

## 7章 既設コンクリート構造物の診断と総合評価

### 7.1 緒言

コンクリート供試体に X 線 CT 法を適用し、第4章で開発した材料構成定量化法を用いて供試体の空隙率や骨材率およびモルタル平均 CT 値を求めることにより、コンクリート中の空隙や骨材の空間分布を求めることやコンクリートの水セメント比や単位水量などの配合を推定できる可能性があることを第5章で明らかにした。

X 線 CT 法では、このようなコンクリートの構成材料の空間分布の分析や配合推定のほか、撮影画像の目視診断により、空隙や骨材の特徴などが評価可能であることから、コンクリート構造物の構造的な特性を総合的に診断、評価できる可能性があると考えられる。

本章では、これまでに提案してきた手法を用い、既設コンクリート構造物から採取されたコア供試体を用いて、コンクリート構造物の物性評価や施工状況の総合評価を行う。

第2節では、既設コンクリート構造物への適用として、築後70年後の橋梁構造物から採取した供試体に X 線 CT 法を適用し、空隙や骨材の分析を行なうとともにモルタル平均 CT 値を用いてコンクリートの配合推定や圧縮強度の推定を行う。供試体の診断にあたっては、目視による定性的な診断と材料構成定量化法を適用した各材料の定量評価を組み合わせた総合的な診断を行うことを目的とする。

第3節では、築後100年以上経過したレンガ構造物のモルタル目地部について X 線 CT 法を適用し、同様の分析を行う。

第4節では、これらの診断結果を踏まえ、X 線 CT 法を用いてコンクリート構造物診断をする際の留意事項などについて述べ、X 線 CT 法で診断可能な評価項目について整理して一覧表にまとめ、X 線 CT 法のコンクリート構造物診断への適用に関する考察を行う。

## 7. 2 築後 70 年のコンクリート橋梁の診断

### 7. 2. 1 概説<sup>1)</sup>

熊本県阿蘇郡小国町幸野川のコンクリート橋梁は、1939年に完成した橋長112m、幅員3.5m、半円コンクリートアーチ橋で、径間は20mが4連、両端に10mのアーチをもつ、6径間の橋である。幸野川橋梁の立面図および調査位置を図-7.1に示す。幸野川橋梁のコンクリート構造物は工學院大学が調査中であるが、本橋梁は設計や施工に関する資料が少なく、コンクリートの配合や材料は未知である。また、建設当時は材料が不足していたために、鉄筋ではなく竹筋で代用したコンクリートではないかと考えられている。

これらを背景とし、本橋梁のコンクリートの調査、診断を行うことを目的としてボーリングにより供試体を採取し、X線CT法を適用してコンクリートの構造特性評価を行った。コンクリート供試体は橋の外観を保全するため、橋梁のスパンドレルの内側に埋戻されている土砂を取り除いて、内側からボーリングを行って供試体を採取している。供試体の採取位置を図-7.2に示す。全部で26箇所から供試体採取を行っているが、解析を行った供試体は橋脚部分のNo.2と主桁部分のNo.12である。このうち、No.2の供試体は調査位置において水平にボーリングを行ったものであり、No.12の供試体はアーチの中央付近で鉛直にボーリングを行って採取したものである。

採取した供試体の全景を写真-7.1に示す。供試体の直径は100mmで高さは約400mmであり、事前に乾燥炉に入れ、110℃の温度で24時間乾燥させ、その後密閉容器に乾燥剤とともに入れて12時間自然冷却させた後にX線CT撮影を行った。供試体撮影時にはファントムを同時に撮影し、20mm間隔で20断面撮影を行った。

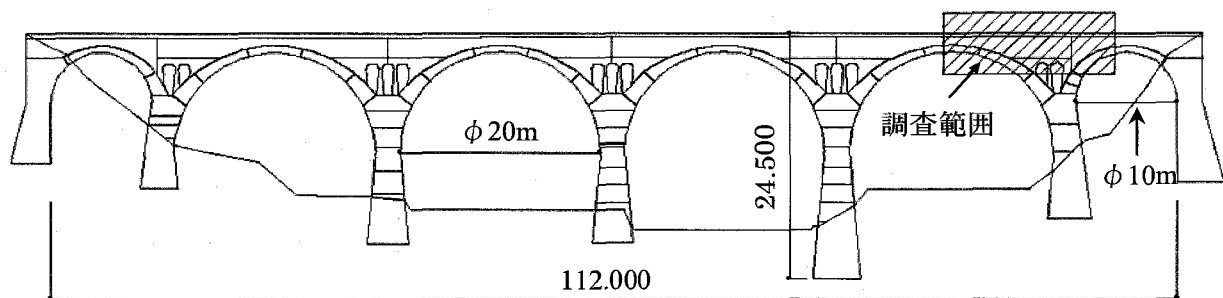


図-7.1 橋梁の立面図および調査位置

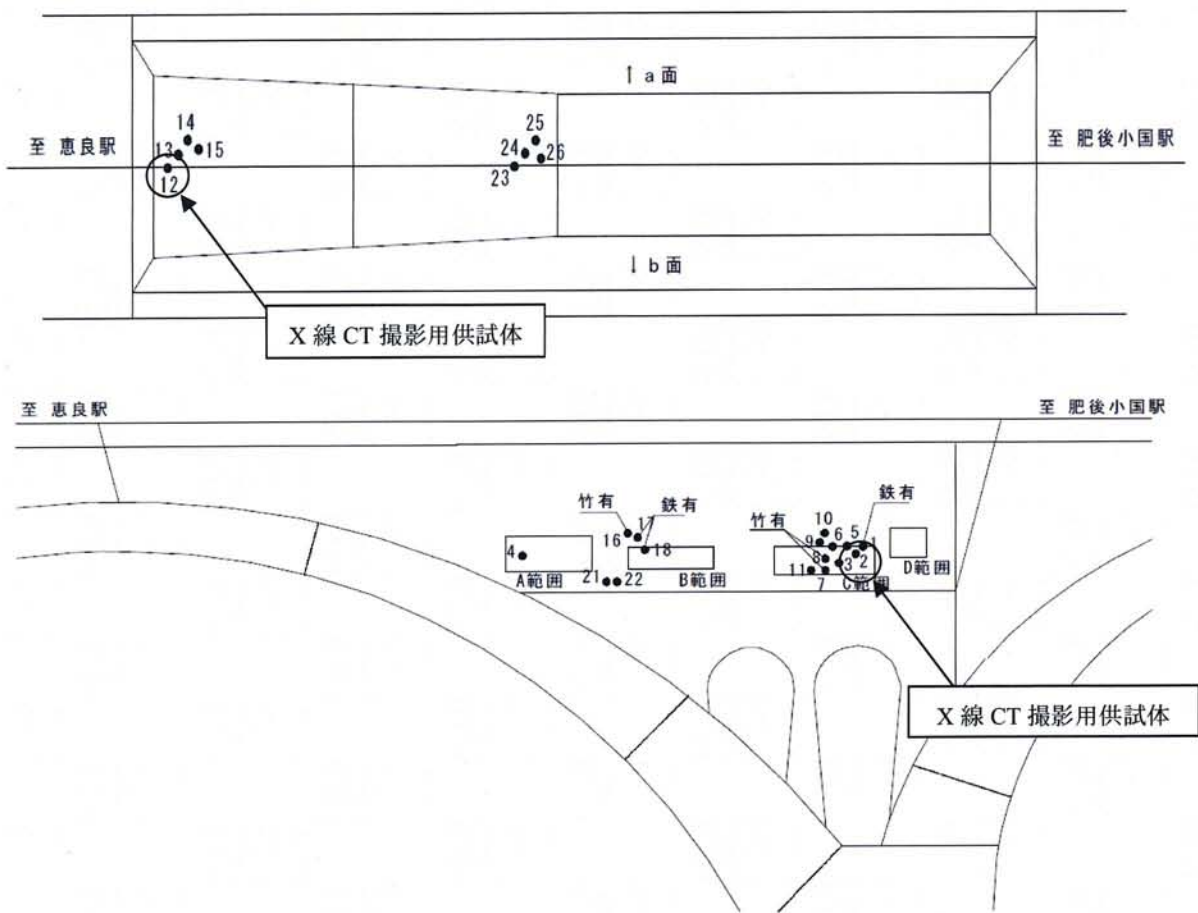


図-7.2 供試体採取位置図



供試体 No. 2



供試体 No. 12

写真-7.1 供試体の全景

### 7. 2. 2 X線 CT 画像の目視診断

供試体の X 線 CT 画像の一例を図-7.3 に示す。また、全断面の X 線 CT 画像を付録-6 (巻末資料) に示す。ボーリングで採取された供試体部分には鉄筋は含まれていなかった。

図-7.3 において、No.2 の (a) の画像を見ると骨材とモルタルの間に空隙があることがわかる。No.2 については、他の断面、例えば (b) の画像においても同様の空隙が存在する。No.2 は水平方向にボーリングを行って採取した供試体であり、他の断面においてもいくつかの骨材の同じ方向の側面に空隙が存在していることから、ブリーディングによって水が上昇し、骨材の下面に空隙を発生させたものと推察できる。

No.12 の (f) の画像に示されるように、骨材の形状はかなり偏平な骨材や角ばった骨材を多く含んでいることがわかる。一方、No.12 の (e) の画像では玉石のような角のない骨材も確認できる。骨材の最大寸法は、No.2 の (b) の画像から推定して、80mm 程度であると考えられる。また、No.12 の (c) の画像のように、骨材の中に空隙があるのがわかる。コンクリート骨材は空隙がなく、堅硬で密実なものが望ましいことから、現在ではこのような空隙の多い骨材をコンクリート用骨材として用いることは少ないので、このような空隙は特徴的であるといえる。特に、No.12 の (d) の画像では骨材全体にわたって空隙の存在が顕著である。このような空隙の分布や形状と地理的な要因から、骨材は阿蘇溶結凝灰岩を使用していると考えられる。

また、No.2 の (a) の画像中には灰色の部分のモルタルの中に一部黒っぽい部分が散在している。これは、石炭ガラのようなものであると推定できる。

以上のように、X 線 CT 画像の分析によって、空隙の分布状況や形状、骨材の形状や性状など、コンクリートについて特徴的な多くの情報が得られた。X 線 CT 画像による物体内部の可視化という最大の特徴を生かし、コンクリート供試体の X 線 CT 画像の定性的な評価を実施することは、コンクリート構造物の診断を行う上で非常に有効である。

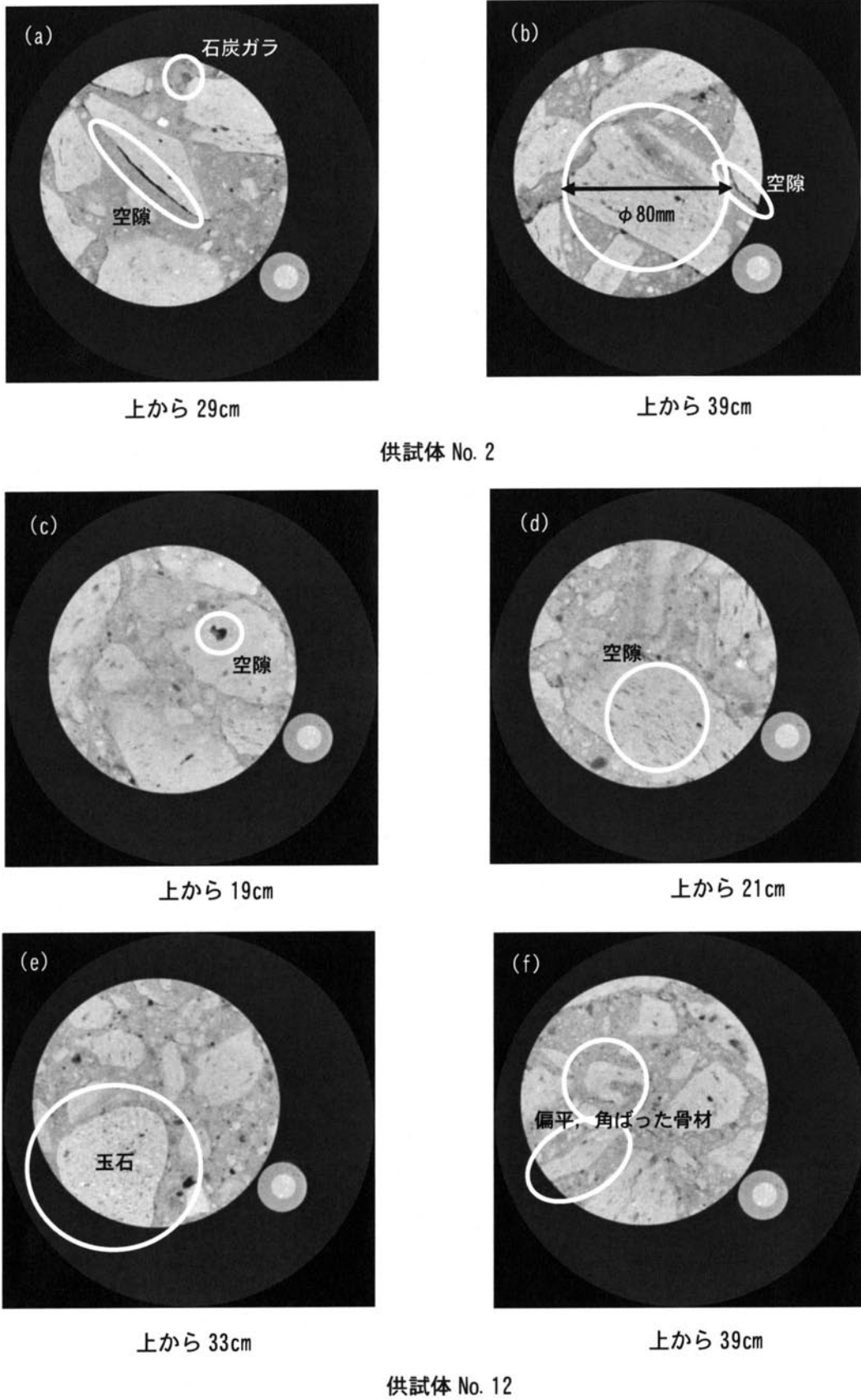


図-7.3 X線CT画像

7. 2. 3 空隙の分析

供試体の軸方向の空隙率  $Pr$  の分布を図-7.4 に示す。横軸は材料構成定量化法で求めた空隙率  $Pr$ 、縦軸は撮影位置を示す。No.12 は上部の方で空隙率の大きいことがわかる。No.12 は主桁部分にあるため、鉛直方向にボーリングを行って供試体を採取している。そのために、ブリーディングが及ぼした影響により、上部で空隙率が大きいと考えられる。一方、水平方向の供試体 No.2 ではブリーディングの影響はみられず、供試体の軸方向にほぼ一様の分布となっている。

No.2 の空隙率は3%~5%であり、第5章で評価した室内作製コンクリートや工場生産コンクリートの空隙率 1%~4%程度よりも若干大きい。これは、CT 画像からも判断できるように骨材の中にも空隙が存在しており、この空隙を評価しているために空隙率が大きくなっていると推察できる。

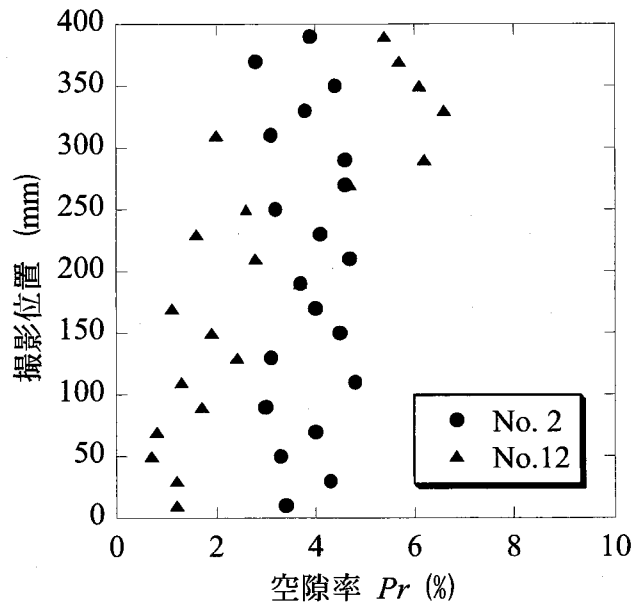


図-7.4 空隙率の鉛直分布

## 7. 2. 4 骨材の分析

## (1) 骨材の密度

材料構成定量化法では、骨材-モルタル境界 CT 値  $CT$  (g-m) を用いて骨材部分の CT 値を抽出し、その平均 CT 値を断面の骨材平均 CT 値  $G_{CT}$  と定義すると、 $G_{CT}$  を用いて骨材の密度  $Gd$  を推定することができる。

直径 100mm のコンクリート供試体の中の種類の異なる骨材の密度  $Gd$  と骨材平均 CT 値  $G_{CT}$  の関係および最小二乗法で近似した近似線を図-7.5 に示す。この近似線は次式 (7.1) で表すことができる。

$$G_{CT} = 877 (\text{cm}^3/\text{g}) Gd (\text{g}/\text{cm}^3) - 921 \quad (7.1)$$

骨材平均 CT 値は、No.2 で 1300, No.12 で 1320 であった。この式に、供試体の骨材平均 CT 値を代入すると、2.5~2.6g/cm<sup>3</sup> という密度となる。これは骨材内の空隙を取り除いた密度であるため、表乾密度はさらに低い値となり、第5章の室内作製コンクリートや工場生産コンクリートで使用したコンクリート用骨材と比較すると密度の小さい骨材を使用しているといえる。

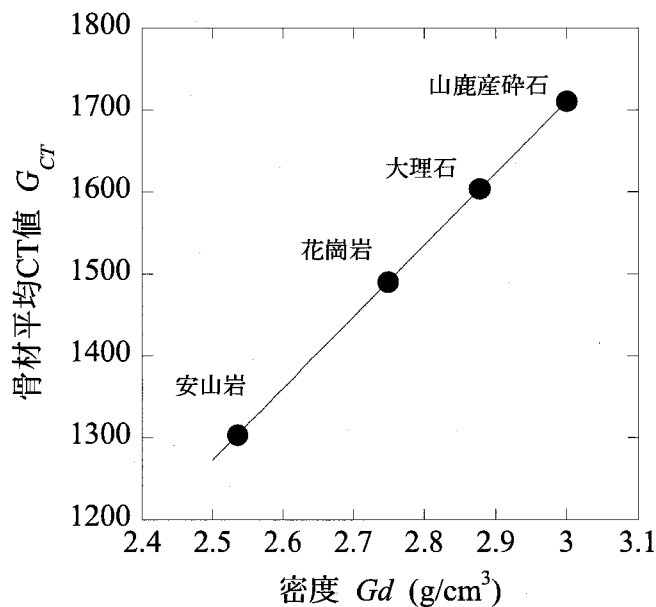


図-7.5 直径 100mm における岩石の密度と CT 値の関係

## (2) 骨材の分布

材料構成定量化法で求めた供試体軸方向の骨材率  $Gr$  の分布を図-7.6 に示す。第5章で使用した室内作製コンクリートの骨材率  $Gr$  はおよそ 30%~50%の範囲であり、工場生産コンクリートの骨材率  $Gr$  は 40%~60%の範囲であった。これらと比較すると、No.2 と No.12 の供試体の骨材率  $Gr$  は 20%~40%と小さい範囲に分布している。X線 CT の断面画像の観察では骨材率が小さいとは判断できないが、ファントムで使用した骨材と、供試体の骨材の密度が異なるため、骨材の境界のしきい値を大きく評価し、骨材の面積を全体的に小さく評価している可能性がある。なお、骨材率の分布状況は均等であり、供試体の軸方向には骨材の偏りが認められない。

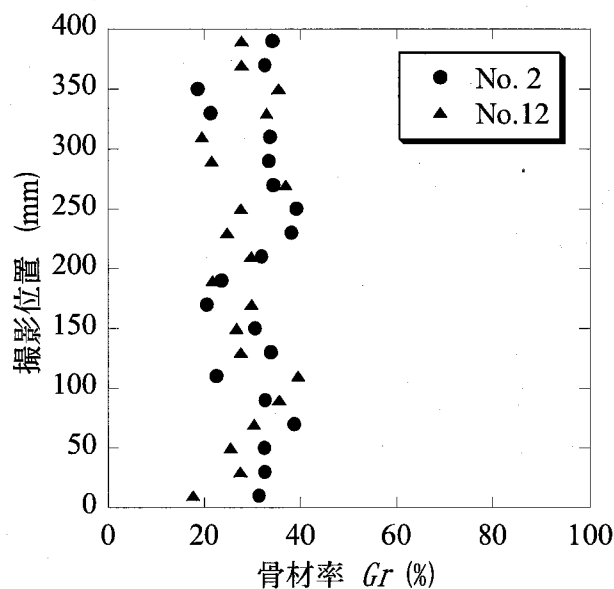


図-7.6 骨材率の鉛直分布

## (3) 骨材の粒度分布

骨材-モルタル境界 CT 値  $CT (g-m)$  をしきい値として二値化処理を行った二値化画像から画像処理によって骨材の粒度分布を推定した。粒径 1.2mm 以上で推定した粒度と、骨材の最大粒径 40mm のコンクリート骨材の標準粒度を図-7.7 に示す。推定粒度分布は供試体を代表する一断面の 2 次元データであり、ふるい試験わけによって求められる実際の粒度分布とは異なる可能性があるが、推定粒度はほぼ骨材の標準粒度の分布形状であるといえる。推定粒度分布は標準粒度と比較して、やや粗粒側にあるが、骨材の最大寸法が 80mm 程度と大きいことが理由のひとつと考えられる。また、No.2 の供試体は直径 10mm 程度以下の粒径が No.12 と比較して少なく、砂分が少ない可能性が考えられる。



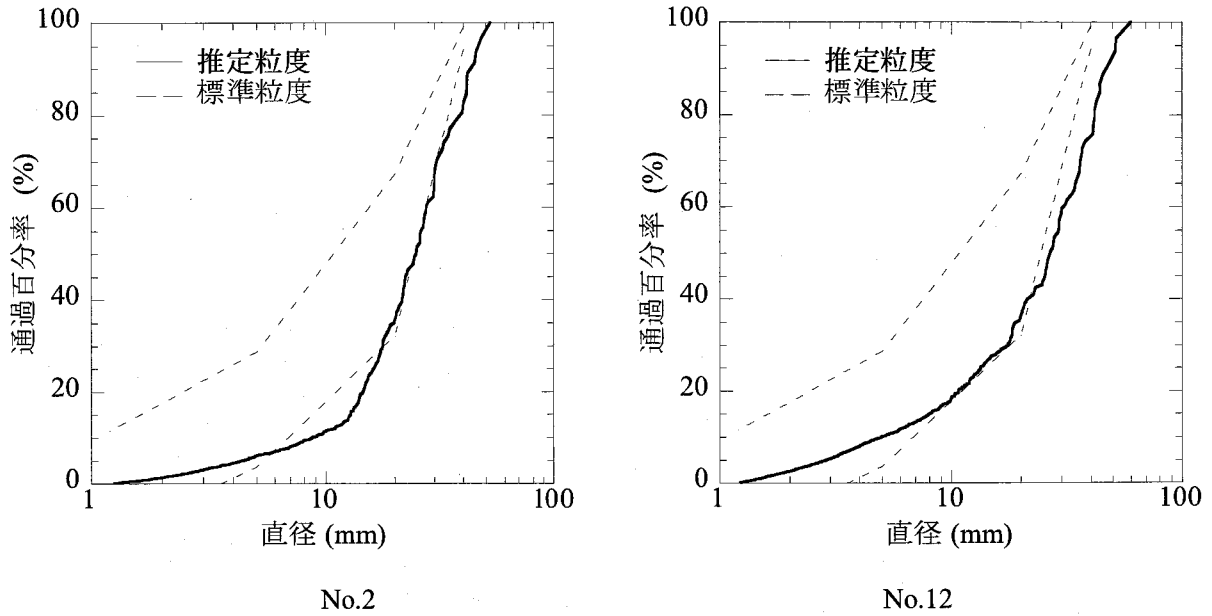


図-7.7 骨材の粒度分布（粒径 1.2mm 以上）

### 7. 2. 5 モルタル平均 CT 値の分析

#### (1) モルタル平均 CT 値の分布

供試体の各断面のモルタル平均 CT 値  $M_{CT}$  の分布を図-7.8 に示す。No.12 では上部でモルタル平均 CT 値が小さい傾向である。これは、図-7.4 で示したように空隙率の鉛直分布でも上部で空隙が多い分布であったことから、施工時にブリーディングが発生したことが原因であると考えら

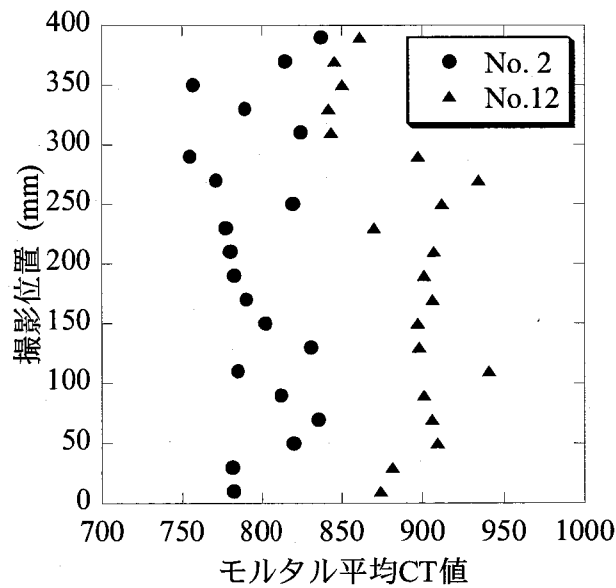


図-7.8 モルタル平均 CT 値の分布

れる。一方、No.2 ではモルタル平均 CT 値は一様の分布である。また、No.12 と比較して No.2 は全体的に CT 値が小さいことがわかる。このことから、No.2 は No.12 と比較して水セメント比や圧縮強度が小さいと推察される。

(2) 配合推定

1) 水セメント比の推定

No.2 の各断面のモルタル平均 CT 値  $M_{CT}$  を平均した供試体のモルタル平均 CT 値  $M_{CT} (mean)$  は 798, No.12 の供試体のモルタル平均 CT 値  $M_{CT} (mean)$  は 890 であった。供試体の直径は 100mm であるから、第5章第2節で検討した供試体寸法による CT 値への影響を考慮し、直径 125mm の時のモルタル平均 CT 値は式 (5.7) を用いて補正すると、それぞれ No.2 で  $M_{CT} (mean) = 681$ , No.12 で  $M_{CT} (mean) = 773$  となる。

第5章で求めたモルタル平均 CT 値  $M_{CT} (mean)$  と水セメント比の相関 (図-5.13) から、水セメント比の推定近似式 (5.1) を用いて供試体の水セメント比を推定すると、No.2 は 107%, No.12 は 66% となる。モルタル平均 CT 値と単位セメント量の相関 (図-5.13) に各供試体のモルタル平均 CT 値と推定した水セメント比をプロットしたものを図-7.9 に示す。

同図では、No.2 のモルタル平均 CT 値が小さいことから、水セメント比が大きく評価されている。この理由は不明であるが、本節第4項で述べた骨材の粒度分布の中で、砂分が少なく、モルタルの密度が小さく評価されたことが理由のひとつとして考えられる。

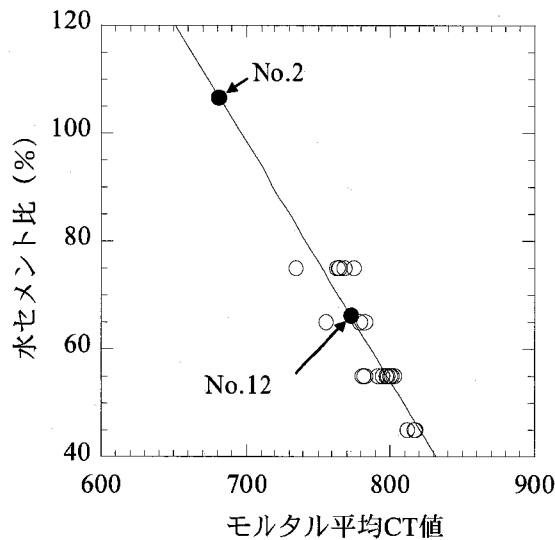


図-7.9 モルタル平均 CT 値と水セメント比

## 2) 単位セメント量の推定

水セメント比と同様に、材料構成定量化法で求めたモルタル平均 CT 値  $M_{CT}$  (mean) と単位セメント量の相関 (図-5.14) から、単位セメント量の推定近似式 (5.2) を用いて供試体の単位セメント量を推定すると、No.2 は  $50\text{kg/m}^3$ 、No.12 は  $250\text{kg/m}^3$  となる。モルタル平均 CT 値と単位セメント量の相関 (図-5.14) に各コアのモルタル平均 CT 値と推定した単位セメント量をプロットしたものを図-7.10 に示す。

推定した単位セメント量は、No.2 で小さく評価されている。これは水セメント比の場合と同様に、砂分が少なく、モルタルの密度が小さく評価されたことがひとつの理由として考えられる。

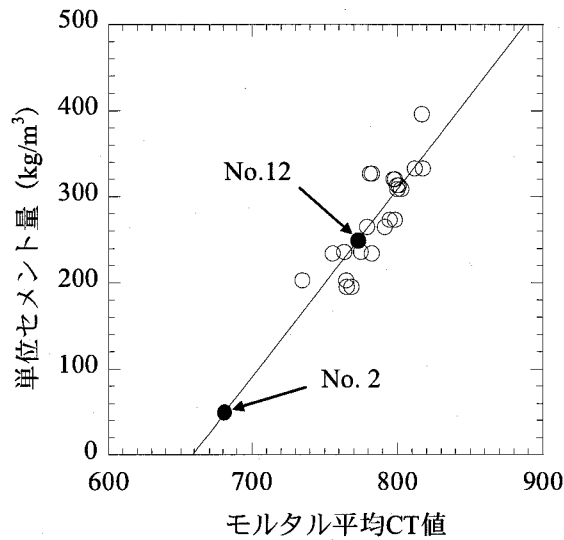


図-7.11 モルタル平均 CT 値と単位セメント量

## (3) 圧縮強度の推定

材料構成定量化法を用いて求めたモルタル平均 CT 値  $M_{CT}$  (*mean*) と圧縮強度  $F_{28}$  の相関 (図-5.22) から、圧縮強度の推定近似式 (5.6) を用いて供試体の材齢 28 日の圧縮強度  $F_{28}$  を推定すると、No.2 は負の値となり推定不可能、No.12 は  $25\text{N/mm}^2$  となる。供試体のモルタル平均 CT 値と材齢 28 日の圧縮強度  $F_{28}$  の相関 (図-5.22) に No.12 のモルタル平均 CT 値と推定した材齢 28 日の圧縮強度をプロットしたものを図-7.11 に示す。

材齢 28 日以降のコンクリート強度の変化はコンクリートの養生の状況により大きく変化すると考えられるが、一例として、材齢 28 日強度を 100 とした場合の圧縮強度比率として、普通ポルトランドセメントを使用し、スランプ 4cm, W/C=50% のコンクリートの 3 年後の強度は標準養生で 124 とされており<sup>1)</sup>、これによると No.12 の材齢 3 年の強度は  $31\text{N/mm}^2$  程度となることが予想できる。

工学院大学の調査<sup>2)</sup>では、図-7.2 に示した位置で採取した供試体の一部について、圧縮強度試験が実施されている。圧縮強度試験を実施した供試体のうち、No.2 を採取したスパンドレル付近の供試体および No.12 を採取したアーチ中央付近の供試体の圧縮強度試験結果を図-7.12 に示す。圧縮強度試験は採取した供試体を長さ 200mm に切断して実施するため、同じ供試体 No. から数本の供試体が採取できる。図-7.12 の各供試体名に示している数字は採取した供試体番号の No. を示しており、A-C の記号は当該供試体 No. において、切断後使用した供試体の記号を示している。

No.2 のスパンドレル付近の供試体の平均圧縮強度は  $24.4\text{N/mm}^2$ 、No.12 のアーチ中央付近の供試体の平均圧縮強度は  $33.9\text{N/mm}^2$  であった。このことから、スパンドレルとアーチ中央部のコンクリートは異なる配合 (水セメント比) を使用していると推察できる。

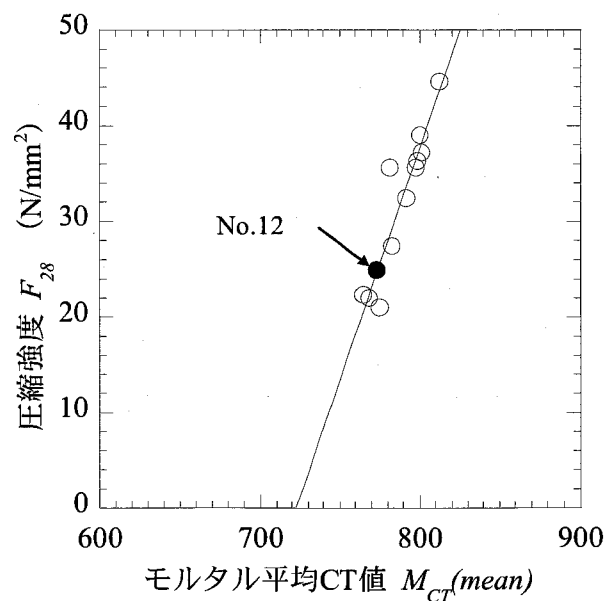


図-7.11 モルタル平均 CT 値と圧縮強度 (材齢 28 日)

No.12 に関しては材齢 3 年後、70 年までの圧縮強度の増加分は予測不可であるが、材齢 3 年後はそれほど強度の増加分がなかったとすると、材齢約 70 年の圧縮強度の実測平均値  $33.9 \text{ N/mm}^2$  に対して材齢 3 年の推定値  $31 \text{ N/mm}^2$  や材齢 28 日の推定値  $25 \text{ N/mm}^2$  という値はほぼ妥当であったと推察される。また、コンクリートの配合についても水セメント比や単位セメント量が近年使用されているコンクリートに近いものであると考えられる。

No.2 における推定値と実測値との相違は、少ない砂分や石炭ガラのような異物がモルタル平均 CT 値に影響していることや、セメントの種類、性能が室内作製コンクリートで使用したものと異なることが理由として考えられる。使用材料を同じとしたコンクリート供試体で圧縮強度の推定近似式を作成することにより、推定の精度を高めることは可能と考えられる。

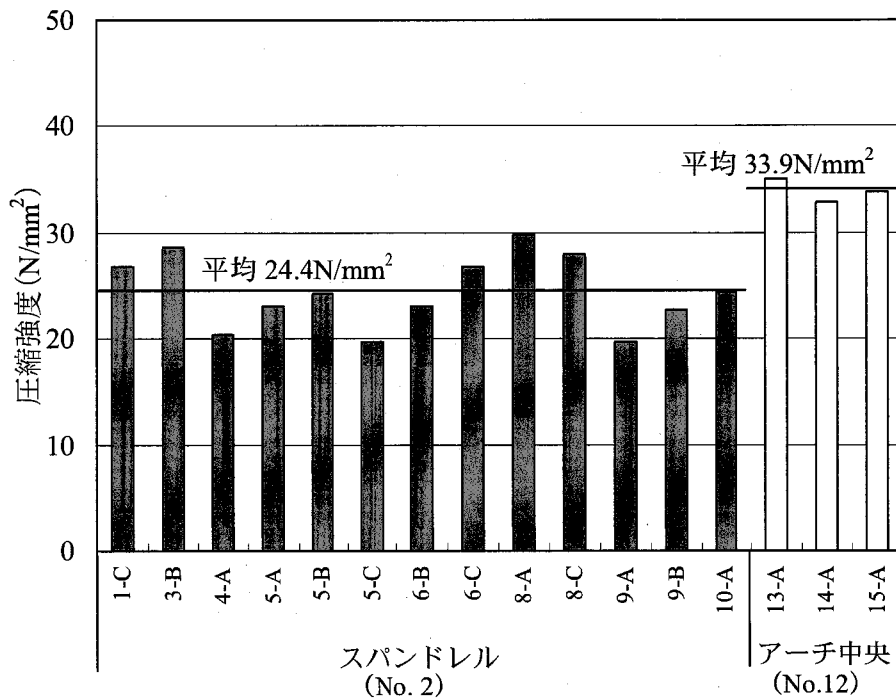


図-7.12 供試体の圧縮強度 (材齢 70 年)

### 7. 2. 6 まとめ

築後70年の橋梁コンクリートから採取された供試体に対してX線CT法を適用し、コンクリートの診断を行った。まず、X線CT画像の目視診断を行い、空隙の分布状況からブリーディングによって粗骨材の下部に水が溜まっている状況が確認できた。骨材の大きな特徴として、偏平な形状ものが多く、相当量の空隙を含んでいることが確認できた。構造物の地理的な要因と合わせると、使用骨材は阿蘇凝結溶解岩であると推察した。また、供試体中には石炭ガラのような、異物の混入も認められた。

次に、空隙の分析では、鉛直に採取した供試体で、ブリーディングの影響により上部ほど空隙が多いことがわかった。材料構成定量化法で評価した空隙率は第5章の室内作製コンクリートや工場生産コンクリートよりも大きく、骨材中に存在する空隙の量が影響を及ぼしていると推察した。

骨材の分析では、骨材の密度は $2.5\sim 2.6\text{g/cm}^3$ であると推定し、供試体中の骨材の分布はほぼ一様に施工されていることがわかった。骨材の推定粒度分布を求めた結果からは、特にスパンドレルの内側から採取した供試体では砂分が少ない傾向が認められた。

モルタル平均CT値の分析では、材料構成定量化法で求めた推定近似式を用いて、水セメント比や単位セメント量の推定を行った。使用する材料が異なるコンクリートの推定近似式を用いているため、モルタル平均CT値の低い水平方向のスパンドレル部の供試体では水セメント比が100%以上となり、評価困難であった。しかし、アーチ部から鉛直方向に採取した供試体では第5章の室内試験で評価したコンクリートと同程度のモルタル平均CT値であり、水セメント比66%、単位セメント量 $250\text{kg/m}^3$ 程度のコンクリートであると評価することができた。また、推定された圧縮強度が実測値に対してほぼ妥当な値であるという結果が得られた。

### 7.3 築後100年以上経過したレンガ構造物の診断<sup>3)</sup>

#### 7.3.1 概説

明治から昭和初期までに建造されたレンガ構造物は、橋脚、橋台、トンネル、水路構造物などで100年以上も経過し、多くの震災に遭遇したにもかかわらず、外観上はほとんど損傷が認められず現在も使用されている構造物が多く見られる。一方、2002年度から鉄道のレンガ積み旧式構造物について、「旧構造物の維持管理に関する研究」をテーマとして、レンガ供試体による部材実験や現位置調査により採取したコアによる各種材料試験、解析プログラムによる評価などの取り組みが全国で行われている。レンガ構造物は、主体となるレンガ、目地部のモルタル、モルタルとレンガの境界部等の損傷や劣化が原因で不安定になると考えられる。ここでは、これらの部分の健全性を調査する目的でX線CT法を適用する。

X線CT法による診断を行ったレンガ構造物である橋梁の一例（根室本線乙部川）を写真-7.2に示す。写真-7.3は同橋台のレンガ構造の状況である。

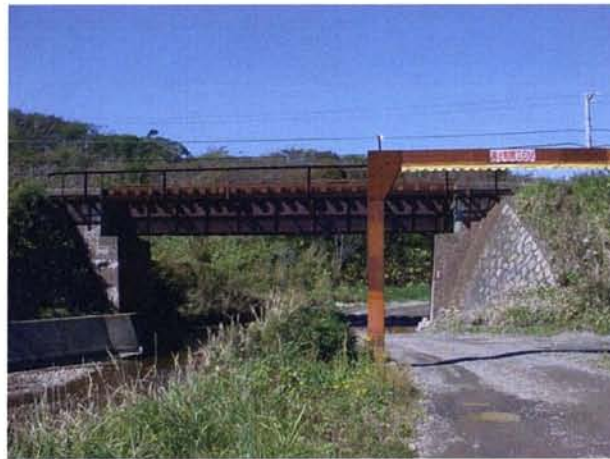


写真-7.2 橋梁と橋台（根室本線 乙部川橋梁）



写真-7.3 レンガ構造の橋台（根室本線 乙部川橋梁）

調査の対象としたレンガ構造物の概要を表-7.1 に示す。ボーリングして採取した供試体は計 5 本で、直径は 100mm、高さは 220mm から 450mm である。建設から 100 年以上経過している構造物もあることから、材料の劣化が進行している可能性がある。目地部分にはモルタルが使用されており、特にその目地部分の劣化が問題視されている。モルタル部の配合や材料は未知である。採取した供試体の一例（根室本線乙部川）を写真-7.4 に示す。

供試体は事前に乾燥炉に入れ、110℃の温度で 24 時間乾燥させ、その後密閉容器に乾燥剤とともに入れて 12 時間自然冷却させた後に X 線 CT 撮影を行った。供試体撮影時にはファントムを同時に撮影し、一本の供試体につき 30mm～70mm の間隔で 5～7 断面撮影を行った。各供試体について全体の撮影断面数と目地部を対象として撮影されている断面数を表-7.2 に示す。

表-7.1 レンガ供試体の概要

No	採取場所	作成時期	直径(mm)	高さ(mm)
1	JR 九州 鹿児島本線 遠賀川橋梁	明治から昭和初期	100	300
2	JR 北海道 根室本線 乙部川橋梁	1900 年ごろ	100	450
3	JR 東日本 東北本線 和香川橋梁	明治から大正	100	350
4	JR 東日本 新橋駅	—	100	220
5	JR 東海 武豊線 石ガ瀬橋梁	—	100	250



写真-7.4 採取した供試体の例

表-7.2 撮影断面数

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
全体の撮影断面数	7	7	5	6	7
目地部を対象とした撮影断面数	3	1	1	3	2



### 7. 3. 2 X線 CT 画像の目視診断

直径 100mm の供試体のうち、モルタル部の X 線 CT 画像の一例 (No.1) を図-7.13 に示す。CT 画像では指標となる「ファントム」を供試体の左下に同時に撮影している。また、全断面の X 線 CT 画像を付録-7 (巻末資料) に示す。

CT 画像ではレンガとモルタル目地部の状況が確認できる。レンガは均質ではなく、白い密度の高い部分や黒い空隙を示す部分が存在することがわかる。また、目地部のモルタルについては空隙の存在が確認でき、レンガ部との境界部についても鮮明に認識可能である。図-7.14 に各供試体の拡大画像と目地のモルタル部とレンガ部の X 線 CT 画像を示す。

モルタル目地部の状況は、No.2 (a)や No.3 (a)の画像のように大きな空隙を含む部分もあるが、No.1 (a)や No.4 (a), No.5 (a)の画像のように空隙がない部分もある。一方、レンガ部の画像では No.1 (b)に示されるようにモルタル目地部に存在する大きな空隙のほか、No.3 (b)や No.5 (b)の画像のように、モルタル目地部とレンガの境界部に存在する連続した空隙が確認できる。一方、No.2 (b)の画像の上部のモルタル目地部はモルタルがよく詰まっており、非常に良好な施工が実施されたといえる。このように、モルタル目地部の状況は空隙のない良好な施工がされている部分と空隙の存在する良好とはいえない部分が混在する。

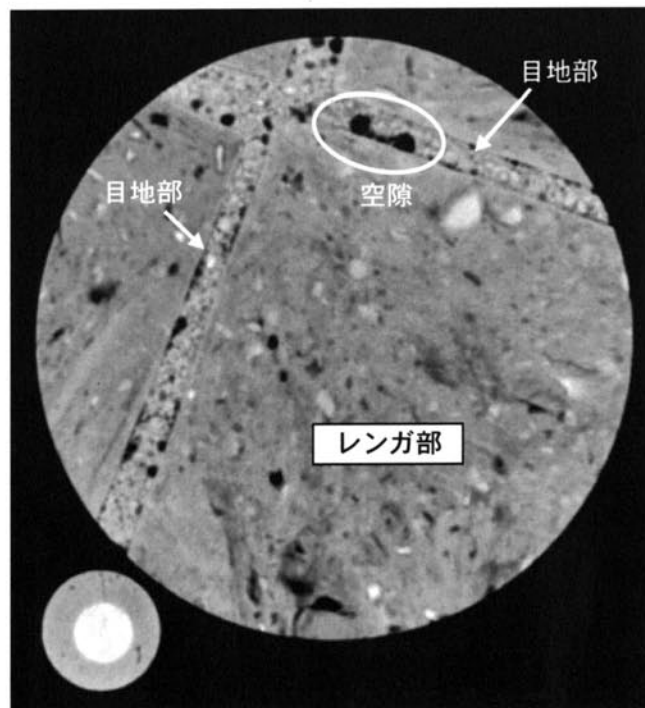


図-7.13 供試体の X 線 CT 撮影画像の例


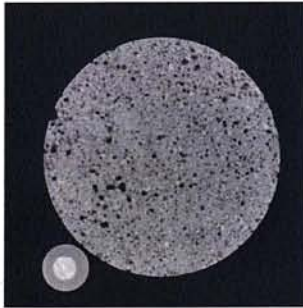








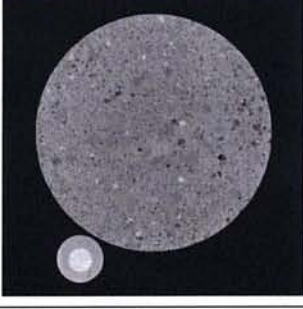
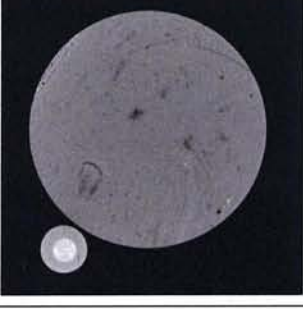



No	拡大図	(a) モルタル部の CT 画像	(b) レンガ部の CT 画像
1			
2			
3			
4			
5			

図-7.14 供試体の拡大図，モルタル部の CT 画像およびレンガ部の CT 画像

次に、モルタル部の断面画像における白い線分で示した直径方向のCT値の分布形状を図-7.15に示す。各画像は明るさやコントラストの設定を一定にして表示している。図には比較の目的で、フレッシュコンクリートをウエットスクリーニングしたもので作製した水セメント比65%のモルタル供試体（第5章の室内作製供試体と同じ材料で作製）のX線CT画像を添付している。

No.1 は、標準供試体 No.6 と比較して黒い部分すなわち小さな空隙が多いことが認識できる。CT値の分布形状でも変動が大きく、小さい空隙が多く存在する特徴が確認できる。一方、No.2, No.3, No.4 は、No.6 と比較して全体的に暗い灰色であり、CT値も全体的に低いことがわかる。特に、No.3 と No.4 の中心付近のCT値は平均で500程度であり、No.6 の中心付近のCT値が750

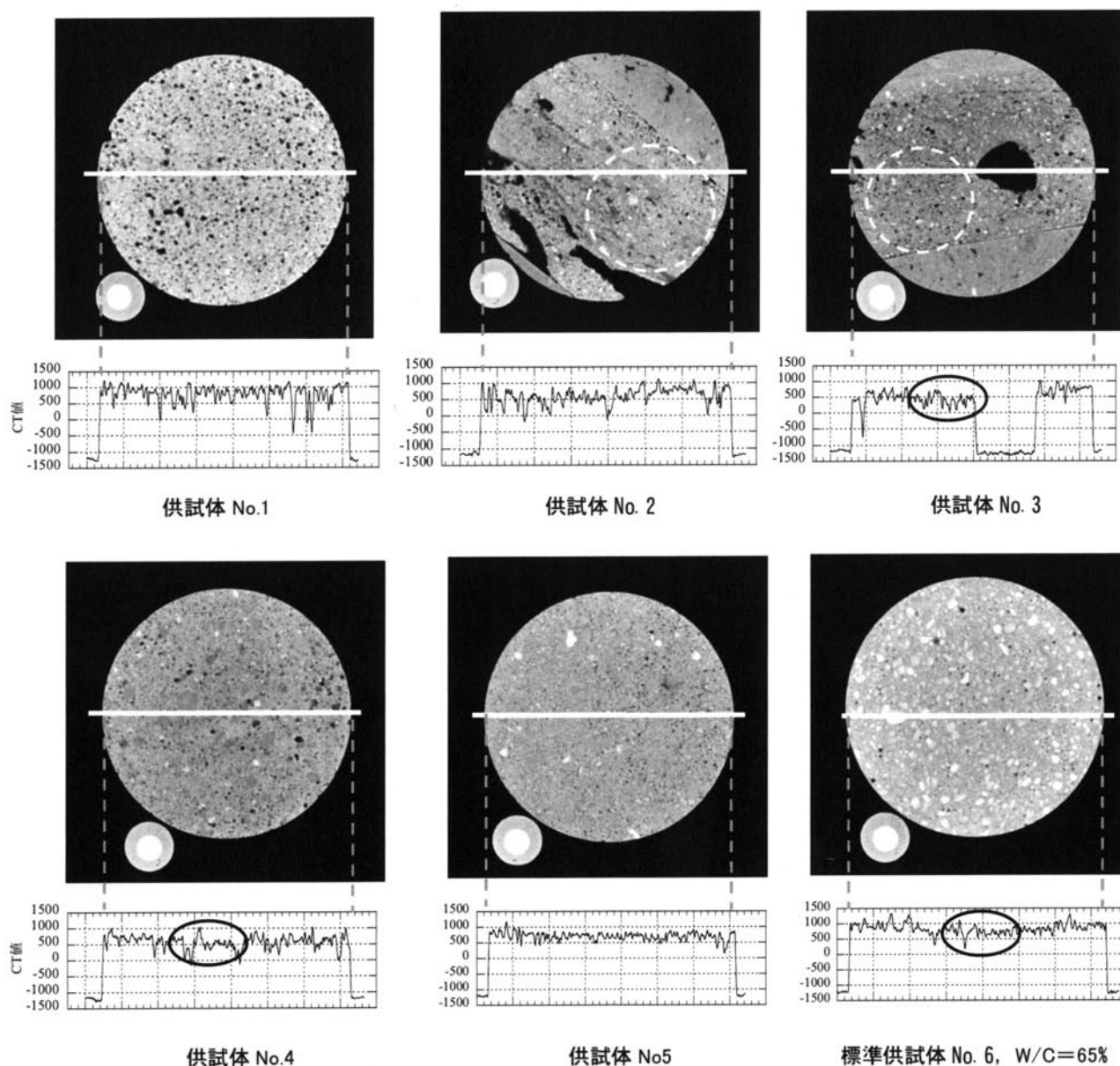


図-7.15 モルタル部のX線CT画像とCT値の分布図

程度であることと比較すると低い CT 値である。また、No.5 も若干ではあるが CT 値は低く、標準供試体 No.6 と比較すると画像は暗い。さらに、No.5 は No.6 と比較して、白い部分の骨材や黒い部分の空隙が少ないことから、小さい粒径の骨材を使用し、空隙が少なく施工されていると推察できる。

なお、No.2 と No.3 は、大きな空隙が存在することから、モルタルの CT 値を評価する際には図中に示した白い点線の範囲内を対象領域とする。

### 7. 3. 3 空隙の分析

図-7.15 に示す No.1～No.5 の各供試体断面を対象として、材料構成定量化法を用いて空隙率  $Pr$  の評価を行った。対象領域は No.1, No.4 と No.5 に関しては供試体の断面全体とし、No.2 と No.3 に関しては、点線の範囲内を対象領域とした。表-7.3 にモルタル部の空隙率  $Pr$  を示す。

モルタル部の空隙率は No.2, No.3 と No.4 について空隙率が 10%～16% と評価されたが、No.1 では 25.5% と大きく、No.5 では 1.2% と極端に小さい。図-7.15 の画像で評価したように、No.1 では小さい空隙の存在が顕著であり、このために空隙率が大きいと考えられる。一方、No.5 では空隙が少なく、密実なモルタルによって緻密な施工が実施されていたと推察される。

表-7.3 空隙面積率

供試体	空隙率 $Pr$ (%)
No.1	25.5
No.2	12.8
No.3	10.2
No.4	15.9
No.5	1.2

### 7. 3. 4 骨材の分析

目地モルタルには粒径 5mm 以上の粗骨材は使用されていないと考えられ、骨材がモルタル部の物性に及ぼす影響は小さいと考えられるが、図-7.15 に示す No.1～No.5 の各供試体断面を対象として、材料構成定量化法を用いて骨材率  $Gr$  の評価を行った。対象領域は No.1, No.4 と No.5 に関しては供試体の断面全体とし、No.2 と No.3 に関しては大きな空隙を含むことから図中に示した点線の範囲内を対象領域とした。表-7.4 にモルタル部の骨材率  $Gr$  を示す。

No.1 の供試体で骨材率が 3.0% と多く、他のコア供試体と比較して大きい骨材率であるが、図-7.15 の画像で評価したように、コア No.1 は供試体断面の CT 値が高いことから骨材が多く使用されていると考えられる。

表-7.4 骨材面積率

供試体	骨材率 $Gr$ (%)
No.1	3.0
No.2	0.7
No.3	0.1
No.4	0.1
No.5	0.3

### 7. 3. 5 モルタル平均CT値の分析

#### (1) モルタルCT値のヒストグラム

図-7.15 に示す No.1~No.6 の各供試体断面について、モルタル部の CT 値のヒストグラムを求めたものを図-7.16 に示す。対象領域は空隙率を評価した時と同様に、No.1, No.4, No.5 と No.6 に関しては供試体の断面全体とし、No.2 と No.3 に関しては大きな空隙を含むことから図中に示した点線の範囲内を対象領域とした。

モルタル CT 値の頻度分布の位置や形状は、骨材の量や水セメント比、空隙の量等によって各供試体について大きく異なっている。頻度分布のピークの CT 値は No.1 が最も高く、No.3 が最も低い。

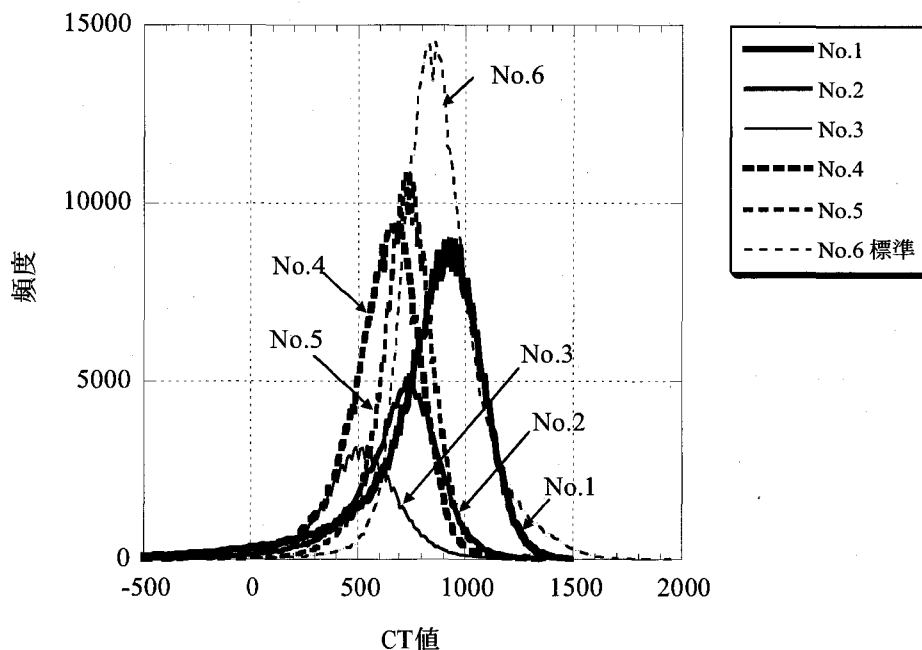


図-7.16 モルタル部平均CT値のヒストグラム

## (2) モルタル平均 CT 値

材料構成定量化法を用いて No.1~No.5 のモルタル平均 CT 値  $M_{CT}$  (mean) を求めた。供試体の直径は 100mm であるから、第5章第2節で検討した供試体寸法による CT 値への影響を考慮し、式 (5.7) を用いて直径 125mm の時のモルタル平均 CT 値に補正した。補正した各供試体のモルタル平均 CT 値を表-7.5 に示す。モルタル平均 CT 値は No.1 が最も高く、No.3 が最も低いことがわかる。

次に、材料構成定量化法で求めたモルタル平均 CT 値と水セメント比の関係から、水セメント比の推定近似式 (5.1) を用いて各供試体の水セメント比を推定した。図-7.17 に材料構成定量化法で求めたモルタル平均 CT 値と水セメント比の相関 (図-5.13) に各供試体のモルタル平均 CT 値と推定した水セメント比をプロットしたものを示す。

表-7.5 供試体のモルタル平均 CT 値

供試体	モルタル平均 CT 値 $M_{CT}$ (mean)
No.1	764
No.2	611
No.3	487
No.4	519
No.5	609

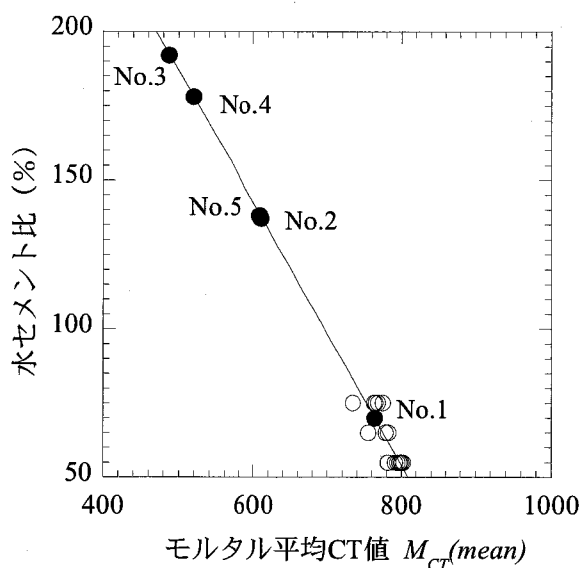


図-7.17 モルタル部の平均 CT 値と水セメント比

図-7.17より、No.1を除いてモルタル平均CT値より評価した水セメント比は130%以上と大きく評価されていることがわかる。水セメント比の大きい箇所では強度不足が懸念されるため、No.2～No.5の各箇所については詳細な調査が必要と考えられる。

No.1のモルタルは、小さな空隙が多く、空隙率が大きかった。また、骨材率が大きく、モルタルCT値が大きかった。これらのことから、骨材量の多い、水セメント比の小さい硬練りのモルタルを材料として施工していた可能性が高いと推察される。また、No.2～No.4のモルタルは、空隙率や骨材率、モルタル平均CT値の値が近く、水セメント比の大きい、単位水量の大きいモルタルであったことが推察される。一方、No.5のモルタルは、骨材率が小さく、画像でも骨材が少ないと評価できた。そして、空隙率は少ないことから、水セメント比や単位水量が大きいとともに、骨材が少ないセメントペーストに近い材料で施工された可能性が高いと推察される。

### 7.3.6 まとめ

築後100年以上経過したレンガ構造物より採取した供試体に対してX線CT法を適用し、モルタル目地部の診断を行った。まず、X線CT画像の目視診断を行い、各供試体のモルタル目地部の状況は、空隙のない良好な施工がされている部分と空隙の存在する良好とはいえない部分が混在することがわかった。

空隙の分析では、モルタル部の空隙率について、3本の供試体の空隙率が10%～16%の範囲にあるのに対し、1つの供試体は小さい空隙が多く存在するために空隙率が25.5%と大きく、1つの供試体は1.2%と小さい結果であり、供試体による大きな相違があった。

モルタル平均CT値の分析では、地域によりかなりのばらつきがあり、No.1を除いて他の供試体の水セメント比は相当に大きいものであったと推察される。水セメント比の大きい箇所では強度不足が懸念されるため、No.2～No.5の各箇所については詳細な調査が必要と考えられる。No.1のモルタルは、小さな空隙が多く、空隙率が大きかった。そして、骨材率が大きく、モルタルCT値が大きかったことから、骨材量の多い、水セメント比の小さい硬練りのモルタルを材料として施工していた可能性が高いと推察された。

以上、既設レンガ構造物の目地モルタル部にX線CT法を適用することによって、骨材や空隙の特徴を把握し、モルタルの特性について、総合的な考察を行うことができた。レンガ構造物のモルタル部のような狭い範囲の対象物では、圧縮強度試験などを実施することが困難であり、劣化状況等を把握、検討するにはX線CT法は有効であるといえる。

## 7. 4 X線 CT 法のコンクリート診断への適用に関する考察

### 7. 4. 1 X線 CT 法による可視化

医療診断と同様であるが、X線 CT 法をコンクリート診断へ適用する最大のメリットは、内部構造の可視化である。可視化により、X線 CT 画像の目視診断を行い、定性的な評価が可能となる。医療診断において、X線 CT 画像から病気の範囲や程度などを診断するように、コンクリートの場合でも骨材や空隙の形状、分布状況などにおける特徴的なことから、コンクリートの材料特性や劣化状況を診断することが可能である。このためにはX線 CT 画像の目視診断を行う技術者に、コンクリートに対する高度な技術的知見が必要であるが、このことは、医療診断においても同様である。

図-7.18に示したX線 CT 画像は、第5章で使用した室内作製コンクリートと本章で扱った1930年代の橋梁コンクリートのコア供試体の撮影断面である。X線 CT 画像は、明るさやコントラストの調整によって見え方も異なるが、コンクリートの物性に関する特徴を比較することが可能である。例えば、図-7.18の画像を対象に目視診断を実施すると、室内作製コンクリートの骨材は色がほぼ一様であるのに対し、既設橋梁コンクリートの骨材には模様があり、黒い空隙が確認できる。また、骨材周辺の空隙や偏平な骨材が使用されていることも特徴的であるといえる。

このほか、例えばコンクリート供試体の超音波伝播速度を測定しても、骨材を伝わってきたものか、モルタル部分を伝わってきたものか、あるいは鉄筋の部分を伝わってきたものかなどの疑問に遭遇する。このような疑問を解決できる手段としても、X線 CT 画像を用いた可視化による目視診断は大変有効であると考えられる。

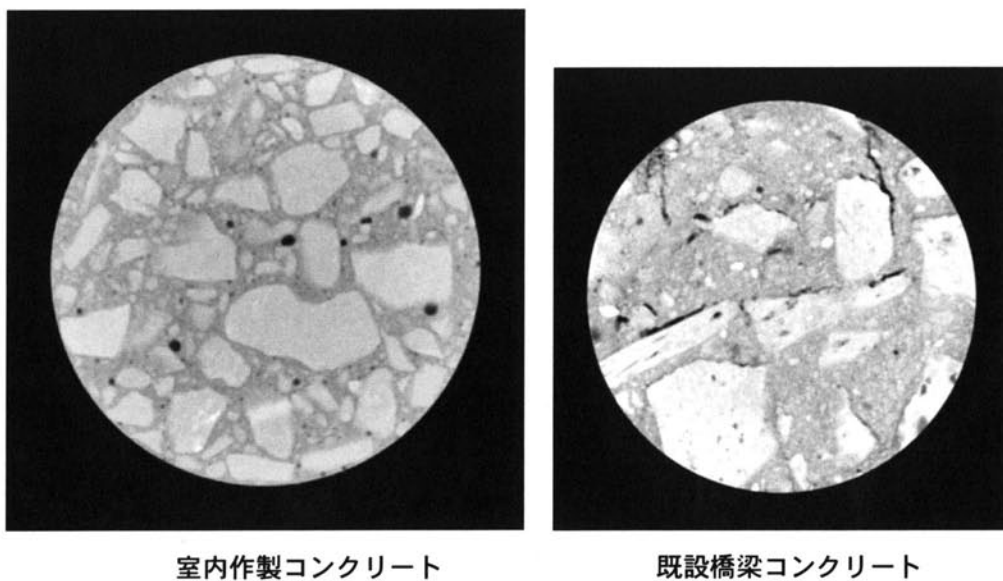


図-7.18 コンクリート供試体のX線 CT 画像の例



#### 7. 4. 2 定量化による構造特性評価

X線CT法を工学的に活用するためには、定量化された数値情報を合理的に評価することが必要である。すなわち、X線CT画像より、対象物体の寸法や密度情報を数値的に処理することで、物性の評価が可能となる。コンクリート診断においては、構成材料の定性的な特徴を把握するとともに、材料構成の定量化を行うことにより、さらに判断材料が増え、空隙率や骨材率、水セメント比の評価など、数値的な評価が可能になる。

本研究では、X線CT法を用いたコンクリート診断の際に、コンクリートの材料構成の定量化によって、相対的な評価が可能ながことが明らかとなった。具体的には、コンクリート供試体のモルタル平均CT値を求めることにより、相対的に水セメント比や単位セメント量の大きさを比較することが可能であり、例えば配合が既知の標準供試体と診断対象の供試体を比較することによって、空隙率や骨材率、水セメント比の相対的な評価が可能となる。また、鉛直方向の供試体を採取してX線CT法を適用することにより、ブリーディングなどの施工状況の把握も可能となる。

一方、絶対的な評価として、コンクリートの配合推定、すなわち水セメント比や単位セメント量を推定する場合、使用材料が同じであれば高い精度での配合推定が可能となり、例えば、細骨材の種類や細骨材率が異なる場合などでも十分な精度の配合推定が可能と考えられる。しかし、使用材料が大きく異なる場合、特にセメントの種類が異なる場合や使用骨材の密度が大きく異なる場合には、共通の推定近似式を用いると誤差が大きくなるので注意が必要である。このような場合には、使用する材料毎にモルタル平均CT値と水セメント比、単位セメント量の相関と推定近似式を求めることが必要となる。また、使用材料が未知の供試体であっても、類似する材料を用いた、数種類のコンクリート供試体の推定近似式を事前に作成しておくことにより、X線CT法を用いて骨材の密度などを評価することは可能であると考えられる。

#### 7. 4. 3 X線CT法による診断項目

X線CT法を用いて、既設コンクリート構造物の診断と総合評価を行うにあたっては、一覧表により「コンクリートの何が診断できるか」という項目を明確にすると便利である。本研究で実施した診断項目について、X線CT法により評価可能と考えられる項目を表-7.6に示す。表では、本研究では対象としていないが、例えば、クラックの評価などのような項目について、評価可能と考えられる項目についても整理を行った。

また、抽出した評価項目を材料の物性に関するものと施工の評価に関するものに区別し、具体的な評価事項について記載をしている。本表は今後、X線CT法をコンクリート診断に適用する際の評価項目の指標となると考えられる。

表ではまず、内部の状況として、配筋や異物などの内部欠陥を挙げた。これらはコア供試体を採取するよりも原位置において施工状況を把握するために実施する要望があると考えられる。次の空隙や骨材については本章でもX線CT法の有効性を確認できたと考えられるが、空隙の量や

分布、骨材の密度や分布状況、形状、最大寸法や粒度分布など、非常に多くの情報を信頼性のある可視化という方法で得ることができる。空隙については、本研究では検討していないが、ひび割れもその対象となるであろうし、骨材についても例えば碎石か川砂利かなども骨材の形状から容易に推察が可能であると考えられる。

最後にモルタル平均 CT 値の分析により、ブリーディングなどの施工状況の把握や配合推定が可能になると考えられる。配合推定については、材料毎に十分なデータがないのが現状であるが、普通ポルトランドセメントを用いた一般的なコンクリートであれば、現状でも十分に適用可能である。既設構造物を診断する際には使用材料が未知のものが多いと考えられるが、精度の高い配合推定を行うためには、種類の異なる使用材料や配合を用いたコンクリート供試体のモルタル平均 CT 値のデータを多く採取することが望ましいといえる。

表-7.6 X線 CT 法で評価可能な項目の一覧

評価項目	材料の物性に 関するもの	施工の評価に 関するもの	具体的な評価事項
<b>a 内部の状況</b>			
a-1 配筋（径、本数、被りなど）	○	○	施工状況
a-2 内部欠陥（異物、空隙など）	○	●	施工状況
<b>b 空隙（直径1mm以上を対象）</b>			
b-1 空隙の量・分布（鉛直方向）	●	●	施工状況（ブリーディング）
b-2 空隙の特徴（形状、大きさ、位置）	●	●	施工状況（ジャンカなど）
b-3 クラックの形状	○	○	劣化状況
<b>c 骨材（粒径1mm以上を対象）</b>			
c-1 骨材の密度（CT値）	●		配合
c-2 骨材の量・分布（鉛直方向）	●	●	施工状況（粗骨材分離）
c-3 骨材の最大寸法、形状など	●		配合（偏平の程度）
c-4 粒度分布	●		配合
<b>d モルタル</b>			
d-1 モルタルの密度（CT値）の分布状況		●	施工状況（ブリーディング）
d-2 モルタルの密度（CT値）	●		配合 [ 水セメント比（圧縮強度）、 単位セメント量 ]

● 本研究で実施した項目

○ 評価可能と考えられる項目

## 7. 5 結言

X線CT法による既設コンクリートの総合的な診断という目的で、築後70年後の橋梁構造物と築後100年以上経過したレンガ構造物という2つ構造物にX線CT法を適用し、その有効性を検討した。

70年経過後の橋梁コンクリートでは、スバンドリル部とアーチ部の2箇所から採取したコアに対してX線CT法を適用し、まずX線CT画像の目視診断により空隙の分布状況や骨材の特性に関する特徴的なことが明らかとなった。次に、材料構成定量化法を用いて、空隙や骨材の分析を行い、施工時においてブリーディングが発生したことや空隙の多い骨材を使用しているなどの特徴を明らかにした。最後にモルタル平均CT値の分析を行い、コンクリートの水セメント比や単位セメント量、圧縮強度の推定を行った。使用する材料が異なるコンクリートの推定近似式を用いているため、モルタル平均CT値の低い供試体では水セメント比が100%以上となり、評価困難であったが、第5章の室内試験で評価したコンクリートと同程度のモルタル平均CT値の供試体については、推定された圧縮強度が実測値に対してほぼ妥当であるという結果が得られた。

100年以上経過後のレンガ構造物でも同様な項目について分析を行った。100年以上経過後という特殊性に加え、レンガ構造物の目地部という特殊な条件での分析となったが、X線CT画像の目視診断により施工状況などの把握が可能となった。また、X線CT画像の目視診断と同時にCT値について直径方向の分布形状や頻度分布の分析を行うことで、コア供試体による相違を把握することができた。次に、モルタル平均CT値の分析により水セメント比の推定を行ったが、コアNo.1を除いてCT値が極端に小さく、相当に水セメント比が大きいということが明らかとなり、これらについては更なる診断の必要性を提案した。

本章の既設構造物の診断では、X線CT画像による「可視化」が総合評価を実施する際に大きな役割を果たしたといえる。材料が未知のコンクリート構造物の配合推定を行うには、十分なバックデータが必要であることがわかったが、コンクリートの総合的な診断を行う際に、可視化という部分でこれを補うことで評価の精度は向上すると考えられる。

最後に、X線CT法のコンクリート構造物診断への適用に関する考察を行った。X線CT画像の目視診断を行い、構成材料の定性的な特徴を把握するとともに、材料構成の定量化を行うことにより、さらに判断材料が増え、空隙率や骨材率、水セメント比の評価など、数値的な評価が可能になる。さらに、実際にX線CT法を適用することにより「コンクリートの何が診断できるか」という項目について一覧表にまとめ、今後X線CT法でコンクリート診断を行う際の指標となるように評価項目の整理を行った。

**【参考文献】（第7章）**

- 1) 岡田清，六車熙：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，p.345，1981.
- 2) 嵩研究室，“2007年度旧国鉄宮原線幸野川橋梁に関する調査報告書”，工学院大学工学部建築都市デザイン学科，2007.10
- 3) 天明敏行，村上祐治，伊藤剛，尾原祐三，“X線CT法による100年以上経過後のレンガ構造物の診断例”，土木学会第63回年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp.379-380，2008.9

## 8章 結論

高度経済成長期に大量に建設されたコンクリート構造物の維持・管理は、社会資本整備における21世紀の日本の大きな課題である。コンクリート構造物の寿命を延ばし、機能を回復させるためには、まずコンクリートの現状を診断し、的確な評価を行うことが重要である。

本論文では医療分野で診断に普及されているX線CTスキナの産業用の装置を用い、X線CT法をコンクリート診断に適用するための基礎的な研究を行った。本研究で対象としたコンクリートは型枠を用いて作製した供試体や実構造物より採取したコア供試体であり、これらにX線CT法を適用して分析をすることにより、配合の推定や施工状況・劣化状況の評価を行った。

第1章では、X線CT法をコンクリート診断へ適用する本研究の背景と目的を示すとともに、本論文の構成について述べた。

第2章では、X線CT法に関するレビューを行った。まず、X線やX線CT法の歴史について概観するとともに、地盤材料への適用に関する既往の研究についてまとめた。次に、近年の研究成果として、GeoXシンポジウムで発表されている研究やコンクリート工学におけるX線CT法の適用した例についてレビューを行った。

第3章では、X線CT法をコンクリートに適用するにあたり、X線やX線CT法の基本的な概念、画像の構成方法、本研究で用いたX線CT装置やコンクリート供試体のX線CT画像についてその特徴や留意点をまとめ、直径の異なるコンクリート供試体を用いて行った基礎試験を行った。試験は、直径の異なるコンクリート供試体を用い、管電圧やスライス厚などの条件を変化させてX線CT撮影を行った。撮影条件を変化させた試験結果から直径が125mm以下のコンクリート円柱供試体を撮影する場合には、十分な電圧をかけてカップング効果の影響を小さくするために、管電圧を300kVとすることが望ましいことがわかった。また、スライス厚は細かいものを観察するためには0.3mmと小さく設定できるが、ノイズの影響を避けるには1.0mm以上とすることが適当であり、これによってコンクリートを粒径約1.0mm以上の骨材、モルタル、粒径約1mm以上の空隙（エントラップドエア）に分けて判別することが可能であることがわかった。

第4章では、X線CT法を用いてコンクリートの材料構成の定量化を行うため、コンクリートの断面画像のCT値のヒストグラムを用いて、骨材、モルタル、空隙に区分し、それら材料構成の定量化法を新たに開発した。具体的には、材料の境界CT値を評価する方法として、空隙とモルタルの境界CT値については、CT値のヒストグラムから特徴点を見出し、微分処理を行うことでしきい値を決定し、骨材とモルタルの境界CT値については、供試体とともに撮影したファン

トムを用いてしきい値を決定した。この結果、境界 CT 値を精度よく、かつ、客観的に決定することが可能となった。また、それらを用いて構成材料の空隙率、骨材率およびモルタルの相対密度分布を定量化することができることを具体的に示した。さらに、原位置から採取した圧縮強度試験用の供試体などの材料構成特性を評価する場合は、直径 125mm 程度の円柱供試体であれば、10 断面程度の X 線 CT 撮影を実施してそれぞれの値を評価し、それらの平均値をコアの材料構成特性の代表値とすることが望ましいと論じた。

第5章では、第4章で提案した材料構成定量化法を適用して、材料や配合の異なるコンクリート供試体の構造特性評価、すなわちコンクリート供試体の骨材率、空隙率、モルタル平均 CT 値の評価を行った。

第2節では、3種類の細骨材を用い、実験室内で水セメント比や細骨材率を変えたコンクリート供試体を作製し、X線CT法を適用した。室内で作製されたコンクリート供試体の材料や配合の範囲内ではモルタル平均値に対する水セメント比、単位セメント量、圧縮強度の相関は高く、これらの相関関係を用いて配合を推定できることを明らかにした。また、本方法で評価された水セメント比や単位セメント量は、従来の配合推定方法である「セメント協会法」と呼ばれる方法と同程度以上の精度を有することがわかった。さらに、供試体の X 線 CT 画像から推定粒度分布曲線を求め、実際の粒度分布と比較を行い、粒径 1mm 以上を対象にした推定粒度分布において、粒径 15mm 以下の粒度分布は実際の粒度分布に近いものであることを確認した。

第3節では、九州の6つの生コン工場で生産された7本のコンクリート供試体に X 線 CT 法を適用して空隙率、骨材率、モルタル平均 CT 値の評価を行った。生コンは工場が異なるため、使用される材料や配合が大きく異なるものであったが、モルタル平均 CT 値と水セメント比の相関やモルタル平均 CT 値と単位セメント量の相関は高く、室内作製コンクリートともほぼ同様の傾向であることが確認できた。X 線 CT 法における材料構成定量化法で評価するモルタルは粒径 1mm 以下の細かな骨材を含んでいるが、同じ種類のセメントや同程度の密度の骨材、標準粒度の骨材を用いている場合には、水セメント比などの評価が可能であると考えられる。一方、生コン工場で作製された供試体には粗骨材の密度が相当に高いものやセメントの種類が異なるものがあったが、このような場合に水セメント比などを評価する際には注意が必要であることがわかった。

X 線 CT 法による配合推定を高い精度で行う場合には、その材料ごとに推定近似式を求めることで対応が可能となると考えられる。具体的な方法として、使用する骨材毎に水セメント比の異なる供試体を作製して X 線 CT 法を適用し、モルタル平均 CT 値－水セメント比の相関図より推定近似線を求める。推定対象のコンクリートにも同様にモルタル平均 CT 値を求め、推定近似式を用いることで水セメント比や単位セメント量、圧縮強度などの特性を推定、評価することができると考えられる。

第6章では、施工時におけるコンクリートの品質評価に関する諸問題について X 線 CT 法を適用した事例について述べた。コンクリート構造物の診断にあつては、材料そのものの診断を行うとともに、どのように施工が行われていたかを評価することも大変重要である。

第2節では、コンクリート構造物コンクリートの施工上の最大の特徴のひとつであるコンクリートの経時変化について X 線 CT 法による検討を行った。また、経時変化に伴うブリーディングの影響を調査するために、X 線 CT 装置のスキャノ撮影という機能を用いて、コンクリートの平面透過撮影を実施した。

モルタルの X 線 CT 撮影では打込み初期に CT 値が上昇するが、その上昇量はわずかであり、密度の変化を伴うようなものではないことがわかった。一方、コンクリートの経時変化試験では、差画像の分析により、ブリーディングの発生する範囲や程度などを明らかにした。

第3節では、コンクリートダムにおいて近年の合理化施工の代表である RCD 工法について、現場から採取されたボーリングコアに X 線 CT 法を適用し、材料や空隙の分布特性を明らかにするとともに、コアを用いた物理特性と比較検討し、施工評価を行った。X 線 CT 法の適用によって懸念された骨材の分布状況やブリーディングの状況を定量的に確認することができた。また、空隙の特徴などが可視化によって明らかとなり、リフト内の物性の分布に与える影響などを考察することが可能となった。

第4節では、鉄筋コンクリート構造物を対象とし、施工されたコンクリート橋梁の数箇所から供試体をサンプリングし、供試体の空隙率や骨材率のばらつきを評価するとともに、供試体のモルタル平均 CT 値からコンクリートの圧縮強度を評価した。その結果、供試体のモルタル平均 CT 値は圧縮強度と高い相関にあることを確認し、得られた相関関係を用いれば、供試体のモルタル平均 CT 値から圧縮強度の推定が可能となったことが明らかとなった。

本論文の最終章の7章では、X 線 CT 法による既設コンクリートの総合的な診断という目的で、築後70年後の橋梁構造物と築後100年以上経過したレンガ構造物という2つ構造物に X 線 CT 法を適用し、その有効性を論じた。

70年経過後の橋梁コンクリートでは、スバンドリル部とアーチ部の2箇所から採取したコアに対して X 線 CT 法を適用したが、まず X 線 CT 画像の目視診断により空隙の分布状況や骨材の特性に関する特徴的なことが明らかとなった。次に、材料構成定量化法を用いて、空隙や骨材の分析を行い、施工時においてブリーディングが発生したことや空隙の多い骨材を使用しているなどの特徴を明らかにした。最後にモルタル平均 CT 値の分析を行い、コンクリートの水セメント比や単位セメント量、圧縮強度の推定を行った。使用する材料が異なるコンクリートの推定近似式を用いたため、推定値は一部で乖離したが、相対的には評価が可能であった。

100年以上経過後のレンガ構造物でも同様な項目について分析を行った。100年以上経過後という特殊性に加え、レンガ構造物の目地部という特殊な条件での分析となったが、X 線 CT 画像の

目視診断により施工状況などの把握が可能となった。また、X線 CT 画像の目視診断と同時に CT 値について直径方向の分布形状や頻度分布の分析を行うことで、コア供試体による相違を把握することができた。また、モルタル平均 CT 値の分析により水セメント比の推定を行い、1つの供試体を除いた他の供試体は推定される水セメント比が大きいことが明らかとなり、これらについては更なる診断の必要性を提案した。

既設構造物の診断では、X線 CT 画像による「可視化」が総合評価を実施する際に大きな役割を果たしたといえる。材料が未知のコンクリート構造物の配合推定を行うには、十分なバックデータが必要であることがわかったが、コンクリートの総合的な診断を行う際に、可視化という部分でこれを補うことで評価の精度は向上すると考えられる。

最後に、X線 CT 法のコンクリート構造物診断への適用に関する考察を行った。X線 CT 画像の目視診断を行い、構成材料の定性的な特徴を把握するとともに、材料構成の定量化を行うことにより、さらに判断材料が増え、空隙率や骨材率、水セメント比の評価など、数値的な評価が可能になる。さらに、実際に X線 CT 法を適用することにより「コンクリートの何が診断できるか」という項目について一覧表にまとめ、今後 X線 CT 法でコンクリート診断を行う際の指標となるように評価項目の整理を行った。

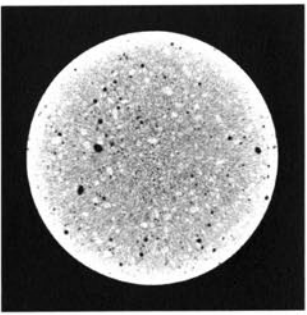
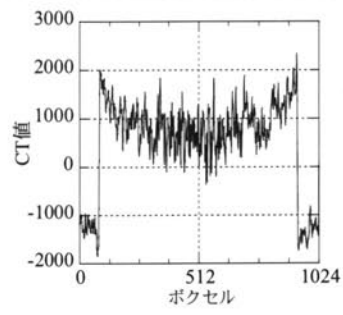
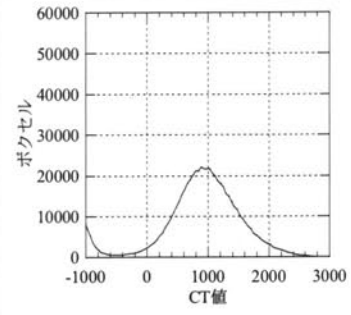
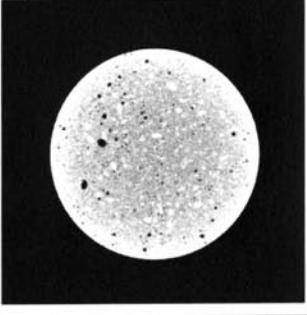
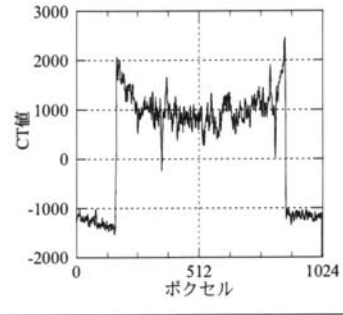
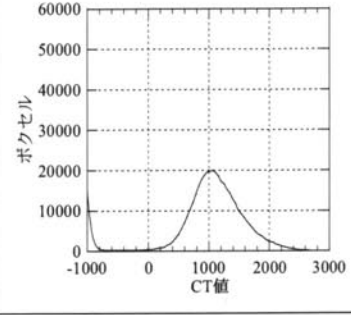
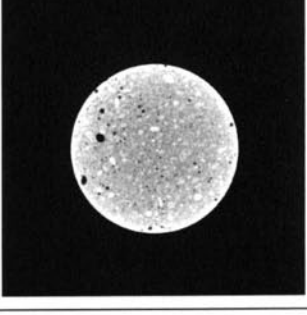
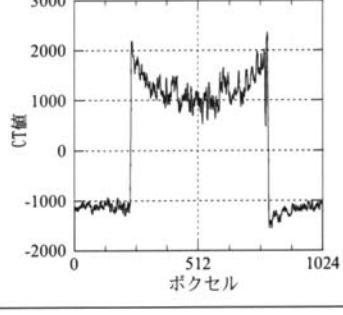
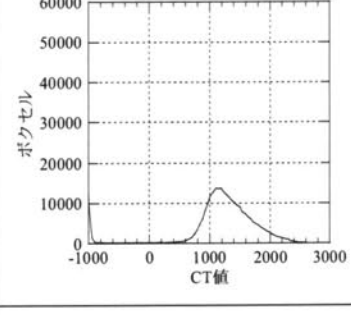
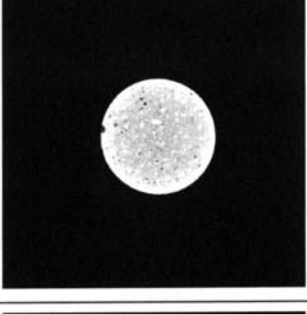
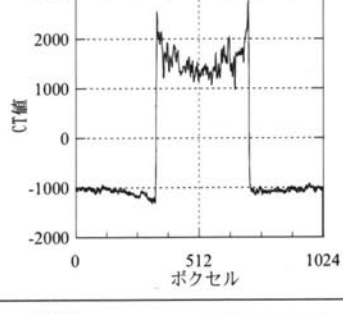
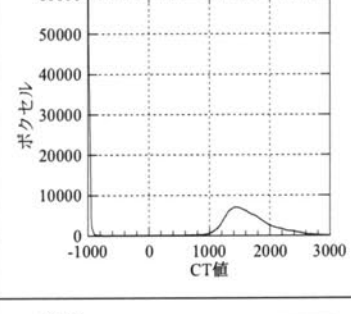
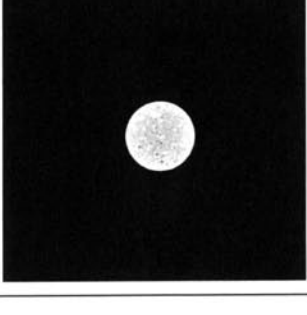
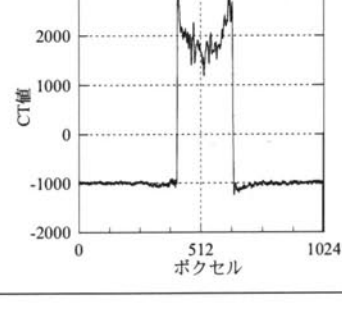
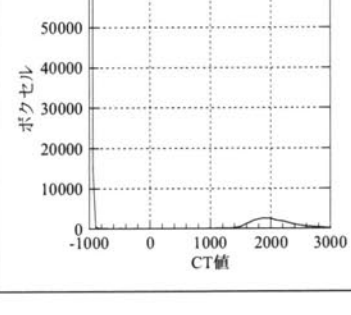
コンクリート診断における X線 CT 法の適用は研究例が非常に少なく、本研究のように体系的に実施された例はない。産業用 X線 CT 装置そのものが、医療用と比較して普及していないこともあるが、医療用での装置の有効性や普及率をみれば、X線 CT 装置の非破壊検査装置としての利便性は容易に想像できる。コンクリート構造物に対し、原位置で適用するには次世代の装置の開発を待つ必要があるが、コア供試体採取によるコンクリート構造物の劣化診断が一般的な現状では、X線 CT 法の有効性は本研究によって明らかとなったといえよう。

今後は、本研究で得られた知見をベースとし、コンクリート供試体の診断においてより、精度よく、的確に構造特性の評価を行うことが課題である。具体的にはコンクリートの配合推定や劣化状況・施工状況の評価をより正確に把握することである。このためには、数多くのコンクリート供試体の撮影、分析を行い、異なる材料や配合に対する評価基準をデータベースとして所有しておくことが有効である。同時に、より効率的に精度よく構造特性を評価するための手法を開発していくことも必要であろう。これらと相まって、X線 CT スキャナ装置が進化し、分析の解像度が向上することも期待したい。

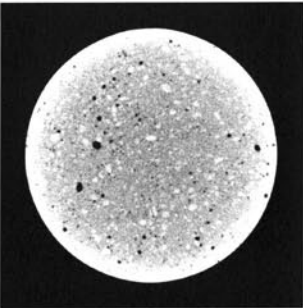
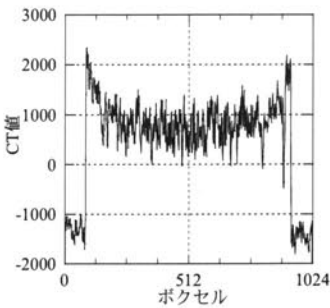
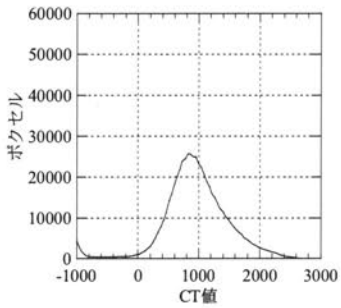
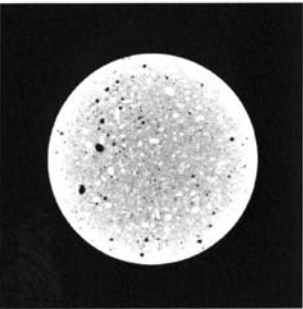
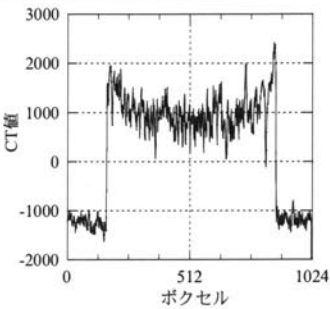
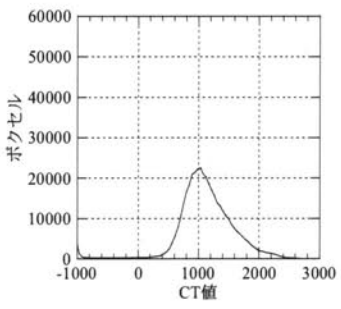
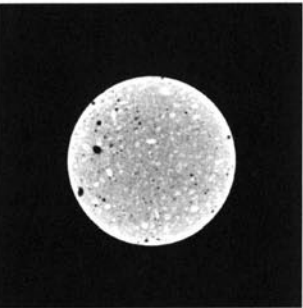
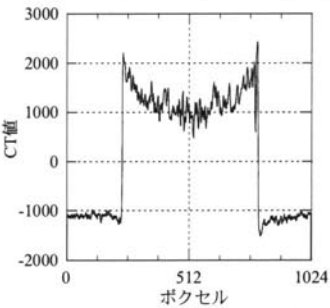
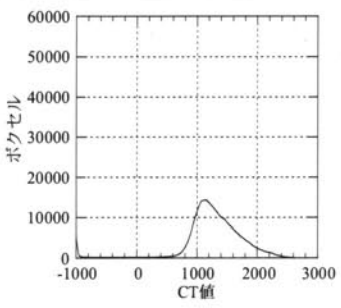

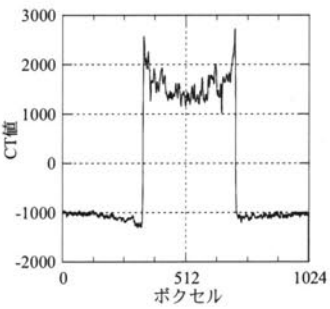
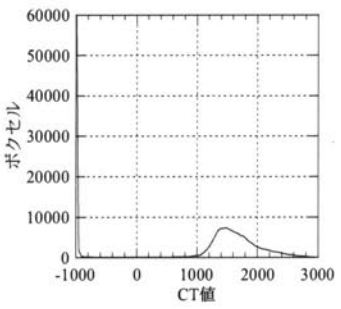

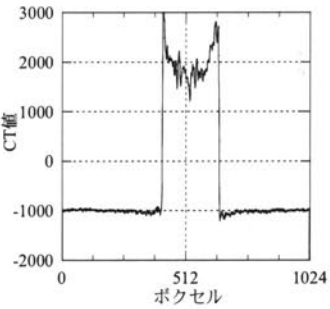
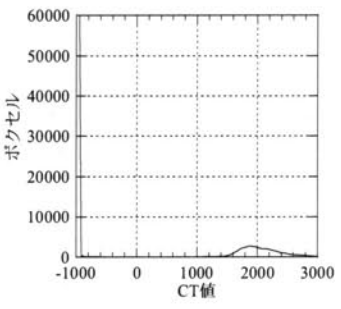


付録 1 モルタル供試体を用いた X 線 CT 法の基礎試験の X 線 CT 画像

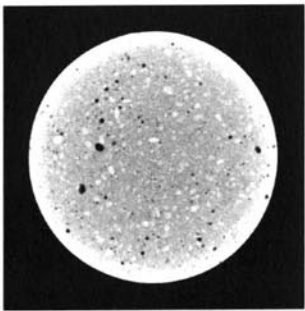
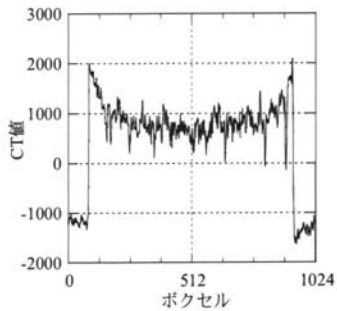
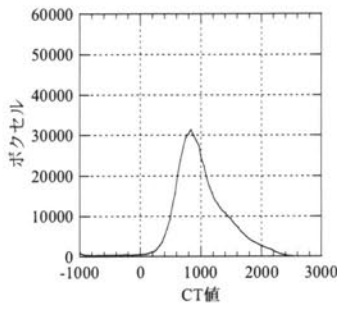
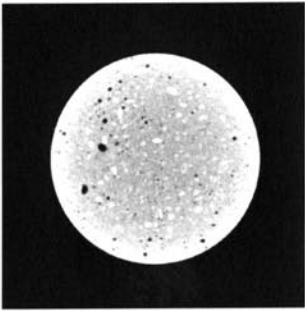
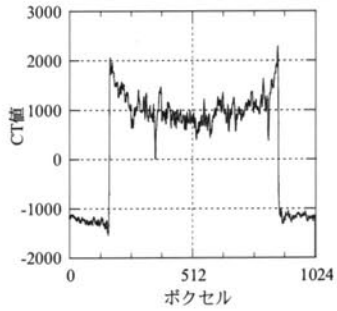
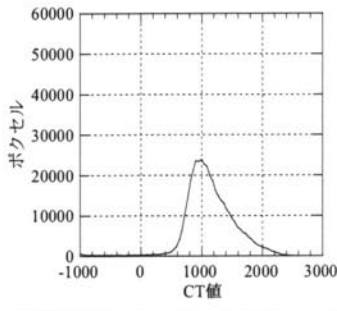
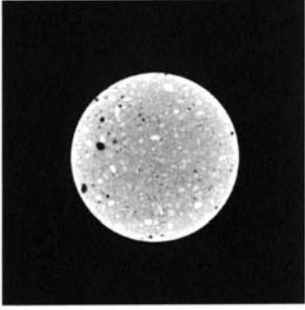
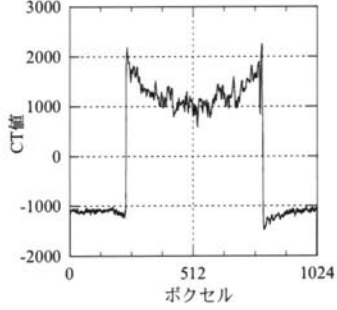
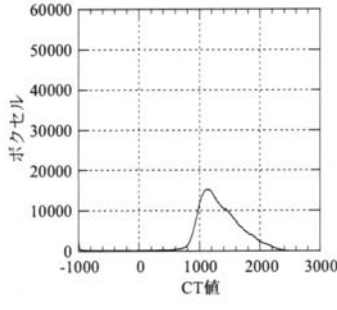
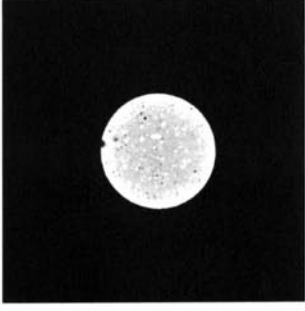
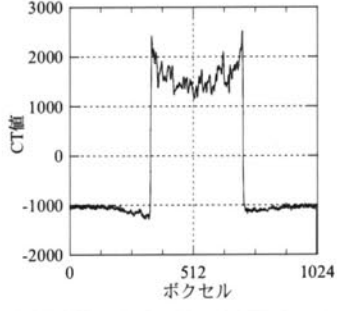
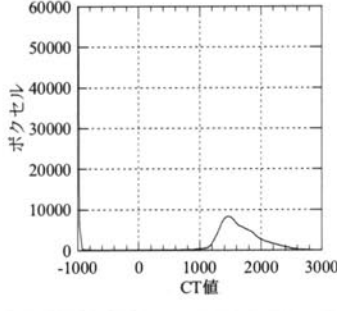

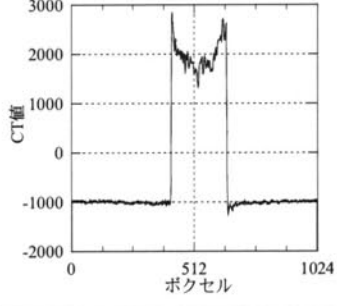
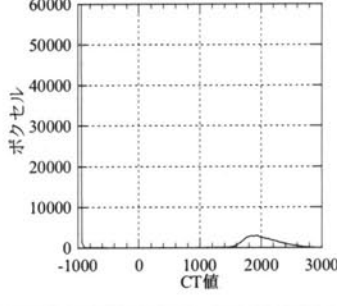
管電圧: 150 kV, 設定スライス厚: 0.3 mm

直径	X 線 CT 画像	CT 値のプロットプロファイル	CT 値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

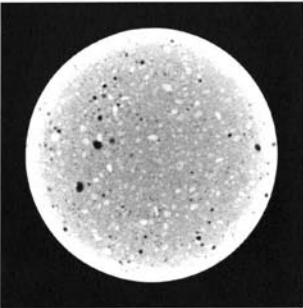
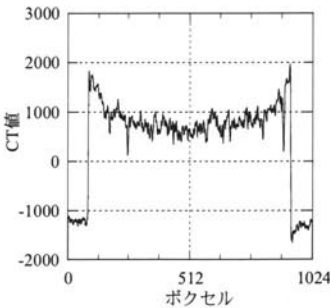
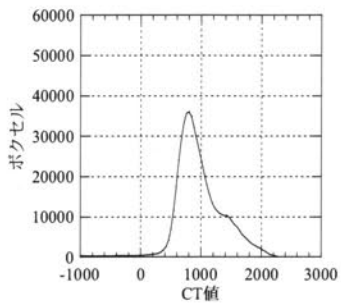
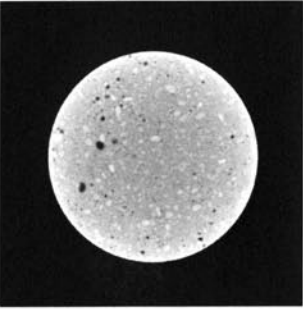
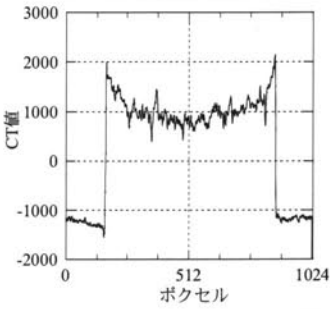
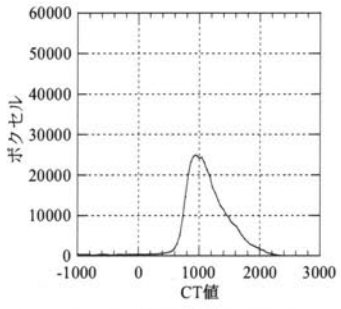
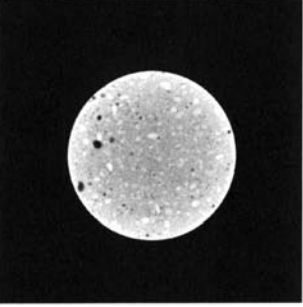
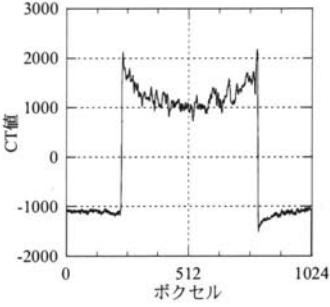
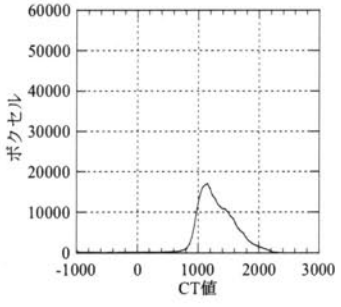
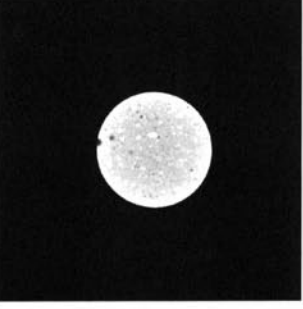
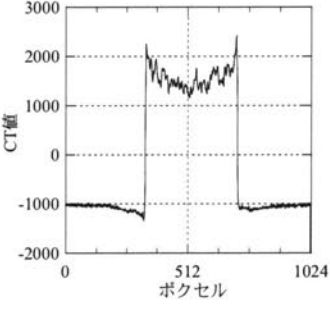
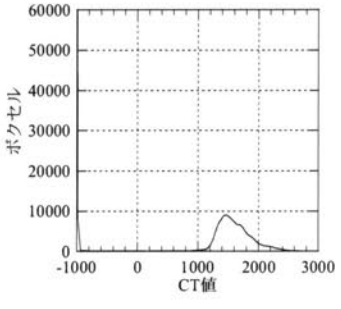

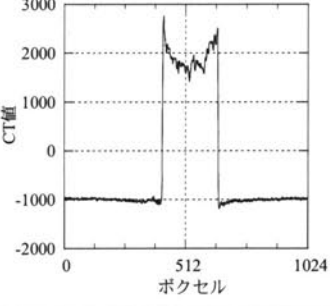
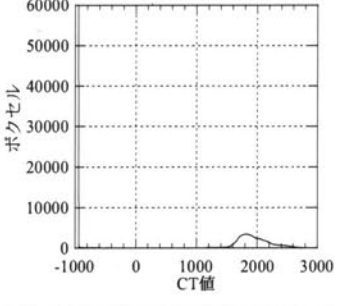
管電圧: 150 kV, 設定スライス厚: 0.5 mm

直径	X線 CT 画像	CT 値のプロットプロファイル	CT 値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

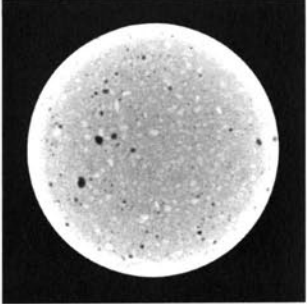
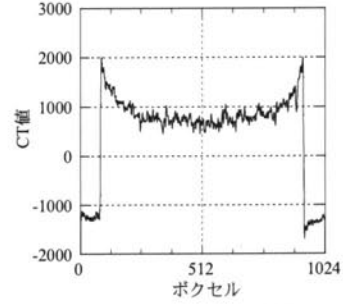
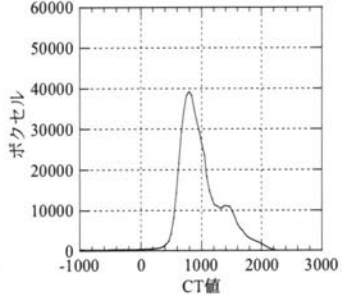
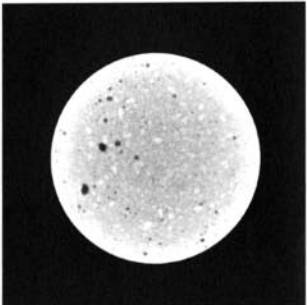
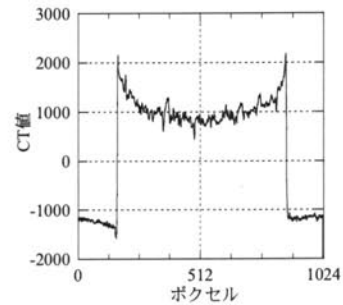
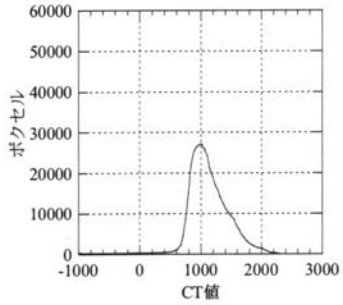
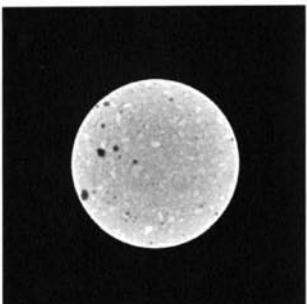
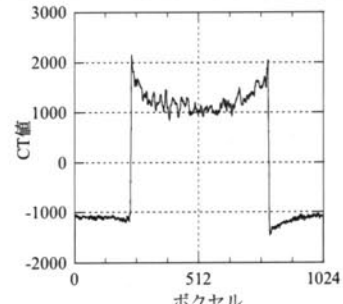
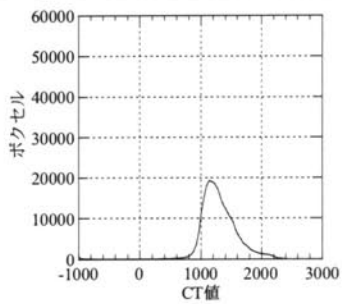
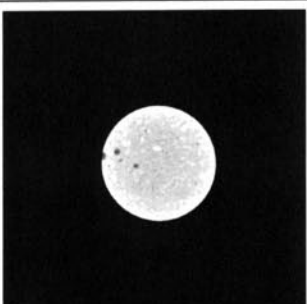
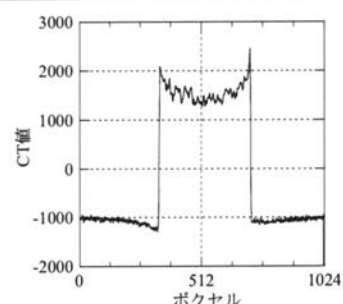
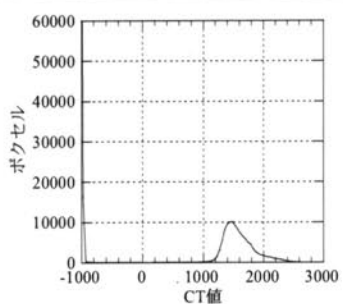
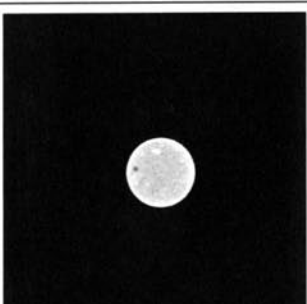
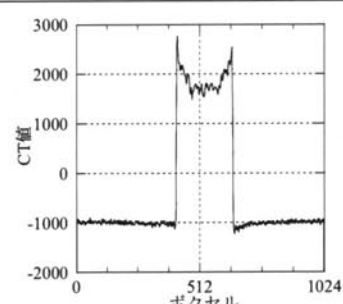
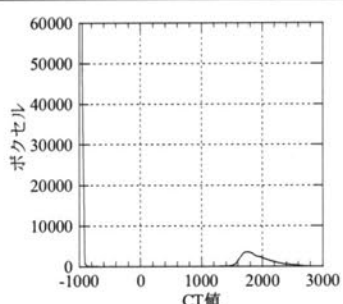
管電圧: 150 kV, 設定スライス厚: 1.0 mm

直径	X線 CT 画像	CT 値のプロットプロファイル	CT 値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

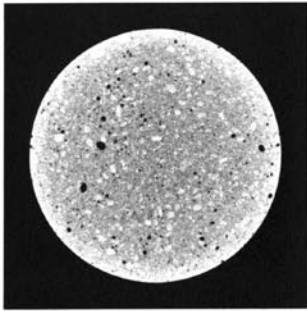
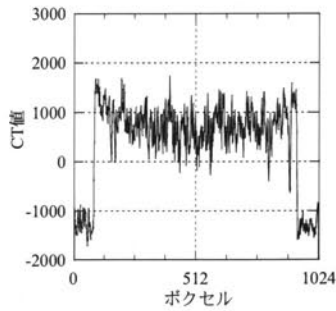
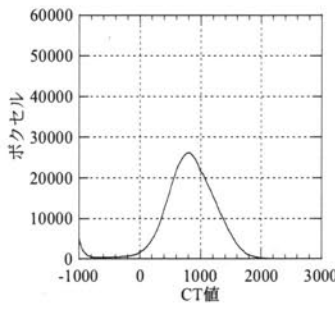
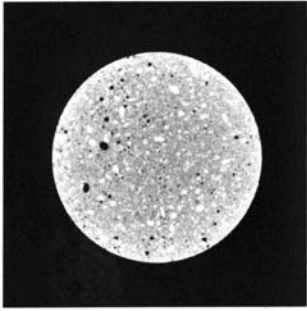
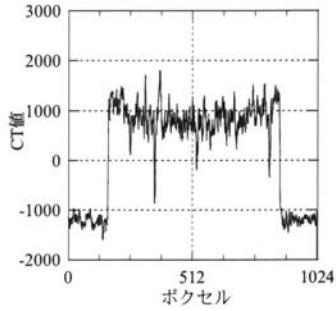
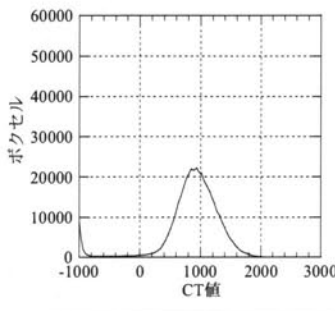
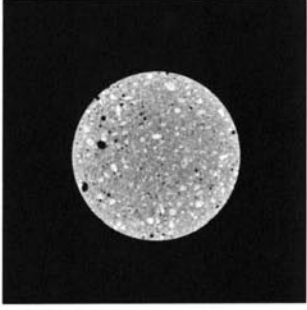
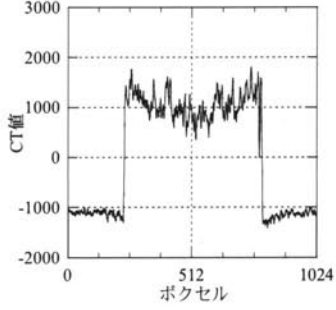
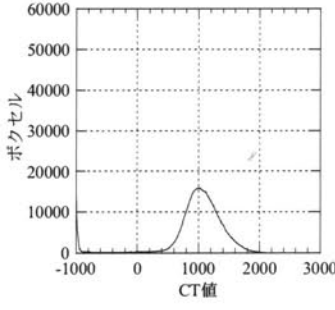

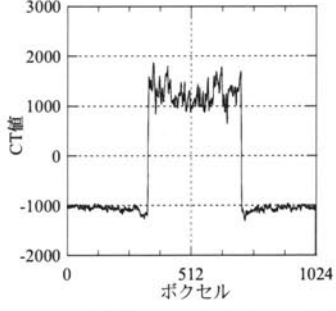
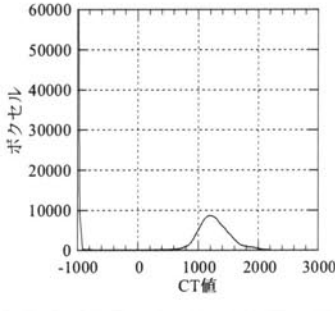

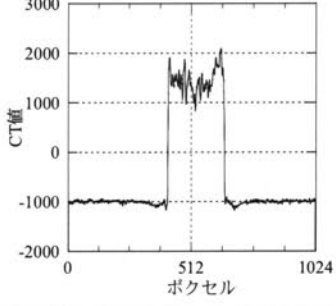
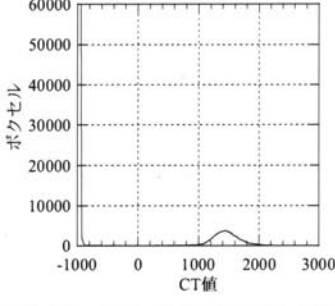
管電圧: 150 kV, 設定スライス厚: 2.0 mm

直径	X線 CT 画像	CT 値のプロットプロファイル	CT 値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

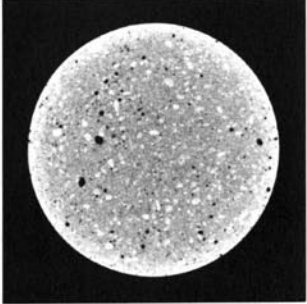
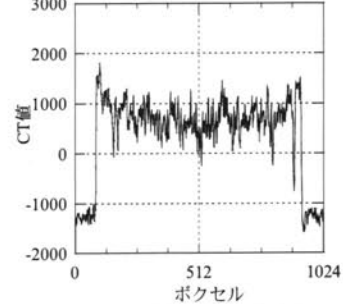
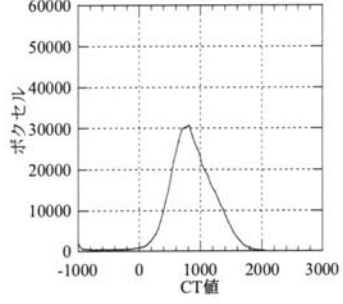
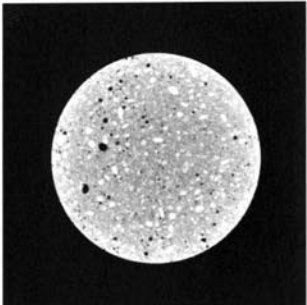
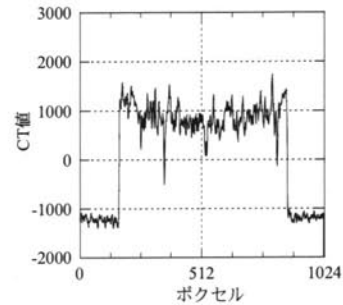
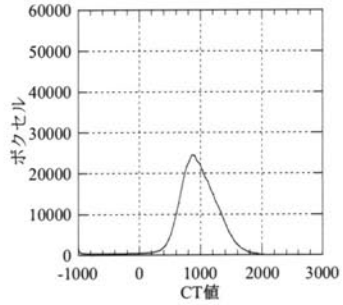
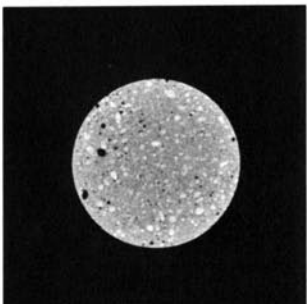
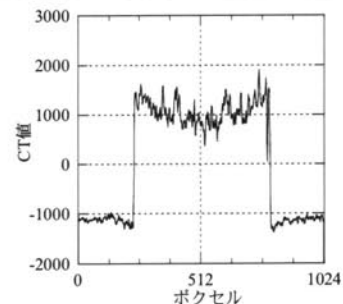
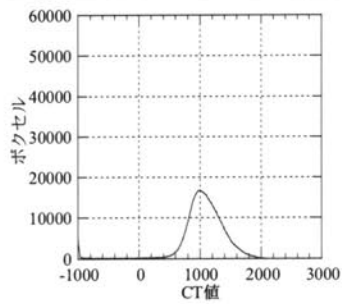
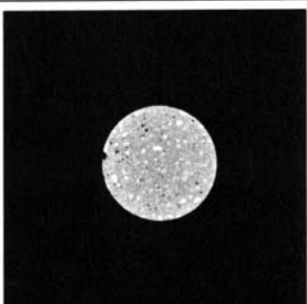
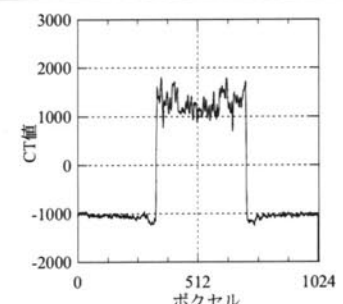
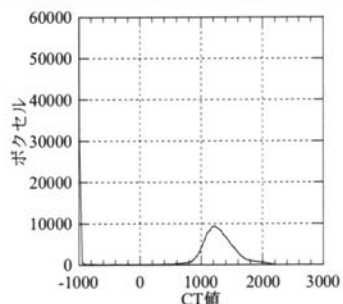
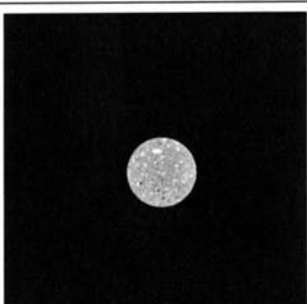
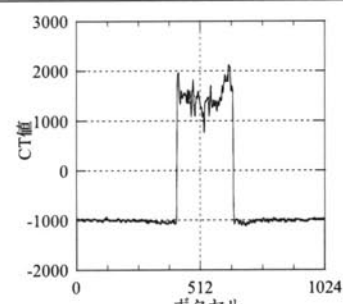
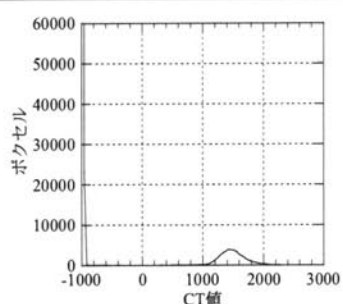
管電圧: 150 kV, 設定スライス厚: 4.0 mm

直径	X線 CT 画像	CT 値のプロットプロファイル	CT 値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

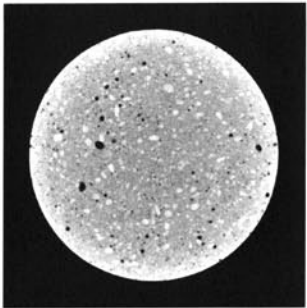
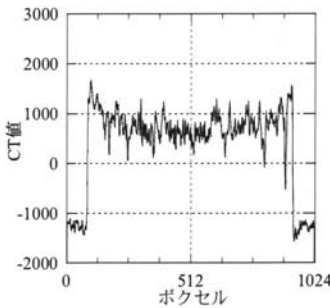
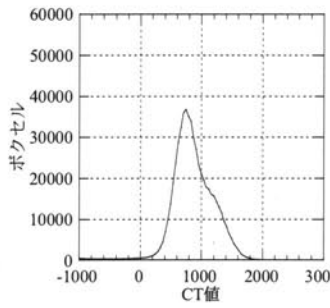
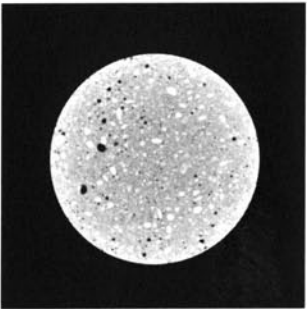
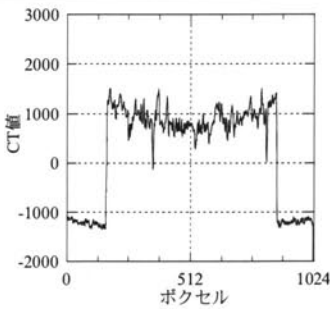
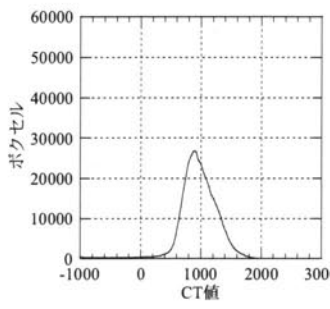
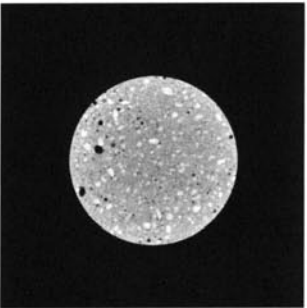
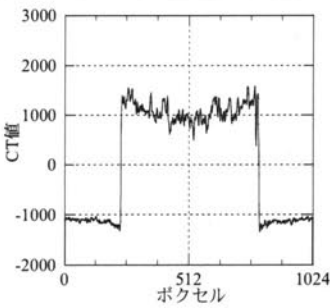
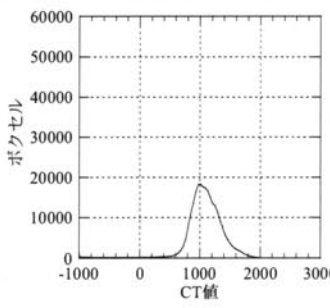

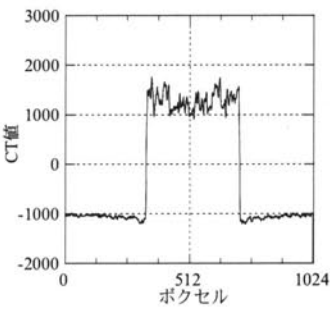
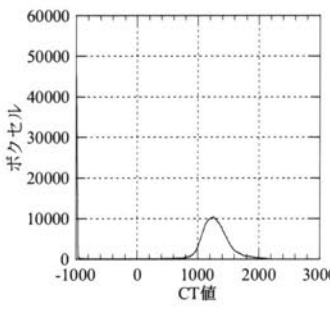
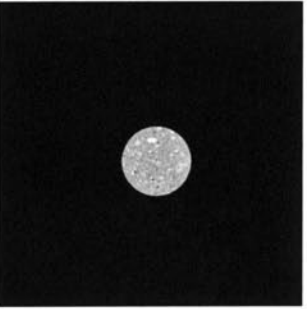
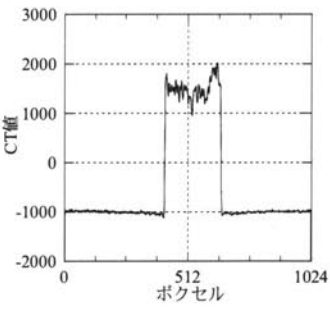
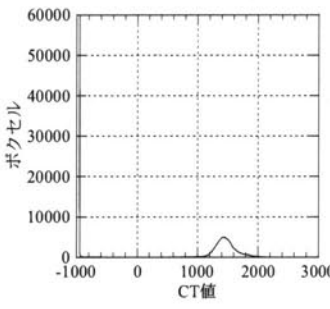
管電圧: 200 kV, 設定スライス厚: 0.3 mm

直径	X 線 CT 画像	CT 値のプロットプロファイル	CT 値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

管電圧: 200 kV, 設定スライス厚: 0.5 mm

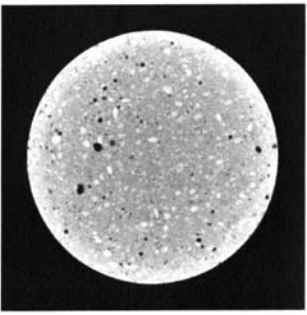
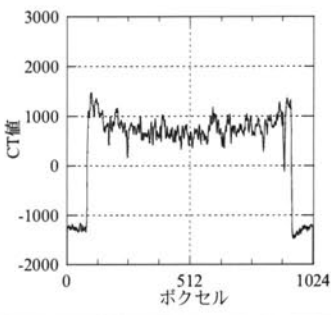
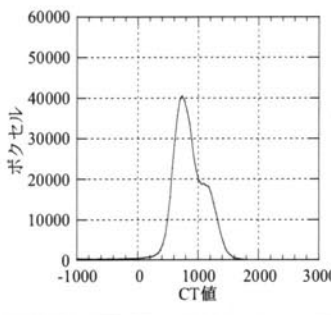
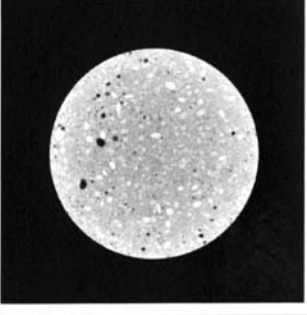
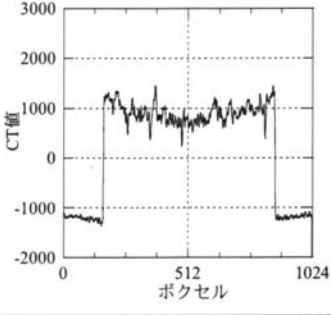
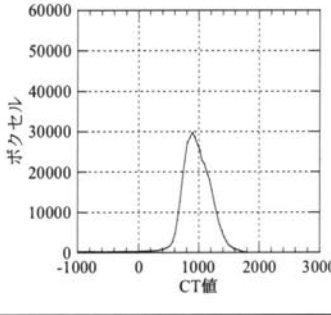
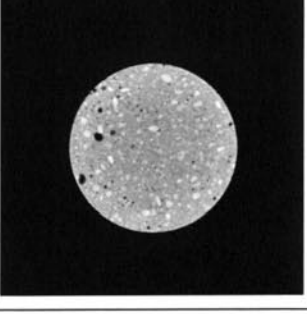
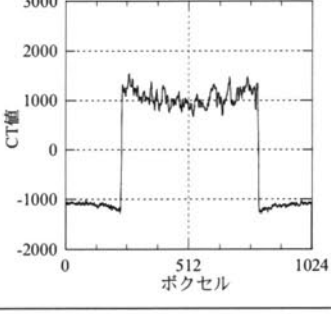
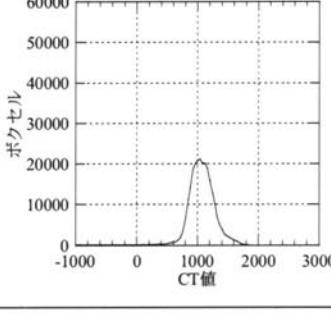
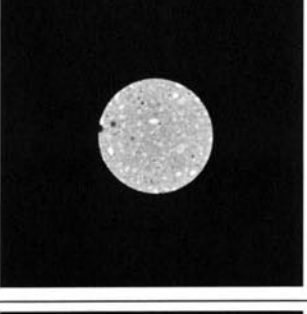
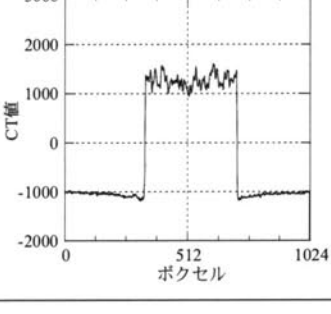
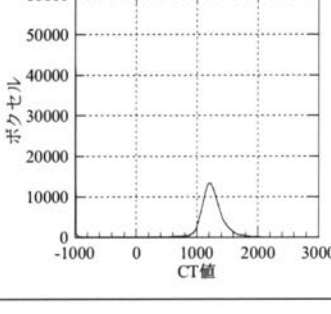
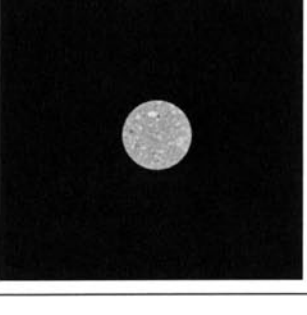
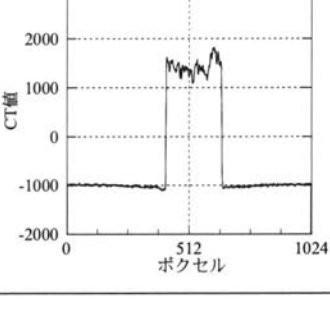
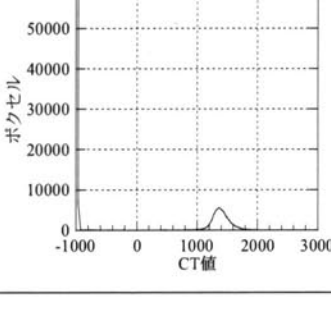
直径	X線 CT 画像	CT 値のプロットプロファイル	CT 値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

管電圧: 200 kV, 設定スライス厚: 1.0 mm

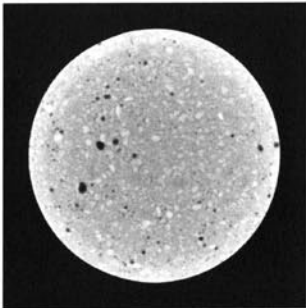
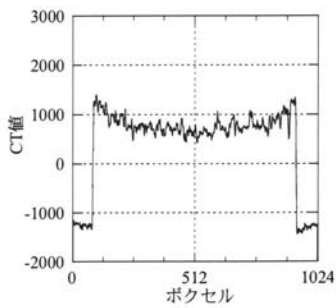
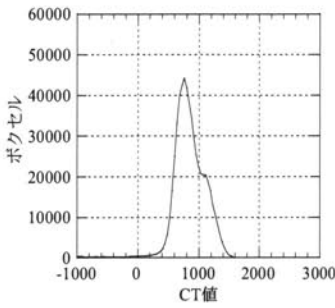
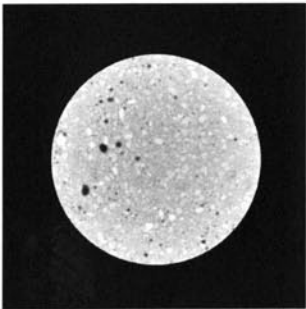
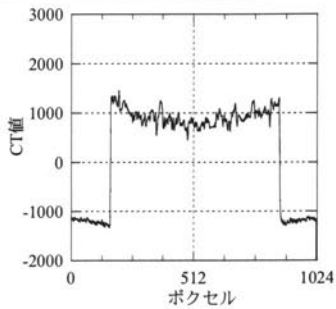
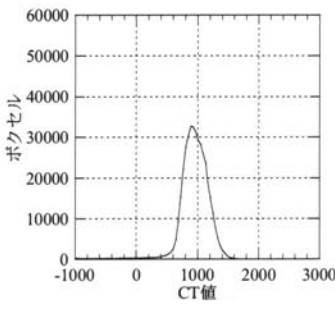
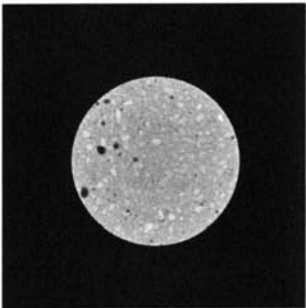
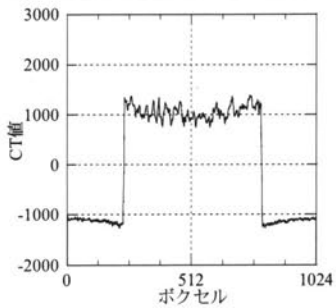
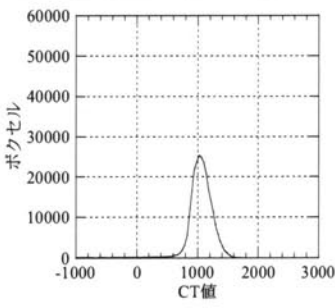
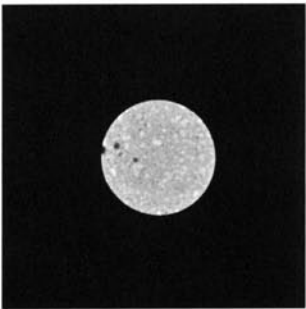
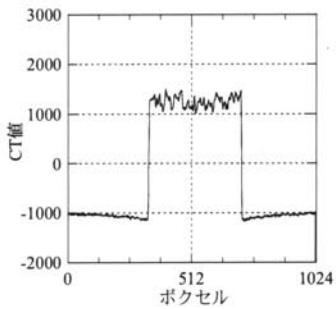
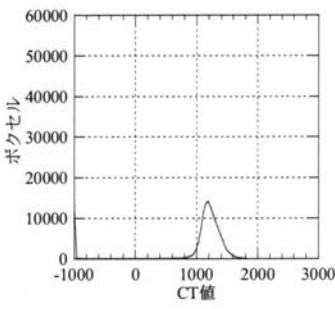

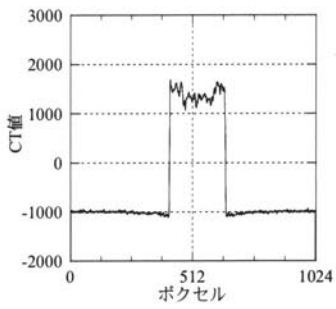
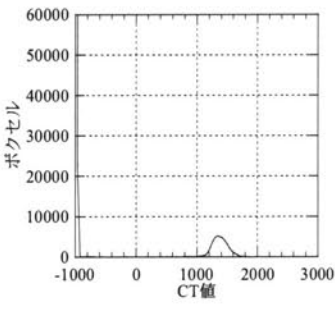
直径	X線CT画像	CT値のプロットプロファイル	CT値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			



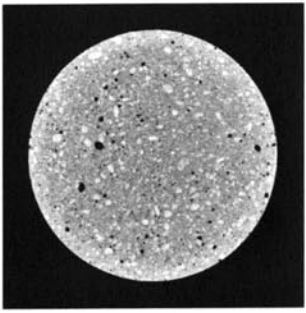
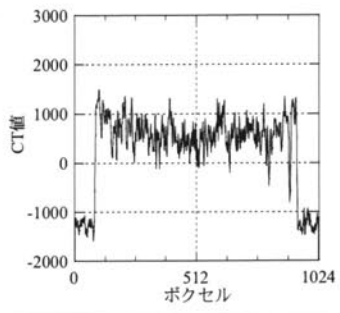
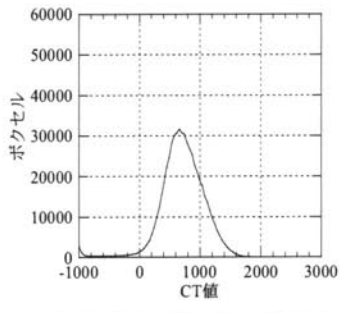
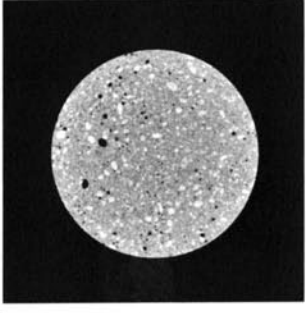
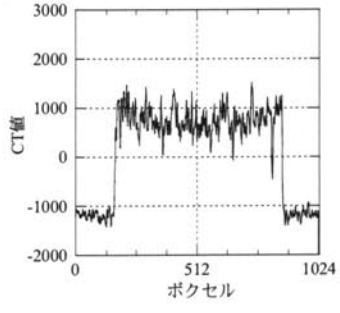
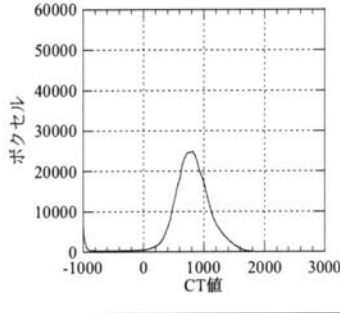
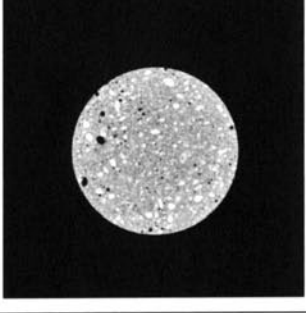
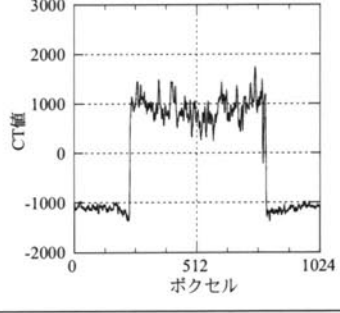
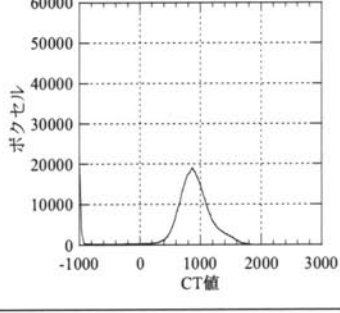
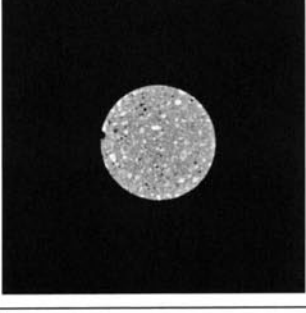
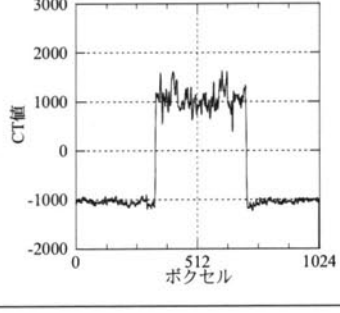
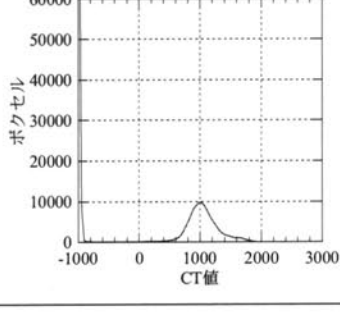
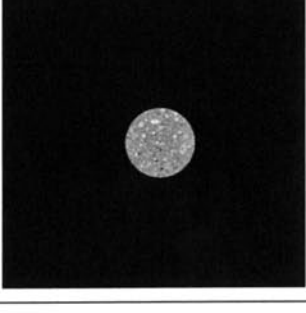
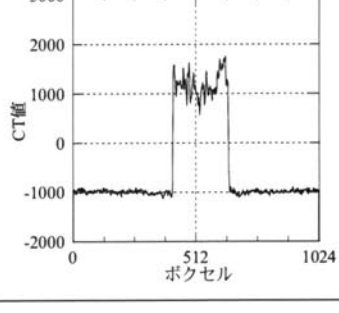
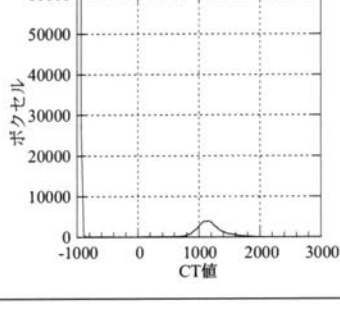
管電圧: 200 kV, 設定スライス厚: 2.0 mm

直径	X線 CT 画像	CT 値のプロットプロファイル	CT 値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

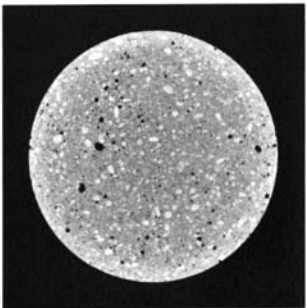
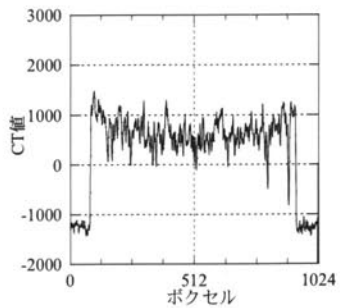
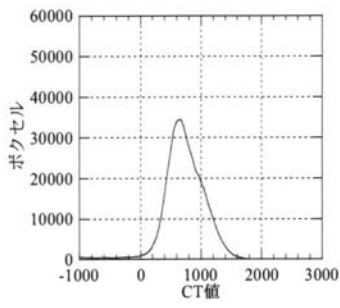
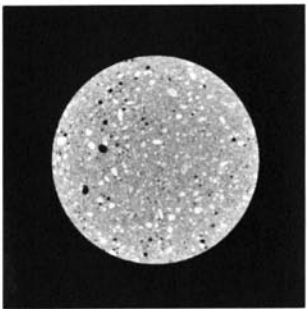
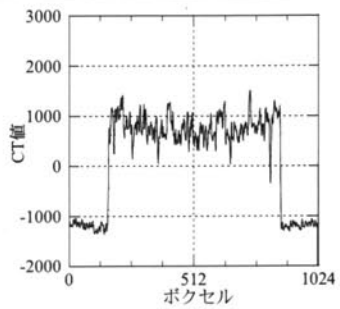
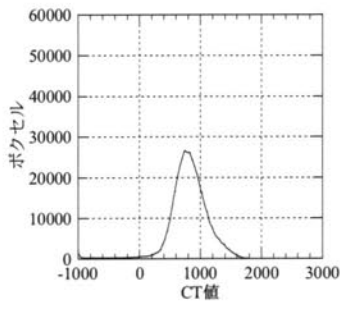
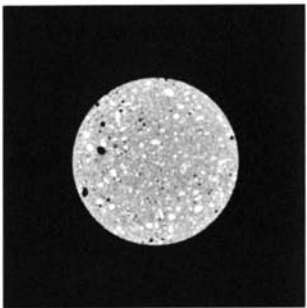
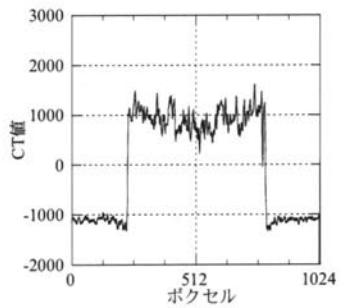
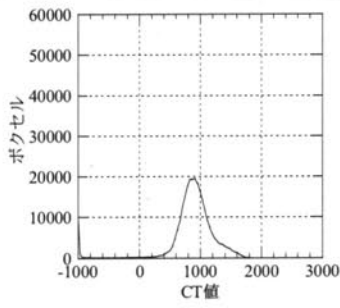
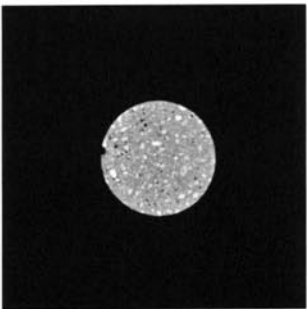
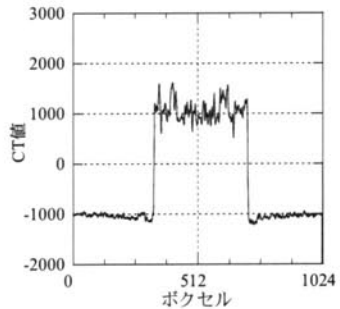
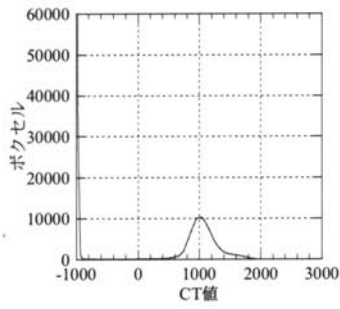
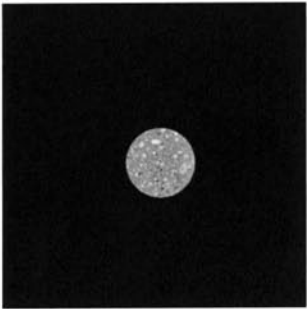
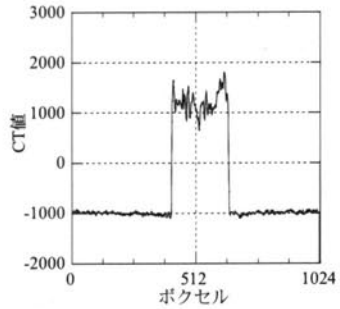
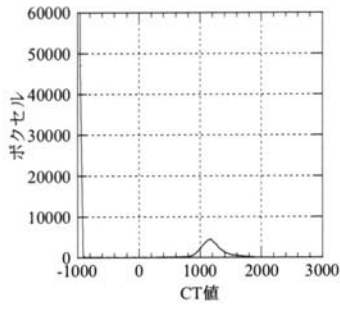
管電圧: 200 kV, 設定スライス厚: 4.0 mm

直径	X 線 CT 画像	CT 値のプロットプロファイル	CT 値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

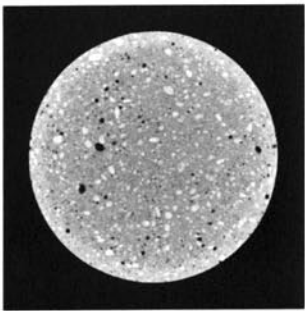
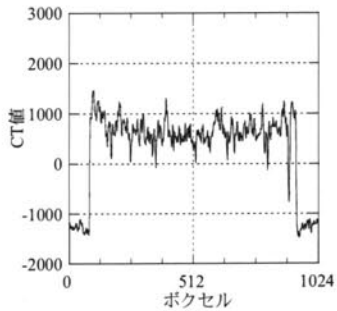
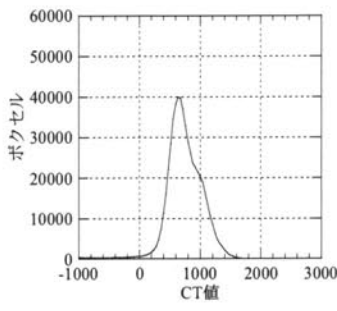
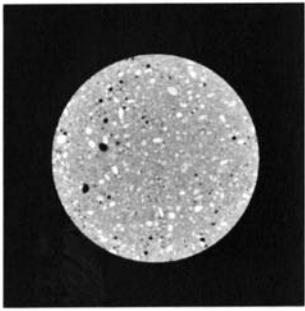
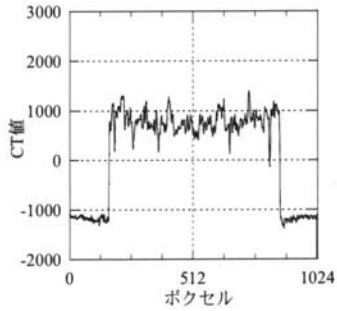
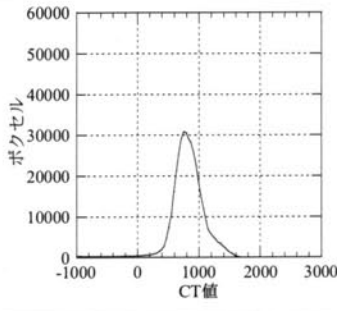
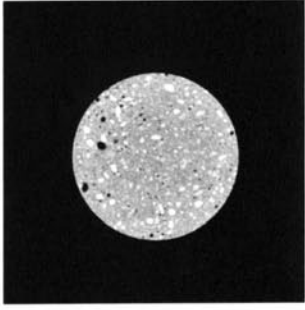
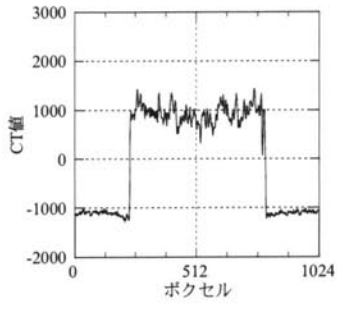
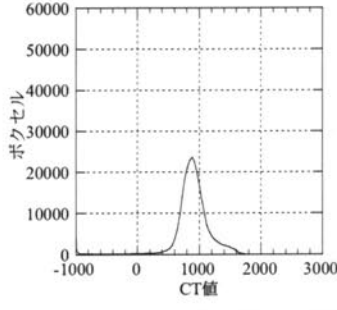
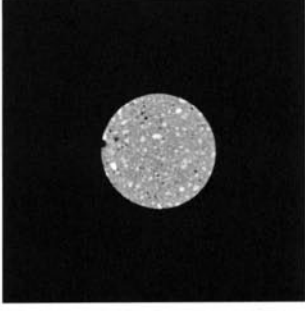
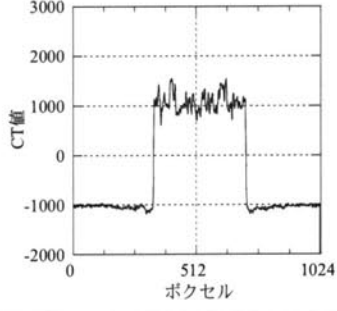
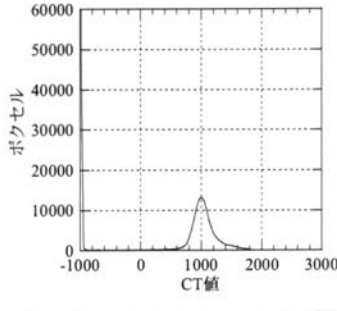
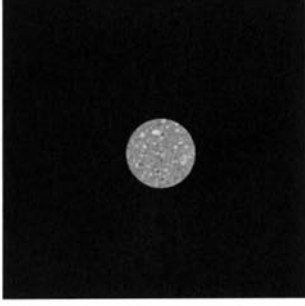
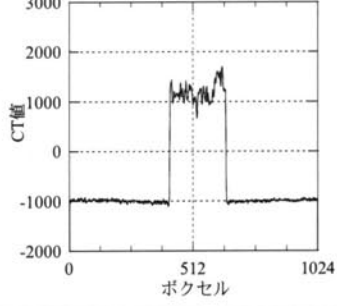
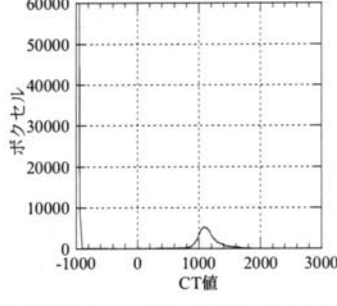
管電圧:300 kV, 設定スライス厚:0.3 mm

直径	X線 CT 画像	CT 値のプロットプロファイル	CT 値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

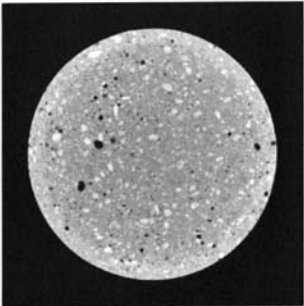
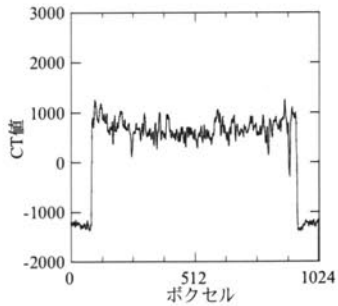
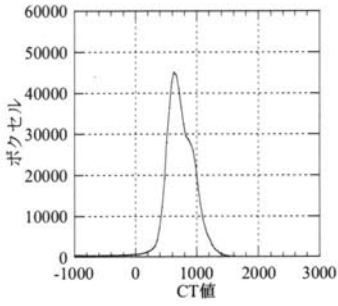
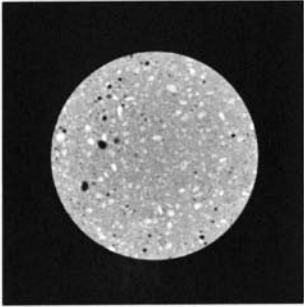
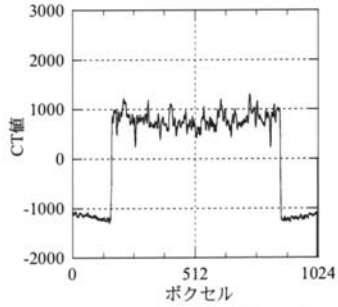
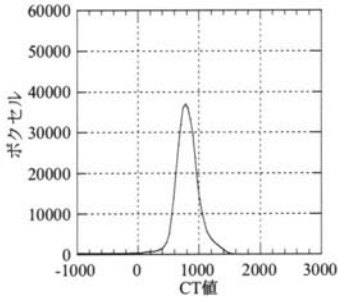
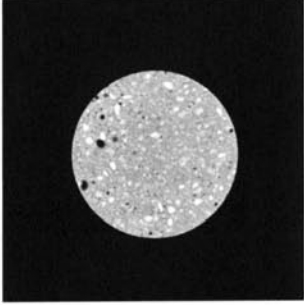
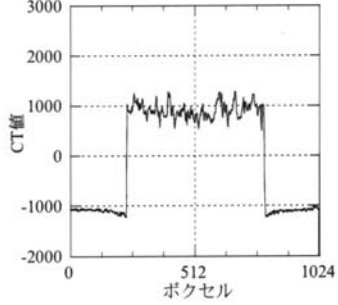
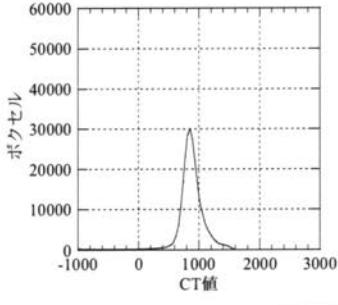
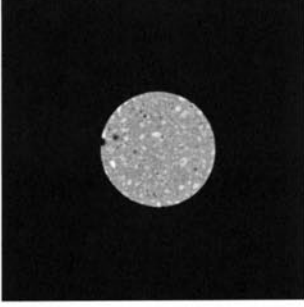
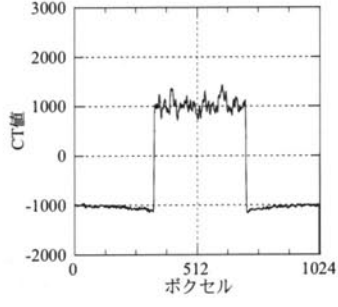
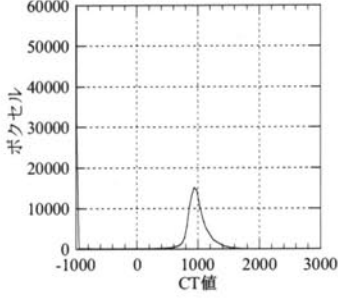
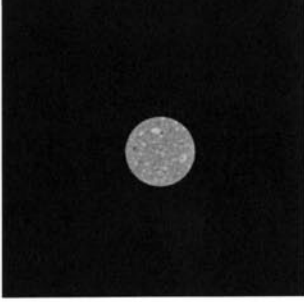
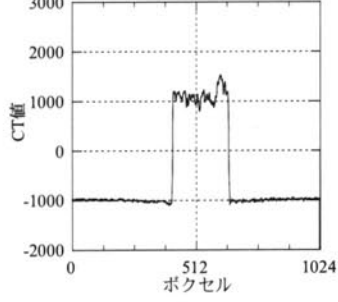
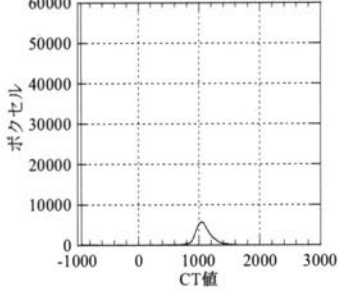
管電圧: 300 kV, 設定スライス厚: 0.5 mm

直径	X線CT画像	CT値のプロットプロファイル	CT値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

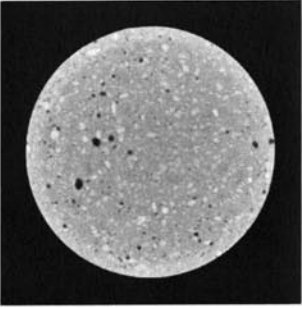
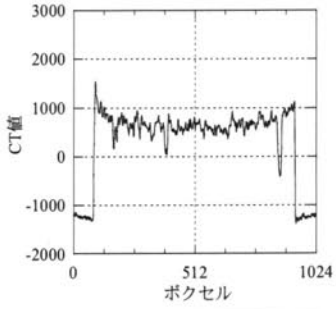
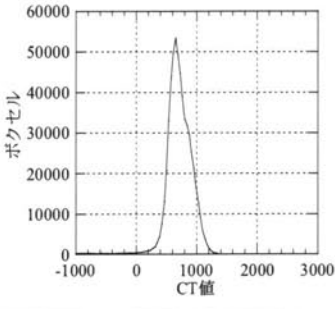
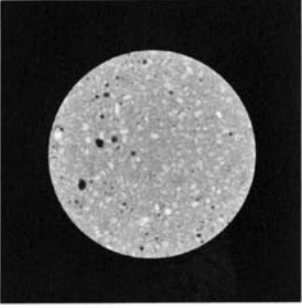
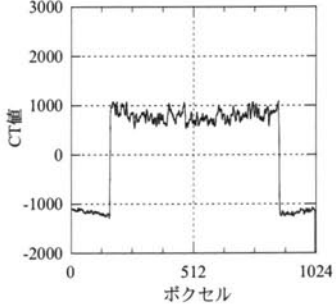
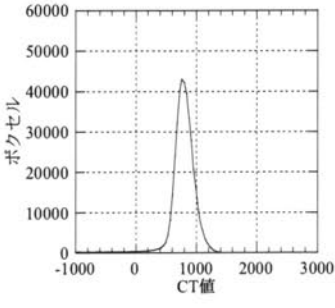
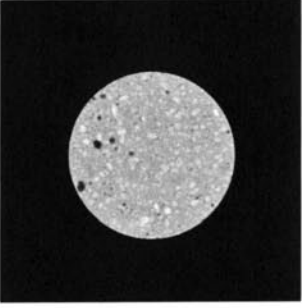
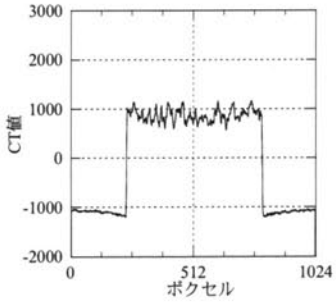
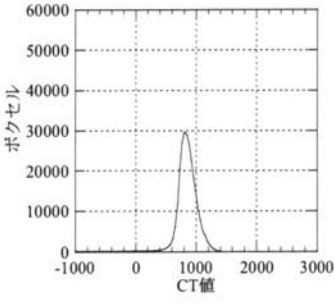
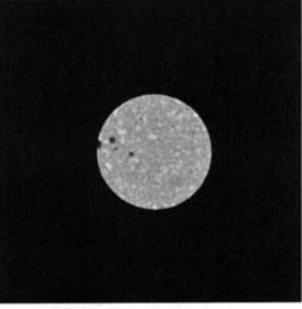
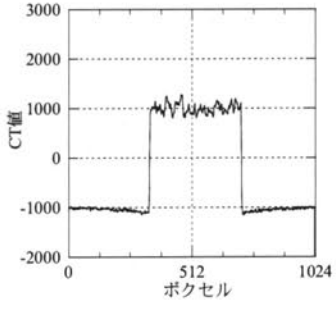
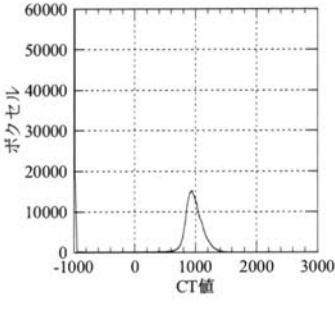

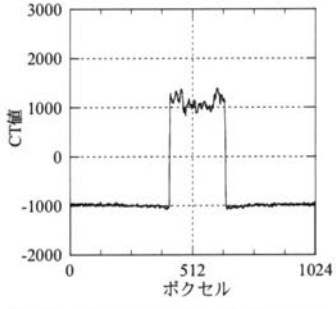
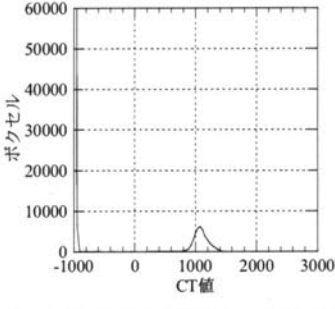
管電圧: 300 kV, 設定スライス厚: 1.0 mm

直径	X線 CT 画像	CT 値のプロットプロファイル	CT 値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

管電圧: 300 kV, 設定スライス厚: 2.0 mm

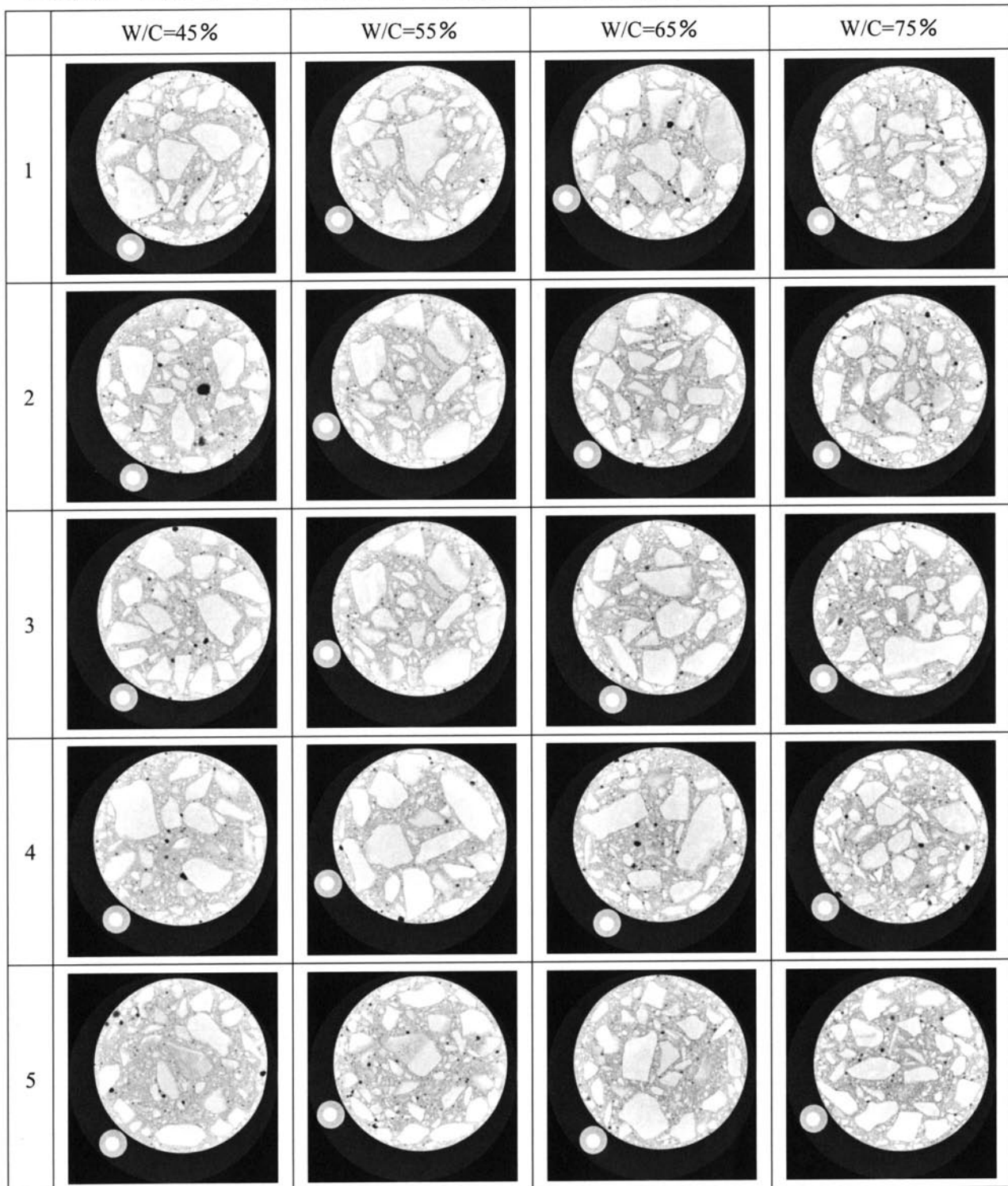
直径	X線 CT 画像	CT 値のプロットプロファイル	CT 値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

管電圧: 300 kV, 設定スライス厚: 4.0 mm

直径	X 線 CT 画像	CT 値のプロットプロファイル	CT 値のヒストグラム
125mm			
100mm			
83.6mm			
58.7mm			
34.5mm			

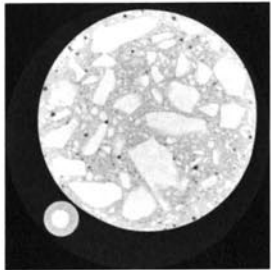
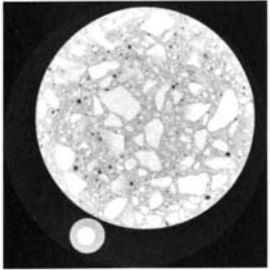
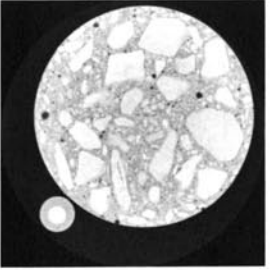
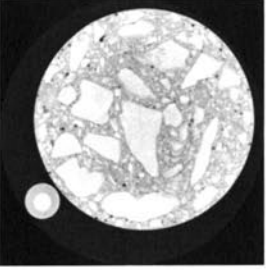
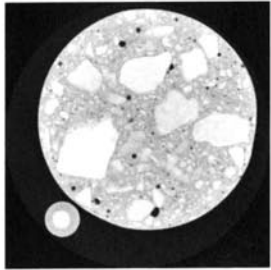
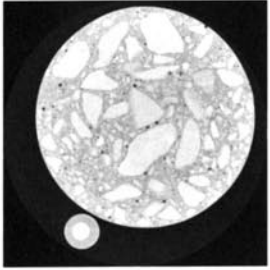
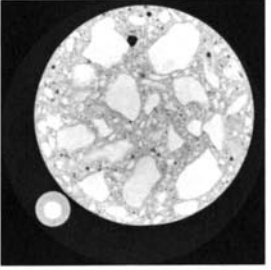
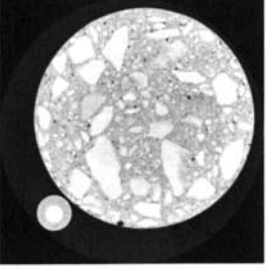
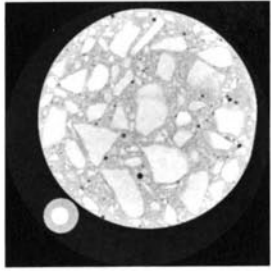
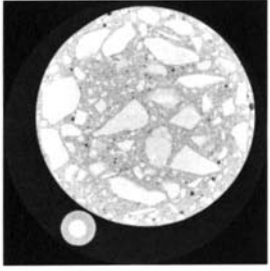
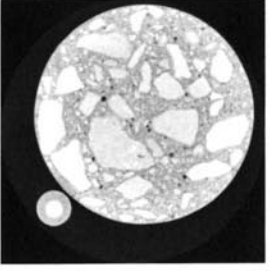
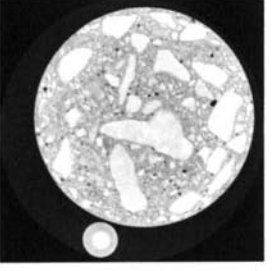
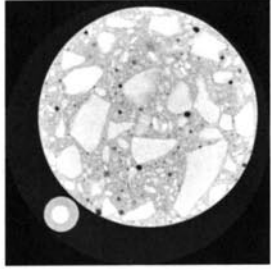
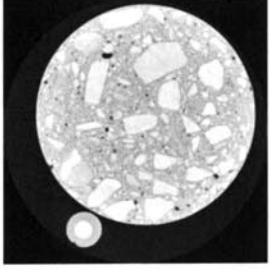
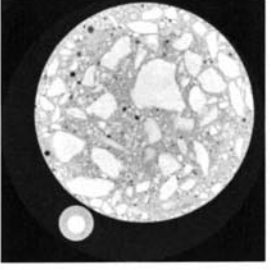
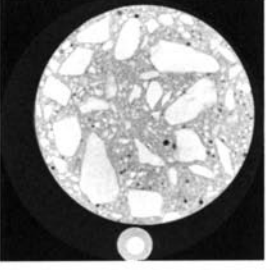
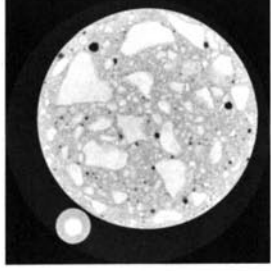
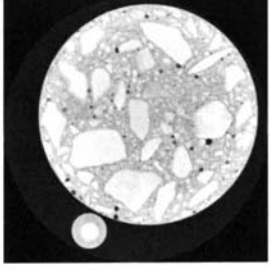
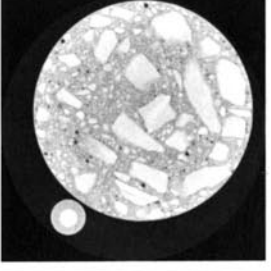
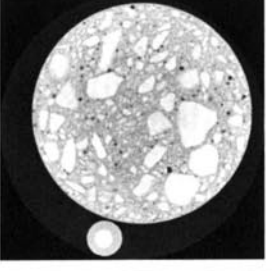
## 付録2 室内作製コンクリートのX線CT画像

B 供試体 コンクリート (Gmax40mm) のX線CT撮影断面画像1~5



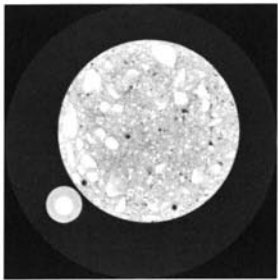
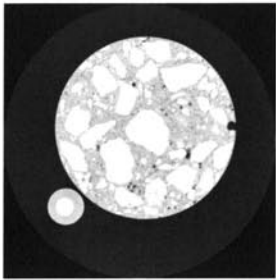
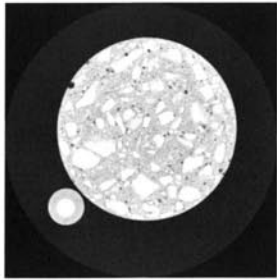
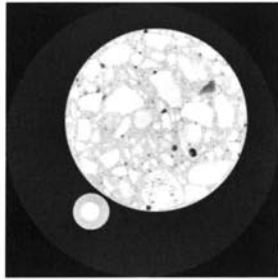
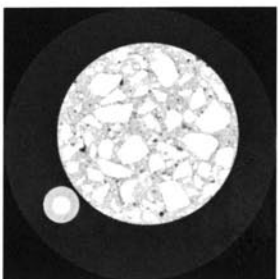
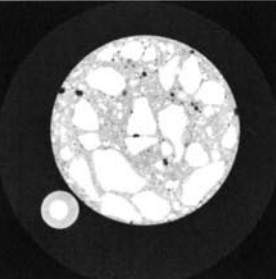
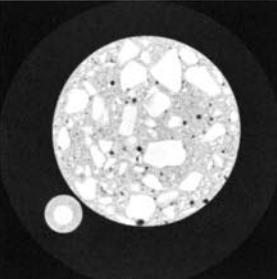
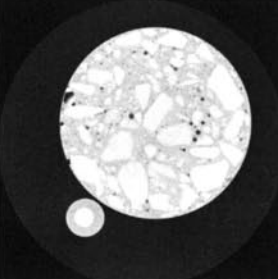
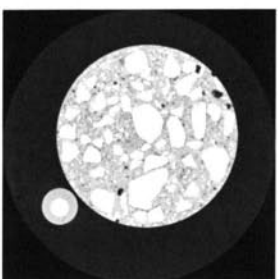
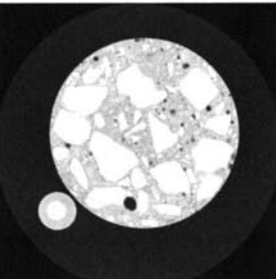
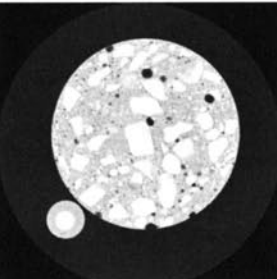
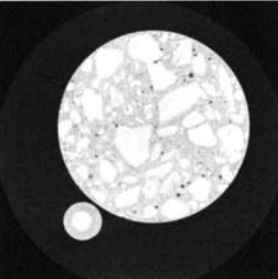
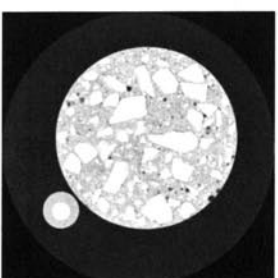
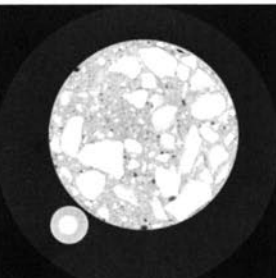
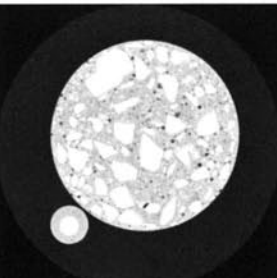
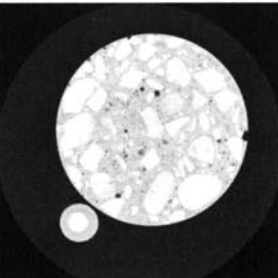
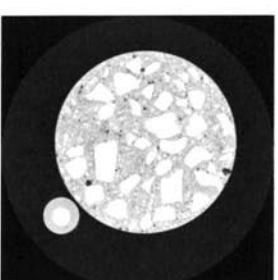
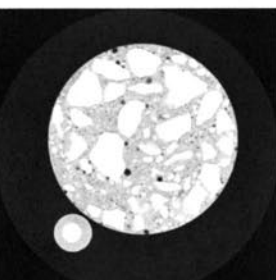
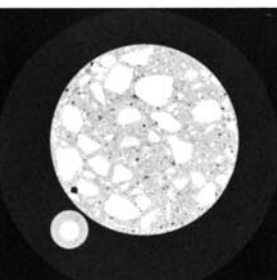
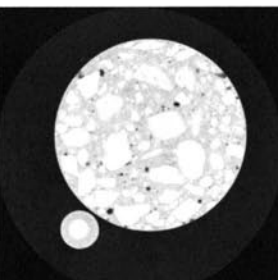


B 供試体 コンクリート (Gmax40mm) の X 線 CT 撮影断面画像 6~10

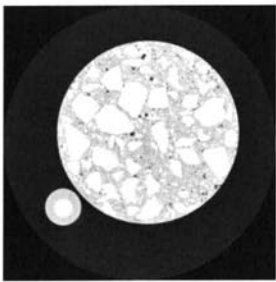
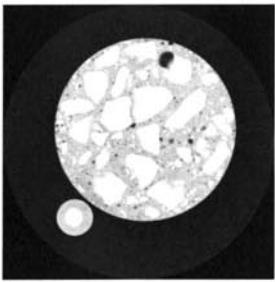
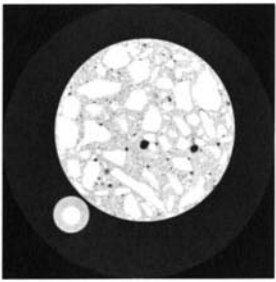
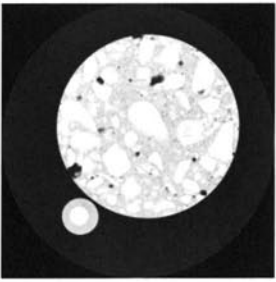
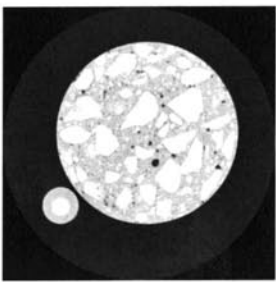
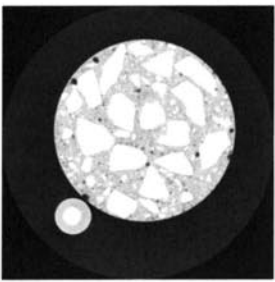
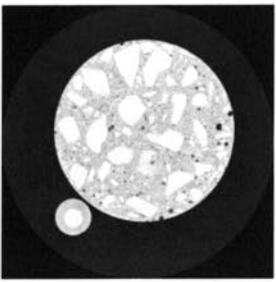
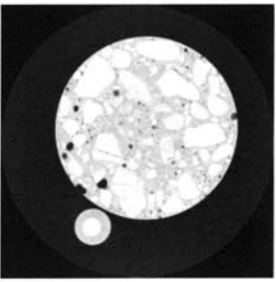
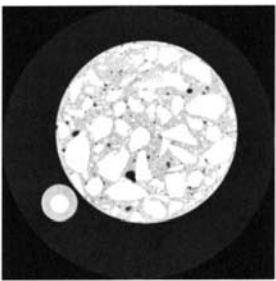
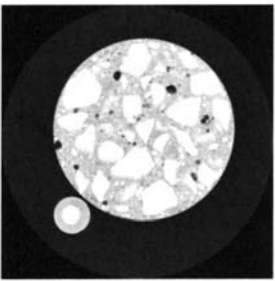
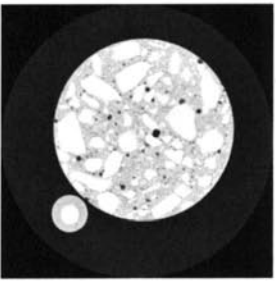
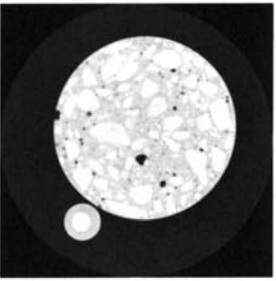
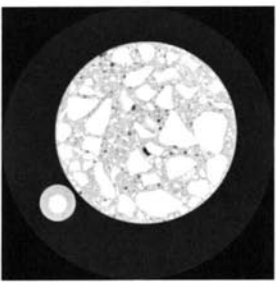
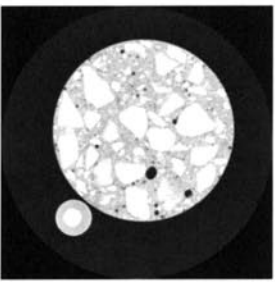
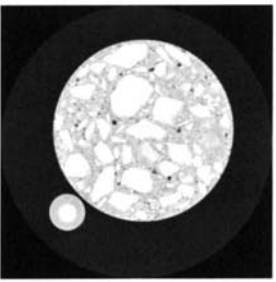
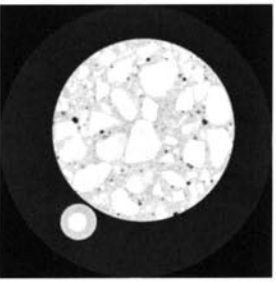
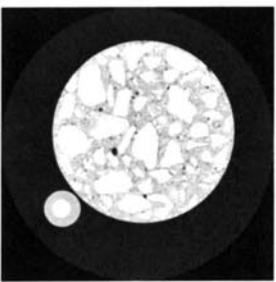
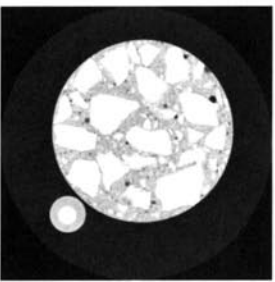
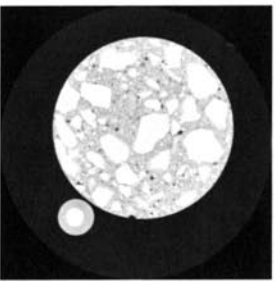
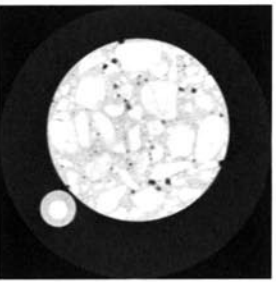
	W/C=45%	W/C=55%	W/C=65%	W/C=75%
6				
7				
8				
9				
10				

付録3 工場生産コンクリートのX線CT画像

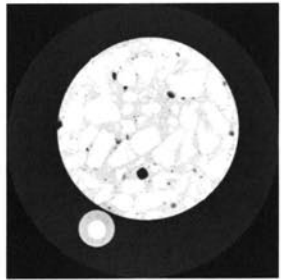
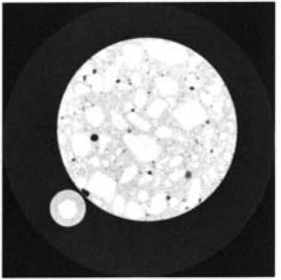
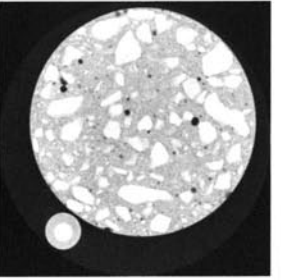
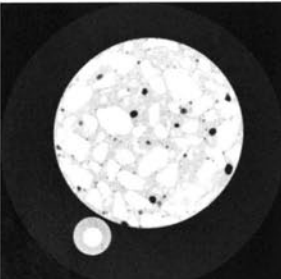
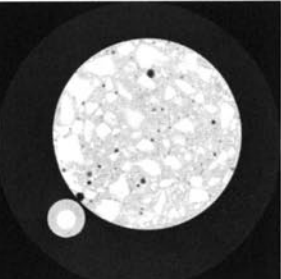
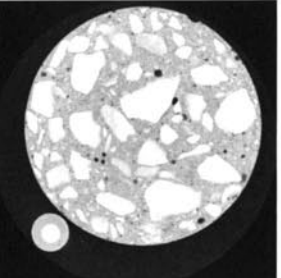
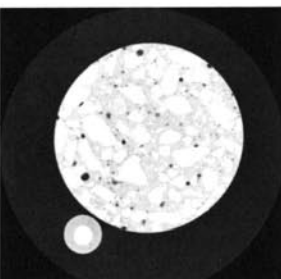
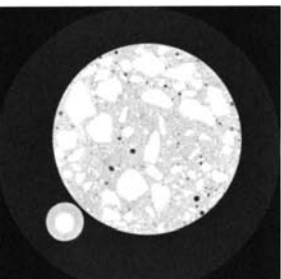
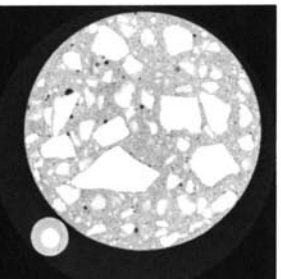
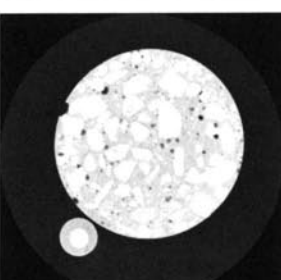
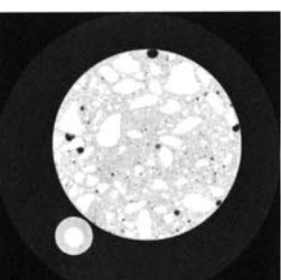
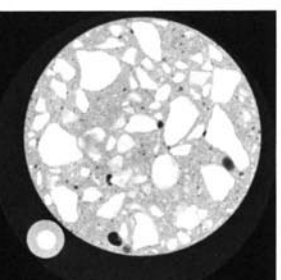
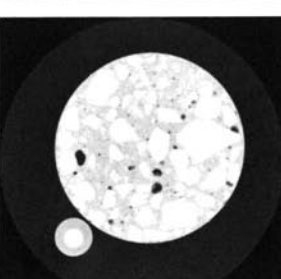
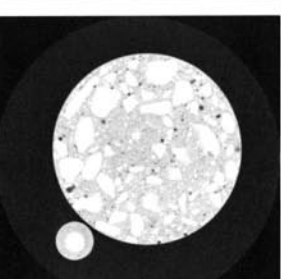
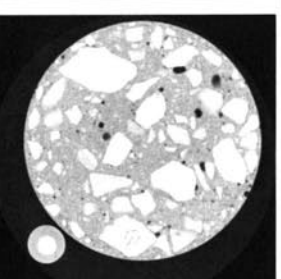
X線CT撮影断面画像（A～D 供試体）1～5

	A 供試体	B 供試体	C 供試体	D 供試体
1				
2				
3				
4				
5				

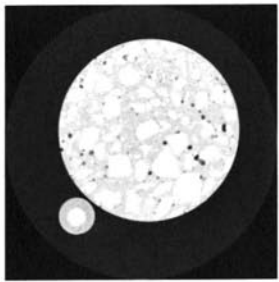
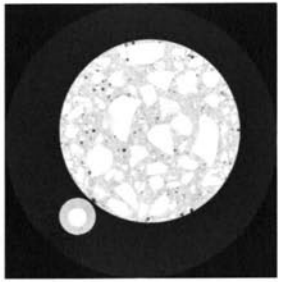
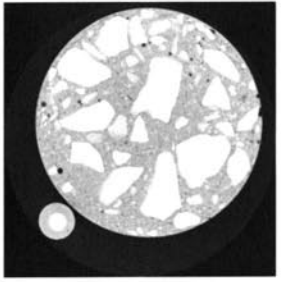
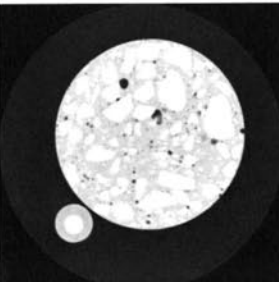
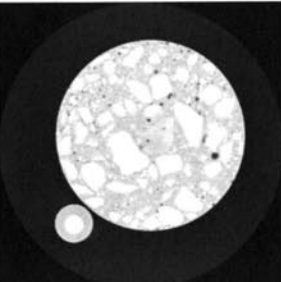
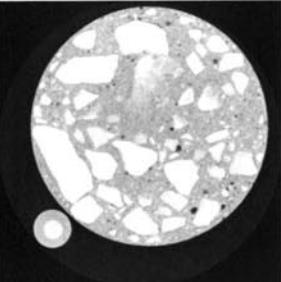
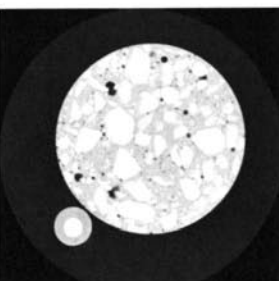
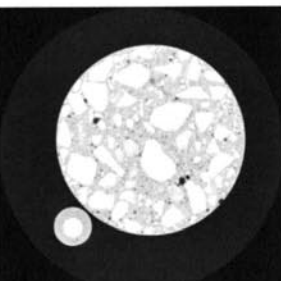
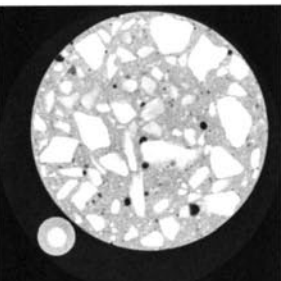
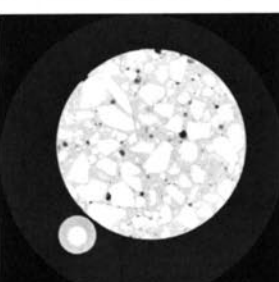
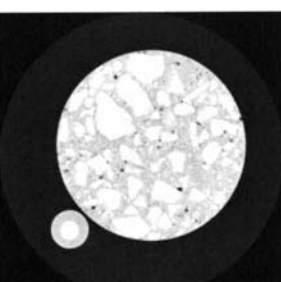
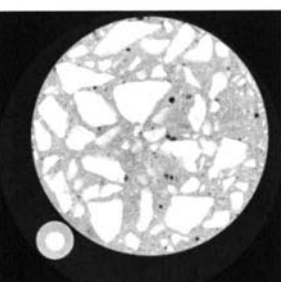
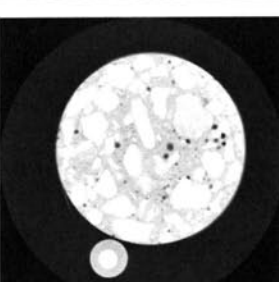
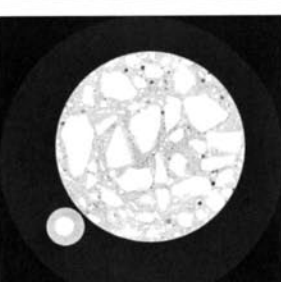
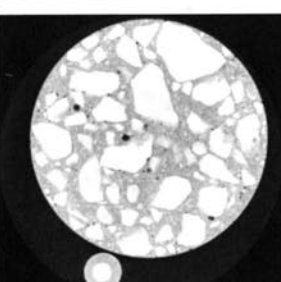
X線 CT 撮影断面画像 (A~D 供試体) 6~10

	A 供試体	B 供試体	C 供試体	D 供試体
6				
7				
8				
9				
10				

X線 CT 撮影断面画像 (E~G 供試体) 1~5

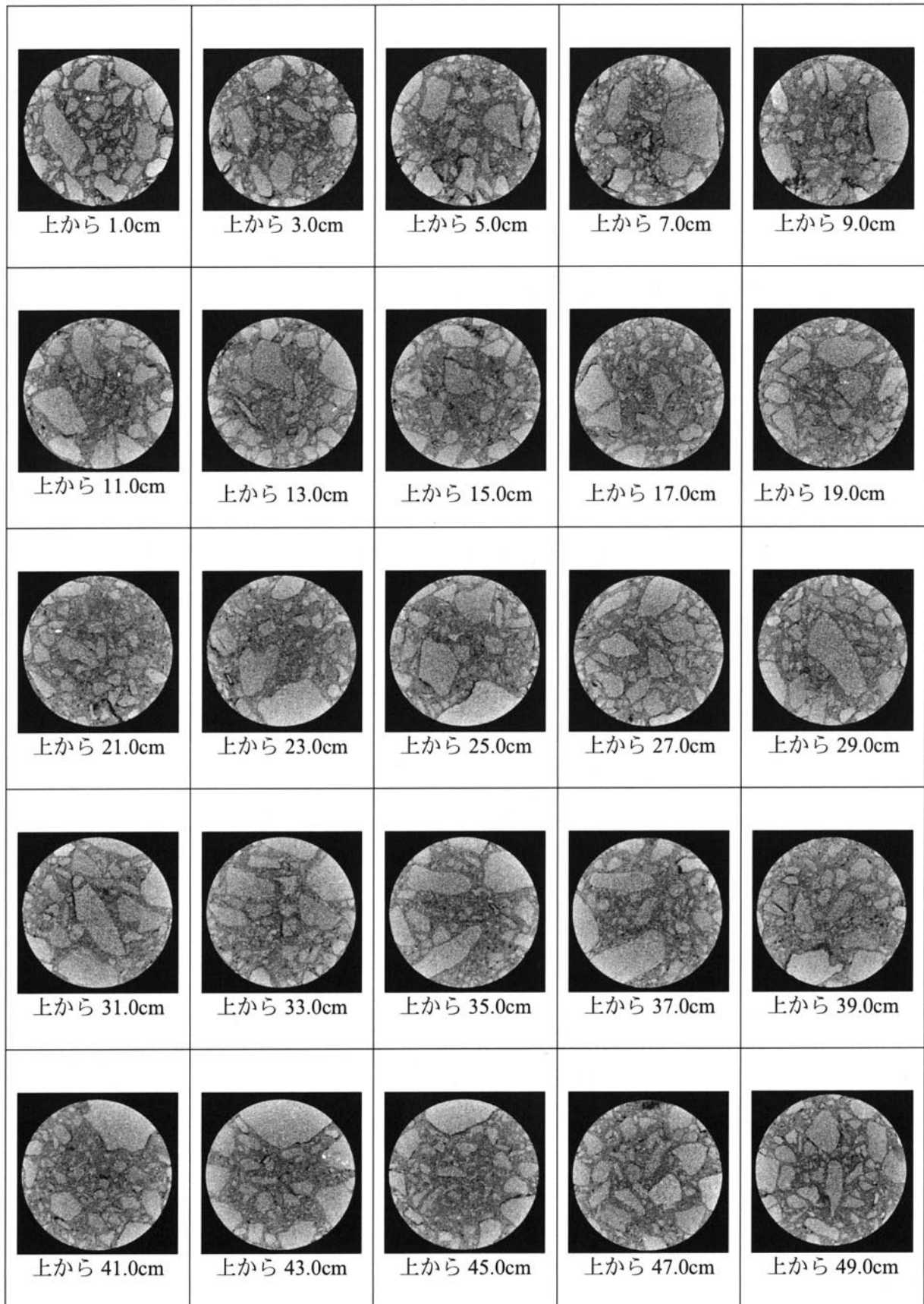
	E 供試体	F 供試体	G 供試体
1			
2			
3			
4			
5			

X線 CT 撮影断面画像 (E~G 供試体) 6~10

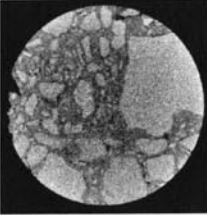
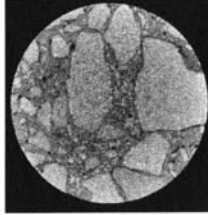
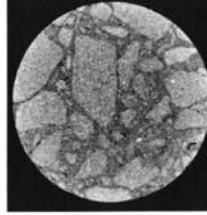
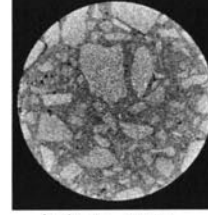
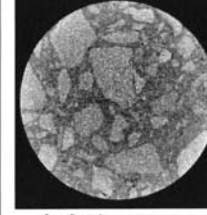
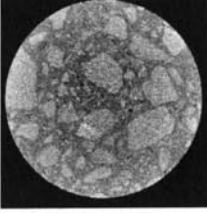
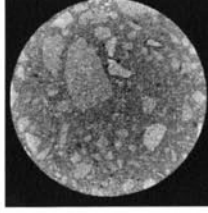
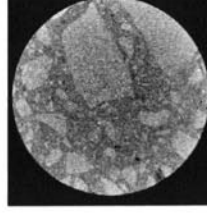
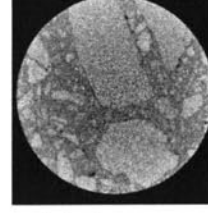
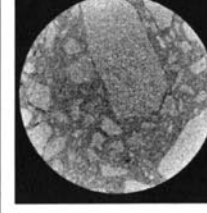
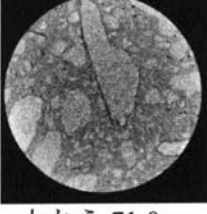
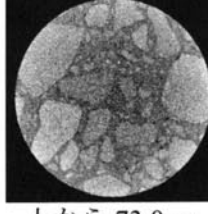
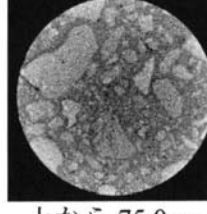
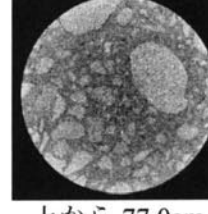
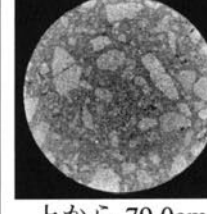
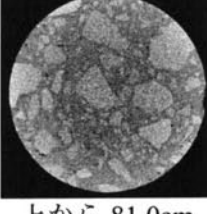
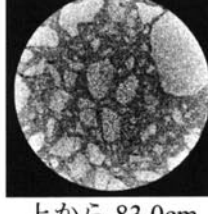
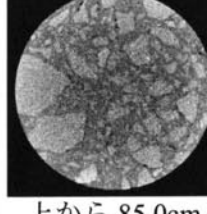
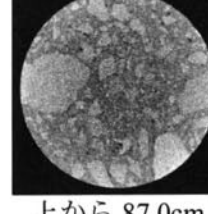
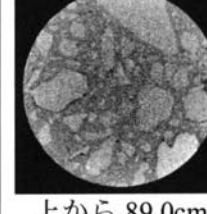
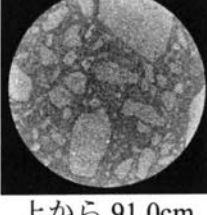
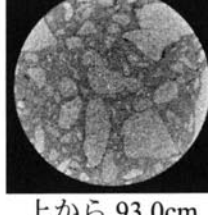
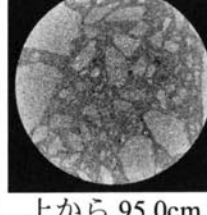
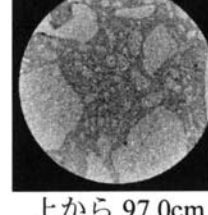
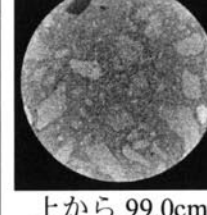
	E 供試体	F 供試体	G 供試体
6			
7			
8			
9			
10			

## 付録4 RCD 供試体の X 線 CT 画像

RCD 供試体の X 線 CT 画像 ケース A(転圧回数 16 回) (1)

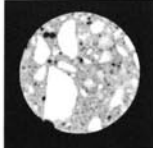
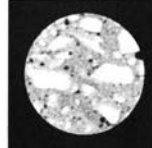
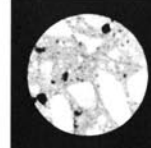
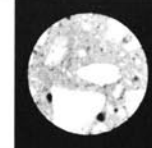
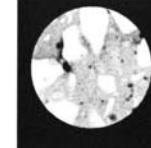
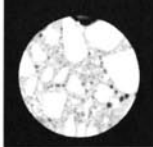
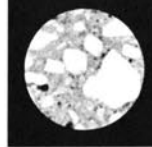
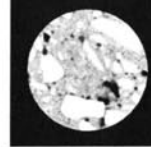
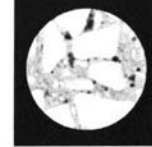
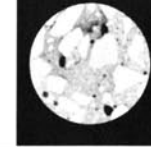

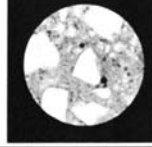
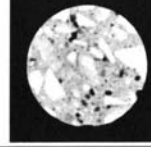
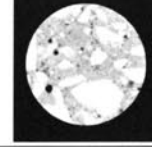
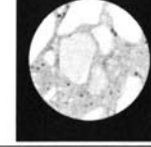
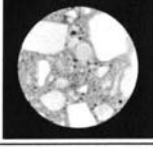
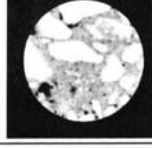



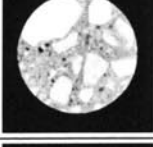




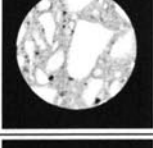




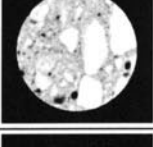
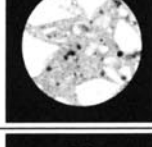
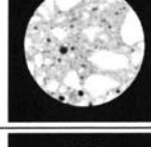
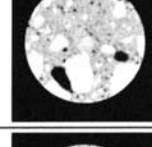
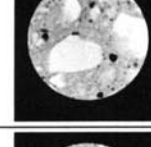
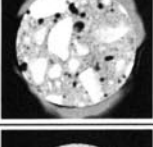
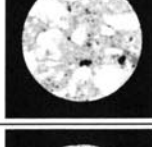
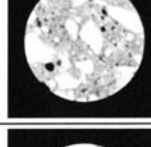

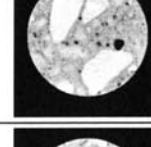
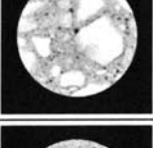
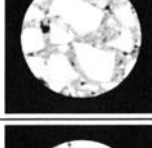
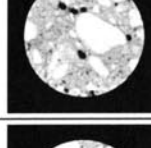
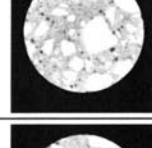
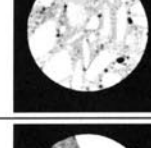
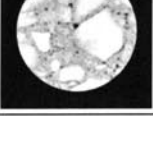






RCD 供試体の X 線 CT 画像 ケース A(転圧回数 16 回) (2)

 上から 51.0cm	 上から 53.0cm	 上から 55.0cm	 上から 57.0cm	 上から 59.0cm
 上から 61.0cm	 上から 63.0cm	 上から 65.0cm	 上から 67.0cm	 上から 69.0cm
 上から 71.0cm	 上から 73.0cm	 上から 75.0cm	 上から 77.0cm	 上から 79.0cm
 上から 81.0cm	 上から 83.0cm	 上から 85.0cm	 上から 87.0cm	 上から 89.0cm
 上から 91.0cm	 上から 93.0cm	 上から 95.0cm	 上から 97.0cm	 上から 99.0cm

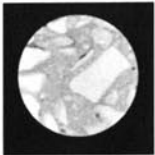

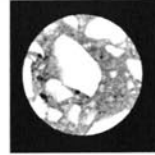
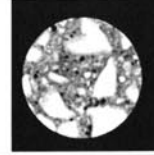


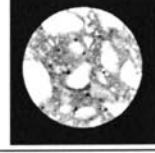

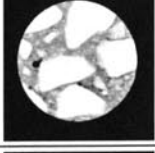



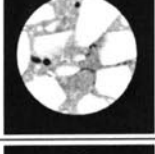



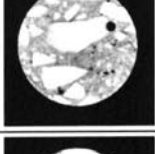
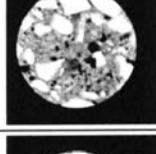
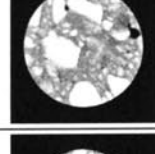
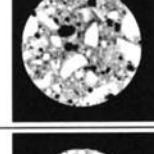
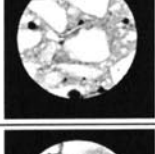
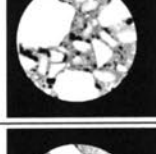
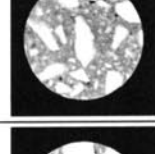
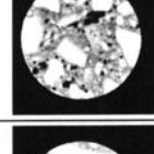
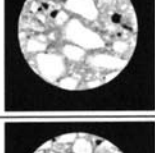
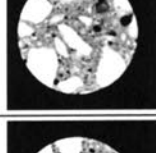
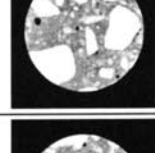
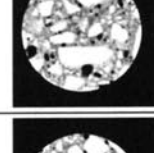
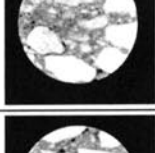
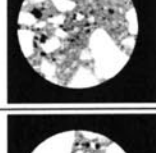
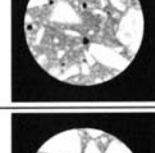
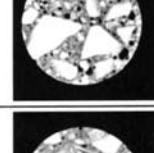
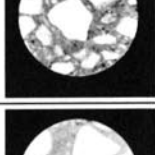
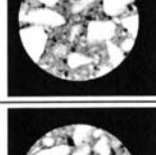
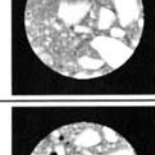
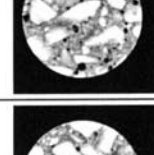

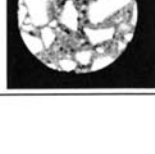


付録5 橋梁コンクリート構造物供試体のX線CT画像

X線CT撮影断面画像 (No.1~No.5)

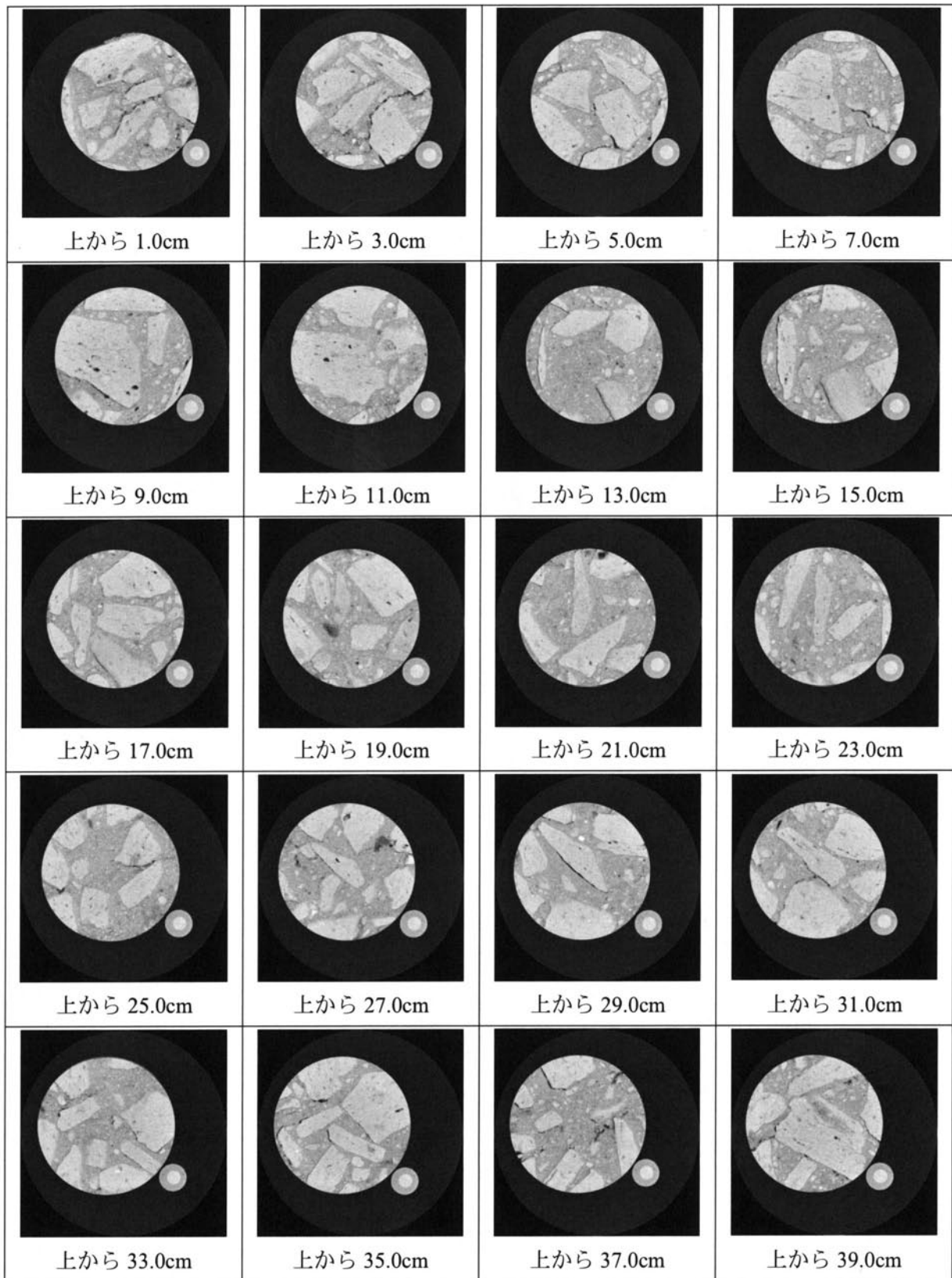
No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
				
				
				
				
				
				
				
				
				
				



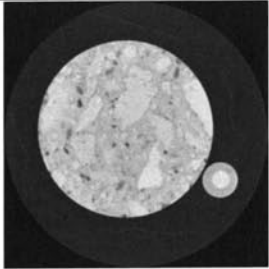
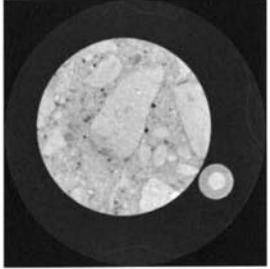
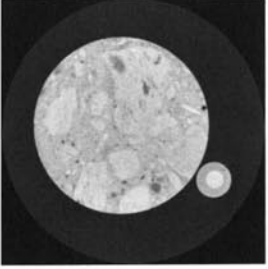
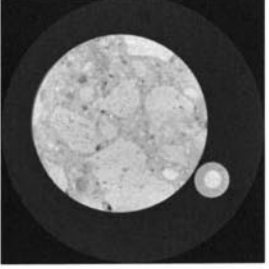
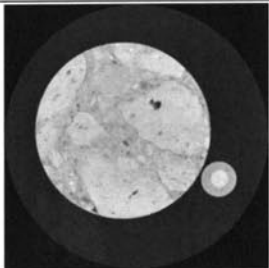
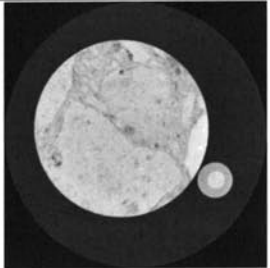
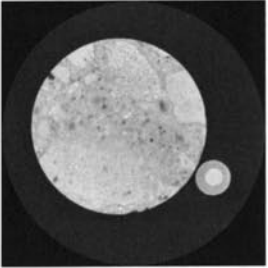
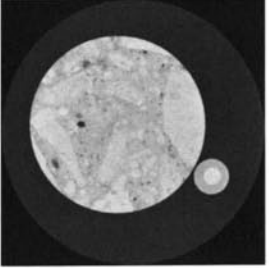
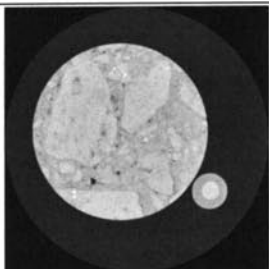
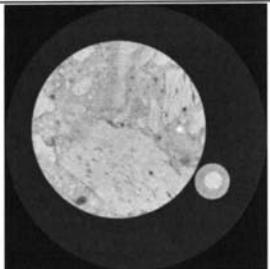
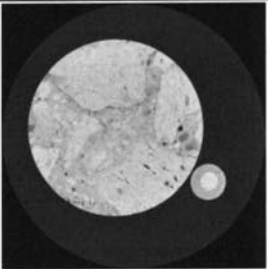
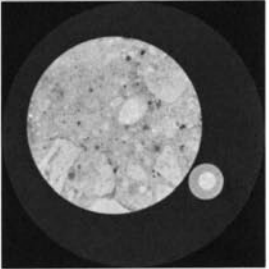
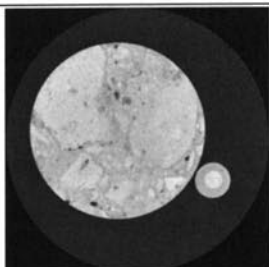
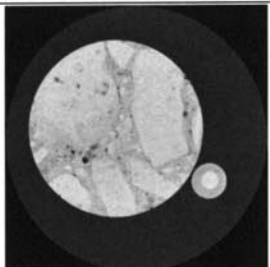
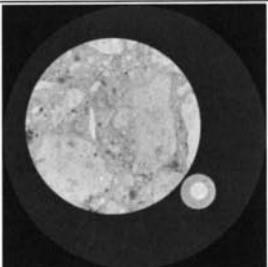
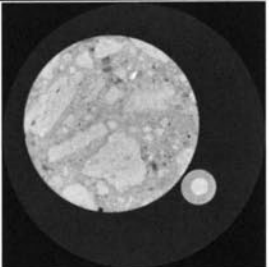
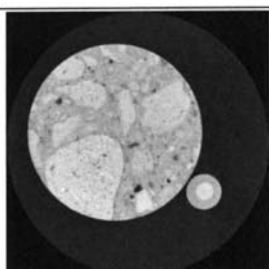
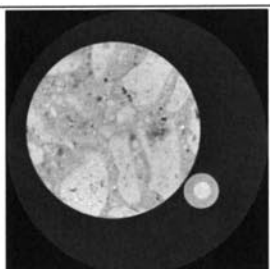
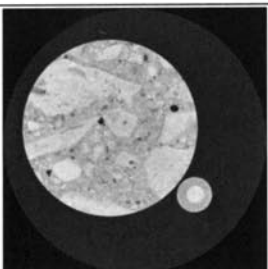
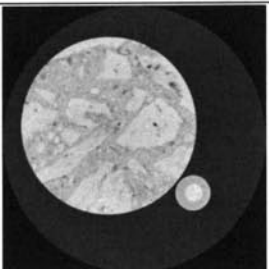
X線 CT 撮影断面画像 (No.6~No.9)

No.6	No.7	No.8	No.9
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			

付録6 築後70年のコンクリート橋梁から採取した供試体のX線CT画像  
コア供試体 No.2



コア供試体 No.12

			
上から 1.0cm	上から 3.0cm	上から 5.0cm	上から 7.0cm
			
上から 9.0cm	上から 11.0cm	上から 13.0cm	上から 15.0cm
			
上から 17.0cm	上から 19.0cm	上から 21.0cm	上から 23.0cm
			
上から 25.0cm	上から 27.0cm	上から 29.0cm	上から 31.0cm
			
上から 33.0cm	上から 35.0cm	上から 37.0cm	上から 39.0cm

付録7 築後 100 年以上経過後のレンガ構造物供試体の X 線 CT 画像

No.1	No.2	No.3	No.4	No.5

## 付録 8 本論文で使用了パラメータの一覧表

パラメータ	記号
供試体の断面積	$A$
X線CT法で評価した空隙の面積	$P_A$
X線CT法で評価した骨材の面積	$G_A$
X線CT法で評価した断面の空隙率	$Pr$
X線CT法で評価した供試体の空隙率 (各断面の平均)	$Pr (mean)$
X線CT法で評価した断面の骨材率	$Gr$
X線CT法で評価した供試体の骨材率 (各断面の平均)	$Gr (mean)$
空隙-モルタル境界CT値	$CT (p-m)$
骨材-モルタル境界CT値	$CT (g-m)$
X線CT法で評価した断面の骨材平均CT値	$G_{CT}$
骨材の密度	$G_d$
X線CT法で評価した断面のモルタル平均CT値	$M_{CT}$
X線CT法で評価した供試体のモルタル平均CT値 (各断面の平均)	$M_{CT} (mean)$
供試体の直径	$D$
水セメント比	$W/C$
セメント水比	$C/W$
単位セメント量	$C$
供試体の圧縮強度	$F$
供試体の圧縮強度 (材齢28日)	$F_{28}$

## 付録 9 関連論文

本論文の各章に関連した論文，講演概要集一覧

### 第3章 X線CT法の基礎

#### 論文

- 1) 天明敏行, 尾原 祐三, 伊藤 剛, 村上祐治, :「コンクリート円柱供試体に X 線 CT 法を適用する際の管電圧と供試体寸法の影響について」, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, 2009, 投稿中

### 第4章 硬化コンクリートの材料構成定量化法

#### 論文

- 1) 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, 日本コンクリート工学協会, Vol.30, No.2, pp.739-744, 2008.6
- 2) T.Temmyo, Y.Murakami, Y.Obara:「Evaluation of Water Cement Ratio of Hardened Concrete by X-ray CT Method」, Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, pp.443-449, 2006.10

#### 学会講演発表概要集

- 1) 伊藤剛, 天明敏行, 浜崎大志, 尾原祐三:「X線CT法を用いた硬化コンクリートの特性評価」, 資源・素材2007(春季大会), pp.77-78, 2007.4

### 第5章 材料構成定量化法による硬化コンクリートの構造特性評価

#### 論文

- 1) 天明敏行, 堤知明, 村上祐治, 尾原祐三:「X 線 CT 法によるコンクリート供試体の非破壊検査」, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol.25-1, pp.1643-1648, 2003.6
- 2) T.Temmyo, T.Tsutsumi, Y.Murakami, Y.Obara:「Estimation of structural characteristics of RCD by an X-ray CT method」, X-ray CT Geomaterials, Soiles, Concrete, Rocks, A.A.Balkema Publishers, a member of Swuets & Zeitlinger Publisher, pp.199-205, 2003

#### 学会講演発表概要集

- 1) 天明敏行, 堤知明, 村上祐治, 尾原祐三:「X 線 CT 法を用いた硬化コンクリートの水セメント比と単位セメント量の推定方法について」, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 5-163, 2002.9
- 2) 天明敏行, 堤知明, 村上祐治, 尾原祐三:「X線CT法による水セメント比の推定について」土木学会第 56回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, V-426 , pp.852-853, 2001.10

## 第6章 コンクリートの施工に関する評価

### 論文

- 1) 天明敏行, 尾原 祐三, 堤知明, 村上祐治:「RCDコアのX線CT法による物性分布の評価」, 土木学会論文集, Vol.64, No.3, pp.248-260, 2008.7
- 2) T.Temmyo, Y.Obara , T.Tsutsumi, Y.Murakami, : 「 Distribution of physical properties in Roller-Compacted Dam-Concrete cores analyzed by X-ray CT」, Symposium: Dam Safety Management, Role of State, Private Companies and Public in Designing, Constructing and Operating of Large Dams, ICOLD 75<sup>th</sup> Annual Meeting, 2007, pp.1-10
- 3) 天明敏行, 森田浩二, 菊地保旨, 村上祐治, 藤田司, 高橋博:「マレーシアのスガイキンタダムにおけるRCCダムの施工技術」, 土木建設技術シンポジウム論文集, 土木学会, pp.163-170, 2007.8
- 4) 高橋博, 藤田司, 菊地保旨, 天明敏行:「マレーシア国スガイキンタダムにおけるRCCの仮設備と施工」, ダム工学, Vol.16, No.1, pp.41-54, 2006.1
- 5) 天明敏行, 菊地保旨, 村上祐治, 大矢道弘:「マレーシアのスガイキンタダムで実施したRCCダムの配合設計と試験施工」, ダム工学, Vol15, No.4, pp.307-318, 2005.12
- 6) 天明敏行, 堤知明, 村上祐治, 尾原祐三:「X線CT法による超硬練りコンクリートの骨材分布と締固め特性」コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol.23, No.2, pp.1297-1302, 2001.7

### 学会講演発表概要集

- 1) 天明敏行, 尾原祐三, 堤知明, 村上祐治:「X線CT法によるRCDコアの物理特性の分布」, 大ダム, 日本大ダム会議, No.203 (2008-4), pp.81-83, 2008.1
- 2) 天明敏行, 伊藤剛, 尾原祐三, 村上祐治:「X線スキャノ撮影によるブリーディング現象の可視化」, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 5-048, pp.95-96, 2007.9
- 3) 伊藤剛, 天明敏行, 村上祐治, 尾原祐三:「X線CTスキャナによるモルタル硬化時の経時変化撮影」, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 5-044, pp.87-88, 2007.9
- 4) 伊藤剛, 天明敏行, 村上祐治, 尾原祐三:「X線CT法によるコンクリート硬化時の内部構造変化」, 第28回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, 西日本岩盤工学研究会, pp.53-56, 2007.9

## 第7章 既設コンクリート構造物の評価・診断

### 学会講演発表概要集

- 1) 天明敏行, 村上祐治, 伊藤剛, 尾原祐三:「X線CT法による100年以上経過後のレンガ構造物の診断例」, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, pp.379-380, 2008.9

## 謝辞

本研究を進めるにあたっては、多くの先生方、上司・先輩・後輩・同僚の方々の助言、ご指導を賜りました。また、学会等で知り合った多くの方々からもたくさんのご指導を賜りました。

研究では終始懇切なるご指導・ご激励と細部にわたるご教示を賜りました熊本大学大学院自然科学研究科 教授 尾原祐三先生に深甚なる謝意を表する次第です。

また、ご多忙にもかかわらず本論文の草稿を査読いただき、貴重なご意見・ご指導を賜りました熊本大学副学長 菅原勝彦先生、熊本大学大学院自然科学研究科 教授 大谷順先生、大津政康先生、准教授 佐藤晃先生に謹んで感謝の意を表します。また、熊本大学大学院 自然科学研究科 教授 山田文彦先生、准教授 椋木俊文先生には、研究中セミナーや学会等において、ご指導と有益なご意見をいただきました。また、熊本大学 尾原研究室の伊藤剛氏（現東芝メディカルシステムズ（株））、濱崎大志氏（現若築建設（株））をはじめ研究室の各位にはゼミを通じて、有難いご助言・多大なご協力を賜りました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

本論文は、熊本大学大学院博士後期課程で行った研究を学位論文としてまとめたものでありますが、本研究の発端は2000年にダム建設のプロジェクトをきっかけにX線CT法に出会ったことがきっかけでした。この研究の機会を与えていただいた東京電力（株）設備基盤技術グループ主管研究員 堤知明博士ならびに（株）間組 技術環境本部 技術研究所 技術第一部部長 村上祐治博士に心より感謝申し上げます。特に村上祐治博士には本研究に関して終始ご指導いただきましたが、研究以外にもいろいろな面で惜しみないご指導を賜りました。厚く御礼申し上げます。また、論文発表会では（株）KSK 構造診断研究所 社長 山下英俊博士ならびに東電設計（株）土木本部耐震技術部 主任 中川貴之氏に貴重なご意見をいただきました。御礼申し上げます。

社会人ドクターコースへ行く機会が得られたのは筆者の所属する（株）間組で社内公募制という制度が設立された2006年でした。（株）間組 土木事業本部 副本部長 浜野哲夫氏、ダムグループ長 藤田司氏をはじめ、土木事業本部技術部、特にダムグループの各位には本研究を存分に進められる環境を整えていただくとともに、多大なご助力を賜りました。厚く御礼申し上げます。このほか、技術環境本部技術研究所のコンクリートチームの方々による技術的なサポートや、技術環境本部技術企画部、人事部の方々による事務的なサポート、そのほか九州支店の作業所、熊本営業所の方々など、本当にたくさんの方々の支援を受けました。

日々の生活において、研究や業務に十分な時間をくれた家族も含めまして、皆様に感謝の意を表しつつ、本論文を結びたいと思います。