

X線CTを用いたアスファルト混合物の 品質評価および耐久性評価に関する研究

2015年3月

熊本大学大学院自然科学研究科

谷 口 聡

目次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.1.1 アスファルト混合物.....	1
1.1.2 X線CT法.....	6
1.2 研究の目的	8
1.3 本論文の構成	8

第2章 既存のアスファルト混合物の評価手法

2.1 概説	13
2.2 アスファルト混合物の品質評価.....	14
2.2.1 管理と検査.....	14
2.2.2 品質評価のための試験方法.....	16
2.3 アスファルト舗装の耐久性評価.....	19
2.3.1 路面の評価.....	19
2.3.2 構造の評価.....	22
2.3.3 室内試験による評価.....	24
2.4 まとめ	25

第3章 X線CT

3.1 概説	28
3.2 X線CTの概要.....	28
3.2.1 X線の物理特性.....	28
3.2.2 X線CTスキャナ.....	32
3.2.3 X線CT画像.....	35
3.3 CT画像の解析	38
3.3.1 骨材輪郭抽出のための画像処理手法.....	38
3.3.2 セグメンテーション.....	43
3.3.3 粒子の追跡手法.....	46
3.4 X線CTの適用事例.....	48
3.4.1 土系材料	48
3.4.2 セメントコンクリート材料.....	49
3.4.3 アスファルト混合物.....	50
3.5 まとめ	51

第4章 X線CTを用いたアスファルト混合物の内部特性の評価

4.1 概説	60
4.2 撮影条件の検討.....	61
4.3 構成素材の内部特性の評価.....	65
4.3.1 構成素材の概要.....	65
4.3.2 構成素材のCT値特性評価.....	67
4.4 アスファルト混合物の内部特性の評価.....	73
4.4.1 アスファルト混合物の概要.....	73
4.4.2 アスファルト混合物のCT値特性指標.....	75
4.4.3 アスファルト混合物のCT値特性評価.....	78
4.4.4 X線CTのアスファルト混合物への適用可能性.....	94
4.5 まとめ	94

第5章 X線CTを用いたアスファルト混合物の品質評価手法

5.1 概説	98
5.2 試験概要	99
5.2.1 供試体の概要.....	99
5.2.2 撮影方法	101
5.2.3 全断面平均CT値及び密度の算出.....	101
5.2.4 基準供試体と現場供試体の内部特性の評価.....	103
5.2.5 断面数及び撮影位置の決定.....	103
5.3 基準供試体と現場供試体の物性評価.....	104
5.3.1 CT値の分布	104
5.3.2 基準供試体と現場供試体の内部特性.....	107
5.4 断面数及び撮影位置の決定.....	123
5.5 まとめ	127

第6章 X線CTを用いたアスファルト混合物の耐久性評価

6.1 概説	130
6.2 試験概要	131
6.2.1 供試体の概要.....	131
6.2.2 ホイールトラッキング試験.....	135
6.2.3 X線CT撮影.....	135
6.2.4 画像処理	137
6.2.5 DICの設定条件.....	137
6.2.6 DICによる変位場及びひずみ場の算出.....	139

6.3	試験結果	140
6.3.1	ホイールトラッキング試験結果.....	140
6.3.2	CT 画像	142
6.3.3	DIC による変位特性.....	154
6.3.4	DIC によるひずみ特性.....	163
6.4	まとめ	169
第 7 章	結論	173

謝辞

第1章 序論

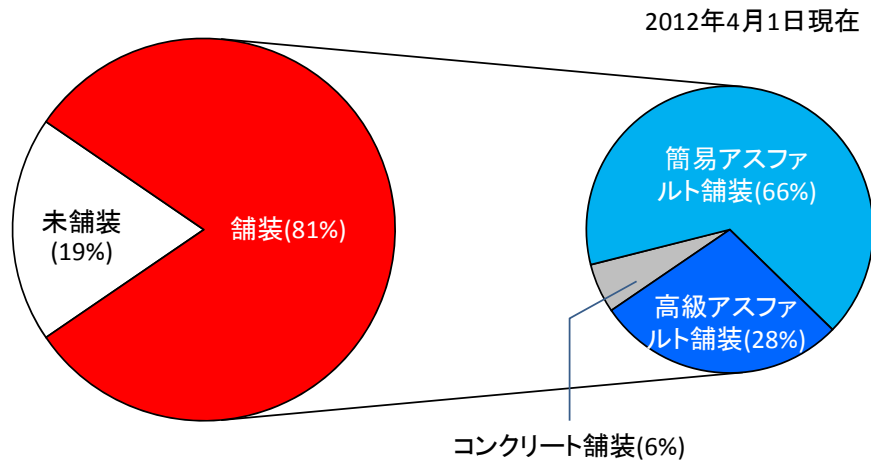
1.1 研究の背景

1.1.1 アスファルト混合物

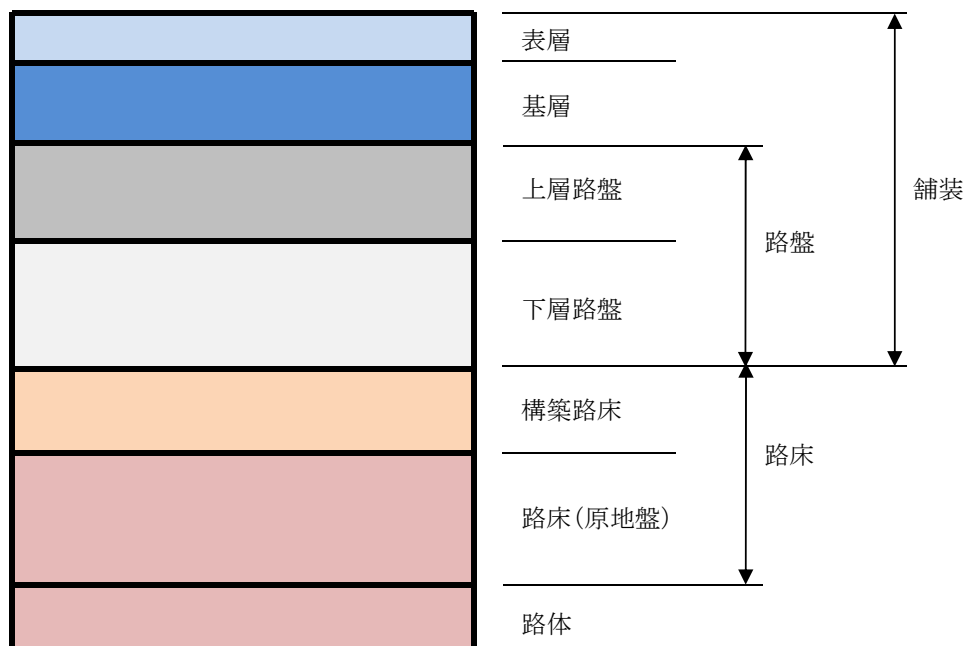
(1) アスファルト舗装の現況

道路は人や物を運ぶだけでなく、街区の形成、電気、水道、ガス、通信等のライフラインの収容といった機能を有する最も身近なインフラストラクチャーである¹⁾。その中で舗装は人や車両の安全かつ円滑な交通を図るとともに、沿道環境の保全に資するといった役割を担っている²⁾。

わが国においては、近代に至るまで車馬交通が発達しなかったこと、明治政府が鉄道の普及に力を入れていたこと、第二次世界大戦にあらゆる資材が戦争に投入されたことから、戦後直後の道路舗装の実情は悲惨なものであった³⁾。1950年の舗装率は国道、都道府県道合わせて4.6%に過ぎず、1956年5月に来日したワトキンス調査団の「日本の道路は信じがたいほど悪い。工業国にしてこれほど完全にその道路網を無視してきた国はほかにない」⁴⁾と言わしめたのも無理のないことであった。この劣悪な道路整備状況から脱却すべく、建設省は道路五箇年計画等により計画的かつ急速に道路整備が進めるとともに、1960年代以降、モータリゼーションによって自動車保有台数が急増したこともあいまって、2012年4月1日現在、全国で約120万km超の道路が整備され、図-1.1に示すとおり舗装率は80%を超えるに至った⁵⁾。また、舗装道路のうち、約28万km（約28%）が高級アスファルト系舗装、約65万km（約66%）が簡易舗装であり、簡易舗装を含めたアスファルト系舗装の割合は94%を占める。アスファルト系舗装が積極的に採用されてきた大きな理由として、「①安価なアスファルトの調達、②初期コストが安価、③養生が不要で早期交通開放が可能、④維持・修繕が容易等である⁶⁾」が挙げられる。その結果、我が国ではアスファルト舗装を用いることが主流となっており、アスファルト舗装の品質および耐久性の向上のための研究が今なお続けられている。



図－1.1 舗装率と舗装種別毎の内訳⁵⁾



図－1.2 アスファルト舗装各層の名称⁷⁾

(2) アスファルト混合物の種類と配合設計

アスファルト舗装は一般に図－1.2に示すように、表層、基層および路盤からなり、路床上に構築される^{7),8)}。表層は舗装の最上部にあつて、交通の安全性、快適性等、路面の機能を確保することにある。また基層は路盤の不陸を整正し、表層に加わる交通荷重を路盤に均等に分散させることにある。そのため、表層および基層には、通常、アスファルト混合物が用いられる⁹⁾。

アスファルト混合物は、砕石や砂利等といった粗骨材，天然砂や人工砂といった細骨材，石灰や石粉等のフィラー，アスファルトで構成される複合材料であり，その配合により表-1.1に示すような混合物の種類がある．細粒度アスファルト混合物，密粒度アスファルト混合物，粗粒度アスファルト混合物，開粒度アスファルト混合物，ポーラスアスファルト混合物の順に粗骨材の割合が多くなり，細骨材の割合が少なくなる．また，タイヤチェーン等による摩耗が問題になる積雪寒冷地域ではフィラーを多く使用している．アスファルト混合物の選定は，それぞれの混合物の耐流動性，耐摩耗性，すべり抵抗性，耐水性，耐ひび割れ，耐透水性といった特性や，一般地域，積雪寒冷地域等といった使用箇所によって決定される．

アスファルト混合物の配合設計は，アスファルト舗装の安定性，耐久性およびすべり抵抗性等を，また，敷きならし，締固めおよび表面仕上げ等の施工性を確保するために実施される^{7),8)}．配合設計の段階で骨材配合比が決定されるとともに，ポーラスアスファルト混合物を除くアスファルト混合物はマーシャル安定度試験，ポーラスアスファルト混合物のアスファルト量はダレ試験によってアスファルト量が決定される．

表-1.1 アスファルト混合物の種類^{7),8)}

使用層	一般地域	積雪寒冷地域
基層	粗粒度アスファルト混合物(20)	
表層	密粒度アスファルト混合物(20,13)	密粒度アスファルト混合物(20F,13F)
	細粒度アスファルト混合物(13)	細粒度ギャップアスファルト混合物(13F)
	密粒度ギャップアスファルト混合物(20,13)	細粒度アスファルト混合物(13F)
	開粒度アスファルト混合物(13)	密粒度ギャップアスファルト混合物(13F)
	ポーラスアスファルト混合物(20,13)	

[注1] ()内の数字は最大粒径を表し，最大粒径20mmのものは耐流動性，耐摩耗性およびすべり抵抗性等の品質に優れ，13mmのものは耐水性およびひび割れに対する抵抗性に優れる．

[注2] Fはフィラーを多く使用していることを示し，耐摩耗性に優れる一方，耐流動性に劣る傾向がある．

[注3] 粒度が不連続なものをギャップアスファルト混合物といい，耐摩耗性，すべり抵抗性を向上させるために用いられる．

[注4] ここでいう地域の区分は，タイヤチェーン等による摩耗が問題になる地域を積雪寒冷地域といい，その他の地域を一般地域という．

[注5] 開粒度アスファルト混合物(13)は，すべり止め舗装として車道および歩道の透水性舗装等に用いられる．

[注6] 細粒度アスファルト混合物は，密粒度アスファルトに比べ耐水性・耐ひび割れ性に優れる一方，耐流動性に劣るため，軽交通道路や歩道等に用いられる．

(3) アスファルト混合物の品質評価

舗装工事において、受注者はその完成物が設計図書の基準を満たすように施工管理（工程管理、出来型管理、品質管理、写真管理等）を行い⁸⁾、その成果の判定のために発注者が検査を行う⁷⁾。品質管理は受注者が実施するものであり、管理項目、管理頻度、管理の限界は検査基準、工事規模、施工能力等に応じて受注者が合理的に定める⁸⁾。一方、品質検査は仕様を再現しているかどうかによって施工直後の性能を確認するために行われる⁷⁾。

品質管理および品質検査に共通する表層・基層の評価項目は粒度、アスファルト量および締固め度である。これらの評価を総称して本論文では「品質評価」と呼ぶ。このうち、粒度、アスファルト量については配合設計どおりに混合物が再現されているかを評価するものである。『舗装設計施工指針』⁷⁾では、粒度、アスファルト量の標準的な検査方法として「アスファルト抽出試験方法」が示されている。しかし、アスファルト抽出試験方法には、抽出試験に多くの時間を要する、引火性、毒性を持つ溶剤の取り扱いに注意を要する¹⁰⁾、ならびにその後に実施されるふるい分け試験において細粒分を過小評価する等の問題が指摘されている¹¹⁾。

(4) アスファルト混合物の破損と路面の評価

路面に見られるアスファルト舗装の破損を表-1.2に示す⁷⁾。アスファルト混合物は粘弾性的な挙動を示し、特に温度や載荷時間によってその挙動は大きく異なる¹²⁾。これは、アスファルトが高温では粘性流体の、低温では弾性体の性質を持ち、その中間の一般的な温度界ではこれら両方を兼ね備えた性質を持つためである¹³⁾。この性質がアスファルト混合物の理論解析を複雑なものとしているとともに、アスファルト舗装に様々な種類の破損が生じる要因となっている¹⁴⁾。アスファルト舗装に見られる破損の例として、温度が高い夏ではアスファルト混合物が軟らかくなり、車輪の走行によってわだち掘れが発生する。逆に、寒冷地においては硬くなったアスファルト混合物が、急激な温度低下に追従できずに発生する温度ひび割れ¹²⁾や、融雪期に発生するポットホール¹⁵⁾が問題となっている。また、長期の供用に際しては、路盤以下の層の弱体化等による疲労ひび割れが発生する。さらに、1980年代にはアスファルト舗装表面から入る縦方向の線状ひび割れ、いわゆる「わだち割れ」等といった新たな破損形態も見られるようになった^{16),17)}。

表-1.2 路面に見られるアスファルト舗装の破損⁷⁾

破損の種類		主な原因等	原因と考えられる層	
			表層	基層以下
ひび割れ	亀甲状ひび割れ (主に走行軌跡部)	舗装厚さ不足，路床・路盤の支持力低下・沈下，計画以上の交通量の履歴	○	○
	亀甲状ひび割れ(走行軌跡部～舗装面全体)	混合物の劣化・老化	○	○
	線状ひび割れ (走行軌跡部縦方向)	混合物の劣化・老化	◎	○
	線状ひび割れ(横方向)	温度応力	○	○
	線状ひび割れ (ジョイント部)	転圧不良，接着不良	◎	○
	リフレクションクラック	コンクリート版，セメント安定処理の目地・ひび割れ		◎
	ヘアークラック	混合物の品質不良，転圧温度不適	◎	
	構造物周辺のひび割れ	地盤の不等沈下		◎
	橋面舗装のひび割れ	床版のたわみ	○	◎
わだち掘れ	わだち掘れ(沈下)	路盤・路床の沈下		◎
	わだち掘れ(塑性変形)	混合物の品質不良	◎	○
	わだち掘れ(摩耗)	タイヤチェーンの走行	◎	
平坦性の低下	平坦性	縦断方向の凹凸	◎	○
		コルゲーション，くぼみ，寄り	◎	
	段差	構造物周辺の段差		◎
浸透水量の低下	滞水，水はね	空隙づまり，空隙つぶれ	◎	
すべり抵抗値の低下	ポリッシング	混合物の品質不良(特に骨材)	◎	
	ブリージング(フラッシュユ)	混合物の品質不良(特にアスファルト)	◎	
騒音値の増加	騒音の増加	路面の荒れ，空隙づまり，空隙つぶれ	◎	
ポットホール	混合物の剥奪飛散	混合物の品質不良，転圧不足	○	○
その他	噴泥	ポンピング作用による路盤の浸食		◎

【注】◎：原因として特に可能性の大きいもの，○：原因として可能性のあるもの

路面の破損の評価方法として、路面を非破壊で調査するという観点から路面性状測定車によるひび割れ、わだち掘れおよび平坦性の測定、ならびにFWD (Falling Weight Deflectometer) による路面たわみ量からの構造評価等が実施されている¹⁸⁾。しかし、これらは舗装の表面のみの測定、あるいは舗装内部からの予測にすぎず、表層および基層の内部からの評価がなされていない^{19),20)}。舗装の破損のメカニズムを解明するためには、アスファルト混合物の表面のみならず、内部からの評価が必要である。一方で、アスファルト混合物の内部挙動を室内試験によって解明しようという試みがなされている²¹⁾が、これは主に供試体の側面に着目して評価したものである。

1.1.2 X線CT法

X線CT法^{22),23)}とは、被検体にX線を照射し、被検体透過前後のX線エネルギー減衰比から被検体内部のX線吸収率の空間分布を数値的に求め、これを画像化するという実用化された逆解析手法である^{24),25)}。X線吸収率が物体内部の密度にほぼ比例することから、X線CT法は物体内部の密度分布を画像化する技術であり、素材や空隙の位置の把握等、密度の違いを評価するうえでX線CT法は非常に有効な手段である^{26),27)}。

X線CTの「CT」はComputed Tomographyの頭文字で、コンピュータによる演算処理によって断層画像を取得する「手法」を指す²²⁾。また、「Tomogram」はCTによって得られた断層画像を、「CTスキャナ」は断層撮影を行うための装置をそれぞれ指す。なお、Tomographyという言葉は、地震波を調べるための「地震波トモグラフィ」、コンクリートの内部を超音波で調べる「超音波トモグラフィ」等といった形で、「内部の性状を調べる技術」としても用いられている。

医療用X線CTスキャナは、1972年にHounsfield氏(1919-2004)²⁸⁾によってEMIスキャナとして開発されて以降、技術の進展を繰り返し、頭部のみならず、肺組織、血管、気管支、腹部、骨盤等を高速で撮影し、高精度で鮮明な画像を得ることができることから、放射線臨床医学において不可欠な装置となっており、世界各地の病院に普及している²⁹⁾。

一方、160kV以上の高エネルギーX線管を有する産業用X線CTスキャナは、1982年12月に日本で初めて導入された^{30),31)}。以降、X線CTの用途は人体から材料へと広がり、近年では、金属、自動車、航空、電気・電子等に関わる材料や製品の非破壊検査等に使用されている。医療用X線CTスキャナは、一般に管電圧が120～140kVであり³²⁾、人体がベッドに横たわったままX線発生器および検出器が回転する機構であるのに対し、産業

用X線CTスキャナは、一般に医療用X線CTスキャナよりも電圧が高いX線管が使用され（熊本大学では最大300kV）、X線発生器および検出器が固定され、被検体を乗せたテーブルが回転する機構となっている。

土木分野においても数多くのX線CTの適用がなされている。地盤および岩盤工学の分野においては、国外では1980年代にSteudeら³³⁾によって、国内では1990年代に石油公団のHagiwaraら³⁴⁾によって始められた。また、1996年に熊本大学^{26),35)}、2003年に港湾空港技術研究所³⁶⁾、2007年に京都大学³⁷⁾等にX線CTが導入され、地盤材料の可視化や三軸圧縮試験による地盤材料の破壊メカニズムの解明³⁸⁾等、数多くの成果が発表されている。セメントコンクリートにおいてもX線CTを用いた材料構成定量化法の提案や²⁷⁾、セメントモルタルの破壊メカニズムの解明³⁹⁾、アルカリ骨材反応を起こしたセメントコンクリートの破損評価⁴⁰⁾等が行われている。さらに、橋梁や水門等に用いられる強化繊維プラスチック（FRP）⁴¹⁾の内部評価にもX線CTが用いられている。

X線CT法を用いたアスファルト舗装材料への適用は、米国で1988～92年に実施された新道路研究計画（Strategic Highway Research Program, SHRP）までさかのぼることができる⁴²⁾。新道路研究計画においては、医療用X線CTを用いてアスファルト混合物の円柱コアを撮影し、その断面撮影に成功している。近年では、アスファルト混合物の空隙、亀裂および透水性の分析^{43),44)}、骨材の形状把握⁴⁵⁾等の論文が国内外において発表されている。しかし、これらの研究ではX線CTの特性値であるCT値や密度の観点での研究はほとんど実施されていない。また、天明²⁷⁾がセメントコンクリートで実施した材料構成の定量化や、土系材料³⁵⁾で実施されているような破損メカニズムの解明までに踏み込んだ研究は行われていないのが現状である。

X線CT法によるアスファルト混合物の評価は、CT値や密度を用いて、骨材、アスファルトおよび空隙の情報を把握することによって、アスファルト混合物の配合設計の再現性評価を可能とし、品質評価の効率化に寄与するものと考えられる。また、アスファルト混合物はそのほとんどが骨材で構成されていることから、土系材料と同様、破損のメカニズム解明に寄与するものと考えられる。

本研究の中心的な役割を果たすX線CTスキャナは、熊本大学工学部X-Earthセンターが保有する東芝製の産業用X線CTスキャナであり、材料構成の定量的な評価および破壊メカニズムの解明が期待される。

1.2 研究の目的

X線CT法によるアスファルト混合物内部の評価は、材料構成の定量化や破損のメカニズムの解明に大きな意義があると考えられる。

本研究の目的は、X線CT法をアスファルト混合物の品質評価および破損評価へ適用することにある。このため、まず室内で作製されたアスファルト混合物の円柱供試体の試験を実施し、密度と相関の高いCT値によってアスファルト混合物の内部特性の評価を行う。次に、実現場で作製および採取されるアスファルト混合物の基準供試体および現場供試体を用いた試験を実施し、品質評価手法を提案するための検討を行う。最後に、直方体のホイールトラッキング試験用供試体を用いた試験を実施し、X線CTを用いた耐久性評価手法の検討を実施する。

1.3 本論文の構成

本論文は、本章第1節および第2節で述べたことを背景や目的として、X線CT法をアスファルト混合物に適用する基礎的研究についてまとめたものである。本論文の構成を図-1.3に示す。

第1章の序論では、本研究の背景および目的を示すとともに、本論文の構成について説明している。

第2章では、アスファルト混合物の品質評価および耐久性の評価に関する既存研究についてまとめている。

第3章では、X線CTについて概観するとともに、土木分野におけるX線CT法の適用事例についてまとめている。

第4章では、アスファルト混合物を構成する素材および混合物にX線CT法を適用し、素材および混合物の密度特性の評価を実施するとともに、材料構成の定量化方法を提案している。

第5章では、プラントにおいて作製された基準供試体および現場で採取された現場供試体にX線CT法を適用し、双方の密度特性の比較を行うとともに、品質評価へ適用する際の測定断面数について検討を行っている。

第6章では、ホイールトラッキング試験を実施したアスファルト混合物の挙動を把握

し、混合物の変位特性およびひずみ特性について分析を行っている。

最後に、第7章では各章において得られた成果を総括している。

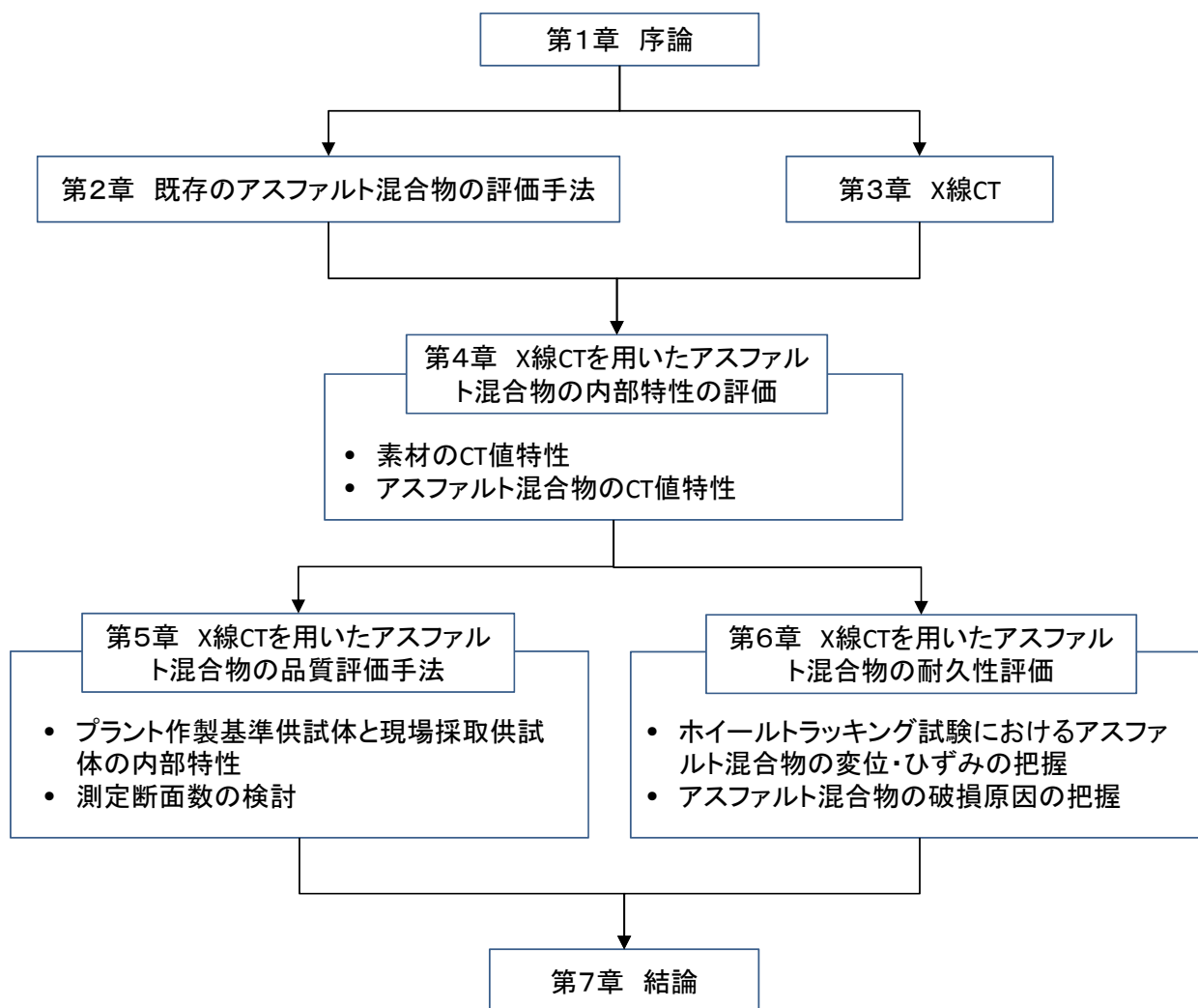


図-1.3 論文の構成

【参考文献】（第1章）

- 1) 武部健一：道のはなしII，技報堂出版，1992.
- 2) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用，2004.
- 3) 日本道路協会：日本道路協会50年史，1997.
- 4) ワトキンス調査団：日本国政府建設省に対する名古屋・神戸高速道路調査報告書，建設省道路局，1956.
- 5) 国土交通省道路局：道路統計年報（平成24年度），2013.
- 6) 多田宏行：語り継ぐ舗装技術—道路の設計・施工・保全—，鹿島出版会，2000.
- 7) 日本道路協会：舗装設計施工指針（平成18年版），2006.
- 8) 日本道路協会：舗装施工便覧（平成18年版），2006.
- 9) 土木学会：土木用語大辞典，技報堂出版，1999.
- 10) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2007.
- 11) 千野琢磨，秋葉正一，加納陽輔：亜臨界水を用いたアスファルト混合物の品質管理試験の検討，日本大学生産工学部第43回学術講演会，2010.
- 12) 土木学会：舗装工学の基礎，2012.
- 13) 土木学会：舗装工学，1995.
- 14) 松野三朗：アスファルト舗装の破損とパフォーマンス，2012.
- 15) 丸山記美雄，安倍隆二，熊谷政行：融雪期に発生する舗装のポットホールの実態と発生メカニズムの検討，寒地土木月報，No.730，pp.2-13，2014.
- 16) Molenaar A.A.A.: Fatigue and Reflection Cracking due to Traffic Loads, Proceeding of Association of Asphalt Paving Technologists, pp.440-474, 1984.
- 17) Matsuno S. and Nishizawa T.: Longitudinal Surface Cracking of Flexible Pavement, Proceedings of 2nd Paving in Cold Area, pp.779-796, 1984.
- 18) 日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック2013，2013.
- 19) Taniguchi S., Nishizaki I. and Moriyoshi A.: A study of Longitudinal Cracking in Asphalt Pavement using CT scanner, Road Materials and Pavement Design, vol. 9, issue 3, pp.549-558, 2008.
- 20) Taniguchi S., Nishizaki I. and Moriyoshi A.: Three Dimensional Diagnosis of Pavement Damage using CT scanner, Proceedings of the 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (Mairepav6),

2009.

- 21) 近藤崇, 森吉昭博, 吉田隆輝, 高橋正一: ホイールトラッキング試験におけるアスファルト混合物内部の骨材の移動特性, *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 46, (3), pp.172-180, 2003.
- 22) 岩井喜典: CTスキャナ, コロナ社, 1979.
- 23) Kak A.C. and Slaney M.: *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, Published under the sponsorship of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1987.
- 24) 久保司郎: 逆問題, 培風館, 1992.
- 25) 岡本良夫: 逆問題とその解き方, オーム社, 1993.
- 26) 椋木俊文: 地盤工学におけるX線CT法の適用に関する研究, 熊本大学大学院自然科学研究科博士論文, 2001.
- 27) 天明敏行: X線CT法のコンクリート診断への適用に関する基礎的研究, 熊本大学大学院自然科学研究科博士論文, 2009.
- 28) Hounsfield G.: *Computed Transverse Axial Scanning (Tomography) Part 1, Description of System*, *British Journal of Radiology*, Vol.46, No.552, pp.1016- 1022, 1973.
- 29) 平尾芳樹: 医療用X線CT技術の系統化調査報告, 技術の系統化調査報告書, Vol.12, pp.83-160, 2008.
- 30) 田口勇, 中村滋男: 鉄鋼用X線断層撮影装置の開発, 鉄と鋼, 第71巻第14号, pp.117-123, 1985.
- 31) 谷本慶哲, 富沢雅美, 西出明彦: 産業用X線CTスキャナの現状, 精密工学会誌, 第56巻第8号, pp.1386-1389, 1990.
- 32) 辻岡勝美, 井田義弘: X線CT検査の実際(1)ースキャンパラメータの設定ー, 日本放射線技術学会雑誌, 第58巻第11号, pp1456-1460, 2002.
- 33) Steude J.S., Hopkins F. and Anders J.E.: *Industrial X-ray Computed Tomography Applied to Soil Research*, Proceedings of a symposium sponsored by division S-1 and S-6 of the Soil Science Society of America, *Tomography of Soil-Water-Root Process*. SSA Special Publication on No.36, pp.29-42, 1994.
- 34) Hagiwara T. and Nanba T.: *Generation of proximity function for naturally fractured reservoir simulator using X-ray CT scanner system*, presented at the Eleventh Workshop for the IEA, Collaborative Project on EOR, Paris, 1990.

- 35) 大谷順：地盤工学における産業用X線CTスキャナーの適用，土と基礎，第48巻第2号，pp.17-20，2000.
- 36) 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.
- 37) Higo Y.: Study on Strain Localization of Multi-phase Granular Soils using Microfocus X-ray CT, The 1st International Workshop on X-ray CT Visualization for Socio-Cultural, Engineering & Environmental Materials, X-Earth (IWX) 2010, pp.49-53, 2010.
- 38) 大谷順，渡邊陽一，Lenoir N.：X線CTデータに基づく異なる拘束圧下での三軸圧縮下における砂のひずみの特性，土木学会第63会年次学術講演会講演概要集，3-208，2008.
- 39) Landis E.N.: X-ray Tomography as a Tool for Micromechanical Investigations of Cement and Mortar, 2nd International Workshop on X-Ray CT for Geomaterials (GeoX), 2006.
- 40) Griffa M., Münch B., Igarashi G., Leemann A., Mokso R., Jerjen I., Schuetz P. and Lura P.: Damage in cement-based materials by the Alkali-Aggregate reaction: Detection and Characterization by X-ray Tomographic Microscopy, Tomography of Materials and Structures, Posters, pp.317-320, 2013.
- 41) Frommknecht A., Effenberger I. and Verl A.: Using 3D Texture for Analysing Fibre Reinforced Plastic, Tomography of Materials and Structures, Posters, pp.155-158, 2013.
- 42) 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.
- 43) Masad E., Muhunthan B., Shashidhar N., and Harman T.: Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete using Image Analysis, Imaging Technologies in Civil Engineering, Vol.13, No.2, 1999.
- 44) Kutay M.E. and Aydilek A.H.: Accuracy of the two Common Semi-Analytical Equations in Predicting Asphalt Permeability, 2nd International Workshop on X-Ray CT for Geomaterials (GeoX), 2006.
- 45) You Z.P., Adhikari S. and Kutay M.E.: Dynamic modules simulation of the asphalt concrete using the X-ray computed tomography images, Materials and Structures, 2008.

第2章 既存のアスファルト混合物の評価手法

2.1 概説

図-2.1は舗装のライフサイクルを示す¹⁾。舗装の性能は図-2.1に示すとおり、供用に伴って低下するため、アスファルト舗装の建設時および供用時の評価は極めて重要となる。

アスファルト舗装の建設時の品質の評価は、品質管理および品質検査として実施され、締固め度、粒度、アスファルト量を評価することにより、所定の配合どおりに施工がなされているかが確認される。締固め度の評価は「アスファルト混合物の密度試験方法」により、粒度およびアスファルト量の評価は「アスファルト抽出試験方法」およびその後の「骨材のふるい分け試験方法」により行われる^{2),3)}。

一方、アスファルト舗装の供用時には破損の調査を実施し、その耐久性を評価することが重要である³⁾。舗装の破損の調査には「路面性状測定車」に代表される「路面調査」と「FWD (Falling Weight Deflectometer)によるたわみ量測定」に代表される「構造評価」がある^{3),4)}。また、以上の現場における調査とは別に、ホイールトラッキング試験等の室内試験によって破損の原因を究明しようという試みもなされている⁵⁾。

本章では、既存のアスファルト混合物の評価手法を概観し、問題点を抽出することを目的とする。第2節では、舗装の管理と検査の概念および品質評価手法についてまとめ、第3節ではアスファルト舗装の現場調査および室内試験についてまとめ、最後に第4節で本章を総括する。

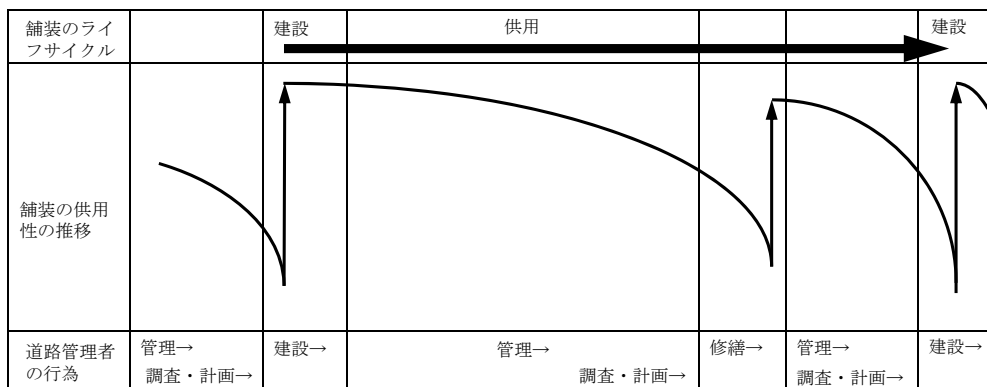


図-2.1 舗装のライフサイクル¹⁾

2.2 アスファルト混合物の品質評価

2.2.1 管理と検査

図-2.2は管理および検査の実施フローと実施主体を示す²⁾。舗装工事における管理は、一般に基準試験、出来形管理、品質管理からなる。

基準試験は、使用する材料や施工の方法が適正なものであるかどうかを確認するためのもので、通常、施工開始以前に行う。基準試験には材料の品質を確認する試験、基準密度のような基準値を得るための試験、ならびに作業標準を得るための試験施工等がある。基準試験は原則として受注者が実施し、その結果について発注者が確認・承諾を得る。表層、基層に用いる加熱アスファルト混合物は、事前に砕石の粒度、アスファルトの物理性状および混合物のマーシャル安定度等の規格試験および配合試験を実施し、品質が規格に適合していることを確かめることとなっている²⁾。

管理及び検査のフロー	主たる実施者	
	発注者	受注者
基準試験 <ul style="list-style-type: none"> 試験の実施 試験成績書 		○
↓		
基準試験結果の確認	○	
↓		
作業標準の作成		○
↓		
施工		○
↓		
出来形・品質管理 <ul style="list-style-type: none"> 試験・測定の実施 作業標準によるチェック 		○
↓		
検査	○	

図-2.2 管理および検査の実施フローと実施主体²⁾

品質管理は、所定の品質を確保するために受注者が行うものである。品質管理の項目、頻度および管理の限界は検査基準や過去の施工実績等を考慮して受注者が定める。『舗装施工便覧』²⁾には表-2.1に示すとおり、表層および基層に用いるアスファルト混合物の品質管理項目、頻度および管理限界の参考例が示されている。

舗装の施工直後には性能の確認を行わなければならないことが『舗装の構造に関する技術基準』⁶⁾に示されている。性能の確認方法には、性能指標の値の確認による方法と、性能が確認されている舗装の仕様を出来形・品質により確認する方法とがある。『舗装設計施工指針』¹⁾には、アスファルト混合物層の検査実施項目例が表-2.2のように示されている。

なお、本論文においては品質管理および品質検査双方を総称して「品質評価」と呼ぶこととする。

表-2.1 品質管理項目、頻度および管理限界の参考例²⁾

項目	工事規模別項目、実施の有無		実施する場合の頻度例	管理の限界例	試験方法
	中規模以上の工事	小規模の工事			
外観	○	○	随時		観察
温度	○	○	随時		温度計
粒度	○	△	印字記録：全数 または 抽出・ふるい分け試験 1～2回/日	印字記録の場合 骨材累積最終ピン計量値がその基準値の±6%以内であるとともに 2.36mm: $\pm 0.01 \times W_a \times (11.3 - 0.06S)$ 以内 75 μ m: 石粉量は $\pm 0.01 \times W \times F \times (0.30 - 0.013F)$ 以内 ふるいわけ試験の場合 2.36mm: ±12% 以内 75 μ m: ±5% 以内	舗装調査・試験法便覧
アスファルト量	○	△	印字記録：全数 または 抽出・ふるい分け試験 1～2回/日	印字記録の場合 骨材累積最終ピン計量値がその基準値の±6%以内であるとともに $\pm 0.01 \times W \times (0.95 - 0.06A)$ 以内 抽出試験の場合 ±0.9% 以内	
締固め度	○	△	1,000m ² に1回	基準密度の94%以上	

W_a: 1バッチの基準骨材計量値(kg), W: 1バッチの基準全計量値(kg),
S: (1バッチ当たりの2.36mm直近ホットピンまでの基準骨材計量値/W_a)×100(%),
F: 現場配合における石粉配合率(%), A: 現場配合におけるアスファルト配合率(%)

表-2.2 品質検査実施項目の例¹⁾

工種		項目	
基層・表層	アスファルト混合物層	締固め度	
		粒度	2.36mm
			75 μ m
		アスファルト量	

2.2.2 品質評価のための試験方法

(1) 締固め度（密度）

アスファルト舗装の表層および基層の締固め度は、基準密度に対する比を百分率で表したものである¹⁾。したがって、締固め度を算出するためには現場供試体とアスファルトプラント等室内で実施される基準試験による供試体の密度を比較する必要がある。

密度の測定には密粒度アスファルト混合物に代表される空隙の小さなアスファルト混合物等と、ポーラスアスファルト混合物に代表される空隙の大きなアスファルト混合物があり、それぞれの混合物で異なる試験方法が用いられている³⁾。

空隙の小さなアスファルト混合物等ではアルキメデスの原理を用いた測定法が利用される。すなわち越流装置のある容器が用いられる。試験の手順は以下のとおりである。

i) 乾燥供試体の空気中における質量測定

供試体を室温の空気になくとも1時間静置したのち、室温において乾燥状態の供試体の空気中における質量(A)を計る。

ii) 供試体の水中における重力質量測定

供試体を常温の水中に約1分間放置したのち、水中における重力質量(C)を測定する。

iii) 供試体の表乾質量測定

水中における質量を測定した供試体の表面の水分を柔らかい布等で手早くぬぐい、表乾質量(B)を測定する。

iv) 供試体密度の計算

供試体の表面がち密で吸水しない場合は見掛密度、供試体の表面はなめらかだが吸水する場合にはかさ密度を計算する。見掛密度(ρ_{ma})は式-2.1、かさ密度(ρ_{mb})は式-2.2で求められる。

$$\rho_{ma} = \frac{A}{A-C} \times \rho_w \quad (2.1)$$

$$\rho_{mb} = \frac{A}{B-C} \times \rho_w \quad (2.2)$$

ここに、

ρ_w : 常温の水の密度($\cong 1\text{g/cm}^3$)

空隙の大きなアスファルト混合物等ではノギスによる方法，真空パックによる方法およびパラフィン被覆による方法が示されている．真空パックおよびパラフィン被覆についてはアルキメデスの原理を利用している．ノギスによるかさ密度(ρ_{mc})の算出は式-2.3，真空パックまたはパラフィン被膜によるかさ密度(ρ_{md})は式-2.4で求められる．

$$\rho_{mc} = \frac{W}{A \times L} \quad (2.3)$$

ここに，

W ：供試体の質量(g)，

A ：供試体の断面積(cm²)

L ：供試体の平均厚さ(cm)

$$\rho_{md} = \frac{A}{B - C - \left(\frac{B - A}{D} \right)} \times \rho_w \quad (2.4)$$

ここに，

A ：供試体の空気中における質量(g)

B ：真空パックまたはパラフィン被覆した供試体の空気中における質量(g)

C ：真空パックまたはパラフィン被覆した供試体の水中における重力質量(g)

D ：試験袋またはパラフィンの密度(g/cm³)

ρ_w ：常温の水の密度(≒1g/cm³)

(2) アスファルト量

アスファルト量の品質評価は，通常，アスファルト抽出試験方法により行われる³⁾．アスファルト抽出試験方法には，a)減圧式ソックスレー抽出方法，b)自動遠心分離抽出法（写真-2.1），c)強制循環式自動抽出法，d)常圧式ソックスレー抽出方法がある．

アスファルト抽出試験によるアスファルト量の算定手順は次のとおりである．

- i) 抽出試験前の試料の質量(M_1)を計る．
- ii) 試料に水分が含まれている場合には「JIS K 2275: 1996 原油および石油製品－水分試験方法」⁷⁾に規定する水分装置により，水分量(M_2)を測定する．



写真-2.1 自動遠心分離抽出機（寒地土木研究所）

- iii) 抽出試験後の骨材質量(M_3)を計測する.
- iv) ソックスレー抽出法を用いた場合には、細粒骨材質量(ろ紙の質量増加分, M_4)を求める.
- v) 式-2.5によりアスファルト量(A_s)を求める.

$$A_s(\%) = \frac{(M_1 - M_2) - (M_3 + M_4)}{M_1 - M_2} \times 100 \quad (2.5)$$

混合物からアスファルトを抽出するためには、溶剤が必要となる。1990年代までは溶剤として三塩化エタン(1.1.1トリクロロエタン)が用いられていたが、1989年1月1日に発効された「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」により、1995年末をもって製造禁止となった。代替溶剤として『舗装調査・試験法便覧』³⁾には1-ブロモプロパン、d-リモネン、ナフテン系炭化水素、テトラリン、トルエンが示されているが、いずれにしても引火性、可燃性があり、また毒性が全くないとは言い難いため、関連法規を遵守するとともに、取り扱いにあたっては溶剤に対する教育や、明確な表示を徹底させる必要がある。

(3) 粒度

粒度は、抽出試験後に採取された骨材のふるい分け試験によって行われる。しかし、抽出試験後のふるい分け試験においては、細粒分が過小評価されるという問題が千野ら⁸⁾によって指摘されている。

2.3 アスファルト舗装の耐久性評価

2.3.1 路面の評価

舗装の路面の評価は、目視観察等を主体とした「目視調査」、ならびに調査試験機および器具等を用いて定量的に評価する「路面性状調査」がある⁴⁾。

目視調査では、目視観察や簡易な器具（スケール等）を用いて破損の状況を把握し、交通量や気象状況等の既存データを参考に、破損原因を推定または特定する。アスファルト舗装の目視調査の項目と調査内容を表-2.3に示す。

表-2.3 アスファルト舗装の目視調査の項目と調査内容⁴⁾

調査項目	調査内容
ひび割れ	○目視観察 ・ひび割れの発生状態 ・ひび割れの程度 ・ひび割れ幅 ・下面からの析出物の確認
わだち掘れ	○目視あるいはスケール測定 ・わだち掘れの程度 ・滞水や水はねの程度
段差，平坦性 (コルゲーション，くぼみ，寄り，プリスタリング)	○目視あるいはスケール測定 ・周囲との高さの違い ・下面からの析出物の確認 ○感覚評価 ・車両走行による騒音，振動
ポットホール	○目視あるいはスケール測定 ・ポットホールの面積や深さ ・周囲の状態（油漏れの有無，フィラーの滲出等）
ポリッシング，フラッシュ，ブリージング (すべり抵抗の低下)	○目視あるいはスケール測定 ・ポリッシング面積 ・滞水や水はねの程度 ○感覚評価 ・車両走行による騒音，振動，すべり
ポーラスアスファルト舗装の骨材飛散	○目視あるいはスケール測定 ・骨材飛散の面積や深さ ・滞水や水はねの程度 ○感覚評価 ・車両走行による騒音，振動
ポーラスアスファルト舗装の空隙づまり，空隙つぶれ	○目視 ・空隙の閉塞状態 ・滞水や水はねの程度 ○感覚評価 ・散水による水の浸透度合い
ポーラスアスファルト舗装における部分的な寄り (側方流動)	○目視あるいはスケール測定 ・わだち掘れの程度 ・滞水や水はねの程度
はく離	○目視あるいはスケール測定 ・舗装表面へのフィラー分の滲出の有無 ・部分的な沈下の面積や深さ
供用状態の把握	○交通量，気象条件，沿道状況，維持修繕履歴 等

路面性状調査は、舗装の路面の状態や破損の程度を数値化して把握するもので、調査試験機や器具等を用いて実施する⁴⁾。たとえば、わだち掘れについては横断プロフィールメータ（写真－2.2）を用いる方法等が、平たん性については3mプロフィールメータによる方法（写真－2.3）および国際ラフネス指数(IRI: International Roughness Index)⁹⁾の調査方法等が『舗装調査・試験法便覧』³⁾に示されている。またひび割れ、わだち掘れ、平たん性を容易、自動的かつ高速で測定する方法として路面性状測定車（図－2.3）が用いられる¹⁰⁾。現在、路面性状測定車は舗装管理システム^{11)~13)}の一部を構成しており、一般的には3~5年に1回の測定が行われ、路面のデータがデータベースに蓄積されている。路面の評価はこれらの単独指標、または式－2.6で示されるような維持管理指数(MCI: Maintenance Control Index)^{14),15)}等といった総合指標を用いて評価される。

$$MCI = \text{Min}(MCI_0, MCI_1, MCI_2, MCI_3) \quad (2.6)$$

ただし、

$$MCI_0 = 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2}$$

$$MCI_1 = 10 - 1.51C^{0.3} - 0.30D^{0.7}$$

$$MCI_2 = 10 - 2.23C^{0.3}$$

$$MCI_3 = 10 - 0.54D^{0.7}$$

ここに、

C : ひび割れ率(%)

D : わだち掘れ深さ(mm)

σ : 平たん性(mm)

しかし、これらの路面評価は路面の状態を測定することができるが、アスファルト混合物の内部まで評価できないという問題がある。



写真-2.2 横断プロフィールメータ



写真-2.3 3mプロフィールメータ

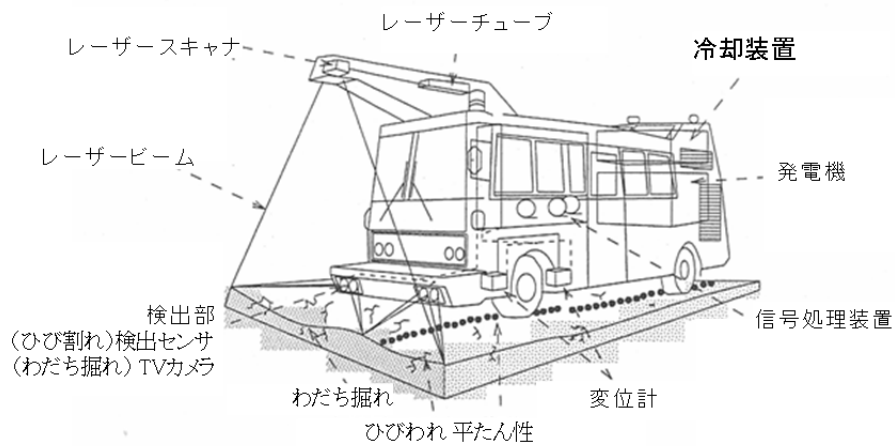


図-2.3 路面性状測定車の例⁹⁾

2.3.2 構造の評価

構造調査は路面性状だけでは破損の範囲を深さ方向に特定しにくい場合や沈下を伴ったひび割れやわだち掘れ等が発生し、支持力不足が考えられる場合等に行われる⁴⁾。構造調査はFWD（写真－2.5）^{16),17)}、コア採取、開削調査等により行われる。

FWDは道路・空港等の原位置における舗装構成層の各層の支持力特性の推定、舗装構造評価、コンクリート舗装の目地・ひび割れ部における荷重伝達特性等を評価するために用いられる。

図－2.4はFWD装置の模式図を示す³⁾。舗装構造が健全であるかどうかについては、FWDの衝撃荷重によるたわみ量によって評価される¹⁶⁾。FWDの測定データから構造評価する手法には、舗装表面のたわみ量から、多層弾性理論等の解析理論に基づいた逆解析によって舗装を構成する各層の弾性係数を推定する方法と、測定データのたわみから直接的に構造的な健全度を推定する方法がある。

逆解析の基本的な流れは以下のとおりである。

- i) 各層の弾性係数を仮定する
- ii) 順解析によるたわみを計算する
- iii) ii)で計算したたわみ量と測定したたわみ量を比較する
- iv) 両者の差が大きければ両者の差が小さくなるように弾性係数を修正し、小さければ各層の弾性係数を出力する

多層弾性理論に基づいた逆解析のプログラムは国内外で開発、研究されており、国内で公表されたものにはガウスニュートン法を用いたBALM (Back Analysis for Layer Moduli)¹⁸⁾、LMBS (Layer Moduli Back-calculation System)¹⁹⁾、拡張ベイズ法を用いた手法²⁰⁾、遺伝的アルゴリズムを用いた手法²¹⁾等がある。

一方で、FWDのたわみデータから直接的に構造評価する方法が提案されている²²⁾。この手法は載荷板直下のたわみ(D_0)、ならびに載荷板から200mmおよび1500mmの位置のたわみ(D_{200} , D_{1500})を用いたものであり、 D_0 と49kN換算輪数、 $D_0 - D_{200}$ とアスファルト混合物層厚にアスファルト混合物層の弾性係数を乗じた値、 $D_0 - D_{1500}$ と等値換算厚（舗装を構成する層の厚さが表層基層用加熱アスファルト混合物の何cmに相当するかを示す値）、 D_{1500} と路床の弾性係数が相関関係にあることを利用したものである。

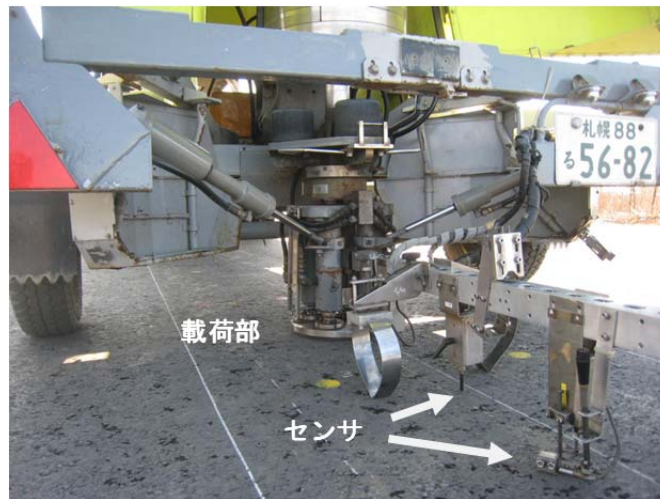


写真-2.5 FWD（寒地土木研究所・牽引式）

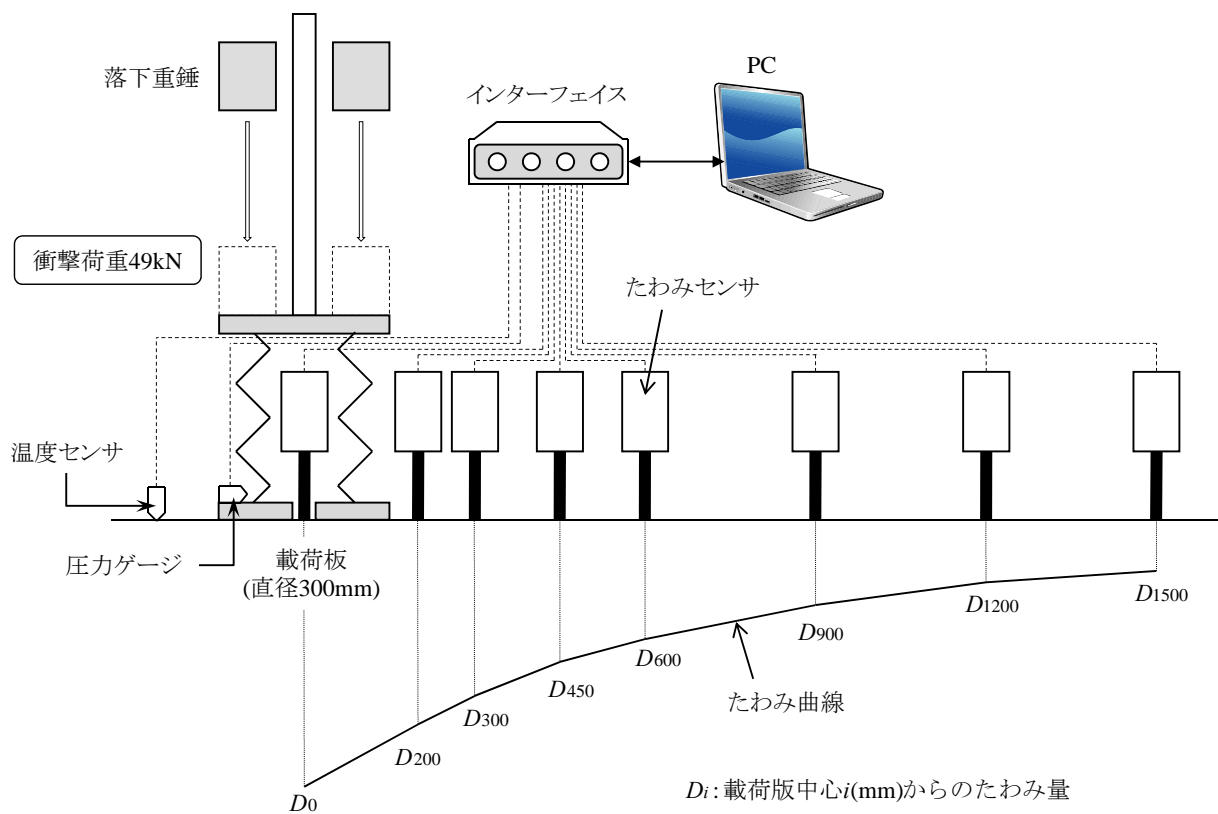


図-2.4 FWD装置の模式図³⁾

しかし、FWDによる構造評価はあくまでも路面のたわみ量から内部の状態を予測するものであり、精度的にも問題がある。

2.3.3 室内試験による評価

アスファルト混合物の破損原因を特定するため、アスファルト混合物の内部挙動を室内試験によって解明しようという試みが、近藤ら^{5),23),24)}およびAbd-Alla²⁵⁾らによってなされた。両者は図-2.5に示す装置により、密粒度アスファルト混合物(13F)およびポーラスアスファルト混合物のホイールトラッキング試験を実施し、35mmカメラにより供試体の撮影を行い、骨材の挙動を把握した。結果の概要を以下に示す。

- ・ 密粒度アスファルト混合物(13F)では荷重側方部分で隆起（上方向への動き）が発生するとともに、荷重直下の上部で圧密（下方向への動き）、中央部で圧密および流動（横方向の動き）が発生している一方、ポーラスアスファルト混合物で全体的に圧密が発生している⁵⁾。
- ・ アスファルト混合物大きなひずみの分布は、密粒度アスファルト混合物ではタイヤの両端より50～60mm程度、ポーラスアスファルト混合物ではタイヤ両端付近にある²³⁾。
- ・ 走行方向が異なると、表面の変形量に違いが生じるとともに、荷重載荷部および側方の骨材の動きに大きな違いが生じる²⁴⁾。
- ・ 4層構造のアスファルト混合物のホイールトラッキング試験を行った結果、荷重付近での混合物表面での流動や混合物の圧密現象が確認され、混合物内部の2mm以上のすべての骨材が垂直方向に移動し、高温で600回の車両通過だけで表層内部に局部的に40%以上の大きなひずみが生じた²⁵⁾。

しかしこれらの結果は、供試体の側面から撮影した結果である。

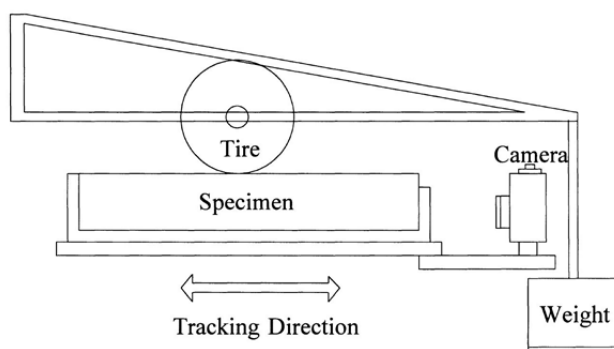


図-2.5 骨材挙動の把握のための装置⁵⁾

2.4 まとめ

本章では既存のアスファルト混合物の品質評価手法およびアスファルト舗装の耐久性評価手法について概観した。その結果、以下の知見が得られた。

- i) 密度試験、アスファルト抽出試験、ふるい分け試験という一連の品質評価手法は、多くの労力を要するとともに、抽出試験に使用する溶剤の取扱いが煩雑である。
- ii) 現場における耐久性評価手法は、舗装の表面のみの評価または表面から構造を予測しているにすぎない。
- iii) 既存のホイールトラッキング試験の骨材挙動の把握は、側面のみからの評価であり、供試体内部での骨材挙動の評価がなされていない。

これらの問題を解決するためには、アスファルト混合物の内部を測定できるX線CTの利用が期待される。

【参考文献】（第2章）

- 1) 日本道路協会：舗装設計施工指針（平成18年版），2006.
- 2) 日本道路協会：舗装施工便覧（平成18年版），2006.
- 3) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2007.
- 4) 日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック2013，2013.
- 5) 近藤崇，森吉昭博，吉田隆輝，高橋正一：ホイールトラッキング試験におけるアスファルト混合物内部の骨材の移動特性，*Journal of the Japan Petroleum Institute*, 46, (3), pp.172-180, 2003.
- 6) 日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説，2001.
- 7) 日本工業標準調査会：原油および石油製品－水分試験方法，日本工業規格 JIS K 2275，1996.
- 8) 千野琢磨，秋葉正一，加納陽輔：亜臨界水を用いたアスファルト混合物の品質管理試験の検討，日本大学生産工学部第43回学術講演会，pp107-108，2010.
- 9) 土木学会：路面のプロファイリング入門，2003.
- 10) 丹治和裕：路面性状の測定技術，アスファルト，Vol.41，No.108，pp.26-32，1999.
- 11) Taniguchi S., Yoshida T. and Xing J.: A Comparison of HDM-4 and MLIT-PMS, *Proceedings of the 2nd JAPAN-CHINA Workshop on Pavement Technologies*, pp.195-203, 2003.
- 12) 谷口聡，伊藤正秀，野村敏明，阿部忠行：舗装データベースを用いた供用性曲線作成手法に関する研究，舗装工学講演会講演論文集，Vol.8，pp.99-106，2003.
- 13) 谷口聡：舗装データベースを用いた路面性状予測手法の検討，舗装，Vol.46，No.7，pp.26-29，2003.
- 14) 建設省国道第一課，土木研究所：舗装の維持修繕の計画に関する調査研究，第34回建設省技術研究会道路部門指定課題論文集，pp.247-254，1980.
- 15) 谷口聡，池田拓哉，東嶋奈緒子：アスファルト舗装の修繕原因と修繕工法に関する研究，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，V-31，pp.62-63，1998.
- 16) 土木学会：FWDおよび小型FWD運用の手引き，2002.
- 17) 池田雄一，池田拓哉，谷口聡：FWDたわみの逆解析データと温度補正式の検討，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，V-196，pp.392-393，1999.
- 18) 黒林功，松井邦人，井上武美，董勤喜：静的逆解析によるアスファルト舗装の構

- 造評価診断システムの開発，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，V-45，2000.
- 19) 青木朋貴，姫野賢治，大谷智夫：多層弾性理論に基づいたWindows95/98上の順および逆解析プログラムの開発，第23回日本道路会議，日本道路協会，一般論文集，pp.494-495，1999.
- 20) 屠偉新，丸山暉彦，高橋修：拡張ベイズ法による舗装弾性係数の逆解析に関する基礎的研究，第1回舗装工学講演会講演論文集，pp.15-22，1996.
- 21) 亀山修一，姫野賢治，丸山暉彦，笠原篤：遺伝的アルゴリズムを用いた舗装体の弾性係数の逆解析，土木学会論文集，No.550/V-32，pp.195-204，1996.
- 22) 阿部長門，丸山暉彦，姫野賢治，林正則：たわみ評価指標に基づく舗装の構造評価，土木学会論文集，No.460/V-18，pp.41-48，1993.
- 23) 近藤崇，森吉昭博，吉田隆輝，高橋正一：高温時のホイールトラッキング試験によるアスファルト混合物内部に発生するひび割れ，*Journal of the Japan Petroleum Institute*, 47, (2), pp.90-99, 2004.
- 24) 近藤崇，森吉昭博，吉田隆輝，高橋正一：載荷条件の異なるホイールトラッキング試験におけるアスファルト混合物の変形特性，*Journal of the Japan Petroleum Institute*, 48, (5), pp.260-271, 2005.
- 25) Abd-Alla E.M., Moriyoshi A., Partl M.N., Takahashi K., Kondo T. and Tomoto T.: New Wheel Tracking Test to Analyze Movements of Aggregates in Multi-layered Asphalt Specimens, *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 49, (5), pp.274-279, 2006.

第3章 X線CT

3.1 概説

X線CT(Computed Tomography)は、被検体の密度を三次元的に可視化し、定量的に評価する手法である¹⁾。1972年にHounsfield²⁾によって発表された医療用X線CTスキャナは、世界の臨床医学において革命的变化をもたらした。その後、医療用X線CTは検査時間を短縮し、患者の負担を軽減するための改良が進められ、医学分野で幅広く用いられるようになった。

現在、X線CTは医療用のみならず、鉄鋼³⁾、自動車⁴⁾、航空宇宙⁵⁾等に関わる材料や製品の非破壊検査等での実績がある。土木分野においても、土系材料、セメントコンクリート等に用いられており、GeoX(International Workshop on X-ray CT for Geomaterials)^{6)~8)}、ICTMS(International Conference on Tomography of Materials and Structures)⁹⁾等の国際会議において数多くの研究成果が発表されている。

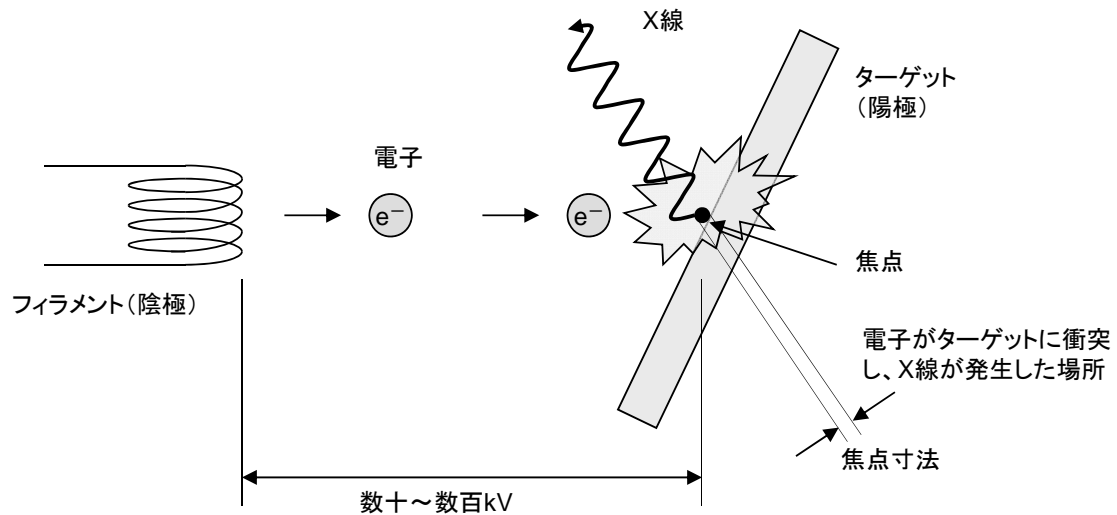
本章の目的はX線CTの基本およびCT画像の処理手法を説明するとともに、土木材料に対するこれまでのX線CTの研究について概観することにある。第2節ではX線およびX線CTの概要について説明し、第3節で土系材料、セメントコンクリート、アスファルト混合物に係るX線CTの適用事例をとりまとめたうえで、第4節で本章のまとめを行う。

3.2 X線CTの概要

3.2.1 X線の物理特性

(1) X線の発生^{1),10)~12)}

X線発生の原理を図-3.1に示す。ターゲット側を陽極、フィラメント側を陰極として、数十～数百kVの高電圧をかける。この電圧は「X線エネルギー」と呼ばれ、X線管内で発生するものについては「X線管電圧」と呼ばれている。フィラメントから飛び出した熱電子が、陽極に向かって加速し、ターゲットに衝突する。この衝突時にX線が放射される。



図－3.1 X線発生 の原理

X線はターゲット面の電子が衝突する部分から発生し、この部分は「焦点」と呼ばれる。産業用X線CTスキャナにおいては、ミニフォーカス型およびマイクロフォーカス型と呼ばれているものが製造されているが、これは焦点寸法の大きさによって区別される。焦点の幅を「焦点寸法」と呼ぶ。医療用X線CTスキャナの焦点寸法は0.7～1.7mm程度である。産業用X線CTの焦点寸法は、100 μ m以上のものはミニフォーカス型、10 μ m以下のものはマイクロフォーカス型と呼ばれている⁴⁾。

一般に、電子が衝突する際に発生するエネルギーのほとんどは熱であり、X線エネルギーはわずかである。そのため、X線発生装置には熱冷却装置が必要となっている。

(2) X線の減衰

a) 一方向におけるX線の減衰¹³⁾

一方向におけるX線減衰と出力画像の概念を図－3.2に示す。X線は供試体を通過する際に強度が減衰し、供試体通過前後のX線減衰の関係は式－3.1で表される。

$$I = I_0 \exp(-\mu W) \quad (3.1)$$

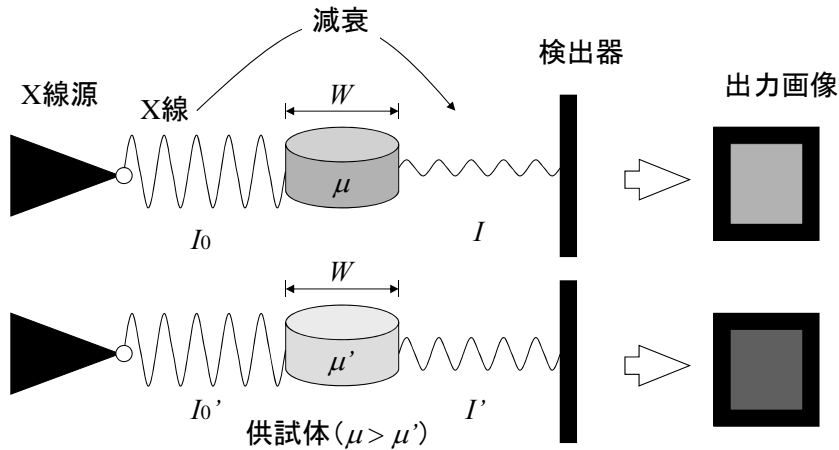
ここに、

I_0 : 供試体通過前のX線強度

I : 減衰したX線の強度

W : X線の供試体透過長

μ : X線吸収係数、



I_0, I_0' : 供試体通過前のX線強度 ($I_0 = I_0'$)
 I, I' : 供試体通過後のX線強度
 W : X線の供試体透過長
 μ, μ' : 供試体のX線吸収係数 ($\mu > \mu'$)

図-3.2 X線減衰の原理

一般に、物質に対するX線吸収係数は他の物質の密度にほぼ比例するとされている。そのため、式-3.1は供試体の密度が大きいほど、供試体透過長が長いほどX線強度の減衰が大きくなり、供試体の密度が小さいほど、供試体透過長が短いほどX線強度の減衰は小さくなることを示している。

出力画像は、図-3.2に示すように検出器によって得られたX線強度をグレイスケール（白黒濃淡の256階調）で表示される。一般に、通常のX線撮影画像は、供試体透過長が同じとした場合、X線吸収係数が大きい部分は白っぽく、X線吸収係数が小さい部分は黒っぽく表示される。

b) 二次元におけるX線の減衰と画像再構成^{14),15)}

次に図-3.3のように空間的に一様でない線吸収係数分布をもつ物体（アスファルト混合物）を考え、照射するX線として平行なビーム群を考える。また、絶対座標系を (x, y) 、 y 軸とX線との伝播方向のなす角を θ とし、角度 θ における空間座標系を (s, t, θ) とする。このとき、位置 s で検出されるX線強度および投影関数は式-3.2で表される。

$$p(s, \theta) = \log \left(\frac{I_0}{I(s)} \right) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu(x, y) dt \quad (3.2)$$

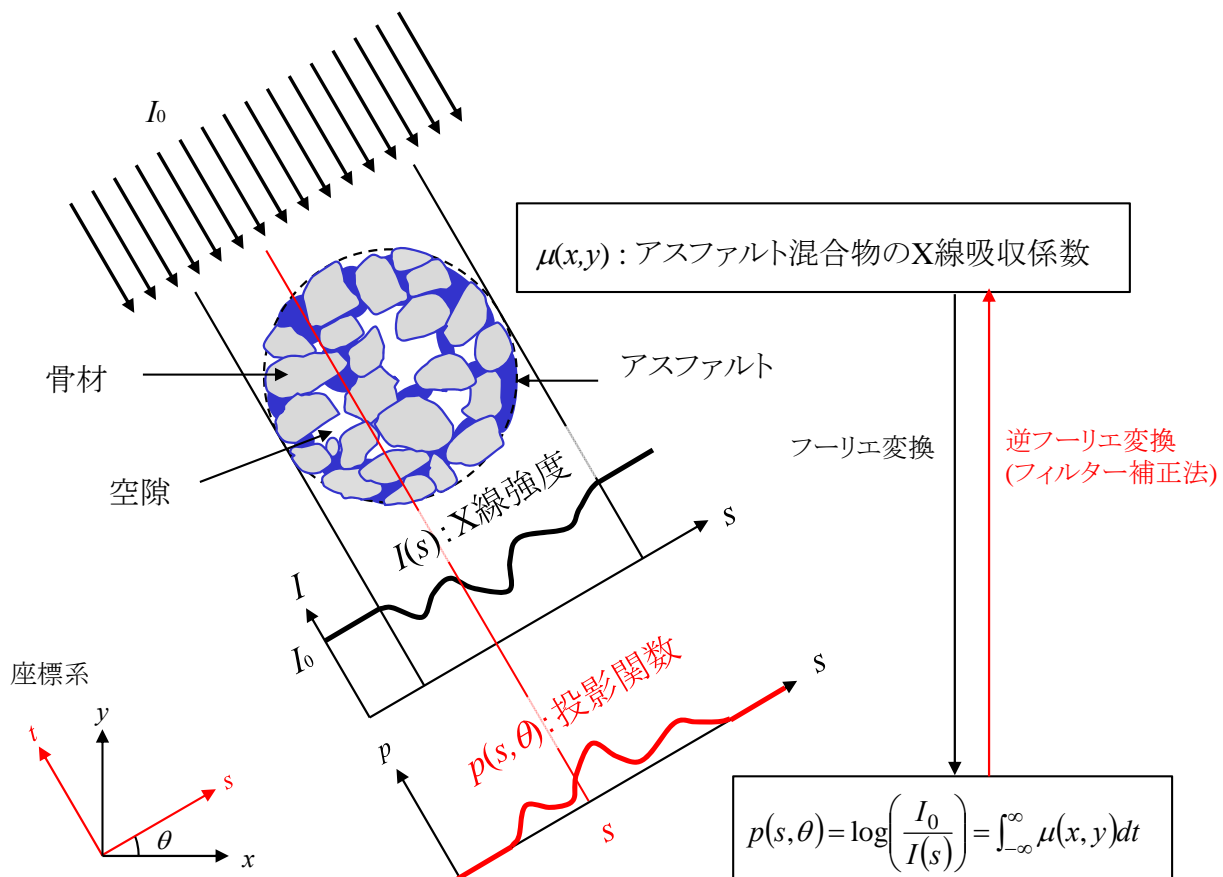


図-3.3 一様でない吸収分布を持つ物体に対する投影¹⁴⁾

ここに,

$p(s, \theta)$: 投影関数

$I(s)$: 位置 s におけるX線強度

$\mu(x, y)$: 位置 (x, y) における供試体のX線吸収係数

なお、式-3.2はラドン変換¹⁶⁾と呼ばれ、X線の伝播方向に沿って得られるX線吸収係数を総和し、それを s 軸上に投影していることを意味する。X線CT法においては、さまざまな角度(θ)および位置(s)からX線を照射し、投影関数 $p(s, \theta)$ を求め、逆フーリエ変換によって供試体X線吸収係数の分布 $\mu(x, y)$ を求めている。

(3) CT値

CT値(CT_v)とは、体内組織のX線吸収係数の値を水および空気を基準として表現したものである。これは材料についても同様であり、CT値とX線吸収係数の関係は式-3.3を用いて表すことができる¹⁵⁾。

$$CT_v = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} \times \kappa \quad (3.3)$$

ここに

μ_t : 材料のX線吸収係数

μ_w : 水のX線吸収係数

κ : 比例定数

空気のX線吸収係数は0とみなせることから、空気のCT値は $-\kappa$ となる。また、X線吸収係数は密度にほぼ比例し、 μ_t/μ_w は比重とみなすことができる。そのためCT値は密度と線形関係にあることから、材料の構成や劣化を評価する場合において非常に重要なファクターとなる。また、 $\kappa=1000$ とした場合にはHounsfield Unit(HU)とも呼ばれ^{1),12)}、医療分野においては通常 $\kappa=1000$ が用いられているとともに、熊本大学のCTスキャナにおいても採用されている値である¹⁵⁾。

3.2.2 X線CTスキャナ

(1) X線CTの開発経緯¹⁾

1895年10月にRöntgen(1845-1923)によってX線が発見され¹⁰⁾、その約20年後の1914年にX線管球のみを動かすことによって断層像を得るアイデアがMayerによって発表された。また、X線CTの基本原理は1917年にRadonによって発表された¹⁶⁾。しかし、計算量が莫大となるため、実用化されるためにはコンピュータの普及を待たなければならなかった。

わが国においても、終戦直後の1946年から高橋信次(1912-1985)が「人体の輪切り像」を得るため、被験者の回りを廻りながら撮影する「X線廻転撮影法」に関する実験研究を開始し、1957年に"Rotation Tomography"¹⁷⁾として研究成果が発表された。この研究成果は"TAKAHASHI TOMOGRAPHY"と名付けられ、手作業で画像再構成を行っていることからComputed Tomographyではないものの、世界で最初の人体断層撮影装置として、またCTの前身として位置づけられている。

1963～64年にかけて、米国の物理学者Cormack(1924-1998)^{18),19)}により、X線の投影データから画像を再構成する数学的手法と簡単なファントム（密度が既知であるX線CT撮影用の標本）に応用した研究成果が発表された。これらの研究成果はCT技術の礎となった。

また、1972年、英国EMI社の技術者Hounsfield(1919-2004)によってX線CTが開発され、臨床試験を担当したAtkinson Morley病院（ロンドン）の医師Ambrose(1923-2006)との両名によって、X線CTに関する初めての報告が英国放射線学会の概要として発表された。また、翌年には頭部用X線CTについてHounsfield²⁾が、臨床試験の結果についてAmbrose²⁰⁾がそれぞれ英国放射線学会に論文を発表している。

これらの功績により、Cormack とHounsfieldは、1979年のノーベル生理学医学賞を受賞している。

わが国においても、1975年にEMI社のX線CTが国内1号機として東京女子医科大学に導入され²¹⁾、同年10月には国産X線CTの1号機が名古屋保健衛生大学（現・藤田保健衛生大学）に導入された²²⁾。

1982年、日本初の産業用X線CTスキャナが開発された^{3),23)}。産業用X線CTスキャナは、通常、医療用X線CT（通常120～140kV）²⁴⁾に比べ非常に高いエネルギーを持っている。土木分野においては、1996年に熊本大学にミニフォーカス型の産業用X線CTスキャナ¹⁵⁾が導入され、土系材料、セメントコンクリート材料についての実績がある。

また、1980年頃から空間分解能の高いマイクロフォーカス型X線CTスキャナが始まり、2003年に港湾空港技術研究所²⁵⁾、2007年に京都大学²⁶⁾、2009年に近畿大学、2010年に熊本大学、ならびに2013年に土木研究所等にそれぞれ導入されている。

(2) 熊本大学における産業用X線CTスキャナ^{27)~29)}

本研究で使用した産業用X線CTスキャナ（東芝製TOSCANER-23200）は熊本大学X-Earthセンター所有の装置で、1996年に導入された。スキャナ全体の概略図を図-3.4に、装置の仕様を表-3.1に示す。本装置はデータ収集において試料台が往復並進運動および回転を伴うTR(Traverse/Rotation)方式を採用している。X線管と検出器は固定されており、その間を試料台が往復並進および回転を行い、180°、360°または720°回転させて投影データを蓄積する。

X線発生起電力は、本装置では150kV、200kV、300kVに変換することが可能である。また、X線管にはコリメータ（タングステン製のスリット）が設けられており、これによって、30°の照射角を持つファンビームが照射される。なお、本装置では0.3mm、0.5mm、1.0mm、2.0mm、4.0mmの5種類の照射厚の設定が可能である。

X線の照射中に、試料台は1100mmのストロークで往復並進移動する。試料台が並進移動して端点に達すると、試料台は30°回転し、引き続き並進移動する。これにより、

新たな方向からX線が照射され、新たな投影情報が蓄積されることになる。

検出器としてはCCDカメラが用いられ、176チャンネルの検出器によりその減衰が計測される。データ加算角度が180°の場合、6方向から情報を得ることになるため、1断面の画像を再構成するのに1056個（176×6）の投影情報を得ていることになる。176個の各検出器はX線源を焦点とするような方向を向いて設置されている。散乱X線を取り除きダイレクトX線のみを検出するため、検出器側にもコリメータが設置されている。より精度の高い非破壊検査をする場合は、線対称処理をせずに180°回転を360°回転、あるいは720°回転することによってデータ数を増やすことができる。

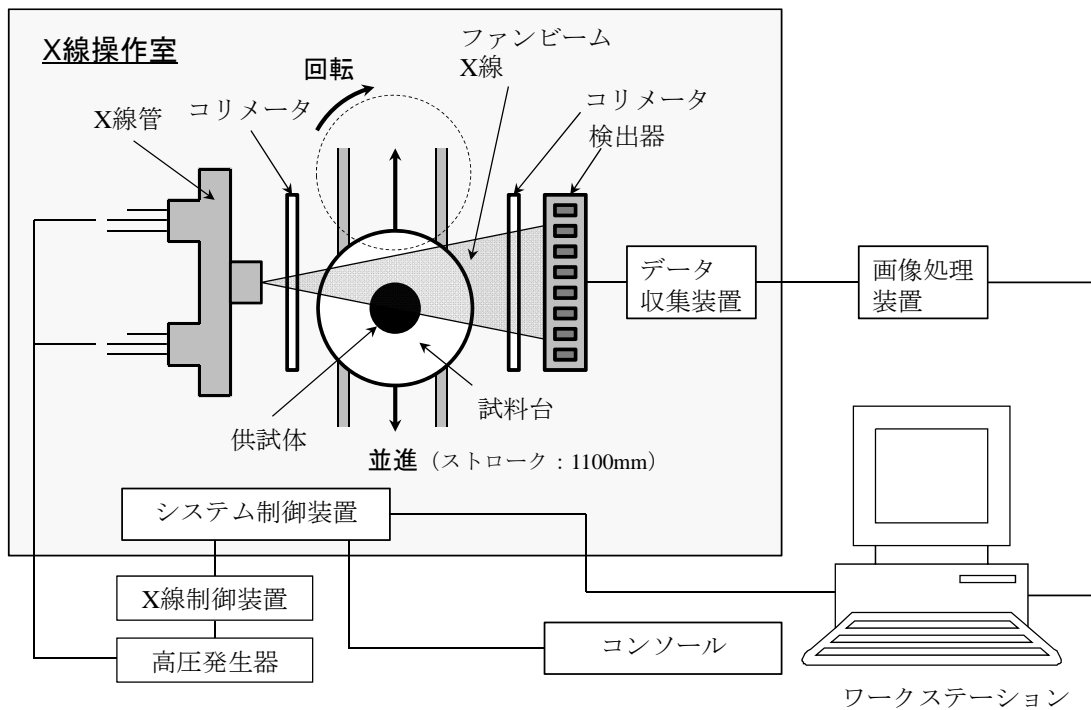


図-3.4 産業用X線CTスキャナ概要図²⁵⁾

表-3.1 産業用X線CTスキャナの仕様²⁷⁾

X線管電圧	150kV, 200kV, 300kV
管電流	4mA, 3mA, 2mA
X線照射厚	0.3mm, 0.5mm, 1mm, 2mm, 4mm
データ加算数	180°, 360°, 720°
撮影ピッチ	0.1mmの整数倍
時間分解能	180°: 2.5分, 360°: 5分, 720°: 10分
撮影領域 (直径, 高さ)	直径400mm, 高さ700mmまで
画像再構成マトリクス数	2,048×2,048
最小画像サイズ	73μm (φ=150mmの場合)
最大積載質量	100kg
X線検出器	CCDカメラ

3.2.3 X線CT画像

(1) ピクセルとボクセル

図-3.5はピクセル (pixel) とボクセル (Voxel) の概念を示す。二次元画像ファイルの画素はピクセルと呼ばれ、デジタルカメラを選定する際の重要な要素となっている。一方、ボクセルはピクセルを立体化した三次元の画素である。したがって、供試体は非常に小さなボクセルによって構成されているとみなすことができる。

また、ボクセルはピクセルと同様、明度、彩度および色相といった色の情報、ならびにCT値の情報を持っている。図-3.6に示すように、X線には厚みがあるため、ある厚みを持った供試体のスライスについてX線吸収量の分布を求めることができる²³⁾。

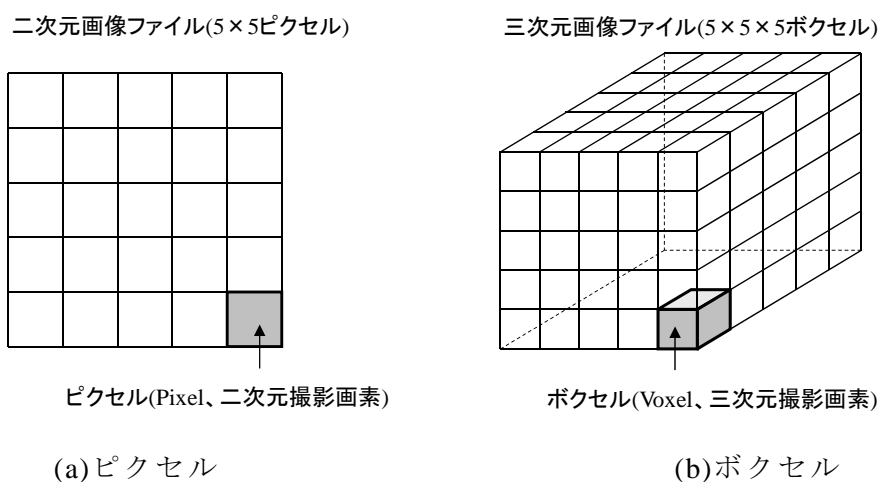


図-3.5 ピクセルとボクセルの概念

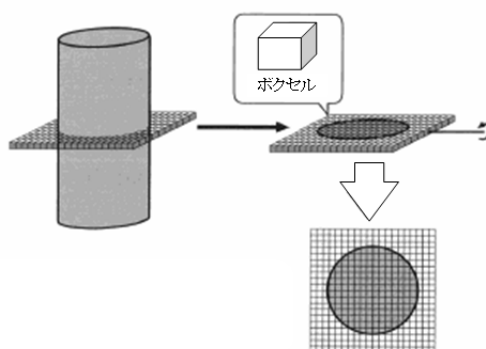


図-3.6 供試体照射におけるボクセルの概念²³⁾

(2) CT値からの画像取得

X線CT画像は、ボクセルが持つCT値等といった情報から通常256階調のグレイスケールとして変換され、画像化される。CT画像では、通常、CT値が高い（被検体内において密度が大きい）領域は白色に、CT値が低い（被検体内において密度が小さい）領域は黒色に表示される²⁸⁾。

X線CT画像は、被検体断面が持つCT値を表示するために、一般にWL（Window Level：CT値の表示範囲の中心）とWW（Window Width：CT値の表示範囲の大きさ）と呼ばれる値を最適な値に設定する画像処理を施さなければならない²⁷⁾。WLやWWの取り方によって、出力画像の色合いが変化する。そのため、WLやWWの設定には「X線CT画像から何を評価するのか」を定め、それに応じた値を設定する必要がある。

(3) アーティファクト

X線スキャナの線源としてX線管を使用すると、一般に連続X線が発生し、単波長しかもたない単色X線とは異なった特性を有する。そのため、この異なる特性による影響を考慮する必要がある。実際に被検体透過後のX線強度を検知して、被検体断層内のX線吸収係数を求めようとする場合、X線CT法では被検体断層面の透過厚によるX線スペクトルの変化がX線CT画像に悪影響を及ぼすことが知られている。これは、低いエネルギーのX線ほど吸収されやすいため、透過する被検体の厚さが増加するにつれてX線が高いエネルギーの波動に変化するために起きる。このことを物理学では「X線が硬くなる」と表現し、特に「X線ビームハードニング現象」（図-3.7）と呼ばれる。また、X線ビームハードニング現象の影響を受けることによって、CT値分布が鍋底型になるカップング効果、ならびにデータの異常および再構成計算途中のエラーによるアーティファクト（擬像）が発生する^{1),10),27),30)}。

カップング効果は管電圧が小さい場合、あるいは供試体の寸法が大きく、密度が高い場合にX線が十分に透過されずに、X線CT画像の供試体周囲が白っぽくなる現象である。椋木²⁷⁾がセメントモルタルで実証実験を行った結果を図-3.8に示す。したがって、X線を十分通すような管電圧の選択が重要となる。

アーティファクトと呼ばれる疑似画像は、X線CTのデータに異常が発生した場合または再構成計算の途中で誤差が生じた場合に発生する¹⁾。この現象は丸い供試体ほど発生しにくく、角張った供試体ほど発生しやすい²⁸⁾。ここで、アスファルト混合物のホイールトラッキング用供試体A(300×300×50mm)および供試体Aから両端7.5cmを切り

取った供試体B(150×300×50mm)に熊本大学のX線CT試験機（管電圧300kV）を用いて撮影した結果を図-3.9に示す。供試体Aはほとんどがアーティファクトに覆われて白色化しているのに対し、供試体Bはアーティファクトを大幅に軽減することができ、骨材の形状が鮮明に写し出されていることがわかる。

したがって、これらの問題を避けるためには、供試体の大きさおよび形状に留意し、CT値分布形状が鍋底型を示さないような撮影条件を採用する必要がある。

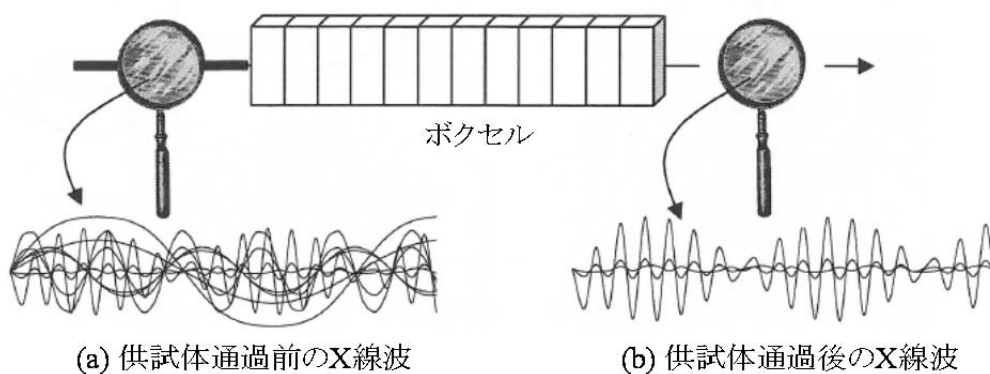


図-3.7 ビームハードニング現象²⁷⁾

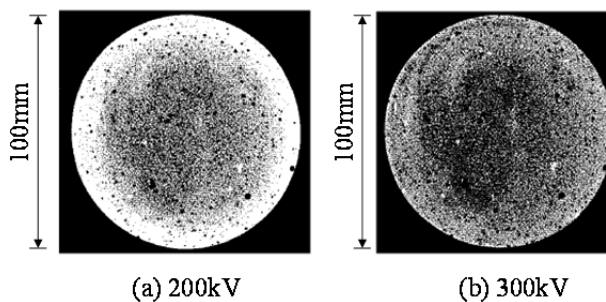


図-3.8 カッピング効果²⁸⁾

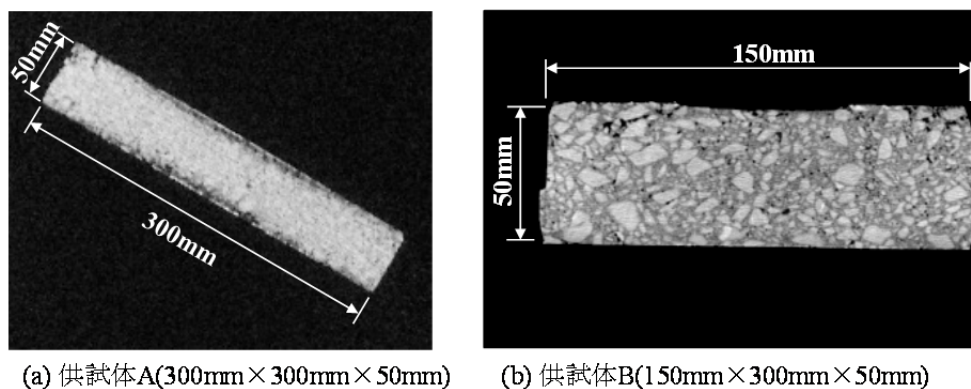


図-3.9 供試体サイズの違いによるアーティファクトの有無

3.3 CT画像の解析

3.3.1 骨材輪郭抽出のための画像処理手法

近年、セメントコンクリートやアスファルト混合物の画像から、骨材の輪郭を抽出する様々な手法が提案されている。Sefidmazgi³¹⁾はアスファルト混合物の骨材輪郭抽出のため、メディアンフィルタ、Hmax変換を用い、アスファルト混合物の画像解析ソフト"iPas"(Image processing and analysis system)を作成している。また、天明²⁸⁾はセメントコンクリートのオブジェクトの輪郭を算出するエッジ処理について述べている。以下、これらで用いられているメディアンフィルタ、Hmax変換、ならびにエッジ処理について述べる。

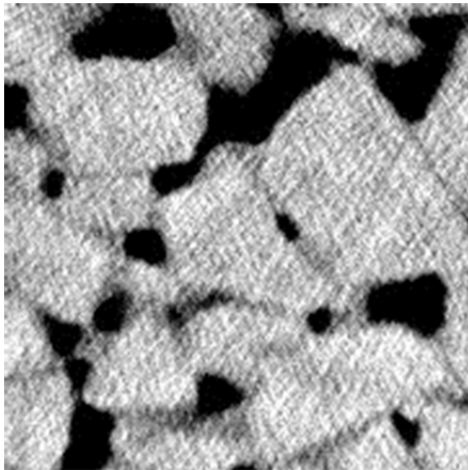
(1) メディアンフィルタ

X線検出器等からデジタル変換された画像には、通常、様々なノイズが含まれている。こうした画像から本来の画像を抽出するためには、ノイズをあらかじめできる限り取り除くことが必要である。このための画像処理法が平滑化である³²⁾。

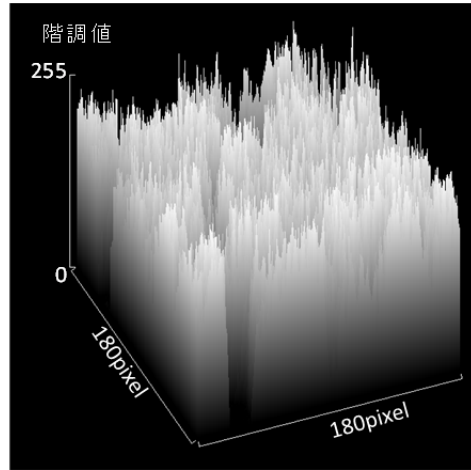
メディアンフィルタは、エッジ、線等画像の重要な情報を損なうことなく平滑化する手法の一つであり、局所領域でのメディアン（中央値）を出力するものである。

メディアンフィルタの結果を図-3.10に示す。なお、図-3.10の原画像はアスファルト混合物のCT画像であり、薄い灰色の部分が粗骨材、濃い灰色の部分がマスチック（細骨材+アスファルト）、黒い部分が空隙を表す。図-3.10(1)のa)は、ポーラスアスファルト混合物のCT画像の一部を切り取ったものであり、ノイズが含まれた画像である。この画像に"iPas"の'Median Filter Size'を5および9に設定してメディアンフィルタを施した画像はそれぞれ図-3.10(1)のb)およびc)に示される。また、それぞれの画像について"ImageJ"の'Surface Plot'機能を用いて階調値分布を表示したものを図-3.10(2)に示す。

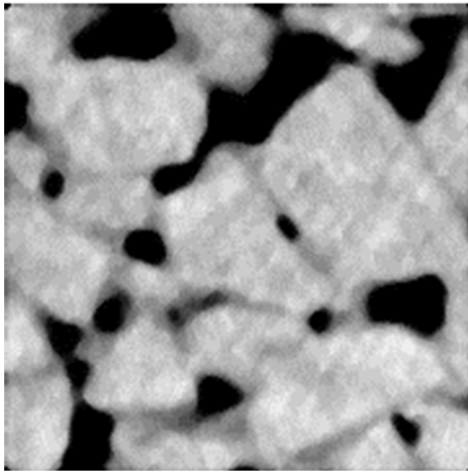
CT画像を見た場合には、Median Filter Sizeの値が小さい場合には画像がぼけにくくなる反面、ノイズが残りやすくなる。一方、Median Filter Sizeの値が大きい場合には、画像のノイズが残りにくい反面、ぼけやすくなる。階調値分布を見た場合には、Median Filter Sizeの値が小さい場合には針のように先鋭化する。一方、Median Filter Sizeの値が大きい場合にはなだらかな曲面となる。



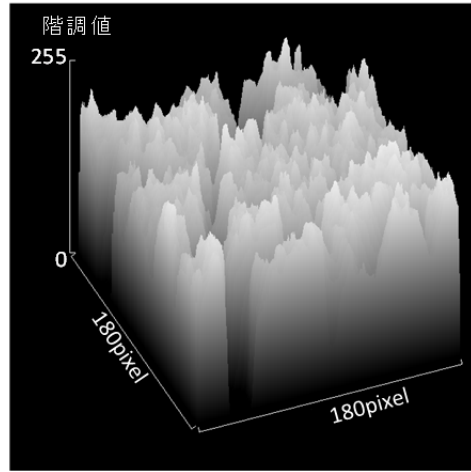
a) 原画像



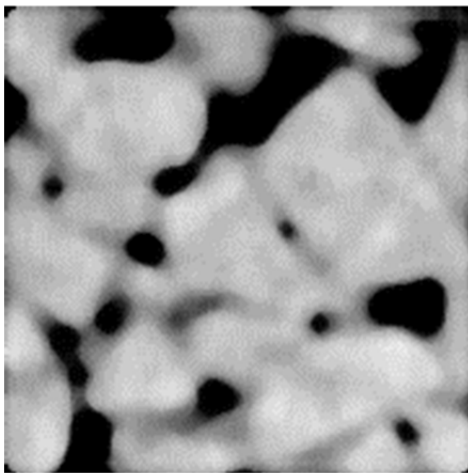
a) 原画像



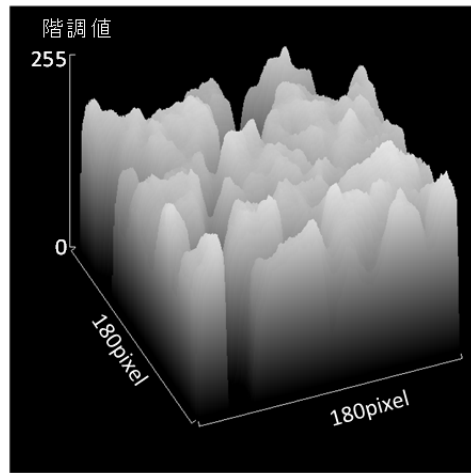
b) Median Filter Size = 5



b) Median Filter Size = 5



c) Median Filter Size = 9



c) Median Filter Size = 9

(1) 原画像

(2) 階調値分布

図-3.10 メディアンフィルタの結果

(2) Hmax変換^{31),33)}

Hmax変換は、CT画像の骨材領域の階調値の極大値から、指定した設定値を引いたものを新たな最大値として変換するものである。すなわち、Hmax変換の設定値(Hmax Size)を h 、ピクセルの階調値の局所極大値を f 、対象となるピクセルの階調値を g としたとき、 $g > f - h$ となった場合の g は $f - h$ 置き換えられる³³⁾。これにより、粗骨材領域の画像を均一化するとともに、後述のWatershed変換で粗骨材領域が分断されるのを防ぐ役割をもつ。

図-3.10(1)b)、すなわちMedian Filter Sizeが5の画像を原画像とした場合のHmax変換の結果を図-3.11に示す。CT画像を見た場合には、Hmax Sizeの値が小さい場合には、階調値のピークカットが小さい分、明るい画像になるとともに、粗骨材領域の濃度ばらつきが大きく、抽出される粗骨材の粒度が小さくなる傾向がある。また、Hmax Sizeの値が大きい場合には、階調値のピークカットが大きい分、暗い画像になるとともに、粗骨材領域の濃度のばらつきが小さく、抽出される粗骨材の粒度が大きくなる傾向がある。階調値分布をみた場合には、Hmax Sizeの値が大きいほど、粗骨材領域の平らな部分が大きくなる。

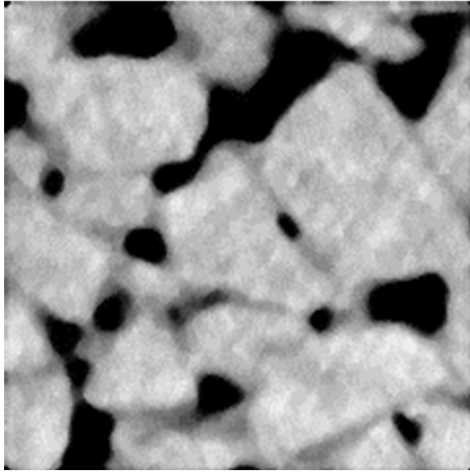
(3) エッジ処理

エッジ処理は、画像の明るさの変化によりオブジェクトの輪郭を算出する手法である²⁸⁾。本研究では画像ソフト"ImageJ"を用いて画像分析を行っているが、本ソフトでは式-3.4で表されるSobelオペレータを用いている³²⁾。またエッジ画像の強さ g は式-3.5で表される。

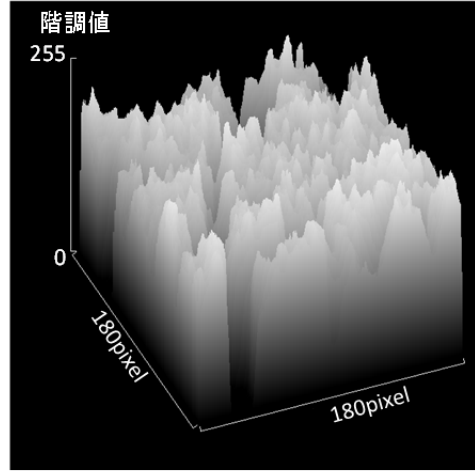
$$f_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad f_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$g = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (3.5)$$

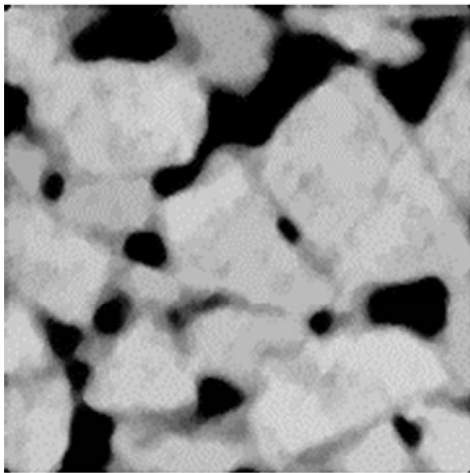
図-3.10(1)b)を原画像とした場合のエッジ処理の結果を図-3.12に示す。原画像の粗骨材と空隙境界部分でエッジが強調されている一方、粗骨材の輪郭も大まかに表されている。しかし、粗骨材内にも濃淡があることから、粗骨材内にもエッジが現れている。



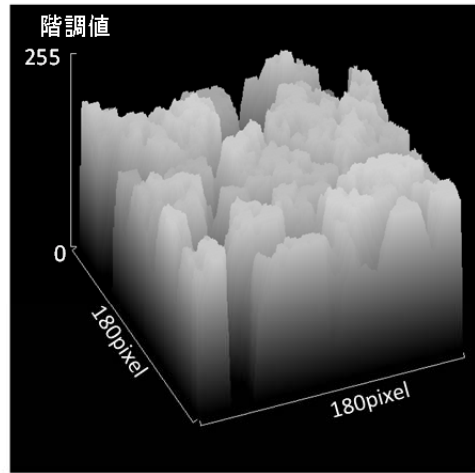
a) Median Filter Size = 5



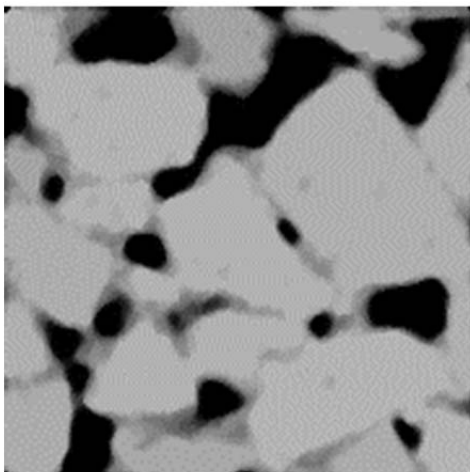
a) Median Filter Size = 5



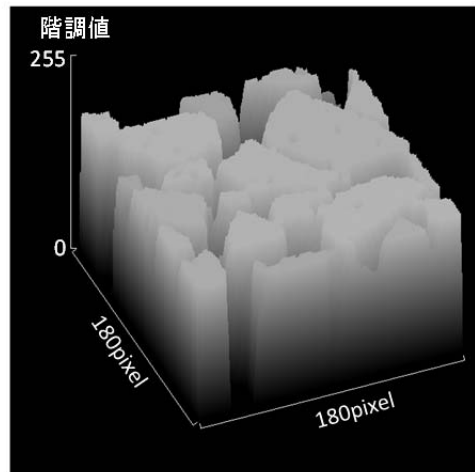
b) Hmax Size (h) = 30



b) Hmax Size (h) = 30



c) Hmax Size (h) = 60



c) Hmax Size (h) = 60

(1) 原画像

(2) 階調値分布

図-3.11 Hmax変換の結果

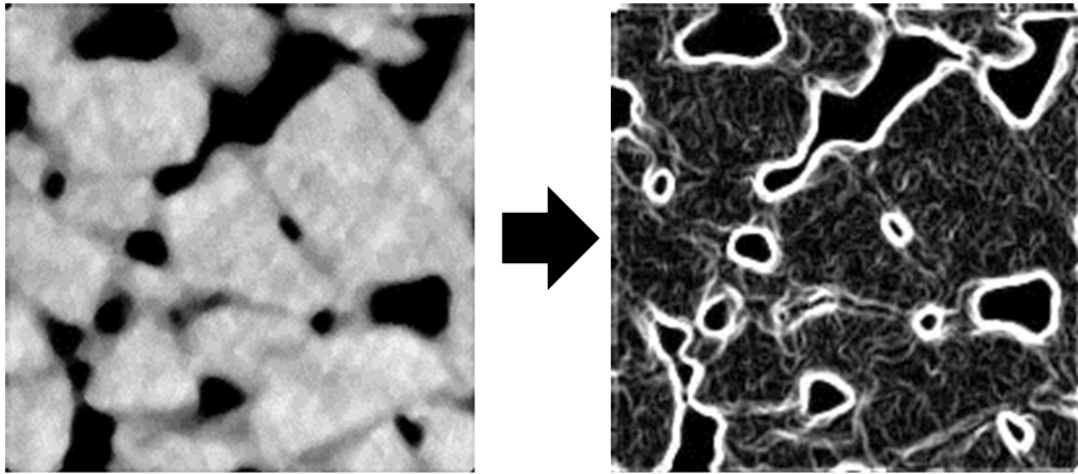


図-3.12 エッジ処理の結果

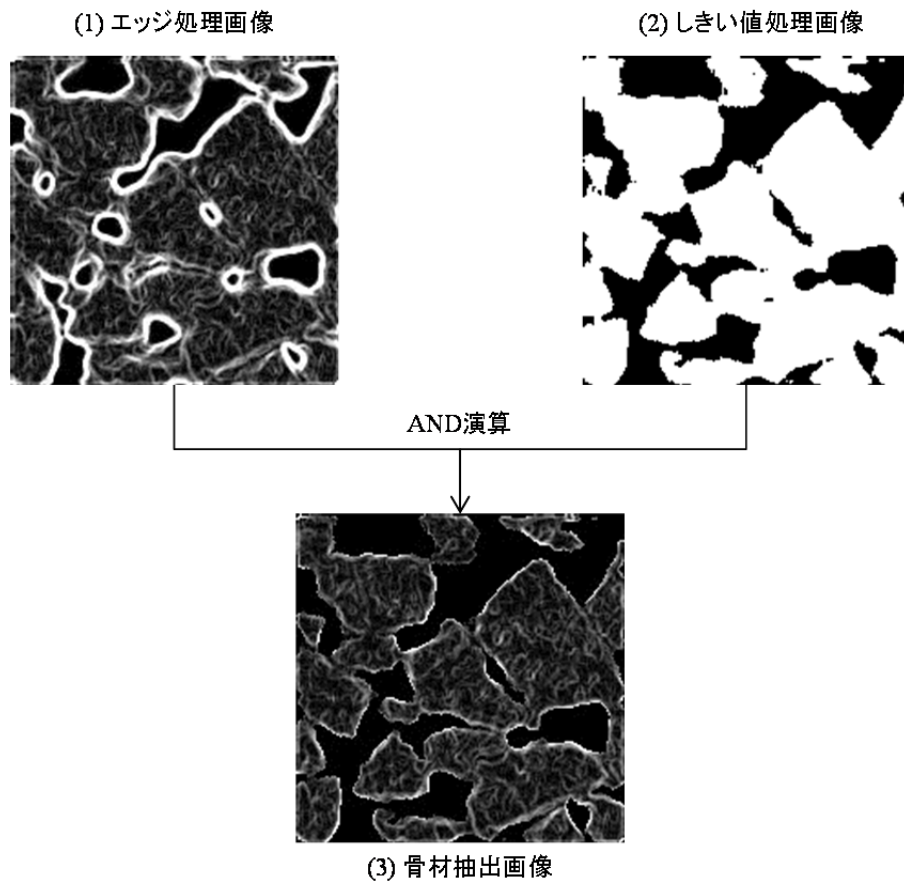


図-3.13 エッジ処理としきい値処理による骨材の抽出

なお、エッジ処理した画像（図-3.13(1)）と次節で詳述するしきい値処理画像（図-3.13(2)）をImageJのAND演算を施すことで、骨材の輪郭を抽出することが可能となる（図-3.13(3)）。

3.3.2 セグメンテーション

画像に含まれる様々な情報やフェーズを切り出すことをセグメンテーションと呼ぶ³²⁾。X線CT画像から素材の構成を特定するためには、セグメンテーションを行うためのしきい値を設定する必要がある。領域やしきい値を客観的に決定する主なセグメンテーション手法を以下に示す。

(1) Watershed変換

Watershedとは分水嶺のことであり、Watershed変換は、画像の階調値を反転させたあと、分水嶺の部分を抽出し、画像内の領域を決定する手法である。この手法は、先述の"iPas"³¹⁾で採用されている。図-3.11(1)b)、すなわちHmax Sizeが30の画像についてWatershed変換を行った結果を図-3.14に示す。図中の黒い線の部分がWatershed変換された部分である。なお、本手法は後述のp-タイル法等とは異なり、領域を決定するものであり、しきい値を決定する手法ではない。

(2) p-タイル法

画像内で対象物の面積比率が既知であるとき、二値化あるいは多値化処理を行う時に1とする画素を面積比率 P となるようにしきい値 T を決定する手法をp-タイル法(Percentile Method)と呼ぶ。この手法はしきい値自動決定法の中で最も簡単な方法であり、図-3.15のように面積比率 P が既知の場合、対象物の面積 S_0 を画像全体の面積 S で除したものが P と一致するようにしきい値 T を定めればよく、あらかじめ配合が既知なアスファルト混合物に用いられている^{34),35)}。しかし、実道における配合が未知なアスファルト混合物のコアについては適用できない等の問題がある。

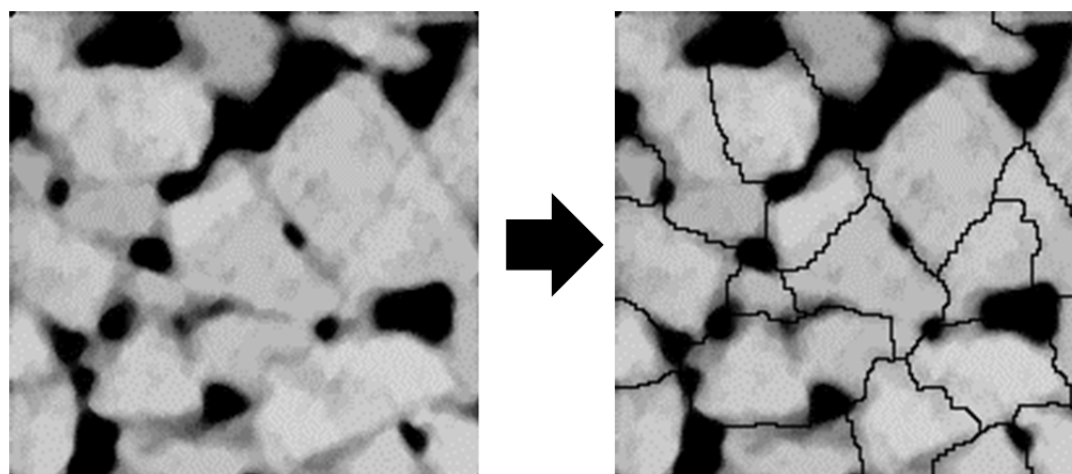


図-3.14 Watershed変換の結果

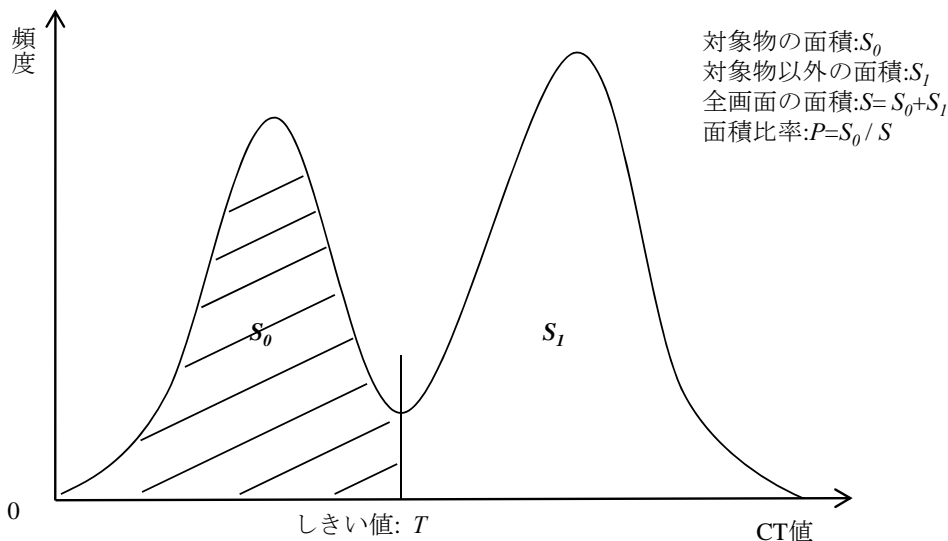


図-3.15 p-タイル法 の概念

(3) 大津の判別分析法

大津の判別分析法は、統計的な意味での最適しきい値を決定する方法であり、対象物の濃度と背景の濃度とがそれぞれ最もよくまとまり、かつ対象物と背景との違いが際立つようにしきい値を求める方法である³⁶⁾。しきい値 T で画像を2つのクラスに分けたときに、その2つのクラス内分散（クラスの散らばりの大きさ）を σ_W 、クラス間分散（2クラス間の散らばりの度合い）を σ_B 、分離度を R とすると、それぞれは式-3.6～式-3.8で表される。大津の方法では、 R が最大となる T を求めることにより、しきい値を決定する。

$$\sigma_W^2 = \frac{n_1\sigma_1^2 + n_2\sigma_2^2}{n_1 + n_2} \quad (3.6)$$

$$\sigma_B^2 = \frac{n_1(\mu_1 - \mu_T)^2 + n_2(\mu_2 - \mu_T)^2}{n_1 + n_2} \quad (3.7)$$

$$R = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_W^2} \quad (3.8)$$

ここに、

μ_T : 全画素濃度の平均値

σ_i : 濃度 T で分けたときのクラス i の分散

μ_i : 濃度 T で分けたときのクラス i の平均値

n_i : 濃度 T で分けたときのクラス i の画素数

大津の方法は双方性を持つ場合には非常に良い結果が得られる一方、双峰性がない画像には向いていないという問題がある。

(4) ファントムを用いる方法

天明²⁸⁾は骨材とモルタルを判別する方法として、ファントム（CTスキャナの性能等を確認するために用いられる、材料および断面積が既知の標本）を用いた。具体的には、直径20mmのセメントペーストの中にコンクリートの骨材の密度とほぼ同じである直径100mmの花崗岩を挿入したものを撮影し、p-タイル法によりしきい値を求めている。

(5) 三階微分

天明²⁸⁾はセメントコンクリートのCT値の低い部分、すなわち空隙とモルタルの境界部分のCT値の分布がなめらかとなることから、空隙とモルタルを判別する方法として三階微分を用いる方法を採用した。ヒストグラムを表す関数を $f(CT)$ とし、それを CT について三階微分を行い、0となるCT値をボクセル数が急激に上昇する特徴点として、空隙－モルタルのCT値としたものである。

(6) Region Growing法

Region Growing法は、抽出対象領域内部の点から同一の領域に属すると思われる連結領域を順次取り込みながら領域拡張を行い、必要な領域全体を抽出する手法である³⁷⁾。Higoら³⁸⁾は、不飽和砂のCT画像から土粒子、水、空気の三相割合を定量化するためRegion Growing法を用いており、その概要は以下のとおりである。

まず、密度とCT値が概ね線形関係にある性質を利用して、CT値が高く白で表示されている土粒子、CT値が低く黒で表示されている空気、グレーで表示されている水のCT値をサンプリングし、平均値 \bar{x} および標準偏差 σ を求める。次に、各相のCT値は正規分布していると仮定し、平均値 \bar{x} から $\pm 2\sigma$ を各相が重複した領域あるいは重複しない領域は、それぞれの領域境界CT値の平均値平均を新たに領域境界とする。その後、この領域境界を許容値として、Region Growing法により土粒子部分と間隙空気部分を抽出し、残りを間隙水とする。

この方法の特徴は、各相の割合だけでなく、三値化画像が同時に得られることである。

3.3.3 粒子の追跡手法

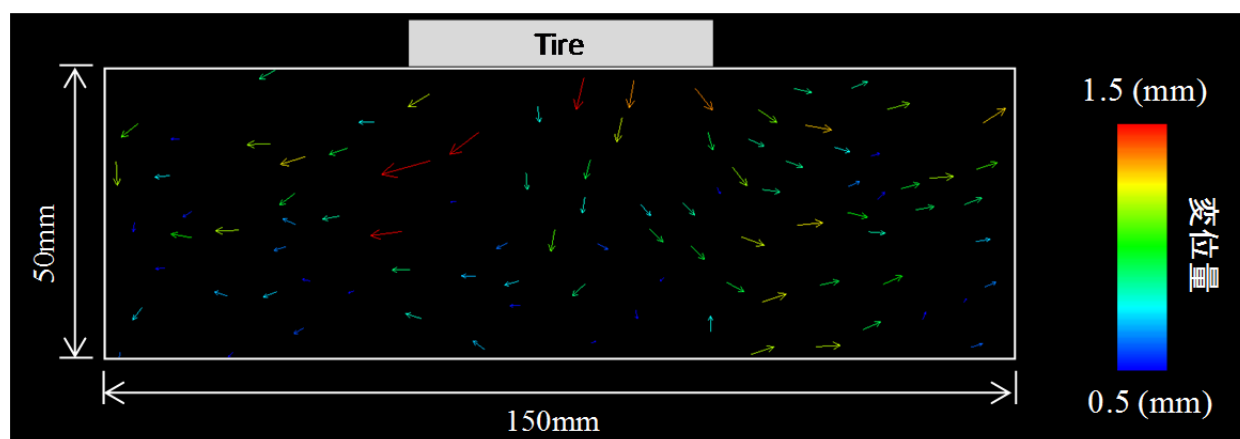
近年，土系材料ではCT画像から土粒子の挙動を分析する手法として，粒子追跡法（Particle Tracking Velocitometry，以下PTV）およびデジタル画像相関法（Digital Image Correlation，以下DIC）等の画像解析手法が用いられている³⁹⁾．以下にPTVおよびDICの概要を示す．

(1) PTV

PTVは，流体力学等で用いられる粒子画像流速計測法(Particle Image Velocitometry，以下PIV)のうち，粒子一つ一つの判別が容易である程度にトレーサ粒子（流体の動きを可視化するために挿入する粒子）の濃度を低くし，各粒子の動きを追跡する手法であり，低密度PIVとも呼ばれる⁴⁰⁾．この手法では画像データから比較的粒径の大きい粒子を抽出し，その粒子を追跡することで変位ベクトルを得ることができることから，土系材料⁴¹⁾のアスファルト混合物^{42),43)}の挙動解析にも用いられている(図－3.16)．PTVでは，粒子の挙動を把握することにより，全体の動きの大まかな挙動を把握することができる．

(2) DIC⁴²⁾

DICは，測定対象物の輝度値の分布を基にして測定対象物の変形前後を，デジタルカメラやCTスキャナ等で撮影し，得られたデジタル画像の輝度値分布から試料内部の変形量と方向を同時に求める手法である^{29),44)}．



図－3.16 アスファルト混合物におけるPTVの適用事例^{42),43)}

PTVは骨材に着目するのに対し、DICは画像の輝度値の動きに着目している。このことからPTVに比べ、骨材の部分のみならず、対象物全体の変位やひずみを計算することができ、その挙動を把握することができるメリットがある。代表的なDICのプログラムとしてはフランスのLaboratoire 3S-Rで開発された"Tomowarp"⁴⁴⁾がある。近年、DICは土系材料²⁹⁾、鋼材⁴⁵⁾およびセメントコンクリート^{46),47)}等の変位およびひずみの解析で適用事例がある。

DICにおける解析手順は以下のとおりである²⁹⁾。

- 1) 変形前後のデジタル画像を取得する。
- 2) 変形前の画像中に基準となる節点群を定義する (図-3.17(a))。
- 3) 各節点を中心に相関窓および検索窓 (相関窓が移動すると考えられる範囲) のサイズを定義する。
- 4) 変形後の画像で相関窓を動かしながら相関係数を算定する。
- 5) 相関が最も高い位置を移動後の領域と同定する。この状態でボクセル単位 (整数) の移動量が求まる (図-3.17(b))。
- 6) 5)で得られたボクセル単位の移動量に対して、サブピクセル補正 (ボクセル単位以下の分解能で移動量を補正) を行い、実数での変位分布を求める。
- 7) 得られた変位場を基にひずみ場を求める。

なお、DICにおける相関係数の算定式は様々な式が提案されているが、本研究において使用した式はScalar Productと呼ばれるものであり²⁹⁾、算定式を式-3.9に示す。

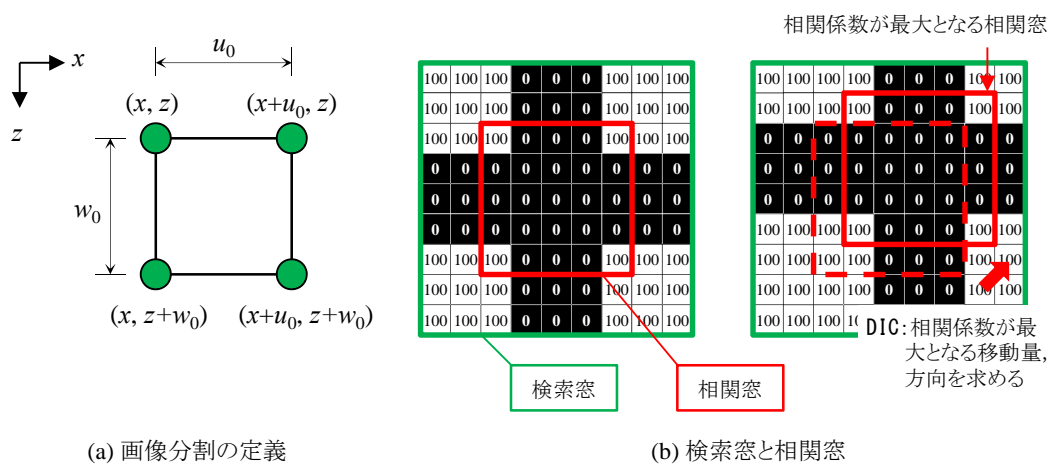


図-3.17 DICにおける検索窓, 相関窓および移動量算定の概念²⁹⁾

$$CC(u, v) = \sum_{x, y} I_1(x, y) I_2(x+u, y+v) \quad (3.9)$$

ここに、

u : x 方向の移動量

w : z 方向の移動量

ここで重要なのが節点群、相関窓と検索窓の設定である。接点間隔(u_0, w_0)を細かくした場合には、精度良く変位やひずみが計算できるとともに、局所的なひずみ等がとりにやすい反面、計算時間が膨大になる、ノイズが入りやすい等の問題が発生しやすい。また、相関窓や検索窓を大きくすると、計算時間が膨大になる等の問題が発生しやすくなる一方、相関窓を小さくすると、局所的に異常なベクトルが発生する等の問題が発生しやすくなる。そのため、節点群、相関窓と検索窓の設定にあたっては、計算時間や精度等を考慮して選定しなければならない。

3.4 X線CTの適用事例

3.4.1 土系材料

土系材料（粘土、砂および岩盤等の総称）に関しては、初期の段階では医療用X線CTスキャナが用いられている^{48)~50)}。その後、産業用X線CTスキャナおよびマイクロフォーカス型X線CTスキャナが開発されて以降は、土系材料に関する様々な試験が行われている。

医療用X線CTスキャナを用いた事例として、谷ら⁴⁸⁾、稲崎ら⁴⁹⁾、Desuresら⁵⁰⁾の研究が挙げられる。谷ら⁴⁸⁾は、市販の医療用X線CTを用いて、模型砂層（豊浦砂(密度約1.6g/cm³)、幅250mm、長さ1700mm、層厚100mm)に水平移動を加えることで、横ずれ断層の模型実験を行い、横ずれ断層による地盤内のせん断帯の形成過程を可視化し、せん断帯の発生メカニズムについて考察を行った。稲崎ら⁴⁹⁾は栃木県日光市湯元に位置する湯の湖で、延長2.2mの底質試料を採取し、医療用X線CT（管電圧120kV）を用いて取得されたCT画像、コア観察およびガンマ線スキャナの結果を比較し、総合柱状図を作成した。Desuresら⁵⁰⁾は医療用X線CTスキャナと三軸圧縮試験装置を組み合わせた装置を開発し、相対密度の異なる供試体について三軸圧縮試験を行い、その結果、相対密度の違いによりせん断帯の発生過程が異なることを示している。

1990年代に入り、医療用X線CTスキャナより高電圧、高エネルギーを有する産業用X線CTスキャナが開発されると、土系材料へも適用されていく。産業用X線CTスキャナを土系材料に用いた初期の例としては、石油公団の研究⁵¹⁾があり、ボーリングコア内部の可視化を行っている。1996年、熊本大学に産業用X線CTスキャナが導入され、岩盤工学⁵²⁾や地盤工学²⁷⁾における適用の可能性とその定量的評価手法について研究を行っている。

X線CTスキャナ用三軸圧縮試験機⁵³⁾が開発されたのを契機に、土系材料の破壊メカニズムの可視化に関する研究が盛んに行われるようになった。渡邊ら^{54),55)}は粒子追跡法およびデジタル画像相関法を用いて、山砂の三軸圧縮試験における変位特性およびひずみ場の解明を行った。御手洗ら⁵⁶⁾はタイヤチップ混合固化処理土の一軸圧縮試験およびX線CT撮影を実施し、耐久性を評価した。Higoら⁵⁷⁾は、マイクロフォーカス型X線CTスキャナを用いて不飽和土を対象とした三軸圧縮試験を実施し、供試体内部の破壊現象を可視化した。海外においても同様の試験が実施されており、Alshibliら⁵⁸⁾はNASAケネディ宇宙センターのX線CTスキャナを用いて粒状材料供試体の三軸圧縮試験を行い、砂の密度変化、せん断力の発生の様子を明らかにした。Besulleら⁵⁹⁾は粘土質岩の供試体の三軸圧縮試験およびX線CT撮影を実施し、偏差応力による粘土質岩の崩壊の様子を明らかにした。Lenoirら⁶⁰⁾はシンクロトロンによる放射光を利用したX線CTスキャナにより、軟岩の三軸圧縮過程についてデジタル画像相関法を用いて可視化している。

その他にも、気泡混合処理土の透水試験⁶¹⁾、杭の水平方向への荷重に対する砂の挙動⁶²⁾、鋼管矢板の貫入による閉塞領域⁶³⁾、開端杭の貫入による先端閉塞現象のメカニズム解明⁶⁴⁾、ならびにトンネルの切羽崩壊の模型実験⁶⁵⁾等といった応用分野にもX線CTが展開されている。

3.4.2 セメントコンクリート材料

X線CTのセメントコンクリートへの適用事例は、セメントペースト、セメントモルタルおよびセメントコンクリートに大別される。

セメントペーストおよびセメントモルタルの研究事例は以下のとおりである。増田ら⁶⁶⁾は、水セメント比50%、約1mm³のセメントペースト試料について、SPring-8のX線CTを用いて関心領域の大きさと空隙率の関係について解析を行った。Landis⁶⁷⁾は、X線CT撮影を行うための特殊な載荷試験装置を用いて、直径4mm、高さ4mmのモルタル供

試体に対して載荷試験を行い、X線CT画像からモルタルにひび割れが発達していく様子を解明した。人見ら⁶⁸⁾は、SPring-8のビームラインBL47XU（光電子分光・マイクロCT）を用いて、500 μ m～700 μ m程度のモルタル試料についてX線CTを適用し、水セメント比の違いおよびカルシウム溶脱の有無による空隙構造の違いを明らかにした。伊藤ら⁶⁹⁾は、熊本大学の産業用X線CTスキャナを用いてモルタル硬化時のCT値の経時変化を調べた。

セメントコンクリートの研究事例は以下のとおりである。天明²⁸⁾は熊本大学の産業用X線CTスキャナを用いて、セメントコンクリート材料の材料構成定量化手法の開発および同手法の室内作製供試体および工場生産コンクリートへの適用、コンクリート構造物の施工に関する評価、ならびに既設コンクリート構造物の診断と総合評価を行い、X線CT法のコンクリート診断への適用可能性について検討した。Wongら⁷⁰⁾は直径100mmのセメントコンクリート供試体について試験実施前、ならびに終局強度の50%および85%載荷時にX線CT撮影（120kV）を実施した。川北ら⁷¹⁾は、1mm³未満の微小フライアッシュコンクリート供試体についてSPring-8のX線CTスキャナを用いて撮影し、空隙構造の観察を実施した。Fukudaら⁷²⁾は北海道大学のマイクロフォーカス型X線CTスキャナを用いて、高強度低透水性セメントコンクリートの微細構造の把握を行った。麓⁷³⁾は、近畿大学のX線CT装置内に300kN万能試験機を設置し、コンクリートの三次元X線CT画像から粒子形状の分析を行うとともに、圧縮応力下における骨材の挙動を解明した。

3.4.3 アスファルト混合物

X線CTのアスファルト舗装材料への適用は、米国で1988～92年に実施された新道路研究計画（Strategic Highway Research Program, SHRP）⁷⁴⁾までさかのぼることができる。新道路研究計画では、医療用X線CT（130kV）を用いて、石油の産地が異なる6種類のアスファルトのファントムおよびアスファルト混合物のX線CT撮影を行った。その後、産業用およびマイクロフォーカス型X線CTスキャナによる研究が発表されている。Masadら⁷⁵⁾は産業用X線CTスキャナを用いて、ジャイレトリコンパクトを用いたアスファルト混合物の供試体作製時における空隙率の測定を行った。Youら⁷⁶⁾やZeleelewら⁷⁷⁾は、骨材の形状をX線CTにより把握し、個別要素法によって破壊のシミュレーションを行っている。Taniguchiら^{78),79)}はマイクロフォーカス型X線CTスキャナを用いて、積雪寒冷地の高速道路のアスファルト混合物層およびアスファルト安定処理層の亀裂の

幅を表示させている。Kutayら⁸⁰⁾は、X線CT画像による空隙解析結果と透水量を求める理論式から透水速度を計算し、室内試験により得られた透水速度との比較を行った。Khanら⁸¹⁾はX線CTを用いてアスファルト混合物の定ひずみ疲労試験における破損の定量化を実施した。Wuら⁸²⁾は2次元のアスファルト混合物CT画像から3次元の粒度分布を予測するモデルを提案した。Zeleelewら⁸³⁾はアスファルト混合物のCT画像を、骨材、マスティック（アスファルトと細骨材を混合したもの）、空隙の3相に分類するアルゴリズムを提案した。Coleriら⁸⁴⁾はHeavy Vehicle Simulatorと呼ばれる実大載荷試験装置およびX線CTを用いてわだち掘れのメカニズムを解明した。Onifadeら⁸⁵⁾はX線CT画像を画像処理した後、FEMによってアスファルト混合物の内部構造を解明した。Zeleelewら⁸⁶⁾はAETA (Adaptive Enhanced-based Thresholding Algorithm)と呼ばれるCT画像のしきい値決定法を提案した。

しかしいずれの研究も空隙、亀裂および透水性の評価、ならびに骨材の形状に特化したものであるとともに、CT画像の階調値（Gray-level）での議論であり、天明²⁸⁾がセメントコンクリートで行ったような、X線CTの特性である密度、CT値に着目した議論が行われていないという問題がある。また、ほとんどの研究が室内試験によるものであり、実道のアスファルトコンクリートで実施した試験は少ない。

3.5 まとめ

本章では、X線CTの基本的な概念およびX線CT画像を用いた材料構成の定量化手法について説明するとともに、土系材料、セメントコンクリートおよびアスファルト混合物における適用事例についてとりまとめた。以下に得られた知見を列挙する。

- i) CT撮影により得られた断面画像は、CT値によるデジタル画像であり、被検体の密度を定量的に表すことから、構成材料の定量化が可能である。
- ii) ある程度大きい材料の品質を評価する場合には、ミニフォーカス型X線CTの方が適している。一方、微小な亀裂および損傷等を評価するためには、解像度の高いマイクロフォーカス型X線CTの方が適している。
- iii) 供試体の大きさ、形状によってはアーティファクトの問題が発生するため、試料の形状に留意する必要がある。

- iv) X線CTに関する画像処理方法のとりまとめを行った.
- v) 土系材料については、熊本大学をはじめとして国内外において研究が盛んに行われ、X線CTおよび三軸圧縮試験によって砂の破壊メカニズム、一軸圧縮試験によって粘土の破壊メカニズムの解明を行っている。また、杭の貫入やトンネルの切り羽崩壊等、応用分野へ研究が展開している。
- vi) セメントコンクリート材料については、モルタル、コンクリートにおいて適用事例があり、X線CT試験の結果から水セメント比を評価する等といった品質管理手法の提案や既設構造物のコンクリートの破損の評価が行われた。
- vii) アスファルト混合物については空隙、亀裂および透水性の評価、ならびに骨材の形状に特化した研究が盛んに行われている一方、X線CTの特性である密度、CT値に着目した議論が行われていない。

【参考文献】（第3章）

- 1) 岩井喜典：CTスキャナ，コロナ社，1979.
- 2) Hounsfield G.: Computed Transverse Axial Scanning (Tomography) Part 1, Description of System, British Journal of Radiology, Vol.46, No.552, pp.1016- 1022, 1973.
- 3) 田口勇，中村滋男：鉄鋼用X線断層撮影装置の開発，鉄と鋼，第71年第14号，pp.117-123，1985.
- 4) 藤井正司：X線透過法とCTによる内部検査（特集：自動車産業に貢献する検査機器），検査技術，12(10)，日本工業出版，pp.62-69，2007.
- 5) 吉田豊明，高原北雄：B11 X線CTによるタービン冷却翼の非破壊検査の試み，ガスタービン定期講演会講演論文集(13)，日本ガスタービン学会，pp.145-150，1985.
- 6) Otani J. and Obara Y.: X-ray CT for Geomaterials, Soil, Concrete, Rocks, GEOX2003, 2003.
- 7) Resrues J., Viggiani G. and Besuelle P.: Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, GEOX2006, 2006.
- 8) Alshibli K.A. and Reed A.H.: Advances in Computed Tomography for Geomaterials, GEOX2010, 2010.
- 9) Cnudde V. and Bernard D.: Tomography of Materials and Structures, 1st ICTMS, 2013.
- 10) 大槻義彦：エックス線，大月書店，1982.
- 11) 三好邦昌：X線管の技術動向(後編)，日本放射線学会雑誌57(4)，pp418-420，2001.
- 12) 辻岡勝美：X線CTの機器工学(1)－X線の発生と検出－，日本放射線学会雑誌，58(2)，pp262-266，2002.
- 13) 飯沼武，館野之男：X線イメージング，コロナ社，1999.
- 14) 羽石秀明：X線イメージング技術，画像電子学会誌，37(5)，pp.748-754，2008.
- 15) 大谷順，尾原祐三，菅原勝彦，椋木俊文：地盤工学における産業用X線CTスキャナーの適用，土と基礎，48(2)，pp.17-20，2000.
- 16) Radon J.: On the Determination of Function from their Integrals along Certain Manifolds, Ber. Verh, Sächs Akad. Wiss. 69, pp.262-277, 1917.
- 17) Takahashi S.: Rotation Tomography, Japan Society for the Promotion of Science, 1957.
- 18) Cormack A.M.: Representation of a Function by its Line Integrals with some Radiological Applications, Journal of Applied Physics, Vol.34, pp2722-2727, 1963.

- 19) Cormack A.M.: Representation of a Function by its Line Integrals with some Radiological Applications II, Journal of Applied Physics, Vol.35, pp2908-2913, 1963.
- 20) Ambrose J.: Computed Transverse Axial Scanning (Tomography) Part 2, Clinical Application, British Journal of Radiology, Vol.46, No.552, pp.1023-1047, 1973.
- 21) 吉田滋俊 : EMIscannerという名のCT, 日本放射線学会雑誌, 57(2), pp.190- 193, 2001.
- 22) 矢仲重信 : X線CT装置(国産1号機)開発の思い出, JIRA会報, No.167, pp46-53, 2003.
- 23) 谷本慶哲, 富沢雅美, 西出明彦 : 産業用X線CTスキャナの現状, 精密工学会誌, 第56巻第8号, pp.1386-1389, 1990.
- 24) 辻岡勝美, 井田義弘 : X線CT検査の実際(1)ースキャンパラメータの設定ー, 日本放射線技術学会雑誌, 第58巻第11号, pp1456-1460, 2002.
- 25) 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.
- 26) Higo Y.: Study on Strain Localization of Multi-phase Granular Soils using Microfocus X-ray CT, The 1st International Workshop on X-ray CT Visualization for Socio-Cultural, Engineering & Environmental Materials, X-Earth (IWX) 2010, pp.49-53, 2010.
- 27) 椋木俊文 : 地盤工学におけるX線CT法の適用に関する研究, 熊本大学博士論文, 2001.
- 28) 天明敏行 : X線CT法のコンクリート診断への適用に関する基礎的研究, 熊本大学博士論文, 2009.
- 29) 渡邊陽一 : X線CTデータを用いたひずみ場の定量化に基づく地盤破壊機構の解明に関する研究, 熊本大学博士論文, 2011.
- 30) Mukunoki T., Otani J., Obara Y. and Kaneko K.: Artifact of X-ray CT data in the analysis of geomaterial properties, X-ray CT for Geomaterials, Soil, Concrete, Rocks, GEOX2003, pp.95-101, 2003.
- 31) Sefidmazgi N.R.: Defining effective aggregate skeleton in asphalt mixture using digital image, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, 2011.
- 32) 高木幹雄, 下田陽久 : 新編 画像処理ハンドブック, 東京大学出版会, 2004.
- 33) Soille P.: Morphological Image Analysis -Principles and Applications-, 2nd Edition, Springer, 2003.

- 34) Zelelew H.M. and Papagiannakis A.T.: A volumetric thresholding algorithm for processing asphalt concrete X-ray CT images, *International Journal of Pavement Engineering*, Taylor & Francis, 12(6), 543-551, 2011.
- 35) 谷口聡, 小川慧一郎, 大谷順, 西崎到: X線CTを用いたアスファルト舗装材料の定量的評価に関する研究, *土木学会論文集E1 (舗装工学)*, Vol.67, No.3 (舗装工学論文集第16巻), I_165-I_172, 2011.
- 36) 大津展之: 判別および2乗規準に基づく自動しきい値選定法, *信学論*, vol.J 63-D, No.4, pp.349-356, 1980.
- 37) 佐野耕一, 及川道雄, 磯部義明: リージョングローイング法による軟部組織の抽出と三次元表示, *Medical Imaging Technology*, 13(3), pp.189-194, 1995.
- 38) Higo Y., Oka F., Matsushima Y., Morishita R. and Yoshida T.: Trinarization of μ X-ray CT Images of Partly Saturated Sand at Different Water-retention States, *Tomography of Materials and Structures*, Talk, 1st ICTMS, 2013.
- 39) 高野大樹, 大谷順: X線CTの総論と画像解析手法, *材料*, 日本材料学会, No.62, No.10, pp.654-659, 2013.
- 40) 大川原真一: 粒子画像流速計測法(PIV)の工学的基礎～原理およびトレーサ粒子の選定～, *日本バイオレオロジー学会誌*, Vol.12, No.3, 1998.
- 41) Watanabe Y., Lenoir N., Otani J. and Nakai T.: Displacement in sand under triaxial compression by tracking soil particles on X-ray CT data, *Soil and Foundation*, The Japan Geotechnical Society, Vol.52, No.2, pp.312-320, 2012.
- 42) 小川慧一郎, 谷口聡, 大谷順, 佐藤宇紘: 粒子追跡手法を用いたポーラスアスファルト混合物の骨材挙動の解明, 平成24年度土木学会西部支部研究発表会, V-20, pp.729-730, 2013.
- 43) Taniguchi S., Ogawa K., Otani J., Nishizaki I. and Himeno K.: Visualisation of Aggregate Movement in the Wheel-tracking Test of Asphalt Mixture Using X-ray Computed Tomography, *Tomography of Materials and Structures*, Book of abstracts, Poster, pp.269-272, 2013.
- 44) Hall S.A., Lenoir N., Viggiani G., Desures J. and Besulle P.: Strain localization in sand under triaxial loading: characterization by X-ray micro tomography and 3D digital image correlation, *Proceeding of International Symposium on Computational*

Geomechanics (COMGeo09), 2009.

- 45) 出水亨, 松田浩, 戸次翔, 森崎雅俊, 内野正和, 伊藤幸広, 森田千尋: デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol.68, No.2, pp.I_683-690, 2012.
- 46) 内野正和, 佐川康貴, 尾上幸造: デジタル画像相関法を用いたコンクリート供試体のひずみ計測, 日本機械学会年次大会講演論文集(1), pp833-834, 2006.
- 47) 佃善彦, 宮里心一, 戸島幹夫, 畝田道雄: デジタル画像相関法を用いた腐食RC 梁のひび割れ発見, 日本材料学会学術講演会講演論文集, 60, pp.281-282, 2011.
- 48) 谷和夫, 上田圭一: X線CTを用いた横ずれ断層模型実験, 土木学会第48回年次学術講演会講演論文集, III-677, pp.1408-1409, 1993.
- 49) 稲崎富士, 井内美郎, 中野司: 湖沼底質試料の非破壊・密度構造分析への医療用X線CTスキャナの利用, 地質調査所月報, No.46(11), pp.629-642, 1995.
- 50) Desures J., Chambon R., Mokni R. and Mazerolle F.: Void Relation evolution inside shear bands in triaxial sand specimen studies by computed tomography, Geotechnique 46(3), pp.529-546, 1996.
- 51) 萩原利幸, 難波隆夫: X線CTスキャナーによる地球科学試料の内部構造分析技術とその応用, 地質調査所月報, 46(11), pp.565-642, 1995.
- 52) Sugawara K., Obara Y., Kaneko K., Koike K., Ohmi M. and Aoi T.: Visualization of Three-Dimensional Structure of Rocks using X-ray CT Method, Proceedings of the 1st ARMS, Vol.2, pp.769-774, 1997.
- 53) 大谷順, 尾原祐三, 椋木俊文, 浅長チエ, 吉村匡弘: X線スキャナ用三軸圧縮試験機の開発, 第34回地盤工学研究発表会, 1999.
- 54) 渡邊陽一, 大谷順, レノア・ニコラ, 高野大樹: X線CTを用いた三軸圧縮下における砂の三次元変位特性の解明, 応用力学論文集, 10, pp.505-512, 2007.
- 55) 渡邊陽一, 大谷順, レノア・ニコラ, ホール・ステファン, 高野大樹: X線CTデータおよび画像相関法を用いた三軸圧縮下における砂のひずみ場の測定, 応用力学論文集, 10, pp.505-512, 2007.
- 56) 御手洗義男, 安原一哉, 菊池喜昭, Karmokar A.K.: 古タイヤゴムチップを固化処理土に混合した新しい地盤材料の開発と力学的特性, 土木学会論文集C, 63(3), pp.881-900, 2007.

- 57) Higo Y., Oka F., Kimoto S., Sanagawa T., Sawada M. Sato T. and Matsushima Y.: Visualization of Strain Localization and Microstructures in Soils during Deformation using Microfocus X-ray CT, *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, GEOX2010*, pp.43-51, 2010.
- 58) Alshibli K.H., Batiste S.N. and Sture S.: Micro-Characterization of Shearing in Granular Materials Using Computed Tomography, *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, GEOX2006*, pp.17-34, 2006.
- 59) Besulle P., Batiste S.N., Sture S.: X-ray Micro CT for Studying Strain Localization in Clay Locks under Triaxial Compression, *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, GEOX2006*, pp.35-52, 2006.
- 60) Lenoir N., Bornet M., Desures J., Besulle P. and Viggiani G.: Volumetric Digital Image Correlation Applied to X-ray Microtomography Image from Triaxial Compression Tests on Argillaceous Rock, *Strain*, 43, pp.193-205, 2007.
- 61) 菊池喜昭, 永留健, 水谷崇亮: 気泡量の違いによる気泡混合処理土の透水・吸水特性の変化, *港湾空港研究所報告*, 45(2), 2006.
- 62) Otani J.: X-ray Computed Tomography for Geotechnical Engineering, *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, GEOX2006*, pp.95-115, 2006.
- 63) 八田直己, 大谷順, 平井卓, 萩原敏行, 木村亮: X線CTを用いたH連結鋼管矢板の鉛直支持力特性の解明, *地盤工学研究発表会講演集*, Vol.40, pp.1431-1432, 2005.
- 64) 菊池喜昭, 佐藤宇紘, 森川嘉之: 開端杭貫入時の杭先端周辺地盤の変形挙動の観察, *港湾空港技術研究所資料第1177号*, 2008.
- 65) 大谷順, 永谷英基, 高野大樹: X線CTを用いたトンネル切羽崩壊機構の評価, *土木学会論文集C*, 62(4), pp.814-824, 2006.
- 66) 増田亜由子, Promentilla M. A. B., 杉山隆文, 人見尚: セメントペーストのX線CT画像におけるREV解析, *第62回セメント技術大会講演要旨*, pp.24-25, 2008.
- 67) Landis E.N.: X-ray Tomography as a Tool for Micromechanical Investigations of Cement and Mortar, *2nd International Workshop on X-Ray CT for Geomaterials (GeoX)*, 2006.
- 68) 人見尚, 三田芳幸, 斉藤裕司, 竹田宣典: 高輝度X線CTを用いたコンクリートのカルシウム溶脱の評価, *コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集*, 5, pp.223-228, 2005.

- 69) 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, 2007.
- 70) Wong R.C.K and Chau K.T.: Evolution of air voids in concrete specimen under uniaxial loading using X-ray computer tomography, X-ray CT for Geomaterials, Soil, Concrete, Rocks, GEOX2003, 2003.
- 71) 川北昌弘, 杉山隆文, 田村優介: コンクリートの空隙構造観察のための高輝度X線CTの利用について, 第61回セメント技術大会講演要旨, pp.24-25, 2007.
- 72) Fukuda D., Nara Y., Maruyama M. and Kaneko K.: Investigation of Sealing Behavior of Fracture in Cementitious Material in Ground Water Using Micro-focus X-ray CT and 3D Image Analysis, Tomography of Materials and Structures, Talk, 1st ICTMS, 2013.
- 73) 麓隆行: 新しい機構のX線CTの開発とポリマーコンクリートの圧縮試験への応用, 土木学会論文集E2, Vol.69, No.2, pp182-191, 2013.
- 74) 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.
- 75) Masad E., Muhunthan B., Shashidhar N., and Harman T.: Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete using Image Analysis, Imaging Technologies in Civil Engineering, Vol.13, No.2, pp.88-95,1999.
- 76) You Z.P., Adhikari S. and Kutay M.E.: Dynamic modules simulation of the asphalt concrete using the X-ray computed tomography images, Materials and Structures, Springer, Vol.42, Issue 5, pp.617-630, 2009.
- 77) Zelelew H.M. and Papagiannakis A.T.: DEM simulation of asphalt concrete uniaxial creep, the 6th international conference on maintenance and rehabilitation of pavement and technological control (MAIREPAV6), 2009.
- 78) Taniguchi S., Nishizaki I. and Moriyoshi A.: A study of Longitudinal Cracking in Asphalt Pavement using CT scanner, Road Materials and Pavement Design, Lavoisier, vol. 9, issue 3, pp.549-558, 2009.
- 79) Taniguchi S., Nishizaki I. and Moriyoshi A.: Three-Dimensional Diagnosis of Pavement Damage using CT Scanner, the 6th international conference on maintenance and rehabilitation of pavement and technological control (MAIREPAV6), 2009.
- 80) Kutay M.E. and Aydilek A.H.: Accuracy of the two Common Semi-Analytical Equations

in Predicting Asphalt Permeability, 2nd International Workshop on X-Ray CT for Geomaterials (GeoX), pp.301-307, 2006.

- 81) Khan R. and Collop A.C.: The Use of X-Ray Computed Tomography to Characterize Microdamage in Asphalt, Road Material and Pavement Design, Taylor & Francis, Vol.12, No.1, pp.89-109, 2010.
- 82) Wu W., Wang D. and Zhang X.: Estimating the Gradation of Asphalt Mixtures using X-Ray Computerized Tomography and Stereology Method, Road Material and Pavement Design, Taylor & Francis, Vol.12, No.3, pp.699-710, 2011.
- 83) Zelelew, H.M. & Papagiannakis, A.T.: A volumetric thresholding algorithm for processing asphalt concrete X-ray CT images, International Journal of Pavement Engineering, Taylor & Francis, Vol.12, No.6, pp.543-551, 2011.
- 84) Coleri E., Harvey J.T., Yang K. and Boone J.M.: Micromechanical approach to investigate asphalt concrete rutting mechanisms, Construction and Building Materials, Elsevier, No.30, pp.36-49, 2012.
- 85) Onifade I., Jelagin D., Guarin A., and Birgisson B.: Asphalt Internal Structure Characterization with X-ray Computed Tomography and Digital Image Processing, Multi-Scale Modelling and Characterization of infrastructure Materials, RILEM, No.8, pp.139-158, 2013.
- 86) Zelelew H.M., Almutashri A., Agaian S. and Papagiannakis A.T.: An improved image processing technique for asphalt concrete X-ray CT images, Road Material and Pavement Design, Taylor & Francis, Vol.14, No.2, pp.341-359, 2013.

第4章 X線CTを用いたアスファルト混合物の内部特性の評価

4.1 概説

アスファルト混合物は、骨材、石粉およびアスファルトを主たる材料として構成される^{1),2)}。アスファルト混合物に使用される骨材は2.36mmを境として粗骨材、細骨材に分類される。粗骨材は粒径の大きさによって5号砕石(20~13mm)、6号砕石(13~5mm)および7号砕石(5~2.5mm)等に分類され、細骨材は粗砂、中砂および細砂といった天然砂³⁾、ならびにスクリーニングス(砕石や玉砕を製造する際に生じる、粒径2.36mm以下の細かい部分)および砕砂(岩石を破砕して製造した細骨材)等の人工砂に分類される。石粉は石灰岩を粉砕したものであり、アスファルトと一体となって骨材の間隙を充填し、混合物の安定性および耐久性を向上させる役割がある。アスファルトは石油から精製されるストレートアスファルト(以下、ストアス)、アスファルトにポリマーを加えてアスファルトの性状を改善したポリマー改質アスファルト等がある。ポリマー改質アスファルトには、重交通道路のわだち掘れの軽減を目的としたポリマー改質アスファルトⅡ型(以下、PMA-II)、ならびにポーラスアスファルト混合物に使用するための高粘度なポリマー改質アスファルトH型(以下、PMA-H)等がある。

アスファルト混合物は、第1章でも述べたように気象条件、地域条件、交通条件、材料条件および施工方法等を勘案したうえで、混合物の種類および配合が決定され、所定の温度で混合されることにより舗設される。主として利用されるアスファルト混合物は、基層用として用いられる粗粒度アスファルト混合物(以下、粗粒度)、積雪寒冷地域でない一般地域において表層用として一般的に用いられている密粒度アスファルト混合物(以下、密粒度)、ならびに雨天走行時の安全性や騒音低減の機能が求められる箇所に使用されるポーラスアスファルト混合物(以下、ポーラス)等がある。

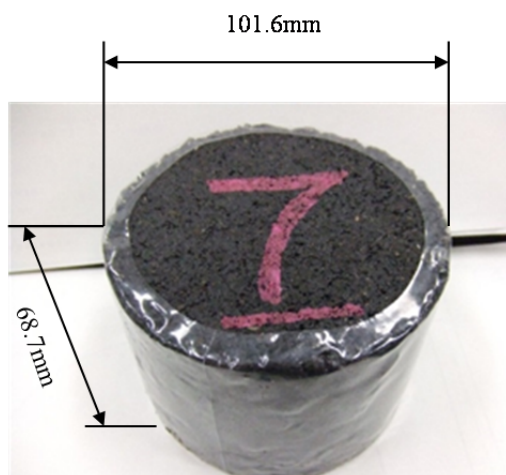
天明⁴⁾は、X線CT法を用いて骨材、モルタルおよび空隙といったセメントコンクリートの材料構成の定量化手法を開発した。アスファルト混合物も骨材、石粉、アスファルトおよび空隙で構成される材料であり、密度も粗骨材、石粉が2.6~2.7g/cm³程度、アスファルトが1.0g/cm³程度であることから、セメントコンクリートと同様にX線CT法の適用が考えられる。

本章では、マーシャル安定度試験用供試体（直径101.6mm）のX線CT撮影を行い、アスファルト混合物の内部特性の評価を行う。内部特性を評価する手法として、本章では密度と相関の高いCT値を用いる。第2節でX線CTの撮影条件の検討を行う。第3節でアスファルト混合物を構成する素材，すなわち粗骨材，細骨材，石粉およびアスファルトにX線CT法を適用し，それぞれのCT値特性について述べる。第4節でアスファルト混合物にX線CT法を適用し，アスファルト量，アスファルトの種類，ならびに混合物の種類すなわち骨材配合率の違いによるCT値特性の違いについて述べ，第5節で本章を総括する。

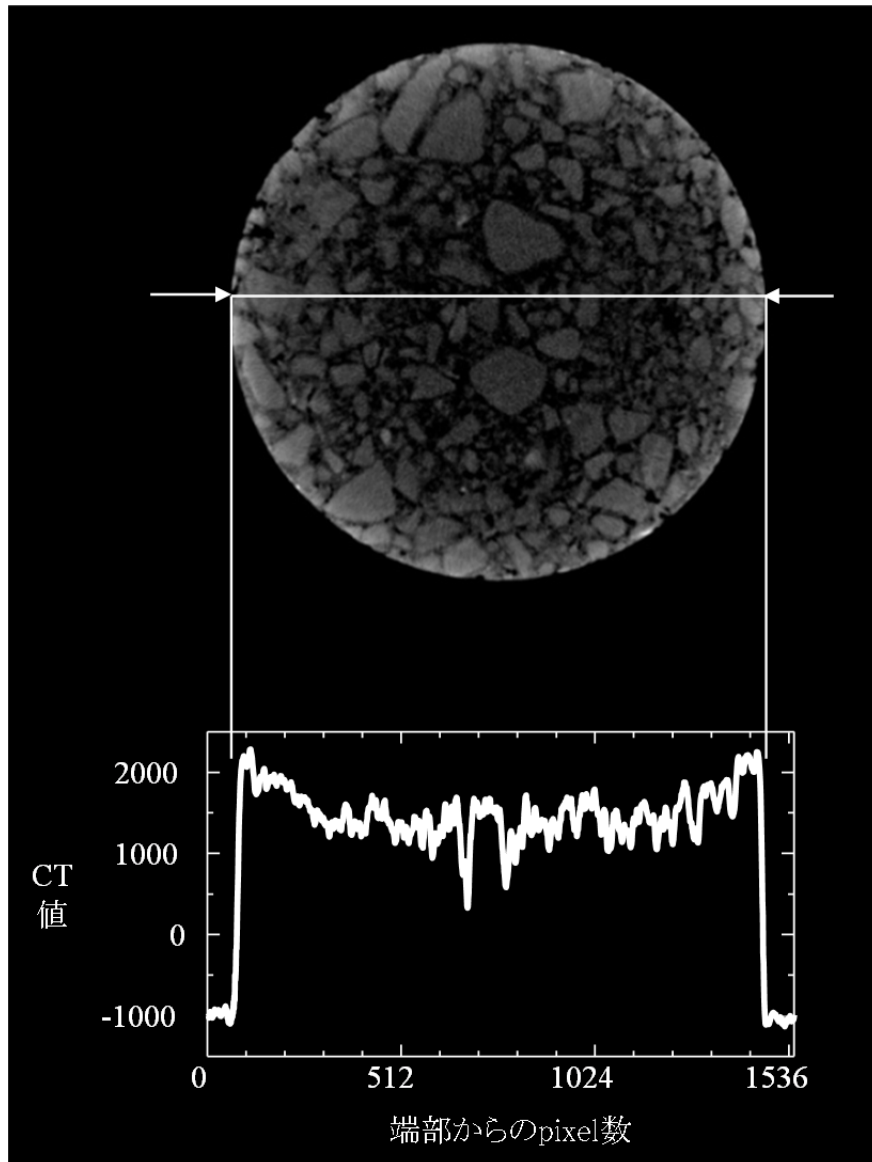
4.2 撮影条件の検討^{5),6)}

第3章3.2.4で述べたとおり，X線CT撮影条件はビームハードニング現象が起きず，カップリング現象によるCT値分布形状が鍋底型を示さないような撮影条件を採用する必要がある。そこで，直径101.6mm，高さ68.7mmの密粒度アスファルト混合物（写真－4.1）による予備撮影を実施した。

はじめに，起電力150kV，設定スライス厚1.0mmで撮影した。図－4.1より供試体の縁の部分が供試体内部と比べてより白く見えており，X線ビームハードニング現象が起きていることがわかる。図中には白い矢印で示す直径方向のCT値分布形状を併せて示している。供試体端部に近いほどCT値が高く，供試体中心部に近いほど低くなっていて，CT値分布の形状が鍋底型を示す「カップリング効果」を確認した。



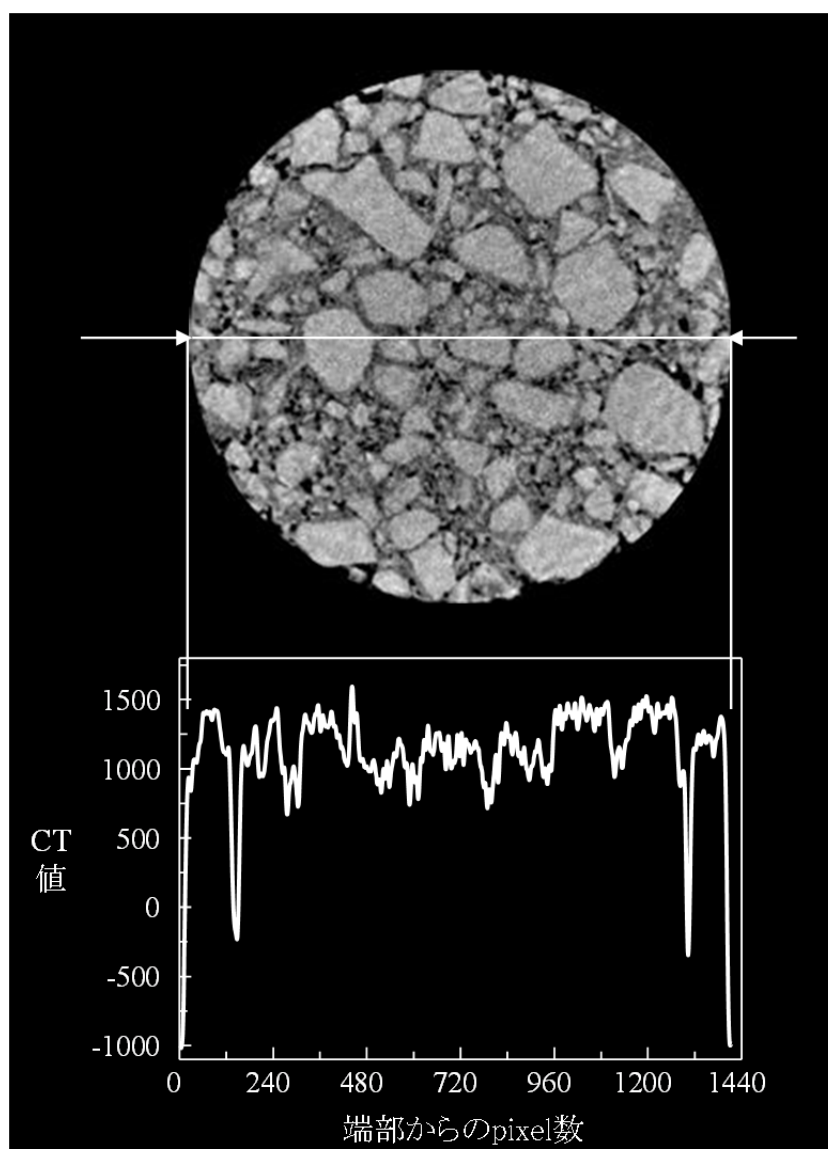
写真－4.1 アスファルト混合物供試体



図－4.1 起電力150kVにおけるアスファルト混合物の撮影画像とCT値の分布⁵⁾

一方，起電力を300kVに上げた場合には，図－4.2に示すようにCT値分布形状は鍋底型を示しておらず，カップング効果が発生していないことを確認した。

そこで，本研究においては撮影条件を表－4.1のとおり設定した．なお，素材についてはアスファルト混合物より直径が50mmと小さいこと，粗骨材と細骨材の境界が2.36mmであることから起電力を250kV，設定スライス厚を2.0mmとした．アスファルト混合物については，細骨材の抽出も考慮し，起電力を300kV，設定スライス厚を1.0mmとした．



図－4.2 起電力300kVにおけるアスファルト混合物の撮影画像とCT値の分布⁶⁾

表－4.1 X線CT撮影条件

	素材	アスファルト混合物
起電力	250kV	300kV
スライス厚	2.0mm	1.0mm
撮影領域	φ150mm	
画像再構成マトリクス数	2048×2048ピクセル	
ボクセルサイズ（空間分解能）	0.073×0.073×2.0mm ³	0.073×0.073×1.0mm ³

撮影位置を図-4.3に示す⁷⁾。素材は粗骨材，細骨材，石粉およびストアス（写真-4.2）を，胴径50mmのポリカーボネード瓶に高さ55mmまで充填したことから，底面より10mm，25mm，40mmの位置にX線を照射した。密粒度および粗粒度は直径101.6mm，高さ68.7mmの円柱供試体を用いていることから，10.0mm，21.5mm，34.3mm，46.4mm，58.7mm，ポーラスは直径101.6mm，高さ61.2mmの円柱供試体を用いていることから10.0mm，20.3mm，30.6mm，40.9mm，51.2mmの位置にX線を照射した。

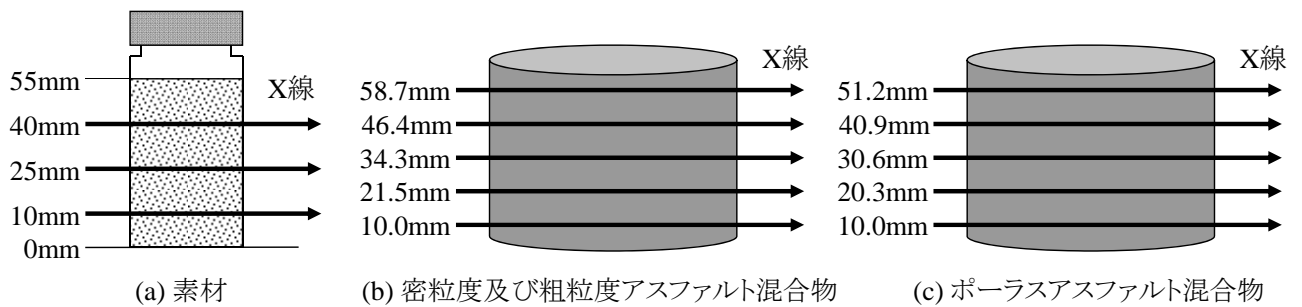


図-4.3 X線照射位置⁷⁾

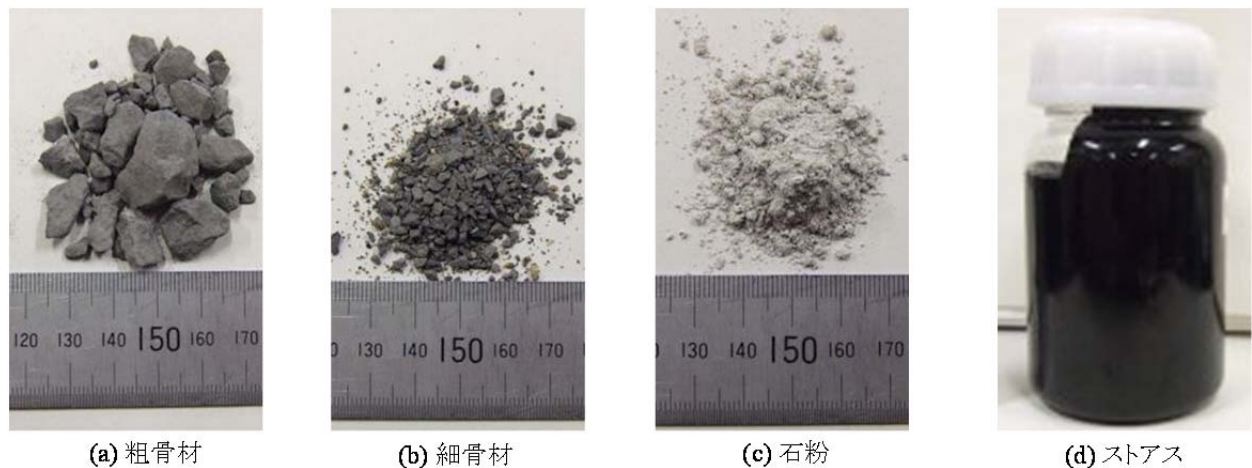


写真-4.2 素材

4.3 構成素材の内部特性の評価^{5),7),8)}

4.3.1 構成素材の概要

粗骨材については、JIS A 5001『道路用砕石』⁹⁾に準拠した図-4.4の粒度分布を有する6号砕石および7号砕石を、細骨材については、図-4.5の粒度分布を有するスクリーニングス、砕砂および細砂を表-4.2の配合率に基づいて充填した。粗骨材および細骨材の合成粒度はそれぞれ図-4.4および図-4.5に示される。また、『舗装調査・試験法便覧』¹⁰⁾により実施した密度試験結果および各供試体内の密度計算結果を表-4.3に示す。

石粉については、表-4.4に示すJIS A 5008『舗装用石灰石粉』¹¹⁾の基準を満たすものを使用し、表-4.2のとおり全骨材中5%を配合した。試験成績表に示された密度は2.770g/cm³であった。

アスファルトにはストアス、PMA-II等の種類があるが、素材のX線CT撮影においては、ポリマー等の影響を排除することからストアスを採用した。ストアスの密度はJIS K 2207『石油アスファルト』¹²⁾に基づいて測定した結果、1.041g/cm³であった。

表-4.2 骨材配合率

粗骨材		細骨材			石粉
6号砕石	7号砕石	スクリーニングス	砕砂	細砂	
36.5%	20.0%	11.5%	14.5%	12.5%	5.0%

表-4.3 骨材の密度

	粗骨材		細骨材		
	6号砕石	7号砕石	スクリーニングス	砕砂	細砂
密度試験値(g/cm ³)	2.690	2.697	2.661	2.669	2.729
供試体密度(g/cm ³)	2.692		2.686		

表-4.4 石粉の粒度

ふるい目開き	粒度規格(JIS A 5008)	通過質量百分率
0.6mm	100%	100%
0.15mm	90~100%	97.0%
0.075mm	70~100%	80.9%

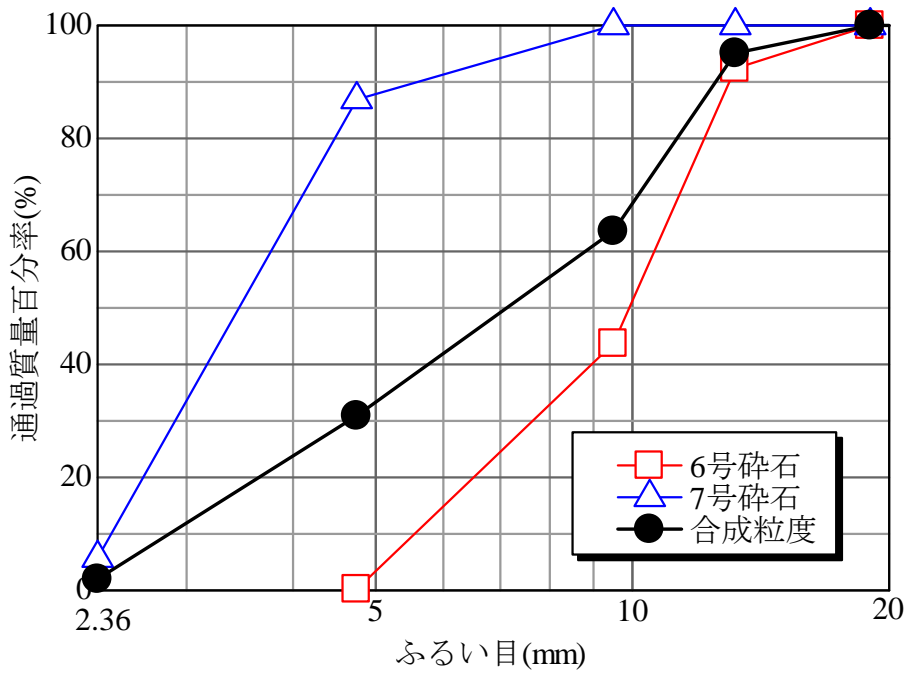


図-4.4 粗骨材の粒度分布曲線

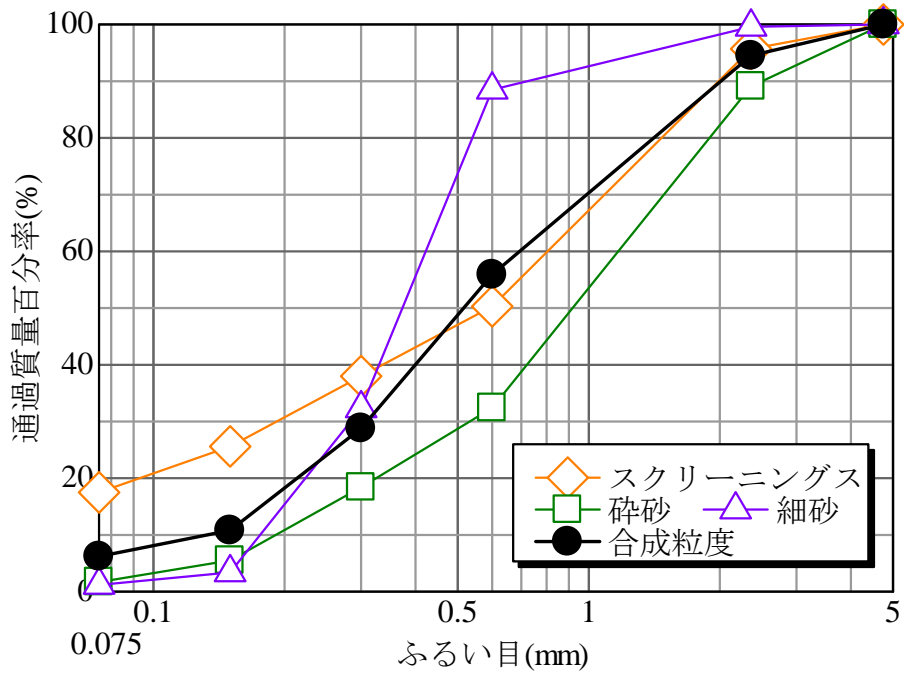


図-4.5 細骨材の粒度分布曲線

4.3.2 構成素材のCT値特性評価

はじめに粗骨材、細骨材および石粉の粒径と、ボクセルサイズ ($0.073 \times 0.073 \times 2.0\text{mm}^3$) の関係を図-4.6に示す¹³⁾。図-4.4より、粗骨材の98%以上が粒径2.36mm以上の粒子であることから、粗骨材の粒径とボクセルサイズは図-4.6(a)の関係となる。また、図-4.5より、細骨材の94.5%が2.36mmふるいを通過するが、93.8%が0.075mmふるいに残留するため、細骨材の粒子は図-4.6(b)のように複数のボクセルにまたがって存在することとなる。さらに、表-4.4より石粉の80.9%が0.075mmふるいを通過することから、石粉は図-4.6(c)のようにボクセル内に粒子として存在する形となる。

粗骨材のX線CT画像を図-4.7に、CT値ヒストグラムを図-4.8に示す。粗骨材のCT画像は、骨材の形状および空隙の存在がはっきりと確認できる。また、CT値ヒストグラムから、粗骨材のCT値ヒストグラムは双峰性を示しており、CT値が-1,000前後の範囲が空隙を、1,500~1,600前後の範囲が粗骨材を表わしていると考えられる。これは、CT画像からもわかるように、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していること、図-4.6(a)が示すように、粗骨材の粒子がボクセルを包含することにより粗骨材のピークが発生したことによると考えられる。ボクセル数の最大値は空隙で650程度、粗骨材で500程度となっているが、空隙と粗骨材の間を示すCT値の頻度も100程度あり、骨材と空隙の両方を含有するボクセルが相当数あることを示している。

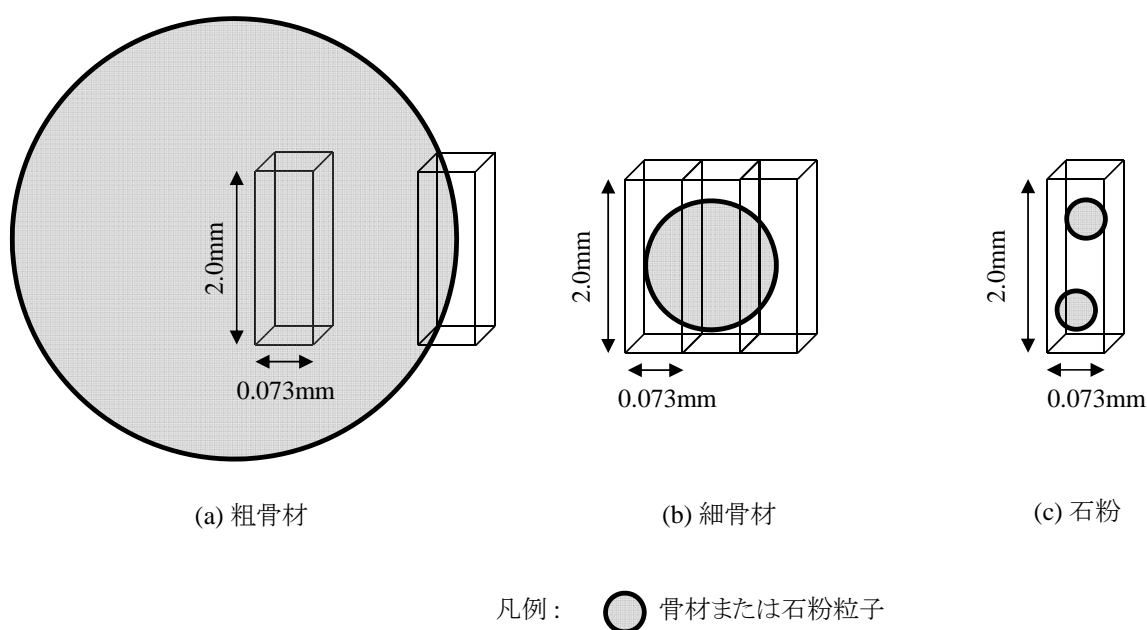


図-4.6 骨材および石粉の粒径とボクセルサイズの関係¹³⁾

細骨材のX線CT画像を図-4.9に、CT値ヒストグラムを図-4.10に示す。細骨材のCT画像は、一部で密度の高い砂粒子が確認されるものの、大部分がグレーで覆われている。細骨材のCT値ヒストグラムは、粗骨材とは異なり、ボクセル数が最大となるCT値（以下、ピークCT値）が600～700の間に存在する単峰性を示している。また、ピーク値のボクセル数は最大で1,300程度となっており、粗骨材よりも多くなっている。これは細骨材の粒径が小さいため、骨材間の空隙を充填できているからであると考えられる。また、通常CT値と密度は比例関係にある。しかし、表-4.3より粗骨材と細骨材の密度はほぼ同じであるのに対して、ピークCT値の差が大きい。これも粒径が影響しているものと推測される。表-4.1で示したように、X線CTの空間分解能が $0.073 \times 0.073 \times 2.0\text{mm}^3$ であるのに対し、細骨材は大部分が粒径2.0mm以下であり、図-4.6(b)が示すように、複数のボクセルが細骨材粒子を包含することから、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。そのため、空隙部分に影響されて各ボクセルのCT値が低くなり、このようなCT値ヒストグラムになるのではと考えられる。また、X線CT画像の大部分のグレーの部分は、細骨材の粒子と空隙が混在しているものと考えられる。さらに、容器の底に近い断面のCT値ヒストグラムほど大きな頻度値を取っているのは、小さな粒子が重力の影響により容器の底の方に溜まるためと考えられる。

石粉のX線CT画像を図-4.11に、CT値ヒストグラムを図-4.12に示す。双方から、容器の底部に近いほどCT値が高くなる傾向があり、ピークCT値は250～500の間に存在している。X線CTの空間分解能は $0.073 \times 0.073 \times 2.0\text{mm}^3$ であるのに対し、表-4.4より石粉の約80%が0.075mm以下の粒子が占めており、図-4.6(c)が示すように、1つのボクセルが石粉粒子を包含している。そのため、石粉を粒子として判別するのはほとんど不可能である。また、CT値に関してはボクセル内に石粉粒子が多ければ高くなるが、反対に少なければ低くなる。さらに、石粉は粗骨材および細骨材に比べ分布が狭く、ピークCT値におけるボクセル数は最大4,000程度となっている。したがって、粉末状の小さい粒子で構成されている材料である石粉は、重力の影響により容器の底の方に溜まりやすい（密になりやすい）ということ、石粉粒子と空隙がほぼ同じ割合でボクセル内に分布していることを示しているものと考えられる。

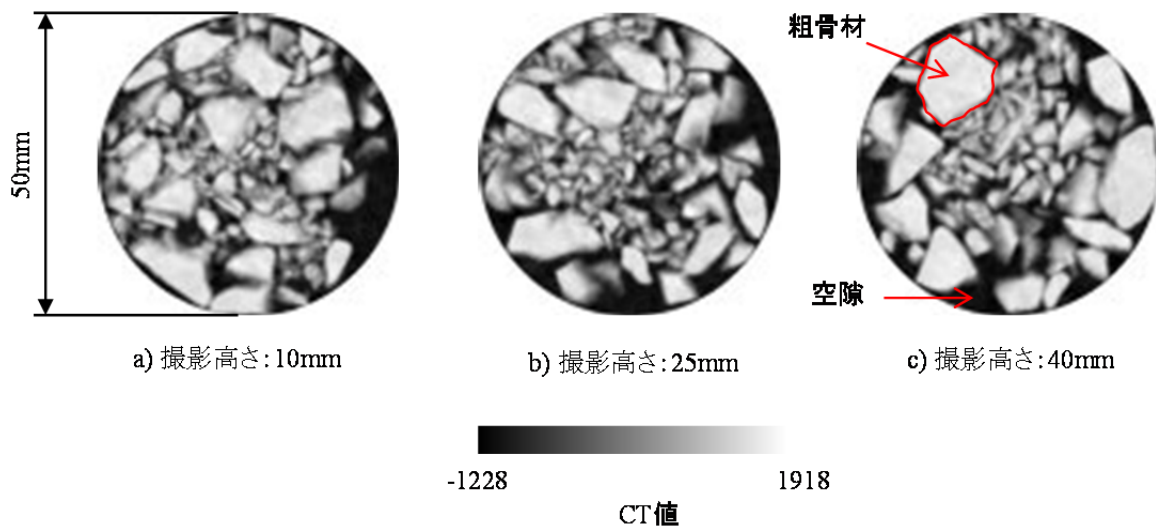


図-4.7 粗骨材のX線CT画像

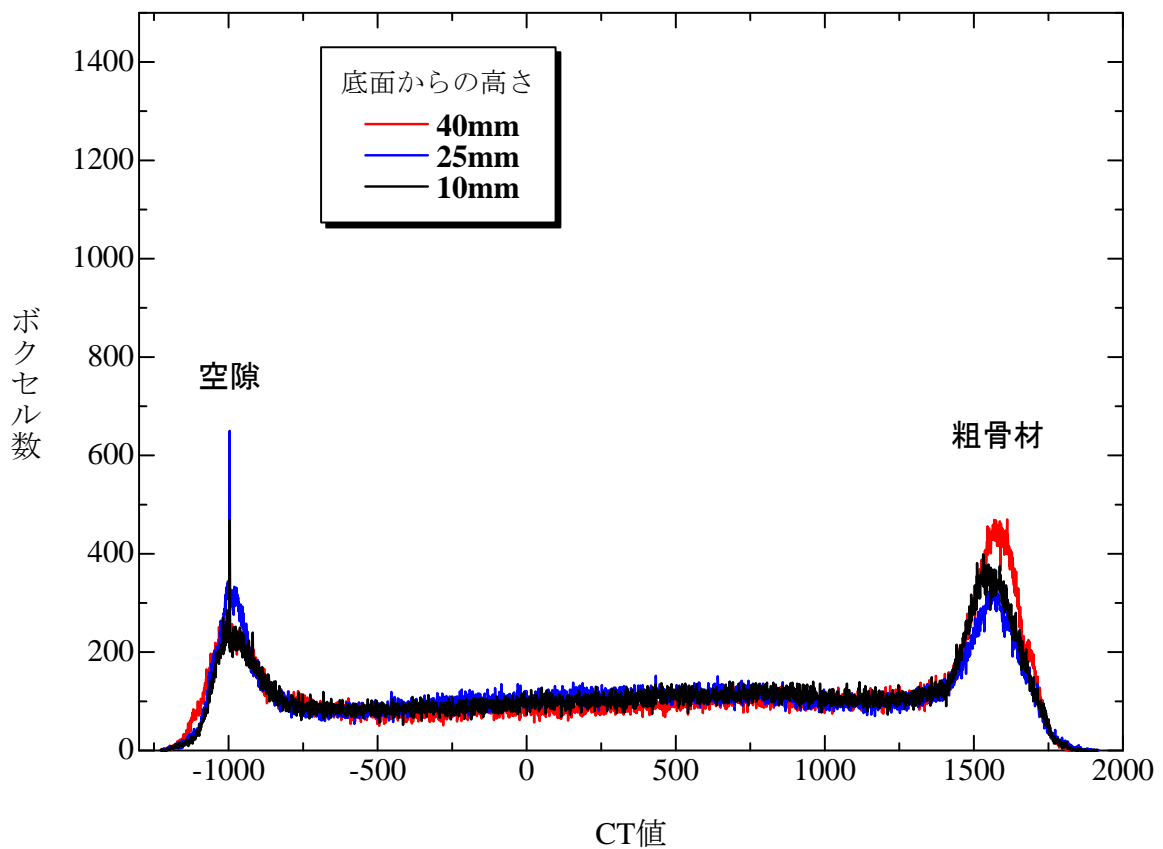


図-4.8 粗骨材のCT値ヒストグラム

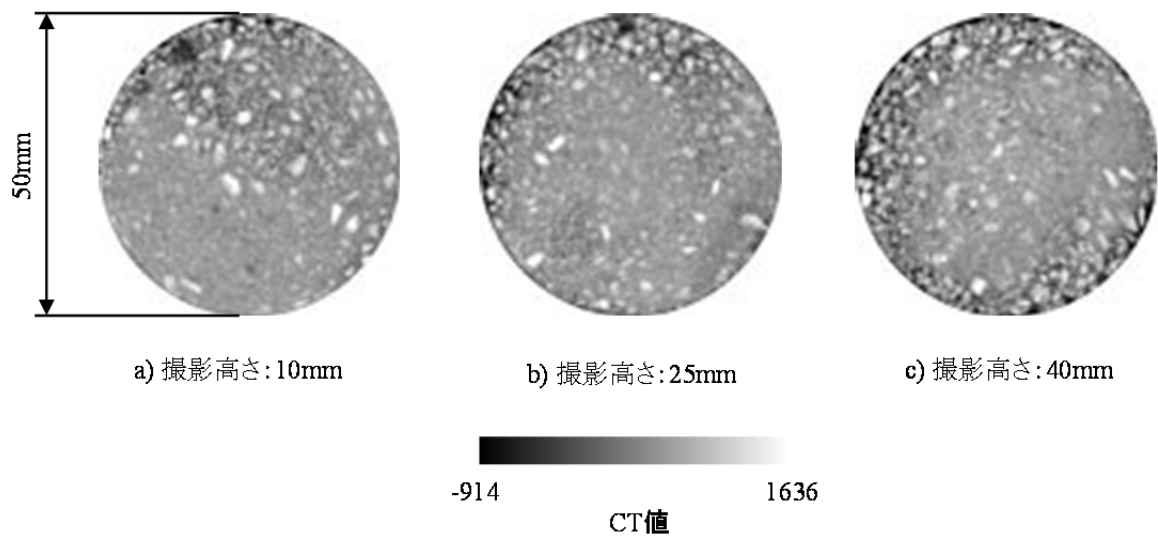


図-4.9 細骨材のX線CT画像

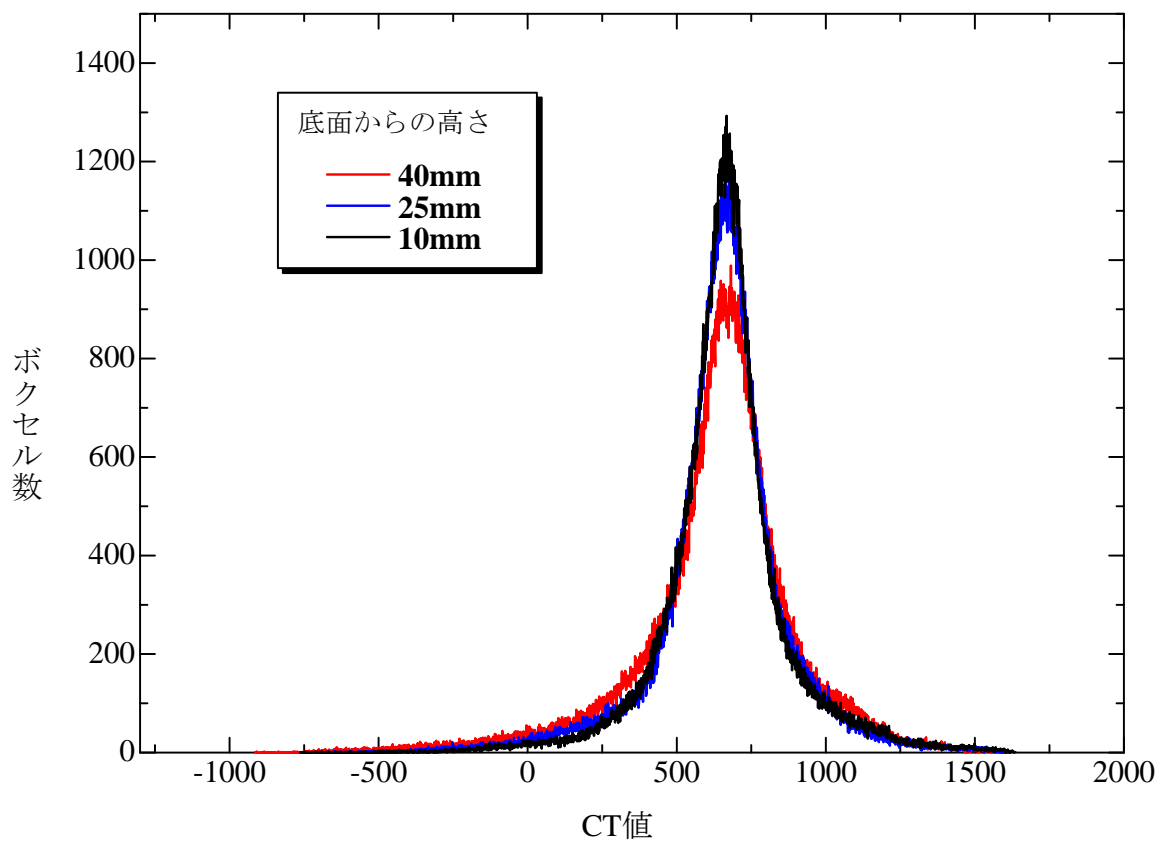


図-4.10 細骨材のCT値ヒストグラム

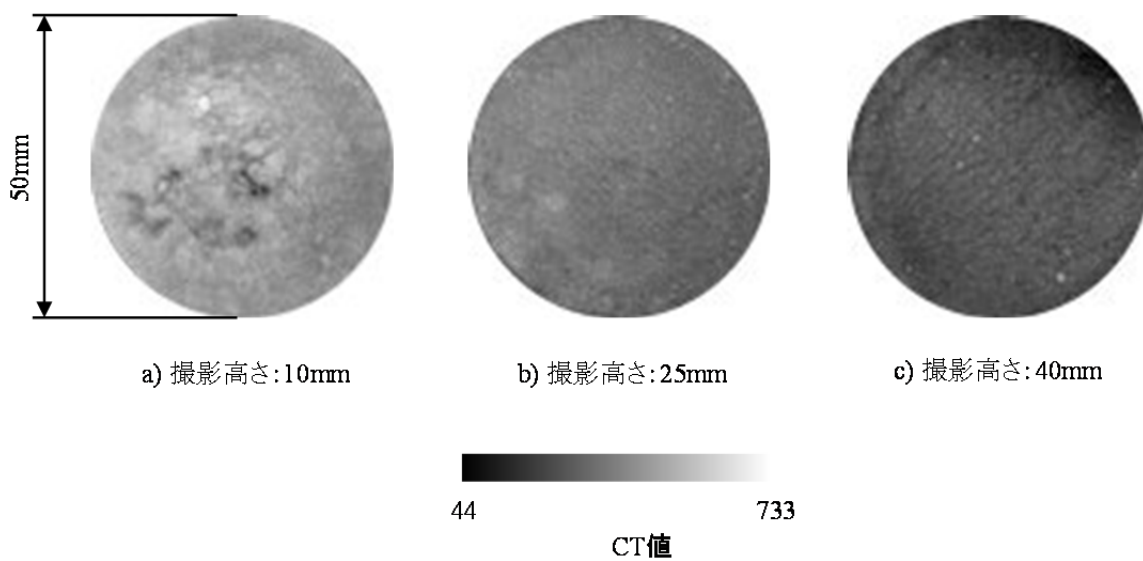


図-4.11 石粉のX線CT画像

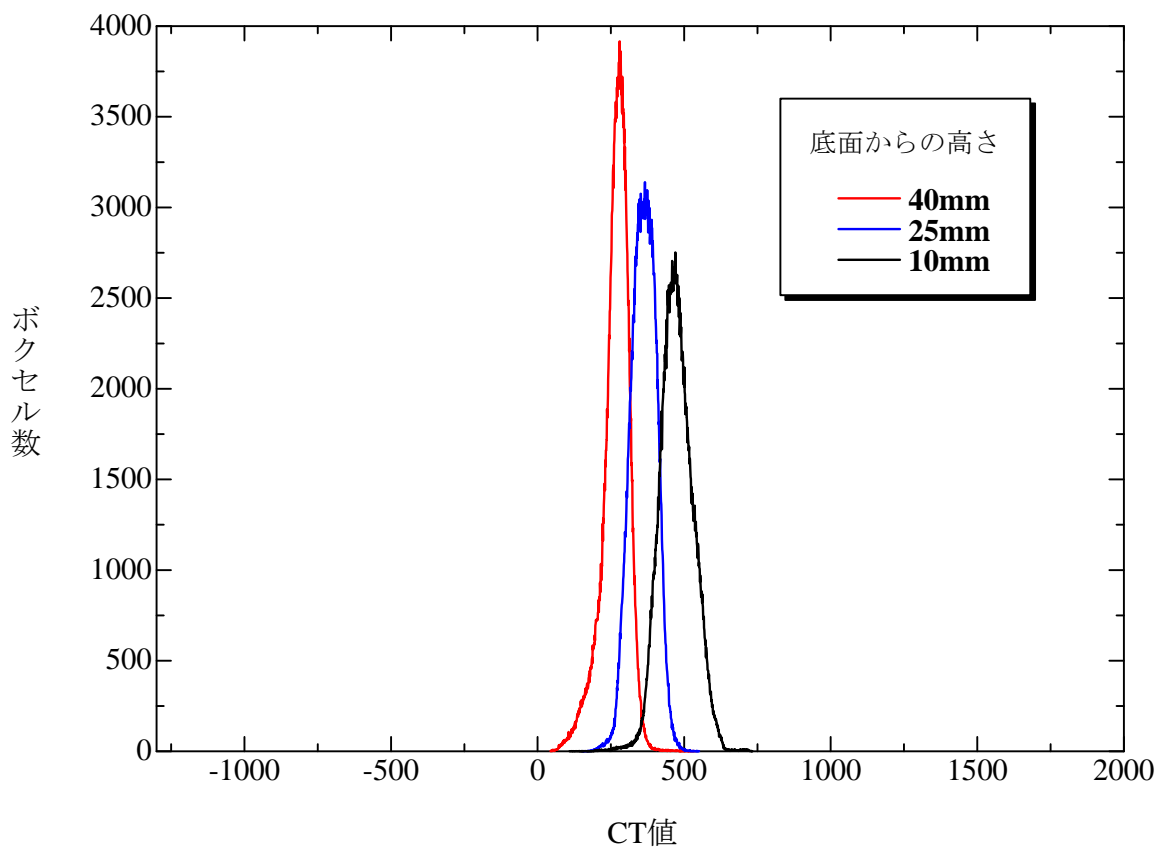


図-4.12 石粉のCT値ヒストグラム

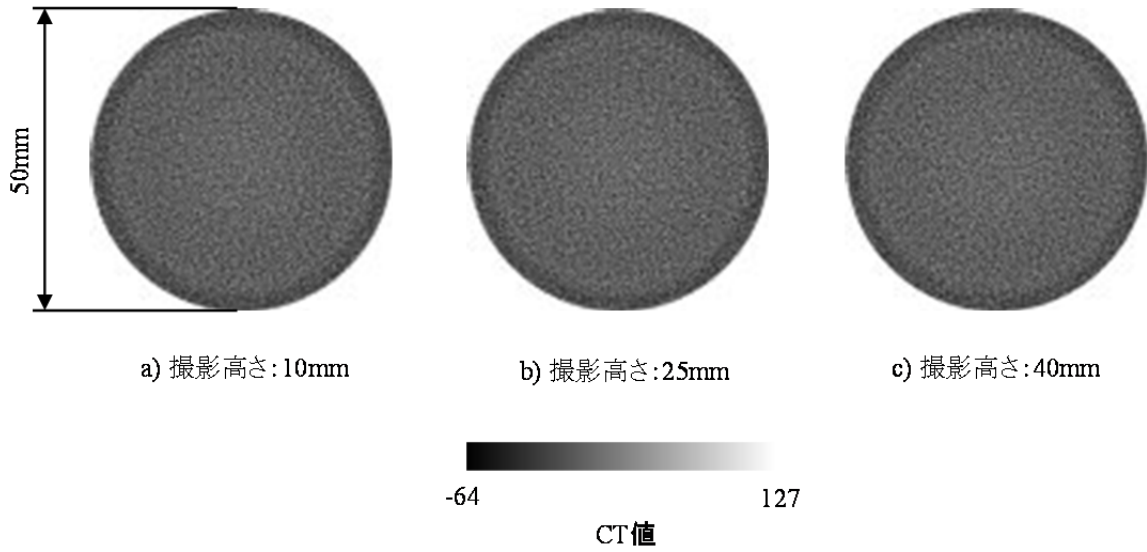


図-4.13 ストアスのX線CT画像

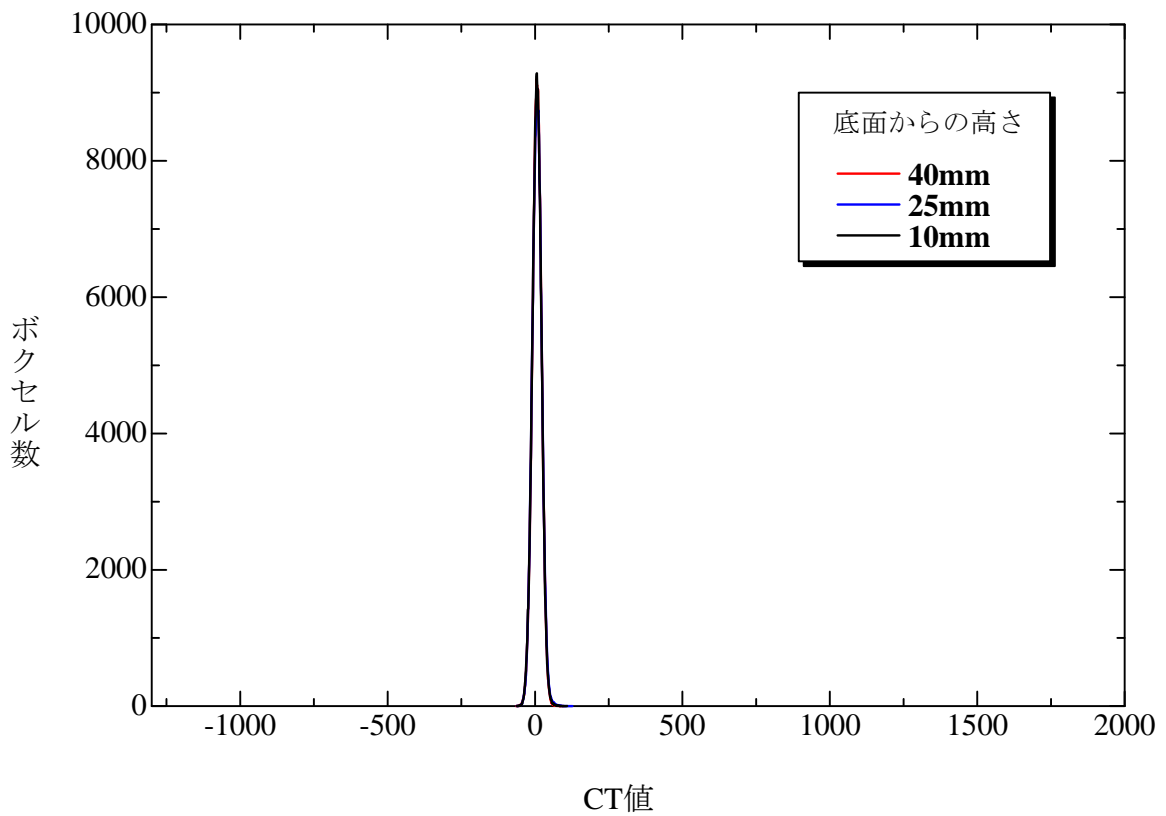


図-4.14 ストアスのCT値ヒストグラム

ストアスのX線CT画像を図-4.13に、CT値ヒストグラムを図-4.14に示す。ストアスのCT画像は、密度の高い部分と密度の低い部分が点在しているように見える。密度の低い部分に石粉が入り込むことによって、アスファルト混合物の安定性および耐久性の向上が図られているものと考えられる²⁾。ストアスのCT値ヒストグラムは、3本の線が重なっていると同時に、CT値が-35~50の間に99%以上のボクセルが存在し、骨材と比較した場合には非常に狭い範囲に分布している。また、ボクセル数の最大値が9,500程度となっている。これはアスファルトが均質な材料であることを示すものである。ピークCT値の平均を求めた結果は6.5となる。通常、密度1.0g/cm³の水のCT値は0である¹⁴⁾。水の密度と近い密度をもつアスファルト（密度：1.041g/cm³）のCT値は水と近い値を示している。

これらの各素材のCT値特性を踏まえ、次節でアスファルト混合物の内部特性について評価を行う。

4.4 アスファルト混合物の内部特性の評価

4.4.1 アスファルト混合物の概要^{6)~8),15),17)~20)}

本研究では表-4.5の実験計画表に基づき、密粒度、粗粒度およびポーラスについてX線CT撮影を実施した。密粒度ストアスについては最適アスファルト量（5.5%）を中心として、4.5~6.5%の0.5%刻みで設定するとともに、粗粒度、ポーラスは最適アスファルト量の5.0に設定した。使用したアスファルトは、密粒度がストアスおよびPMA-II、粗粒度がストアス、ポーラスがPMA-Hである。これにより、アスファルト量による違い、アスファルトの種類の違いおよび骨材配合率の違いについて検討する。

各アスファルト混合物の合成粒度を図-4.15に、体積比率を表-4.6に、密度を表-4.7に示す。また、アスファルトの主な物理性状を表-4.8に示す。

なお、X線CT撮影は以下の順序で行われた。はじめに、アスファルト量による違いを確認するため、No.1~No.5のX線CT撮影を実施した（以下、Stage1）。次に、アスファルトの種類の違いを確認するため、No.2およびNo.6のX線CT撮影を（以下、Stage2）、最後にアスファルト混合物の種類、すなわち骨材配合率の違いを確認するため、No.2、No.7およびNo.8のX線CT撮影を実施した（以下、Stage3）。

表-4.5 実験計画表

混合物の種類	アスファルトの種類	骨材配合率			アスファルト量				
		粗骨材	細骨材	石粉	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
密粒度	ストアス	56.5%	38.5%	5.0%	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
	PMA-II				No.6				
粗粒度	ストアス	72.0%	23.0%	5.0%	No.7				
ポーラス	PMA-H	84.0%	11.0%	5.0%	No.8				

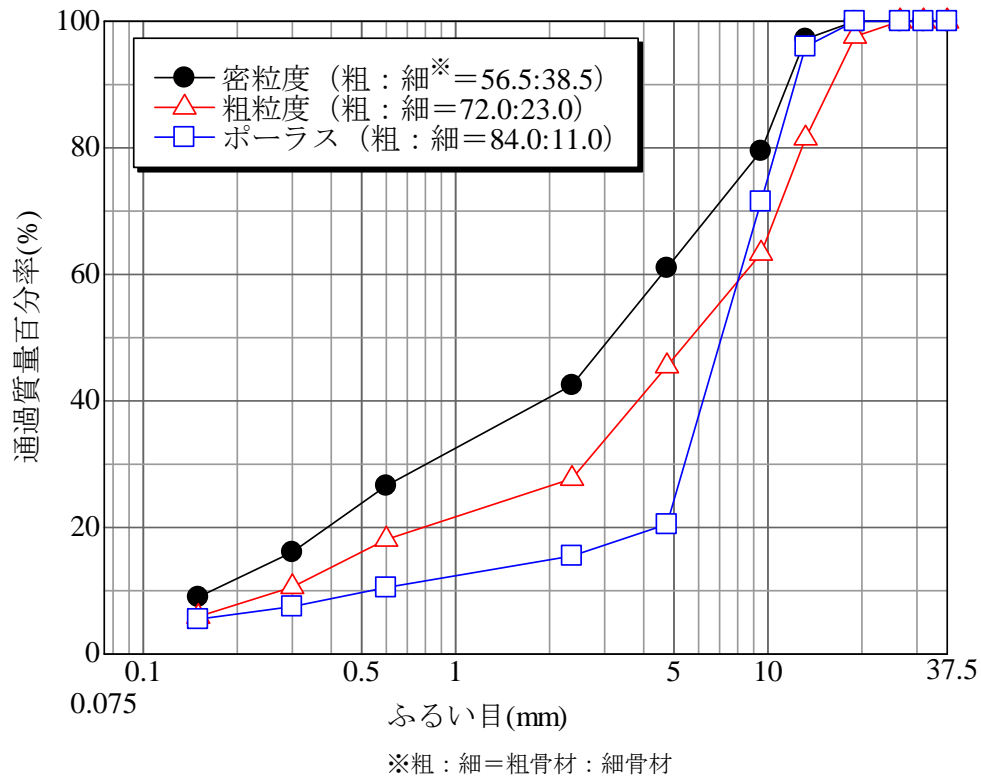


図-4.15 アスファルト混合物の合成粒度

表-4.6 各アスファルト混合物の体積比率

No.	粗骨材	細骨材	石粉	アスファルト	空隙
1	47.2%	32.2%	4.0%	10.1%	6.5%
2	47.0%	32.1%	4.0%	11.3%	5.6%
3	47.2%	32.2%	4.0%	12.6%	4.0%
4	47.1%	32.3%	4.1%	13.9%	3.6%
5	47.0%	32.1%	4.1%	14.9%	1.9%
6	47.1%	32.2%	4.0%	11.6%	5.1%
7	60.5%	19.3%	4.0%	11.4%	4.8%
8	60.3%	7.7%	3.4%	9.8%	18.8%

表－4.7 各アスファルト混合物の密度

No.	密度	No.	密度
1	2.349g/cm ³	6	2.366g/cm ³
2	2.360g/cm ³	7	2.381g/cm ³
3	2.388g/cm ³	8	2.024g/cm ³
4	2.393g/cm ³		
5	2.398g/cm ³		

表－4.8 アスファルトの主な物理性状

物理性状	ストアス	PMA-II	PMA-H
密度(g/cm ³)	1.041	1.030	1.031
針入度(1/10mm)	65	66	66
軟化点(°C)	47.6	87.4	89.2
60°C 粘度(Pa·s)	1.94×10 ²	4.14×10 ⁴	1.42×10 ⁵

4.4.2 アスファルト混合物のCT値特性指標¹⁵⁾

アスファルト混合物のCT値特性指標としては、しきい値、断面平均CT値、各素材の平均CT値が挙げられる。以下にそれぞれの概要について述べる。

(1) しきい値

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＋石粉および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値は大きくなり、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。

Zeleelewら¹⁶⁾はアスファルト混合物を空隙、マスチック（アスファルト＋石粉＋細骨材）、骨材の三相に分割するしきい値の決定方法を提案している。一方、本研究では、CT値と密度がほぼ線形関係にあること、また、図－4.8、図－4.10、図－4.12および図－4.14より空隙、アスファルト、石粉、細骨材、粗骨材の順にボクセル数が最大となるCT値が大きくなることから、空隙、アスファルト＋石粉、細骨材、粗骨材の四相に分割することを試みる。なお、アスファルト＋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³¹⁾、また、石粉は約80%が75μm以下の粒子であり、X線CT画像の空間分解能(0.073×0.073×1.0mm³)では粒子として判断できないためである。

以下にアスファルト混合物のしきい値算出方法について示す¹⁵⁾。なお、今回は各素材の体積率があらかじめ判明していることから、p-タイル法を用いる。図－4.16に示すように、空隙の面積を S_1 、アスファルト＋石粉の面積を S_2 、細骨材の面積を S_3 、粗骨

材の面積を S_4 ，全体の面積を $S = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4)$ とする．また，空隙率を v_v ，アスファルト+石粉の体積率を v_a ，細骨材の体積率を v_s ，粗骨材の体積率を v_g とする．CT値の低い方から面積を求め， S_1 を S で割った値が v_v となるCT値を空隙とアスファルト+石粉のしきい値(以下，しきい値1： T_1)， S_2 を S で割った値が v_a となるCT値をアスファルト+石粉と細骨材のしきい値(以下，しきい値2： T_2)， S_3 を S で割った値が v_s となるCT値を細骨材と粗骨材のしきい値(以下，しきい値3： T_3)とする．

なお，p-タイル法は，アスファルト混合物の各素材の体積率が既知の場合に適用可能であり，各々のしきい値は，各素材が既知の体積率に基づいて配合されているという前提で算出される．しかし，アスファルト混合物に含まれる骨材は様々な形状をもつため，各供試体断面で必ずばらつきが生じる．そのため，それぞれのしきい値でばらつきが生じる可能性がある．また，既に供用された舗装等，各素材の体積率が未知なアスファルト混合物の供試体には適用ができないことに留意する必要がある．

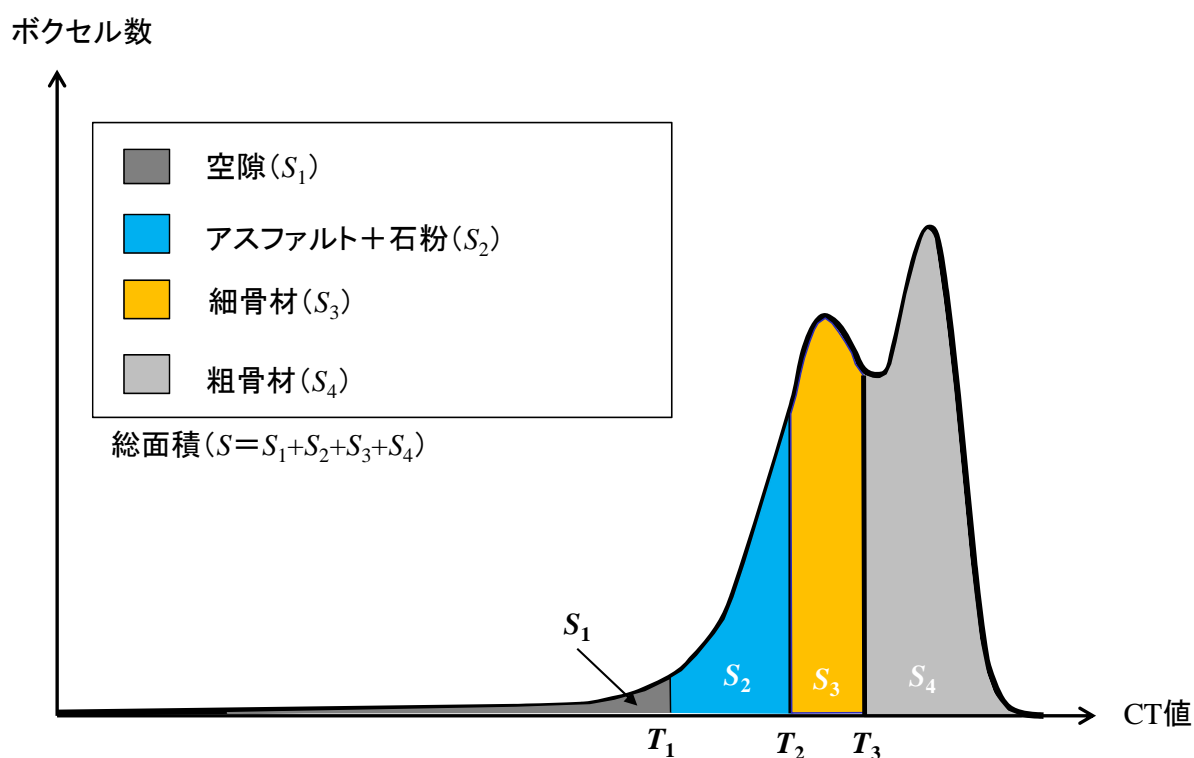


図-4.16 アスファルト混合物におけるp-タイル法の概念¹⁵⁾

(2) 断面平均CT値および各素材平均CT値

混合物全体の密度の傾向を把握するために、断面平均CT値を式-4.1のとおり定義する。

$$CT_{ave} = \sum_{i=CT_{min}}^{CT_{max}} \frac{i \times n_i}{N} \quad (4.1)$$

ここに、

CT_{ave} : 断面平均CT値

CT_{min} : CT値の最小値

CT_{max} : CT値の最大値

n_i : CT値が*i*のときの頻度

N : 総ボクセル数

また、混合物中の各素材の密度の傾向を把握するために、空隙、アスファルト+石粉、細骨材、粗骨材の平均CT値をそれぞれ式-4.2~4.5のとおり定義する。

$$CT_v = \sum_{i=CT_{min}}^{T_1-1} \frac{i \times n_i}{N_v} \quad (4.2)$$

$$CT_a = \sum_{i=T_1}^{T_2-1} \frac{i \times n_i}{N_a} \quad (4.3)$$

$$CT_s = \sum_{i=T_2}^{T_3-1} \frac{i \times n_i}{N_s} \quad (4.4)$$

$$CT_g = \sum_{i=T_3}^{CT_{max}} \frac{i \times n_i}{N_g} \quad (4.5)$$

ここに、

CT_v : 空隙の平均CT値

N_v : 空隙の総ボクセル数

CT_a : アスファルト+石粉の平均CT値

N_a : アスファルト+石粉の総ボクセル数

CT_s : 細骨材の平均CT値

N_s : 細骨材の総ボクセル数

CT_g : 粗骨材の平均CT値

N_g : 粗骨材の総ボクセル数

4.4.3 アスファルト混合物のCT値特性評価

(1) アスファルト量による違い^{6),8),15)~19)}

Stage1 (アスファルト量による違い) で撮影されたCT画像を図-4.17に示す。CT画像より粗骨材の形状や空隙の分布を確認することができる。また、各断面でアスファルト量が増加するにともなって、色の濃い部分、すなわち空隙が徐々に減少している傾向にあることが確認できる。しかし、画像からでは、各構成材料にどのような特性を示すのかを明確に知ることはできない。そこで、各アスファルト混合物のCT値ヒストグラムをもとに、比較し考察を行う。

図-4.18に供試体No.3における高さごとのCT値ヒストグラムを示す。すべての箇所において1,100および1,400付近でピークが発生する双方性が確認された。細骨材の体積率が約32%、粗骨材の体積率が約47%であることから、1,100~1,200付近のピークは細骨材、1,400付近のピークは粗骨材であると考えられる。

ここで、粗骨材および細骨材単体のケースと、粗骨材および細骨材がアスファルト混合物の内部に存在する場合の比較を行う。

粗骨材単体でのピークCT値は図-4.8より1,500~1,600であるが、混合物の場合には1,400付近に低下する。これは、単体の場合には粗骨材粒子がボクセルを包含し(図-4.6(a))、すべてが粗骨材のみで満たされるボクセルが多く存在するが、混合物の場合には、一定の割合で細骨材、石粉、アスファルトが含まれるため、粗骨材のみで満たされるボクセルが減少し、アスファルトや空隙が含まれる粗骨材のボクセルが増加したものと考えられる。

細骨材単体でのピークCT値は図-4.10より600~700であるが、混合物の場合には1,100~1,200に増加する。これは、複数のボクセルが細骨材粒子を包含するため(図-4.6(b))、細骨材単体の場合には、ボクセル内で細骨材の周囲が空隙で満たされているのに対し、混合物の場合には細骨材の周囲にアスファルトおよび石粉が存在するためであると考えられる。

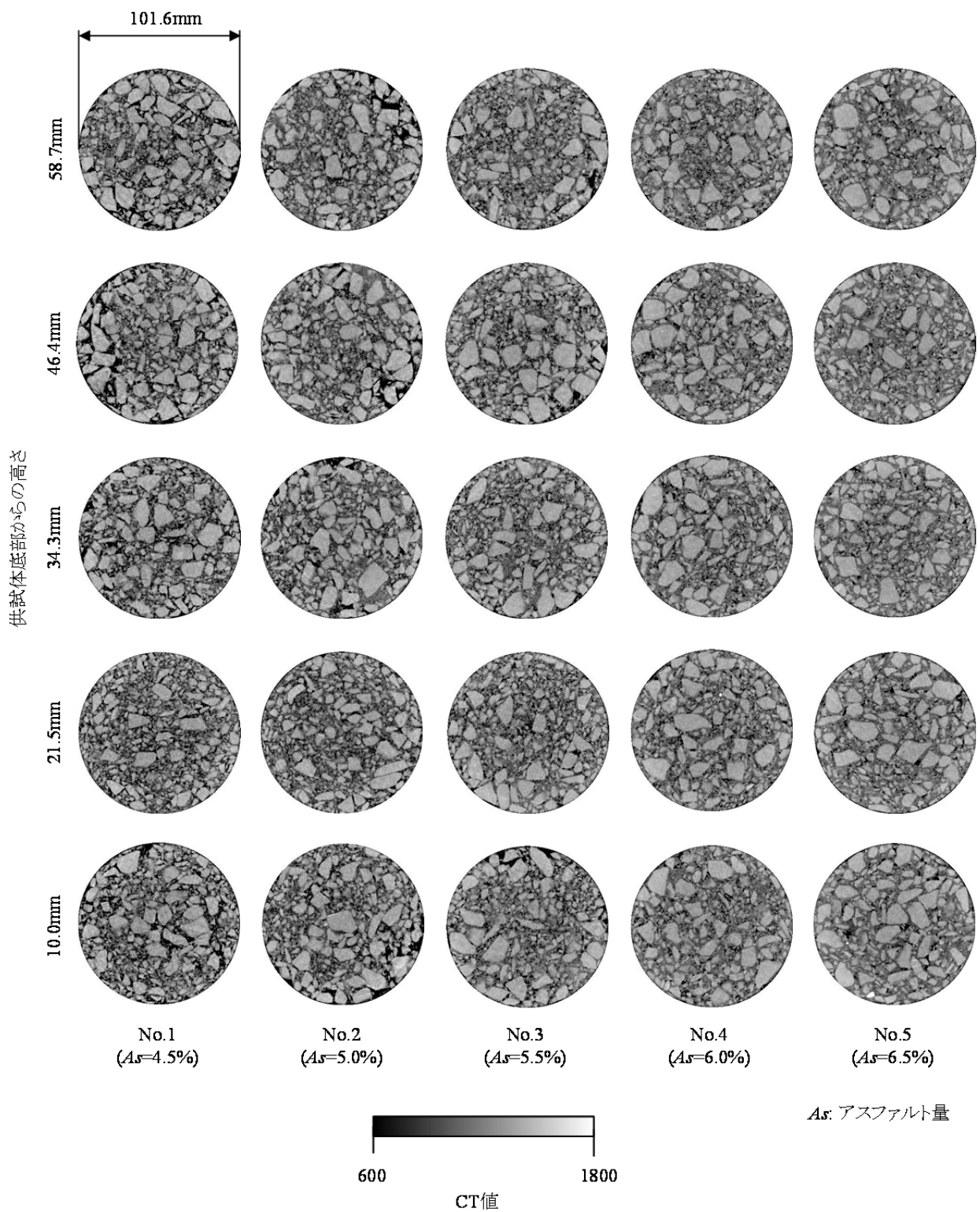


図-4.17 X線CT撮影結果(Stage1 : アスファルト量の違い)

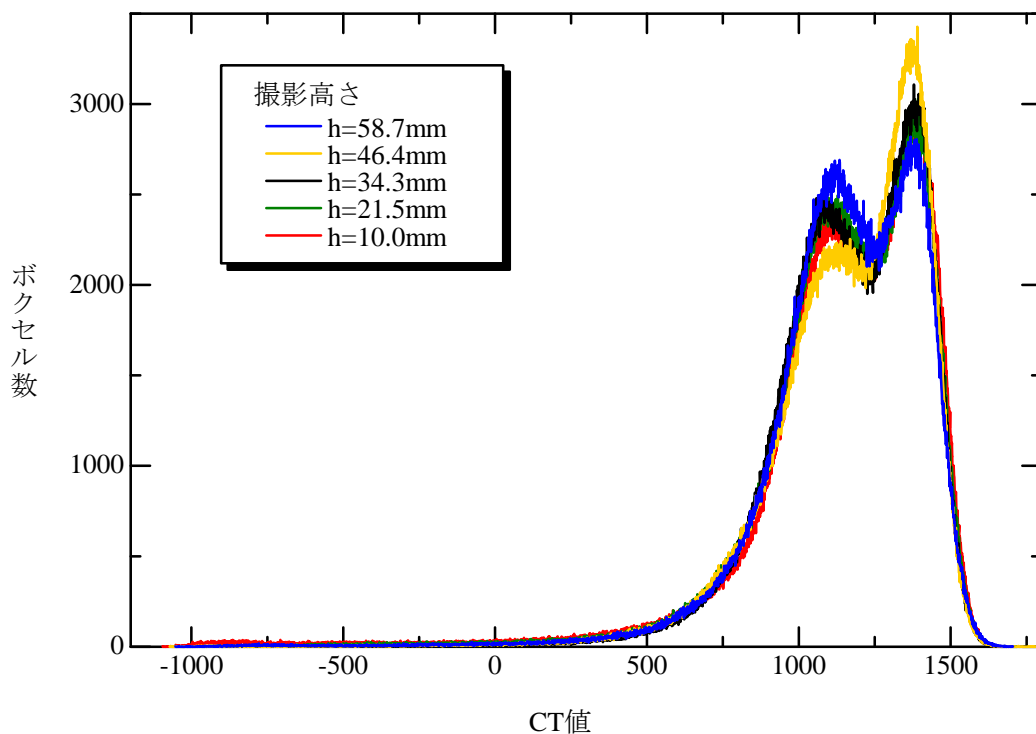


図-4.18 供試体No.3における高さごとのCT値ヒストグラム

アスファルト+石粉および空隙は体積率が小さかったため、骨材のようなピークは見られなかった。

なお、高さごとに骨材や空隙の配置が異なることから、高さごとに分布にばらつきが生じている。以後、5断面平均によって議論することとする。

図-4.19に供試体No.1～No.5における5断面平均のCT値ヒストグラムを示す。図-4.19よりアスファルト量が増加するごとに、CT値が約1,100および約1,400をピークとする双峰性が現れ、逆にアスファルト量が減少するごとに双峰性が崩れることが確認できる。

ここで、CT値を0以下、0～950、950～1,200、1,200以上の4つに区分してCT値分布の傾向を見る。

CT値が0以下のボクセルはほとんど存在しない。これは空隙率が1.9%～6.5%と低く、密に材料が配置されているためであり、 $0.073 \times 0.073 \times 1.0 \text{mm}^3$ のボクセル内にアスファルトや骨材が入り込んでいると考えられる。

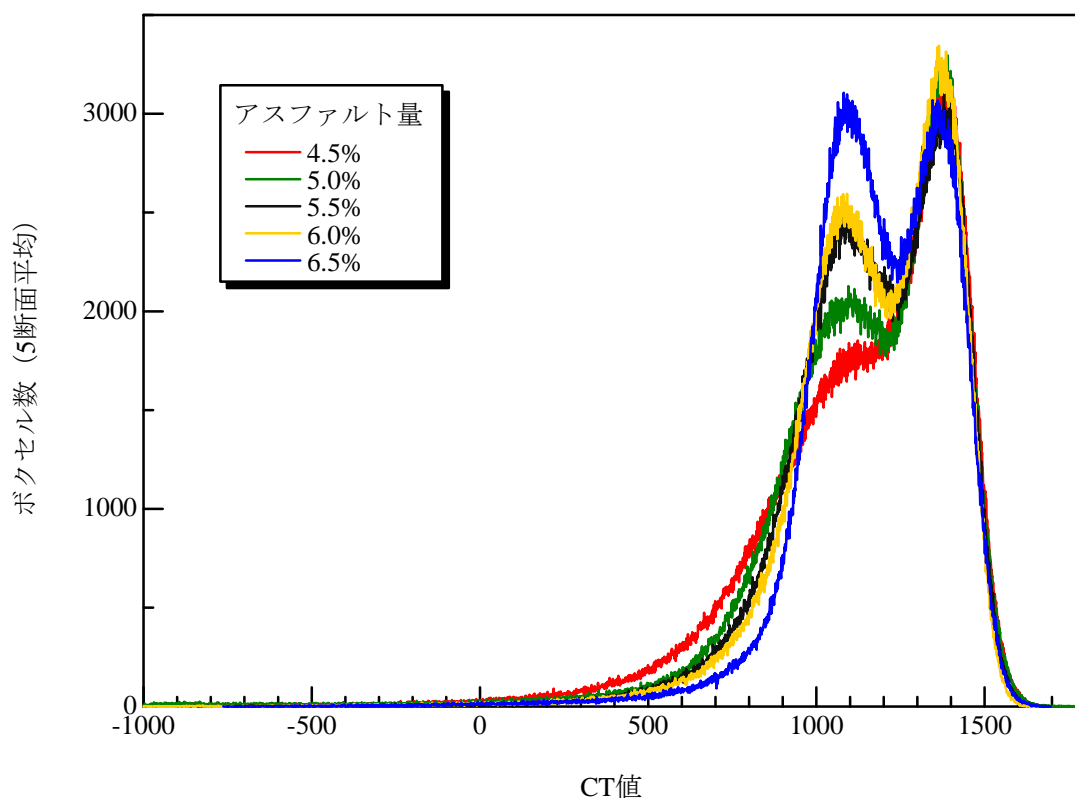


図-4.19 アスファルト量の違いによるCT値ヒストグラム

CT値が0～950のボクセルはアスファルト量が増加するほどCT値の頻度が減少する傾向がある。これは空隙にアスファルトが充填されることにより、CT値が小さいボクセルの頻度が減少していることを意味している。

CT値が950～1,200のボクセルはアスファルト量が増加するほどCT値の頻度が増加する傾向がある。これは、細骨材の粒径は図-4.5より約半数以上が0.6mm以下であることから、スライス厚よりも小さく、図-4.6(b)に示すように、ボクセルの空隙部分にアスファルトが充填されるため、CT値が大きいボクセルが増加したものと考えられる。

CT値が1,200以上のボクセルはアスファルトの増減による大きな変化は見られない。これは粗骨材の体積率が約47%とほぼ一定であり、図-4.6(a)に示すように、ボクセルサイズよりも大きいことからアスファルトが充填されなかったためである。

図-4.16の方法によって算出したしきい値1～3とアスファルト量の関係を図-4.20に示す。

しきい値1は、アスファルト量が5%以下の範囲においてCT値が増加する傾向が見ら

れ、5%以上の範囲においてはCT値が低下する傾向が見られた。これはアスファルト量の低い領域では、アスファルトが入り込むことによってアスファルトの影響が強くなり、そのためしきい値が高くなると考えられる。一方、アスファルト量の高い領域では、空隙そのもののボクセル数が少なくなることにより、**図-4.16**中の S_1 の面積率が小さくなり、それに伴いCT値のしきい値が低くなったものと考えられる。

しきい値2は、アスファルト量が増加するに従って増加する傾向が見られた。これは細骨材の粒径がボクセルサイズ ($0.073 \times 0.073 \times 1.0\text{mm}^3$) を下回るものがあり、その中にアスファルトが入り込むことによって、アスファルトがしきい値に影響を及ぼしたものと考えられる。

しきい値3は、1,210~1,221とほぼ一定の値を示した。これは、しきい値の高い領域では細骨材と粗骨材による支配が大きく、また**表-4.5**に示されるように骨材配合率が一定であったため、アスファルト量による変動がなかったものと考えられる。

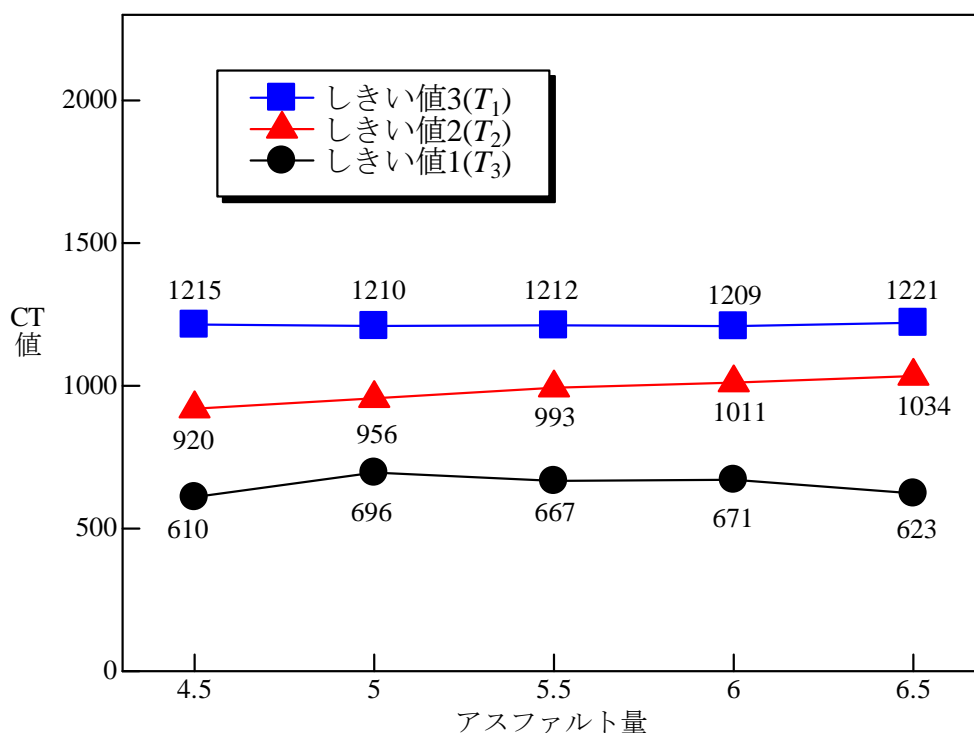
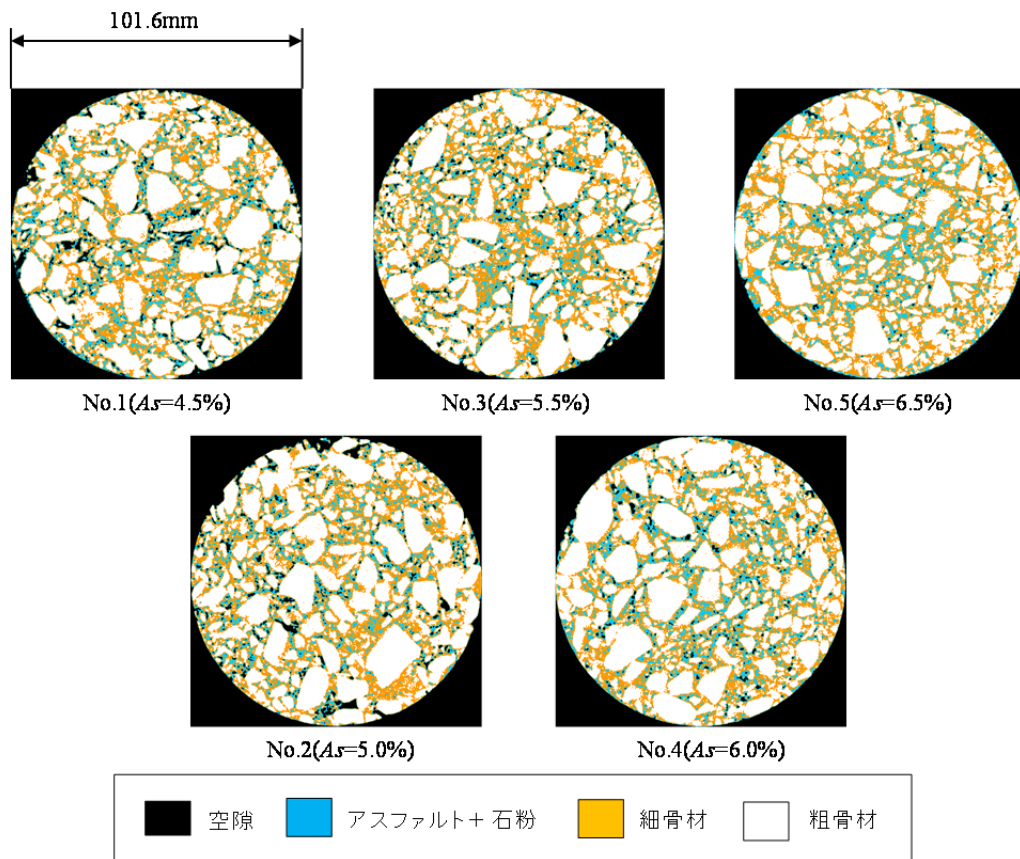


図-4.20 アスファルト量としきい値1~3の関係



※撮影高さ = 34.3mm

図-4.21 アスファルト混合物の4値化画像

図-4.20のしきい値に基づいて、アスファルト混合物の4値化画像を作成した。供試体No.1～5の中央断面における4値化画像を図-4.21に示す。黒色の部分が空隙、水色の部分がアスファルト+石粉、橙色の部分が細骨材、白色の部分が粗骨材をそれぞれ表している。これによって、空隙の部分の面積はアスファルト量が増加するに従い小さくなり、アスファルト量5.5%以上になると空隙がほとんど見られなくなる。一方、アスファルト+石粉の部分の面積はアスファルト量が大きくなるに従って大きくなることわかる。

式-4.1により求めた各供試体の5断面における断面平均CT値とアスファルト量の関係を図-4.22に示す。アスファルト量が増加するに従って断面平均CT値も増加する傾向にある。これはアスファルト量の多い供試体の密度が高くなるため、CT値が高くなるものと考えられる。

そこで、アスファルト混合物の密度と断面平均CT値（5断面平均）の関係を図-4.23に示す。図-4.23は断面平均CT値と密度の相関が高く、線形性が成立していることを

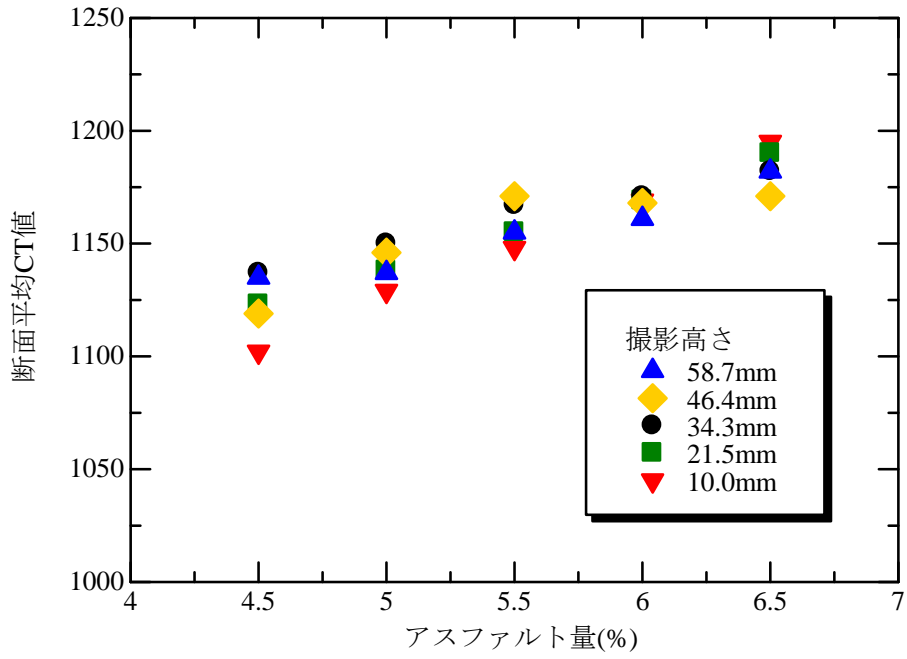


図-4.22 断面平均CT値とアスファルト量の関係

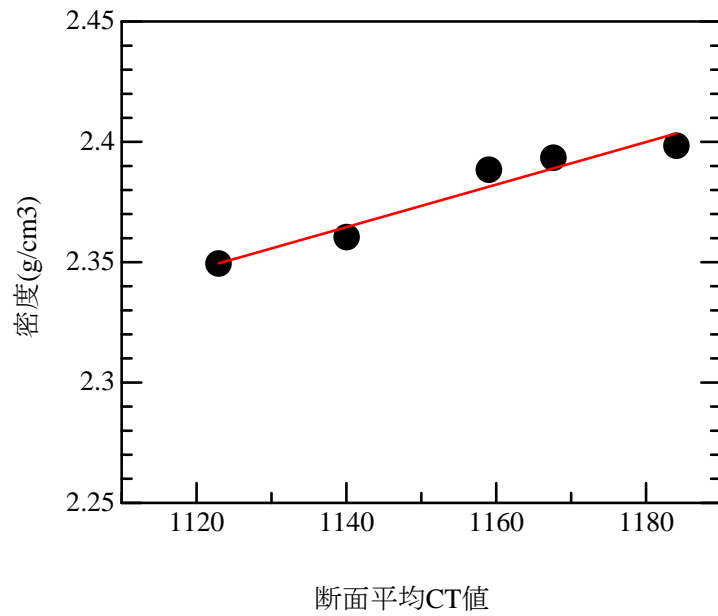


図-4.23 アスファルト混合物の密度と断面平均CT値の関係

示している。また，説明変数を断面平均CT値，目的変数をアスファルト混合物の密度とした場合，回帰式は式－4.6で表され，相関係数は0.970である。これにより，断面平均CT値とアスファルト混合物に大きな相関があることを確認した。

$$\rho_{as} = 8.847 \times 10^{-4} CT_{ave} + 1.356 \quad (1,123 \leq CT_{ave} \leq 1,184) \quad (4.6)$$

ここに，

ρ_{as} : アスファルト混合物の密度

CT_{ave} : 断面平均CT値

式－4.2～5により求めた空隙，アスファルト＋石粉，細骨材および粗骨材の平均CT値（5断面平均）を図－4.24に示す。

空隙については，アスファルト量6.0%より小さい領域では，5.5%で若干減少するものの，アスファルト量の増加に伴ってCT値が高くなる傾向が見られた。一方，6.0%から6.5%では急激な平均CT値の低下が見られた。しきい値1と比べた場合とはピークの位置が異なるものの，アスファルト量とp-タイル法の面積比率が影響したものと見られる。また，空隙のCT値は通常-1,000となるが，密粒度アスファルト構造物は密な構造で有り，空隙と判定されたボクセル内にも骨材やアスファルトが含まれることから，空隙の平均CT値は300～400の値になったと考えられる。

アスファルト＋石粉については，アスファルト量が増加するにしたがってCT値が増加する傾向が見られた。これは，空隙中にアスファルトが入り込んだ影響と考えられる。そこで，説明変数をアスファルト＋石粉の平均CT値，目的変数をアスファルト量として線形回帰分析を行ったところ，回帰式は式－4.7のとおりとなり，相関係数は0.982となった(図－4.25)。これより，アスファルト＋石粉のCT値からアスファルト量を予測できる可能性がある。

$$As = 0.0148CT_a - 7.41 \quad (797 \leq CT_a \leq 906) \quad (4.7)$$

ここに，

As : アスファルト量

CT_a : アスファルト＋石粉の平均CT値

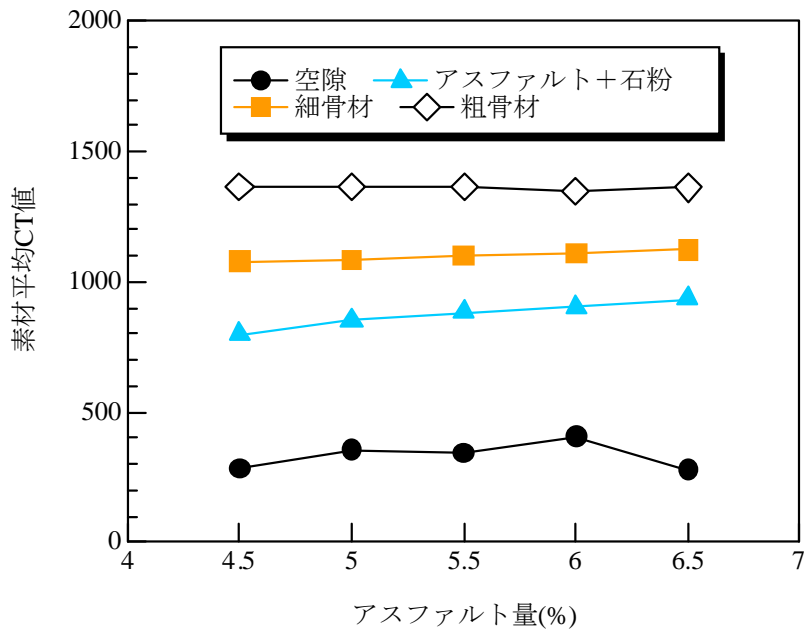


図-4.24 各素材の平均CT値とアスファルト量の関係

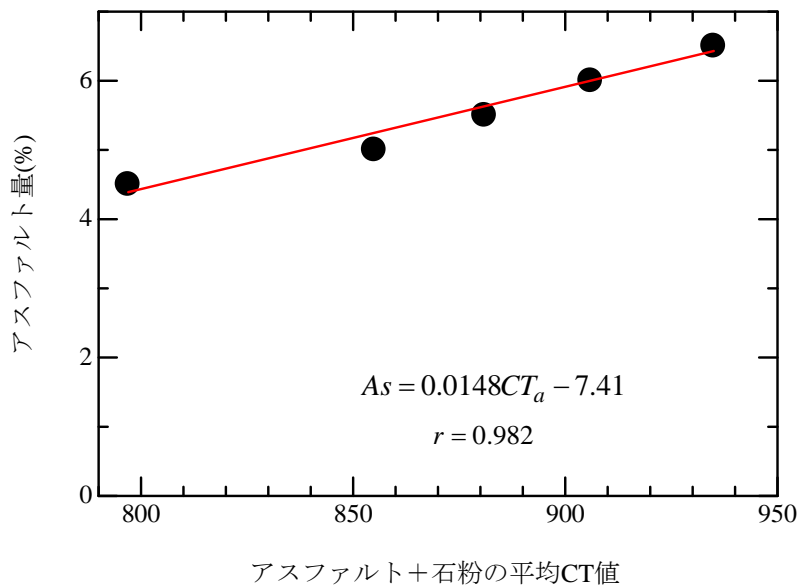


図-4.25 アスファルト量+石粉の平均CT値とアスファルト量の関係

細骨材については、アスファルト量が増加するに従って、CT値が微増する傾向が見られた。これは細骨材のボクセルの中にアスファルトが含まれたためと考えられる。

粗骨材については、しきい値3同様、アスファルト量の変化に対するCT値の大きな変化は見られなかった。

(2) アスファルトの種類による違い^{7),19)}

Stage2 (アスファルトの種類による違い) の中央断面におけるX線CT撮影結果を図-4.26に、5断面平均のヒストグラムを図-4.27に示す。PMA-IIはストアスに比べ、CT値が500~1,000および1,600以上の部分でボクセル数が若干多く、1,000~1,600の部分でボクセル数が少なくなっている。これは表-4.8に示すように、アスファルトの密度がPMA-IIの方が低いことによるものであると考えられる。しかし、ヒストグラム自体はストアスとPMA-IIはほぼ同様の傾向を示している。

図-4.16の方法によって算出したストアスおよびPMA-IIのしきい値を図-4.28に示す。密度と体積率の関係から若干の差は見られるものの、大きな差はないと考えられる。

ストアスとPMA-IIの4値化画像を図-4.29に示す。表-4.6に示すように、供試体No.2およびNo.6における各素材の体積率がほぼ同じであることから、各素材の分布は両者で大きな差がないといえる。

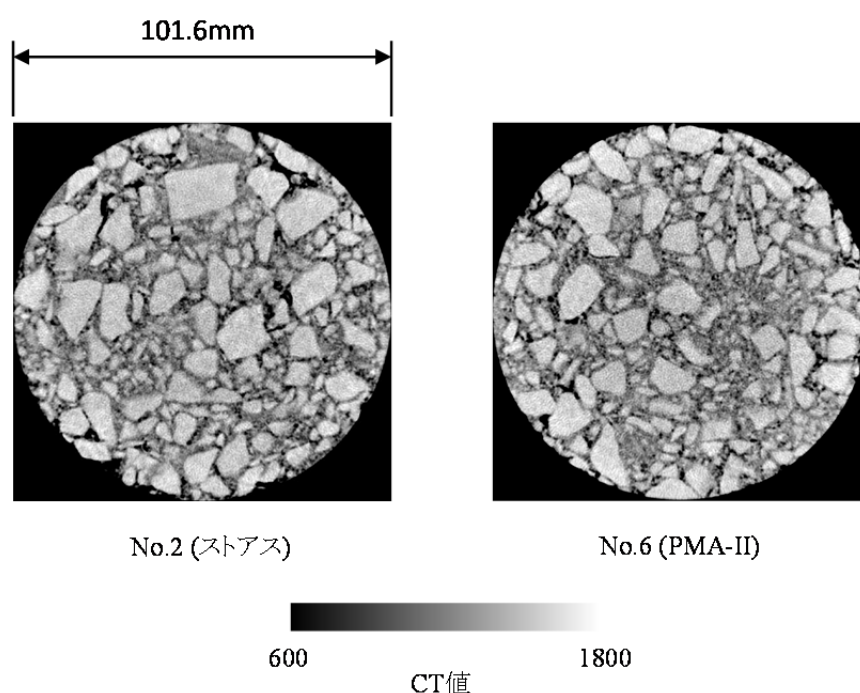


図-4.26 X線CT撮影結果(Stage2 : アスファルトの種類の違い)

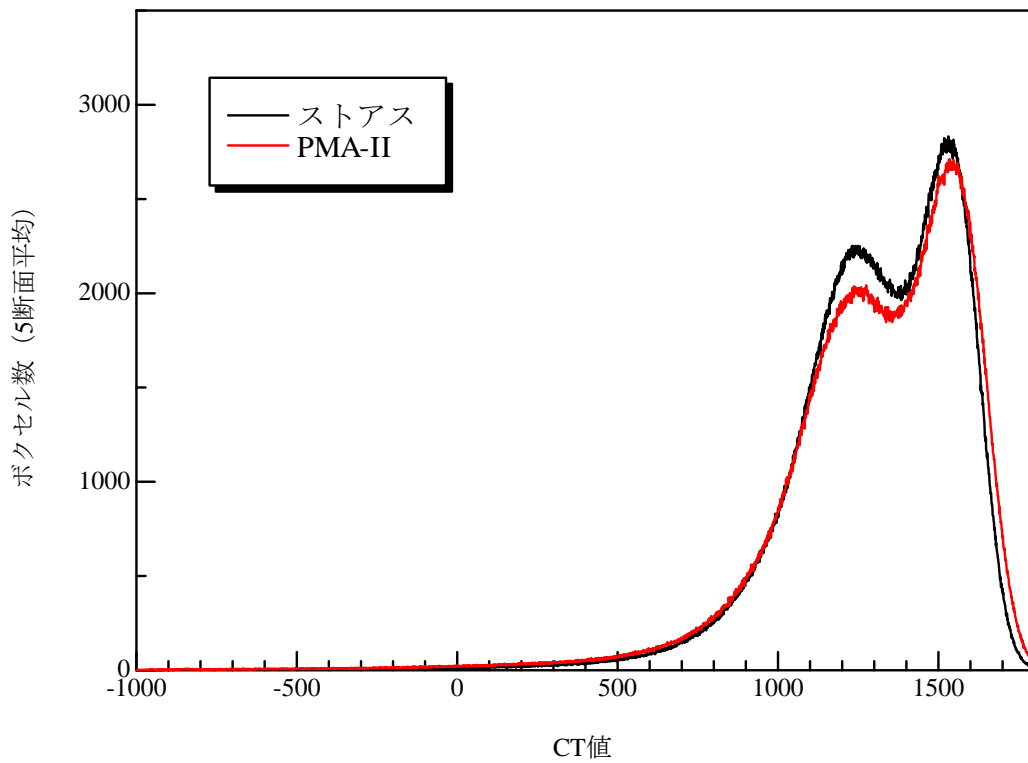


図-4.27 アスファルトの種類の違いによるCT値ヒストグラム

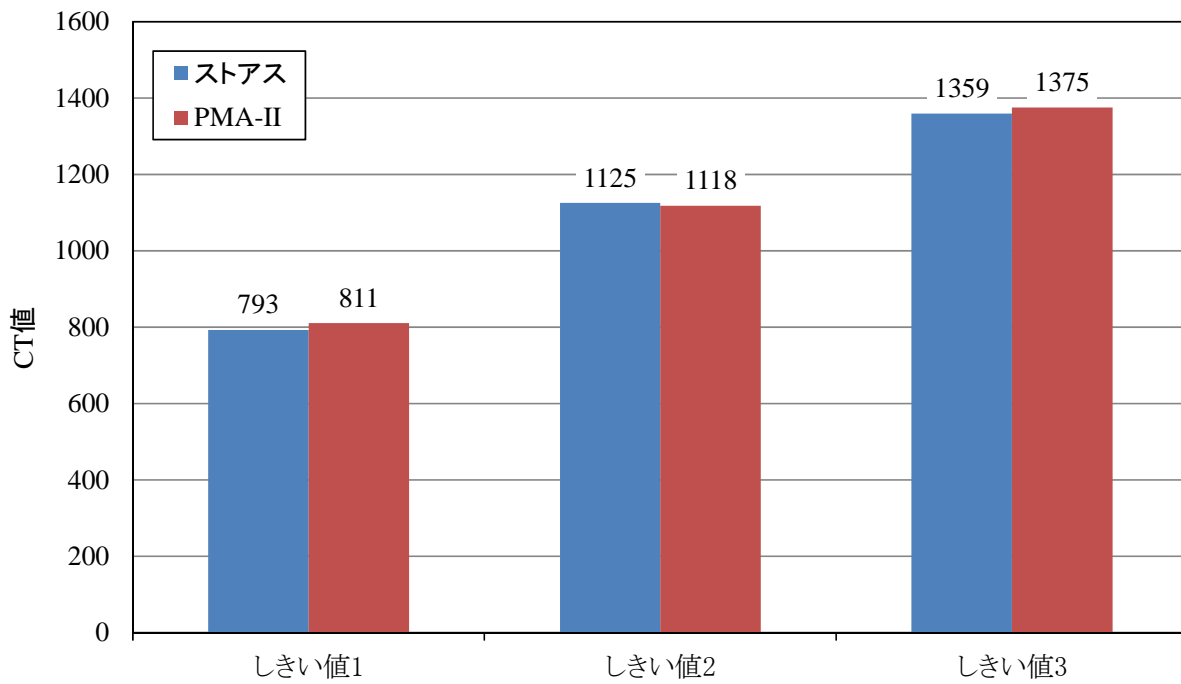
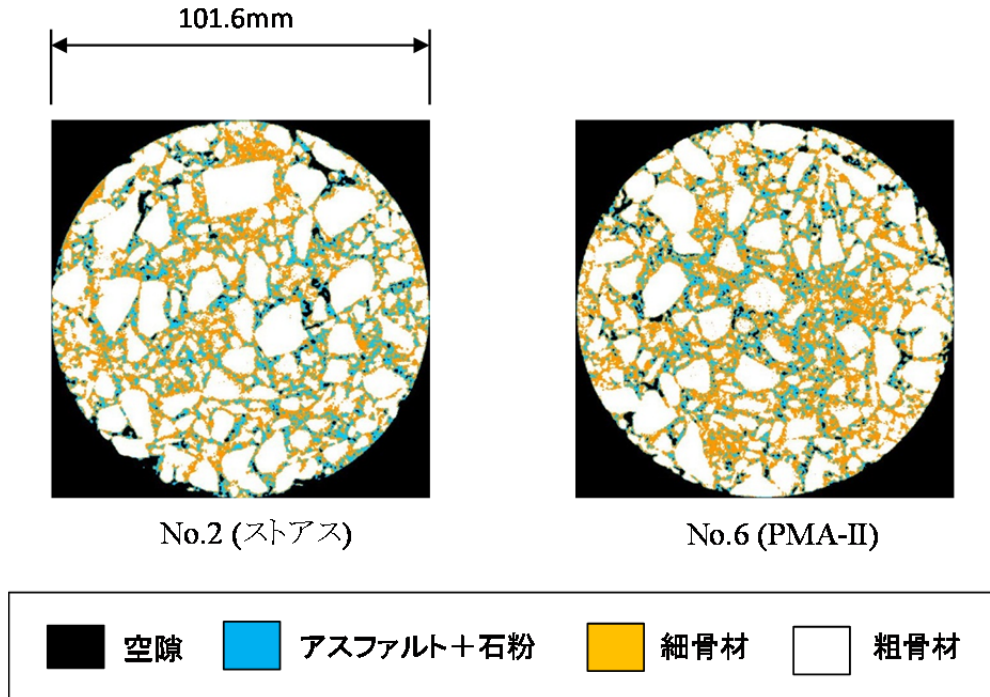


図-4.28 ストアスおよびPMA-IIのしきい値



※撮影高さ = 34.3mm

図-4.29 ストアスおよびPMA-IIの4値化画像

(3) 骨材配合率による違い^{7),19)~22)}

Stage3 (骨材配合率による違い) のX線CT撮影結果を図-4.30に示す。密粒度ストアス、粗粒度、ポーラスの順に空隙(黒い部分)が多くなり、アスファルト+石粉および細骨材(濃いグレーの部分)が少なくなっていることがわかる。

骨材配合率の違いによる5断面平均のヒストグラムを図-4.31に示す。ここで、CT値を-500以下、-500~700、700~1,300、1,300以上の4つに区分してCT値分布の傾向を見ることとする。

CT値が-500以下のボクセルは、密粒度ストアスはほとんど存在しなかったのに対し、粗粒度はCT値-900付近で約60ボクセル、ポーラスはCT値-850付近で約500のボクセルが存在している。

CT値が-500~700の間では、密粒度ストアス、粗粒度がCT値の増加とともに徐々に増加しているのに対し、ポーラスは概ね100ボクセル以上の値となっている。これは、ポーラスのほとんどが粗骨材と空隙で占められており、細骨材やアスファルト等、空隙を充填する材料が少ないため、図-4.8の粗骨材と同様の傾向が見られたものと考えられる。CT値が700~1,300の間では、密粒度ストアスでピークの発生があるのに対し、

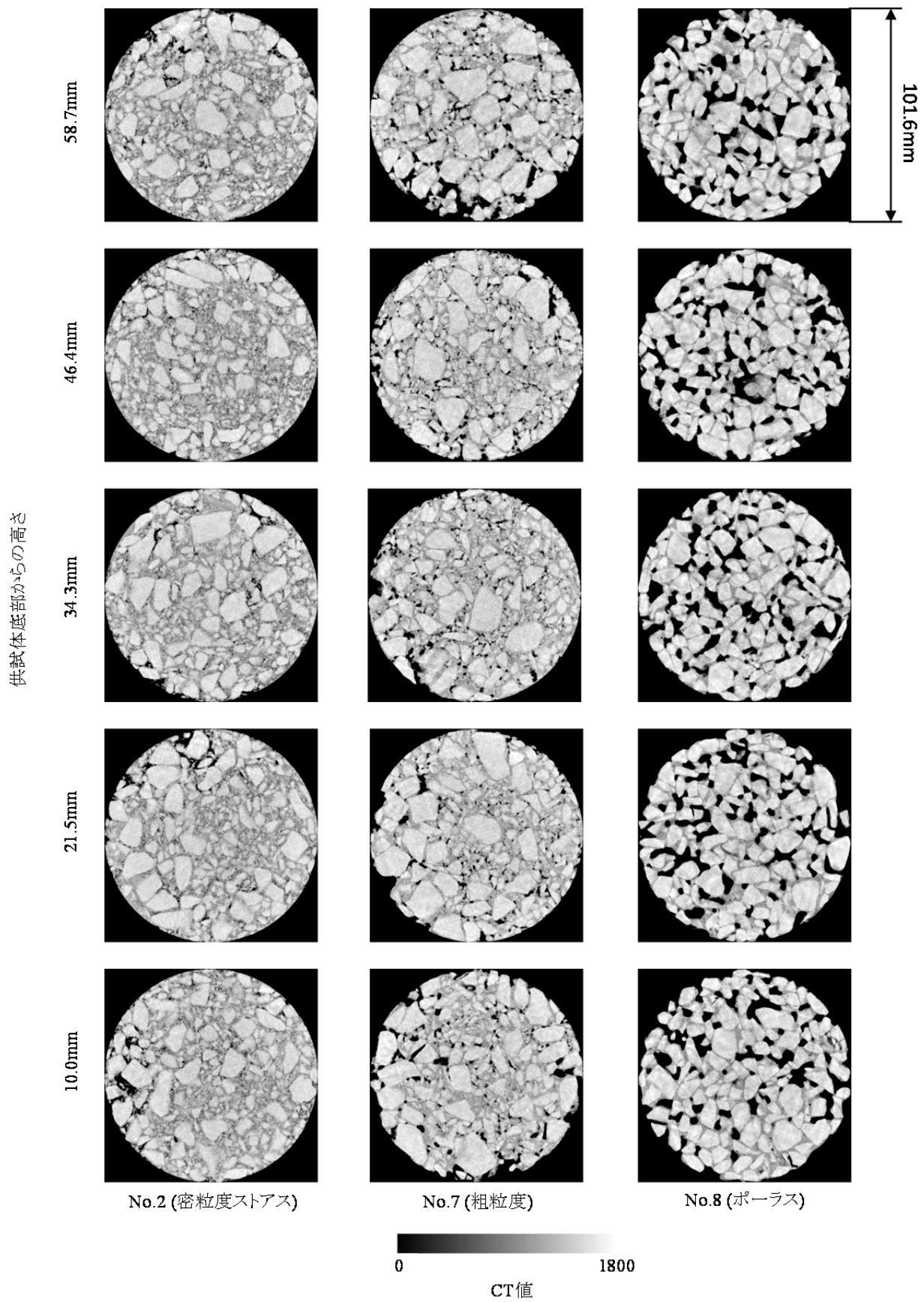


図-4.30 X線CT撮影結果(Stage3 : 骨材配合率の違い)

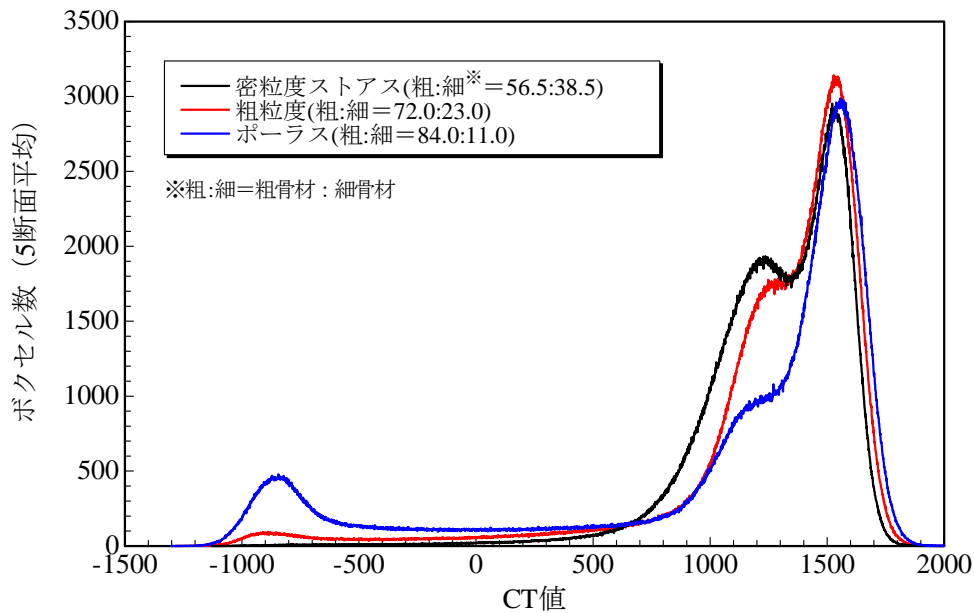


図-4.31 骨材配合率の違いによるCT値ヒストグラム

粗粒度，ポーラスの順にピークが崩れる現象が見られた．これは，密粒度，粗粒度，ポーラスの順に細骨材の体積率が少なくなるために発生したものと考えられる．CT値が1,300以上では，いずれの混合物においても粗骨材の影響とみられるピークの発生が見られた．

図-4.16の方法によって算出した密粒度ストアス，粗粒度およびポーラスのしきい値を図-4.32に示す．

しきい値1は，粗粒度，ポーラス，密粒度の順に大きくなった．空隙率が粗粒度の方がポーラスに比べて小さいのにもかかわらずしきい値が小さくなったのは，空隙そのもののボクセル数が少なくなるとともに，p-タイル法の面積率が小さくなり，CT値のしきい値が低下したものと考えられる．

しきい値2は，混合物の種類による差は見られなかった．これは，空隙を除いた骨材の体積比率が密粒度ストアスで83.8%，粗粒度で83.6%，ポーラスで83.8%とほとんど変わらなかったためであると考えられる．

しきい値3は，ポーラス，粗粒度，密粒度の順に大きくなっている．これは，ポーラスが粗骨材の周囲の細骨材やアスファルトが少なくなっているのに対し，密粒度は粗骨材の周囲の細骨材やアスファルトが多くなっていることが起因していると考えられる．

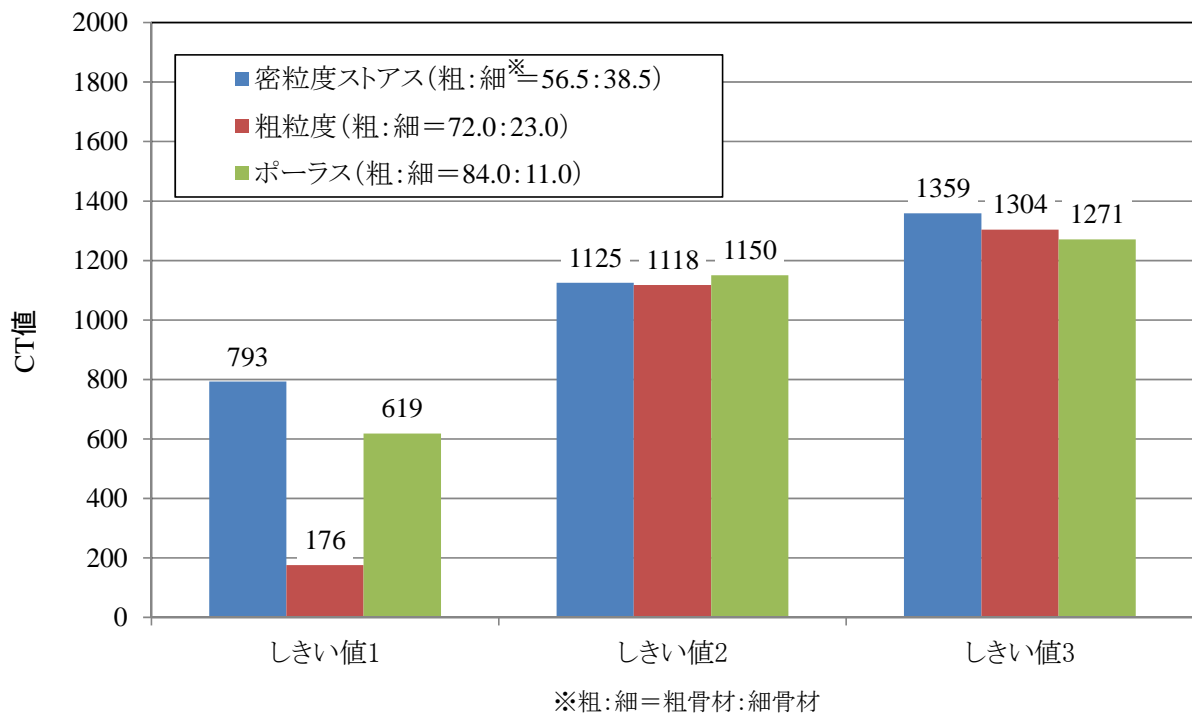


図-4.32 密粒度，粗粒度およびポーラスのしきい値

ここで，粗骨材と細骨材の境界としての意味を持つCT値であるしきい値3を説明変数，2.36mmふるい通過質量百分率を目的変数として線形回帰分析を行う．これは2.36mmふるい通過質量百分率が大きければ細骨材の量が多くなり，しきい値3を押し上げる効果があると考えられるからである．回帰式は式-4.8のとおりとなり，相関係数は0.996となった(図-4.33)．これより，しきい値3より2.36mmふるい通過質量百分率を予測できる可能性があることが確認された．

$$p_{2.36} = 0.303(T_3 - 1,217) \quad (1,271 \leq T_3 \leq 1,359) \quad (4.8)$$

ここに，

$p_{2.36}$: 2.36mmふるい通過質量百分率

T_3 : しきい値3

密粒度ストアス，粗粒度およびポーラスの中央断面の4値化画像を図-4.34に示す．これにより，密粒度ストアス，粗粒度，ポーラスの順に空隙が大きくなるとともに，細骨材やアスファルトが少なくなることが確認できる．

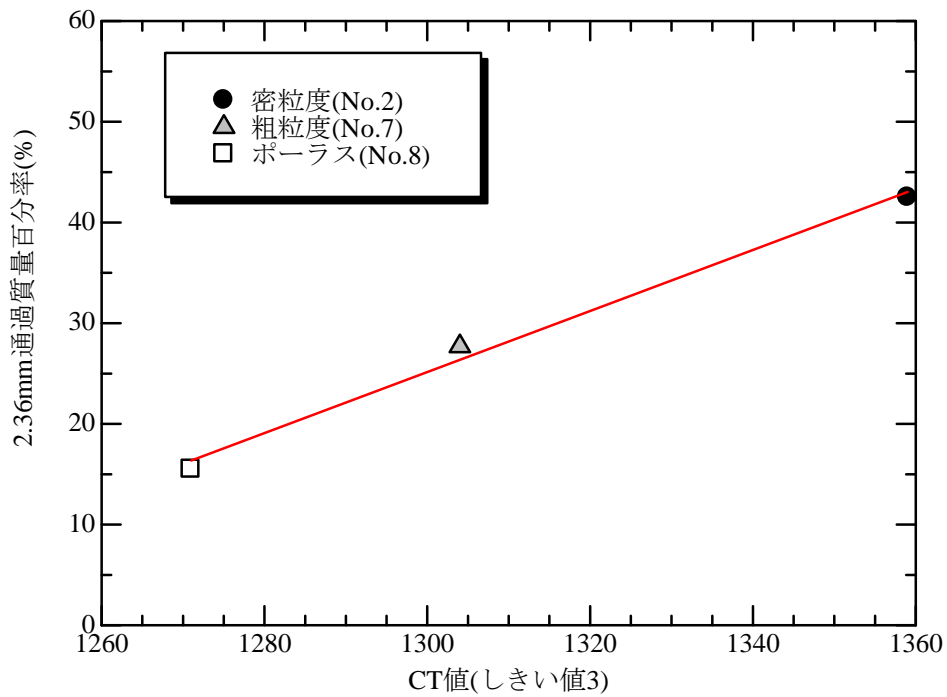
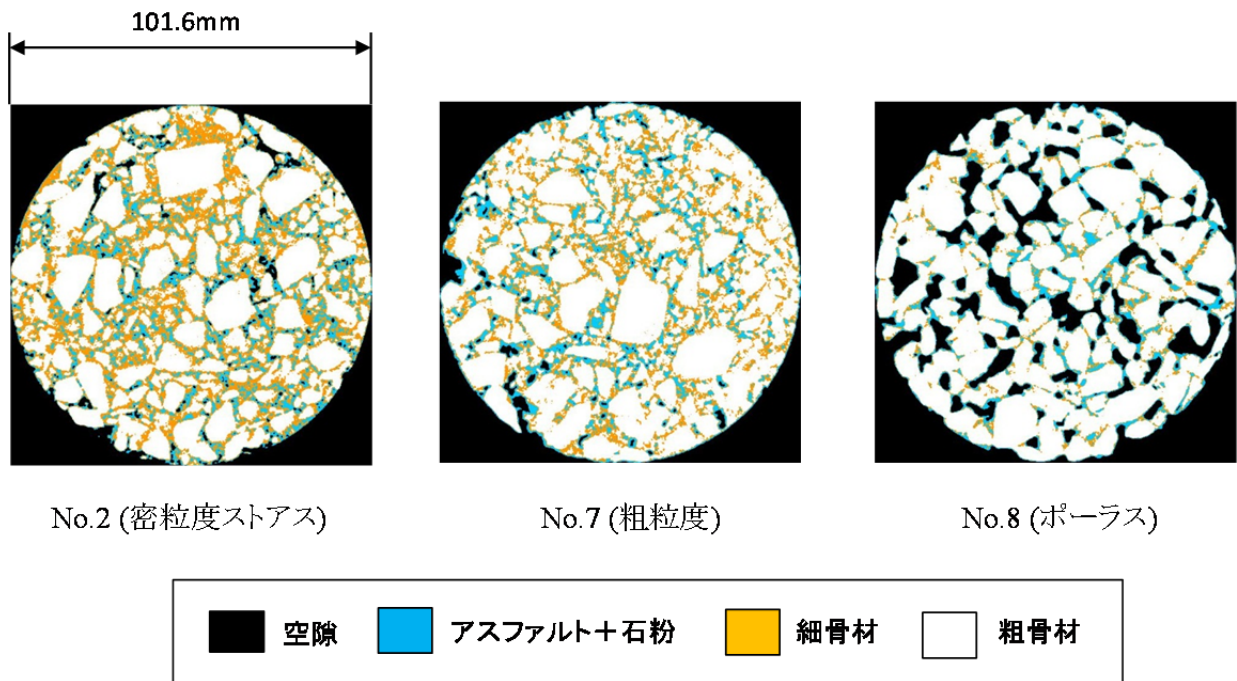


図-4.33 しきい値3と2.36mm通過質量百分率の関係



※撮影高さ = 34.3mm

図-4.34 密粒度ストアス, 粗粒度およびポーラスの4値化画像

4.4.4 X線CTのアスファルト混合物の評価への適用可能性

4.4.3で見たように、アスファルト混合物の内部はCT画像によって可視化し、CT値等の特性値によって混合物の内部を評価することが可能であることが明らかとなった。そこでX線CTのアスファルト混合物への適用可能性について述べる。

第2章2.2.2で述べたように、アスファルト抽出試験はアスファルト量、粒度を評価する試験として用いられているが、アスファルトを抽出するための溶剤の引火性、可燃性、毒性等の問題がある。そこで、式-4.7でアスファルト+石粉のCT値とアスファルト量、式-4.8でしきい値3と2.36mmふるい通過百分率の相関が高かったことから、それぞれのCT値指標によって評価できる可能性があり、X線CTの適用が考えられる。なお、配合が未知なアスファルト混合物については、別途、セグメンテーション手法を提案していかなければならないという課題が残積している。また、今回はそれぞれの条件について、1個の供試体で試験を行い、評価を行ったものである。そのため、アスファルト量および粒度を精度良く予測するためには、現在のデータだけでは不十分である。したがって、CT値指標とアスファルト量および粒度の関係について、より詳細に調査するため、様々な種類のアスファルト混合物のCT撮影を実施し、さらなるデータの蓄積を行ったうえで、基準を設定に向けた検討を行う必要がある。

その他、異物の混入およびポーラスアスファルト混合物の目詰まり物質の確認、浸透型補修材料の充填状況の確認、ならびに骨材の配向性の確認等にもX線CTの適用が期待される。

4.5 まとめ

本章では、粗骨材、細骨材、石粉およびアスファルトといったアスファルトを構成する素材、ならびにアスファルト混合物にX線CT法を適用した。はじめに素材について得られた知見を列挙する。

- i) 粒径が大きく多孔性の粗骨材については、CT値ヒストグラムの分布に双峰性が見られた一方、粒径が小さく密な構造の細骨材および石粉については、CT値ヒストグラムの分布に単峰性が見られたことから、粒径によるCT値分布特性を明らかにすることができた。

- ii) アスファルトについては、CT画像に密度の高い部分と低い部分が点在する一方、平均CT値は密度がほぼ同じの水に近く、CT値が骨材に比べ狭い範囲に分布している等、アスファルトのCT値特性を把握することができた。

次に、アスファルト混合物について得られた知見を列挙する。

- iii) アスファルト量および骨材配合率が変化した場合にはCT値の分布やしきい値が大きく変化する一方、アスファルトの種類を変化させてもCT値の分布に大きな変化がなかった等、アスファルト混合物のCT値特性を把握することができた。
- iv) 4値化画像により、骨材の形状、ならびに骨材、アスファルトおよび空隙の分布状況を把握することができた。
- v) 断面平均CT値とアスファルト混合物の密度、アスファルト+石粉の平均CT値とアスファルト量、ならびにしきい値3と2.36mmふるい通過百分率との間の相関係数が大きいことから、CT値の各指標からアスファルト混合物の密度、アスファルト量、2.36mmふるい通過百分率を定量化できる可能性があることがわかった。

今後は、様々な種類のアスファルト混合物のCT撮影を実施し、CT値指標とアスファルト量および粒度の関係についてデータの蓄積を行ったうえで、基準を設定に向けた検討を行う必要がある。また、アスファルト舗装で問題となっている事象（ポーラスアスファルト混合物の目詰まり等）に対しても適用を広げていく必要がある。

【参考文献】（第4章）

- 1) 日本道路協会：舗装設計施工指針（平成18年版），2006.
- 2) 日本道路協会：舗装施工便覧（平成18年版），2006.
- 3) 日本地盤工学会：地盤材料の工学的分類方法，地盤工学会基準JGS0051，2009.
- 4) 天明敏行：X線CT法のコンクリート診断への適用に関する基礎的研究，熊本大学大学院博士論文，2009.
- 5) 三角直輝：X線CTを用いたアスファルト混合物の品質評価手法に関する基礎的研究，熊本大学卒業論文，2010.
- 6) 小川慧一郎：X線CTを用いた配合の異なるアスファルト混合物の工学特性に関する研究，熊本大学卒業論文，2011.
- 7) Taniguchi S., Ogawa K., Otani J. and Nishizaki I.: A study on quality evaluation for bituminous mixture using X-ray CT, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, Vol.7, No.2, pp.89-101, 2013.
- 8) 谷口聡，大谷順，西崎到：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，舗装工学講演会論文集，Vol.15，pp.41-48，2010.
- 9) 日本工業標準調査会：道路用碎石，日本工業規格JIS A 5001，1995.
- 10) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2007.
- 11) 日本工業標準調査会：舗装用石灰石粉，日本工業規格JIS A 5008，1995.
- 12) 日本工業標準調査会：石油アスファルト，日本工業規格JIS K 2207，1996.
- 13) Otani J.: State of the art report on geotechnical X-ray CT research at Kumamoto University, *X-ray CT for Geomaterials, Soil, Concrete, Rocks, GEOX2003*, pp.43-77, 2003.
- 14) 大谷順，尾原祐三，菅原勝彦，椋木俊文：地盤工学における産業用X線CTスキャナーの適用，*土と基礎*，48(2)，pp.17-20，2000.
- 15) 谷口聡，小川慧一郎，大谷順，西崎到：X線CTを用いたアスファルト舗装材料の定量的評価に関する研究，*土木学会論文集E1（舗装工学）*，Vol.67，No.3（舗装工学論文集第16巻），I_165-I_172，2011.
- 16) Zelelew, H.M. & Papagiannakis, A.T.: A volumetric thresholding algorithm for processing asphalt concrete X-ray CT images, *International Journal of Pavement Engineering*, Taylor & Francis, Vol.12, No.6, pp.543-551, 2011.

- 17) 小川慧一郎, 谷口聡, 大谷順 : X線CTを用いた配合の異なるアスファルト混合物の工学特性に関する研究, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, V-370, 2011.
- 18) Taniguchi S., Nishizaki I., Ogawa K. and Otani J.: A Feasibility Study on the Quality Inspection Method of Asphalt Pavement using X-ray CT, Proceedings of the 7th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV7), No.53, 2012.
- 19) Taniguchi S., Nishizaki I., Ogawa K. and Otani J.: New X-ray CT Evaluation Method of Engineering Characteristics of Asphalt Mixture, Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Geotechnics (IS-Hokkaido), No.57, 2012.
- 20) 谷口聡, 西崎到, 大谷順 : X線CTスキャナを用いたアスファルト混合物内部の品質評価手法の開発, 土木技術資料, Vol.55, No.2, pp.22-25, 2013.
- 21) 小川慧一郎, 谷口聡, 大谷順 : X線CTを用いた種類の異なるアスファルト混合物の工学特性の評価に関する研究, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, V-373, 2012.
- 22) 小川慧一郎 : X線CTを用いたアスファルト混合物の工学特性の評価に関する研究, 熊本大学大学院修士論文, 2013.

第5章 X線CTを用いたアスファルト混合物の品質評価手法

5.1 概説

舗装工事において、受注者はその完成物が設計図書の基準を満たすように施工管理（工程管理，出来形管理，品質管理，写真管理等）を行い，その成果の判定のために発注者が検査を行う^{1),2)}。第2章図-2.2で示したように，施工前には使用する材料や施工の方法が適正なものであるかを確認する基準試験を，施工中には施工者が設計図書に合格する舗装を築造するために自主的に施工管理を，施工後には発注者が完成した舗装の性能の確認および検査を行う。

第2章表-2.1および2.2で示したように，主たる品質管理および検査の項目は，粒度，アスファルト量，締固め度である。これらの試験の項目では，プラントであらかじめ作製されるアスファルト混合物のマーシャル供試体（以下，基準供試体），ならびに現場から採取されたコア（以下，現場供試体）によって評価を行う。なお，本論文では品質管理および品質検査双方を総称して「品質評価」と呼ぶ。

第4章では，X線CT撮影により骨材，アスファルトおよび空隙分布を把握する手法を提案するとともに，CT値の各指標からアスファルト量，2.36mmふるい通過百分率を定量化できる可能性があることがわかった。しかし，提案されたX線CT法の実用性を検証するためには，実現場のデータによって検証する必要がある³⁾。

一方，基準供試体および現場供試体が均質に配合されていれば1断面による評価が可能である。しかし，アスファルト混合物に含まれる骨材は様々な形状をもつため，各供試体断面で必ずばらつきが生じる。そのため，実際の品質評価を行う際には複数断面による評価が望ましいといえる。しかし，どの程度の断面を撮影すれば，精度の良い評価ができるかということが大きな課題となる^{3),4)}。

そこで，第5章では品質評価手法を提案することを目的とし，第2節では試験の概要を，第3節では基準供試体および現場供試体の全断面撮影を実施し，アスファルト混合物の内部特性の評価を行った結果を，第4節でX線CT撮影方法および撮影断面数についての提案を示し，第5節で結果を総括する。

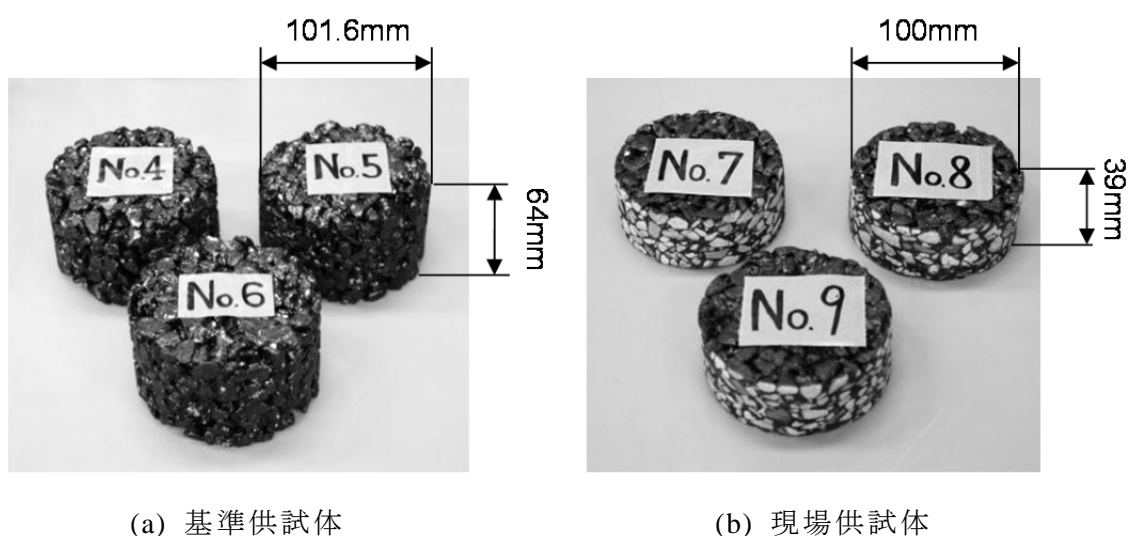
5.2 試験概要

5.2.1 供試体の概要^{3)~5)}

本章で使用した供試体は，平成24年夏季に施工された一般地域（『積雪寒冷特別地域における道路交通の確保に関する特別措置法』において指定される積雪地域または寒冷地域を除いた地域）の高速道路の現場において，品質管理に用いるためにアスファルトプラントであらかじめ作製された最大粒径13mmのポーラスアスファルト混合物の基準供試体（No.4～6），ならびに現場から採取された現場供試体（No.7～9）である（写真－5.1）。

本供試体で使用された素材は，粗骨材として粒径が5～13mmの6号砕石が，細骨材として粒径が2.36mm以下の細砂が，フィラーとして石粉が，バインダとしてポリマー改質アスファルトH型（以下，PMA-H）が用いられた．骨材配合率および密度を表－5.1に，各骨材の粒度分布を図－5.1に，合成粒度を図－5.2に示す．使用されたPMA-Hの主な物理性状は表－5.2のとおりであり，最適アスファルト量は4.9%である．

ポーラスアスファルト混合物の基準供試体のサイズは直径101.6mm，高さ64mmであり，現場供試体のサイズは直径100mm，高さ39mmである（写真－5.1）．また，ポーラスアスファルト混合物の密度を表－5.3に，各供試体の体積率計算結果を表－5.4に示す．なお，理論最大密度は 2.494g/cm^3 であった．



写真－5.1 基準供試体各骨材の粒度分基準供試体および現場供試体

表-5.1 骨材配合率および密度

	粗骨材	細骨材	石粉
骨材配合率(%)	84.6	10.4	5.0
密度(g/cm ³)	2.663	2.468	2.820

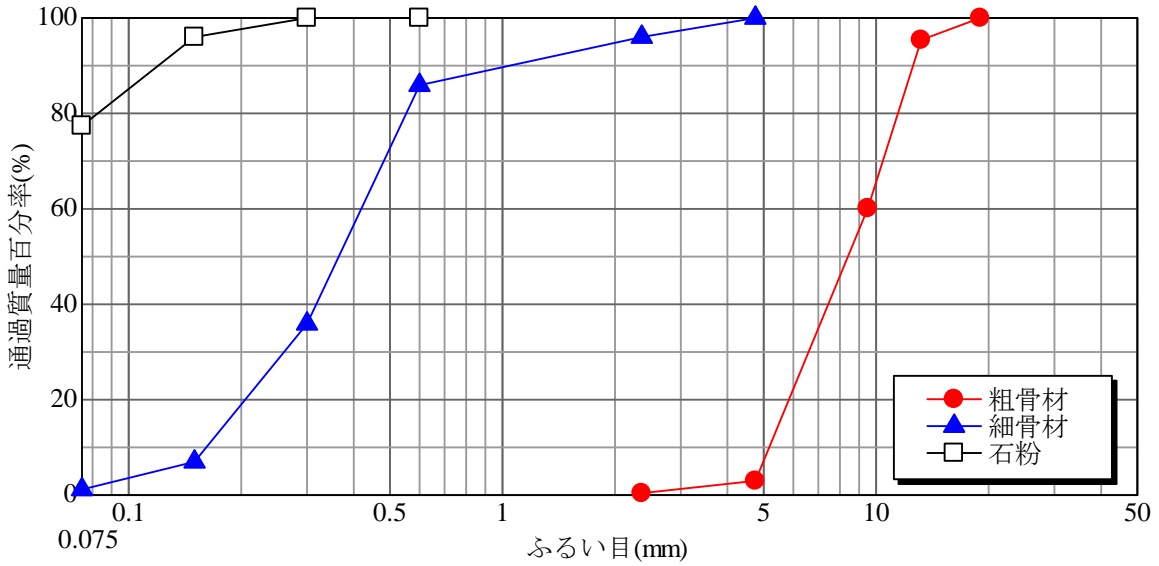


図-5.1 各骨材の粒度分布

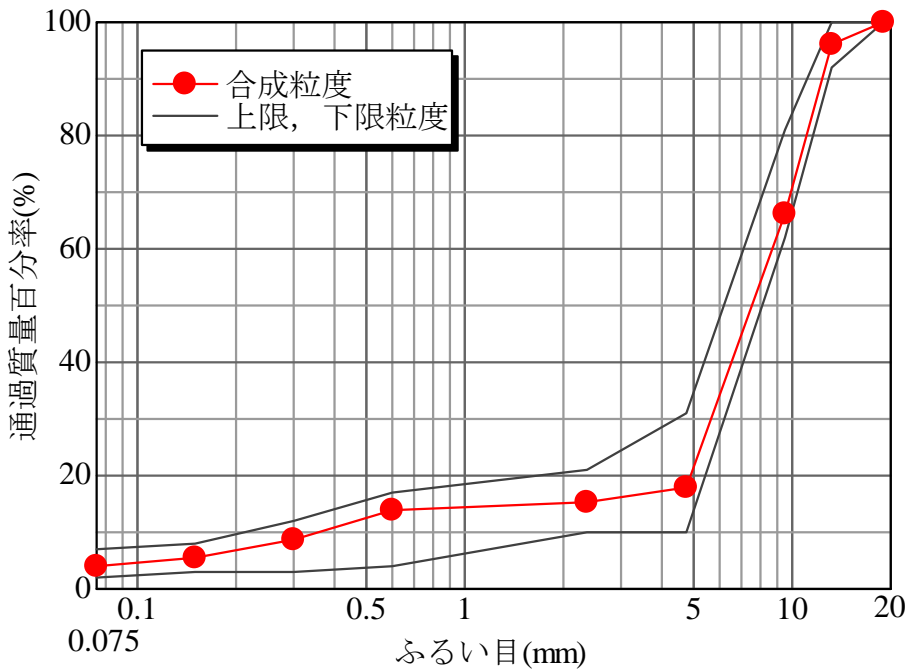


図-5.2 合成粒度

表－5.2 PMA-Hの主な物理性状

物理性状	物理性状値
15°C密度(g/cm ³)	1.025
25°C針入度(1/10mm)	50
軟化点(°C)	90.0
最適混合温度範囲(°C)	165～175
最適締固温度範囲(°C)	155～165

表－5.3 ポーラスアスファルト混合物の密度

種別	No.	密度(g/cm ³)
基準供試体	4	1.991
	5	1.979
	6	1.997
現場供試体	7	1.990
	8	2.039
	9	1.986

表－5.4 ポーラスアスファルト混合物の体積率

	No.	粗骨材	細骨材	石粉	アスファルト	空隙
基準供試体	4	59.3%	7.9%	3.3%	9.4%	20.2%
	5	58.9%	7.8%	3.3%	9.3%	20.6%
	6	59.5%	7.9%	3.3%	9.4%	19.9%
	平均	59.2%	7.9%	3.3%	9.4%	20.2%
現場供試体	7	59.3%	7.9%	3.3%	9.4%	20.2%
	8	60.7%	8.1%	3.4%	9.6%	18.2%
	9	59.1%	7.8%	3.3%	9.4%	20.4%
	平均	59.7%	7.9%	3.3%	9.5%	19.6%

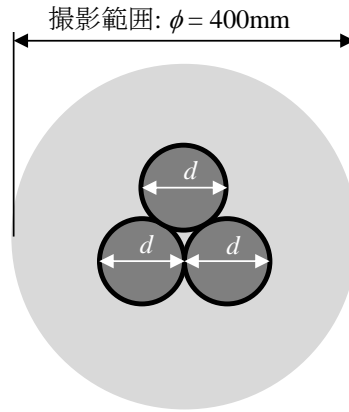
※No.4,5およびNo.7の合計が100%にならないのは四捨五入による

5.2.2 撮影方法

X線CT撮影は、図－5.3に示すとおり品質検査を想定して基準供試体および現場供試体を3本並べ、直径400mmの範囲で撮影を実施した。起電力300kVのX線をスライス厚1.0mmで1mm毎に照射し、図－5.4に示すように、基準供試体については1～63mmの63断面、現場供試体については1～38mmの38断面のCT画像を取得した。なお、ボクセル数は2,048×2,048であり、空間解像度(ボクセルサイズ)は0.195×0.195×1mm³である。

5.2.3 全断面平均CT値および密度の算出

Zeleelewら⁶⁾やYouら⁷⁾は、供試体の上下面で空隙率が極端に高くなること、すなわち外部空隙の影響を指摘している。そのため、撮影した全断面の密度あるいはCT値を採用すれば、大幅な過小評価または過大評価を行ってしまうことが懸念される。そこで、本研究においては外周部の影響を避けるために、供試体上下面を異常値と判断し、グラブス・スミルノフ検定を行った。検定手法を以下に示す。



基準供試体: $d = 101.6\text{mm}$
 現場供試体: $d = 100\text{mm}$

図-5.3 撮影範囲

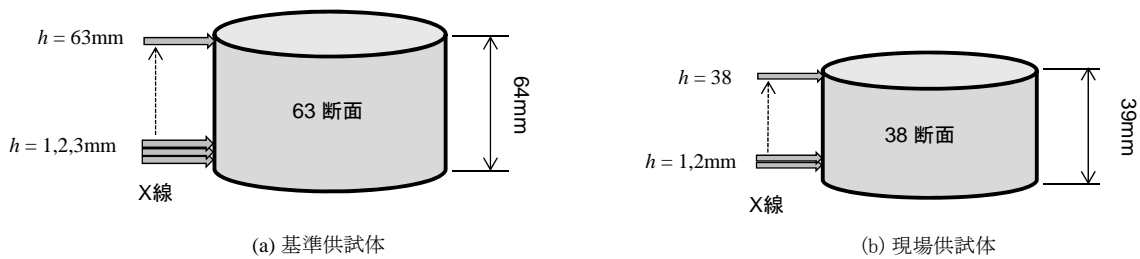


図-5.4 X線照射位置

1) 前提を以下に示す.

帰無仮説: 他のデータとかけ離れた値は異常値ではない.

対立仮説: 他のデータとかけ離れた値は異常値である.

2) 標本の大きさを n (基準供試体: 63, 現場供試体: 38), 標本データを X_1, X_2, \dots, X_n とする.

3) 標本平均を \bar{x} , 不偏分散を U とする.

4) 有意水準 α を決定し, スミルノフ棄却検定表よりデータ数 n のときの有意点 t を得る. なお, 有意水準 α は 0.05 とした.

5) 式-5.2 をもとに, 検定統計量 T を算出する.

以上の検定手順により, 基準および現場供試体の上下面のデータを異常値として棄却した. また, 今回の試験では, 現場での評価が密度によって行われることから, 基準および現場供試体の計6本の室内試験による密度測定値 (ρ) と棄却領域を除いた供試体の全断面平均CT値 (CT_p) の関係を求めた.

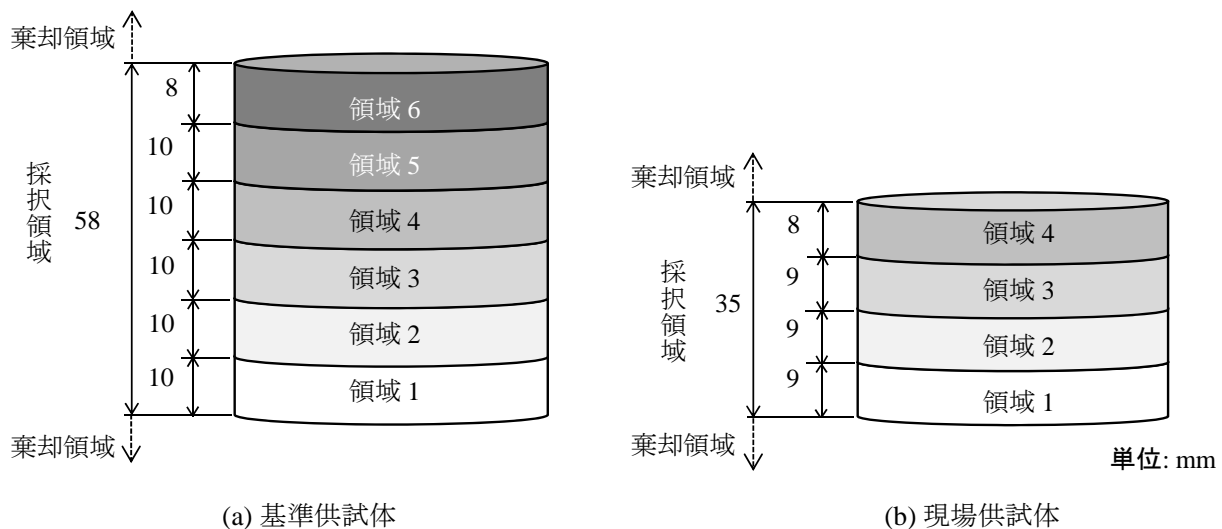


図-5.5 各供試体の評価領域

5.2.4 標準供試体と現場供試体の内部特性の評価

標準供試体および現場供試体が均質に配合されていれば1断面による評価が可能である。しかし、アスファルト混合物に含まれる骨材は様々な形状を持つため、各供試体断面で必ずばらつきが生じる³⁾。そこで、X線CTによる品質評価への適用を前提として、図-5.5に示すように標準供試体の採択領域(58mm)を6つの領域に、現場供試体の採択領域(35mm)を4つの領域に分割し、高さ毎に第4章と同様に、CT画像、CT値ヒストグラム、しきい値および4値化画像を用いて、標準および現場供試体の内部特性の評価を行った。

5.2.5 断面数および撮影位置の決定

アスファルト混合物の内部特性を正確に評価するためには、すべての断面を撮影する必要があるが、それは非効率的である⁴⁾。X線CTによる品質評価への適用するためには、各抽出断面の間隔が等しくなるように断面を抽出する等分布抽出方法が考えられる。すなわち、図-5.6に示すように、供試体高さを h 、抽出断面数を n とした場合、高さ $h/(n+1)$ 、 $2h/(n+1)$ 、 \dots 、 $nh/(n+1)$ の部分を抽出する方法である。この方法であれば、各供試体から均等に断面を抽出することが可能となる³⁾。

本章では、抽出断面数と表-5.3に示される各供試体の密度と抽出断面の断面平均CT値から得られる密度との誤差、標準偏差および標準誤差をもとに、抽出断面数を決定することを試みた。なお、標本数が有限の場合の標準誤差は式-5.1で与えられる。

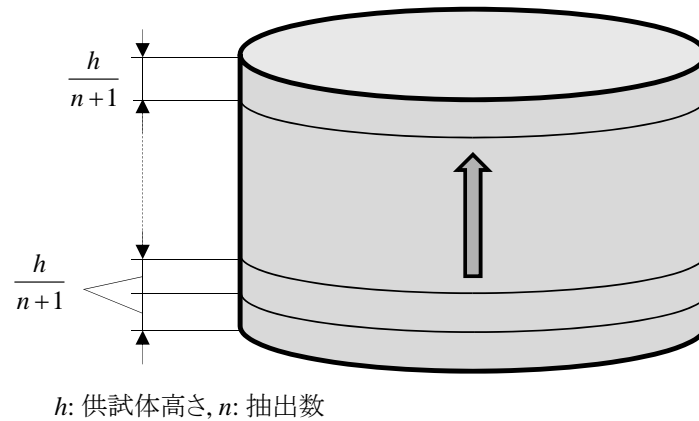


図-5.6 等分布抽出法の概念

$$\delta = \sqrt{\frac{N-n}{N-1} \frac{\sigma^2}{n}} \quad (5.1)$$

ここに,

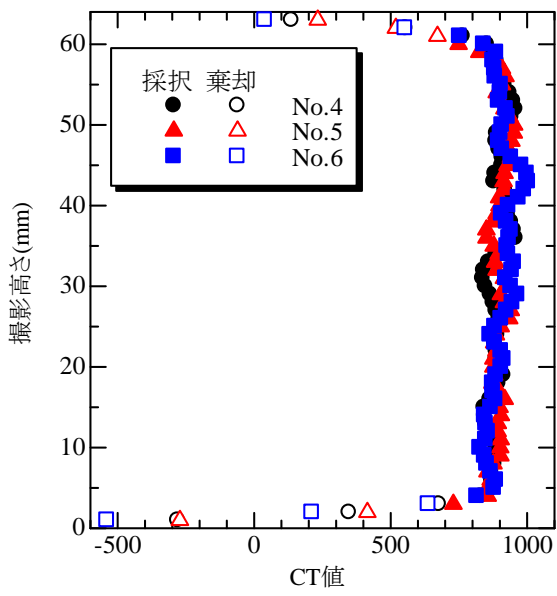
- δ : 標準誤差
- σ : 標準偏差
- n : 抽出断面数
- N : 標本数 (全断面数)

5.3 基準供試体と現場供試体の内部特性の評価

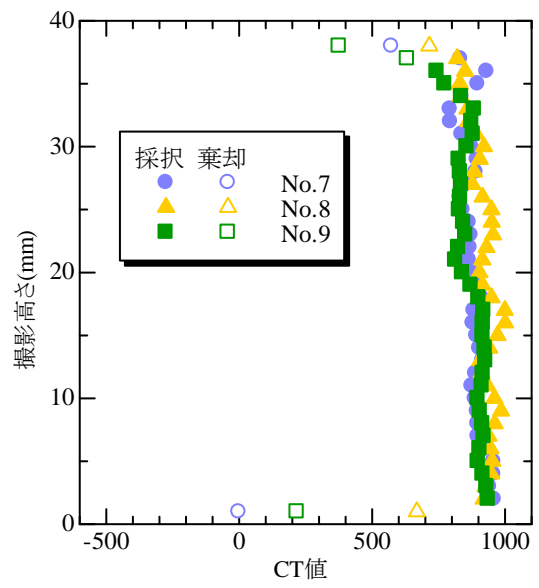
5.3.1 CT値の分布

基準供試体および現場供試体の高さ毎のCT値の分布を図-5.7に示す。グラブス・スミルノフ検定を行った結果、供試体No.4およびNo.6では高さ1~3mmおよび62~63mm, No.5では高さ1~2mmおよび61~63mm, No.7およびNo.8では高さ1および38mm, No.9では1, 37および38mmのデータが棄却された。棄却されたデータを除いた基準供試体および現場供試体の平均CT値を表-5.5に示す。

基準供試体のCT値の傾向は、下面(高さ1~3mm)および上面(61~63mm)については比較的緩やかにCT値が低下している。これは、基準供試体はモールドにより作製され、モールドの境界面の影響により上下面において外部空隙の影響が発生したことによるものである(写真-5.2(a))。採択された領域では多少のばらつきがみられるものの、ほぼ一定の値に収束する傾向が見られた。



(a) 基準供試体



(b) 現場供試体

図-5.7 基準供試体と現場供試体のCT値の分布



i) 上面



ii) 下面

(a) 基準供試体



i) 上面



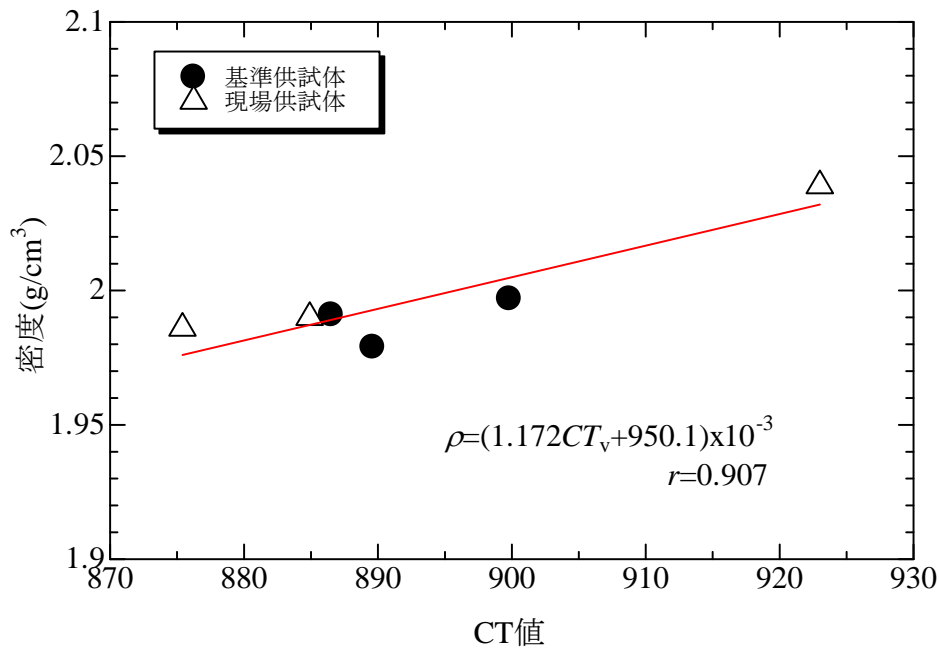
ii) 下面

(b) 現場供試体

写真-5.2 基準供試体および現場供試体コアの上下面

表－5.5 基準および現場供試体の平均CT値

種別	No.	CT値	平均	標準偏差
基準供試体	4	886.5	892.0	10.0
	5	890.6		
	6	899.8		
現場供試体	7	884.9	894.5	35.6
	8	923.0		
	9	875.4		



図－5.8 基準供試体および現場供試体のCT値および密度の関係

現場供試体上面（高さ37～38mm）は表層表面の外部空隙の影響で緩やかに密度が低下した一方、現場供試体下面はカッタで成型されたため、高さ2mmから1mmにかけて急激に減少した（写真－5.2(b)）。採択された領域では、上方ほどCT値が低く、下方ほどCT値が高くなる傾向が見られた。

表－5.3の各供試体の密度，ならびに表－5.5の各供試体のCT値の関係をプロットした図を図－5.8に示す。両者について回帰分析を行った結果，式－5.2が得られ，相関係数は0.907であり，両者の相関が高いことを確認した。

$$\rho = (1.172CT_v + 950.1) \times 10^{-3} \quad (875.4 \leq CT_v \leq 923.0) \quad (5.2)$$

ここに， ρ ：各供試体の密度， CT_v ：各供試体のCT値

5.3.2 基準供試体と現場供試体の内部特性

(1) CT画像

基準供試体および現場供試体のCT画像を図-5.9~11に示す。なお、各図にはCT値と式-5.2により変換された密度を併記している。また $WL=1.5\text{g/cm}^3$ (CT値=469), $WW=3.0\text{g/cm}^3$ (CT値=2,560), すなわち密度が 0g/cm^3 (CT値=-811以下)の時は黒(階調値=0), 密度が 3g/cm^3 (CT値=1,749)以上の時は白(階調値=255)となるように設定している。

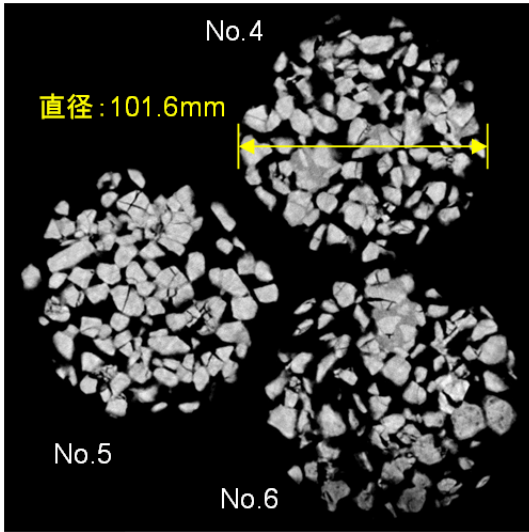
図-5.9は基準供試体および現場供試体の上下面のCT画像である。基準供試体の上下面は、外部空隙の影響により全体的に空隙が多く、密度が低い画像となっている。同様に、現場供試体上面も外部空隙の影響を受けている画像となっている。反対に、現場供試体下面のCT画像は裁断面の凹凸の影響を受けたことにより、線状の模様が入る形となった。

図-5.10は基準供試体の6つの領域の中心($h=8,18,28,38,48,57\text{mm}$)におけるCT画像を示す。図-5.7(a)で高さによるCT値の違いが見られなかったように、それぞれの領域における骨材および空隙の分布に大きな違いは見られなかった。

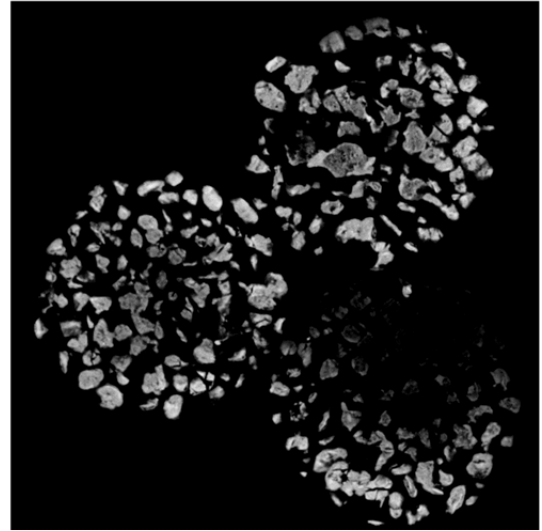
図-5.11は現場供試体の4つの領域の中心($h=6,15,24,33\text{mm}$)におけるCT画像を示す。図-5.7(b)で高さによるCT値の違いが見られたように、下部ほど骨材が多く、上部ほど空隙が多い画像となった。また、基準供試体の外周は骨材の形状がそのまま現れているのに対し、現場供試体は円形の輪郭となっているが、これはコアカッターによる影響であると考えられる。

(2) CT値ヒストグラム

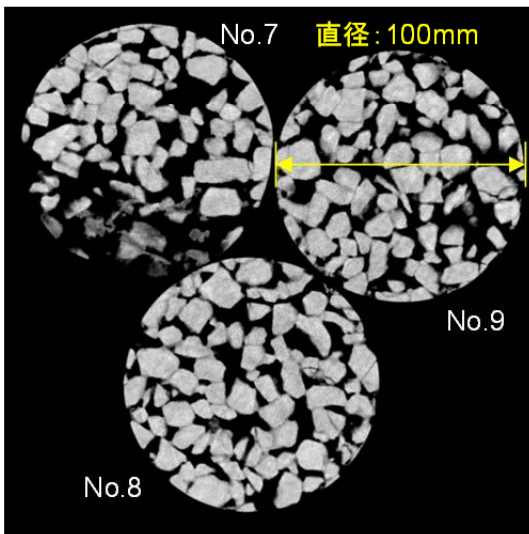
図-5.12は、基準供試体および現場供試体の採択領域全断面を平均したCT値ヒストグラムである。基準供試体については3本の線がほぼ重なっているが、CT値が1,200~1,500の部分で若干の差がみられ、密度が最も低いNo.4の頻度が小さく、密度が最も高いNo.6の頻度が大きくなった。現場供試体については、No.7とNo.9がほぼ重なっている。密度が最も高いNo.8がNo.7およびNo.9に比べ、CT値が-1,000~-700の部分でわずかに小さく、CT値が1,200~1,500の部分でわずかに大きくなった。



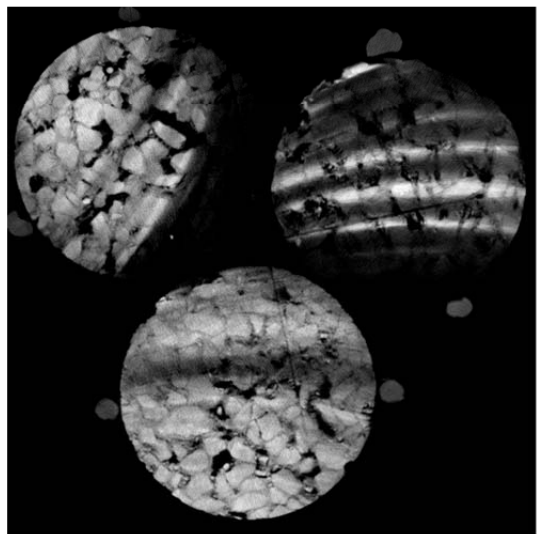
(a) 基準供試体上面



(b) 基準供試体下面



(c) 現場供試体上面



(d) 現場供試体下面

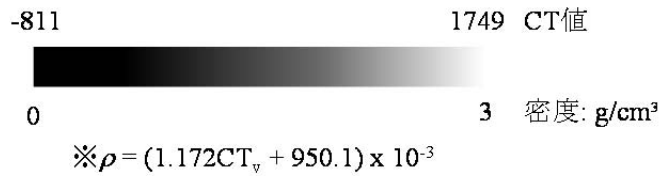
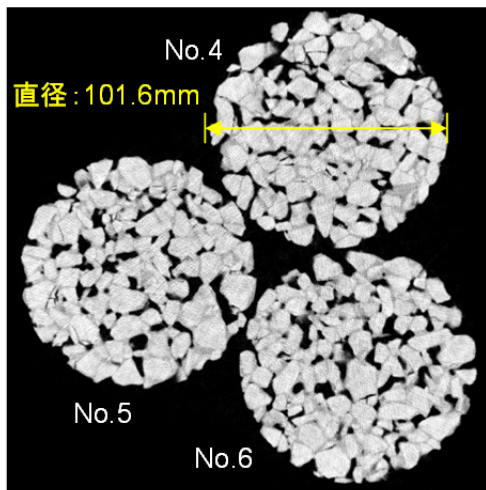
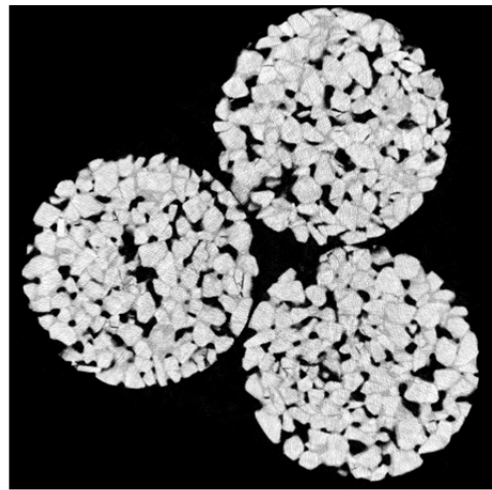


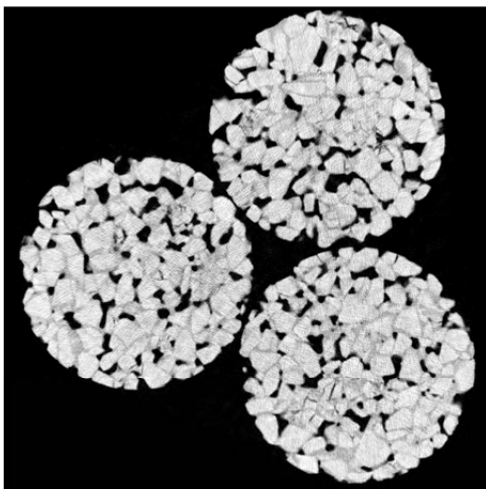
図-5.9 基準供試体および現場供試体の上下面のCT画像



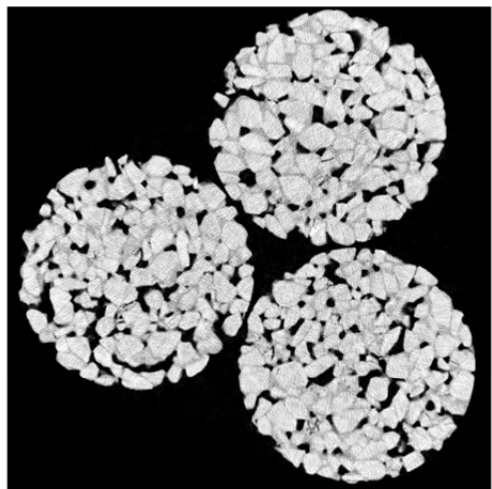
(a) 領域1 (h=8mm)



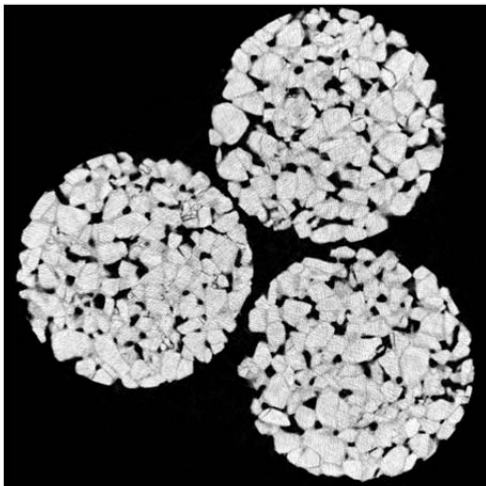
(b) 領域2 (h=18mm)



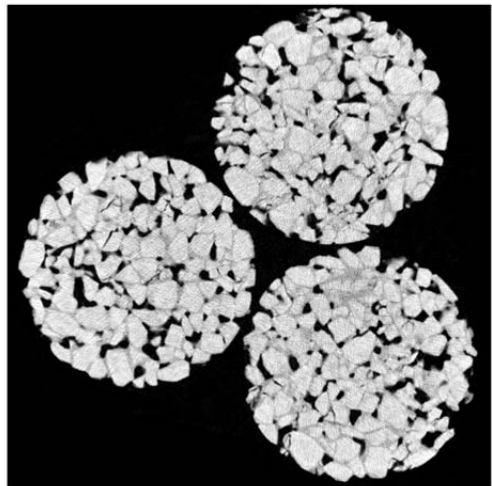
(c) 領域3 (h=28mm)



(d) 領域4 (h=38mm)



(e) 領域5 (h=48mm)



(f) 領域6 (h=57mm)

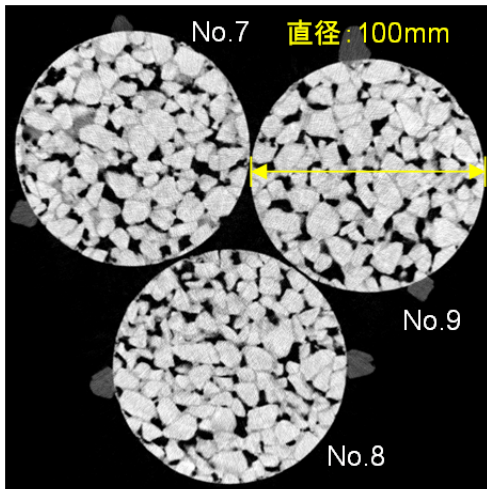
-811

1749 CT値

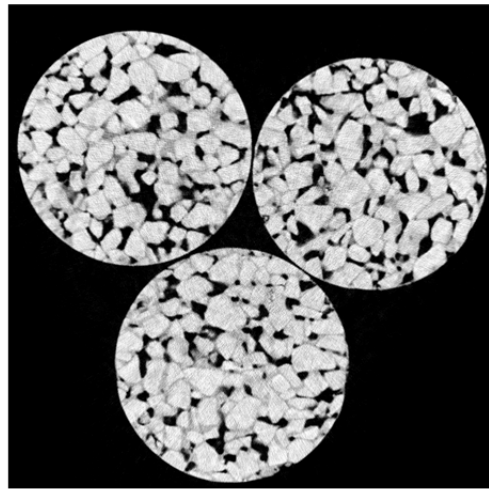


$$\rho = (1.172CT_v + 950.1) \times 10^{-3}$$

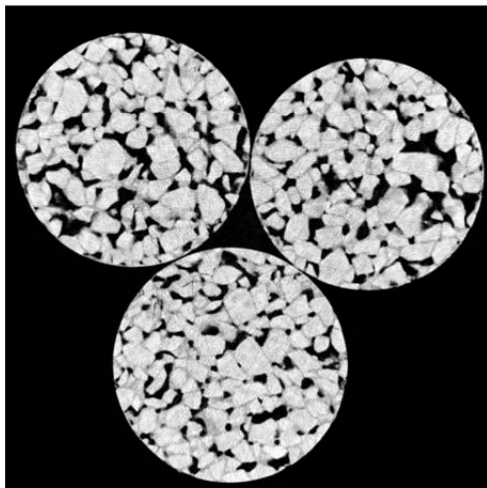
図-5.10 基準供試体の領域中心におけるCT画像



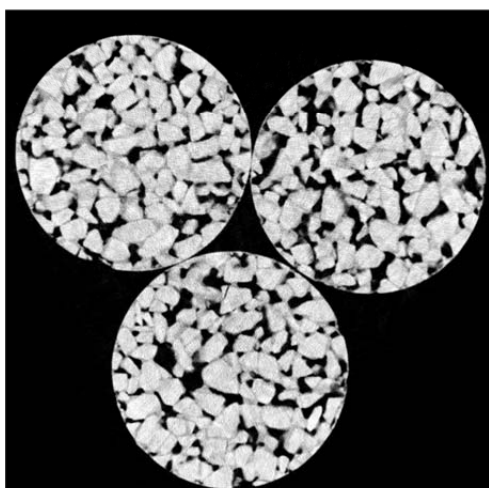
(a) 領域1 (h=6mm)



(b) 領域2 (h=15mm)



(c) 領域3 (h=24mm)



(d) 領域4 (h=33mm)

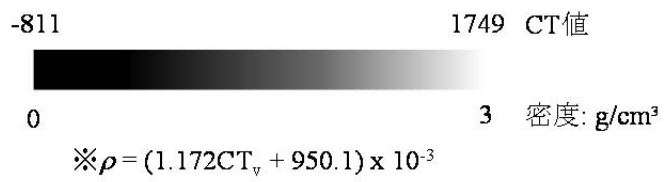
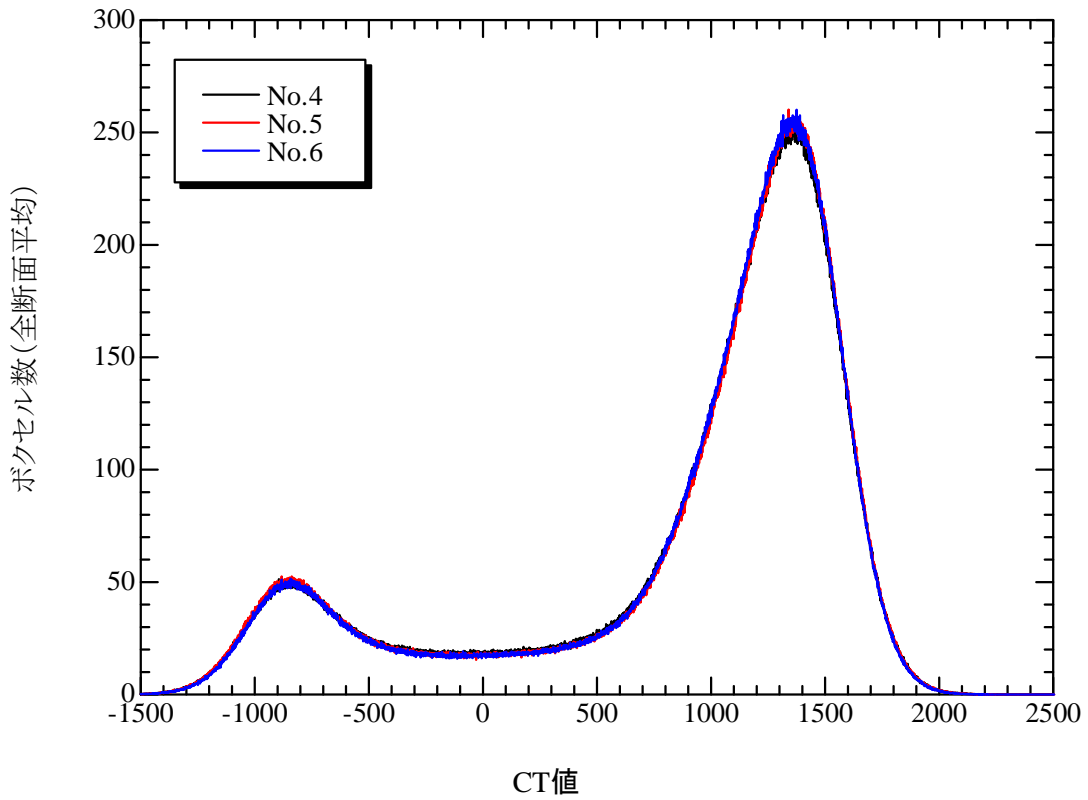
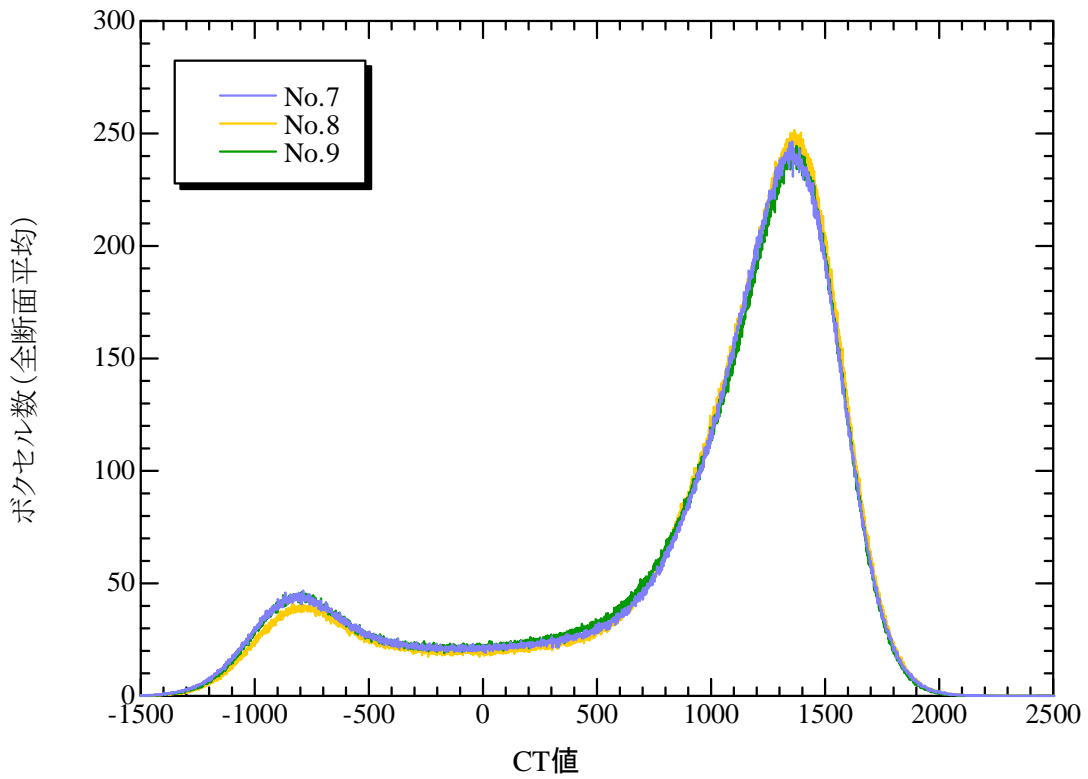


図-5.11 現場供試体の領域中心におけるCT画像



(a) 基準供試体



(b) 現場供試体

図-5.12 基準供試体および現場供試体の採択領域全断面平均CT値

表－5.6 基準供試体および現場供試体の最頻値

(1)基準供試体

No.	CT値範囲	
	-1,000～-700（空隙）	1,200～1,500（粗骨材）
4	-894	1,362
5	-882	1,340
6	-843	1,375
平均	-873	1,359
換算密度※	-0.073g/cm ³	2.543g/cm ³

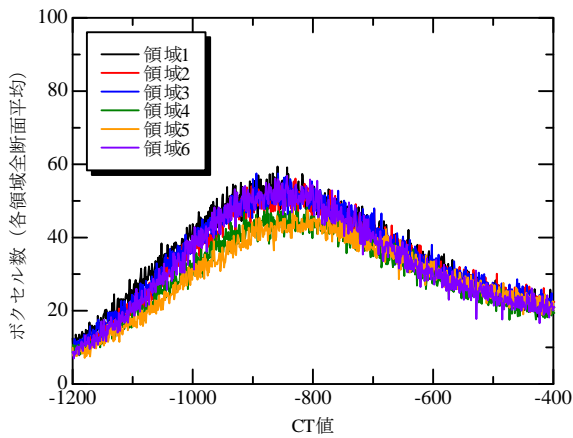
(2)現場供試体

No.	CT値範囲	
	-1,000～-700（空隙）	1,200～1,500（粗骨材）
7	-788	1,356
8	-836	1,365
9	-794	1,374
平均	-806	1,365
換算密度※	0.005g/cm ³	2.550g/cm ³

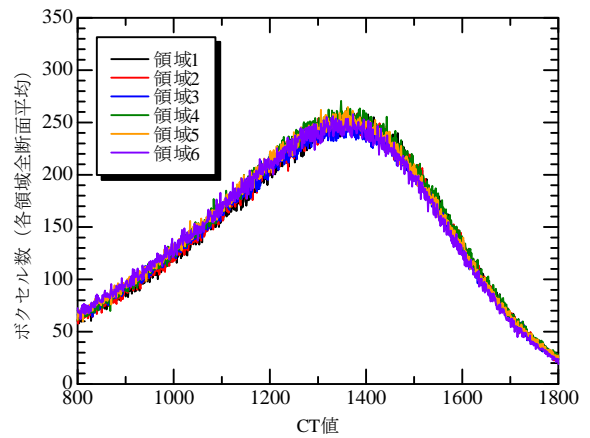
※換算密度：式－5.2により算出された密度

表－5.6はCT値範囲-1,000～-700および1,200～1,500の最頻値を示す。-1,000～-700における最頻値は基準供試体で平均-873，現場供試体で平均-806となり，これらを式－5.2により密度に換算するとそれぞれ-0.073g/cm³，0.005g/cm³となり，ほぼ0g/cm³に近い値となる。1,200～1,500における最頻値は基準供試体で平均1,359，現場供試体で平均1,365となり，これらを密度に換算するとそれぞれ2.543g/cm³，2.550g/cm³となり，表－5.1の粗骨材の密度2.663g/cm³と比べると，0.113～0.12g/cm³小さくなる。これは第4章でも述べたように，粗骨材の周囲の空隙が入り込むことによるものであると考えられる。

基準供試体における図－5.5に示す領域1～6の全断面平均CT値の分布を図－5.13に示す。なお，空隙付近と粗骨材付近の分布を見るため，CT値が-1,200～-400および800～1,800の範囲について示している。CT値の低い領域のCT値分布は領域1,2,6でボクセル数が多く，領域3,4,5でボクセル数が少なくなる傾向が見られ，この傾向は特に供試体No.6で顕著に見られた。CT値の高い領域のCT値分布も領域4,5でボクセル数が多く，領域6でボクセル数が少なくなる傾向が見られた。これは基準供試体が外側で密度が低く，内側で密度が高くなっていることを示しているものである。

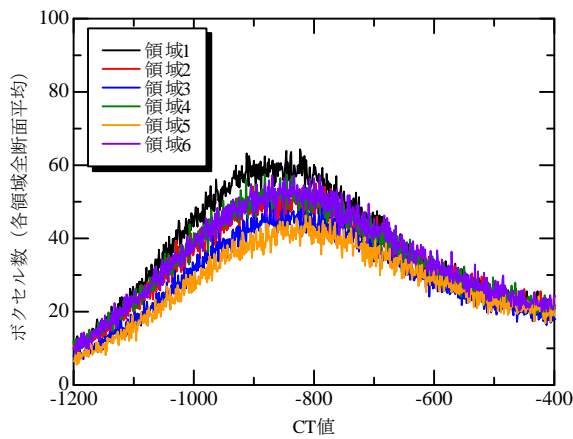


i) CT値=-1200~-400

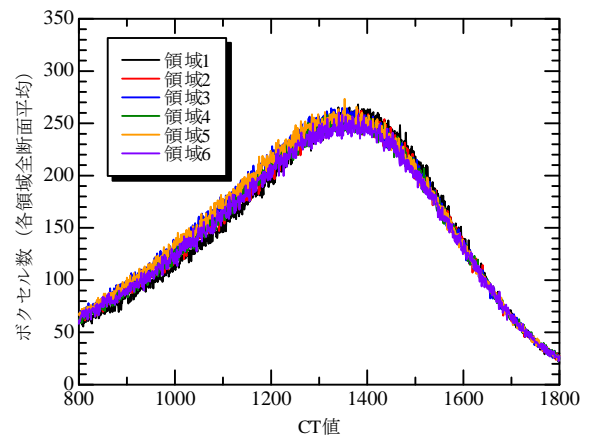


ii) CT値=800~1800

(1) 供試体No.4

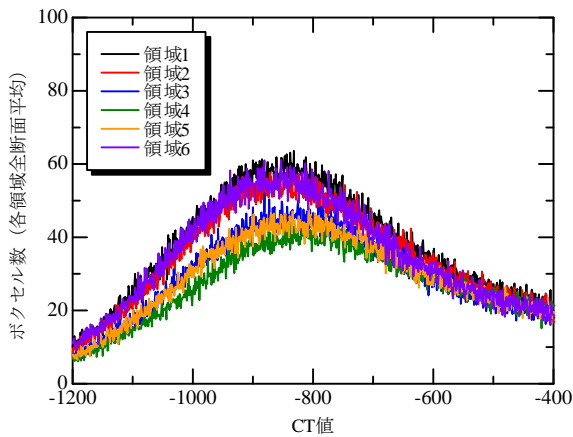


i) CT値=-1200~-400

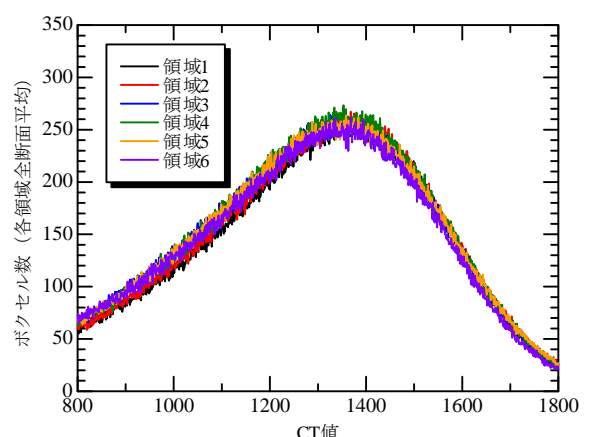


ii) CT値=800~1800

(2) 供試体No.5



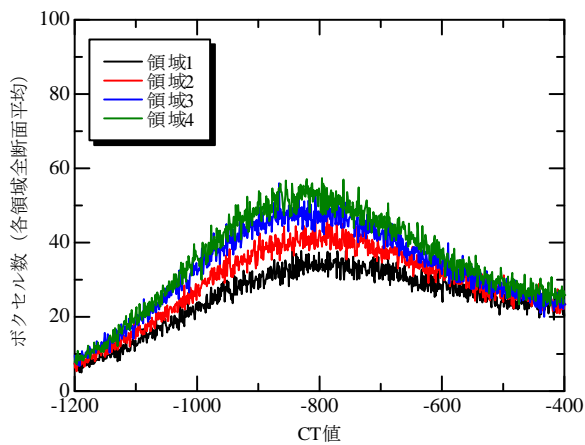
i) CT値=-1200~-400



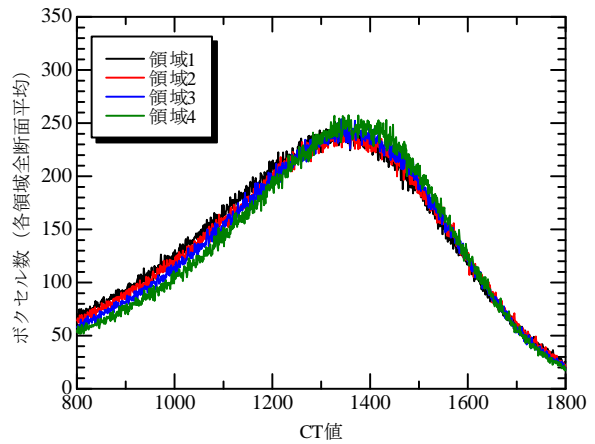
ii) CT値=800~1800

(3) 供試体No.6

図-5.13 基準供試体の領域1~6の全断面平均CT値の分布

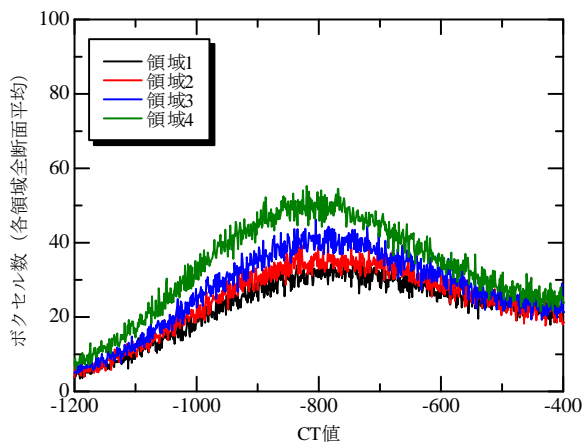


i) CT値=-1200~-400

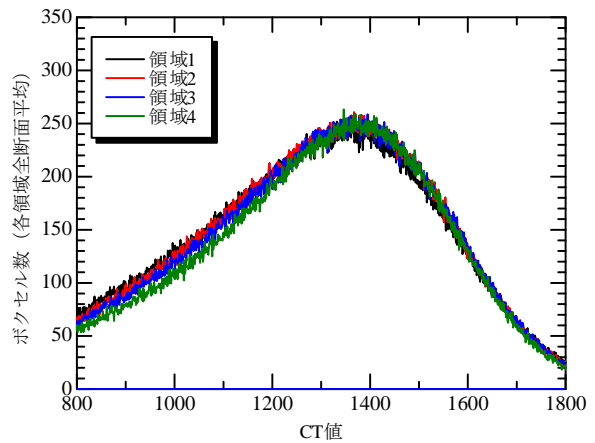


ii) CT値=800~1800

(1) 供試体No.7

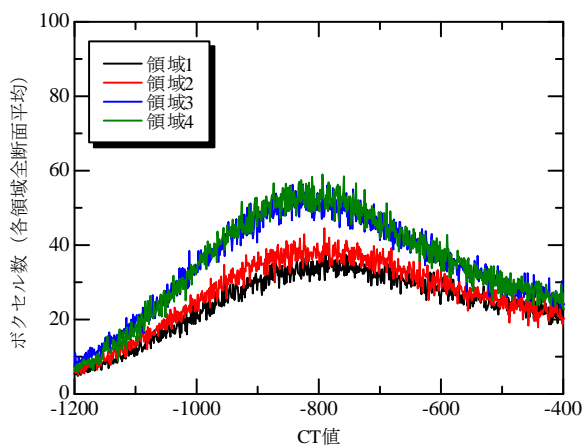


i) CT値=-1200~-400

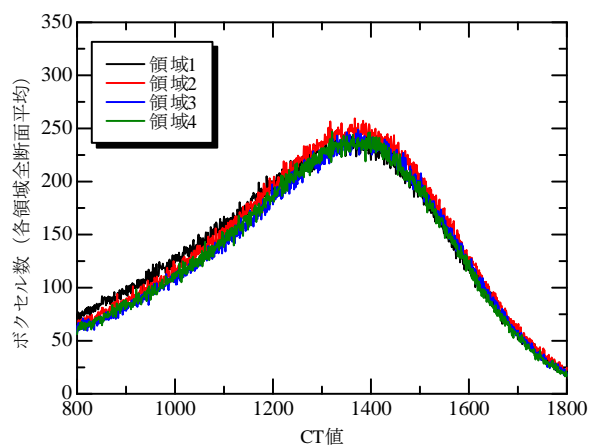


ii) CT値=800~1800

(2) 供試体No.8



i) CT値=-1200~-400



ii) CT値=800~1800

(3) 供試体No.9

図-5.14 現場供試体の領域1~4の全断面平均CT値の分布

現場供試体における図-5.5に示す領域1~4の全断面平均CT値の分布を図-5.14に示す。CT値の低い領域のCT値分布は、いずれの供試体も領域1,2,3,4の順に供試体上部となるにつれてボクセル数が多くなっていく。CT値の高い領域のうち1,200以下の範囲、すなわち細骨材およびアスファルトの領域で、供試体上部となるにつれてボクセル数が少なくなっていく。

(3) しきい値

基準供試体計3本および現場供試体計3本の全断面の平均しきい値および換算密度（式-5.2により換算した密度）を表-5.7に示す。また、各供試体の各領域における平均しきい値を図-5.15に示す。

空隙とアスファルト+石粉を分けるしきい値1は、基準供試体では領域4,5で大きく、領域1,2,6で小さくなる傾向が見られた一方、現場供試体では領域1、すなわち下部で大きく、領域4、すなわち上部で小さくなる傾向が見られた。アスファルト+石粉と細骨材を分けるしきい値2は、基準供試体では領域3,4,5、すなわち内側でやや大きく、領域1,6、すなわち外側でやや小さくなる傾向が見られた一方、現場供試体では下部でやや大きく、上部でやや小さくなる傾向が見られた。細骨材と粗骨材を分けるしきい値3は、基準供試体、現場供試体共、しきい値2とほぼ同様の傾向が見られた。

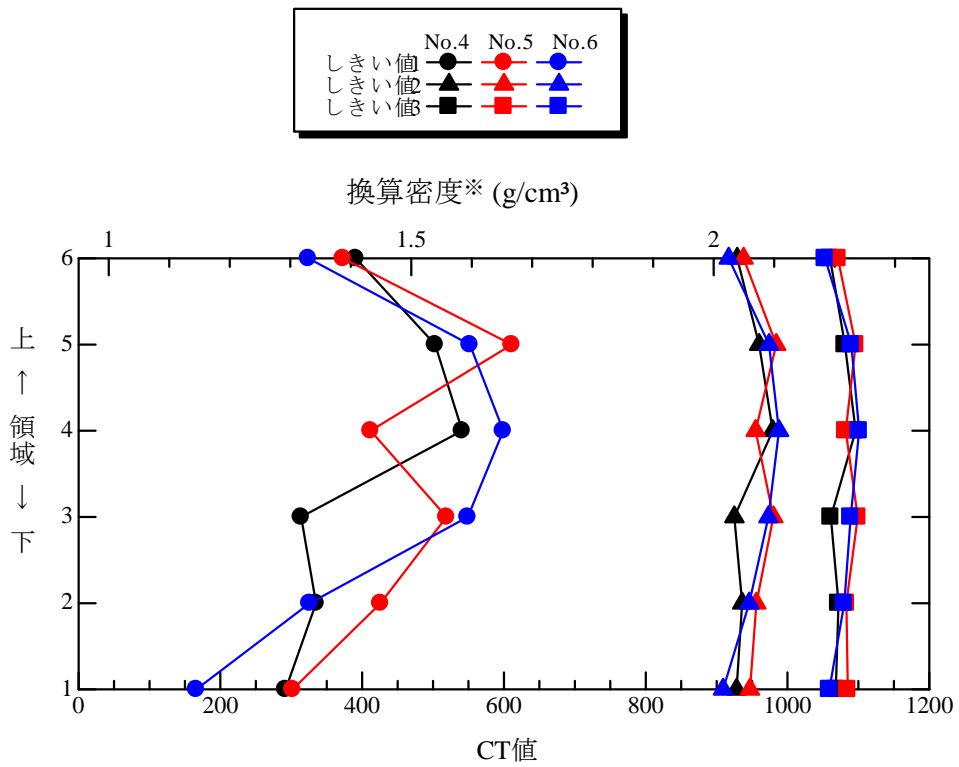
(4) 4値化画像および体積率

表-5.7のしきい値をもとに作成した基準供試体の4値化画像を図-5.16に、現場供試体の4値化画像を図-5.17に、空隙、アスファルト+石粉、細骨材および粗骨材の体積率計算結果を図-5.18に示す。

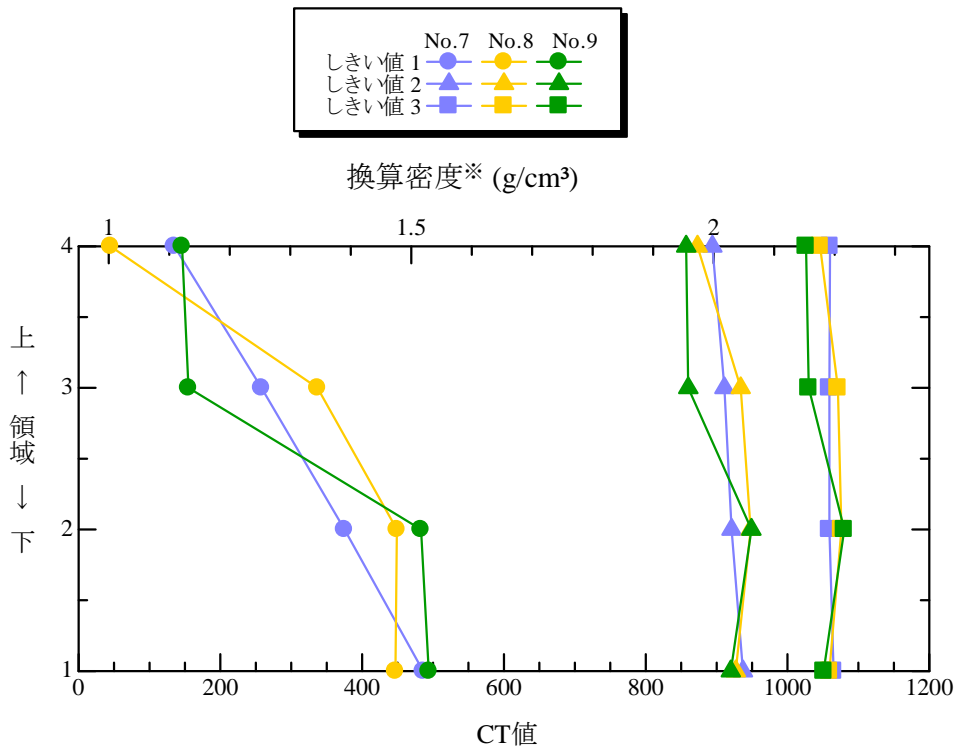
図-5.16からは、基準供試体の領域3,4,5で粗骨材が多く、領域1,2,6で空隙が多いことが確認できる。図-5.18(a)の体積率からもこのことが裏付けられており、領域3,4,5で空隙率が低く、粗骨材の体積率が大きくなっている。

表-5.7 基準供試体および現場供試体計の全断面の平均しきい値および換算密度

種別	しきい値No.	CT値	換算密度
基準供試体	しきい値1	404	1.424g/cm ³
	しきい値2	956	2.071g/cm ³
	しきい値3	1,077	2.212g/cm ³
現場供試体	しきい値1	363	1.376g/cm ³
	しきい値2	926	2.035g/cm ³
	しきい値3	1,056	2.188g/cm ³



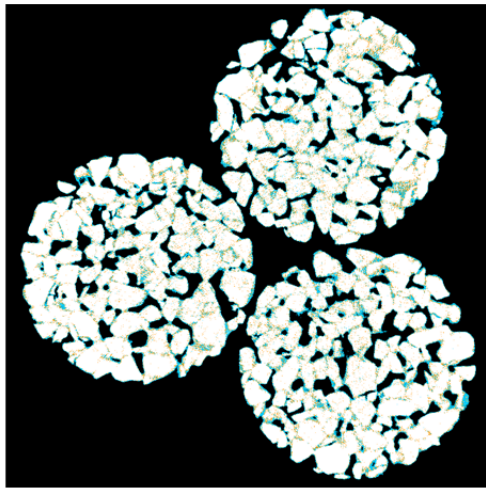
(a) 基準供試体



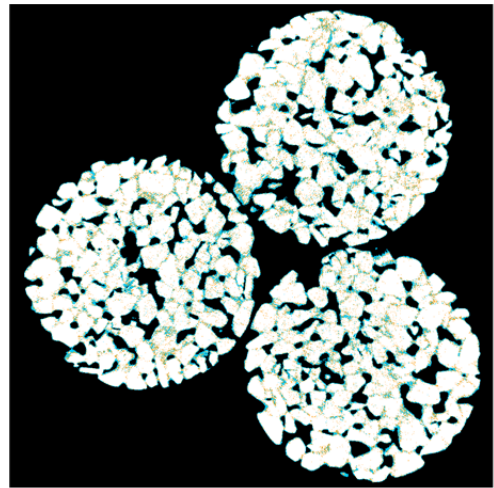
(b) 現場供試体

※換算密度:式5.1により換算された密度

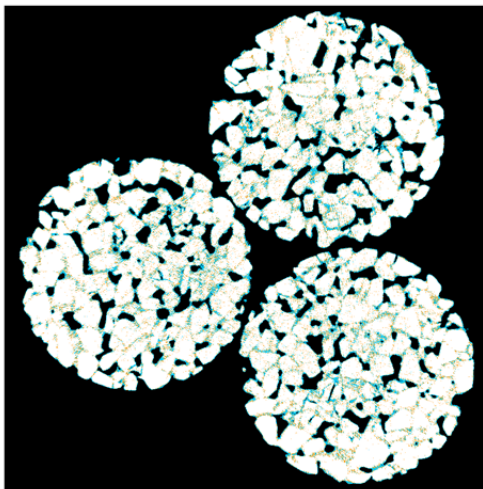
図-5.15 各供試体各領域における平均しきい値



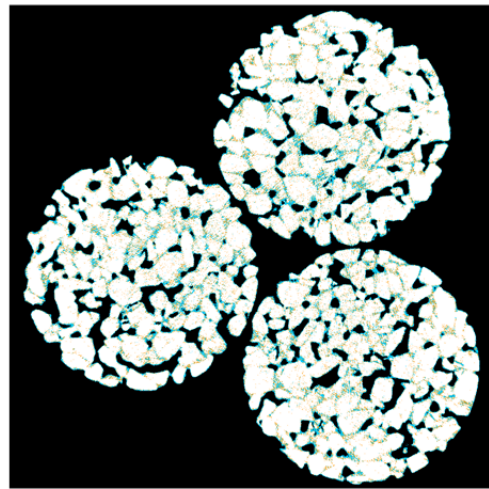
(a) 領域1 (h=8mm)



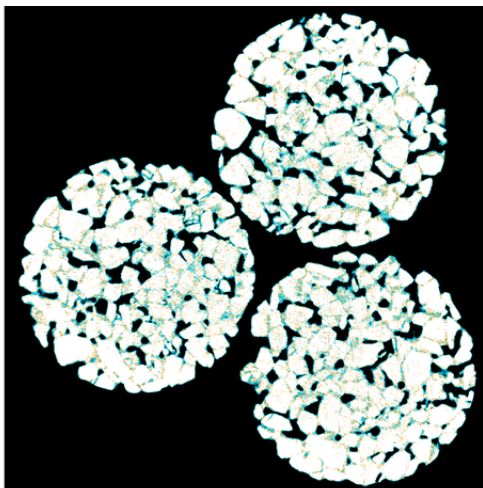
(b) 領域2 (h=18mm)



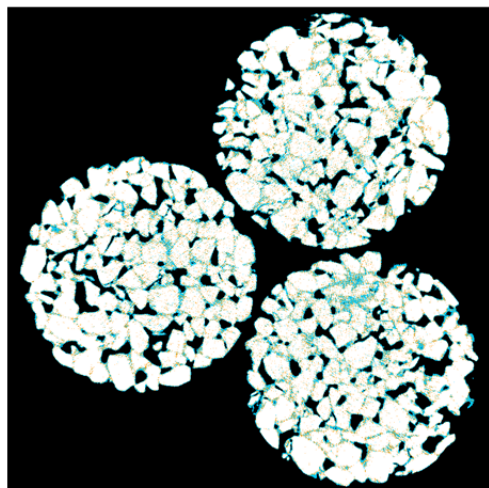
(c) 領域3 (h=28mm)



(d) 領域4 (h=38mm)



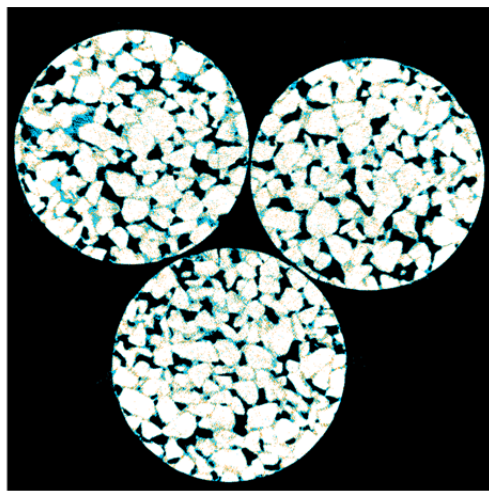
(e) 領域5 (h=48mm)



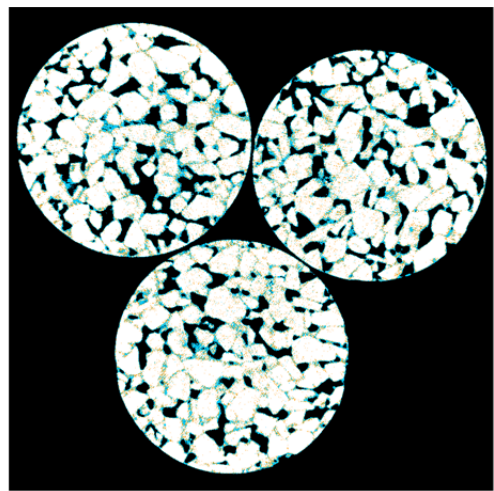
(f) 領域6 (h=57mm)

凡例: 空隙 アスファルト+石粉 細骨材 粗骨材

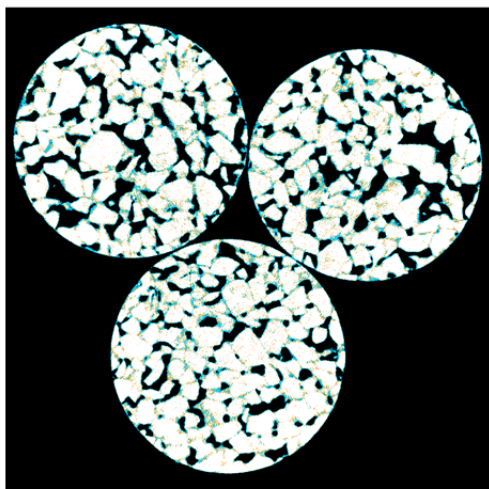
図-5.16 基準供試体の4値化画像



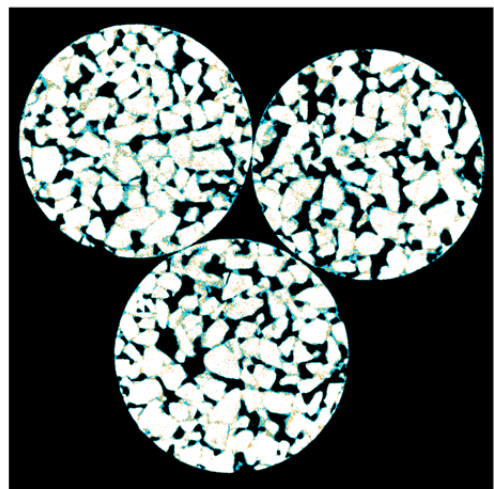
(a) 領域1 (h=6mm)



(b) 領域2 (h=15mm)



(c) 領域3 (h=24mm)



(d) 領域4 (h=33mm)

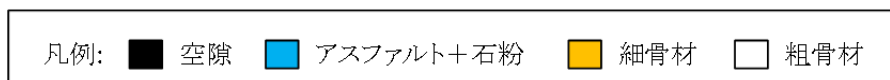
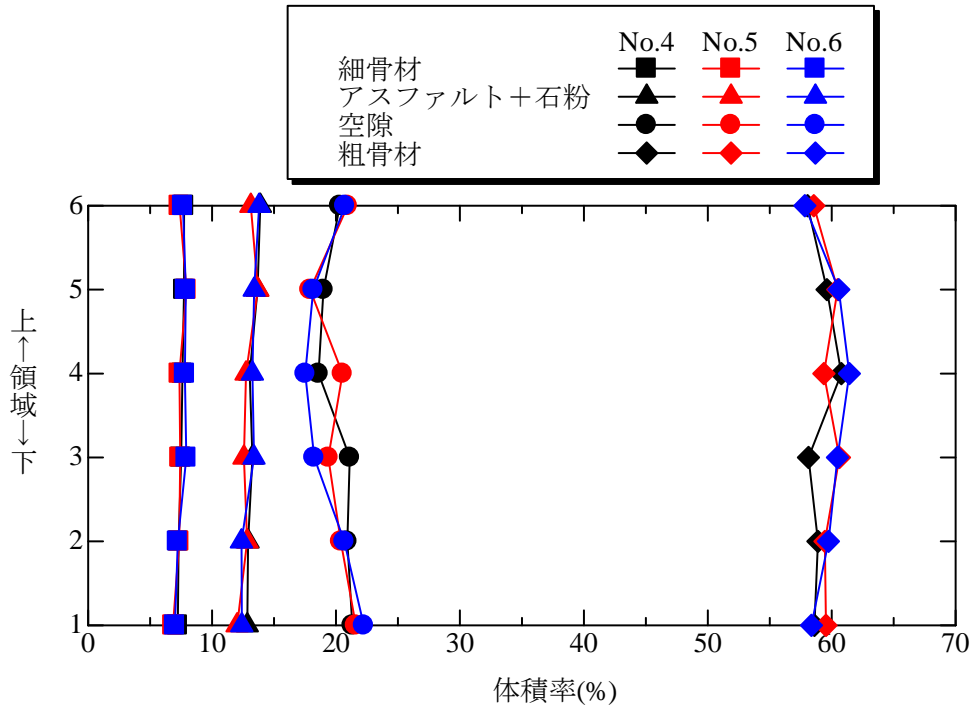


図-5.17 現場供試体の4値化画像

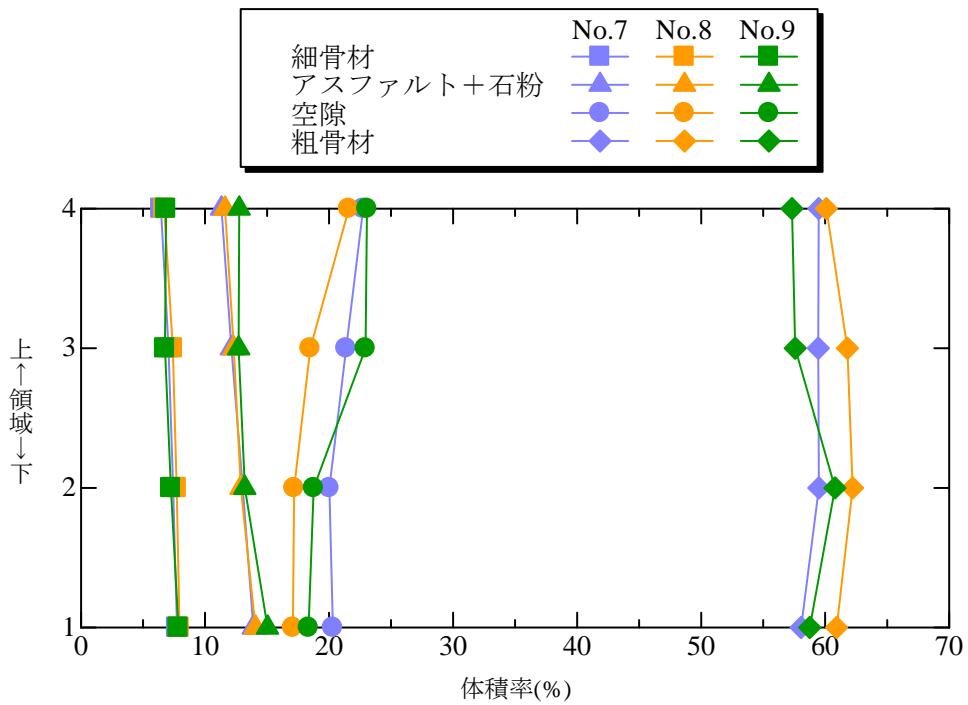
図-5.17からは、現場供試体の下部でアスファルト+石粉が多く、上部でアスファルト+石粉が少なくなり、空隙が多くなっていることが確認できる。図-5.18(b)の体積率からもこのことが裏付けられており、下部に行くに従ってアスファルト+石粉が増加し、空隙が減少している。

(5) 断面平均CT値および各素材平均CT値

各供試体の内部の状況を詳細に把握するため、第4章式4.1~4.5を用いて各供試体の断面平均CT値および各素材の平均CT値を算出した。断面平均CT値を算出した結果を図-5.19に、各素材平均CT値を算出した結果を図-5.20に示す。

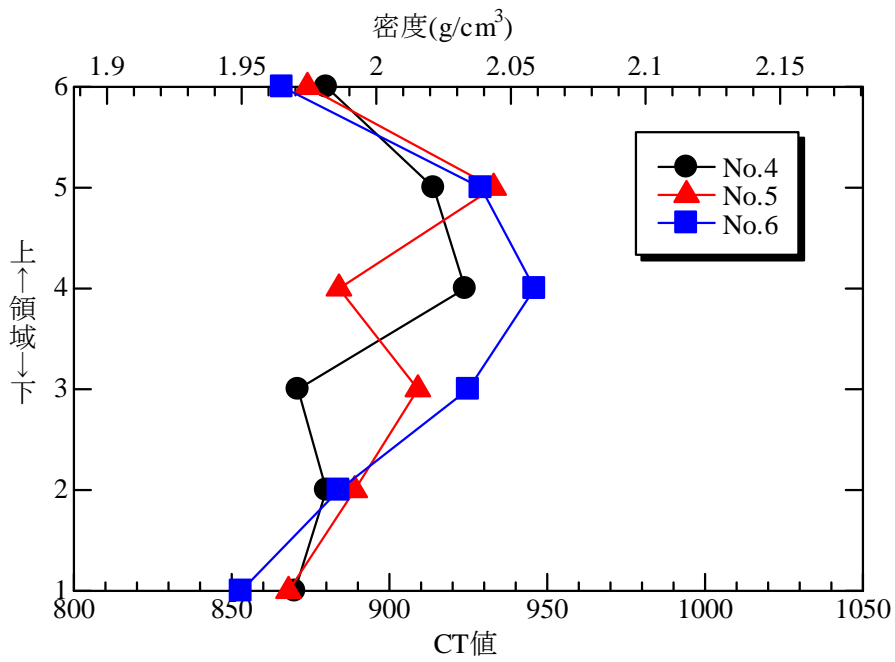


(a) 基準供試体

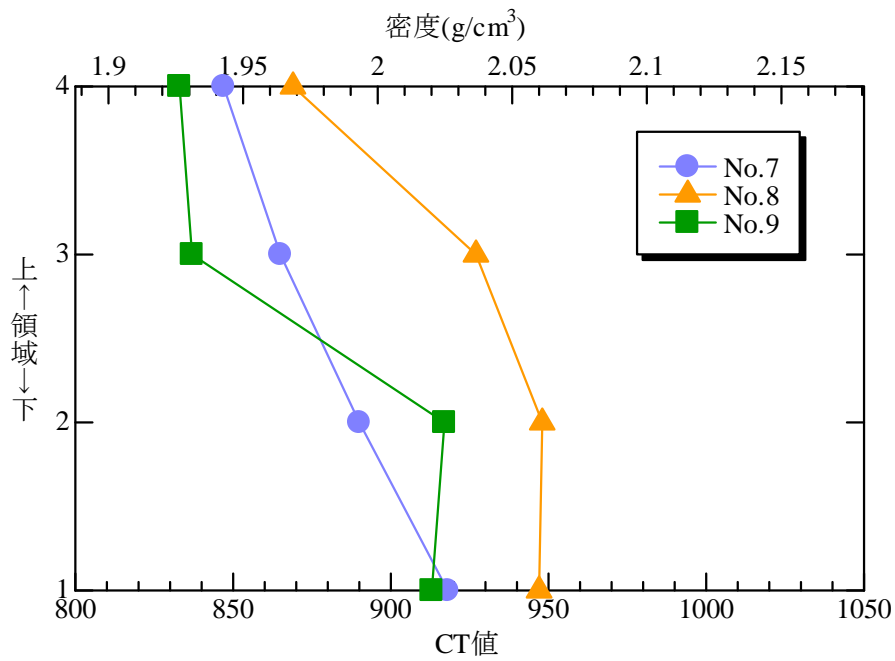


(b) 現場供試体

図-5.18 各領域の各素材体積率

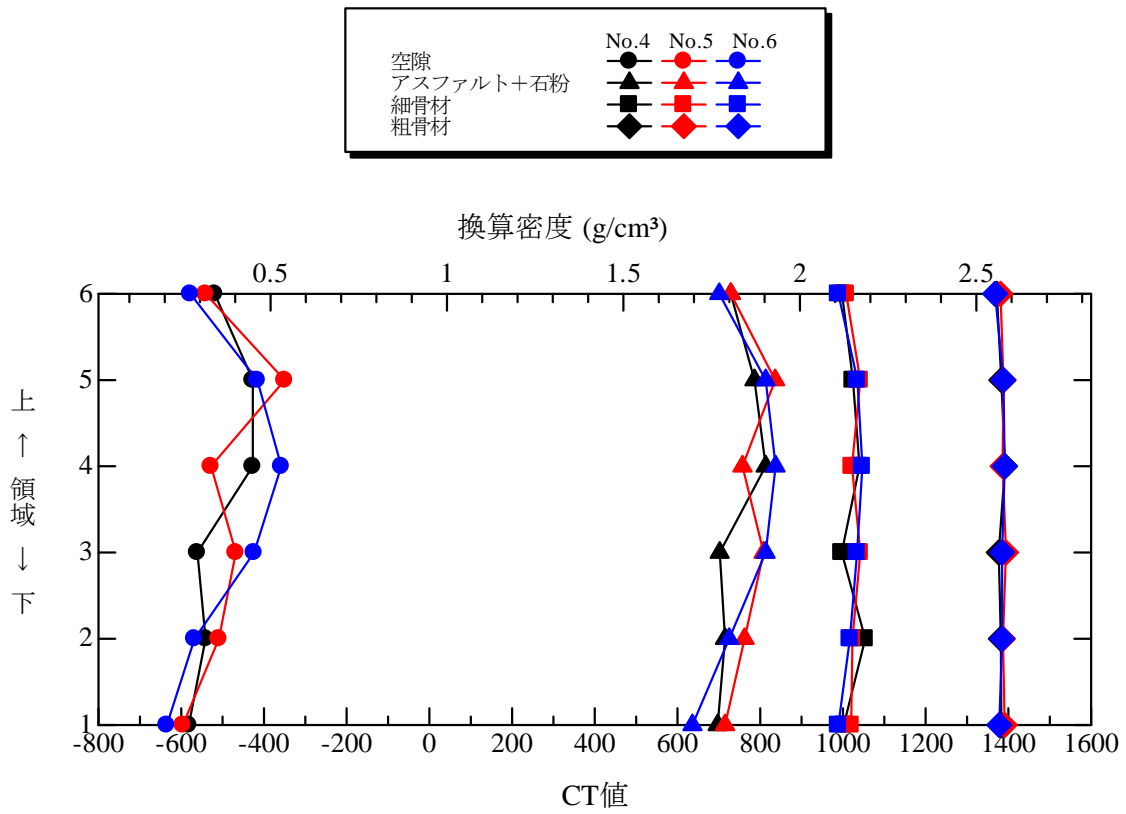


(a)基準供試体

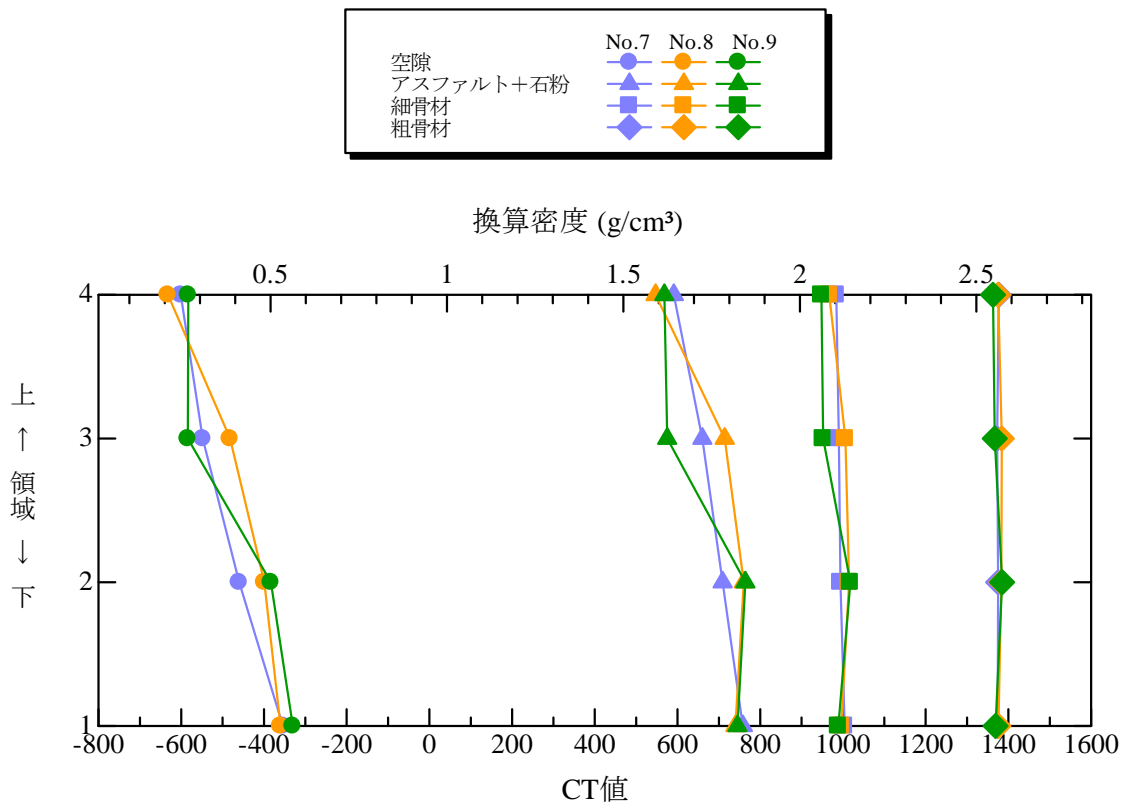


(a)現場供試体

図-5.19 各領域の断面平均CT値



(a) 基準供試体



(b) 現場供試体

図-5.20 各供試体の各素材平均CT値

断面平均CT値については、基準供試体、現場供試体共に図-5.15のしきい値1とほぼ同様の傾向が見られた。これは物質と空隙の境界値であるしきい値1と、物質そのもののCT値を代表する断面平均CT値が密接な関係を示していることを意味している。

空隙の平均CT値については、基準供試体が図-5.15のしきい値1および図-5.19の断面平均CT値とほぼ同様の傾向を示した。一方、現場供試体は上部ほどCT値が小さく、下部ほどCT値が大きくなる傾向が見られた。

アスファルト+石粉の平均CT値については、基準供試体は領域3,4,5といった中間部が大きく、領域1,2,6といった上下部が小さくなった。一方、現場供試体は全般的には上部ほどCT値が小さく、下部ほどCT値が大きくなる傾向が見られた。

細骨材の平均CT値については、基準供試体はわずかではあるが内部が大きく外部が小さくなる傾向が、現場供試体は上部ほど小さく下部ほど大きくなる傾向が見られ、アスファルト+石粉の影響を受けていることが確認された。

粗骨材の平均CT値については、基準供試体、現場供試体共に大きな変化は見られず、基準供試体のCT値は1,368~1,394、換算密度は2.553~2.584g/cm³、現場供試体のCT値は1,363~1,385、換算密度は2.548~2.573g/cm³の範囲にある。

(6) まとめ

一般に、マーシャル供試体の締固めは、マーシャル自動突固め装置のハンマにより、所定の締固め温度（155~165°C、表-5.2）で、はじめに片面を所定回数突き固めた後、モールドを反転させ、もう一方の面を所定回数突き固めることになっている⁸⁾。そのため、図-5.19(a)が示すように、供試体の上下部（領域1,2,6）でCT値が低く、供試体の中間部（領域3~5）でCT値が高くなった。これは、図-5.13および図-5.18(a)が示すように、上下部で空隙率が高く、中間部で空隙率が低くなったためである。また、両側からハンマで突き固められることにより、図-5.17(a)が示すように、粗骨材が中間部に多く集まる結果となった。また、図-5.18(a)では細骨材およびアスファルト+石粉の体積率に大きな変化が見られなかったが、図-5.20(a)ではそれぞれのCT値は中間部ほど高くなっている。細骨材は粒子が小さくアスファルトは常温で固体であること、双方の体積率が小さいことから、双方は空隙の影響を受けたものと考えられる。

一方、現場供試体については、図-5.13および図-5.19(b)が示すように、供試体の上部でCT値が低く、下部でCT値が高くなる傾向が見られた。しかし、供試体No.8およびNo.9については領域2よりも領域1のほうが、CT値がわずかに小さくなっていること

が図-5.19(b)に示されている。これは、アスファルトフィニッシャがアスファルト混合物を敷き均す際に、粗骨材が中間部で若干多く敷き均された後、高温（155～165℃、表-5.2）で転圧する際に熱可塑性をもつアスファルトは細骨材と共に粗骨材間の隙間にそって底部に流れたものと考えられる。これを裏付けるように、図-5.18(b)を見ると、細骨材、ならびにアスファルト+石粉の体積率が上部ほど低く、下部ほど高くなる傾向が見られ、粗骨材についてもわずかながら上下部で体積率が小さくなる傾向がある。

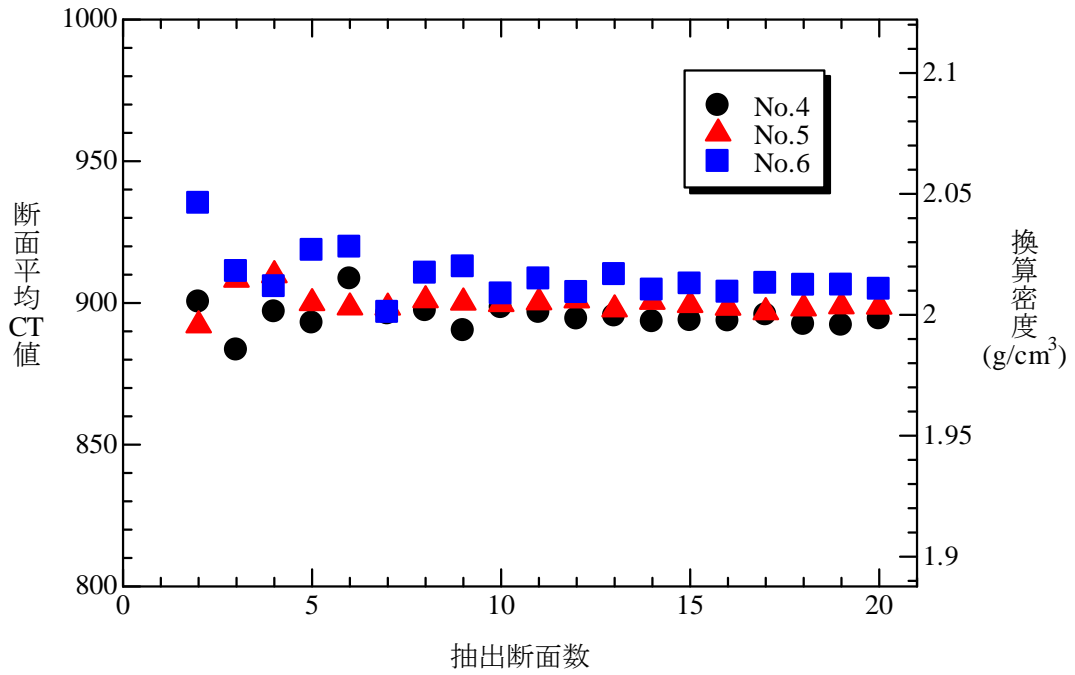
5.4 断面数および撮影位置の決定

5.3で示したように、CT値あるいは密度は、基準供試体では内部ほど大きく、外部ほど小さい、現場供試体では上部ほど小さく、下部ほど大きいという傾向が見られた。そのため、無作為抽出の場合には多くの断面を抽出しなければならないという問題が指摘されているとともに、偏って断面を抽出した場合には、アスファルト混合物の物性を過大評価あるいは過小評価してしまう危険性がある³⁾。そこで、図-5.6に示すように各供試体から等分布により抽出すれば、これらの危険性が解消される可能性がある。したがって、本論文では等分布抽出を採用するものとする。

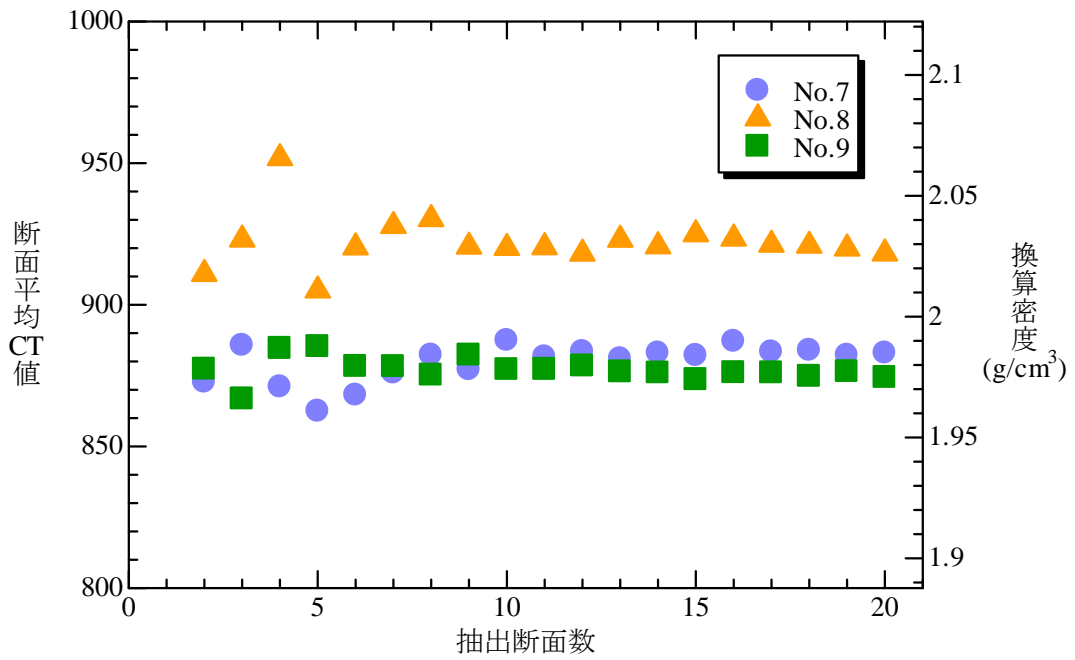
図-5.20は基準供試体および現場供試体における、等分布による断面抽出数と抽出された断面の平均CT値を、図-5.21は断面抽出数と標準偏差を、図-5.22は断面抽出数と標準誤差の関係を示す。

図-5.20の平均CT値に着目した場合、基準供試体、現場供試体共に抽出個数が5個までは多少のばらつきが見られるが、5個以上になれば全体の平均CT値が870～920、換算密度が1.98～2.02g/cm³に収束する傾向が見られる。

図-5.21の標準偏差に着目した場合、基準供試体は抽出個数が5個までは多少のばらつきが見られるが、5個以上になれば標準偏差が密度で0.06g/cm³以内に収束する傾向が見られた。一方、現場供試体ではNo.7の抽出個数3個で標準偏差が小さくなった。これは図-5.18(b)の供試体No.7の断面平均CT値が直線的に推移したためと考えられる。また、No.7の抽出個数4個以上、ならびに供試体No.8,9の抽出個数3個以上で0.06g/cm³以内に収束している。

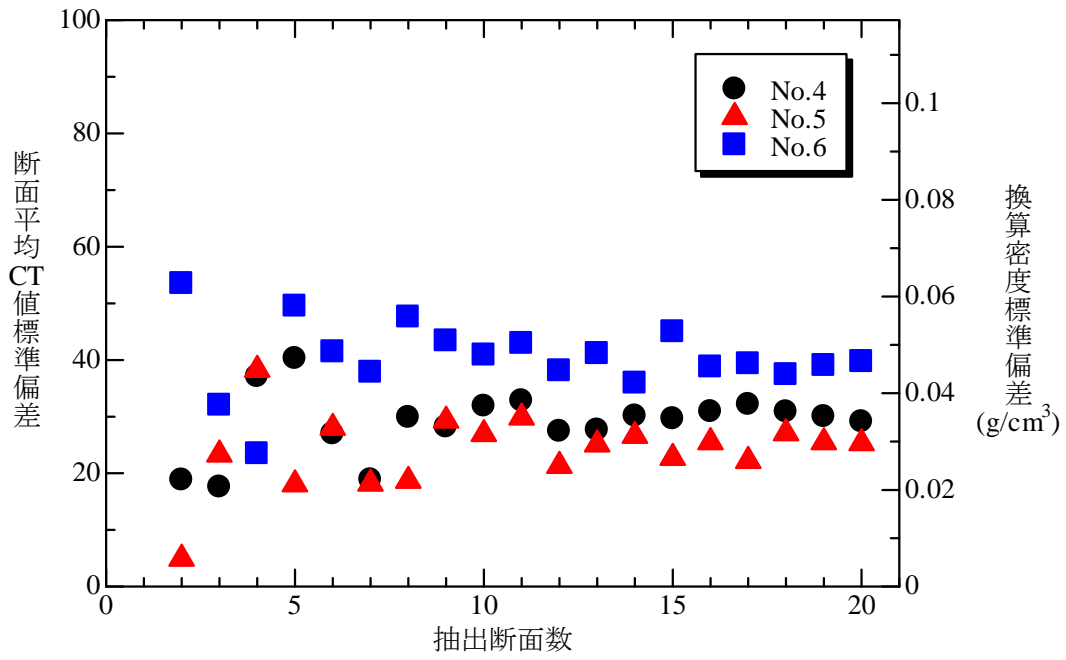


(a) 基準供試体

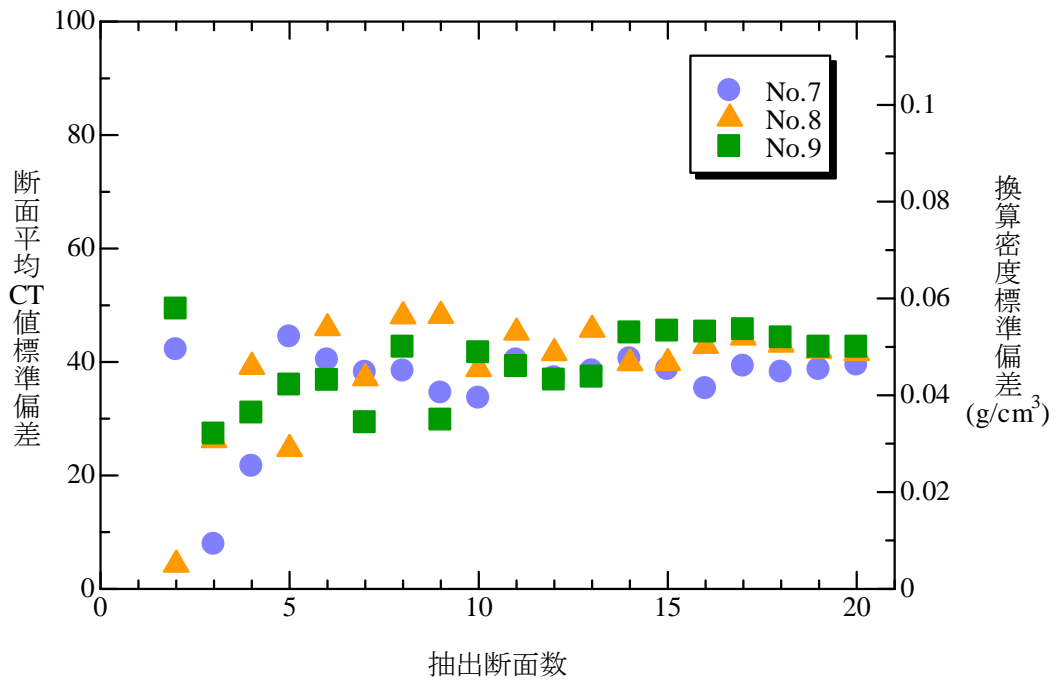


(b) 現場供試体

図-5.20 各供試体における断面抽出数と断面平均CT値

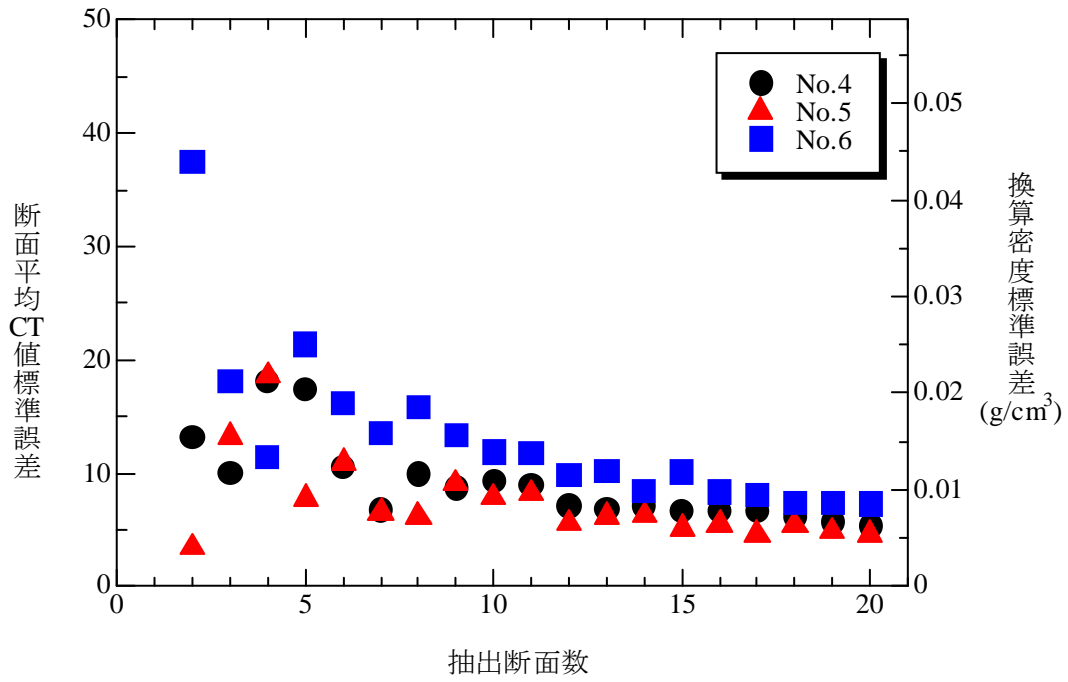


(a) 基準供試体

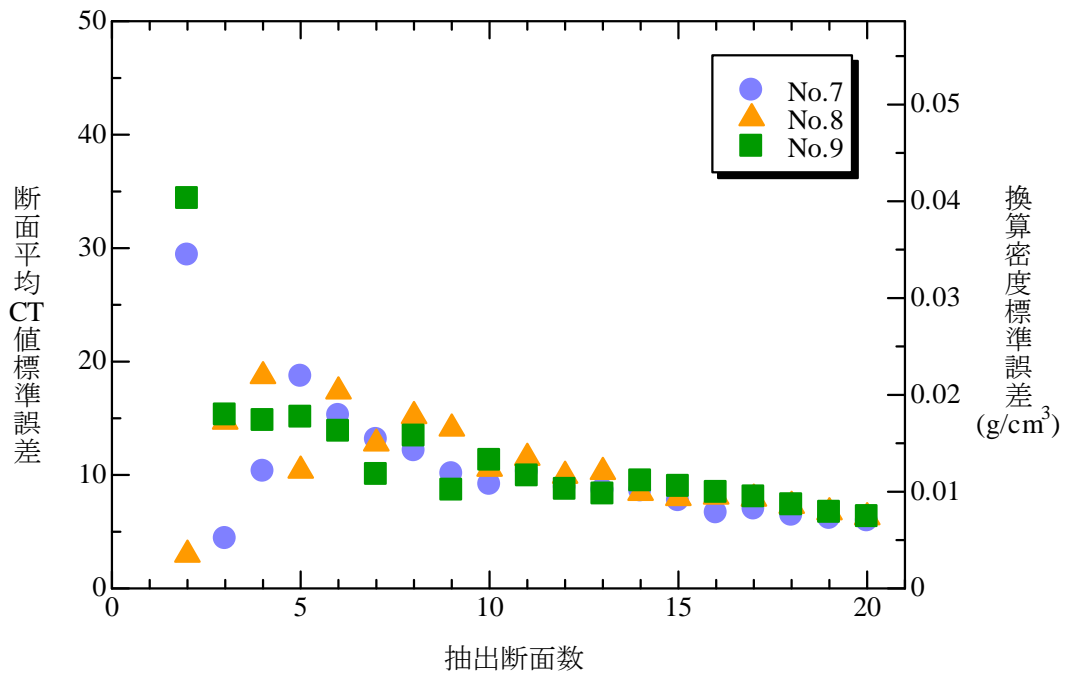


(b) 現場供試体

図-5.21 各供試体における断面抽出数と標準偏差



(a) 基準供試体



(b) 現場供試体

図-5.22 各供試体における断面抽出数と標準誤差

表－5.8 現場供試体計の等分布3断面および全断面の平均CT値および換算密度の関係

No.	CT値			密度(g/cm ³)		
	3断面	全断面	誤差	3断面	全断面	誤差
No.7	886	883	3	1.988	1.985	0.003
No.8	923	920	3	2.032	2.028	0.004
No.9	867	874	-7	1.966	1.975	-0.009

図－5.22の標準誤差に着目した場合、基準供試体No.6の抽出断面数5個で密度の標準誤差が0.025g/cm³、現場供試体No.8の抽出断面数4個で密度の標準誤差が0.022g/cm³となり、それより抽出断面数が増加すると標準誤差が低下する傾向が見られた。したがって、基準供試体で5断面、現場供試体で4断面より増やしても精度の向上は見込めないと考えられる。

図－5.19の高さ毎の断面平均CT値の傾向、ならびに図－5.20～22の抽出数と断面平均CT値、標準偏差および標準誤差を勘案した結果、基準供試体については等分布で5断面以上抽出すれば信頼できるCT値を得ることができるものと考えられる。一方、現場供試体の場合は、上部のCT値が低く下部のCT値が高いこと、3断面以上で標準偏差が安定し、3断面の標準誤差が小さいことから、表－5.8から全断面の結果と等分布3断面の結果との間の誤差が極めて小さいことから、等分布で3断面を抽出した場合でも十分な精度が得られるものと考えられる。

5.5 まとめ

第4章では、室内で行われるマーシャル供試体を用いたX線CT撮影を実施したが、本章では実際の高速道路のポーラスアスファルト舗装の施工現場で用いられた基準供試体および現場供試体の全断面撮影を実施し、それらの内部特性を明らかにするとともに、X線CT撮影に必要な断面数の検討を実施した。以下に得られた知見を列挙する。

- i) 基準供試体および現場供試体を全断面撮影し、グラブス・スミルノフ検定を行ったことにより、採択領域と棄却領域を明確にするとともに、棄却領域における外部空隙や裁断面の状況をCT画像により取得することができた。
- ii) 基準供試体は、マーシャル自動突固め装置のハンマにより突き固められることから、供試体上下部で空隙率が高く、中間部でCT値および密度、ならびに骨材体積

率が高くなることが明らかとなった。

- iii) 現場供試体は敷き均しおよび転圧の影響により，供試体上部で空隙率が高く，供試体下部でCT値および密度，アスファルト+石粉の体積率ならびに骨材体積率が高くなることが明らかとなった。
- iv) 等分布による断面抽出数と抽出された断面の平均CT値，標準偏差および標準誤差の関係を勘案した結果，X線CTでアスファルト混合物の品質評価を行う際には，基準供試体については等分布で最低5断面，現場供試体については等分布で最低3断面抽出することが望ましい。

なお，今回は現場におけるコアを対象として撮影断面数の検討を行った。今後，現場に適用していくためには，提案された断面数による評価を，他の現場において検証する必要がある。

【参考文献】（第5章）

- 1) 日本道路協会：舗装設計施工指針（平成18年版），2006.
- 2) 日本道路協会：舗装施工便覧（平成18年版），2006.
- 3) 小川慧一郎：X線CTを用いたアスファルト混合物の工学特性の評価に関する研究，熊本大学修士論文，2013.
- 4) Taniguchi S., Otani J. & Kumagai M.: A study on characteristics evaluation to control quality of asphalt mixture using X-ray CT, Road Materials and Pavement Design, Taylor and Francis, Vol.15, Issue 4, pp.892-910, 2014.
- 5) 谷口聡，大谷順，熊谷政行：X線CT法を用いたアスファルト混合物の基準供試体および現場供試体の内部特性の評価，第30回日本道路会議論文集，No.3062，2013.
- 6) Zelelew, H.M., Papagiannakis, A.T. & Masad, E.: Application of digital image processing techniques for asphalt concrete mixture images, Proceeding of the 12th International Conference of International Association for Computer Method and Advance in Geomechanics, pp.119-124, 2008.
- 7) You Z.P., Adhikari S. and Kutay M.E.: Dynamic modulus simulation of the asphalt concrete using the X-ray computed tomography images, Materials and Structures, Springer, Vol.42, Issue 5, pp.617-630, 2009.
- 8) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧〔第3分冊〕，2007.

第6章 X線CTを用いたアスファルト混合物の耐久性評価

6.1 概説

わだち掘れは、車輪が通過する位置に走行方向に生じる連続的なへこみであり、アスファルト舗装の代表的な破損形態である^{1),2)}。わだち掘れが大きくなると、車の操縦安定性の低下、水はねによる視界障害、ならびに歩道および沿道への水しぶきの原因になる等、道路利用者に影響を及ぼす。わだち掘れは主として、

- 1) アスファルト混合物層の流動変形によるもの
- 2) 路盤、路床の流動変形によるもの
- 3) タイヤチェーン等の摩耗によるもの

がある²⁾が、全国的に問題となっているのはアスファルト混合物層の流動変形によるものであり、平成9年度の建設省（当時）管理の国道の修繕原因の約4割がアスファルト混合物層の流動変形によるものである³⁾。

一方で、1980年代以降、「わだち割れ」あるいは'Top-down Cracking'と呼ばれる、アスファルト舗装表面から入る縦ひび割れも現場で問題となっているが²⁾、その発生原因の解明が課題となっている。また、ポーラスアスファルト混合物においては縦ひび割れが内部から発生している可能性があることが報告されている^{4),5)}。

耐流動性を評価する試験としては、一般にホイールトラッキング試験⁶⁾が用いられ、その結果は塑性変形輪数として『車道および側帯の舗装の構造の基準に関する省令』⁷⁾にも定められている。ホイールトラッキング試験は所定の大きさの供試体上に荷重調整した小型のゴム車輪を繰返し走行させ、変形-時間曲線より動的安定度、変形率および圧密変形量を求める試験である。しかし、ホイールトラッキング試験では走行荷重による供試体表面の変形を捉えているにすぎないため、アスファルト混合物内部における流動の状況を把握するのは困難である⁸⁾。

近藤ら⁹⁾をはじめ、ホイールトラッキング試験用型枠の垂直直角方向の一面をガラス板とし、骨材の動きを断続的に写真で撮影することで、流動特性を骨材の動きから検討する試みがなされているもの、これらの研究は側面からの評価である。

近年では物体の内部を非破壊で可視化する技術としてX線CTが注目されている。小

川ら¹⁰⁾やTaniguchiら¹¹⁾はCT画像から骨材を抽出し、粒子追跡手法（以下、PTV）を用いてホイールトラッキング試験における骨材の挙動把握を行った。PTVは骨材に着目するのに対し、デジタル画像相関法（以下、DIC）は測定対象物の輝度値の動きに着目していることから、測定対象物全体の挙動を把握できるというメリットがある。

本章では、輪荷重直下のアスファルト混合物の変位特性およびひずみ特性を解明することを目的に、第2節では供試体、ホイールトラッキング試験、X線CT撮影およびDIC解析の概要を、第3章ではホイールトラッキング試験、X線CT撮影、DIC解析を実施し、アスファルト混合物の変位場およびひずみ場を算出するとともに、耐流動性および耐ひび割れ性等、耐久性に関する評価結果を示し、第4節で結果を総括する。

6.2 試験概要

6.2.1 供試体の概要^{8),10)~12)}

本章で使用した供試体は、最大粒径13mmの密粒度アスファルト混合物（以下、密粒度）にストレートアスファルト（以下、ストアス）を添加したもの（以下、W1）、およびポリマー改質アスファルトII型（以下PMA-II）を添加したもの（以下、W2）、ならびに最大粒径13mmのポーラスアスファルト混合物（以下、ポーラス）にポリマー改質アスファルトH型（以下PMA-H）を添加したもの（以下、W3）の3種類である（写真-6.1）。密粒度およびポーラスの骨材配合率を表-6.1に、粒度分布を図-6.1に、ストアス、PMA-II、PMA-Hの物性値を表-6.2に、供試体W1~W3の混合物の諸元を表-6.3に示す。

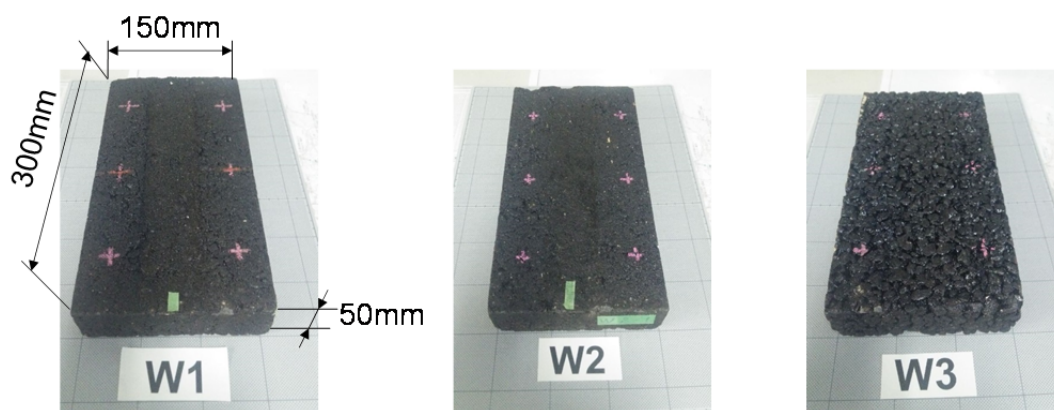


写真-6.1 各供試体写真⁹⁾

表-6.1 密粒度およびポーラスの骨材配合率

	粗骨材	細骨材	石粉
密粒度[%]	60.0	34.5	5.5
ポーラス[%]	85.0	10.0	5.0

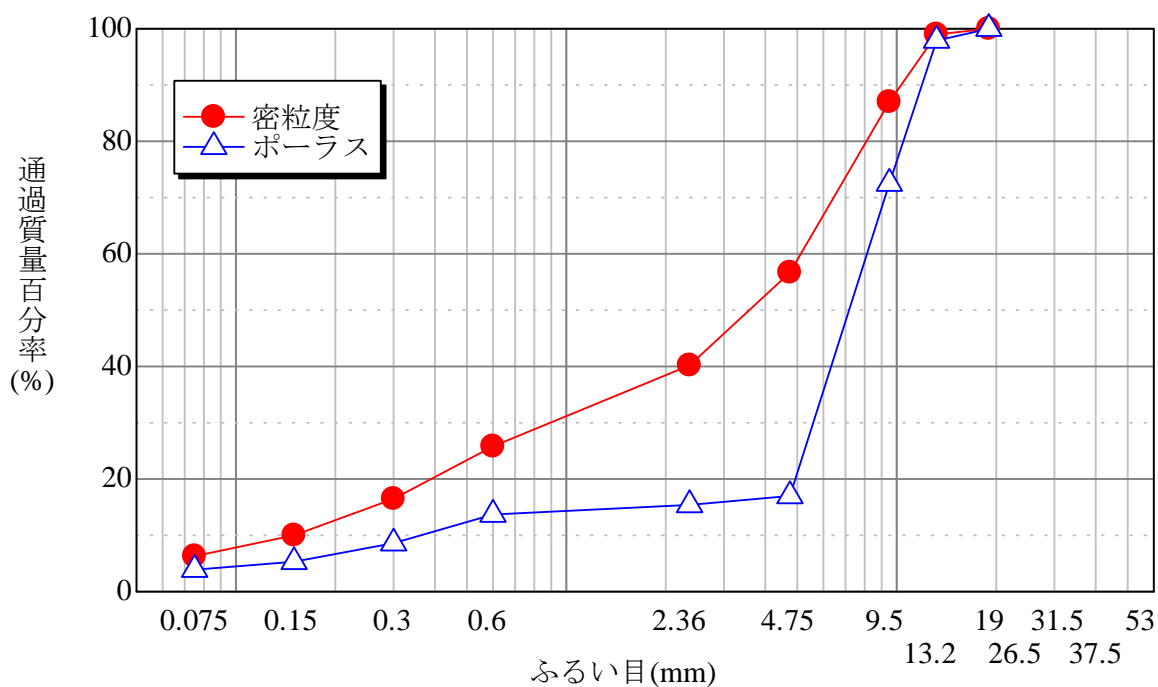


図-6.1 粒度分布曲線

表-6.2 アスファルトの物性値

	ストアス	PMA-II	PMA-H
針入度(1/10mm)	69	62	63
軟化点[°C]	46.5	67.0	101.0
密度(15°C)[g/cm³]	1.034	1.028	1.026

表-6.3 各混合物の諸元

	W1	W2	W3
最適アスファルト量[%]	5.8	5.7	4.9
密度[g/cm³]	2.395	2.375	1.982
空隙率[%]	2.9	3.8	20.9

ホイールトラッキング試験用供試体の作製方法を以下に示す。

- 1) 所定温度に加熱した骨材と，計量したアスファルトを縦型ミキサに投入，攪拌してアスファルト混合物を製造する。
- 2) 製造したアスファルト混合物を，300mm×300mm×50mmの型枠に必要な質量の半分（厚さ25mmになる量）を型枠に入れ敷均し，振動タンパにて転圧する。
- 3) 転圧後，図-6.2のように電気炉酸化スラグ骨材を配置する。
- 4) 転圧後，残りのアスファルト混合物を敷均し，ローラコンパクタにて転圧する。
- 5) 作成終了後，室温になるまで冷却し，冷却後，両端75mmを切り落とし，幅150mm×長さ300mm×高さ50mmに成型する。

通常，ホイールトラッキング試験で使用される供試体のサイズは300mm×300mm×50mmである。しかし，アスファルト混合物は密度の高い骨材が多く，X線を吸収しやすい材料¹³⁾であるとともに，長さとおみの比が6:1であることから，X線CT撮影を行った際にアーティファクト¹⁴⁾と呼ばれる放射状の白い線が発生し，供試体の画像全体が白色化した（写真-6.2）⁸⁾。そのため，両端75mmを切り落とし150mm×300mm×50mmに成型するとともに，ホイールトラッキング試験前後のCT画像を簡便に比較するため，X線を照射する位置に通常のお材よりも密度の高い電気炉酸化スラグ骨材（密度＝3.697g/cm³）を，マーキング骨材として配置した⁸⁾。

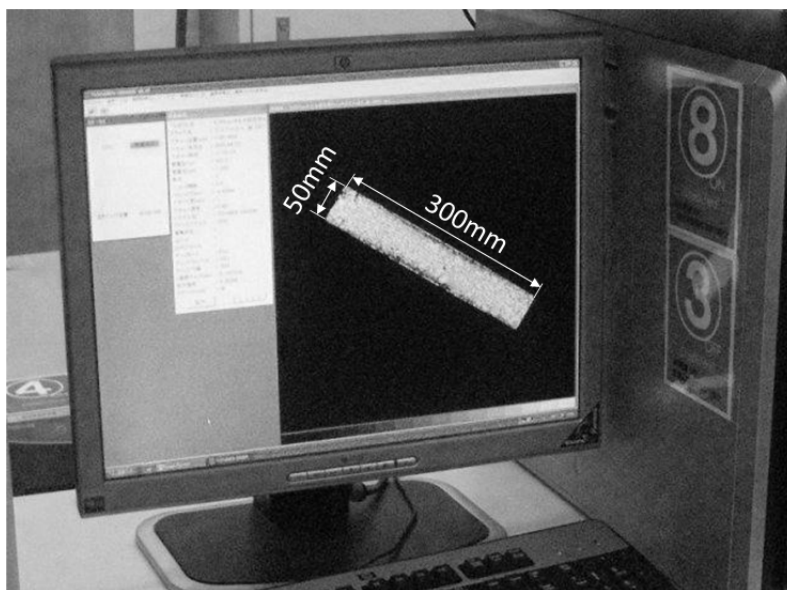
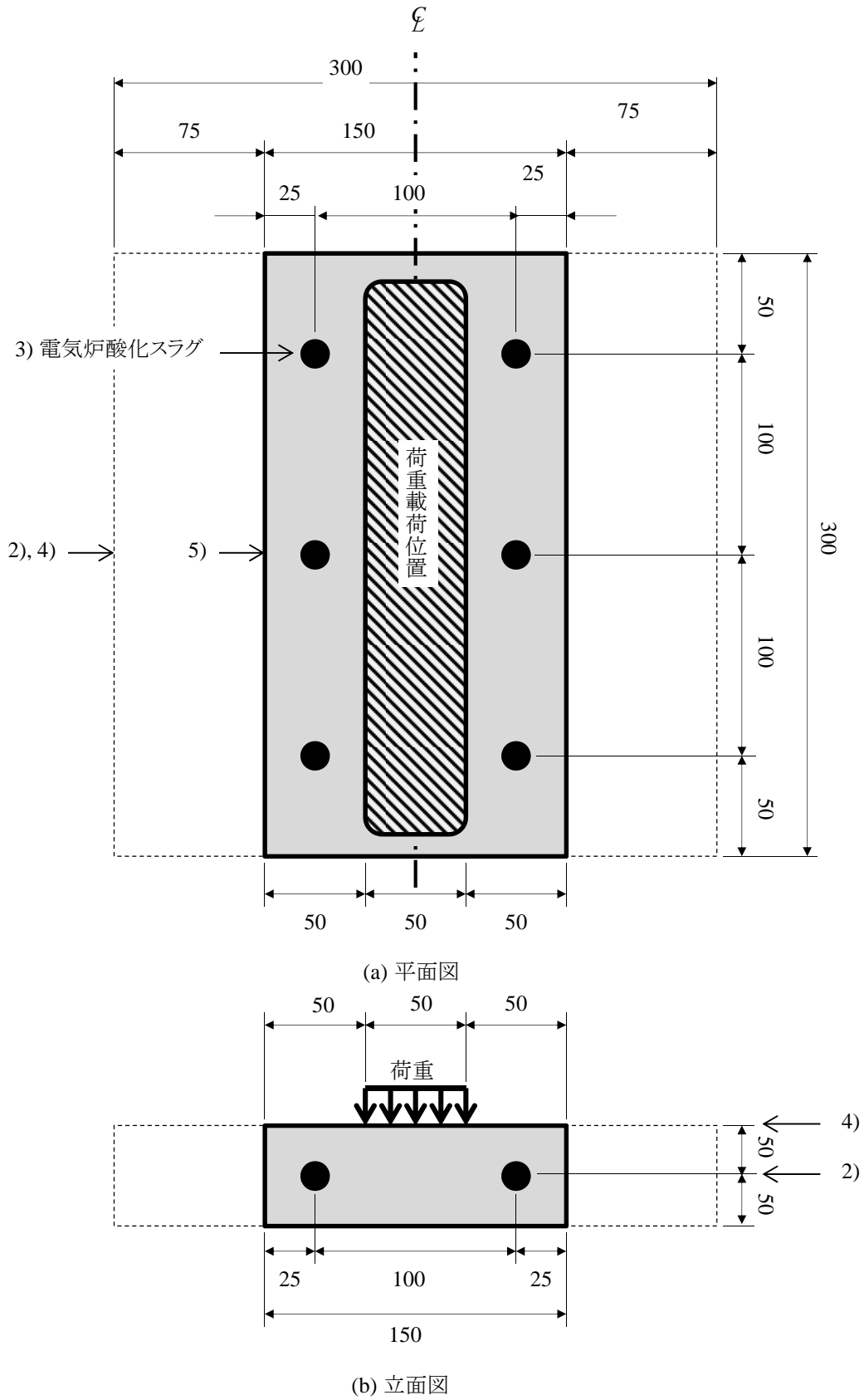


写真-6.2 アーティファクトに伴う画像の白色化⁸⁾



※ 半括弧数字は作製手順の数字

図-6.2 ホイールトラッキング試験用供試体

6.2.2 ホイールトラッキング試験

ホイールトラッキング試験は、高温時におけるアスファルト混合物の耐流動性を室内試験で確認する方法として用いられる⁶⁾。この試験は、写真-6.3に示すように直方体の供試体上に、接地圧が0.63MPaになるよう荷重調整した小型のゴム車輪を繰返し走行させ、動的安定度を求める試験である。試験温度は日本の路面の最高温度を考慮して60°Cとした。

ホイールトラッキング試験回数は、近藤ら⁹⁾の文献を参考に初期の圧密段階にあると考えられる荷重段階を初期荷重とし、荷重回数を600回とし、X線CT撮影およびDIC解析を実施した。また、初期荷重後の挙動を調べるため、W1~W3のすべての供試体について2,400回までの荷重を実施し、X線CT撮影およびDIC解析を実施した。さらに、変形量が大きいW1（密粒度ストアス）については6,000回までの荷重を実施し、後部および中央部のX線CT撮影およびDIC解析を実施した。

6.2.3 X線CT撮影^{8),10)~12)}

図-6.3は供試体の撮影面と荷重面の関係を、図-6.4は撮影方法および座標系を示す。X線の照射は、供試体を直立させ、前部、中央部および後部の3箇所を20枚ずつ撮影し、電気炉酸化スラグ骨材が写し出されている荷重前後の類似のCT画像を解析用画像として抽出した。

X線CT撮影条件を表-6.4に示す。X線管電圧を300kV、スライス厚を1.0mm、撮影領域を直径150mm、画像構成マトリクスを2,048×2,048ピクセル、空間分解能（ボクセルサイズ）を0.073×0.073×1.0mm³とした。

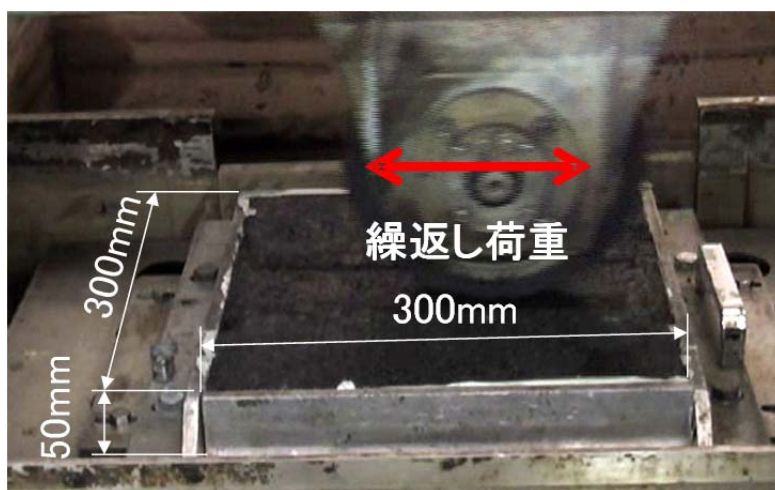


写真-6.3 ホイールトラッキング（通常サイズ）⁶⁾

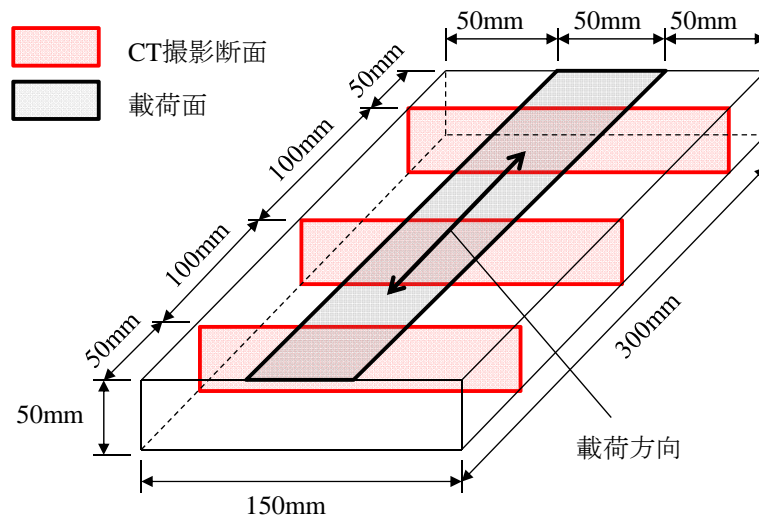


図-6.3 X線CT撮影断面とホイールトラッキング試験の载荷面の関係¹²⁾

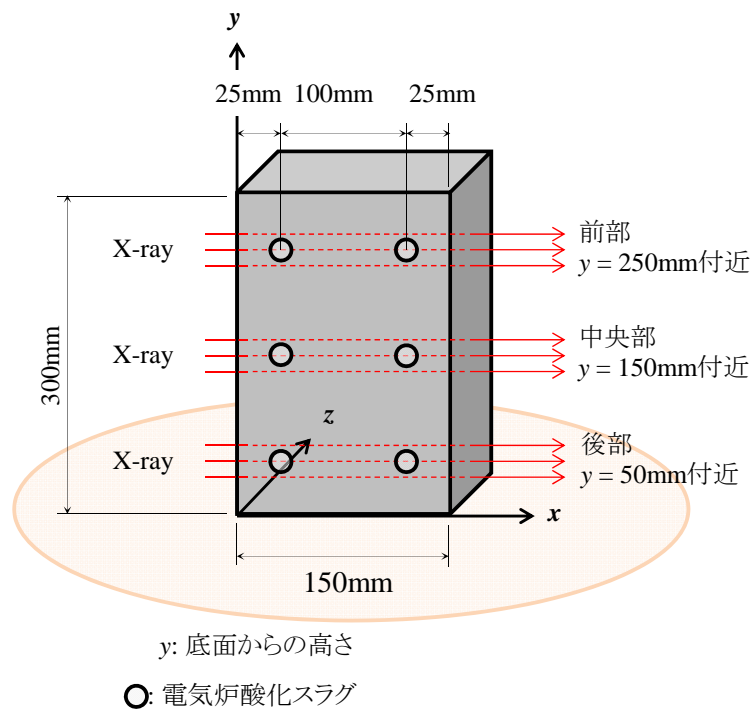


図-6.4 X線CT撮影方法⁸⁾

表-6.4 X線CT撮影条件

X線管電圧	300kV
スライス厚	1mm
撮影領域	$\phi 150\text{mm}$
画像構成マトリクス数	2,048×2,048
空間分解能 (ボクセルサイズ)	0.073×0.073×1.0mm ³

6.2.4 画像処理

第3章3.3.1では画像輪郭抽出のための画像処理手法として、iPas¹⁵⁾による方法とエッジ処理およびしきい値処理を用いる方法の2つを示した。しかし、iPasにおいてはMedian Filter SizeおよびHmax Sizeの入力を適切に行わなければ精度の良い解が得られないという問題がある。そこで、本章ではDICが輝度値の動きに着目していることから、エッジ処理およびしきい値処理を用いる方法により粗骨材とそれ以外の部分に分割することとした。以下にDIC解析用画像の作成方法を示す。

- 1) WL=1,300, WW=600, すなわちCT値の最小値を1,000, 最大値を1,600としてrawデータを256階調化する。
- 2) 電気炉酸化スラグ骨材を目安とし、骨材の形状および配置が同様と思われるCT画像を選択する。
- 3) CT画像を1,700ピクセル×1,700ピクセル(124.5mm×124.5mm)に成形したのち (図-6.5(a)), DICにおける横方向への移動を考慮し、キャンバスサイズを1,800ピクセル×1,800ピクセルに拡張する (図-6.5(b))。
- 3) CT画像のノイズを除去するため、Median Filter Size=5としてメディアンフィルタ処理を行う (図-6.5(c))。
- 4) メディアンフィルタ処理を行った画像にエッジ処理を施す (図-6.5(d))。
- 5) 細骨材と粗骨材のしきい値を算出し、二値化画像を作成する (図-6.5(e))。
- 6) エッジ処理画像と二値化画像をImageJにてand演算を行い、DIC解析用画像を作成する (図-6.5(f))。

6.2.5 DICの設定条件

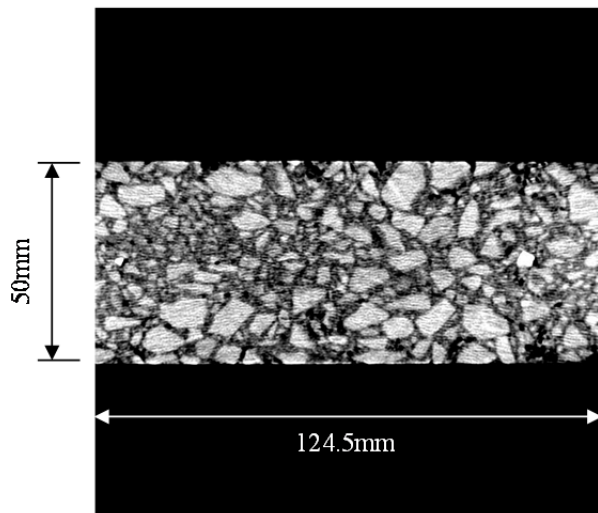
DIC解析は、熊本大学で保有する3次元DIC解析ソフト、TomoWarp¹⁶⁾により実施した。設定内容は以下のとおりである¹⁷⁾。

1) 節点間隔

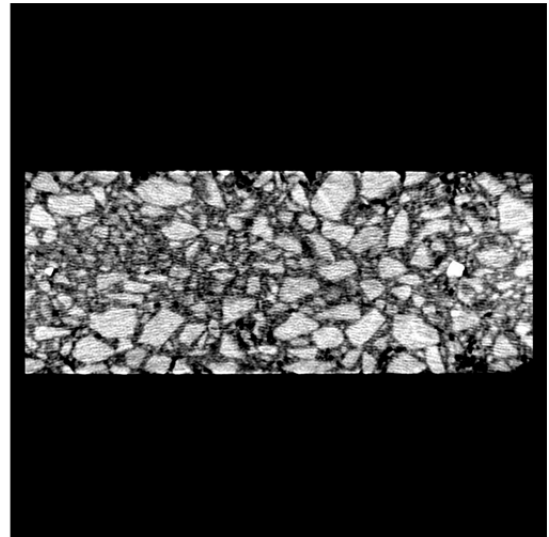
約1mm毎にデータを取得することを考慮し、14ピクセル (約1.03mm) とし、128×128の変位データを取得した (図-6.6(a))。

2) 検索窓

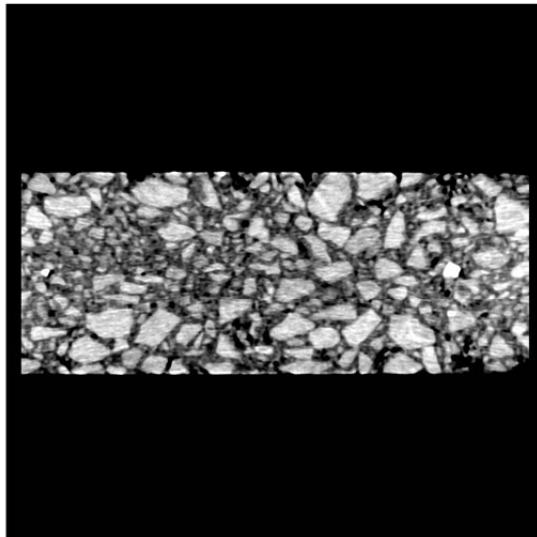
x 方向は試験後の供試体の幅から±25ピクセル (約1.83mm) に、 z 方向の+方向はホイールトラッキング試験の変位をもとに+35ピクセル (約2.56mm)、-方向は載荷前後の画像を比較した結果から-15ピクセル (約1.10mm) にそれぞれ設定した (図-6.6(b))。



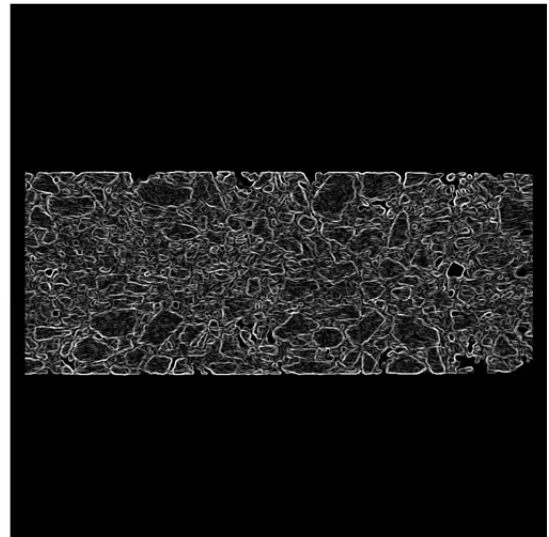
(a) 1,700×1,700ピクセル



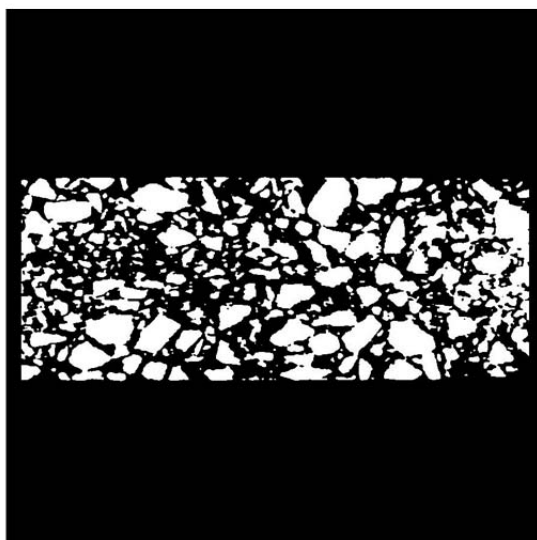
(b) 1,800×1,800ピクセル



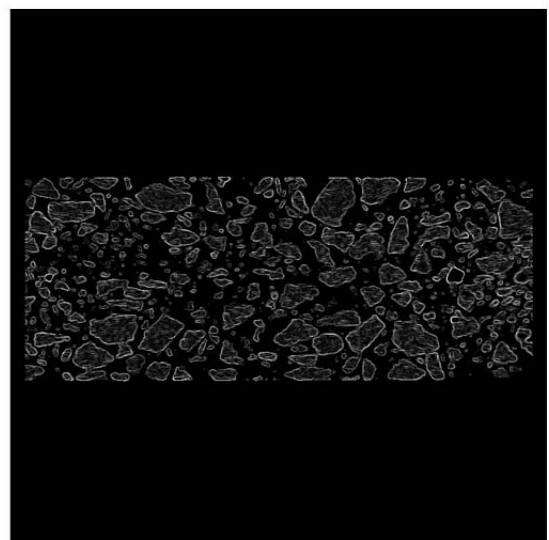
(c) メディアンフィルタ



(d) エッジ処理



(e) 二値化画像



(f) DIC解析用画像

図-6.5 DIC解析用画像の作成

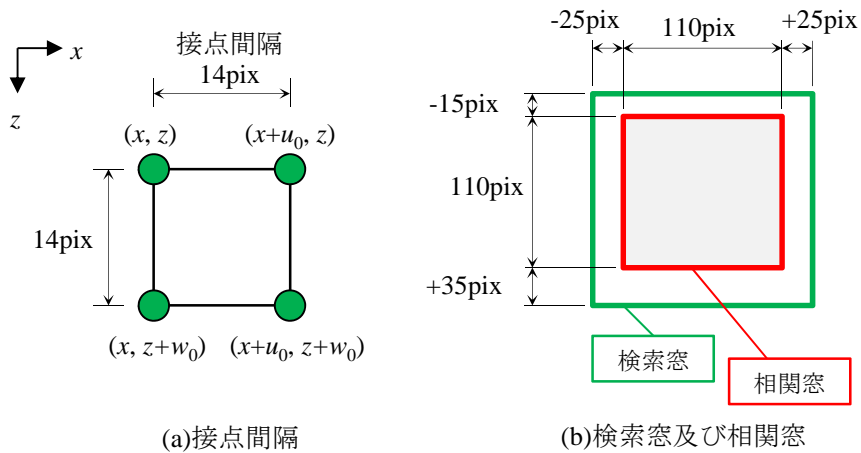


図-6.6 接点間隔，検索窓，相関窓の設定¹⁷⁾

3) 相関窓

相関窓は，当初，一辺が29ピクセル（約2.12mm）の正方形として設定した⁸⁾．しかし大きな骨材や空隙の部分で大きなベクトルが散見されるとともに，ひずみ分布にノイズが発生する等の問題が生じた．そこで，骨材の最大粒径が13mmであり，その大部分を占める6号砕石の粒度範囲である5～13mmの対数中間値である約8mm（110ピクセル）を相関窓の正方形の一辺として採用した（図-6.6(b)）．

6.2.6 DICによる変位場およびひずみ場の算出

変位は，"TomoWarp"¹⁶⁾によって各節点の x 方向および z 方向について算出する．

ひずみは図-6.7のように xz 座標系を設定し，4つの節点の中心において計算を行う．具体的には，左上の節点の座標を (x, z) ，右上の節点の座標を (x', z) ，左下の節点の座標を (x, z') ，ならびに右下のノードの節点を (x', z') とする．ただし $x' = x + u_0$ ， $z' = z + w_0$ （ u_0 は x 方向， w_0 は z 方向の節点間隔）とする．また，それぞれの x 方向の変位を Δx_z ， $\Delta x'_z$ ， Δx_z および $\Delta x'_z$ ， z 方向の変位を Δz_x ， Δz_x ， $\Delta z'_x$ および $\Delta z'_x$ とする．4節点の中心における x 方向のひずみ (ε_x) は式-6.1， z 方向のひずみ (ε_z) は式-6.2のとおり計算される．

$$\varepsilon_x = \frac{(\Delta x'_z - \Delta x_z) + (\Delta x'_z - \Delta x_{z'})}{2u_0} \quad (6.1)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(\Delta z'_x - \Delta z_x) + (\Delta z'_x - \Delta z_{x'})}{2w_0} \quad (6.2)$$

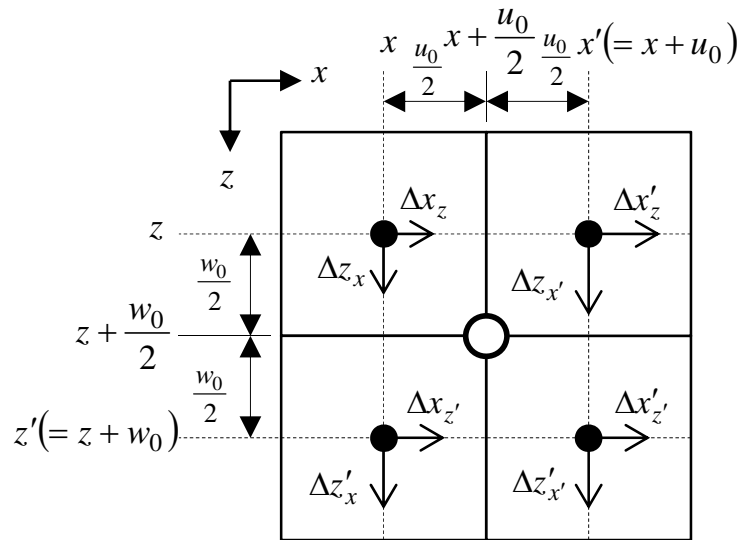


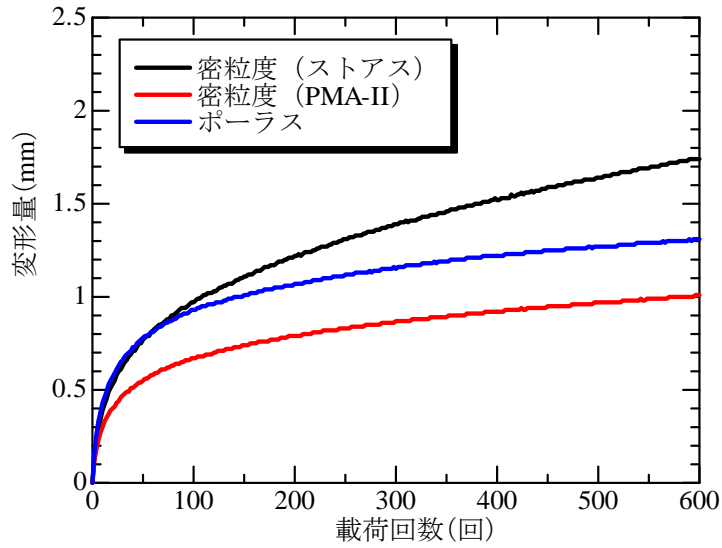
図-6.7 ひずみ算出のための座標系の設定

6.3 試験結果

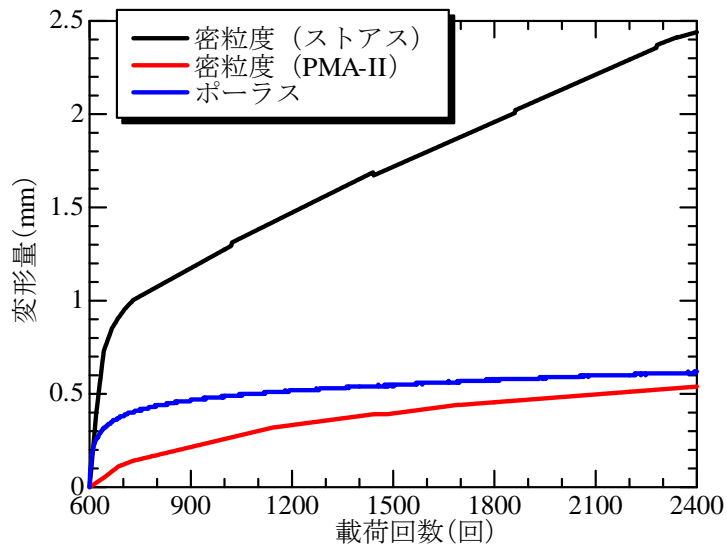
6.3.1 ホイールトラッキング試験結果^{8),12)}

ホイールトラッキング試験結果を図-6.8に、600回、2,400回および6,000回(W1のみ)における総変形量を表-6.5に示す。図-6.8のグラフの形状は、W1は初期の圧密変形が終了した後、直線型を示したのに対し、W2およびW3は上凸型を示した。これは、W1は初期の圧密が終了した後の変形率 (ratio of deformation, RD)、すなわち単位時間あたりの変形量が一定であったのに対し、W2、W3は変形率が低下し続けていることを示している。

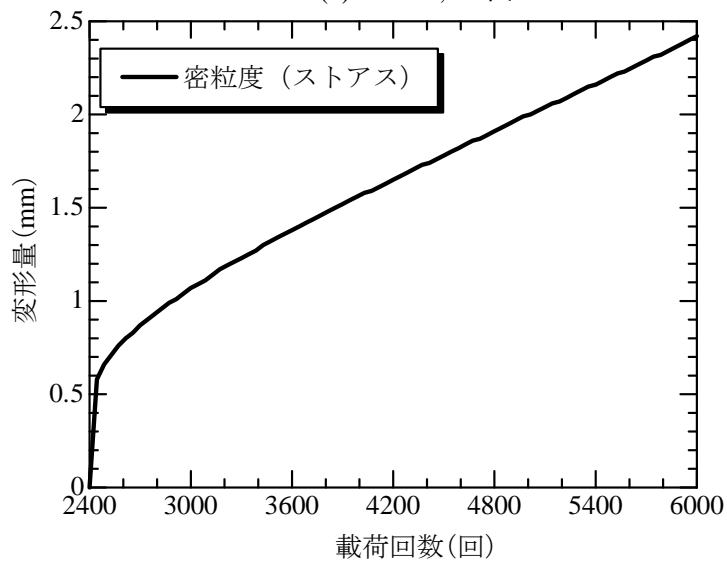
なお、本試験では、ホイールトラッキング試験機をX線CT撮影装置内に持ち込むことが不可能であり、途中でホイールトラッキング試験の载荷を止め、逐次的にX線CT撮影を行ったため、図-6.8のような初期における圧密の変位が生じたものと考えられる。また、ホイール試験用供試体後の中央部の幅を測定した結果、表-6.6のとおりとなり、W1で5.0mm、W2で1.3mm、W3で4.8mmの伸長がみられた。



(1) 0~600回



(2) 600~2,400回



(3) 2,400~6,000回

図-6.8 ホイールトラッキング試験結果

表-6.5 ホイールトラッキング試験における総変形量

	W1	W2	W3
600回	1.74	1.01	1.31
2,400回	4.18	1.55	1.92
6,000回	6.60	—	—

(単位：mm)

表-6.6 ホイールトラッキング試験の幅（中央部）

W1	W2	W3
155.0	151.3	154.8

(単位：mm)

表-6.7 しきい値（CT値）計算結果

供試体	しきい値※	後部	中央部	前部	平均値
W1	しきい値1	889	631	706	742
	しきい値2	1158	1139	1148	1148
	しきい値3	1308	1313	1304	1308
W2	しきい値1	856	856	861	858
	しきい値2	1134	1134	1129	1133
	しきい値3	1304	1299	1289	1297
W3	しきい値1	687	409	480	525
	しきい値2	1078	1016	1035	1043
	しきい値3	1205	1153	1181	1180

※しきい値1：空隙／アスファルト＋石粉の境界

しきい値2：アスファルト＋石粉／細骨材の境界

しきい値3：細骨材／粗骨材の境界

6.3.2 CT画像

ホイールトラッキング試験におけるW1（密粒度ストアス）のCT画像を後部，中央部，前部の順に図-6.9～11に，W2（密粒度PMA-II）のCT画像を後部，中央部，前部の順に図-6.12～14に，W3（ポーラス）のCT画像を後部，中央部，前部の順に図-6.15～17に示す．なお，本図はアスファルトの充填状況も表示するため，CT値のWLを1000，WWを1,200，すなわちCT値の最小値を400，最大値を1,600と設定した．また，しきい値は表-6.7のとおり計算された．なお，しきい値は載荷回数0回の前部，中央部，後部の画像をもとに算出した．

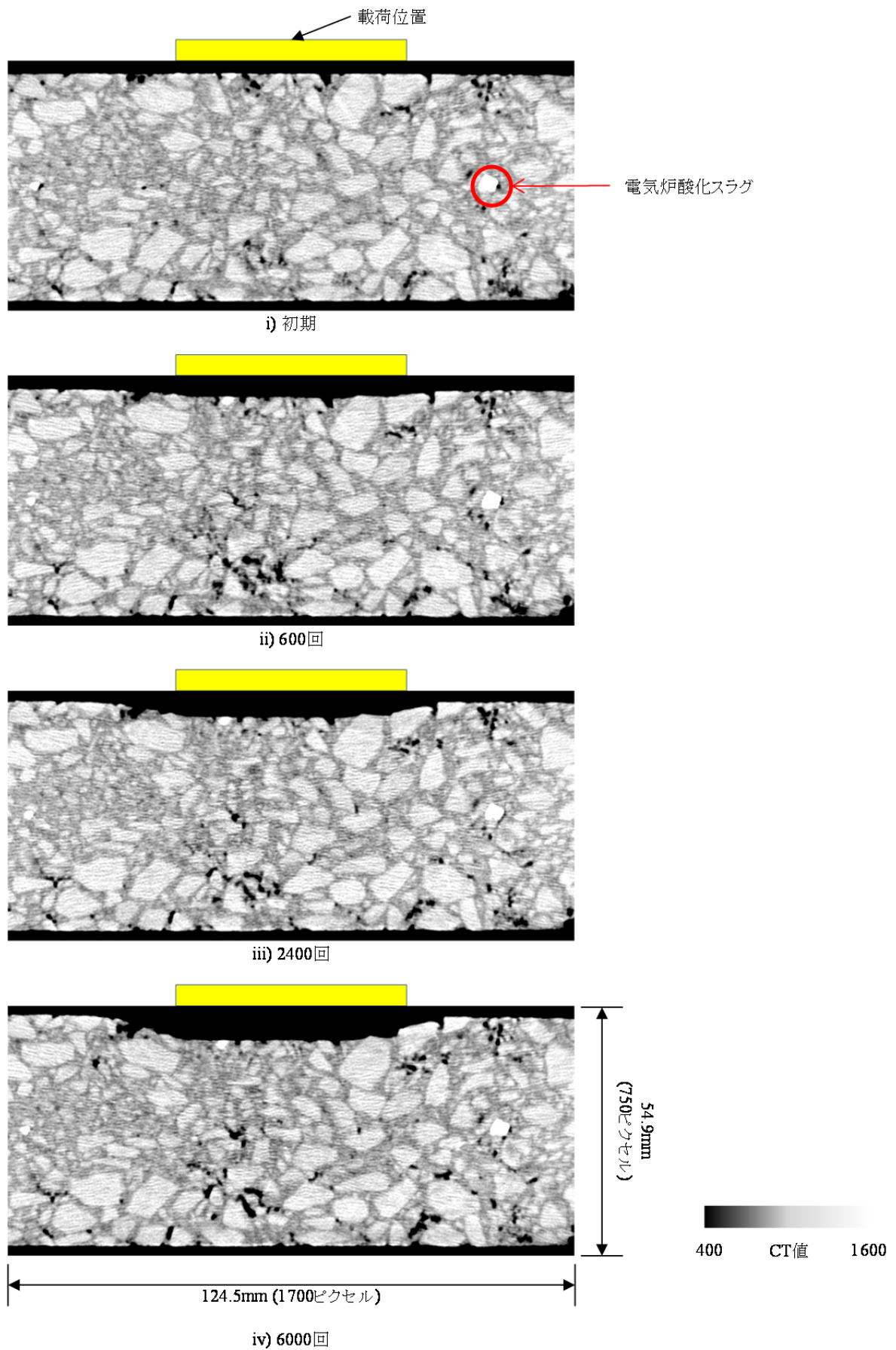


図-6.9 ホイールトラッキング試験におけるW1（密粒度ストアス）後部のCT画像

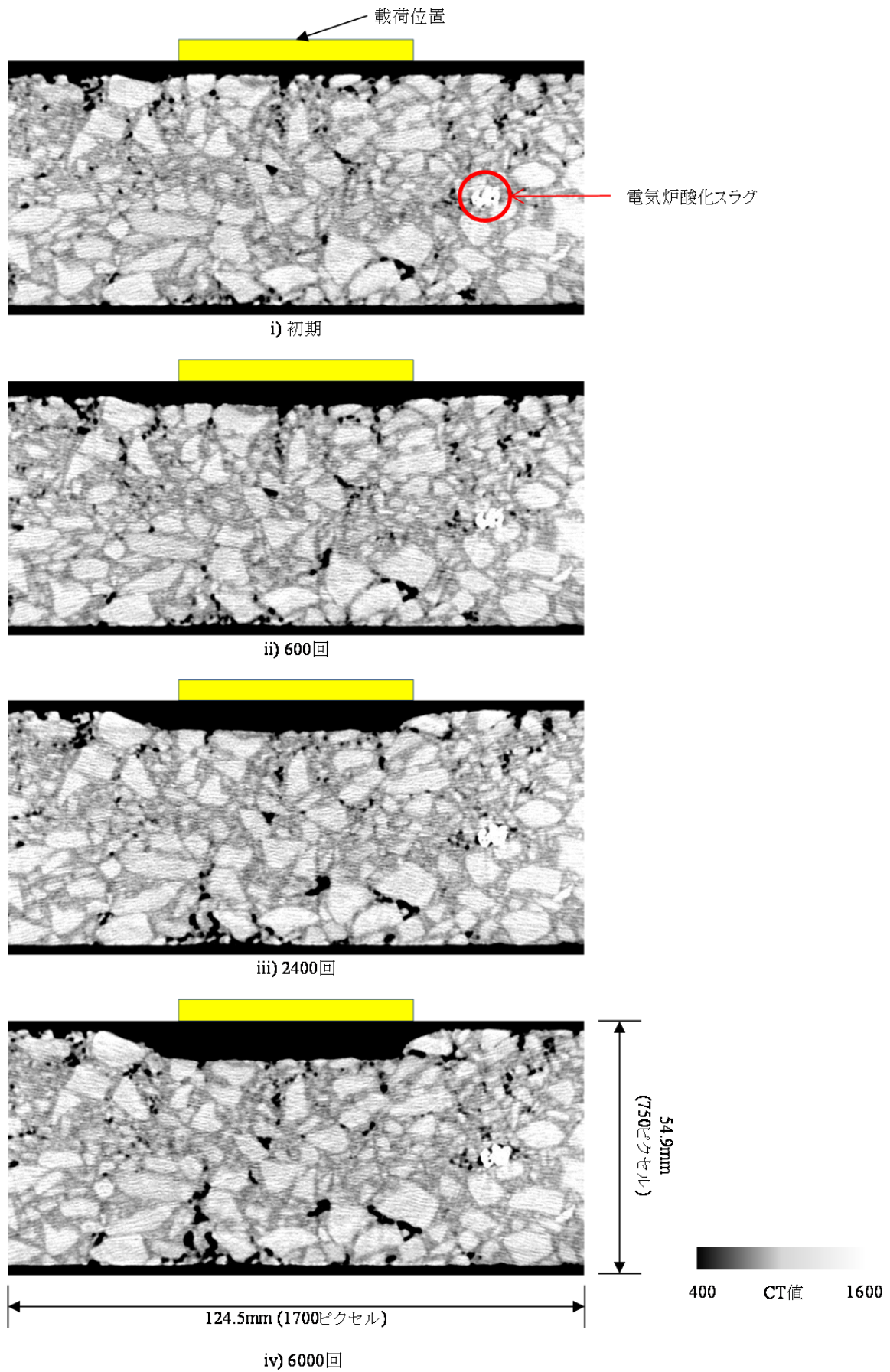


図-6.10 ホイールトラッキング試験におけるW1（密粒度ストアス）中央部のCT画像

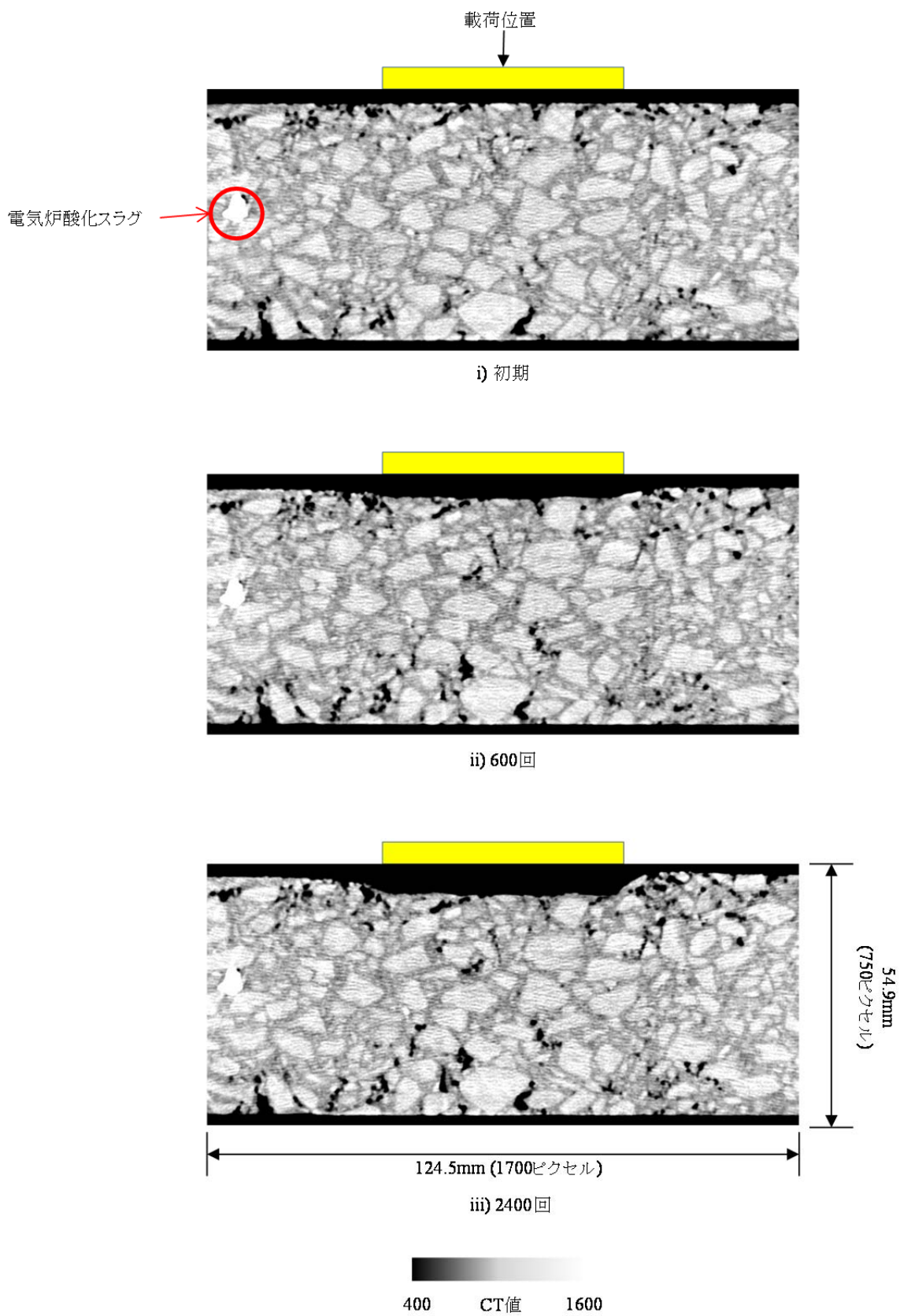


図-6.11 ホイールトラッキング試験におけるW1（密粒度ストアス）前部のCT画像

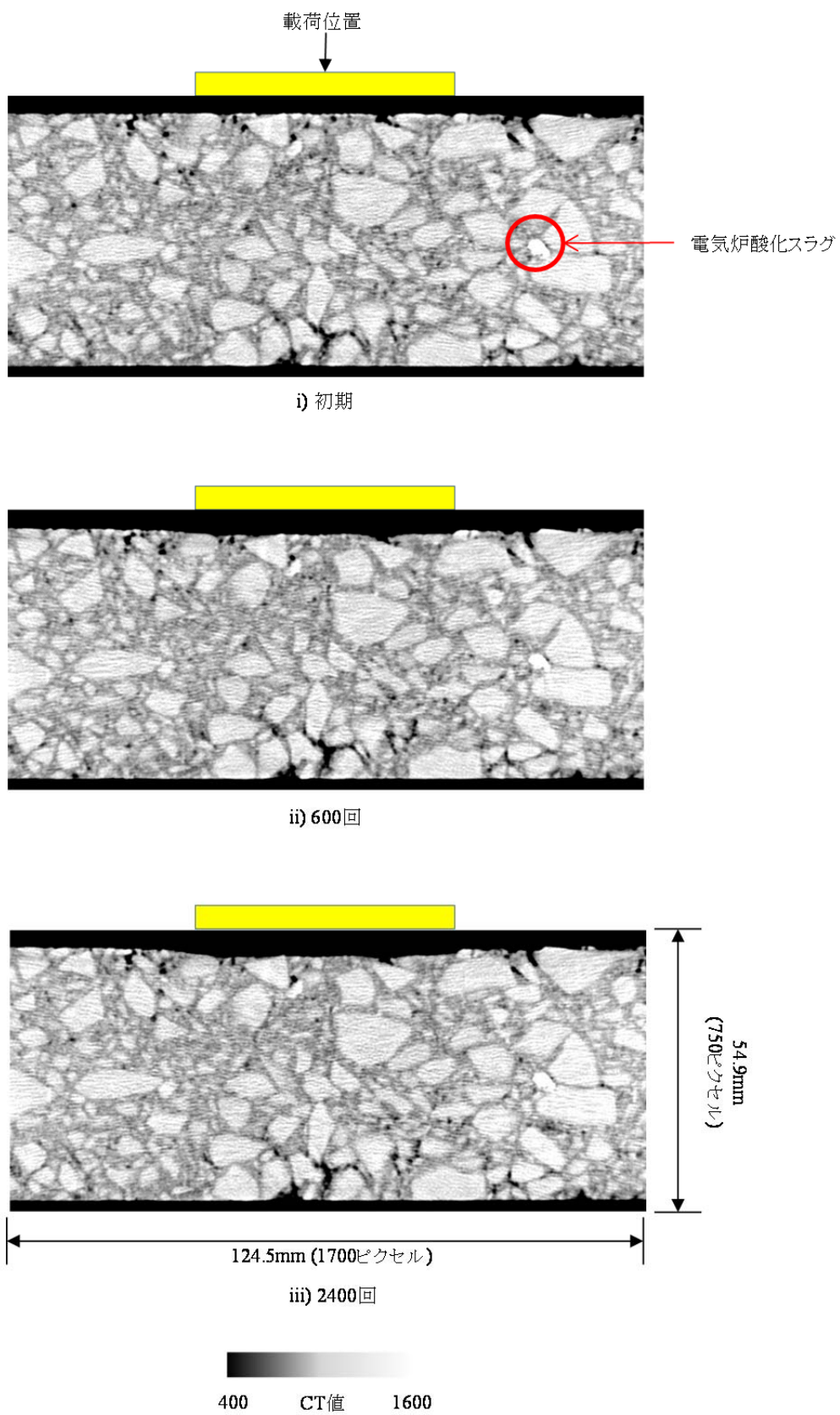


図-6.12 ホイールトラッキング試験におけるW2（密粒度PMA-II）後部のCT画像

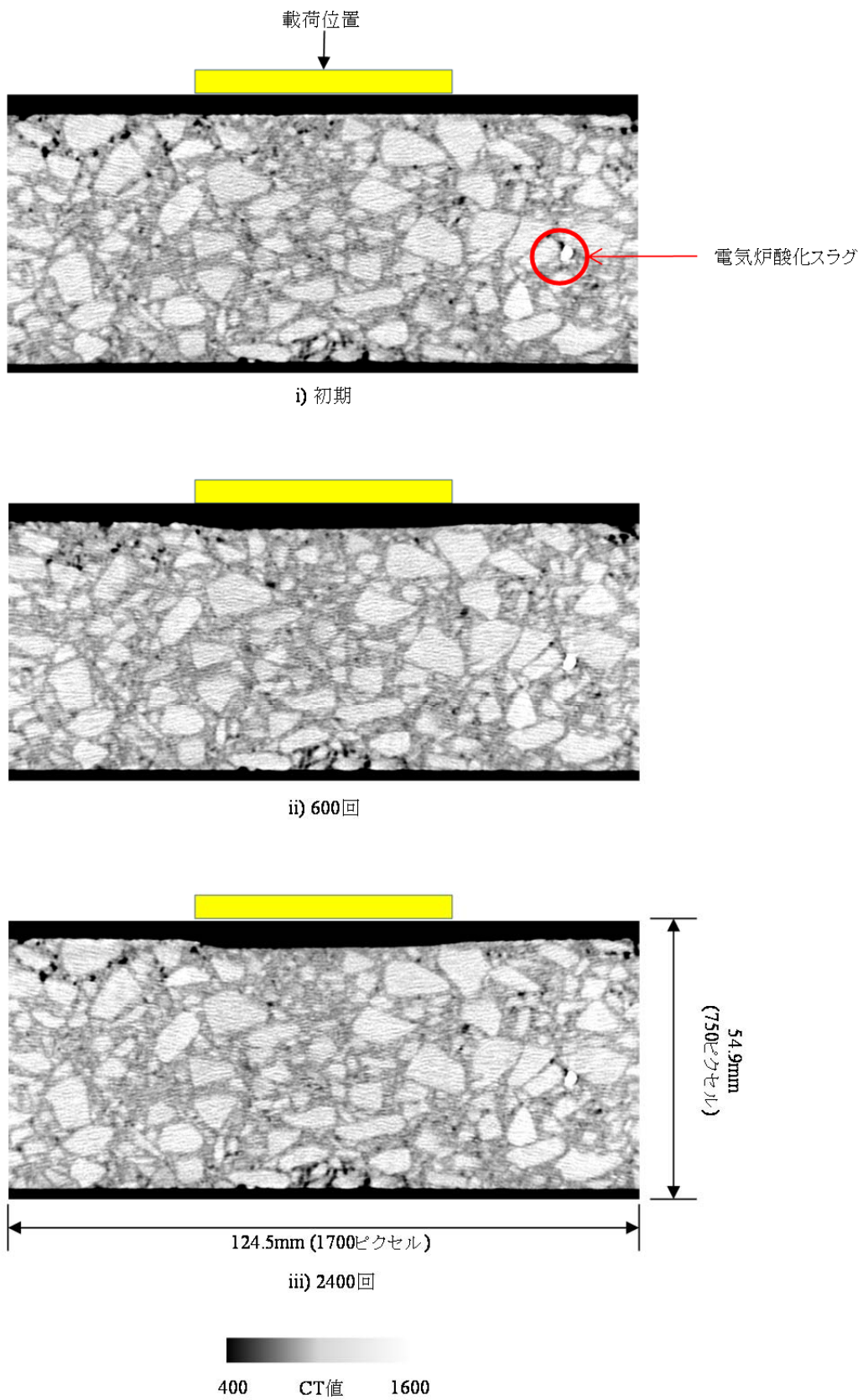


図-6.13 ホイールトラッキング試験におけるW2（密粒度PMA-II）中央部のCT画像

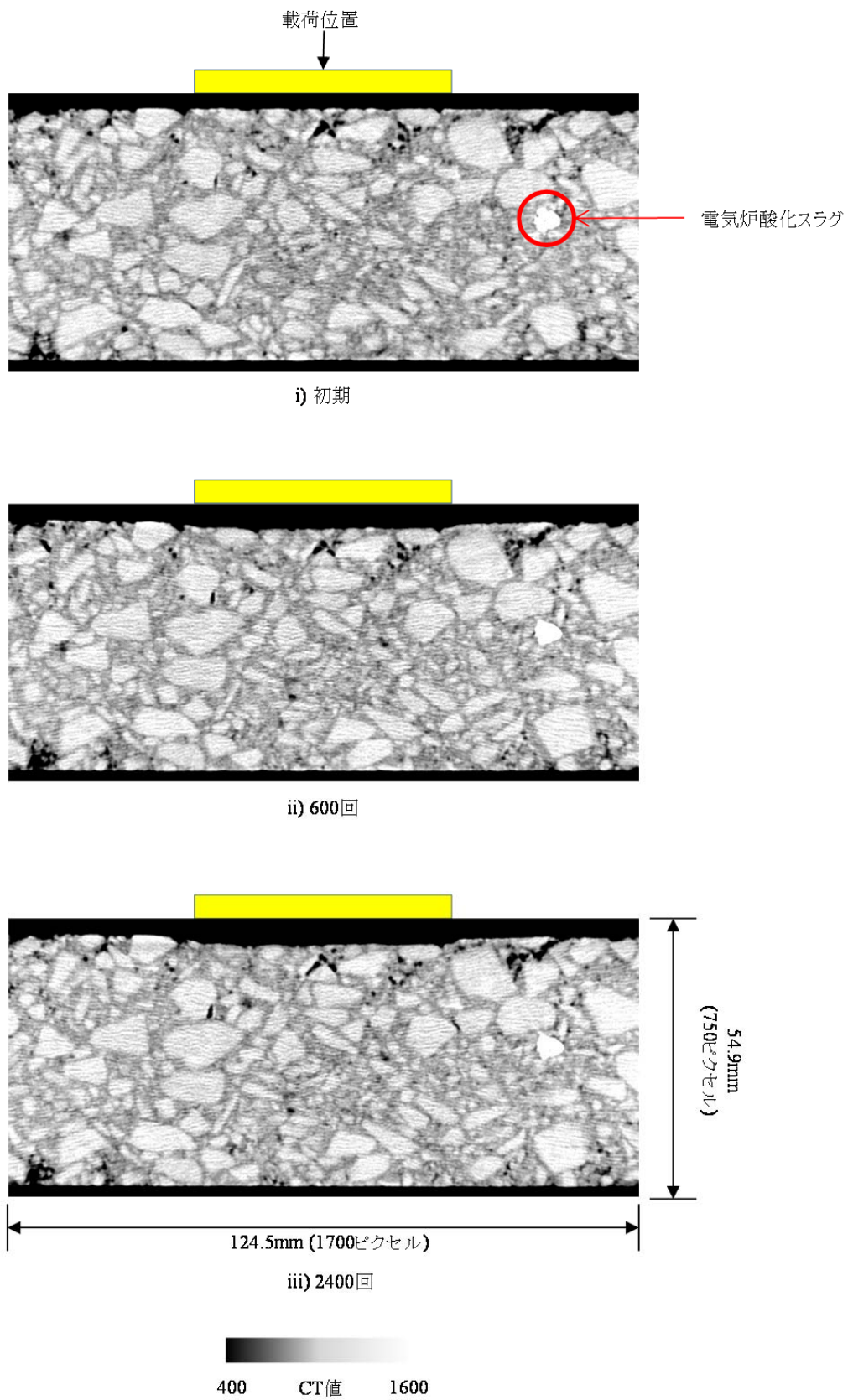


図-6.14 ホイールトラッキング試験におけるW2（密粒度PMA-II）前部のCT画像

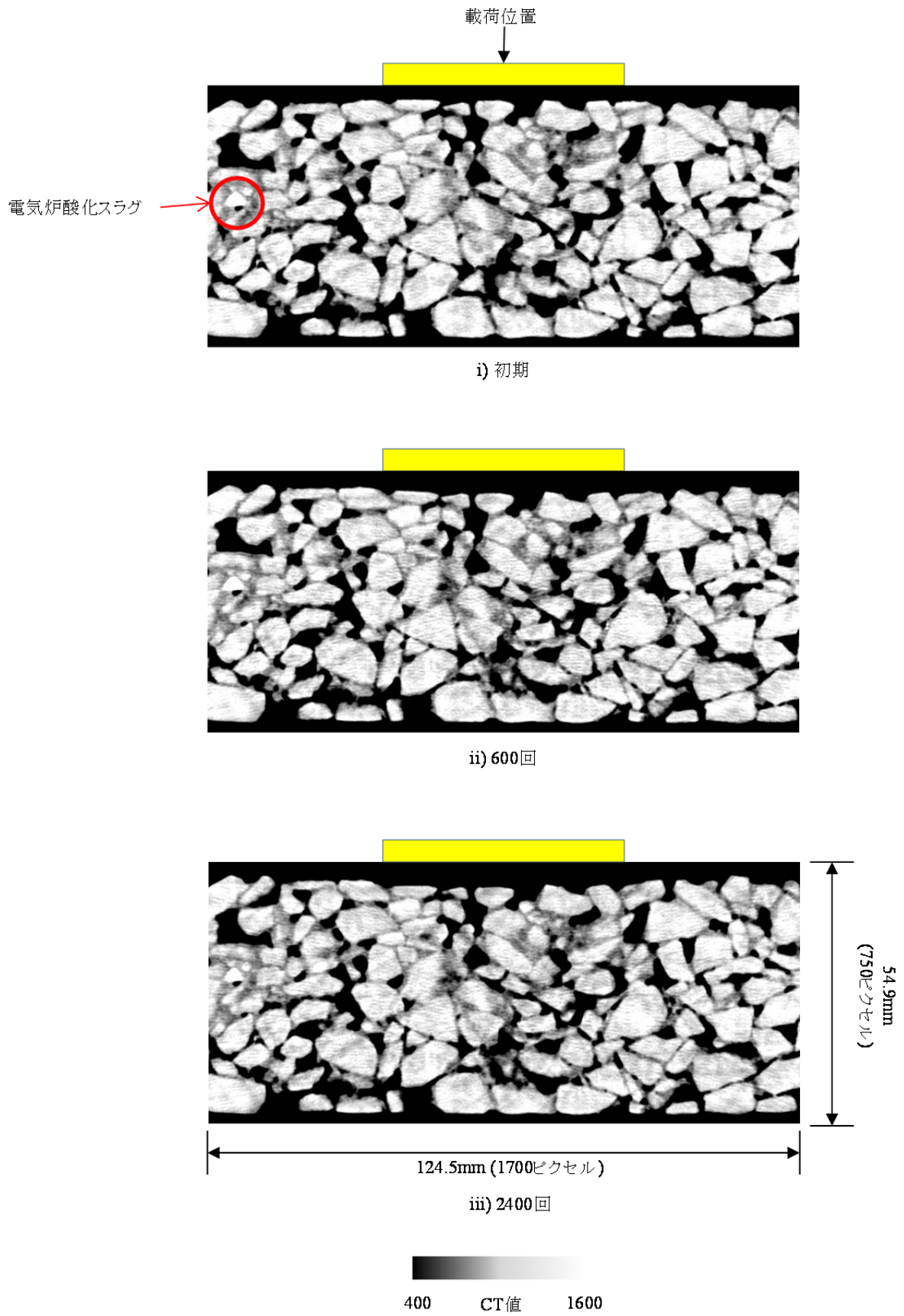


図-6.15 ホイールトラッキング試験におけるW3（ポーラス）後部のCT画像

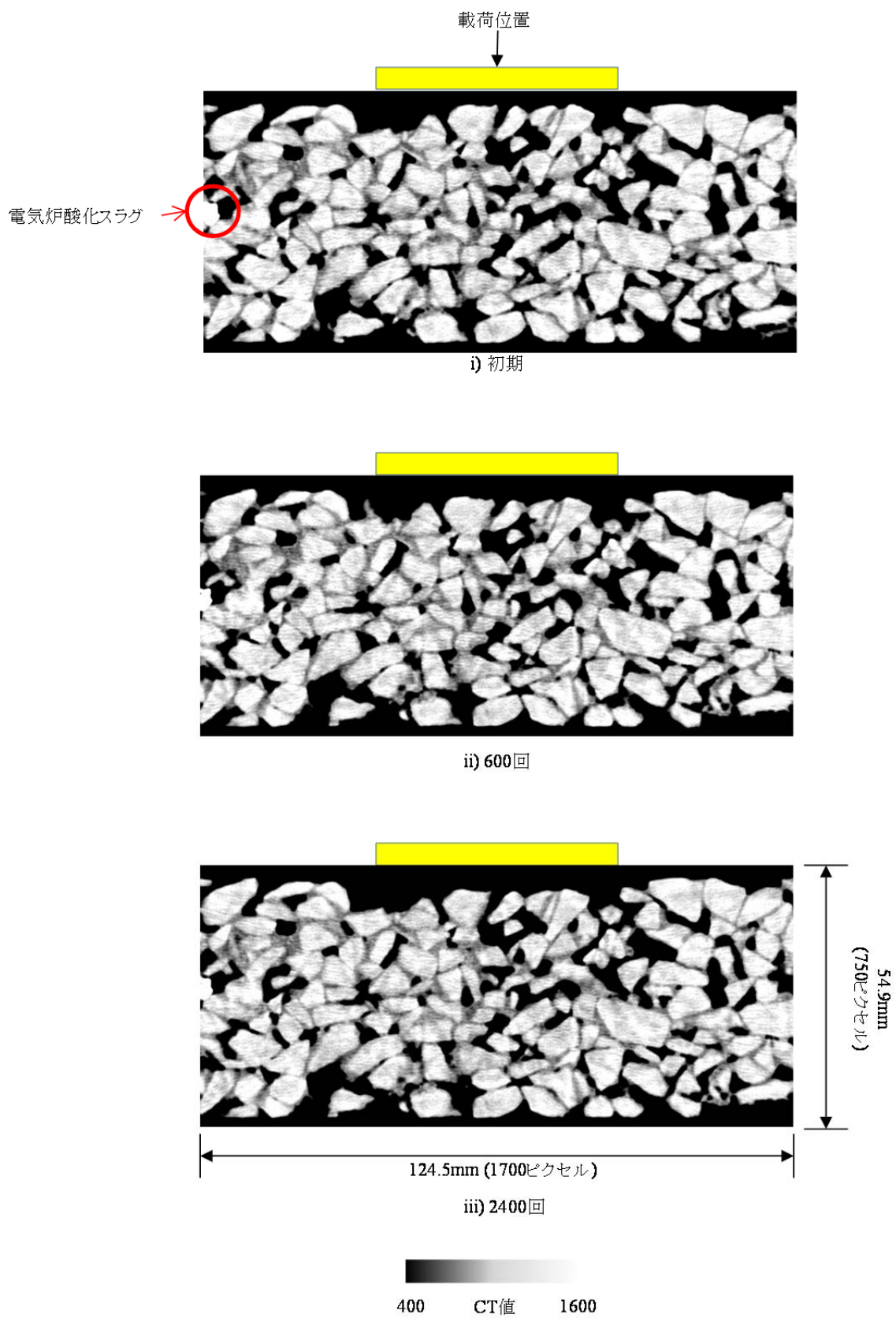


図-6.16 ホイールトラッキング試験におけるW3（ポーラス）中央部のCT画像

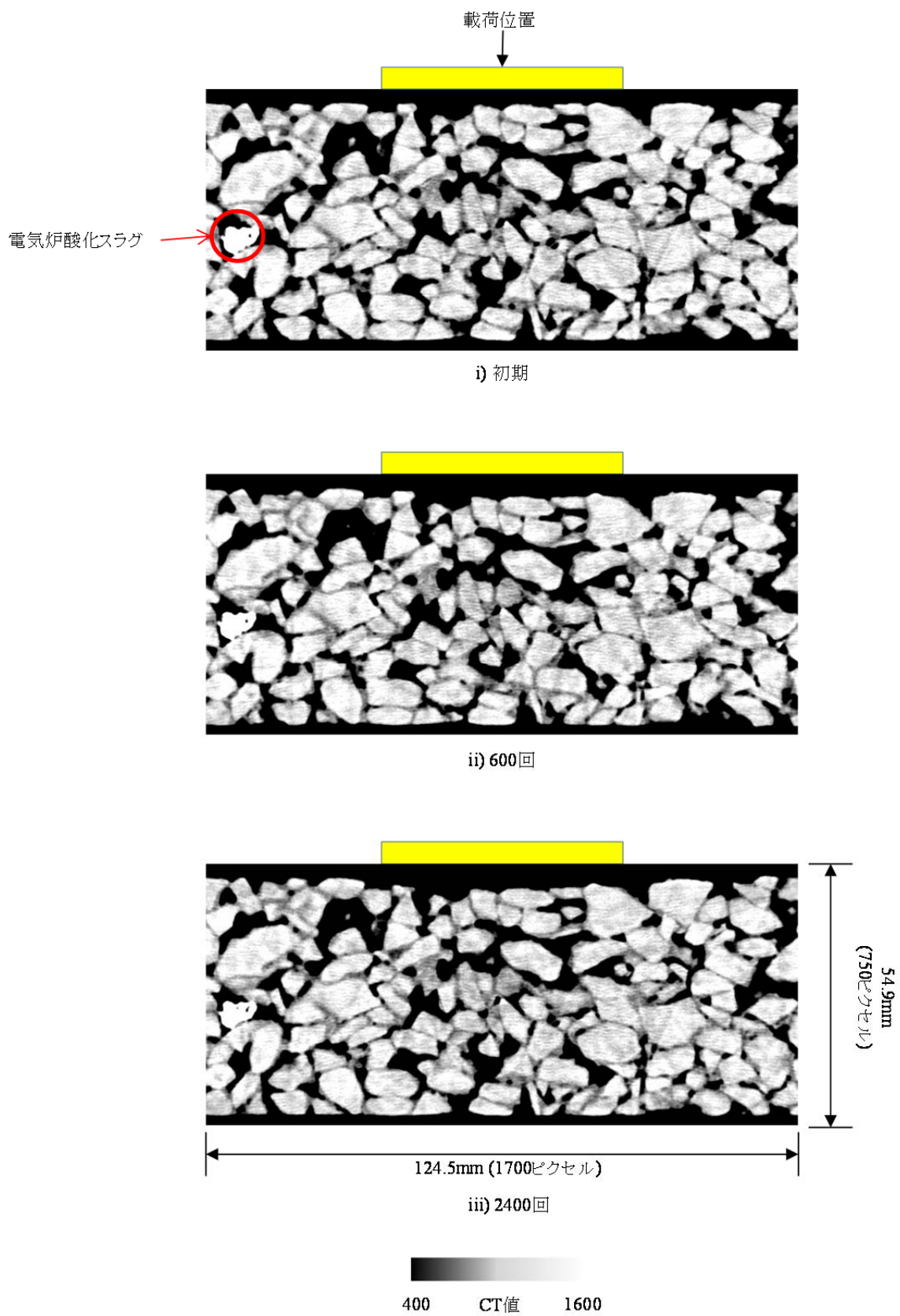


図-6.17 ホイールトラッキング試験におけるW3（ポラス）前部のCT画像

はじめに、わだち掘れの観点から見た場合、W1はW2およびW3に比べ、図-6.8のホイールトラッキング試験の変形量が大きかったことからわかるように、载荷位置直下で空隙が多くなり、供試体が大きくへこんでいることがわかる。ここで、"ImageJ"の'Rectangular selection tool'を用いてわだち掘れ深さを測定した結果を表-6.8に示す。中央部の変形量においてCT画像から測定した結果と、ホイールトラッキング試験の結果を比較すると、W1はほとんど一致した。また、W2の600回で0.16mm、W3の2,400回で0.28mmの誤差があったが、ピクセル数で見た場合W2で2ピクセル、W3で4ピクセル程度であり、誤差は小さいと考えられる。

次に、供試体内の空隙の状況について調べるため、"ImageJ"に搭載されている'Image Calculator'の'Difference'を用いて、载荷前後の画像の差違を比較した。各供試体の中央部において比較した画像を図-6.18に示す。なお、载荷前後で差が大きい部分は白で、差が小さい部分は黒で表される。

W1は载荷部の下部、すなわち図-6.18の黄丸部分で空隙が広がっていることが確認された。これは上面に凹みが生じると同時に、表-6.6が示すように、供試体が横方向へも移動したことから、アスファルトの部分に空隙が発生したものと考えられる。なお、W1の中央部（図-6.10）において、600回から2,400回の間には亀裂のような空隙がみられたが、供試体の裏面を確認したところ亀裂は見られなかった（写真-6.4）。

表-6.8 CT画像によるわだち掘れ深さ測定結果

(a) W1（密粒度ストアス）

	後部	中央部	前部
600回	1.61	1.76 (1.74)	2.05
2,400回	3.22	4.17 (4.18)	4.25
6,000回	5.35	6.52 (6.60)	—

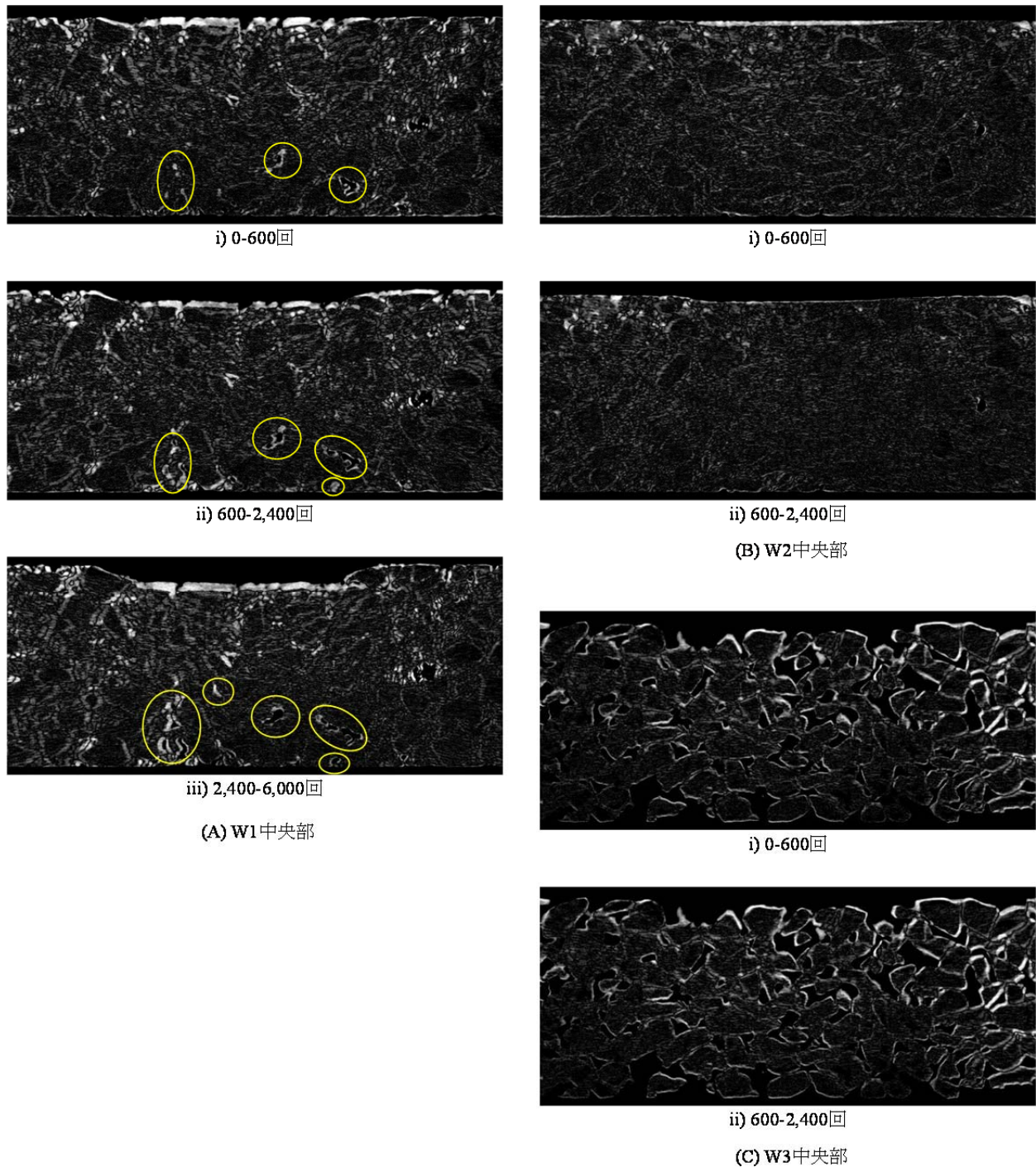
(b) W2（密粒度PMA-II）

	後部	中央部	前部
600回	1.10	1.17 (1.01)	1.17
2,400回	1.46	1.54 (1.55)	1.68

(b) W3（ポーラス）

	後部	中央部	前部
600回	1.17	1.32 (1.31)	1.46
2,400回	2.49	2.20 (1.92)	2.42

（単位：mm、括弧内はホイールトラッキング試験結果）



図－6.18 載荷前後の画像の差違

W2は，図－6.18からは空隙の大きな変化は見られなかった。

W3は骨材移動の影響が大きく，図－6.15～18から空隙の状況を評価するのは困難であった。

なお，骨材および供試体全体の動きについては，CT画像だけでは判断不能であるため，次項でDICの結果を述べる。



写真－6.4 6,000回載荷後におけるW1の供試体裏面

6.3.3 DICによる変位特性¹⁷⁾

(1) 供試体の場所による違い

はじめに、供試体の場所による違いを把握するため、W1の0～600回における変位場、すなわち水平変位および鉛直変位の分布を調べた結果を図－6.19に示す。水平方向については青が左方向、赤が右方向への変位を、鉛直方向については青が上方向、赤が下方向への変位を示す。また、黄色い長方形は載荷位置を示す。

水平方向に関しては、中央部の横断方向 $\pm 25 \sim 35$ mm、深さ0～20mmの箇所では外側方向への変位の大きな箇所がみられ、タイヤの影響により骨材が移動したことがわかる。また、供試体の浅い箇所では横断方向中心からすぐに水平変位が発生するのに対し、深い箇所では横断方向中心から離れたところで水平変位が発生しはじめる傾向が見られた。

鉛直方向に関しては、いずれの箇所においても横断方向 $-25 \sim 25$ mm、深さ0～10mmの箇所では下方向への変位が大きい箇所が現れた。

なお、前部においては横断方向20～60mm、深さ30～50mmの箇所では逆方向の変位が発生している。これは、X線CT撮影を行う際に図－6.4のように供試体を立てて、撮影台の上にテープで固定してから撮影を行ったため、上部のぶれの影響が現れたためと考えられる¹⁰⁾。そこで、最もぶれの影響が少ないと考えられる後部での評価を行う。

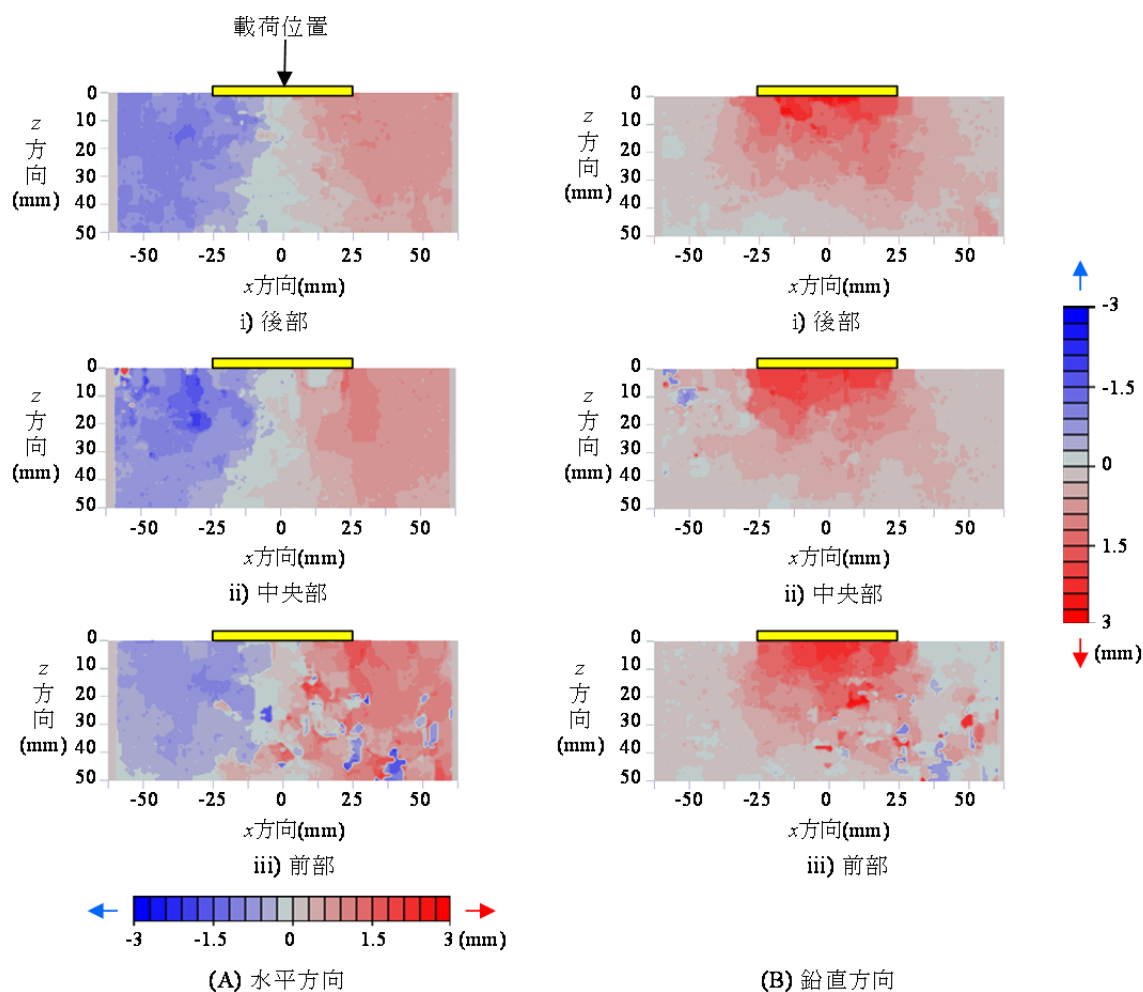


図-6.19 W1の0~600回における後部，中央部および前部の水平および鉛直変位

(2) 供試体の種類による違い

1) W1（密粒度ストアス）

W1の後部における各載荷回数毎の鉛直変位を図-6.20に，水平変位を図-6.21に，ベクトル図を図-6.22に示す。

0~600回においては，変位場およびベクトル図が示すように，載荷位置の直下において，鉛直下方向への移動が卓越していることが確認でき，2mm以上の変位が確認できる。また，水平方向は側方部において外側への移動が卓越しており，その大きさは1mm程度である。全体的には載荷部直下から放射状に骨材が移動していることが確認できた。

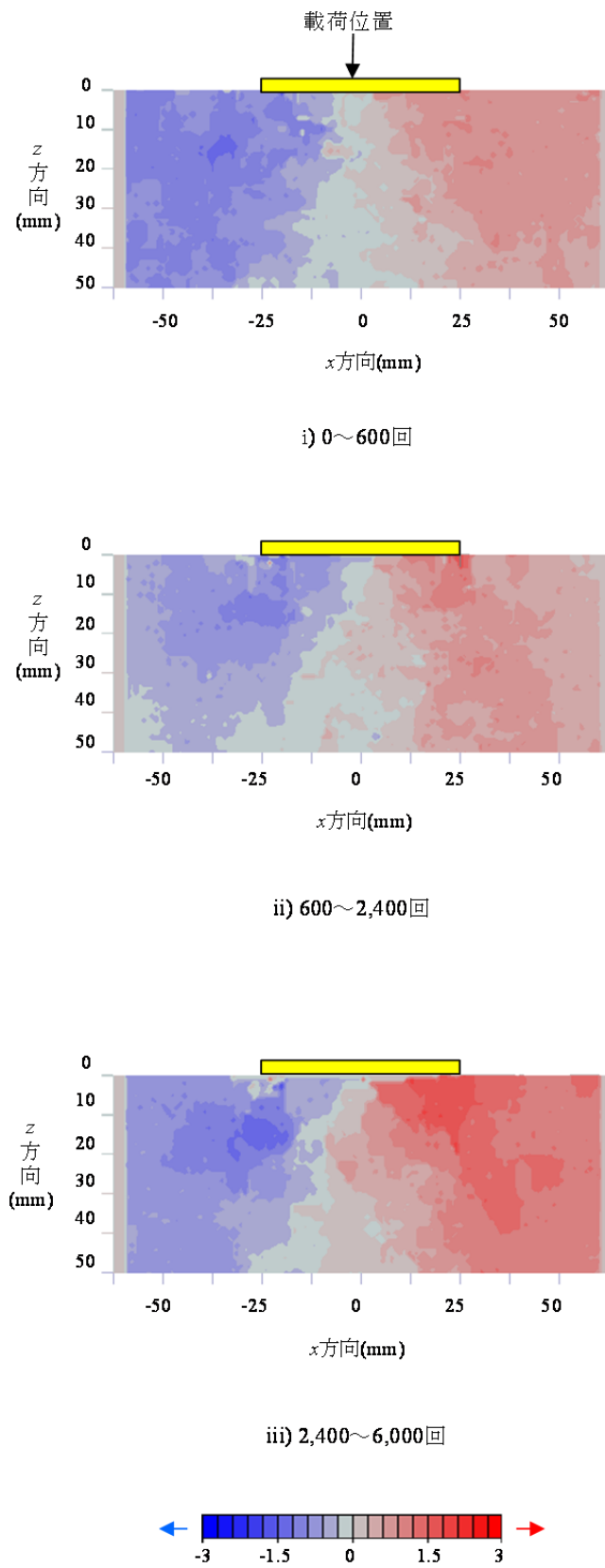


図-6.20 W1 (密粒度ストアス) 後部における水平変位

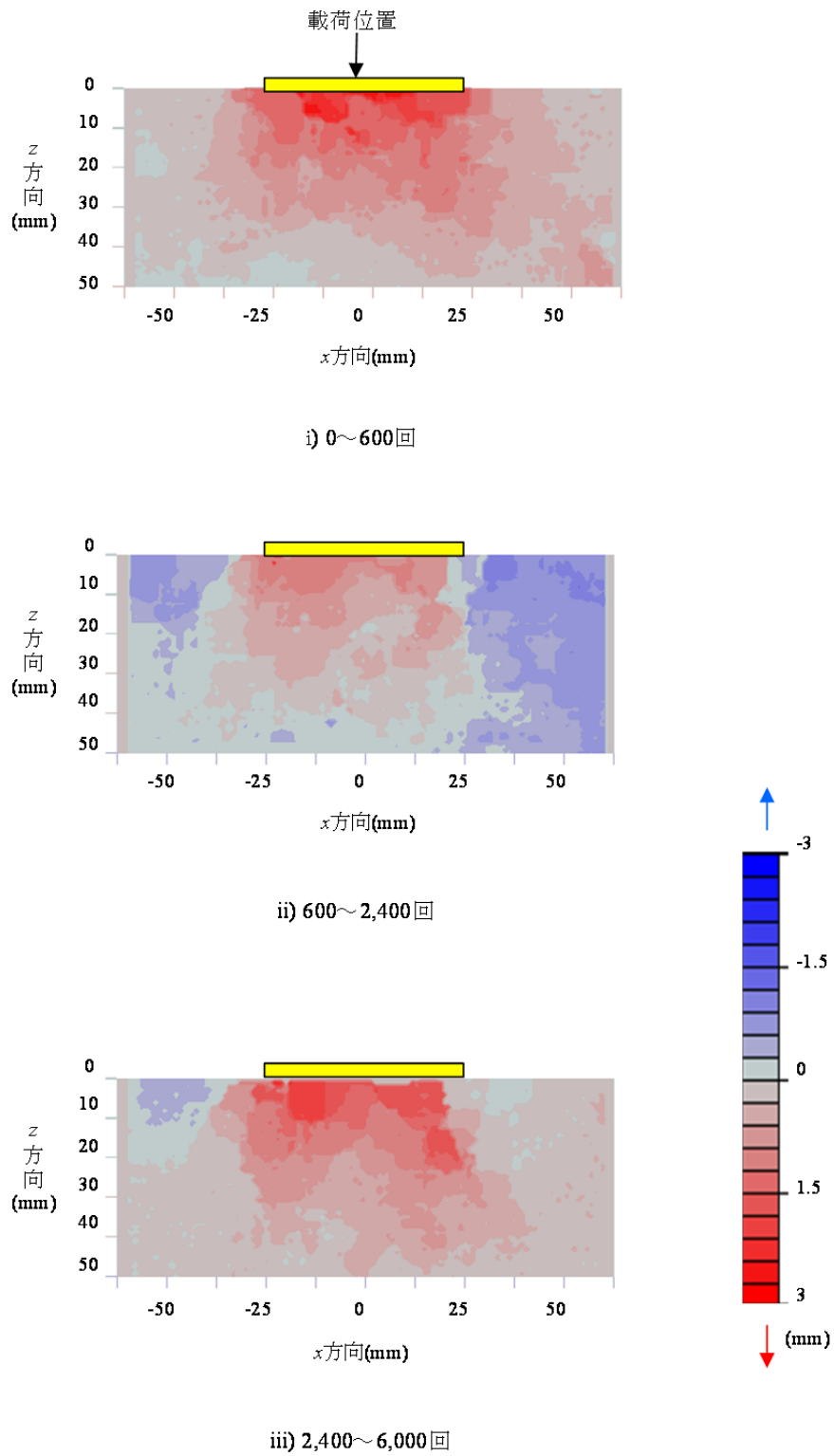
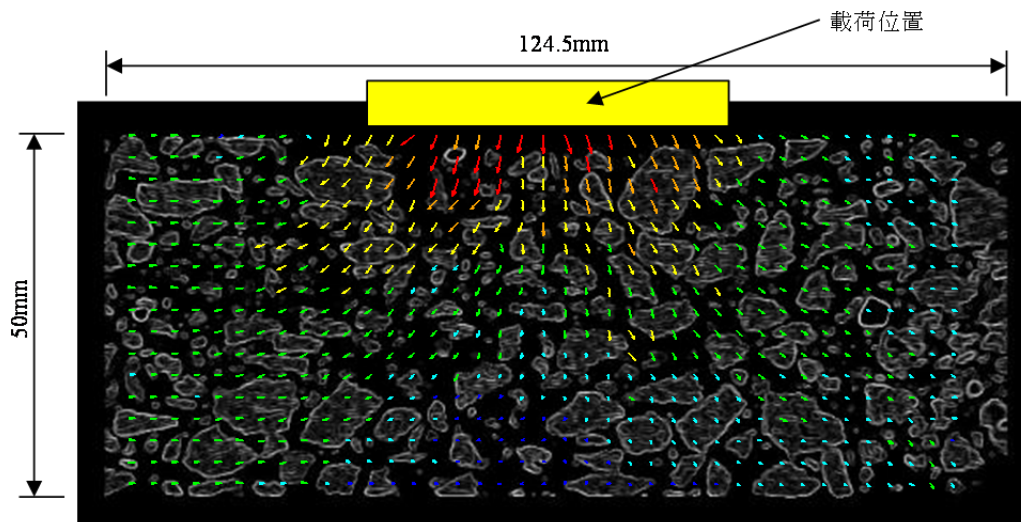
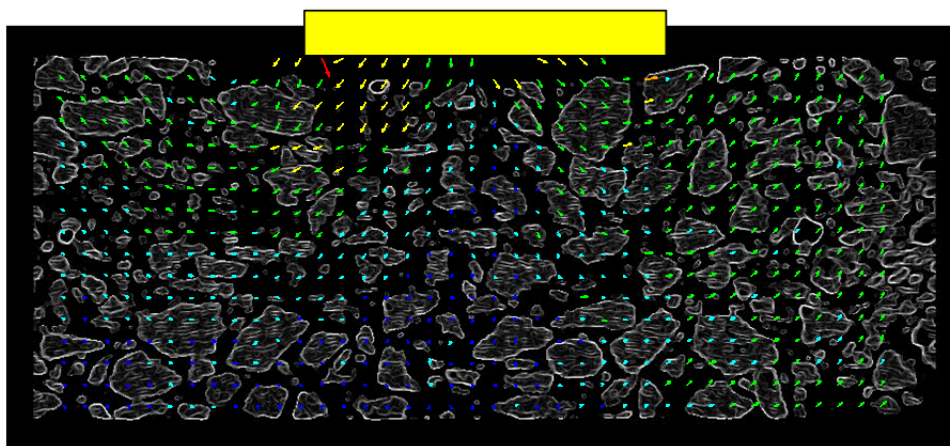


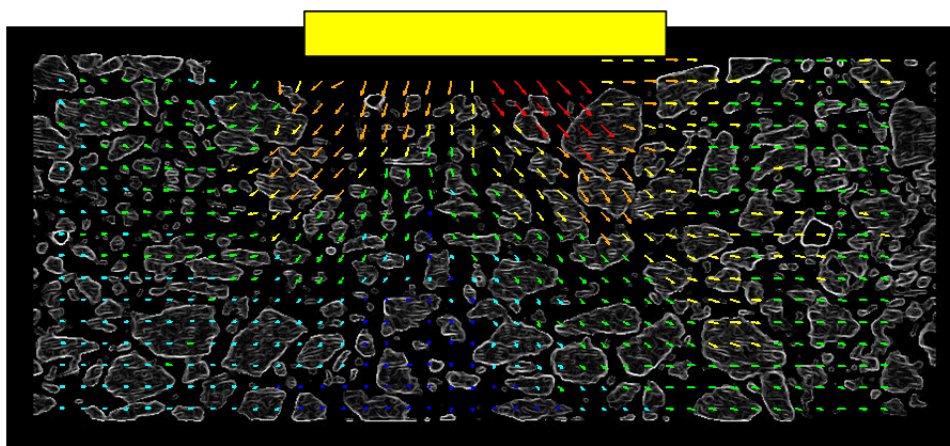
図-6.21 W1 (密粒度ストアス) 後部における鉛直変位



i) 0~600回



ii) 600~2,400回



iii) 2,400~6,000回

変位(mm)

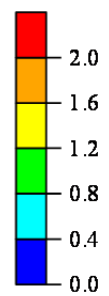


図-6.22 W1 (密粒度ストアス) 後部におけるベクトル図

600～2,400回においては、載荷位置直下における鉛直下方向へ変位が小さくなる一方、側方部で鉛直上方向の変位が大きく、側方部で隆起していることが確認できた。また、水平方向は0～600回と同様の傾向が確認できた。しかし、変位量そのものは3ケースの中で最も小さかった。近藤ら⁷⁾は、このケースの骨材挙動について「圧密および流動がほとんど生じていない」、「空隙の減少や骨材のかみ合わせ等により、走行荷重に対して安定した状態になっている」と結論づけているが、本研究においてもほぼ同様の結果が得られた。

2,400～6,000回においては、鉛直方向よりも水平方向の変位が大きいことが確認された。また、供試体の深い部分（約40mm付近）においても1.2mm以上の変位をもつベクトルが確認されるとともに、側方部においては水平方向のベクトルが卓越し、1.2mm以上の変位をもつベクトルも確認されている。これは600～2,400回のケースとは反対に、鉛直に対して骨材が密な状況であり、鉛直下方向の移動が限られたために左右方向への引張りが強まったものと考えられる。

なお、ホイールトラッキング試験においては、供試体と型枠の接着を行っておらず、境界条件は非拘束となる。また、混合物が側方方向への流動したのは、側方での拘束が若干緩かったことによるものと考えられる。しかし、実際の道路においては、タックコートまたはプライムコートと呼ばれる瀝青材料によって上層と下層は拘束される。そのため、輪荷重によって押された混合物は側方で隆起することとなる。また、表層の下層は粗粒度アスファルト混合物等、今回試験を行った混合物よりも弾性係数の低い材料を用いるため、下層にも鉛直下方向のベクトルが発生することとなる。

2) W2（密粒度PMA-II）

W2の後部における各載荷回数毎の水平変位を図-6.23に、鉛直変位を図-6.24に、ベクトル図を図-6.25に示す。

0～600回においては、輪荷重直下を中心に鉛直下方向のベクトルが卓越しており、側方への変形はほとんどが0.8mm以下のものであった。これはPMA-IIの特性である塑性変形抵抗性やたわみ追従性が発揮されたためと考えられる。

600～2,400回においては、ほとんど変形が生じていないことが確認できる。これは、側方方向への変形が抑えられるPMA-IIを用いていることに加え、W1と同様、空隙の減少および骨材のかみ合わせの効果が発揮されたものと考えられる。

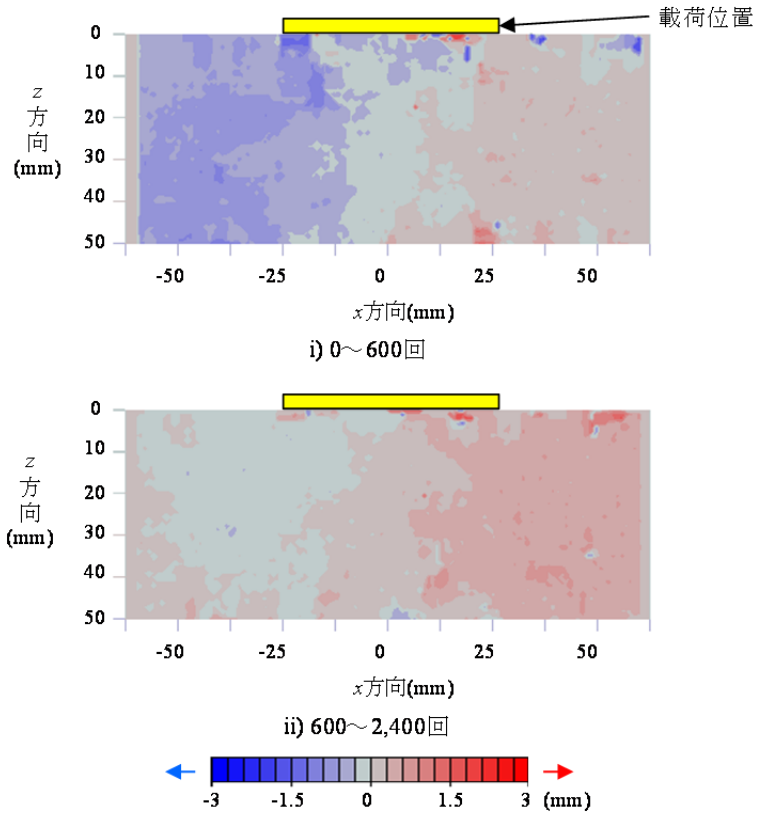


図-6.23 W2（密粒度PMA-II）後部における水平変位

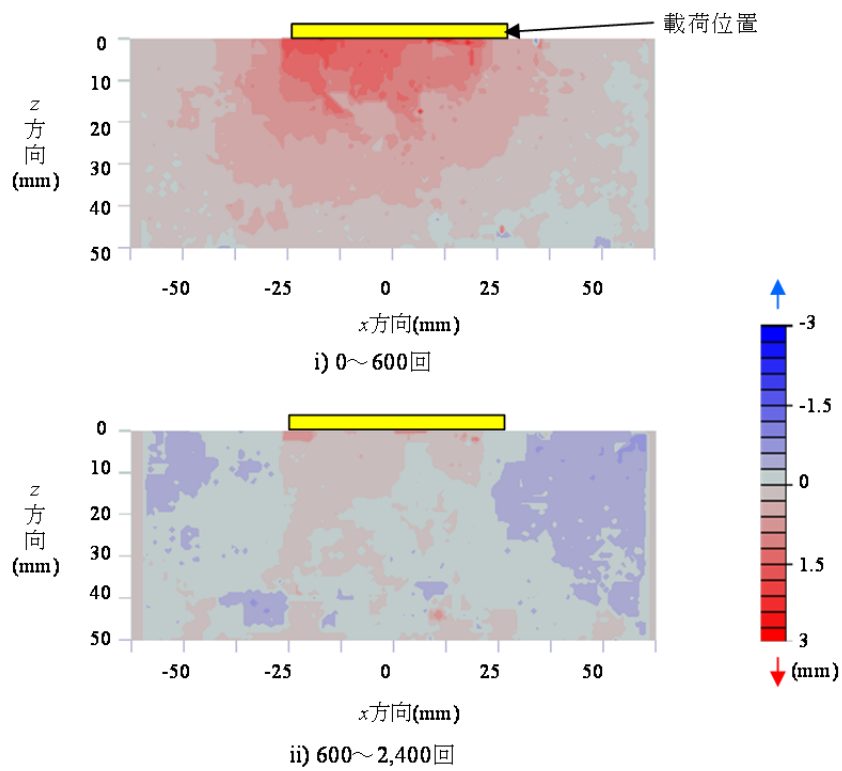


図-6.24 W2（密粒度PMA-II）後部における鉛直変位

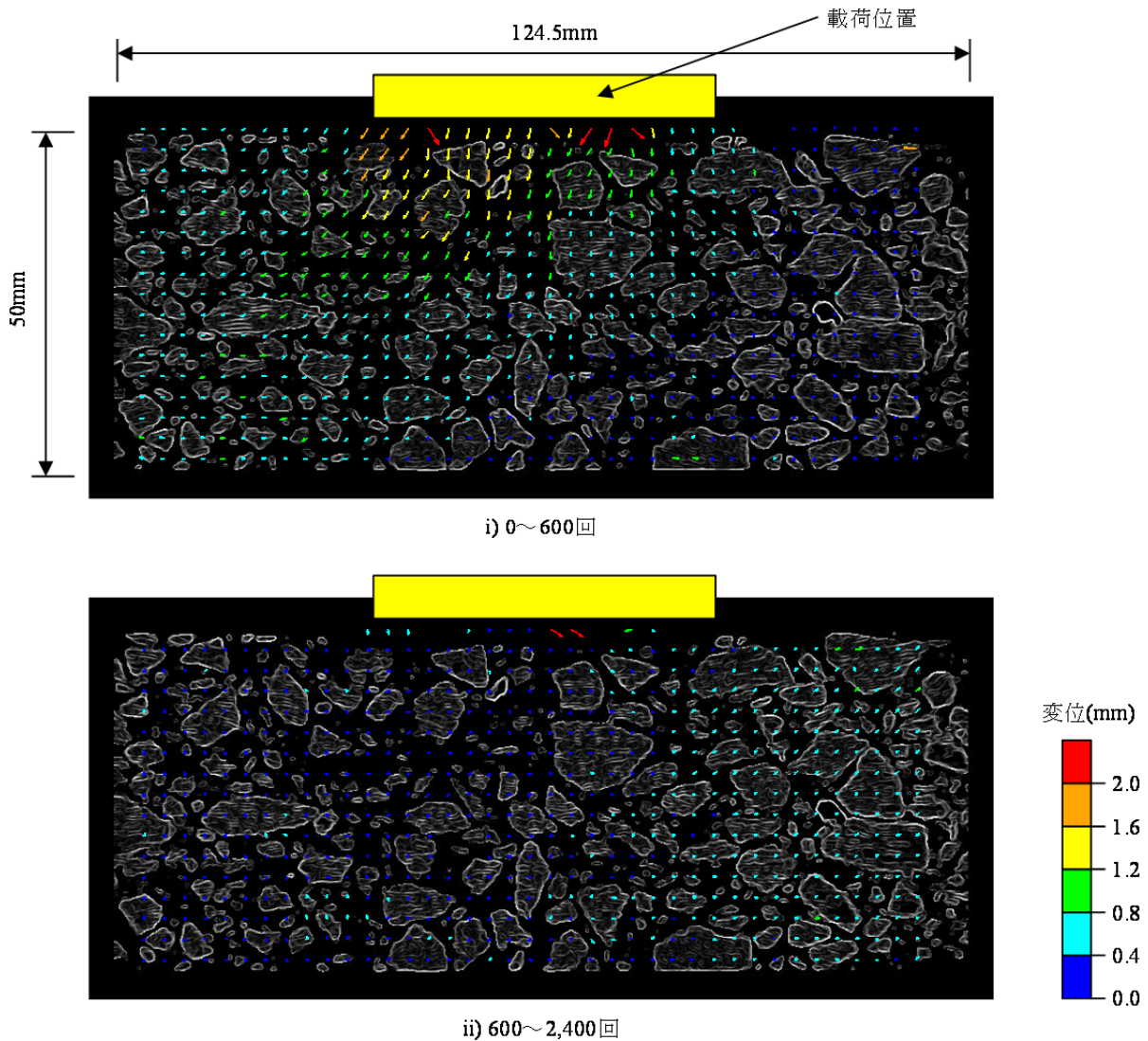


図-6.25 W2後部（密粒度PMA-II）におけるベクトル図

3) W3（ポーラス）

W3の後部における各載荷回数毎の水平変位を図-6.26に、鉛直変位を図-6.27に、ベクトル図を図-6.28に示す。

0～600回においては、W2と同様、輪荷重直下を中心に鉛直下方向のベクトルが卓越している。一方、側方への変形はW2に比べ変位が0.8～1.2mmのベクトルが多くなる傾向が見られ、近年問題となっているポーラスアスファルト舗装の側方流動の兆候であると考えられる¹⁸⁾。なお、中央部の深さ35～40cm付近に大きな変形が発生しているが、図-6.9のCT画像を確認したところ、当該箇所には大きな空隙が存在していることから空隙の影響によるものと考えられる。

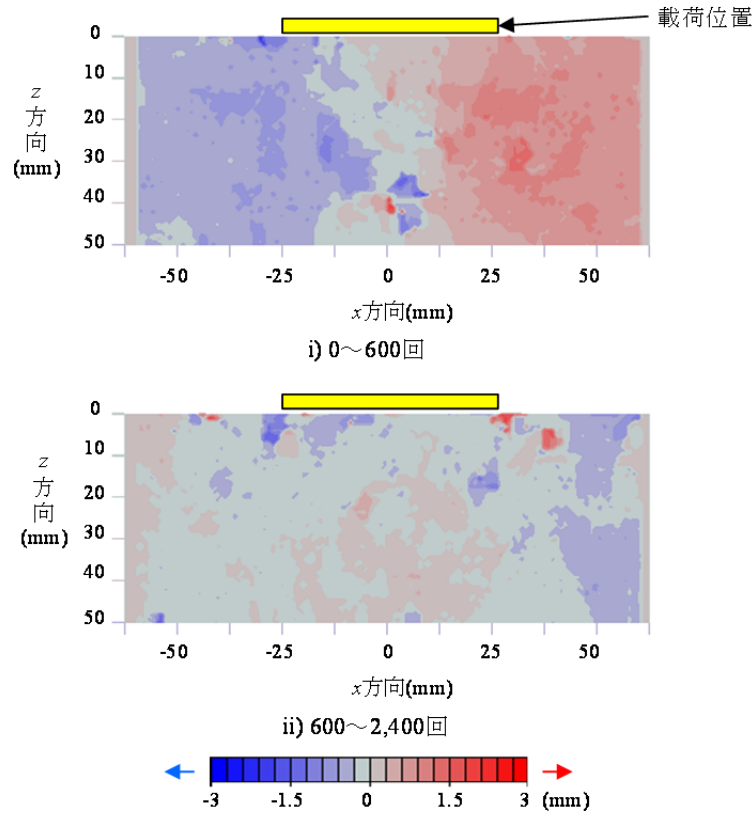


図-6.26 W3（ポーラス）後部における水平変位

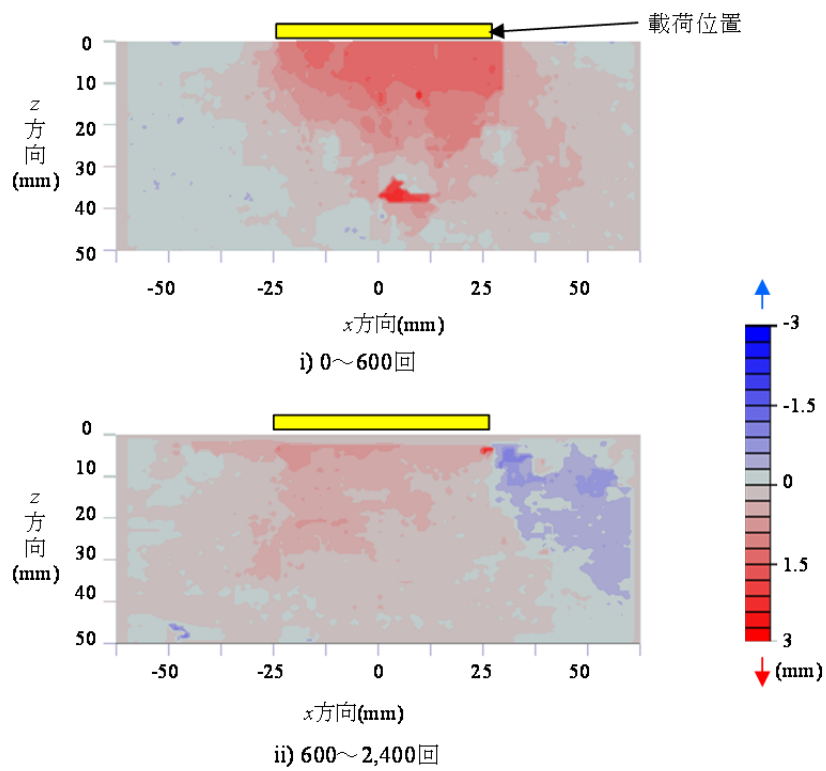


図-6.27 W3（ポーラス）後部における鉛直変位

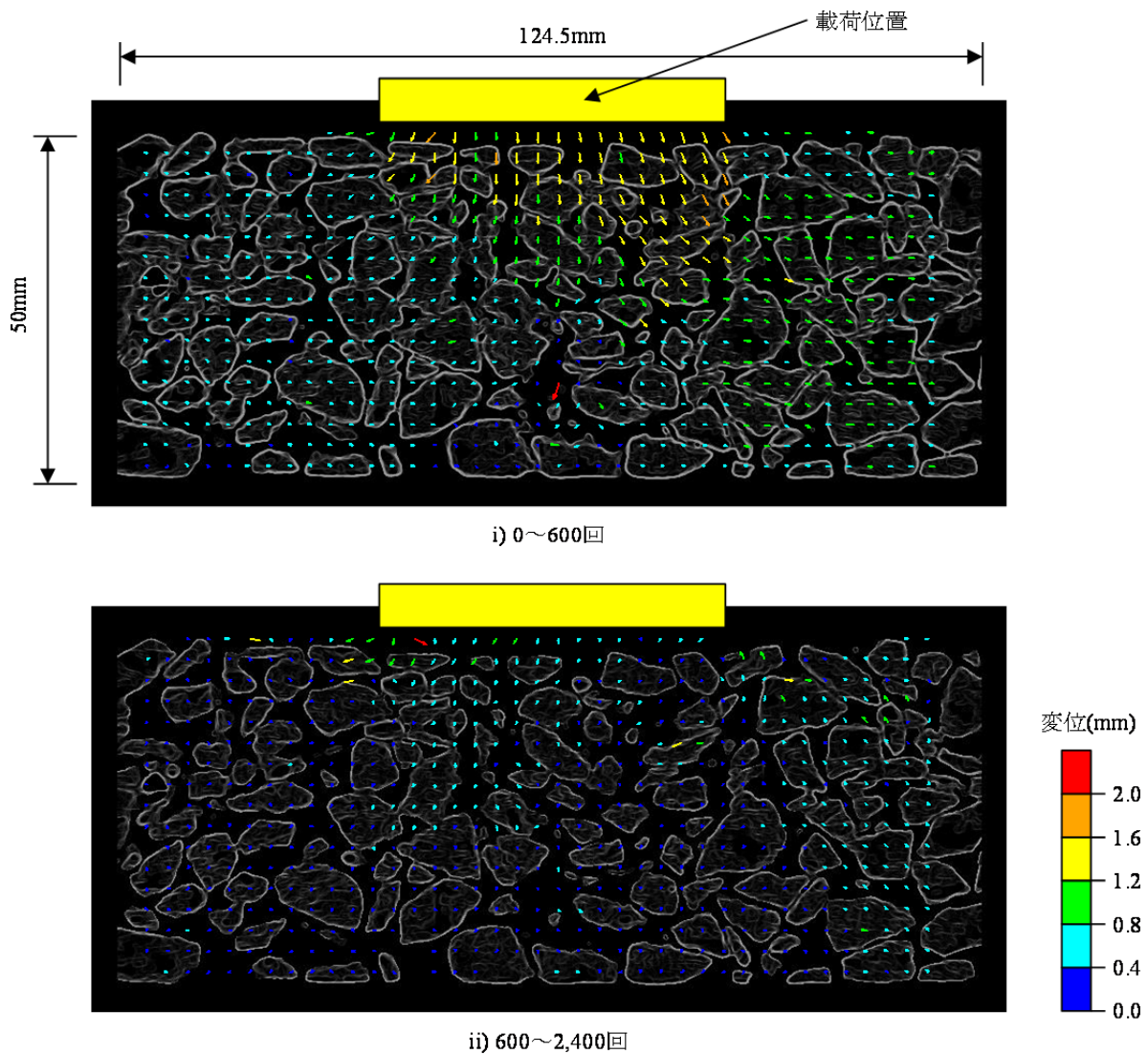


図-6.28 W3後部における各載荷回数毎のベクトル図

600～2,400回においては、W2と同様、ほとんど変形が生じていないことが確認でき、骨材のかみ合わせの効果、ならびにPMA-Hがもつ塑性変形抵抗性および骨材飛散抵抗性の効果が発揮されたものと考えられる。

6.3.4 DICによるひずみ特性¹⁷⁾

1) W1 (密粒度ストアス)

W1の後部における各載荷回数毎の水平ひずみを図-6.29に、鉛直ひずみを図-6.30に示す。

縦ひび割れ発生の原因となる水平方向においては、載荷回数が増加するに従って引張りひずみが大きくなる傾向が見られた。また、0～600回においては浅い部分で大きな引張りひずみが発生しているが、2,400回、6,000回と載荷回数が増えるに従い、引張

りひずみの大きな部分は深い部分にまで達していることが確認できた。これは上部では骨材の流動によって外側に引っ張られることにより発生したものと考えられる。

鉛直方向においては、圧縮ひずみが層状に発生しており、0～600回、2,400～6,000回、600～2,400回の順に圧縮ひずみが小さくなるという、変位の大きさと連動する傾向が見られた。なお、表面部分に引張りひずみが発生しているが、これはわだち掘れによって発生した空間によるものであり、供試体のものではない。

なお、6.3.3で示したように、実際の道路においては、通常、表層は基層よりも弾性係数の高い材料を用いるため、変形は下層へも及ぶ。そのため、水平方向の引張りひずみは表層の下部で発生し、それが疲労破壊規準に達したとき、疲労破壊が発生することになる。

2) W2（密粒度PMA-II）

W2の後部における各載荷回数毎の水平ひずみを図-6.31に、鉛直ひずみを図-6.32に示す。

水平方向については、0～600回において荷重直下の浅い部分でW1よりも大きい引張りひずみが発生していることが確認された。これは、W2はW1に比べ、「わだち割れ」(Top-down cracking)と呼ばれる縦ひび割れが発生しやすいことを示唆している。一方、600～2,400回においては大きなひずみは見られなかった。松野²⁾は「わだち割れ」の原因との一つとして、「交通解放後の早期に入るものが多い」ことを挙げているが、これを裏付ける結果となった。

鉛直方向においては、0～600回、600～2,400回の順に圧縮ひずみが小さくなり、変位の大きさと連動する結果となった。

3) W3（ポーラス）

W3の後部における各載荷回数毎の水平ひずみを図-6.33に、鉛直ひずみを図-6.34に示す。

水平方向については、0～600回において密粒度とは異なり、荷重直下の深い部分で大きい引張りひずみが発生していることが確認された。Taniguchiら^{4),5)}は、北海道の高速道路のポーラスアスファルト混合物を用いてX線CT撮影を行った結果、「縦ひび割れは舗装の表面からだけでは無く、舗装の内部または下部から発生する」と結論づけているが、今回の試験からもこの結論が裏付けられた。600～2,400回においては、大きなひずみの発生は見られなかった。

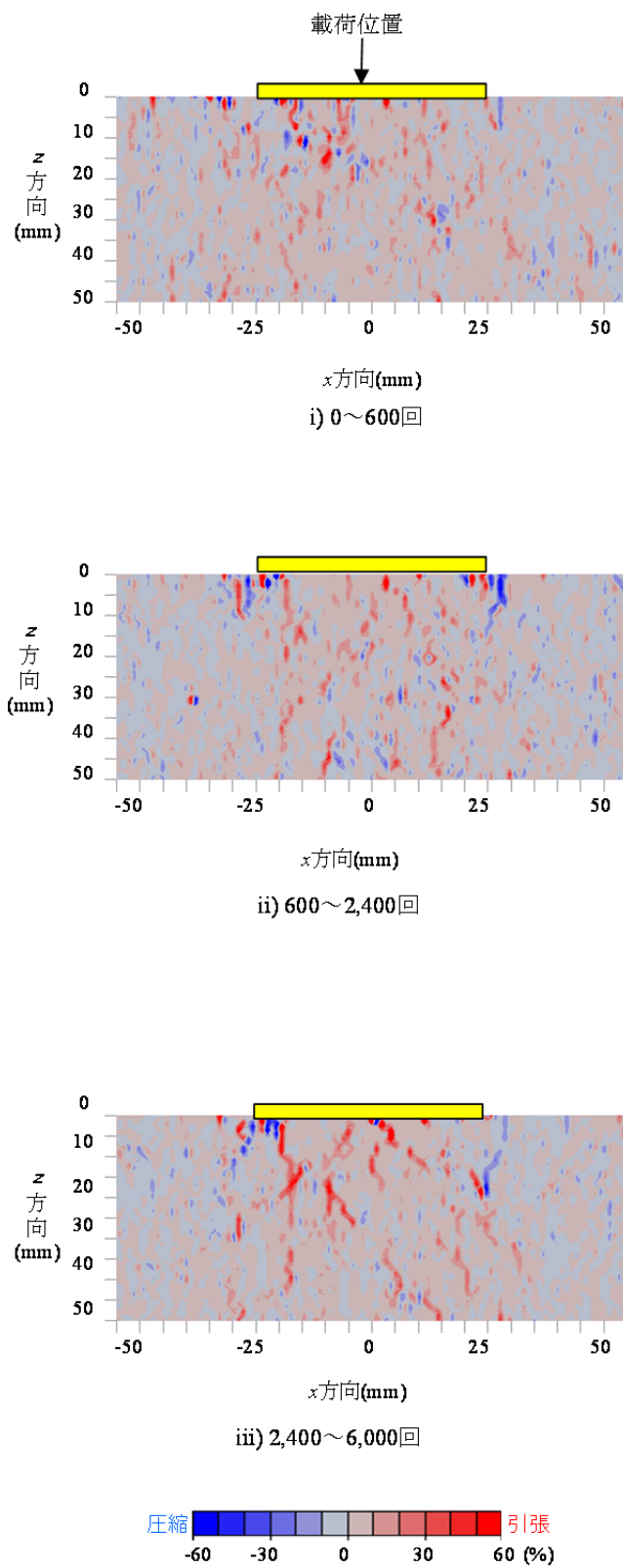


図-6.29 W1（密粒度ストアス）後部における水平ひずみ

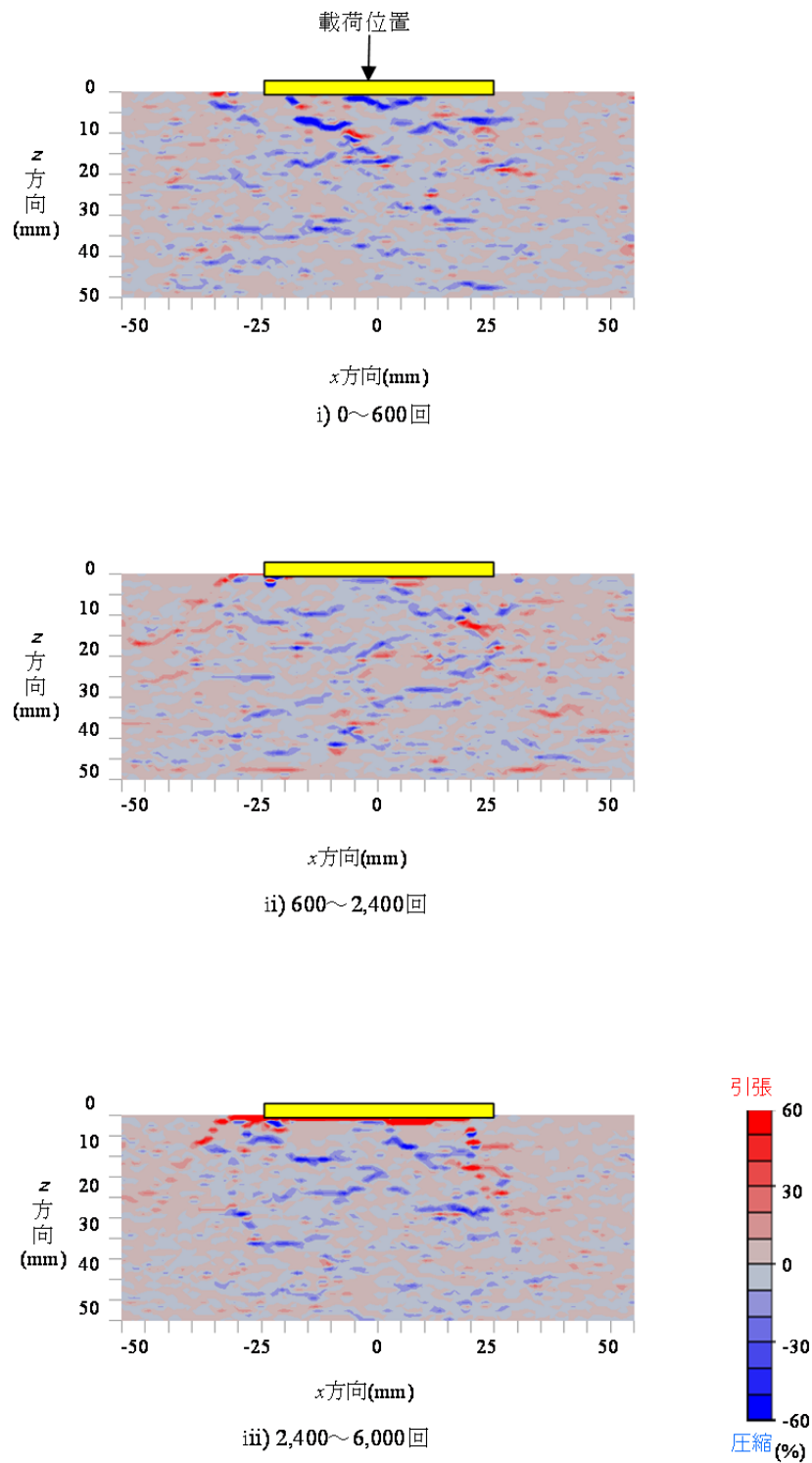


図-6.30 W1（密粒度ストアス）後部における鉛直ひずみ

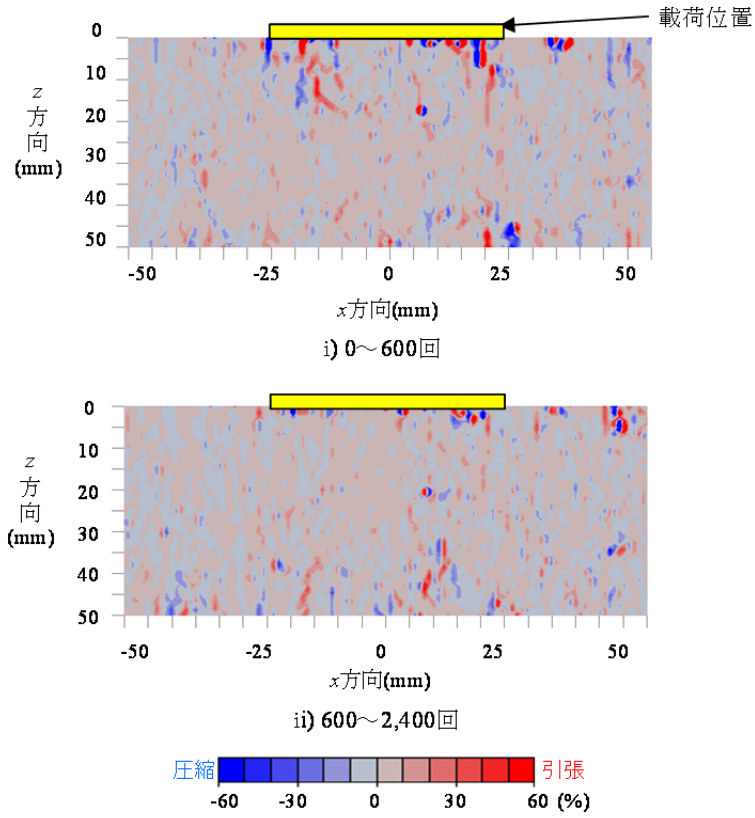


図-6.31 W2（密粒度PMA-II）後部における水平ひずみ

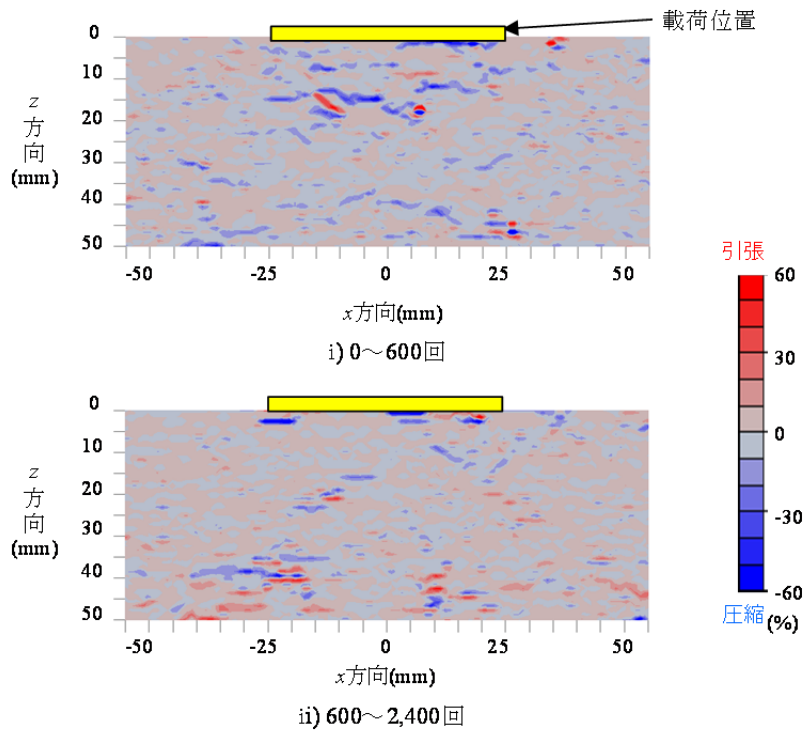


図-6.32 W2（密粒度PMA-II）後部における鉛直ひずみ

鉛直方向については、0～600回において荷重直下の深い部分（深さ30～40cm）において大きなひずみの発生が見られた一方、600～2,400回においては水平方向同様、大きなひずみの発生は見られなかった。

6.4 まとめ

本章では輪荷重下のアスファルト混合物の変位特性およびひずみ特性を把握することを目的に、ホイールトラッキング試験、X線CT撮影、DIC解析を実施し、アスファルト混合物の変位特性およびひずみ特性を解明し、耐流動性および耐ひび割れ性といった耐久性の評価を行った。以下に得られた知見を列挙する。

- i) X線CTおよびDIC解析を行うことにより、アスファルト混合物のホイールトラッキング試験における変位場およびひずみ場を求めることができた。
- ii) ホイールトラッキング試験、CT画像の比較およびDIC解析から得られた変位は概ね一致した。
- iii) 鉛直方向および水平方向の変位は密粒度ストアス、ポーラス、密粒度PMA-IIの順に大きくなった。
- iv) 600回まで載荷した結果、すべての供試体において載荷位置を中心に放射状に骨材が移動していることが確認されるとともに、特に荷重直下においては鉛直下方向のベクトルが卓越した。
- v) 密粒度ストアスを2,400回まで載荷した結果、載荷位置の脇でアスファルト混合物の隆起が確認された。これは600回までの圧密で骨材がかみ合った密な状況になり、変形の拘束がない表面に盛り上がったためと考えられる。
- vi) 密粒度ストアスの場合、600回までの載荷では全体的には引張りひずみは小さくなる一方、載荷回数が増加するに従って、水平方向の引張りひずみが大きくなる。
- vii) 密粒度PMA-IIの場合、水平方向の大きな引張りひずみが表面に集中した。これは表面から入る縦ひび割れ(Top-down Cracking)の発生の可能性を示唆している。
- viii) ポーラスの場合、舗装の内部に水平方向の大きな引張りひずみが発生した。これは、縦ひび割れはアスファルトコンクリートの表面または底面からだけでなく、内部からも発生することを示唆している。

このように、本試験によって耐流動性のみならず耐ひび割れ性についても確認することができ、ホイールトラッキング試験における破損のメカニズムを解明できたものと考えられる。なお、舗装の破損は様々な形態があることから、それぞれの破損についてX線CTの活用が期待される。

また、本試験の結果は、アスファルト混合物のホイールトラッキング試験が、耐流動性のみならず、耐縦ひび割れ性についても表面にひずみゲージを貼る等により評価できることを示唆するものである。今後、縦ひび割れに対する疲労破壊規準を設定するとともに、耐流動性および耐縦ひび割れ性の両方に優れたアスファルト混合物開発が望まれる。

【参考文献】（第6章）

- 1) 舗装委員会舗装設計施工小委員会：舗装の維持修繕ガイドブック2013，日本道路協会，2013.
- 2) 松野三朗：アスファルト舗装の破損とパフォーマンス，理工図書，2011.
- 3) 谷口聡，池田拓哉，東嶋奈緒子：アスファルト舗装の修繕原因と修繕工法に関する実態調査，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，V-31，pp.62-63，1997.
- 4) Taniguchi S., Nishizaki I. and Moriyoshi A.: A study of Longitudinal Cracking in Asphalt Pavement using CT scanner, Road Materials and Pavement Design, vol. 9, issue 3, pp.549-558, 2008.
- 5) Taniguchi S., Nishizaki I. and Moriyoshi A.: Three-Dimensional Diagnosis of Pavement Damage using CT Scanner, Proceedings of the 6th international conference on maintenance and rehabilitation of pavement and technological control (MAIREPAV6), 2009.
- 6) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2007.
- 7) 日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説，2001.
- 8) 谷口聡，小川慧一郎，大谷順，熊谷政行，姫野賢治：X線CTおよびデジタル画像相関法を用いたアスファルト混合物内部の変形特性の把握，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.69，No.3（舗装工学論文集第18巻），I_49-I_57，2011.
- 9) 近藤崇，森吉昭博，吉田隆輝，高橋正一：ホイールトラッキング試験におけるアスファルト混合物内部の骨材の移動特性，Journal of the Japan Petroleum Institute, 46, (3), pp.172-180, 2003.
- 10) 小川慧一郎，谷口聡，大谷順，佐藤宇紘：粒子追跡手法を用いたポーラスアスファルト混合物の骨材挙動の解明，平成24年度土木学会西部支部研究発表会，V-20，pp.729-730，2013.
- 11) Taniguchi S., Ogawa K., Otani J., Nishizaki I. and Himeno K.: Visualisation of Aggregate Movement in the Wheel-tracking Test of Asphalt Mixture Using X-ray Computed Tomography, Tomography of Materials and Structures, Book of abstracts, Poster, pp.269-272, 2013.
- 12) 尾形陽介：X線CTを用いたアスファルト混合物の変形特性の解明に関する研究，熊本大学修士論文，2014.

- 13) 谷口聡, 大谷順, 西崎到: 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, 舗装工学講演会論文集, Vol.15, pp.41-48, 2010.
- 14) 椋木俊文: 地盤工学におけるX線CT法の適用に関する研究, 熊本大学博士論文, 2001.
- 15) Sefidmazgi N.R.: Defining effective aggregate skeleton in asphalt mixture using digital image, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, 2011.
- 16) Hall S.A., Lenoir N., Viggiani G., Desures J. and Besuelle P.: Strain localization in sand under triaxial loading: characterization by X-ray CT microtomography and 3D digital image correlation, Proceedings of International Symposium on Computational Geomechanics (COMGeo09), 2009.
- 17) 谷口聡, 木村孝司, 大谷順: X線CTスキャナおよびデジタル画像相関法を用いたホイールトラッキング試験供試体の変位・ひずみ特性の分析, 寒地土木月報, No.741, pp.15-23, 2015.
- 18) 早川博, 阿部義孝, 山本貴司: 排水性舗装施工箇所における側方流動わだちについて, 平成19年度北陸地方整備局管内事業研究会, 自由課題(G)維持管理・雪, 2007.

第7章 結論

X線CT法によるアスファルト混合物内部の評価は、材料構成の定量化や破損のメカニズムの解明に大きな意義があると考えられる。本論文では、X線CT法をアスファルト混合物の室内作製の供試体、現場採取コアにより品質評価の適用性、有効性を論じるとともに、ホイールトラッキング試験によりアスファルト混合物の耐久性について論じた。以下に各章の結論を概説する。

第1章では、X線CT法をアスファルト混合物の品質評価および耐久性評価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、既存のアスファルト混合物の品質評価および耐久性評価手法について概観するとともに、その問題点を抽出し、これらの問題を解決する方法として、アスファルト混合物の内部を容易に測定できるX線CT法が期待されていることを示した。以下に第2章の結論を列挙する。

- i) 密度試験、アスファルト抽出試験、ふるい分け試験という一連の品質評価手法は、多くの労力を要するとともに、抽出試験に使用する溶剤の取扱いが煩雑である。
- ii) 現場における耐久性評価手法は、舗装の表面のみの評価または表面から構造を予測しているにすぎない。
- iii) 既存のホイールトラッキング試験の骨材挙動の把握は、側面のみからの評価である。

第3章では、X線CTの基本およびCT画像の処理手法を説明するとともに、土系材料、セメントコンクリートおよびアスファルト混合物について、これまでのX線CTの研究について概観した。以下に第3章の結論を列挙する。

- i) CT撮影により得られた断面画像は、CT値によるデジタル画像であり、被検体の密度を定量的に表すことから、構成材料の定量化が可能である。
- ii) ある程度大きい材料の品質を評価する場合には、ミニフォーカス型X線CTの方が適している。一方、微小な亀裂および損傷等の評価するためには、解像度の高いマイクロフォーカス型X線CTの方が適している。

- iii) 供試体の大きさ、形状によってはアーティファクトの問題が発生するため、試料の大きさおよび形状に留意する必要がある。
- iv) X線CTに関する画像処理方法のとりまとめを行った。
- v) 土系材料については、熊本大学をはじめとして、国内外において研究が盛んに行われ、X線CTおよび三軸圧縮試験によって砂の破壊メカニズム、一軸圧縮試験によって粘土の破壊メカニズムの解明を行っている。また、杭の貫入やトンネルの切り羽崩壊等、応用分野へ研究が展開している。
- vi) セメントコンクリート材料については、セメントペースト、セメントモルタルおよびコンクリートにおいて適用事例があり、X線CT撮影の結果から、水セメント比を評価する等といった品質管理手法の提案および既設構造物のコンクリートの破損の評価が行われている。
- vii) アスファルト混合物については空隙、亀裂および透水性の評価、ならびに骨材の形状に特化した研究が盛んに行われている一方、X線CTの特性である密度、CT値に着目した議論が行われていない。

第4章では、マーシャル安定度試験用供試体（直径101.6mm）のX線CT撮影を行い、アスファルト混合物を構成する素材およびアスファルト混合物のCT値特性を把握した。以下に第4章の結論を列挙する。

- i) 粒径が大きく多孔性の粗骨材については、CT値ヒストグラムの分布に双峰性が見られた一方、粒径が小さく密な構造の細骨材および石粉については、CT値ヒストグラムの分布に単峰性が見られたことから、粒径によるCT値分布特性を明らかにすることができた。
- ii) アスファルトについては、CT画像に密度の高い部分と低い部分が点在する一方、平均CT値は密度がほぼ同じの水に近く、CT値が骨材に比べ狭い範囲に分布している等、アスファルトのCT値特性を把握することができた。
- iii) アスファルト量および骨材配合率が変化した場合にはCT値の分布やしきい値が大きく変化する一方、アスファルトの種類を変化させてもCT値の分布に大きな変化がなかった等、アスファルト混合物のCT値特性を把握することができた。
- iv) 4値化画像により、骨材の形状、ならびに骨材、アスファルトおよび空隙の分布状況を把握することができた。

- v) 断面平均CT値とアスファルト混合物の密度，アスファルト+石粉の平均CT値とアスファルト量，ならびにしきい値3と2.36mmふるい通過百分率との間の相関係数が大きいことから，CT値の各指標からアスファルト混合物の密度，アスファルト量，2.36mmふるい通過百分率を定量化できる可能性があることがわかった．

第5章では，高速道路の現場において作製・採取された基準供試体および現場供試体を用いて，全断面撮影を実施し，アスファルト混合物の物性評価を行うとともに，X線CT撮影方法について提案した．以下に第5章の結論を列挙する．

- i) 基準供試体および現場供試体を全断面撮影し，グラブス・スミルノフ検定を行ったことにより，採択領域と棄却領域を明確にするとともに，棄却領域における外部空隙や裁断面の状況をCT画像により取得することができた．
- ii) 基準供試体は，マーシャル自動突固め装置のハンマにより突き固められることから，供試体上下部で空隙率が高く，中間部でCT値および密度，ならびに骨材体積率が高くなることが明らかとなった．
- iii) 現場供試体は，敷き均しおよび転圧の影響により，供試体上部で空隙率が高く，供試体下部でCT値および密度，アスファルト+石粉の体積率ならびに骨材体積率が高くなることが明らかとなった．
- iv) 断面抽出数と抽出された断面の平均CT値，標準偏差，標準誤差の関係を勘案した結果，X線CTでアスファルト混合物の品質評価を行う際には，基準供試体については等分布で最低5断面，現場供試体については等分布で最低3断面抽出することが望ましい．

第6章では，輪荷重直下のアスファルト混合物の変位特性およびひずみ特性を解明することを目的に，ホイールトラッキング試験，X線CT撮影，DIC解析を実施し，アスファルト混合物の耐久性に関する評価を試みた．以下に第6章の結論を列挙する．

- i) X線CTおよびDIC解析を行うことにより，アスファルト混合物のホイールトラッキング試験における変位場およびひずみ場を求めることができた．
- ii) ホイールトラッキング試験，CT画像の比較およびDIC解析から得られた変位は概ね一致した．
- iii) 鉛直方向および水平方向の変位はストレートアスファルトを用いた密粒度アスフ

ァルト混合物，ポーラスアスファルト混合物，ポリマー改質アスファルトⅡ型を用いた密粒度アスファルト混合物の順に大きくなった．

- iv) 600 回まで載荷した結果，すべての供試体において載荷位置を中心に放射状に骨材が移動していることが確認されるとともに，特に荷重直下においては鉛直下方向のベクトルが卓越した．
- v) ストレートアスファルトを用いた密粒度アスファルト混合物を2,400回まで載荷した結果，載荷位置の脇でアスファルト混合物の隆起が確認された．
- vi) ストレートアスファルトを用いた密粒度アスファルト混合物の場合，600回までの載荷では全体的には引張りひずみは小さくなる一方，載荷回数が増加するに従って，水平方向の引張りひずみが大きくなった．
- vii) ポリマー改質アスファルトⅡ型を用いた密粒度アスファルト混合物の場合，水平方向の大きな引張りひずみが表面に集中した．これは表面から入る縦ひび割れ (Top-down Cracking) の発生の可能性を示唆している．
- viii) ポーラスアスファルト混合物の場合，舗装の内部に水平方向の大きな引張りひずみが発生した．これは，縦ひび割れはアスファルトコンクリートの表面または底面からだけでなく，内部からも発生することを示唆している．

今後の課題を整理すると以下のとおりとなる．なお，i)～iv)はX線CTに関するものであり，v)はアスファルト混合物に関するものである．

- i) 本論文により，しきい値やアスファルト+石粉の断面平均CT値等といったCT値指標と粒度，アスファルトに相関が見られたが，これらを基準として設定するためには，様々な種類のアスファルトについてX線CT撮影を実施し，データを蓄積する必要がある．
- ii) 現場で問題となっている事象（異物の混入，ポーラスアスファルト混合物の目詰まり等）や浸透型補修材料の充填状況の確認， X線CTによる可視化が可能な分野へ適用を拡大していく必要がある．
- iii) 品質評価手法として提案した断面数（基準供試体5断面，現場供試体3断面）についての検証を行うため，現場におけるコアのデータの蓄積を行う必要がある．
- iv) アスファルト混合物の破損は様々な形態を有しており，破損メカニズム解明等にX線CTを適用していく必要がある．

- v) ホイールトラッキング試験において、縦ひび割れの評価をできる可能性があることから、縦ひび割れの評価を行う手法を検討する必要がある。

今回得られた知見をベースとし、アスファルト混合物の品質評価および耐久性評価に対して、X線CTの適用が拡大されることを期待する。

謝 辞

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す。本研究を進めるにあたり、熊本大学大学院の研究指導委員会の先生方をはじめとした多くの先生方、ならびに筆者の所属する土木研究所の上司、同僚の方々のご指導、ご助力を賜りましたことを感謝いたします。また、学会等で知り合った多くの方々からも貴重なご意見をいただいたこと、現場の方から多大なるご高配をいただいたことを感謝いたします。

熊本大学大学院教授大谷先生におかれましては、大学院に入学する以前から小生の研究におつきあいいただき、終始懇切丁寧なるご指導、ご激励と細部にわたるご教示をいただきました。深甚なる感謝を表する次第です。

また、尾原祐三教授、重石光弘教授、椋木俊文准教授におかれましては、ご多忙中の中、草稿を査読いただき、貴重かつ的確なご意見・ご指導を賜りました。佐藤晃准教授におかれましては、国際会議やX-Earthセンターの国際ワークショップ等の際に貴重なご意見を賜りました。熊本大学技術職員の佐藤宇紘氏におかれましては、画像解析ソフト及び画像解析プログラム等について、甚大なるご助力をいただくとともに、的確なご指導を賜りました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

さらに、大谷研究室の皆様、特に本研究のX線CT撮影、画像解析、並びにデータ整理等、多大なるご助力をいただいた熊本大学卒業・修了生の三角直輝氏、小川慧一郎氏、尾形陽介氏に多大なる感謝の意を表します。

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すが、本研究の発端は2007年に舗装の劣化評価の研究を進めていくうちに、X線CTに出会ったことでした。この研究の機会を与えていただいた北海道大学森吉昭博名誉教授に心より感謝の意を表します。また、X線CTの研究を進めていくうちにご指導、ご鞭撻を賜りました鐵鋼スラグ協会の四谷進氏、独立行政法人港湾空港技術研究所の高野大樹博士、近畿大学の麓隆行准教授に厚く御礼申し上げます。さらに、アスファルト混合物の室内供試体作製および各種試験現場コアの採取、ならびに電気炉酸化スラグの提供等にご協力をいただいた関係各位に感謝の意を表します。

2012年の入学時に所属した独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料資源研究グループの西崎到上席研究員をはじめとする新材料チームの皆様、また、2013年4月からの現所

属先である寒地土木研究所寒地道路保全技術グループの熊谷政行前上席研究員（現・国土交通省北海道開発局札幌開発建設部札幌道路事務所長）、木村孝司上席研究員、丸山記美雄総括主任研究員をはじめとする寒地道路保全チームの皆様におかれましては、とりわけ研究面での多大なるサポートをいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

最後に、本論文に対し応援、支援をしてくださった両親、知人、友人の皆様には感謝の意を表しつつ、本論文を結びたいと思います。