

X線CTを用いたアスファルト舗装材料の 新しい評価手法に関する研究

谷口聡¹・大谷順²・西崎到³

¹正会員 (独)土木研究所材料地盤研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail : taniguti@pwri.go.jp

²正会員 工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科社会環境工学専攻 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2-39-1)

³正会員 工博 (独)土木研究所材料地盤研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

アスファルト混合物の新しい品質評価手法及び劣化評価手法として、X線CTの適用可能性を検討することを目的として、アスファルト混合物を構成する素材およびマーシャル安定度試験用供試体を用いてX線CT試験を実施した。その結果、X線CT画像はアスファルト混合物内の骨材の形状や空隙の分布等を示すことができることがわかった。また、密度と非常に相関が高いCT値という指標が、アスファルト混合物を評価するうえで有効な評価手段であることが明らかとなった。

Key Words : X-ray CT, asphalt material, asphalt mixture, density

1. 本研究の背景と目的

X線CTは、1972年にHounsfieldによって発明されて以降、短時間で高精度に人体内部の鮮明な画像を得ることができることから、現在では医療で不可欠な装置となっている¹⁾。産業用途においても、自動車、航空、電子産業等といった分野で部品の非破壊検査に用いられている²⁾。土木分野においても、1996年にX線CTスキャナが熊本大学に導入されたのを皮切りに、主として砂や粘土等といった地盤材料に適用され、三軸圧縮試験による破壊メカニズムの解明、矢板及び鋼管杭の貫入のシミュレーション等が行われている³⁾。コンクリートについてもX線CTによる水セメント比を測定する手法が開発されている⁴⁾。これらのことから、舗装材料においてもX線CTによる材料の品質評価及び劣化評価ができることが期待されていた。

アスファルト舗装材料へのX線CTの適用は米国で1988～92年に実施された新道路研究計画 (SHRP) までさかのぼることができる⁵⁾。近年では骨材形状、亀裂等について分析する事例が報告されている。国内においてもTomotoら⁶⁾がアスファルト舗装の亀裂について、矢野ら⁷⁾が空隙率及び骨材形状について分析を行った。このように、これまでのアスファルト混合物への適用においては、骨材形状、空隙及び亀裂等の分析が主であった。

本研究では、アスファルト舗装の素材及び混合物について、密度の違いによる品質評価及び劣化評価手法を提案することを目的に、X線CTスキャナを用いて素材及び

マーシャル安定度試験供試体のX線CT試験を実施した。また、出力画像の結果から骨材配合、アスファルト量、空隙率等といったアスファルト舗装材料のX線CTによる品質評価の可能性について検討を行った。

2. 本研究の方法

(1) X線CT

a) X線CTの原理

X線CTの原理は、様々な方向から「影絵」を測定し、PCでデジタル処理を施すことにより、供試体内部の各点のX線吸収係数 (単位長さあたりのX線吸収量) を求め、それを画像の濃淡で表示することにある⁸⁾。X線CTの撮影方法を図-1に示す。

また、X線吸収量の算出原理を図-2に示す。X線吸収量は、検出器があらゆる方向から受けたX線透過量をPCで演算することによって求めることができる⁹⁾。

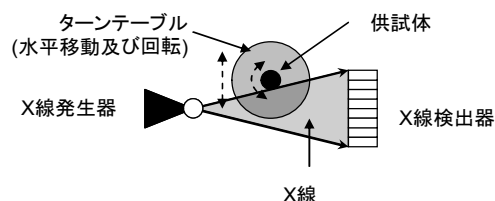


図-1 X線CTの撮影方法

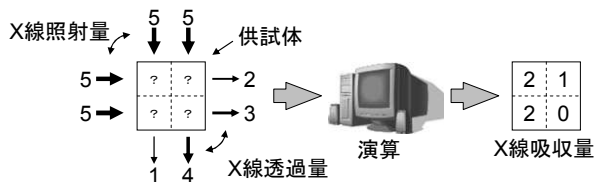


図-2 X線吸収量の算出原理

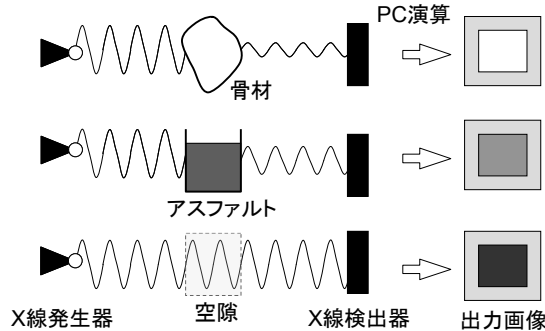


図-3 アスファルト混合物素材のX線減衰の概念および出力画像の色

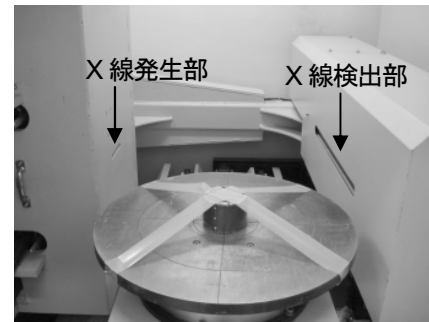


写真-1 X線CTスキャナ (熊本大学)

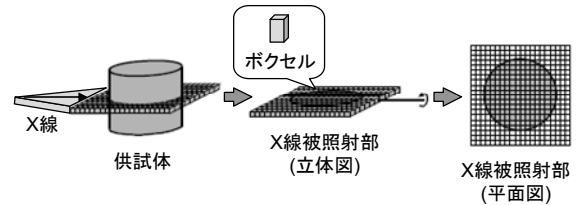


図-4 ボクセルの概念⁸⁾

X線吸収係数は密度の高い材料ほど大きく、密度の低い材料ほど低い傾向がある。すなわち、図-3に示すように骨材等のような密度の高い材料ではX線の減衰が大きく、アスファルト等のような密度の低い材料ではX線の減衰は小さく、空隙ではX線の減衰はほとんどない。

b) X線CTスキャナ

X線CTスキャナによる撮影の様子を写真-1に示す。図-1のとおり、X線発生器から扇状のX線（ファンビーム）が照射され、X線検出器によって減衰したX線透過量を検出する仕組みとなっている。試料台は供試体にX線を照射させるため並進運動を行い、撮影が終了すると30度回転し次の撮影に入る。この走査を6回繰り返すことによって180度からX線が照射されたことになる。この6回の測定結果をもとに供試体のX線吸収係数を求めた。なお、X線CTスキャナは熊本大学の産業用X線CTスキャナTOSCANER4を用いた。

c) 出力画像

はじめに、立体画像を構成するボクセル(Voxel)の概念を図-4に示す。平面画像を構成する最小要素はピクセルと呼ばれるのに対し、X線CTから得られる立体画像を構成する最小要素はボクセルと呼ばれ一つの単位体積を表す。またボクセルはピクセルと同様、明度、彩度、色相等といった、各ボクセルのX線吸収係数を反映した色の情報を持っている。

次に、各ボクセルのX線吸収係数(μ)から式(1)を用いて各ボクセルのCT値を求めた。

$$CT値 = K \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \quad (1)$$

ここに、 μ_w ：水のX線吸収係数、 K ：定数(通常 $K=1,000$)

X線吸収係数は物体の密度にほぼ比例する。そのため、ここで定義されるCT値は、密度が大きいほど大きく、密度が小さいほど小さくなる。そこで、本研究においてはこのCT値を用いてアスファルト混合物材料の密度の違いを評価した。

X線CTの出力画像は、ボクセルが持つCT値等といった情報から、通常、256階調のグレースケールとして変換される。一般に、CT値の高い領域（高密度領域）では白く、低い領域（低密度領域）では黒く表示される。アスファルト混合物素材の場合、骨材のように密度の高い材料は白っぽく、アスファルトのような密度の低い材料は黒っぽく、空隙は真っ黒に表示されることになる（図-3）。

(2) アスファルト混合物供試体の作製

本研究においては、CT画像における濃淡が密度と深い関係があるため、各素材及びアスファルト混合物について『舗装調査・試験法便覧』¹⁰⁾に基づいて密度試験を実施した。素材及びアスファルト混合物の供試体作製の概要は以下のとおりである。

a) 素材

本研究で使用了素材は6号碎石（粒度範囲：5～13mm）及び7号碎石（粒度範囲：2.5～5mm）で構成される粗骨材、スクリーニングス、砕砂、細砂（最大粒径2.36mm）で構成される細骨材、石粉及びストレートアスファルト（以下、ストアス）である。それぞれを胴径50mmのポリカーボネート瓶に高さ55mmまで充填し、素材の供試体を作製した（写真-2）。

粗骨材及び細骨材については、アスファルト混合物の骨材粒度設計により表-1の配合率に基づいて充填した。また、構成素材の密度試験結果及び各供試体内の密度計

算結果を表-2に示す。

石粉については、密度 2.770g/cm^3 、 0.075mm ふるい通過量が 80.9% のものを、表-1のとおり全骨材中 5% を配合した。

ストアスは針入度クラス $60/80$ のものを、密度試験の結果は 1.041g/cm^3 であり、マーシャル安定度試験の結果、最適アスファルト量は 5.5% となった。

b) アスファルト混合物

前節と同じ素材を用いて、マーシャル安定度試験用密粒度アスファルト混合物（最大粒径 13mm ）供試体を3個作製した（写真-3）。供試体のサイズを測定した結果、直径 101.6mm 、高さ 68.7mm であったが、今回はX線CTにより内部の性状を測定することが主目的であることから、本供試体をそのまま使用した。

供試体はマーシャル安定度試験のアスファルト量の最適値（ 5.5% ）に基づき、3個とも同じ配合で作製された。3個の供試体の体積百分率は表-3、密度試験の結果は表-4のとおりである。

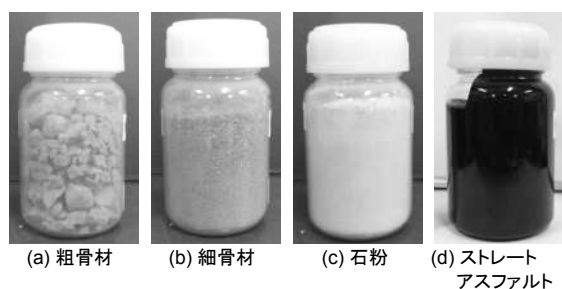


写真-2 素材供試体



写真-3 アスファルト混合物供試体

表-1 骨材配合率

6号 碎石	7号 碎石	スクリー ニングス	砕砂	細砂	石粉
36.5%	20.0%	11.5%	14.5%	12.5%	5.0%

表-2 骨材の密度

	粗骨材		細骨材		
	6号 碎石	7号 碎石	スクリー ニングス	砕砂	細砂
密度試験値	2.690	2.697	2.661	2.669	2.729
供試体密度	2.692		2.686		

(単位: g/cm^3)

表-3 アスファルト混合物供試体の体積百分率

	粗骨材	細骨材	石粉	ストアス	空隙
供試体1	47.3%	32.2%	4.1%	12.7%	3.7%
供試体2	47.4%	32.3%	4.1%	12.7%	3.5%
供試体3	47.2%	32.2%	4.0%	12.6%	4.0%

表-4 アスファルト混合物供試体の密度

	供試体1	供試体2	供試体3
密度(g/cm^3)	2.388	2.393	2.381

表-5 X線CTの撮影条件

X線管電圧	250kV
スライス厚	2.0mm
撮影領域	$\phi 150\text{mm}$
画像再構成マトリクス数	$2,048 \times 2,048$ ピクセル
空間分解能	$0.073 \times 0.073 \times 2.0\text{mm}^3$

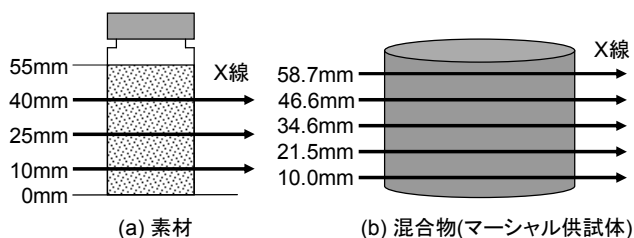


図-5 供試体のX線照射位置

(3) X線CT撮影

X線CTの撮影条件を表-5に示す。照射するX線は、過去のセメントコンクリートの研究事例⁴⁾等からX線管電圧を 250kV 、ファンビームのスライス厚を 2mm とした。また、直径 150mm の供試体に対し 2048×2048 ピクセルで撮影していることから、X線CT画像の空間分解能は $0.073 \times 0.073 \times 2.0\text{mm}^3$ のボクセルで構成されることになる。

図-5に示すとおり、粗骨材、細骨材、石粉、ストアスについては、供試体底部から 10mm 、 25mm 、 40mm の高さに厚さ 2.0mm のファンビームX線を照射した。また、密粒度アスファルト混合物については、供試体底部から 10mm 、 21.5mm 、 34.3mm 、 46.4mm 、 58.7mm の高さにおいてファンビームX線を照射した。

(4) アスファルト混合物の画像解析

図-6に示すように、アスファルト混合物のCT値は、X線の減衰をもとに算出され、減衰量は骨材、アスファルト+石粉、空隙の構成比によって変化する。すなわち、骨材の量が多ければX線の減衰は大きく、CT値も大きくなり、空隙の量が多ければX線の減衰量は小さく、CT値も小さくなる。

アスファルト混合物の出力画像から素材の構成を特定するためには、CT値のしきい値を設定する必要がある。本研究においてはPタイル法(Percentile method)¹¹⁾を用いた。

Pタイル法は、図-7のように対象物の面積 S_0 と対象物以外の面積 S_I から、画像全体の面積 S と面積比率 P を求める。次に、CT値の低い方または高い方から頻度値を積算していき、対象物の面積が画像全体の面積に対して P の割合となるところのCT値をしきい値 T とする。対象物の面積 S_0 は対象となるボクセル数を表し、それを総ボクセル数で除することから、体積率が既知のものについて非常に有効である。

本研究においては空隙、ストアス+石粉、細骨材、粗骨材の4種類に区分するため、3つのCT値のしきい値を求め、4値化を行った。なお、ストアス+石粉としたのは、石粉がアスファルトと一体となって骨材の間隙を充填し、混合物の安定性や耐久性を向上させる役割があること¹²⁾、また、石粉は約80%が 0.075mm 以下の粒子であり、X線CT画像の空間分解能($0.073 \times 0.073 \times 2.0\text{mm}^3$)では粒子として判断できないためである。

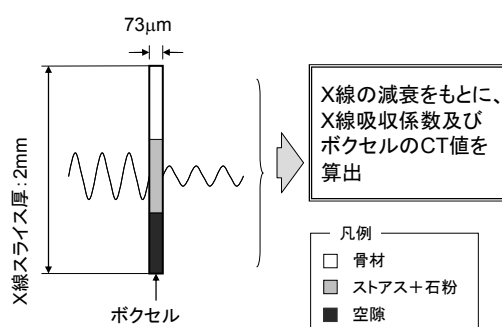


図-6 アスファルト混合物のCT値算出の概念

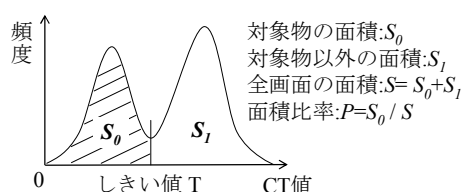


図-7 Pタイル法の概念

3. 本研究の結果及び考察

(1) 素材

a) 粗骨材

粗骨材の断面CT画像及びCT値ヒストグラムを図-8に示す。

断面CT画像から、粗骨材の形状と空隙がはっきり現れていること、CT値ヒストグラムが双峰性を示していることがわかる。これは、粗骨材の標本中には粗骨材間を充填する材料がなく、大きな空隙が多数存在することによ

るものである。

CT値が-1000前後の範囲が空隙を、1600前後の範囲が粗骨材を表わしている。なお、CT値が-1000~1600での頻度が100となっているが、これはボクセル内に空隙部分と骨材部分の両方が混在するボクセルが存在していることによるものである。

b) 細骨材

細骨材の断面CT画像及びCT値ヒストグラムを図-9に示す。

断面CT画像から、小さな粒子が大きな粒子間の空隙を充填していることがわかる。CT値のヒストグラムは粗骨材とは異なり単峰性を示している。これは、X線CTの空間分解能が $0.073 \times 0.073 \times 2.0\text{mm}^3$ であるのに対し、細骨材は大部分が粒径 2.0mm 以下であり、多くのボクセル内に細骨材と空隙の部分が存在していることによる。そのため、空隙部分に影響されて各ボクセルのCT値が低くなるものと考えられる。

CT値のピークはいずれの撮影高さにおいても600~700となっている。

c) 石粉

石粉の断面CT画像及びCT値ヒストグラムを図-10に示す。

断面CT画像は撮影高さが高いほど黒っぽく、低くなるほど白っぽくなっている。また、ヒストグラムから、CT値は撮影高さが高いほど低く、低くなるほど高くなっていることがわかる。

石粉の粒径は非常に小さく 0.075mm 以下の粒子が約80%を占めている。そのため、容器の底の方に溜まりやすい(密になりやすい)という傾向があると考えられる。また、X線CTの空間分解能が $0.073 \times 0.073 \times 2.0\text{mm}^3$ であることから、石粉を粒子として判別することはほとんど不可能であることが、図-10の断面CT画像から読み取れる。

d) ストアス

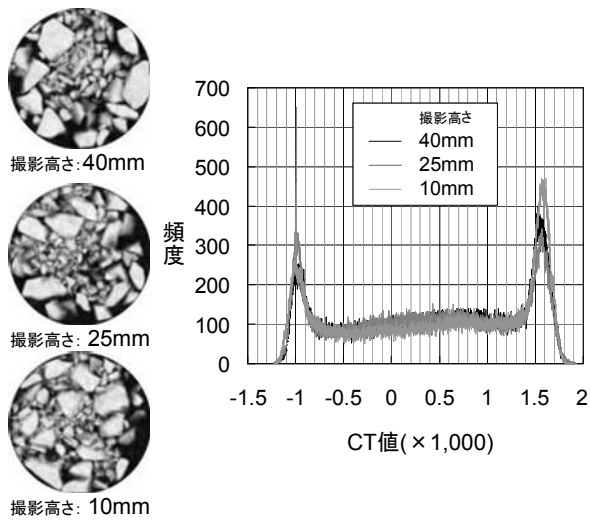
ストアスの断面CT画像及びCT値ヒストグラムを図-11に示す。

断面CT画像はほぼ同じような画像であり、ヒストグラムも3本の線が重なっている状態にある。また、CT値のピークは5付近であった。

(2) アスファルト混合物

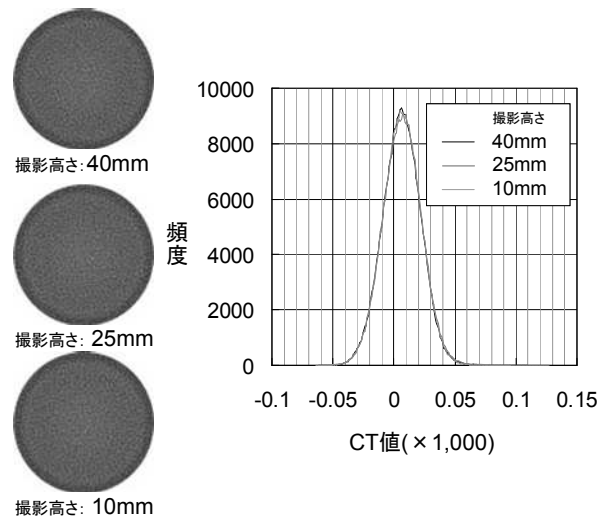
a) アスファルト混合物の撮影画像

アスファルト混合物をX線CTにより撮影した全供試体の断面CT画像を図-12に、高さ 34.3mm における供試体No.1(以下、供試体No.1-3)の拡大図を図-13に示す。さらに、供試体No.1-3、並びに高さ 34.3mm における供試体No.2及び3(以下、No.2-3、No.3-3)のCT値ヒストグラム(後述のしきい値を挿入)を図-14に示す。



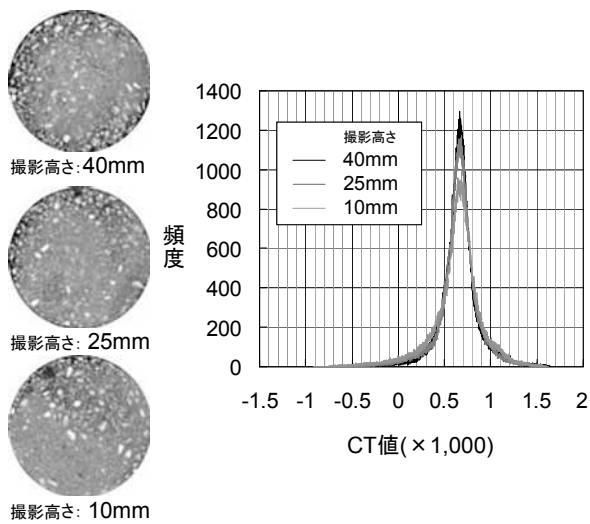
(a) 断面CT画像 (b) CT値ヒストグラム

図-8 粗骨材の断面CT画像及び意CT値ヒストグラム



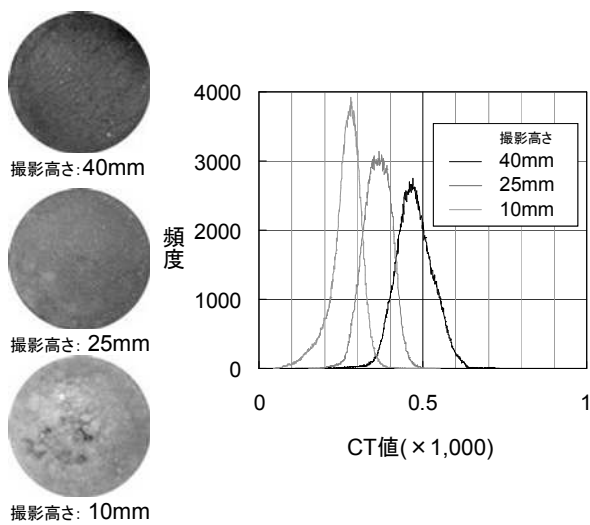
(a) 断面CT画像 (b) CT値ヒストグラム

図-11 ストアスの断面CT画像及びCT値ヒストグラム



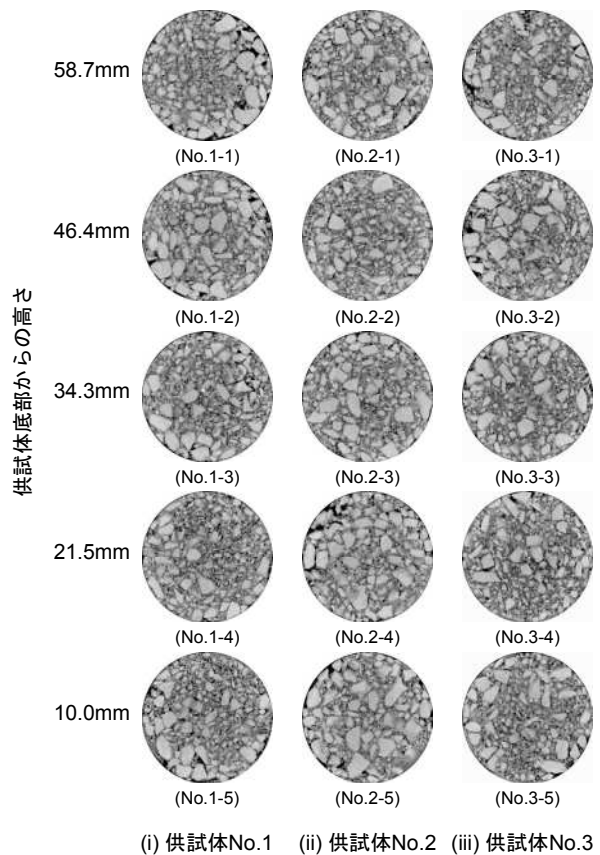
(a) 断面CT画像 (b) CT値ヒストグラム

図-9 細骨材の断面CT画像及びCT値ヒストグラム



(a) 断面CT画像 (b) CT値ヒストグラム

図-10 石粉の断面CT画像及びCT値ヒストグラム



(i) 供試体No.1 (ii) 供試体No.2 (iii) 供試体No.3

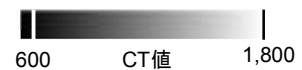


図-12 アスファルト混合物の断面CT画像（全断面）

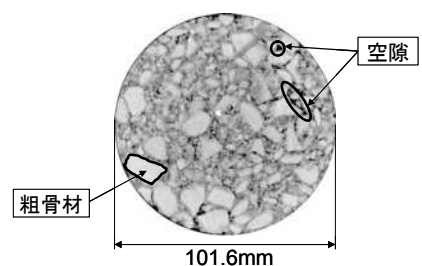
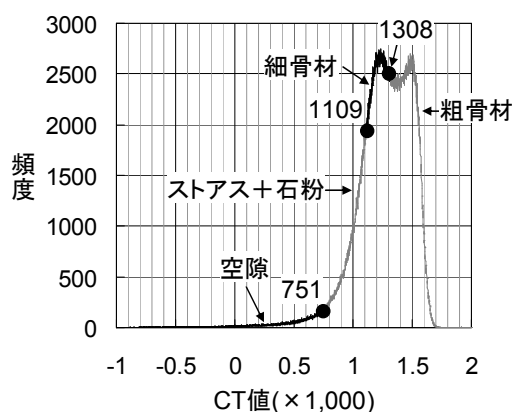
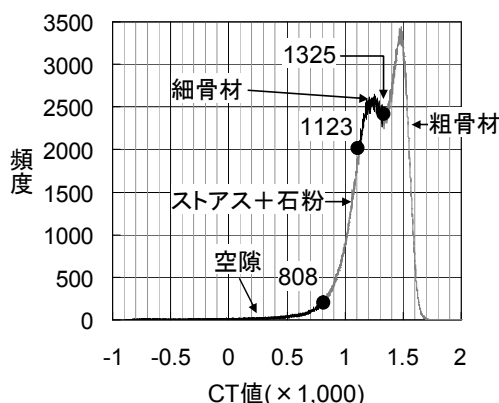


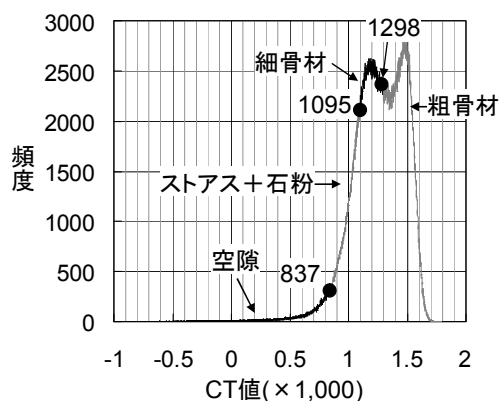
図-13 アスファルト混合物の断面CT画像（No.1-3）



(a) 供試体No.1-3



(b) 供試体No.2-3



(c) 供試体No.3-3

図-14 アスファルト混合物のCT値ヒストグラム

図-12及び図-13から、ある程度粗骨材の形状や空隙の分布を把握することが可能である。また、図-14のヒストグラムはいずれも双峰性を示しており、それぞれのピークは図-8～11の結果より、CT値の小さい方が細骨材、大きい方が粗骨材であると考えられる。

そこで、2.(3)で述べたように、素材の種類毎に同定するため、素材毎にしきい値を設定した。今回使用したアスファルト混合物においては、体積率が既知であることから、Pタイル法によりしきい値を算出した。しきい値は図-14のヒストグラムに基づき、CT値の低い方から面積

比率を求め、空隙、ストアス+石粉、細骨材、粗骨材の体積率と等しくなったCT値をしきい値とした。

Pタイル法によって求めた5断面のしきい値の平均値及び標準偏差を表-6に示す。

空隙/ストアス+石粉のしきい値（以下、しきい値1）の平均は800前後、ストアス+石粉/細骨材のしきい値（以下、しきい値2）の平均は1,100前後、細骨材/粗骨材のしきい値（以下、しきい値3）の平均は1,300前後と、いずれも各素材のCT値のピークよりも大きな値となった。

これは、3.(1)で述べたように、X線CTの空間分解能が $0.073 \times 0.073 \times 2.0 \text{mm}^3$ であり、それぞれの素材、特にアスファルト、石粉及び細骨材の細粒分が混入することによって、X線の減衰が大きくなるためであると考えられる。

また、表-6の標準偏差に着目した場合、しきい値1については標準偏差が大きく、しきい値2及びしきい値3については標準偏差が小さくなる傾向がある。これは、しきい値2及びしきい値3については、アスファルト混合物に占める骨材の割合が多く（表-3の体積比で約80%）、図-14に示されているように峰の部分がはっきりと現れていることによるものである。一方、しきい値1については、アスファルト混合物に占めるアスファルト及び空隙の割合が小さく、しきい値が図-14のヒストグラムの単純増加する部分に位置するため、ばらつきやすいものと考えられる。

さらに、供試体毎の標準偏差に着目した場合には、供試体3は他の2つに比べて小さい傾向が認められた。これは、混合物内の各段面における各素材の体積率のばらつきが小さく、供試体が均一に作製されていることによるものと考えられる。このことから、供試体毎の標準偏差はアスファルト混合物の均質性を表す指標となる可能性があると考えられる。

c) 4値化画像

No.1-3について表-5の平均値をもとに4値化した画像及び4値化した画像から、空隙、ストアス+石粉、細骨材、粗骨材に分類した結果を図-15に、四角の部分を抽出した画像を図-16に、各構成材料を抽出した結果を図-17に示す。

表-6 供試体のしきい値平均及び標準偏差

		しきい値1 (空/アス※)	しきい値2 (アス/細※)	しきい値3 (細/粗※)
平均	供試体1	751	1,109	1,308
	供試体2	808	1,123	1,325
	供試体3	837	1,095	1,298
標準偏差	供試体1	62	14	19
	供試体2	64	2	13
	供試体3	16	3	9

※空=空隙、アス=ストアス+石粉、細=細骨材、粗=粗骨材

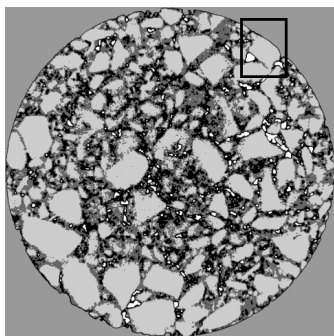


図-15 アスファルト混合物の4値化画像（供試体1-3）



図-16 4値化画像の拡大画像（図-15の四角部）

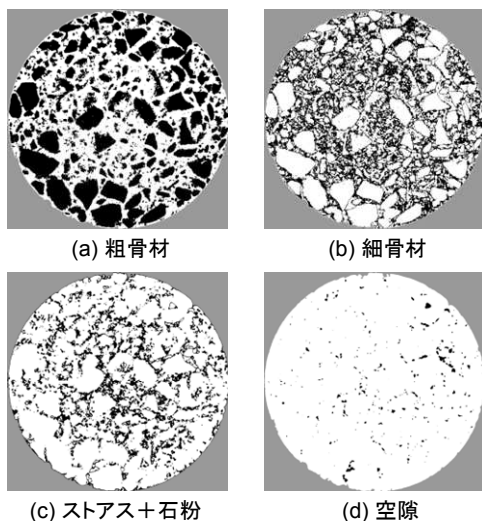


図-17 4値化画像からの構成材料の抽出（供試体1-3）

図-15のように4値化することによって、各材料の供試体内での分布状況や大まかな粒径の違い等、全体像を視覚的に容易に知ることが可能となる。また、図-16のように粗骨材の噛み合わせ状況、アスファルトモルタルの充填状況、空隙の状況を確認することができる。さらに、図-17のように各材料のより詳細な分布状況等を確認することがわかった。

d) 各材料の体積率の鉛直方向分布

表-6の平均しきい値を用いて空隙率の鉛直方向分布を図-18に、ストアス+石粉の体積率の鉛直方向分布を図-19に、細骨材の体積率の鉛直方向分布を図-20に、粗骨材の体積率の鉛直方向分布を図-21に示す。

空隙率については中心に近いほど空隙率が小さく、上面及び底面に近づくほど空隙率が大きくなる傾向が見られた。

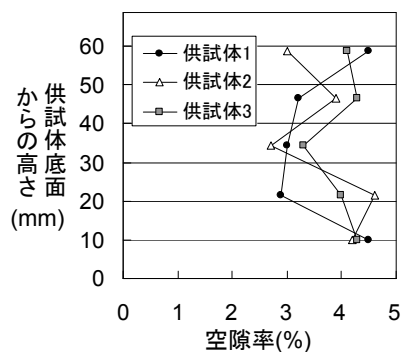


図-18 空隙率の鉛直方向分布

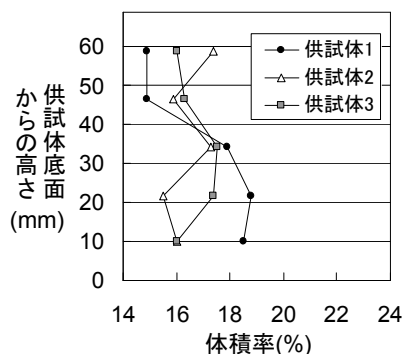


図-19 ストアス+石粉の鉛直方向分布

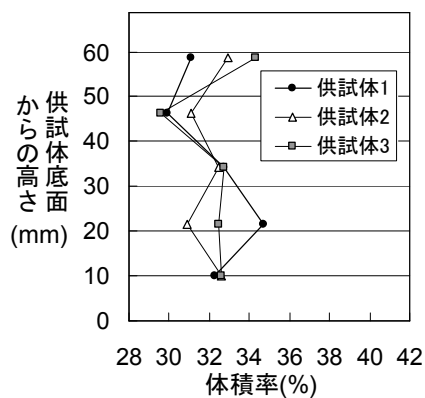


図-20 細骨材の鉛直方向分布

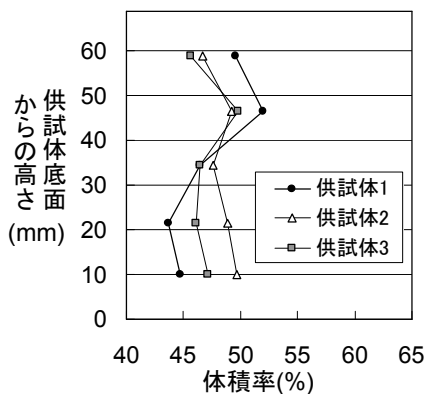


図-21 粗骨材の鉛直方向分布

ストアス+石粉については、供試体1が上面に近づくほど体積率が低く、底面に近づくほど体積率が高くなる傾向が見られた。

細骨材については、46.6mmの高さで体積率が低くなる傾向が見られた。逆に粗骨材は46.6mmの高さで体積率が高くなる傾向が見られた。

図-18~21を総括すると、各段面において素材の体積比の構成が変化することから、複数断面についてX線CT撮影を行い、しきい値はその平均をとることが望ましいことがわかった。

4. まとめ

本研究では、アスファルト混合物の品質を評価するため、X線CTの適用可能性について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・ アスファルト混合物の素材にX線CTを適用した結果、粗骨材とストアスについては密度とCTの間に良好な相関が見られたが、細骨材と石粉は粒子の小ささの影響で、CT値が小さくなる傾向が見られた。
- ・ アスファルト混合物にX線CTを適用した結果、各素材の体積率が明らかな場合には、Pタイル法によりしきい値を設定し、骨材の形状や空隙の分布等を可視化できることが明らかとなった。
- ・ X線CTはアスファルト混合物の品質を評価する手段として、密度と相関が高いCT値が有効な評価手段であることがわかった。

今後はアスファルト量を変化させた場合、あるいは粗粒度、ポーラスアスファルト混合物等、混合物の種類を変えた場合についてX線CT試験を実施する予定である。また、しきい値が妥当である点について、より詳細に現象把握が可能なマイクロフォーカス型X線CT等により検討する予定である。

謝辞：本研究においてX線CT試験実施及びデータ解析に多大なるご助力いただいた三角直輝氏（元熊本大学）に深甚なる感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 岩井喜典：CTスキャナー-X線コンピュータ断層撮影装置一，1979.
- 2) 藤井正司：X線透過法とCTによる内部検査，検査技術10月号，pp.62-69，2007.
- 3) Otani J. : State of the art report on geotechnical X-ray CT research at Kumamoto University, Proceedings of the International workshop on X-ray CT for Geomaterials, pp.43-77, 2003.
- 4) 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定量化法の提案，コンクリート工学年次論文集，第30巻第2号，2008.
- 5) Synolakis C.E., Leahy R.M., Singh M.B., Zhou Z., and Song S.M. : Development of an Asphalt Core Tomographer, SHRP-A-656, National Research Council, 1993.
- 6) Tomoto T. and Moriyoshi A. : Evaluation of Damage to Asphalt Pavements using a Micro-focus CT Scanner and Three-dimensional Crack Analysis, Road Material and Pavement Design, Vol.10, No.3, pp.519-543, 2009.
- 7) 矢野辰明，五傳木一，吾妻雄一：CTスキャンを活用したアスファルト混合物の非破壊評価に関する検討，第27回日本道路会議，No.12014，2007
- 8) 大谷順，菅原勝彦：X線CTの応用技術総論，資源・素材2000（秋季大会），資源・素材学会，2000.
- 9) 菊池喜昭，水谷崇亮，永留健，畠俊郎：マイクロフォーカスX線CTスキャナの地盤工学への適用性の検討，港湾空港技術研究所資料第1125号，2006.
- 10) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2007.
- 11) 高木幹雄，下田陽久：新編画像解析ハンドブック，東京大学出版会，2001.
- 12) 日本道路協会：舗装施工便覧，2009.

A STUDY ON NEW EVALUATION METHOD FOR ASPHALT PAVEMENT MATERIALS USING X-RAY CT SCANNER

Satoshi TANIGUCHI, Jun OTANI and Itaru NISHIZAKI

This research aims to investigate a possibility that X-ray CT evaluate asphalt pavement materials or mixtures. X-ray CT test was conducted for the asphalt pavement materials or mixtures by X-ray CT Scanner in Kumamoto University. In this study, X-ray CT images of asphalt mixture could show the shape of aggregate and distribution of void and so on. Besides, CT value was effective evaluation method to evaluate a difference of the density of the asphalt materials and mixtures.