: Properties of concrete, Fourth Edition, WILEY, 1996.
- 45) 舟尾暢男, 高浪洋平 : データ解析環境「R」, 株式会社工学社, 2005.
- 46) 五十嵐心一, 米山義広 : 若材齢におけるセメントペーストの組織の特徴とその定量評価, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.115-122, 2007.
- 47) Dang, G. H., 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
- 48) 川村満紀 : 土木材料学, 森北出版株式会社, 1996.
- 49) 横田光一郎, 五十嵐心一 : RGB情報を利用したモルタル断面画像からの骨材抽出と構

参考文献

- 成相の空間分布特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1759-1764, 2013.
- 50) 古谷知之: Rによる空間データの統計分析, 株式会社朝倉書店, 2011
- 51) Baddeley, A., Gregori, P., Mateu, J., Stoica, R. and Stoyan, D. : Case Studies in Spatial Point Process Modeling, Springer, 2006
- 52) Bivand, Roger. S., Pebesma, Edzer, Gómez-Rubio, Virgilio : Applied Spatial Data Analysis with R, Springer, 2008
- 53) Murotani, T., Igarashi, S. and Koto, H.: Distribution analysis and modeling of air voids in concrete as spatial point processes, Cement and Concrete Research, Vol.115, pp.124-132, 2019.
- 54) Baddeley, A. and Vedel Jensen, E. V. : Stereology for statisticians, CHAPMAN & HALL/CRC, 2005.
- 55) Mayercsik, N. P. , Felice, R., Ley, M.T. and Kurtis, K. E. : A probabilistic technique for entrained air void analysis in hardened concrete, Cement and Concrete Research, Vol.59, pp.16-23, 2014.
- 56) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一, 山本瑞希: コンクリート中の気泡の空間分布の特徴と分布の再現, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.663-668, 2016.
- 57) 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
- 58) コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会報告書, 日本コンクリート工学会, 2016
- 59) British Standard: Admixtures for concrete, mortar and grout- Test methods- Part 11: Determination of air void characteristics in hardened concrete, BS-EN 480-11: 2005.
- 60) Mindess, S. and Young, J.F.: Concrete, Prentice-Hall, 1981.
- 61) Jakobsen, U.H. et al.: Automated air void analysis of hardened concrete- a Round Robin study, Cement and Concrete Research, Vol.36, No.8, pp.1444-1452, 2006.
- 62) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一, 吉川峻生: 点過程統計量を用いたセメントペースト中の気泡の空間分布の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.493-498, 2015.
- 63) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一: モルタル中の気泡の点過程としての特徴と間引きシミュレーションによる空間分布の再現, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.146-

参考文献

- 153, 2016.
- 64) 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一, 山本瑞希: コンクリート中の気泡の点過程としての特徴量と凍結融解抵抗性の対応, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.987-992, 2016.
- 65) 谷口円, 齋藤和秀, 作榮二郎, 西祐宜: 気泡組織計測に関わるラウンドロビン試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.993-998, 2016
- 66) Baddeley, A.: Spatial point processes and their applications, Stochastic Geometry, lectures given at the CIME summer school held in Martina Franca, Springer Berlin Heidelberg, pp.1-75, 2004.
- 67) デュレット, R.: 確率過程の基礎 (今野紀雄他訳), シュプリンガー・ジャパン, 2005.
- 68) Lu, B. and Torquato, S.: Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle systems, Physical Review A, Vol.45, No.8, pp.5530-5544, 1995.
- 69) 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一: 汎用ソフトウェアの適用によるコンクリート中の気泡の空間分布構造の高度な画像解析の簡易化, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, pp.282-289, 2017.
- 70) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一: コンクリート中の気泡を点過程とみなした簡便法と ASTM 法によって評価した気泡分布特性の比較, コンクリート工学論文集, Vol.28, pp.133-142, 2017.
- 71) Snyder, K. Hover, K. and Natesaiyer, K: An investigation of the minimum expected uncertainty in the linear traverse technique, Cement, Concrete and Aggregates, Vol.13, No.1, pp.3-10, 1991.
- 72) 寺澤佑丞, 室谷卓実, 五十嵐心一: 同一画像情報を用いてリニアトラバース法と点過程法により評価された気泡間距離特性値の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.507-512, 2018.
- 73) 濱幸雄, 太田宏平: フレッシュコンクリートによる気泡組織の測定方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.669-674, 2004.
- 74) 杉山隆文, 志村和紀, 畠田大規: 高解像度型 X 線 CT による AE モルタル中の空隙構造の透視, 土木学会論文集, Vol.67, No.3, pp.351-360, 2011.
- 75) 天明敏行, 伊藤剛, 濱崎大志, 尾原祐三: X 線 CT 法を用いたコンクリートの材料構成定量化法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.739-744, 2008.
- 76) 山岸俊太郎, 鈴木哲也: X 線 CT 画像によるコンクリート損傷の同定に関する試み, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.71, No.2, pp.I_117-I_124, 2015.
- 77) Pleau, R. and Pigeon, M.: The use of the flow length concept to assess the efficiency of air entrainment with regards to frost durability: Part 1- description of the test method, Cement,

参考文献

- Concrete and Aggregates, Vol.18, No.1, pp.19-29 , 1996.
- 78) Kanit, T. et al: Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach, International Journal of Solids and Structures, Vol.40, No.13-14, pp.3647-3679, 2003.
- 79) Rozenbaum, O. and Roscoat, S.R.: Representative elementary volume assessment of three-dimensional x-ray microtomography images of heterogeneous materials: Application to limestones, Physical Review, 89 053304, 2014.
- 80) Illian, J. et al: Statistical analysis and modelling of spatial point patterns, Wiley, Chichester, 2008.