

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

2009年3月

天明敏行

目 次

第1章 序論	1
1. 1 研究の背景	1
1. 1. 1 X線CT法	1
1. 1. 2 コンクリート工学における調査診断	2
1. 2 研究の目的	11
1. 3 本論文の構成	12
参考文献	14
第2章 既往の研究	16
2. 1 X線の歴史	16
2. 2 X線CTの歴史	17
2. 3 X線CTの地盤材料への適用	18
2. 4 GeoX シンポジウムにおける研究成果	19
2. 5 コンクリート工学へのX線CT法の適用	20
参考文献	22
第3章 X線CT法の基礎	27
3. 1 緒言	27
3. 2 X線の性質と利用法	28
3. 2. 1 X線とは	28
3. 2. 2 X線の発生	29
3. 2. 3 X線の利用法	30
3. 2. 4 連続X線と特性X線	31
3. 2. 5 X線の線質	33
3. 2. 6 X線の吸収と散乱	34
3. 2. 7 X線の減弱と吸収	35
3. 2. 8 X線の吸収係数	37

3. 3	X線 CTの画像構成法	38
3. 3. 1	画像再構成の概念	38
3. 3. 2	畳込み逆投影法 (CBP 法)	41
3. 4	本研究で用いた X線 CT 装置	44
3. 4. 1	X線 CT 装置の概要	44
3. 4. 2	X線 CT 装置の構造と特徴	46
3. 5	X線 CT 画像	48
3. 5. 1	X線 CT 画像を構成するボクセル	48
3. 5. 2	X線 CT 画像と CT 値	49
3. 5. 3	密度と CT 値の関係	50
3. 5. 4	供試体形状の影響	51
3. 5. 5	同一断面の連続撮影	52
3. 5. 6	供試体の断面撮影	56
3. 6	X線 CT 法をコンクリートに適用するための基礎試験	59
3. 6. 1	試験概要	59
3. 6. 2	試験方法	59
3. 6. 3	試験結果	61
3. 6. 4	基礎試験のまとめ	73
3. 7	結言	74
	参考文献	75
第 4 章	X線 CT 法を用いた材料構成定量化法の開発	76
4. 1	緒言	76
4. 2	コンクリートの構成材料	78
4. 3	一般的な画像処理方法	79
4. 3. 1	概説	79
4. 3. 2	二値化処理	79
4. 3. 3	エッジ処理	81
4. 4	空隙-モルタル境界 CT 値の決定法	86
4. 5	骨材-モルタル境界 CT 値の決定法	88
4. 5. 1	ファントム	88
4. 5. 2	ファントムによる骨材-モルタル境界 CT 値の決定	89
4. 6	空隙率・骨材率	91
4. 7	モルタル平均 CT 値と水セメント比	92

4. 8	粒度分布	95
4. 9	供試体内の材料分布性状と撮影方法	98
4. 10	結言	100
	参考文献	101
第5章	材料構成定量化法による硬化コンクリートの構造特性評価	102
5. 1	緒言	102
5. 2	室内作製コンクリート供試体への適用	103
5. 2. 1	試験方法	103
5. 2. 2	空隙率の解析	105
5. 2. 3	骨材率の解析	106
5. 2. 4	モルタル平均CT値と水セメント比	107
5. 2. 5	モルタル平均CT値と単位セメント量	116
5. 2. 6	コンクリートの配合推定	117
5. 2. 7	モルタル平均CT値と圧縮強度	120
5. 2. 8	供試体寸法によるモルタル平均CT値への影響	125
5. 2. 9	粒度分布の解析	126
5. 3	工場生産コンクリートへの適用	128
5. 3. 1	試験方法	128
5. 3. 2	供試体のX線CT画像	129
5. 3. 3	空隙率の解析	131
5. 3. 4	骨材率の解析	132
5. 3. 5	モルタル平均CT値と水セメント比	133
5. 3. 6	モルタル平均CT値と単位セメント量	136
5. 3. 7	粒度分布の解析	137
5. 4	結言	139
	参考文献	140
第6章	コンクリート構造物の施工に関する評価	141
6. 1	緒言	141
6. 2	コンクリート内部構造の経時変化	142
6. 2. 1	概説	142
6. 2. 2	モルタルの経時変化試験	143
6. 2. 3	コンクリートのブリーディング現象	149

6. 2. 4	まとめ	154
6. 3	RCD 供試体の X 線 CT 分析による強度特性評価	155
6. 3. 1	概説	155
6. 3. 2	RCD の使用材料, 配合および施工仕様	156
6. 3. 3	物理試験方法	157
6. 3. 4	物理試験結果	159
6. 3. 5	X 線 CT 法による構造特性評価	163
6. 3. 6	強度分布に関する考察	170
6. 3. 7	まとめ	172
6. 4	橋梁コンクリートの施工評価	174
6. 4. 1	概説	174
6. 4. 2	コンクリート供試体	174
6. 4. 3	空隙率と骨材率	176
6. 4. 4	モルタル平均 CT 値	177
6. 4. 5	まとめ	180
6. 5	結言	181
	参考文献	182
第 7 章	既設コンクリート構造物の診断と総合評価	183
7. 1	緒言	183
7. 2	築後 70 年のコンクリート橋梁の診断	184
7. 2. 1	概説	184
7. 2. 2	X 線 CT 画像の目視診断	186
7. 2. 3	空隙の分析	188
7. 2. 4	骨材の分析	189
7. 2. 5	モルタル平均 CT 値の分析	191
7. 2. 6	まとめ	196
7. 3	築後 100 年以上経過したレンガ構造物の診断	197
7. 3. 1	概説	197
7. 3. 2	X 線 CT 画像の目視診断	199
7. 3. 3	空隙の分析	202
7. 3. 4	骨材の分析	202
7. 3. 5	モルタル平均 CT 値の分析	203
7. 3. 6	まとめ	205

7. 4 X線 CT法のコンクリート構造物診断への適用に関する考察	206
7. 4. 1 X線 CT法による可視化	206
7. 4. 2 定量化による構造特性評価	207
7. 4. 3 X線 CT法による診断項目	207
7. 5 結言	209
参考文献	210
第8章 結論	211
付録1 モルタル供試体を用いたX線 CT法の基礎試験のX線 CT画像	215
付録2 室内作製コンクリートのX線 CT画像	230
付録3 工場生産コンクリートのX線 CT画像	232
付録4 RCD 供試体のX線 CT画像	236
付録5 橋梁コンクリート構造物供試体のX線 CT画像	238
付録6 築後70年のコンクリート橋梁から採取した供試体のX線 CT画像	240
付録7 築後100年以上経過後のレンガ構造物供試体のX線 CT画像	242
付録8 本論文で使用したパラメータの一覧表	243
付録9 関連論文	244
謝辞	246

1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 X線CT法

1895年ドイツの物理学者 W.C.Röntgen は偶然に X 線を発見し、1901年にノーベル物理学賞を受賞した。その後、1988年に J.Deisenhofer, R.Huber, H.Michel が X 線結晶解析法を利用した光合成反応中心の構造解析でノーベル物理学賞を受賞するまで、X 線に関するノーベル賞は実に 14 個に上る¹⁾。ノーベル賞の受賞数と研究の価値が比例するとはいえないが、X 線が社会に大きな貢献をしていることは疑いの余地がないであろう。

X 線の利用方法は大きく分けて、①X 線の吸収現象を利用する X 線透過法、②X 線の散乱現象を利用する X 線回折法、③蛍光 X 線の放出現象を利用する X 線分光法がある²⁾。このうち、一般の人々にとって最も身近なのは、X 線透過法による医療用 X 線であろう。健康診断時に実施される胸部や胃部の X 線撮影をはじめとして、内科や外科、歯科などの病院で診療用 X 線装置の世話になっていない人はほとんどいないはずである。空港で飛行機に搭乗する際に受ける手荷物検査も X 線透過法を利用している。X 線透過法は X 線の透過力が物体を構成する元素や密度によって異なることを利用して物体の内部構造を観察する方法である。

X 線 CT 法^{3), 4)}とは、X 線透過法を用いており、被検体に X 線を照射し、物体透過前後の X 線エネルギー減衰比から透過した物体内部の 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^{5), 6)}である。X 線吸収率が物体内部の密度に比例することが知られていることから、X 線 CT 法は物体内部の密度分布を画像化する技術といえる。その原理は比較的簡単であるが、コンピューターの処理速度の向上が不可欠な装置である。

今日 X 線 CT 装置が最も普及しているのは医療用である。短時間でほとんど苦痛なく検査ができ、なおかつ多くの情報を得ることができることから臨床の場では頻繁に用いられている。医療用 X 線 CT 装置の適応範囲は広く、肺組織、血管、気管支のほか頭部はもちろん腹部や骨盤と、人体各部にオールラウンドに利用される。疾患の診断・治療に不可欠な機器であり、全国いたるところの病院に導入されている。

このように、非破壊検査における X 線 CT 法は、医療用 X 線 CT 装置の普及によってその有効性を十分に証明してきたが、高価な装置を償却できる分野は医療以外では少なく、また、産業分野で使用するには測定の対象となる材料は医療用の対象である人体よりも質量が大きいことから、出力の大きい X 線を使用した産業用 X 線 CT 装置が必要であり、医療分野以外での X 線 CT 法はそれほど普及していないのが現状といえよう。

しかし、X 線 CT 法は優れた非破壊検査技術であり、医療以外の分野においても物体の内部の

可視化という点では大きな魅力があることに変わりはない。コンピューターの発達や装置の進歩によってX線CT装置の高解像度化や高速化が進み、微細構造の撮影に特化したマイクロX線CTなど、目的に応じた選択も可能となり、産業界においてもX線CT装置が多岐にわたる分野で適用されている。例えば、自動車などに使われる部品の検査ではX線CT装置によって品質管理が行われているが、産業界以外にも文化財の研究などにおいて多くの成果が上がっている¹⁾。また、近年では産業用X線CT装置を用いたリバースエンジニアリング^{7), 8)}という考え方が注目されている。これは、設計図面から材料を加工して製品をつくるという既存のプロセスにとらわれずに、既に存在する物体を利用して複製や改良、開発などを行う考え方である。この方法によって、製品の数値シミュレーションを机上で実施し、製造効率を上げることが可能となった。

一方、社会資本整備の分野では、地盤工学や岩盤工学の分野で産業用X線CT装置が使用されている。第2章で詳細を述べるが、地盤・岩盤の物性評価^{9), 10), 11)}あるいはその破壊現象^{12), 13)}や浸透現象¹⁴⁾、亀裂^{15), 16)}を定量的に評価した研究が行われ、成果を挙げている。

本研究の中心的な役割を果たすX線CT装置は、熊本大学工学部岩盤工学研究グループが1996年に導入した東芝製の産業用X線CT装置である。これは日本の大学の工学系学部で所有する唯一の産業用X線CT装置であり、世界的にも例をみない。本装置は導入から10年目の2006年4月に最新のIC機器技術の導入により約0.07mmの構造を識別できるように空間分解能を向上させ、これまで以上の精度で内部の構造や現象を可視化・分析できるようになった。

1. 1. 2 コンクリート工学における調査診断

(1) コンクリート構造物の維持管理

コンクリートは社会基盤の根幹である材料のひとつであり、過去50数年間で使用された量はおよそ85億 m^3 と推定されている¹⁷⁾。コンクリートは耐久性があり、半永久的に使用できるものと思われていたが、近年起こった新幹線のトンネル覆工コンクリートの剥落事故や高架橋コンクリートの剥落、アルカリ骨材反応橋脚における鉄筋の切断などが示すように、高度成長期に建設されたコンクリート構造物は意外に早い劣化を起している¹⁸⁾。21世紀は、この高度成長期に大量に建設されたコンクリート構造物の維持・管理が社会資本整備における大きな課題である。現存するコンクリート構造物の寿命を延ばし、その機能を維持させるためには、コンクリート構造物の現在の状態の診断を行い、この診断に基づいた的確な対策を講じることが重要となる。

コンクリート構造物の維持管理の手順を図-1.1に示す。維持管理は維持管理計画、診断、対策、記録というサイクルで実施され、このサイクルの中で維持管理計画の見直しが行われる。コンクリート構造物の維持管理のうち、診断にあたってはまず、維持管理計画に基づいて点検、調査を実施し、その結果から劣化機構の推定や劣化予測、構造物の性能評価を行い、対策の可否を判定する。対策の可否判定において、対策が必要であれば対策を行い、必要がなければ再度点検を実施することとなる。

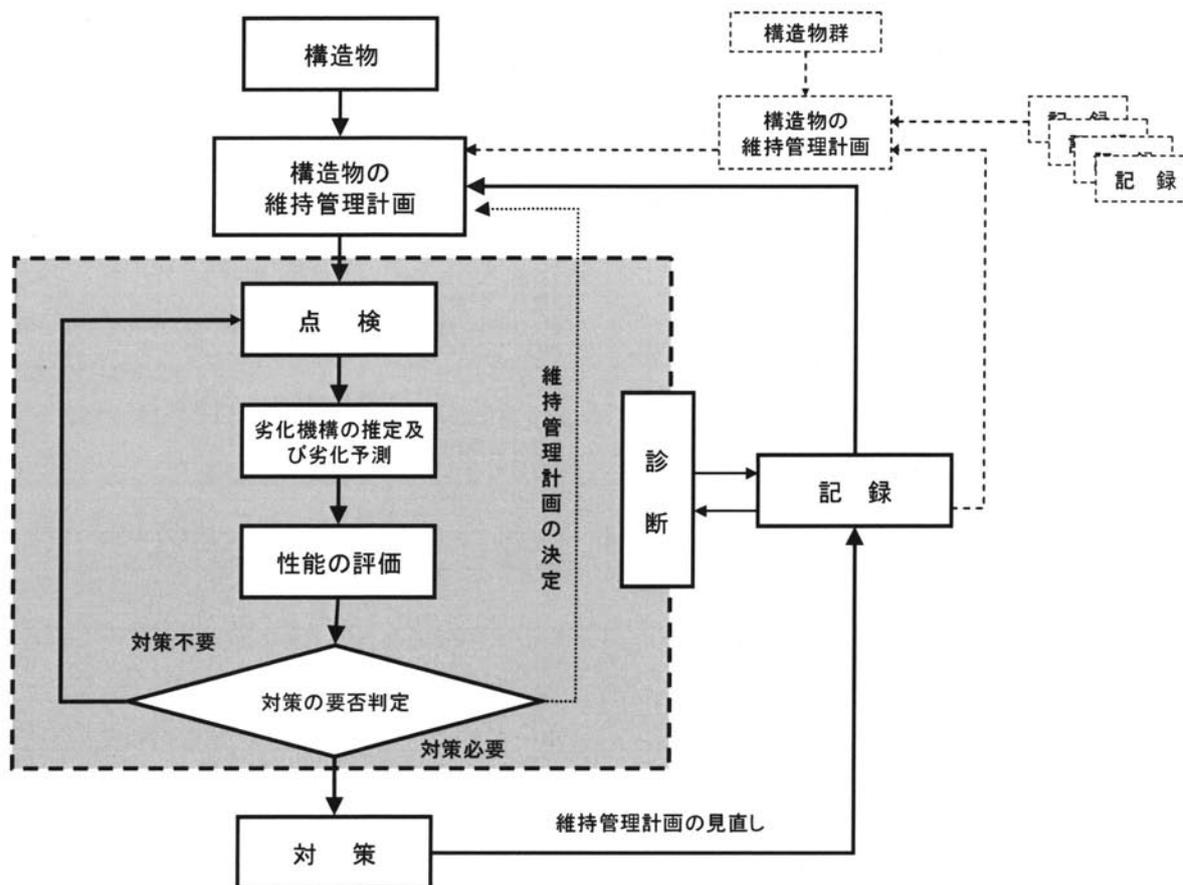


図-1.1 構造物の維持管理の手順¹⁹⁾

(2) 診断と点検, 調査

コンクリート構造物の維持更新を適切に行い、その寿命を延ばすにはその性状を正確に把握し、劣化の原因の調査やその程度の判定、予測を行う「診断」が最も重要である。このことは人間が健康を維持するために健康診断や医療診断を受診するのと同じである。

診断には、初期の診断、定期的診断、および臨時的診断があり、それぞれの目的に応じた診断を行う。構造物の初期状態を把握するための初期の診断では、構造物の維持管理上の初期状態を把握するための初期点検を行う。供用中の構造物の性能を評価し、対策の要否を判定するための定期的診断では、日常点検ならびに定期点検を行う。また、緊急に診断が必要となるような状況が生じた場合には、その目的に合わせて臨時点検、緊急点検を行う。

コンクリート構造物の点検時における調査には表-1.1に示すような具体的方法がある。一般的な調査の方法としては書類の調査、目視およびたたきによる調査、非破壊検査機器を用いる方法、部分的な破壊を伴う方法、実構造物の載荷試験および振動試験による方法、環境作用等を評価するための調査方法、補修・補強材料に関する試験およびモニタリングによる方法などがある。初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検および緊急点検において実施する調査の方法は、調査項目に関する情報が得られるように、適切な方法を選定する必要がある。

表-1.1 調査の方法と得られる情報の例²⁰⁾

調査の方法		得られる情報の例
書類などによる方法 (書類調査)	図書収集 ヒアリング(聞き取り調査)	①使用した示方書、設計基準 ②設計図書 ③施工記録 ④検査記録 ⑤維持管理記録(点検記録、補修、補強履歴など)
目視およびたたきなどによる方法	肉眼による方法 双眼鏡による方法 カメラによる方法 たたきによる方法	①初期欠陥(ひび割れ、豆板、コールドジョイント、砂ずじなど) ②コンクリートの変色・汚れ(さび汁の溶出、カビの発生、ゲルの析出、エフロレッセンス、白華(遊離石灰)、コンクリート自身の変色、漏水など) ③ひび割れ(発生方向、パターン、本数、幅、長さ、さび汁の溶出など) ④スケーリング ⑤コンクリートの浮き(有無、箇所数、面積など) ⑥コンクリートのはく離・はく落の有無 ⑦鋼材の露出・腐食・破断の有無 ⑧変形の有無
非破壊検査機器を用いる方法	反発度に基づく方法	反発度法 ①コンクリートの強度
	電磁誘導を利用する方法	鋼材の導電性および磁性を利用する方法 コンクリートの誘電性を利用する方法 ①コンクリート中の鋼材の位置、径、かぶり ②コンクリートの含水状態
	弾性波を利用する方法	打音法 超音波法 衝撃弾性波法 アコースティック・エミッション(AE) ①コンクリートの圧縮強度、弾性係数などの品質 ②コンクリートのひび割れ深さ ③コンクリート中の浮き、はく離、空隙 ④コンクリートの厚さなどの部材寸法 ⑤シース内のグラウトの充てん状況(PC構造物)
	電磁波を利用する方法	X線法 電磁波レーダー法 赤外線法(サーモグラフィ法) ①コンクリート中の鋼材の位置、径、かぶり ②コンクリート中の浮き、はく離、空隙 ③コンクリートのひび割れの分布状況 ④シース内のグラウトの充てん状況(PC構造物)
	電気化学的方法	自然電位法 分極抵抗法 四電極法 ①コンクリート中の鉄筋の腐食傾向 ②コンクリート中の鉄筋の腐食速度 ③コンクリートの電気抵抗
	光ファイバースコープを用いる方法	①コンクリート内部の状況 ②シース内のグラウトの充てん状況(PC構造物)
局部的な破壊を伴う方法	コア採取による方法 はつりによる方法 ドリル削孔粉を用いる方法 鋼材を採取する方法	①ひび割れ深さ ②コンクリートの圧縮強度、引張強度、弾性係数(積載試験) ③コンクリート中性化深さ ④コンクリートの分析(化学分析、蛍光X線分析、X線回折、熱分析、光学顕微鏡、偏光顕微鏡、走査電子顕微鏡、EPMA) ⑤塩化物イオンの状況(塩化物イオン濃度および濃度分布) ⑥配合分析 ⑦コンクリートの解放膨張量および残存膨張量 ⑧コンクリートの透気性、透水性 ⑨細孔径分布 ⑩コンクリートの気泡分布 ⑪鉄筋の腐食状況(はつりによる方法) ⑫鉄筋の引張強度(鉄筋の採取による方法)
車両の走行による方法	線形、車上感覚試験 載荷試験および振動試験	①部材の断面剛性(静的、動的) ②振動特性
環境作用、荷重等を評価するための調査方法	既往の記録に基づく方法 気象情報(AMeDASなど)に基づく方法 直接測定する方法(センサの利用など) モニタリングによる方法	①気象条件(気温、最低気温、湿度、降水量、日射量) ②水分の供給(雨掛りの状況、地盤からの水の供給条件、防水層や排水設備の状況) ③塩分の供給(飛来塩分量、海水の影響、凍結防止剤の散布量) ④風(向き、速さ、頻度) ⑤二酸化炭素濃度 ⑥酸性度の高い河川水等のpH ⑦下水道関連施設における水質 ⑧酸性雨、酸性霧の発生状況 ⑨アルカリの供給状況 ⑩荷重条件(車両等の状況、振動、水圧など) ⑪災害に関する外力(地震、火災など)

(3) コンクリートの劣化機構と調査方法

コンクリート構造物の劣化機構の推定は、設計図書、使用材料、施工管理および検査の記録、構造物の環境条件および使用条件を検討し、点検結果に基づいて行う。コンクリートの劣化機構には中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリシリカ反応、床版・はり部材の疲労およびすり減りなどがあり、これらの劣化機構の要因や現象、指標の例をまとめたものを表-1.2に示す。

コンクリート構造物の点検では、維持管理計画に定められた頻度、項目および方法で標準調査を行うことを基本とし、標準調査の結果から構造物の詳細な状態を把握する必要があると判断された場合には、詳細調査を行う。

表-1.3にはコンクリートの劣化機構と対応する調査の方法の例を示す。表には劣化項目に対して、標準調査として実施、または必要に応じて実施する項目の例や詳細調査として必要に応じて実施する項目の例などを示してある。これらの調査のうち書類調査や目視による方法は主として標準調査として実施すべき調査であり、非破壊検査や局所的な破壊を伴う調査は詳細調査として必要に応じて実施すべき調査である。

コンクリート構造物の診断における点検・調査は、劣化機構の推定が可能となるよう、以上のような方法で適切に実施される。

表-1.2 劣化機構と要因、指標、現象の関連²¹⁾

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標の例
中性化	二酸化炭素	二酸化炭素がセメント水和物と炭酸化反応を起こし、細孔溶液中のpHを低下させることで、鋼材の腐食が促進され、コンクリートのひび割れやはく離、鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象。	中性化深さ 鋼材腐食量 腐食ひび割れ
塩害	塩化物イオン	コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンにより促進され、コンクリートのひび割れやはく離、鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象。	塩化物イオン濃度 鋼材腐食量 腐食ひび割れ
凍害	凍結融解作用	コンクリート中の水分が凍結と融解を繰返すことによって、コンクリート表面からスケーリング、微細ひび割れおよびポップアウトなどの形で劣化する現象。	凍害深さ 鋼材腐食量
化学的侵食	酸性物質 硫酸イオン	酸性物質や硫酸イオンとの接触によりコンクリート硬化体が分解したり、化合物生成時の膨張圧によってコンクリートが劣化する現象。	劣化因子の浸透深さ 中性化深さ 鋼材腐食量
アルカリシリカ反応	反応性骨材	骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物や炭酸岩塩を有する骨材がコンクリート中のアルカリ性水溶液と反応して、コンクリートに異常膨張やひび割れを発生させる劣化現象。	膨張量 (ひびわれ)
床版の疲労	大型車通行量	道路橋の鉄筋コンクリート床版が輪荷重の繰返し作用によりひび割れや陥没を生じる現象。	ひび割れ密度 たわみ
はり部材の疲労	繰返し荷重	鉄道橋梁などに於いて、荷重の繰返しによって、引張鋼材に亀裂が生じて、それが破断に至る劣化現象。	累積損傷度 鋼材の亀裂長
すり減り	磨耗	流水や車輪などの磨耗作用によってコンクリートの断面が時間とともに徐々に失われていく現象。	すり減り量 すり減り速度

表-1.3 劣化機構と対応する調査の方法の例²⁾

調査の方法	具体的な内容など	劣化機構						
		※2 中性化	塩害	凍害	化学的 侵食	アルカリ シリカ反応	疲労	すり減り
書類などによる方法	設計・施工に関する情報、既往の維持管理・対策に関する情報	●	●	●	●	●	●	●
目視による方法 ^{※1} たたきによる方法	肉眼、双眼鏡、カメラ	●	●	●	●	●	●	●
	浮き、はく離、空洞 鋼材腐食状況(鋼材露出時)	●	●	●	●	●	●	—
反発度に基づく方法	テストハンマー強度	△	△	▲	▲	△	△	▲
電磁誘導を利用する方法	鋼材位置、径	△	△	△	△	△	△	△
弾性波を利用する方法	打音法、超音波法、衝撃弾性波法、AE法	△	△	△	△	△	△	△
	電磁波を利用する方法	電磁波レーダ法						
鋼材配置		△	△	△	△	△	△	△
空隙 かぶり		—	—	—	△	—	△	△
電磁波を利用する方法	赤外線法(サーモグラフィ法)							
	表面はく離	△	△	△	△	△	△	—
電磁波を利用する方法	X線法							
	鋼材配置、径、空隙、ひび割れ	△	△	△	△	△	△	—
電気化学的方法	自然電位法、分極抵抗法	△	△	△	△	△	—	—
	四電極法	△	△	△	△	△	—	—
光ファイバースコープを用いる方法	コンクリート内部の状況、シートス内のグラウトの充てん状況	—	△	—	—	△	—	—
局所的な破壊 ・コア採取による方法 ・はつりによる方法 ・ドリル削孔粉を用いる方法	外観、ひび割れ深さ	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	中性化深さ、中性化残り	▲	▲	△	▲	△	△	—
	塩化物イオン浸透深さ	△	▲	△	△	△	△	—
	塩化物イオン含有量	△	▲	△	△	△	—	—
	圧縮強度、引張強度、弾性係数	△	△	△	△	▲	△	△
	配合分析	△	△	△	△	△	—	—
	アルカリ量	—	—	—	—	△	—	—
	骨材の反応性	—	—	—	—	△	—	—
	解放膨張量、残存膨張量	—	—	—	—	△	—	—
	細孔径分布	△	△	△	△	△	—	—
	気泡分布	—	—	△	—	—	—	△
	透気(水)性試験	△	△	△	△	—	—	△
	熱分析(TG・DTA) ^{※3}	△	—	—	△	—	—	—
	X線回折(水和物等の同定)	△	—	—	△	△	—	△
	EPMA ^{※4}	△	△	—	△	△	—	—
走査型電子顕微鏡観察	—	—	—	△	△	—	△	
局所的な破壊を伴う方法 ・はつりによる方法 ・鋼材を採取する方法	鋼材腐食状況	△	△	△	△	△	△	—
	鋼材引張強度	△	△	△	△	△	△	—
線形、車上感覚試験	道路線形、走行快適性	△	△	△	△	△	●	△
載荷試験(静的、動的)	ひび割れ発生、剛性	△	△	—	—	△	△	—
振動試験	固有振動数、振動モード	△	△	—	—	△	△	—
応力測定法	載荷時のひずみ測定	△	△	△	△	△	△	—
変形測定法	載荷時の変化測定	△	△	△	△	△	△	—

凡例

- : 標準調査として実施する項目の例
- ▲: 標準調査として必要に応じて実施する項目の例
- △: 詳細調査として必要に応じて実施する項目の例
- : 当該の劣化には関係ないか不明

※1: 変形、変色、スケーリング、ひび割れなどの項目を含む。

※2: コンクリートの中性化による鋼材腐食を指す。

※3: TG(熱重量分析)、DTA(示差熱分析)とも、水和成物や炭酸化合物などを定性、定量分析を行う。

※4: 電子線マイクロアナライザーの略称、コンクリート中の元素の定性、定量分析を行う。

(4) 非破壊検査器を用いる調査

コンクリートの非破壊検査方法にはいくつかの方法が用いられているが、それぞれに長所、短所があり、全てに適用可能な方法は現在のところ存在しない。このため、状況に応じて適切な方法が適用される。コンクリートは、セメント、水、砂、砂利からなる複合材料であり、均一でなく配合や含水状態によりその特性が異なる。コンクリート構造物は、この複合材料であるコンクリートにさらに鉄筋などの鋼材を組み合わせた複合構造となっている。したがって、コンクリート構造物の非破壊検査は他の均一な材料と比較して困難であるといえる。

コンクリートの表面近くの鉄筋や内部欠陥を調査する場合には構造物に対して原位置において非破壊検査が適用される。この方法には、超音波法、レーダー法、赤外線サーモグラフィ法、電磁誘導法、X線法などがある^{23), 24)}。

超音波法は、超音波伝播速度を計測することによりコンクリートの内部欠陥やひび割れの深さ、強度の推定などを行う。ひび割れの内部に雨水やエフロエッセンスなどが詰まっている場合には精度の高い測定が困難で、鉄筋などが内部にある場合にも精度が低下する。

レーダー法は、コンクリートに向かって電磁波を放射し、その反射波の伝播時間から鉄筋や空洞の位置を測定する方法である。超音波法と同様に配筋の影響を受ける。

赤外線サーモグラフィ法は、表面付近にある空洞や浮きの調査に適用される。コンクリートと空気部の熱抵抗の相違から表層部の温度変動の差を測定することにより検出する。赤外線カメラを使用し、日射が当たる面や外気温の上昇時や夜間などの温度降下時には、欠陥部分の温度変動が健全部より大きくなることから位置の検出を行う。

電磁誘導法は円形に巻いたコイルに電流を流し、この磁界（一次磁界）内に存在する鉄筋の存在を、発生する誘導電流による別の磁界（二次磁界）を測定することにより測定する。

X線平面透過法、電磁波レーダー法、超音波法や衝撃弾性波法などは透過法であり、コンクリートの内部欠陥や鉄筋の位置、各部位におけるコンクリートの緻密性、耐久性の相違などを調査することができる。これらは医療診断でのX線CT、MRI、超音波診断などに相当する。X線平面透過法ではコンクリート中の鉄筋の状況や空隙などの欠陥を調査することが行われている。2005年の放射線障害防止法の改正により、4MeVまで移動の規制の合理化（橋梁・橋脚の非破壊検査）がなされ、適用範囲は広がっている。また、X線CTを用いると多段配筋の状況など、3次元情報を詳細に知り得ることができるが、橋脚などの大断面の測定は困難である。

これらの非破壊検査はその適用範囲や測定範囲、測定精度に制限があり、状況に応じて使用することができる。

(5) 部分的な破壊を伴う調査

目視やたたきによる方法、あるいは非破壊検査機器を用いる方法で十分な精度が得られない場合や精度の高い情報が必要とされる場合には、コアを採取するなど、部分的な破壊を伴う方法で

調査を行う。採取されたコアを用いれば、圧縮強度や弾性係数の試験、膨張試験などの破壊試験や偏光顕微鏡、X線回析、EPMA、SEM、熱分析によって、強度や耐久性、またはこれらに影響をおよぼすコンクリートの構成元素などを詳細に調査することが可能となる。また、化学分析試験でのC-H-Sの分解による劣化状況の評価やフェノールフタレインによる中性化試験や水銀圧入法による細孔径試験などを目的に応じて実施することができる。このように、コアを採取して試験を劣化原因に応じた適切な試験を実施することで、コンクリートの診断における劣化機構の推定が可能となる。

一方、供試体を用いた調査の中で、施工後のコンクリート構造物の材料構成がどのようなものであるか、計画した配合どおりのものであるか否かを把握することは、構造物の管理上極めて重要であるといえる。また、コンクリート構造物中の骨材や空隙などの空間的な分布などを把握することも施工が適切に行われたかどうかを評価するために重要な情報となる。このために、構造物からサンプルを採取して硬化コンクリートの配合推定試験が実施される。

(6) コンクリートの配合推定²⁵⁾

コンクリートの配合推定は、材料構成や材料配合の分析はセメント協会法と呼ばれる方法を中心に、以下に述べるような化学分析法で実施されている。

1) セメント協会法²⁶⁾

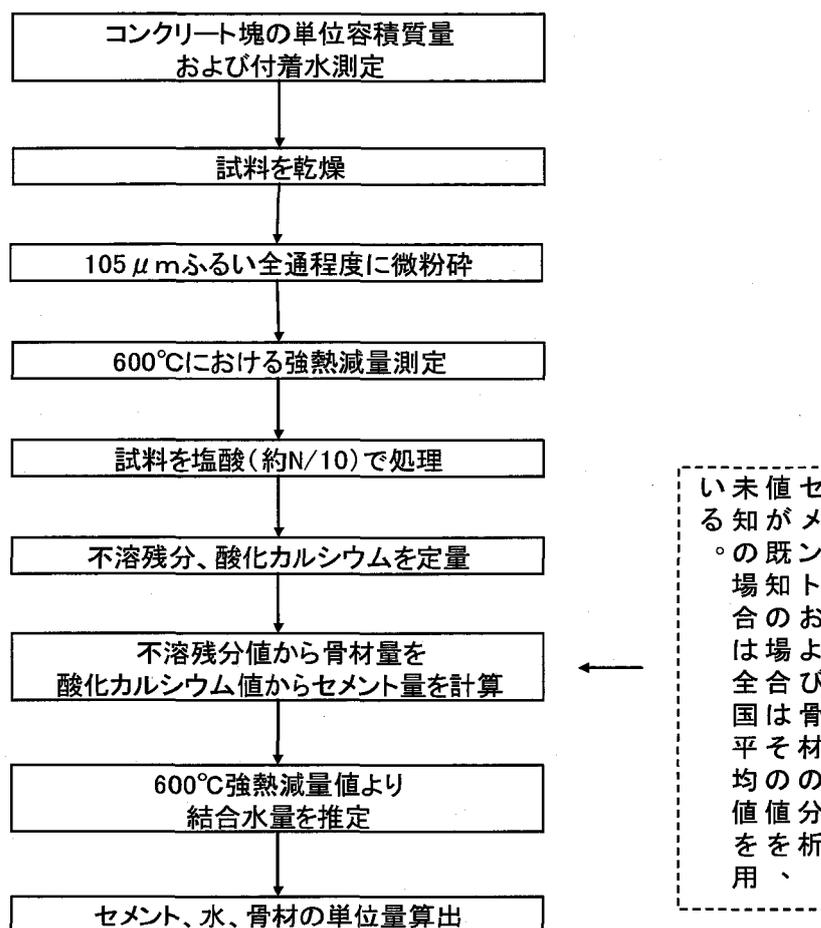
105 μ mふるい全通程度に微粉碎した試料を塩酸(約N/10程度)で処理した後、不溶残分および酸化カルシウムを定量し、これらの値からそれぞれ骨材量およびセメント量を推定する方法である。試験装置等は通常の化学分析に用いられる程度のものであるため、設備上の制約は少ない。ただし、試験実施にあたっては、習熟を要する方法である。本方法のフローを図-1.2に示す。

2) ICPを用いる方法²⁷⁾

セメント協会法は、石灰石骨材や貝殻が混入した海砂を使用したコンクリートに適用すると、セメント水和物中のカルシウムと骨材中のカルシウムを区分できないため、単位セメント量の推定値に誤差を生じる。本ICPを用いる方法は、セメント構成成分中、酸化カルシウムに次いで量が多く、変動の少ない酸可溶性シリカに着目し、誘導結合プラズマ発光分光分析装置(ICP)により測定を行うものである。ただし、キー技術であるICPによる分析に関しては、ICP装置はごく限られた機関しか所有していないため、汎用性に欠ける。

3) グルコン酸ナトリウムを用いる方法²⁸⁾

セメント協会法の欠点である「セメント水和物中のカルシウムと骨材中のカルシウムを区別できないこと」の解消を図った方法であり、グルコン酸ナトリウム溶液を溶解液として採用してい

図-1.2 セメント協会法による配合推定方法²⁶⁾

る。この溶液が貝殻や石灰石骨材に起因する炭酸カルシウムをほとんど溶解せず、セメント分を溶解することを活用したものである。

4) ふっ化水素酸を用いる方法²⁹⁾

試料をふっ化水素酸で完全に分解し、酸化カルシウム量を求める方法で、石灰石骨材を使用した場合にも適用が可能であるとされる。

コンクリートの配合推定法において、ここで述べたセメント協会法を基本とする化学分析法については、以下に述べるような問題点が挙げられる。

- ・ セメント協会法は、セメントがポルトランドセメントで、骨材があまり特殊でないものだけに適用できる。使用セメント・骨材の分析値として全国平均値を用いると、誤差が生じる可能性が高い。
- ・ 石灰石骨材や貝殻を含んだ海砂を用いた場合には、主成分がセメントと同じ酸化カルシウムであるため、セメント協会法は適用できない。

- ・ 配合どおりに製造されたコンクリートであっても、部材中に打込まれると、ブリーディングや粗骨材の分離沈降によりコンクリートの断面における水セメント比の分布が変化する。スラブおよび柱を対象に実施された実験結果³⁰⁾によると、いずれの場合も上層部の水セメント比は配合の値よりも増加し、中間部および下層部では減少する傾向を示している。さらにこれらの現象は、一般に水セメント比が大きいほど顕著になることも報告されている。
- ・ コンクリート構造物中の空隙や骨材などの材料の空間分布は、施工中の分離に起因してばらつきや偏りが生じる。このような空間分布の分析は、コンクリート構造物からのボーリングコアをスライス状に切断した断面の観察などによって実施されているが、コアの切断に多くの時間を要する。

(7) X線 CT法の適用

コンクリート構造物の調査において、コンクリートの配合を推定する方法は、現状化学分析法が用いられており、主成分がセメントと同じ酸化カルシウムである骨材を使用したコンクリートには適用できないことやブリーディングによるばらつきなどを把握できない等の問題点がある。したがって、コンクリートの内部構造を簡易、かつ、高精度に分析することのできる技術が開発されれば、コンクリート構造物の維持・管理における診断の質が飛躍的に向上すると考えられる。

物体の内部構造を可視化することが可能な装置のひとつにX線CT装置がある。この装置は、医療分野で広く世界に普及し、現代医療で欠かすことのできない重要なツールとなっている。X線CT装置は非破壊試験装置であり、短時間で高精度に人体内部の鮮明な画像を得ることができるとともに、患者の負担を軽減させるとともに、医療診断の質を向上させている。このような優れた機能を有するX線CT装置をコンクリート構造物の診断に利用することができれば、材料構成、材料配合、材料の空間分布などのコンクリートの内部構造を簡易、かつ、高精度に分析することが可能と考えられる。また、X線CT法は画像を直接目で見て判断することができることが優位な特徴であり、信頼性が高い診断方法として期待ができる。

X線CT法を用いたコンクリートの研究はこれまであまり実施されていないのが現状であり、適用性についての議論もほとんどなされていない。これまでの数少ない研究にはマイクロX線CT装置による微細構造や破壊メカニズムの研究などがあるが、特に産業用X線を用いた研究は世界的にみてもほとんど例がない。

X線CT法でコンクリート供試体を調査することにより、内部を目視で調査、定性評価できるとともに、X線吸収係数であるCT値を用いることによって、まず、コンクリートの約7割を占め、コンクリートに大きな影響を及ぼす骨材に関する情報、すなわち骨材の形状や粒径、配置状況、骨材率などが評価できる。次に、空隙に関する情報として、空隙の分布状況、空隙率などを評価することによってブリーディングなどの施工状況の把握が可能となる。さらに、モルタルの密度に関する情報の定量的な解析によりコンクリートの水セメント比などの配合を評価できる可

能性がある。このほか、ブリーディングの発生状況の把握、亀裂解析の技術によって破壊のメカニズムを解明、水の浸透の解析を行うことなども可能となると考えられる。

このように、コンクリートのような複合材料を構成する材料の種類やその割合を検査することは、その劣化原因や物性評価を行う手段となり、X線CT法をコンクリート診断に適用する有効性が期待される。適用にあたっては、医療分野のように膨大な量の診断例もなく、適用方法についてはX線CT法の基礎的な部分も含めてCT画像の特徴などを理解し、把握しておく必要がある。同時に、コンクリートの特性を理解しつつ適切な方法を用いないと、誤った判断をしたりする原因になることも考えられる。特に、CT値を用いた数値解析による物性の定量評価を行う場合には、CT画像の目視診断などと併せて評価を行うなど、注意が必要である。

1.2 研究の目的

産業用X線CT装置を用いてコンクリートの内部物性の評価を実施した例は世界でも少なく、その適用性の有効性についても未知な部分が多い。しかし、X線CT法により、コンクリートの内部を3次的に可視化し、かつ定量的にこれを評価することは大きな意義があると考えられる。

本研究の目的は、これまであまり用いられてこなかったX線CT法をコンクリート診断へ適用することである。このために、まずX線CT法をコンクリート供試体に適用する際の特有の留意事項や配慮について検討するための基礎的な試験を行なう。次に、X線CT法でコンクリートの構造特性を評価し、配合推定などを実施する際には、コンクリートの構成材料である骨材やモルタル、空隙を適切に評価することが必要となるが、そのためにコンクリートの材料構成を定量化する方法の開発を行い、適用性の確認と妥当性の検討を行なう。最後に、具体的な実施例として、コンクリート構造物の施工に関する品質評価や既設コンクリート構造物の総合的な診断を実施して、X線CT法の適用性や有効性の確認を行なう。

1. 3 本論文の構成

本論文は本章第1節と2節で述べたことを背景や目的として、X線CT法をコンクリート診断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、既往の研究、X線、X線CTの歴史を概観するとともに、最近の研究成果、特に、コンクリート工学におけるX線CT法の適用についてまとめている。

第3章では、X線CT法をコンクリートに適用するにあたり、基本事項について検討している。具体的には、X線やX線CT法の基本的な概念、画像の構成方法、本研究で用いたX線CT装置やコンクリート供試体のX線CT画像についてその特徴や留意点をまとめ、最適撮影条件について論じている。

第4章では、コンクリートを構成する各材料の定量化方法を開発している。具体的には、撮影された断面画像の画像処理により各材料の境界CT値（しきい値）を適切に設定することが重要であると論じ、材料の境界CT値を評価する方法として、CT値のヒストグラムから特徴点を抽出する方法と供試体とともに撮影するファントムによるしきい値決定法とを用いる材料構成定量化法を開発している。

第5章では、提案した材料構成定量化法の有効性を検討している。具体的には、硬化コンクリート供試体に材料構成定量化法を適用し、骨材、モルタル、空隙を精度よく評価することができることを明らかにするとともに、コンクリート内のモルタル平均CT値から水セメント比および単位セメント量の評価が可能であること、骨材の粒度分布の評価が可能であることなどについて論じている。

第6章では、施工時におけるコンクリートの品質評価に対するX線CT法の適用について検討している。具体的には、RCD工法で施工されたコンクリートダムから採取したコアの材料構成分布を分析し、骨材の分布状況やブリーディングの状況、空隙の特徴などが定量的に分析できることを明らかにするとともに、X線CT法のコンクリートの品質評価への適用性について論じている。

第7章では、既設コンクリート構造物に対するX線CT法の適用について検討している。具体的には、築後70年と100年以上経過した構造物から採取されたコアにX線CT法を適用し、空隙の分布状況、骨材の分布特性、水セメント比や単位セメント量を評価するとともに、材料や配合が全く未知であるコンクリートの圧縮強度の予測が可能であると論じている。

最後に、第8章では各章において得られた成果を総括している。

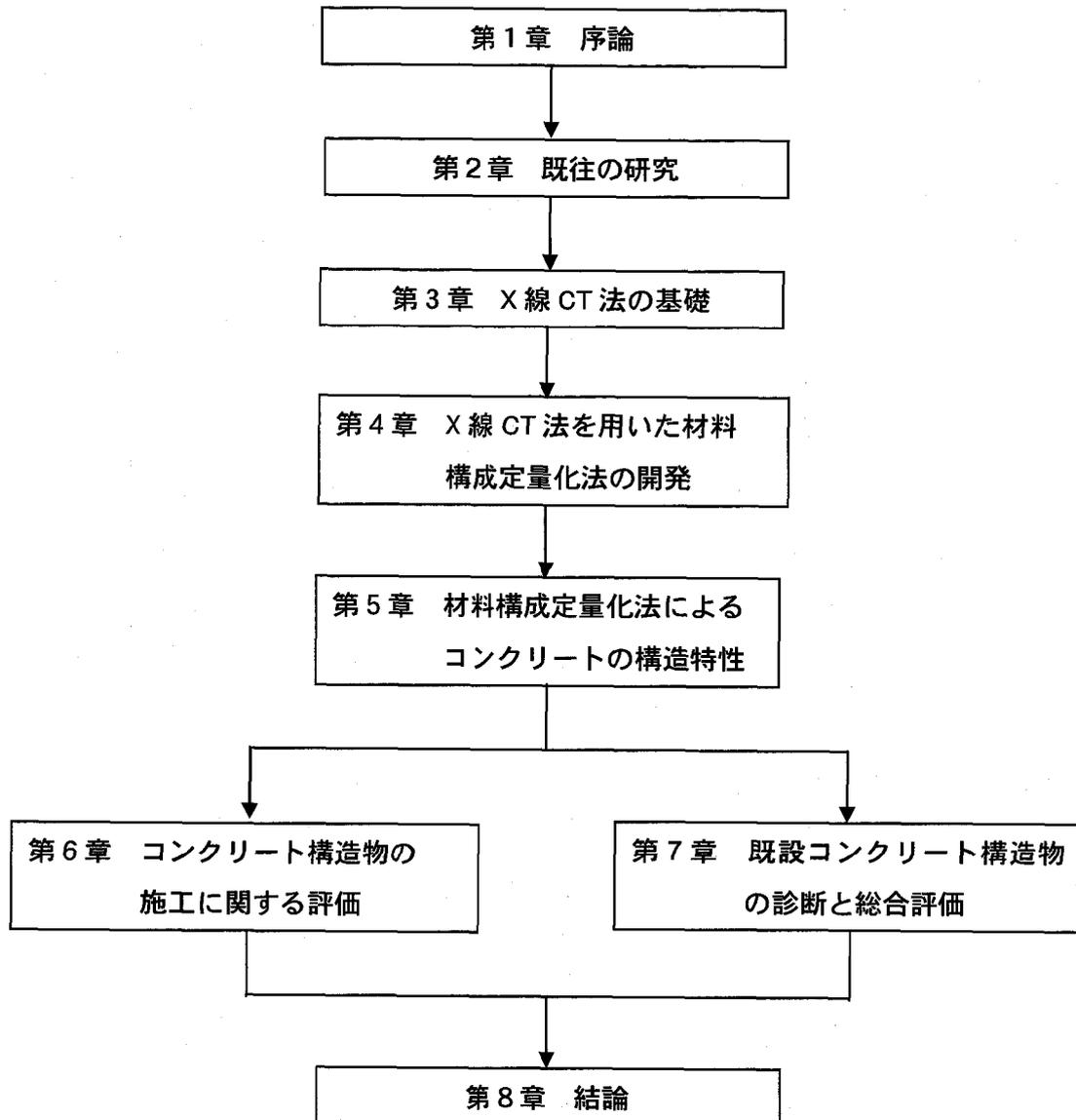


図-1.3 論文の構成

【参考文献】（第1章）

- 1) 加藤誠軌, “X線で何がわかるか”, 内田老鶴圃, 1990
- 2) 岩井喜典, “CT スキャナ”, コロナ社, 1979
- 4) Avinash C. Kak and Malcolm Slaney, “Principles of Computerized Tomographic Imaging”, Published under the sponsorship of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1987
- 5) 久保司郎, “逆問題”, 倍風館, 1992
- 6) 岡本良夫, “逆問題とその解き方”, オーム社, 1993
- 7) 藤井正司, “産業用 CT の進歩とリバースエンジニアリング”, 非破壊検査, 48 (9), pp.296-301, 1999
- 8) 藤井正司, “CT を利用したリバースエンジニアリング”, 非破壊検査, 50 (11), pp.698-703, 2001
- 9) 西沢修ほか, “X線 CT による地球科学試料の内部構造分析とその応用”, 地質調査所月報, 第46巻, 第11号, pp169-220, 1993
- 10) Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M., & Mazeroll, F. “Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography”, *Geotechnique* 46, No.3, pp.529-546.
- 11) K.Sugawara, Y.Obara, K.Kaneko, K.Koike, M.Omi and T.Aoi, “Visualization of Three-Dimensional Structure of Rocks Using X-ray CT Method”, *Proc. of the 1st ARMS*, Vol.2, Seoul, Korea, pp.769-774, 1997.
- 12) J.Otani, Y.Obara and T.Mukunoki “Characterization of failure in soils using X-ray CT Scanner”, *Proc. of Int.symp.on Deformation and progressive failure in geomechanics*, 311-314, 1997.
- 13) T.Mukunoki, J.Otani, Y.Kikuchi, “Evaluation of engineering property of in-situ light-weight soil using X-ray CT scanner”, *Proc. of Xsecond Japan-China joint Symposium on Recent development of theory and practice in geotechnology*, pp.292-299, 1999.
- 14) 菅原勝彦, 佐藤晃, 尾原祐三, 柳迫将秀, “X線 CT による岩石の透水係数の測定”, *資源と素材*, Vol.115, No.11, pp.803-808, 1999
- 15) 菅原勝彦, 小島隆輔, 尾原祐三, 佐藤晃, 島田英樹, “X線 CT による亀裂開口解析”, *資源と素材*, Vol.114, No.12, pp.881-887, 1998
- 16) Sato, A., Suzuki, Y., Fukahori, D. and Sugawara, K., "Evaluation of crack opening in the heterogeneous materials by X-ray CT" *Shigen-to-Sozai*, Vol.120, No.9, pp.493-499. 2004.
- 17) 日本コンクリート工学協会, “コンクリート診断技術 基礎編”, 2002
- 18) 小林一輔, “コンクリートが危ない”, 岩波新書, 1999
- 19) 土木学会, “コンクリート標準示方書 維持管理編”, p.12, 2007
- 20) 土木学会, “コンクリート標準示方書 維持管理編”, p.37, 2007

- 21) 土木学会, “コンクリート標準示方書 維持管理編”, p.47, 2007
- 22) 土木学会, “コンクリート標準示方書 維持管理編”, p.38, 2007
- 23) 小林一輔, コンクリート採取によるコンクリート構造物の劣化診断法, 森北出版, 1998
- 24) 魚本健人監修, 加藤佳孝, 非破壊検査研究会編著, コンクリート構造物の検査・診断—非破壊検査ガイドブッカー, 理工図書, 2003
- 25) 日本コンクリート工学協会, “コンクリート診断技術 基礎編”, pp.134-136, 2002
- 26) セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-18, “硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験結果”, 1967
- 27) 吉田ほか, “石灰石骨材を使用した硬化コンクリートの中のセメント量推定方法”, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.347-352, 1990
- 28) 笠井ほか, “グルコン酸ナトリウム溶液による硬化コンクリート中のセメント量判定試験方法の提案”, 第44回セメント技術大会講演集, pp.328-333, 1990
- 29) 河合ほか, “硬化コンクリート中のアルカリ量の推定に関する研究”, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.92, No.1, pp.651-656, 1987
- 30) 神田ほか, “コンクリート打込み後の部材断面における水セメント比の分布性状”, セメント・コンクリート, No.357, pp.38-43, 1976

2章 既往の研究

2.1 X線の歴史^{1), 2), 3), 4)}

1895年10月、南ドイツのヴュルツブルグ大学の物理学教授であったレントゲン(W.C.Röntgen, 1845-1923)博士は、実験中に覆われたクルークス型放電管から数メートル離れた白金シアン化バリウムのスクリーンが光っていることを発見した。さらに放電管とスクリーンの間に物体を入れるとスクリーンにその影が写ることを発見した。X線を発見した彼は、その成果を同年11月のヴュルツブルグ物理学・医学会に報告し、翌年1896年1月13日にはドイツ皇帝の前でX線の実験を行った。X線は世界中の誰一人として想像することも予見することもできなかったものであり、偶然の大発見といえる。当時は不明な放射線であったことからX線と呼ばれた。

1910年代には、M.von LaueによってX線回折現象が発見され、ブラッグ親子(W.H.Bragg, W.L.Bragg)らによってX線による結晶構造の学問分野が確立した。また、特性X線が英国のC.G.Barklaによって発見された。M.von Laueは1914年に、W.H.BraggとW.L.Braggは1915年に、C.G.Barklaは1917年にそれぞれノーベル物理学賞を受賞しており、当時の先端的な研究であったことがわかる。

1936年には、X線回折や電子線回折による分子構造の研究を行った、オランダ生まれのP.J.W.Debyeにノーベル化学賞が贈られた。

1960年代には、M.F.Perutz, J.C.Kendrewによる球状たんぱく質の構造解析、F.H.C.Crick, J.D.Watson, M.H.F.WilkinsによるDNAの構造解析、D.C.Hodgkinによる生体物質の分子構造解析というノーベル賞受賞の研究が行われた。

1980年代は、世界各地で建設された放射光(SOR)設備を利用した放射光蛍光X線分析という新しい応用分野に若い研究者が目を向け、極微量分析などの成果を上げている。1980年代後半からは、半導体検出器を利用した卓上型の小型な蛍光X線分析装置が普及し、2003年以降は欧州有害物質規制対応で電子機器部品業界に相当台数が導入され注目を浴びている。



写真-2.1 レントゲン博士⁶⁾

2.2 X線CTの歴史

X線CT装置は、測定する物体に多くの異なる方向からX線を照射して物体のX線吸収率を測定し、コンピューターによって画像を再構成して物体の2次元断面像を得る装置である⁵⁾。

その基本原理の数学的証明は1917年オーストラリアの数学者J.Radon⁷⁾によって発表されたが、実用化されるためにはコンピューターの普及を待たなければならなかった。X線CT装置は英国のEMI社の中央研究所に勤めていたG.N.Hounsfield⁸⁾によって発明された。1972年に世界で初めてEMI社から発売され、1979年にG.N.HounsfieldとA.M.Cormackは、ノーベル生理医学賞を受賞した。装置は手術なしで頭内部を鮮明に観察できると言うことで高く評価され、瞬く間に全世界に普及した。日本では、1975年に始めて頭部用CT装置が東京女子医大に納入されたが、当初は撮影に数分の時間がかかり、呼吸等で動きのある腹部には適用でなかったが、研究開発が行われ、1978年には国産初の全身用CT装置「TCT-60A」が国立がんセンター設置された⁹⁾。

X線CT装置は開発されて30年以上になるが、今や世界中に普及し、医療分野の画像診断では誰もが馴染みがあり、偉大な貢献をしているといえる。特に、近年のX線CT装置の進歩には目覚ましく、ヘリカルスキャン、リアルタイムヘリカル、マルチスライスCTと、装置の進歩は加速を続けている。

産業用のX線CT装置は近年開発され、各産業の分野で使用されているが、あらゆる対象に適用可能なCTはない。例えば、自動車のエンジン周りのアルミニウム鋳物などを対象とする金属構造工業用X線CTの分解能は数百 μm であり、一方、半導体、プリント基板等の電子部品を高分解能でスキャンするマイクロフォーカスCTの分解能は数 μm である。このように、用途に合わせた産業用X線CT装置が開発されている。



写真-2.2 G.N.Hounsfield氏¹⁰⁾

2.3 X線CTの地盤材料への適用

地盤工学において、X線CTが最初に適用されたのは土質工学が中心であった¹¹⁾。これらの研究では土質材料の間隙や密度分布を評価したり、乾燥砂に対して水の浸透現象を可視化したりしている^{12), 13)}。

国内では医療用X線CT装置を用いて地盤内部の可視化および物性の定量的な評価を行う研究が実施された。中山¹⁴⁾らおよび池原¹⁵⁾は、医療用X線CT装置を用いて地盤内部の可視化および物性を定量的に評価する研究を行った。また、土の変形挙動を定量的に評価することを試みた研究として、フランスのDesrues et al. (1996)の研究¹⁶⁾がある。彼らは、医療用X線CT装置と三軸圧縮試験装置を組み合わせた実験を行い、ひずみの局所化は試験条件に依存すること、供試体の相対密度が高い状態と低い状態では異なる局所傾向を示すことを述べている。Desruesらの実験方法は、載荷試験と非破壊検査を同じ位置で実施する理想的な方法を探っているが、工学材料に対して医療用X線CT装置を利用しているため、画像の解像度が低く、明確なせん断帯の観察が得られていない。

この他に医療用X線CT装置を用いた例として、谷と上田¹⁷⁾は断層模型実験へ適用した研究を行い、せん断帯の発生機構について考察を行った。西澤¹⁸⁾らは岩盤材料の内部の構造を三次元的に評価し、X線CT装置の適用の有効性を示唆した。また、Kurse & Bezuijnen¹⁹⁾は遠心力載荷の空洞模型実験で破壊領域を分析した。X線CT装置を用い、載荷に伴う土の破壊現象を可視化した研究は国内外を問わず少ないといえる。

研究が実施された当初は産業用のX線CT装置が普及する前のことであり、これらの研究は医療用のX線CT装置を使用していた。このため、X線発生起電圧が小さく、地盤材料を十分に透過可能なエネルギーを持ったX線を発生させることが出来なかったため、地盤材料の内部物性の工学的評価は困難であった^{20), 21)}。

医療用よりX線発生起電圧が大きい産業用X線CT装置を用いた先駆的な研究としては、石油公団でボーリングコアの内部を可視化し、柱状解析を行った荻原と難波の研究²²⁾、岩石内亀裂の開口幅の評価法（亀裂投影法）を提案したSugawaraらの研究²³⁾、乾燥岩石内への水の浸透を可視化した菅原らの研究²⁴⁾などが挙げられる。

2001年には、椋木が地盤工学に関するX線CT法の適用について総括的な研究²⁵⁾を発表した。研究では、産業用X線CT装置を用いて種々の地盤材料を対象に、地盤物性の定量評価を行い、地盤の破壊挙動を非破壊かつ3次元的に可視化してその定量的評価を行うことによって、地盤工学におけるX線CT法の有効性を論じている。

2.4 GeoX シンポジウムにおける研究成果

1996年に産業用X線CTスキャナ(TOSCANER 23200mini)を導入した熊本大学が中心になって、X線CT法の岩石への適用に関する全国的な研究集会が定期的で開催された。その成果をベースとして、第1回 International Geo-X シンポジウムが2003年11月に熊本で開催された。この会議の論文集、X-ray CT for Geomaterials - Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara には、砂、コンクリートおよび岩石にX線CTを適用した事例が数多く収録されている。

この中では特に、亀裂の可視化について論じた論文の数が多い。たとえば、画像間差分による亀裂投影法の高精度化を提案した Sato らの研究²⁶⁾、亀裂投影法による貫通亀裂幅の測定法を提案した Yoshino らの研究²⁷⁾、模型のX線CT可視化実験により、長壁式採掘のピラーの破壊と開口亀裂の進展を分析した Sellers らの研究²⁸⁾、石炭試験片の1軸圧縮破壊の損傷構造分析にX線CTを適用した Dai らの研究²⁹⁾、秋吉大理石の3次元X線CT画像により1軸圧縮降伏後の破断面形成を分析し、内部損傷の局所化と横ひずみの相関性を明らかにした Murata らの研究³⁰⁾、封圧試験における多孔質砂岩のひずみの局所化と破壊を可視化した Besuelle の研究³¹⁾、凍結融解試験で泥岩に発生する微小亀裂を可視化し、凍結融解のサイクルと亀裂開口量の関係を分析した Rodriguez-Rey らの研究³²⁾、マイクロフォーカスX線CTを用いて、花崗岩内の先在微小亀裂の封圧による閉口の可視化に挑戦した Takemura らの研究³³⁾、岩盤緊結工法のロックボルトやケーブルボルトを引き抜く際に、岩盤とボルトの間のモルタルに生じる曲面状亀裂を3次元的に分析し、ボルト形状の影響を明らかにした Ito らの研究³⁴⁾、などが挙げられる。このほか、透水現象に関する Sugawara らの研究^{35), 36)}、ガスハイドレイトに関する Okui らの研究³⁷⁾、岩石の風化過程に関する Koike らの研究³⁸⁾などがある。これらの研究は、岩石力学におけるX線CT法の有効性と将来性を明らかにしている。

第2回 International Geo-X シンポジウムは2006年10月にフランスの Aussois で開催された。この会議の論文集：Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, edited by J. Desrues, G. Viggiani and P. Besuelle には、X線CTの世界的普及を反映して、密度構造変化を伴う多様な工学的事象に関する多数の研究論文が収録されている。泥岩の3軸圧縮試験におけるひずみの局所化と破壊面形成を系統的に分析した Besuelle らの精力的な研究³⁹⁾など、マイクロフォーカスX線CTによる微細構造分析の事例が数多く報告された。透水現象の可視化に関しては、深堀らのトレーサー法の提案⁴⁰⁾、ベントナイトと石英の混合体の透水性に関する Kawaragi らの研究⁴¹⁾、アスファルトの透水性を検討した Kutay & Sydilek の研究⁴²⁾、高温環境での透水可視化システムの開発について論じた Okabe らの研究⁴³⁾、花崗岩の貫通飽和亀裂内でのトレーサーの分散を分析した Sato らの研究⁴⁴⁾などが収録されている。

第1回と第2回の International Geo-X シンポジウムを比較すると、医療用X線CTから産業用X線CTへ、さらにマイクロフォーカスX線CTへ、そして、現在は、シンクロトロン⁴⁵⁾を利用するナノCTへと、研究の流れは微細構造分析に向かっていることがひとつの特徴である。

2. 5 コンクリート工学への X 線 CT 法の適用

X 線 CT 法をコンクリート工学に適用した例はまだ少ない。

Landis et al.^{46), 47), 48), 49)}はマイクロフォーカス X 線 CT 装置により高解像度の 3 次元撮影技術を用いて一軸圧縮状態にあるモルタル円柱供試体の内部クラックの進展を研究した。繰返し载荷を行い、X 線 CT 画像からクラックの面積を求め、破壊エネルギーとの関係を明らかにした。

同様なコンクリートの载荷時の挙動に関する研究では、R.C.K.Wong ら⁵⁰⁾により、空隙の評価が X 線 CT 撮影によって検討されている。

コンクリートは微細な空隙を多く含んでいる多孔質な材料であるが、微細な空隙による細孔構造の把握の試みとして、Landis ら⁵¹⁾はマイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いて空隙の大きさや分布を把握することを試みた。

E.Gallucci ら⁵²⁾は、Swiss Light Source のシンクロトロン MS-X04SA を用いて 1 日目から 60 日目までのセメントペーストの硬化状況を研究した。そして、セメント硬化の過程にあるセメント粒子や空隙について 3 次元的に定量的かつ形態的に調査を行い、硬化の過程を明らかにした。

T.J. Chotard ら^{53), 54)}は、X 線 CT 法を用いてカルシウムアルミナセメントの数分後から数時間後の硬化過程のモニタリングを実施した。その結果、初期の水和過程における X 線吸収率の変化より、定性的かつ定量的な分析が可能であることを示した。

S.T. Erdoğan ら⁵⁵⁾は、マイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いてコンクリート骨材の微粒分の粒子の形状や大きさを 3 次元的に捉えて評価する研究を実施した。ボクセルサイズは $2\mu\text{m}$ であり、レーザー回折による測定などと比較を行ってよい相関を得ている。

また、人見ら⁵⁶⁾は大型放射光施設の Spring8 で実験を行い、モルタル試料に X 線 CT 法を適用し、内部の断面を撮影した。得られた断面画像の評価のため、水銀圧入法により求められた細孔径分布と画像処理で得られた空隙の面積との比較を行い、傾向的に合致する結果を得た。

セメント硬化体への適用の応用例として、高橋ら⁵⁷⁾は建設発生スラッジを用いたファイバー補強セメント安定処理土の耐久性について X 線 CT 法を用いて調べた。乾湿の繰返し試験を行い、ファイバー補強セメント処理土は通常のセメント処理土よりも耐久性があることがわかったが、X 線 CT 画像の解析によって土の保水力は耐久性と関係がなく、ファイバーの絡み合いによって耐久性が増加していることがわかった。

Ala Abbas ら⁵⁸⁾は、10 種類の異なる仕上げを実施しているコンクリート舗装からコアサンプルを採取して、それぞれのコアに対して X 線 CT 装置で撮影を行い、これらを 3 次元構成して舗装表面の形状を評価した。X 線 CT 法で得られた表面形状データを高速フーリエ変換やエネルギースペクトル密度によって解析を行い、定量的な評価を行った。

馬場ら⁵⁹⁾は、スチールファイバー補強コンクリートについて、X 線 CT 法を用いて数値解析をすることによりスチールファイバーの 3 次元配置を推定する方法の研究を行った。

また、平田ら⁶⁰⁾は、骨材の粒度分布を変化させたコンクリートについて、空隙や分離の状況を

X線CT装置で観察し、骨材の粒度分布によってコンクリートの強度やワーカビリティがコントロールできること明らかにした。

X線CT法はコンクリートの調査診断において有効な方法であることが紹介されており^{61), 62), 63)}, コンクリート柱などについて、配筋、空洞、ひび割れなどの躯体断面位置や立体表示が可能となることから、その有用性は限りなく期待されているといえる。しかしながら、現場で装置を持ち込んでの調査は、X線透過撮影による調査であっても500mmを超える柱や梁の撮影は現状不可能であり、安全管理や法規制、コスト面での制約からハードルが高いと考えられる。

コンクリートの劣化診断にX線CTを利用した研究では、Stock, S.R.ら⁶⁴⁾によって、硫酸塩によって侵食されるコンクリートの状況が観察された例がある。

このように、X線CT法はコンクリート載荷時のクラックの進展に関する研究のほか、微細構造に関する研究、特殊コンクリートの物性に関する研究などが多い。しかし、X線CT法の特徴として、コンクリートの密度分布に関する情報が得られるという特徴に注目し、コンクリートの構造特性の評価を行った研究は少ない。

【参考文献】 (第2章)

- 1) 山崎岐男, “レントゲンの生涯－X線発見の栄光と影”, 富士書院, 1986
- 2) 加藤誠軌, “X線で何がわかるか”, 内田老鶴圃, 1990
- 3) MSユニバーサルウェブサイ​​ト (http://www1.bbweb-arena.com/msjpcscd/msusjp_147.htm)
- 4) フリー百科事典“ウィキペディア (Wikipedia)” (<http://ja.wikipedia.org/wiki/ノーベル賞>)
- 5) 岩井喜典, “CTスキャナ”, コロナ社, pp.1-186, 1979
- 6) ヴェルツブルク大学ウェブサイト (<http://www.uni-wuerzburg.de/>)
- 7) J.Radon, “Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten”, Berichte Schsische Akademie der Wissenschaften 69, pp.262-267, 1917.
- 8) G.N.Hounsfield, “A method of and apparatus for examination of a body radiation such as X or Gamma-Radiation, British Patent No. 1283915, 1972
- 9) 辻岡勝美, “X線CT装置の歴史”, 日本放射線技術学会雑誌, 第58巻1号, 2002年1月, p.68.
- 10) 東芝ホームページ (<http://kagakukan.toshiba.co.jp/history/1goki/1978ct/index.html>)
- 11) S.H.Anderson and J.W.Hopmans, “Tomography of Soil-Water-Root Processes”, Proc. Of a symposium sponsored by Division S-1 and S-6 of the Soil Science Society of America in Minneapolis, Minnesota, 1992
- 12) L.A.G.Aylmore, “Application of Computer Assisted Tomography to Soil-Plant-Water studies: An Overview”, Soil Science Society of America, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. Tomography of Soil-Water-Root Processes. SSSA Special Publication no.36, pp7-15, 1994
- 13) Jan W. Hopmans and Milena Cilena Cislerova and Tomas Vogel, “X-ray Tomography of Soil Properties”, Proc. of a symposium sponsored by division S-1 and S-6 of the Soil Science Society of America, in Minneapolis, Tomography of Soil-Water-Root Processes. SSSA Special Publication no.36, pp17-28, 1994
- 14) 中山英樹, 持田文弘, 田中達吉, 田中壮一, “地盤物性評価におけるX線CTの使用例”, 第26回岩盤力学シンポジウム論文集, 土木学会, pp.336-340, 1995
- 15) 池原研, “X線CT装置を用いた地質資料の非破壊観察と測定 (I)”, 地質ニュース 516号, No.516, pp.50-61, 1997
- 16) Desrués, J., Chambon, R., Mokni, M. and Mazerolle, F., “Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studies by computed tomography”, Geotechnique 46, No.3, pp529-546, 1996
- 17) 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回年次学術講演概要集, pp. 1408-1409, (1993).

- 18) 西澤修, 稲角忠弘, 中野司, “X線 CT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, 第46巻, 第11号, pp. 565-642, (1995).
- 19) Kurse, G. A. M. & Bezuijen, A., ”The use CT scans to evaluate soil model”, Proc. of centrifuge '98, Tokyo, Japan, pp. 779-94, (1998).
- 20) D.K.Cassel and D.R.Nielsen, “The Realization of a Dream”, Proc. of a symposium sponsored by division S-1 and S-6 of the Soil Science Society of America, Tomography of Soil-Water-Root Processes. SSSA Special Publication no.36, pp1-5, 1994
- 21) J.S.Steude, F.Hopkins and Jefferey E.Anders, “Industrial X-ray Computed Tomography Applied to Soil Reserch”, Soil Science Society of America, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI53711, USA. Tomography of Soil-Water-Root Processes. SSSA Special Publication no.36, pp29-42, 1994
- 22) 荻原利幸, 難波隆夫, “X線 CT スキャナーによるフラクチャーコアの分析及び流体挙動の数値モデル化”, 地下き裂のキャラクタリゼーション論文集, pp. 30-34, (1990).
- 23) Sugawara, K., Obara, Y. Kaneko, K. Ohmi, M. and Aoi, T, ”Visualization of Three-Dimensional Structure of Rocks Using X-Ray CT Method”, Proc. of the 1st ARMS, Vol.2, Seoul, Korea, pp. 769-774, (1997).
- 24) 菅原勝彦, 尾原祐三, 青井崇浩, 小島隆輔, “X線 CTによる岩石透水現象の可視化”, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 341-346, (1998).
- 25) 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, 2001.3.
- 26) Sato, A., Fukahori, D. and Sugawara, K., “Crack opening analysis by the X-ray CT image subtraction method, X-ray CT for Geomaterials” – Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara, A.A. Balkema Publishers, pp. 247-253, (2003).
- 27) Yoshino, N., Sawada, A. and Sato, H., “An examination of aperture estimation in fractured rock, X-ray CT for Geomaterials” – Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara, A.A. Balkema Publishers, pp. 255-261, (2003).
- 28) Sellers, E. J., Vervoort, A. and Drunmond, M. L., “Insight into pillar failure in experimental samples using CT visualization”, X-ray CT for Geomaterials – Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara, pp. 263-269, (2003).
- 29) Dai, G., Yin, G., Pi, W., Zhu, H. and Xia, C., “Ct real-time analysis of damage evolution of coal under compression, X-ray CT for Geomaterials” – Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara, A.A. Balkema Publishers, pp. 271-279, (2003).
- 30) Murata, S., Saito, T. and Imamura, M., “Lateral displacement and failure of Akiyoshi marble in the post-failure condition observed by X-ray CT”, X-ray CT for Geomaterials – Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara, A.A. Balkema Publishers, pp. 281-286, (2003).

- 31) Besuelle, P., “X-ray Ct observations of strain localization and failure in two porous sandstones”, X-ray CT for Geomaterials – Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara, A.A. Balkema Publishers, pp. 287-292, (2003).
- 32) Rodriguez-Rey, A., Ruiz de Argandona, V. G., Calleja, L., Suarez del Rio, L. M. and Celorio, C., “X-ray tomography characterization of microfissuration on rocks generated by freeze-thaw cycles”, X-ray CT for Geomaterials – Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara, A.A. Balkema Publishers, pp. 293-298, (2003).
- 33) Takemura, T., Oda, M. and Takahashi, M., “Microstructure observation in deformed geomaterials using microfocus X-ray computed tomography”, X-ray CT for Geomaterials – Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara, A.A. Balkema Publishers, pp. 299-304, (2003).
- 34) Ito, F., Aoki, T. and Obara, Y., “Visualization of bond failure in a pull-out test of rock bolts and cable bolts using X-ray CT”, X-ray CT for Geomaterials – Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara, A.A. Balkema Publishers, pp. 305-314, (2003).
- 35) Sugawara, K., Fukahori, D., Iwatani, T., Ikutake, T. and Kubota, S., “Analysis of wetting process of rock by means of X-ray CT”, X-ray CT for Geomaterials – Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara, A.A. Balkema Publishers, pp. 315-334, (2003).
- 36) Sugawara, K., Fukahori, D., Iwatani, and Kubota, S., “Analysis of water flow in rock by a Tracer-aided X-ray CT”, X-ray CT for Geomaterials – Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara, A.A. Balkema Publishers, pp. 335-345, (2003).
- 37) Okui, T., Uchida, T. and Masuda, Y., “Observation of natural gas hydrate dissociation with X-ray CT”, X-ray CT for Geomaterials – Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara, A.A. Balkema Publishers, pp. 347-351, (2003).
- 38) Koike, K., Yoshinaga, T. and Nishiyama, K., “Characterization of weathering process of rocks by X-ray CT and radiance spectra measurements”, X-ray CT for Geomaterials – Soils, Concrete, Rocks, edited by J. Otani & Y. Obara, A.A. Balkema Publishers, pp. 353-361, (2003).
- 39) Besuelle, P., Viggiani, G., Lenoir, N., Desrues, J. and Bornert, M., “X-ray Micro CT for Studying Strain Localization in Clay Rocks under Triaxial Compression”, Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, edited by J. Desrues, G. Viggiani and P. Besuelle, ISTE Ltd, pp. 35-52, (2006).
- 40) Fukahori, D., Saito, Y., Morinaga, D., Ogata, M. and Sugawara, K., “Study on Water Flow in Rock by Means of the Tracer-aided X-rays CT”, Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, edited by J. Desrues, G. Viggiani and P. Besuelle, ISTE Ltd, pp. 288-292, (2006).

- 41) Kawaragi, C., Nakamura, Y., Kashiwaya, K., Kaneko, K. and Yoneda, T., "X-ray CT Observation and Near-Infrared Spectroscopic Measurements of Bentonite-Quartz Mixtures", *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials*, edited by J. Desrues, G. Viggiani and P. Besuelle, ISTE Ltd, pp. 293-299, (2006).
- 42) Kutay, M. E. & Sydilek, A. H., "Accuracy of the Two Common Semi-Analytical Equations in Predicting Asphalt Permeability", *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials*, edited by J. Desrues, G. Viggiani and P. Besuelle, ISTE Ltd, pp. 301-307, (2006).
- 43) Okabe, H., Tsuchiya, Y., Oseto, K. and Okatsu, K., "Development of X-ray CT Coreflood System for High Temperature Condition", *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials*, edited by J. Desrues, G. Viggiani and P. Besuelle, ISTE Ltd, pp. 309-314, (2006).
- 44) Sato, A., Fukahori, D., Sugawara, K., Sawada, A. and Takebe, A., "Visualization of 2-D Diffusion Phenomena in Rock by Means of X-ray CT", *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials*, edited by J. Desrues, G. Viggiani and P. Besuelle, ISTE Ltd, pp. 315-321, (2006).
- 45) Vlassenbroeck, J., masschaele, B., Cnudde, V., Dierick, M., Pieters, K., Van Hoorebeke, L. and Jacobs, P., Octopus 8: "A High Performance Tomographic Reconstruction Package for X-ray Tube and Synchrotron micro-CT", *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials*, edited by J. Desrues, G. Viggiani and P. Besuelle, ISTE Ltd, pp. 167-173, (2006).
- 46) Landis, E.N., Nagy, E.N. Keane, D.T., and Nagy, G., "A Technique to Measure Three Dimensional Work-of-Fracture of Concrete in Compression", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.125 no.6, pp.599-605, 1999.
- 47) Landis, E.N., Nagy, E.N. Keane, "Three-dimensional work of fracture for mortar in compression", *Engineering Fracture Mechanics*, vol.65, pp223-234, 2000
- 48) Landis, E.N., Nagy, E.N. Keane, D.T., "Microstructure and Fracture in Three Dimensions", *Engineering Fracture Mechanics*, vol.70 no.7, pp911-925, 2003
- 49) Landis, E.N., "Damage Variables Based on Three Dimensional Measurements of Crack Geometry", *Strength, Fracture & Complexity*, vol.3 no.2-4, pp.163-173. 2005
- 50) R.C.K.Wong, K.T.Chau, "Evolution of air voids in concrete specimen under uniaxial loading using X-ray computer tomography", *X-ray CT for Geomaterials; Soils, Concrete, Rocks*, pp.223-228, 2003
- 51) Landis, E.N., Petrell A.L., Nagy, E.N., "Examination of pore structure using three-dimensional image analysis of microtomographic data", *Concrete Science and engineering*, Vol.2, pp.162-169, Dec 2000.
- 52) E. Gallucci, K. Scrivener, A. Groso, M. Stampanoni, G. Margaritondo, "3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography (μ CT) ", *Cement and Concrete Research* 37, 2007 pp.360-368

- 53) T.J. Chotard, M.P. Boncoeur-Martel, A. Smith, J.P. Dupuy, C. Gault, "Application of X-ray computed tomography to characterise the early hydration of calcium aluminate cement", *Cement & Concrete Composites* 25, 2003, pp.145–152.
- 54) T.J. Chotarda, A. Smitha, M.P. Boncoeurc, D. Fargeota, C. Gaulta, "Characterisation of early stage calcium aluminate cement hydration by combination of non-destructive techniques": Acoustic emission and X-ray tomography, *Journal of the European Ceramic Society* 23, 2003, pp.2211–2223.
- 55) S.T. Erdoğan, E.J. Garboczi, D.W. Fowler, "Shape and size of microfine aggregates": X-ray microcomputed tomography vs. laser diffraction, *Powder Technology* 177, 2007, pp.53–63.
- 56) 人見尚, 三田芳幸, 斉藤裕司, 竹田宣典, "Spring-8 における X 線 CT 像によるモルタル微細構造の観察", *コンクリート工学年次論文集*, Vol.26, No.1, 2004
- 57) H.Takahashi, *et al*, "A consideration on the durability of fiber-cement-stabilized mud produced from construction sludge", *X-ray CT for Geomaterials; Soils, Concrete, Rocks*, pp.193-198, 2003
- 58) Ala Abbas, M. Emin Kutay, Haleh Azari, "Three-Dimensional Surface Texture Characterization of Portland Cement Concrete Pavements", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 22, 2007, pp.197–209.
- 59) K.Baba, *et al*, "Evaluation of 3-D orientation factor of steel fiber by X-ray CT", *X-ray CT for Geomaterials; Soils, Concrete, Rocks*, pp.207-213, 2003
- 60) A.Hirata, *et al*, "Quality control of the cement concrete by filling of the fine sand to void", *X-ray CT for Geomaterials; Soils, Concrete, Rocks*, pp.215-221
- 61) 社団法人日本コンクリート工学協会, "コンクリート診断技術, 基礎編", 社団法人日本コンクリート工学協会, 2002
- 62) 出海滋, 和泉意登志, 魚本健人, "コンクリート検査への高エネルギーX 線 CT/DR 適用の可能性", *非破壊検査協会, 第3回放射線による非破壊評価シンポジウム講演論文集*, pp132-135, 1999
- 63) 藤井正司, "最近のX投透視技術とその応用ーデジタルラジオグラフィーー", *非破壊検査*, Vol.45, No.10, pp714-719, 1996
- 64) Stock, S.R., Naik, N.K., Wilkinson, A.P. and Kurtis, K.E., "X-ray micro tomography (micro CT) of the progression of sulfate attack of cement paste", *Cement and Concrete Research* vol.32 no.10, pp.1673-1675, 2002.

3章 X線CT法の基礎

3.1 緒言

X線CT法^{1), 2)}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透過した被検体内部の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^{3), 4)}。CTアルゴリズムの先駆はオーストラリアの数学者、Randon (1917)⁵⁾によって示されていたが、X線CTスキャナとして実用化に至るまでには50年の歳月が必要とされた。所要の断面を構成するX線吸収分布に関する多くの情報を記憶・蓄積することから、コンピュータの発達により開発された技術といえる。X線CT法では、物体の密度に比例して対象物体を透過中のX線エネルギーが吸収されるため、X線吸収率の空間分布が求められる。したがって、X線CT法によって物体内部の密度分布を明らかにすることができる。

本章では、X線CT法をコンクリートに適用するにあたり、撮影条件の違いによるCT画像の特徴などについて検討する。このために、X線CT装置の基本的な原理や特徴、画像の構成方法、本研究で用いたX線CT装置について述べるとともに、硬化コンクリート供試体を用いた基礎試験を実施し、撮影条件や供試体寸法が撮影画像に及ぼす影響について検討する。

第2節では、X線CT法の基本となるX線の性質と利用法の概要を述べる。X線の発生からX線の吸収、散乱、減弱などの現象やX線の吸収係数について概説し、X線CT法で用いられるX線透過法における基本的事項について述べる。

第3節では、X線CT装置による画像の構成法について述べる。X線CT装置により再構成される画像はその原理を理解することによってその特徴や留意すべき点が明らかとなる。ここでは画像を補正して再構成するアルゴリズムである「畳込み逆投影法」について説明する。

第4節では、本研究の主たる装置である熊本大学所有のX線CT装置について、仕様や性能などについて述べる。

第5節では、X線CT画像について述べる。X線CT画像で表示される画像はCT値と呼ばれるX線吸収率を表す数値で構成され、密度とは関係が深い。ここでは、物体の同一断面を連続して撮影した画像や複数の断面を撮影した結果について具体例を示す。

第6節では、X線CT法をコンクリート診断に適用するための基礎的な条件を検討する目的で実施した基礎試験についてその方法と結果を述べる。試験は、直径の異なるコンクリート供試体を用い、管電圧や設定スライス厚などの条件を変化させてX線CT撮影を行ない、撮影条件や供試体寸法が撮影画像に及ぼす影響について検討する。

第7節では、本章の結論を述べる。

3. 2 X線の性質と利用法^{6), 7), 8)}

3. 2. 1 X線とは

X線は電磁波の一種である。電磁波とは、空間の電界と磁界がお互いの電磁誘導によって交互に発生する際に発生する電磁場の周期的な変動による波のことで、エネルギー放射現象の一種である。電磁波は、波長の長い方から、電波・赤外線・可視光線・紫外線・X線・ガンマ線などと呼び分けられているが、図-3.1に示すようにX線の波長は $10^{-12} \sim 10^{-8}$ m程度と非常に短い。

X線の基本的な性質には以下のようなものがある。

- ・ 対陰極（陽極）から発散し、対陰極に対しては垂直ではなく、磁界や電解によって曲げられない。
- ・ 結晶に当たると回折し干渉する。
- ・ 光と同じように偏りを示す。
- ・ 物質に当たると電子を出す。
- ・ 光電子のエネルギーは大きく、振動数が大きい。したがって、波長が小さい。
- ・ 化学作用によって写真フィルムに作用する。
- ・ 蛍光作用によってシアン化白金バリウムを塗った蛍光板に当てると蛍光を出す。
- ・ 生理作用によってX線が当たると細胞を破壊する。
- ・ 透過作用があり、X線の波長が短いほど透過し、透過力は物質の密度に反比例する。
- ・ 電離作用があり、X線は気体を電離してイオンとし、気体に電気伝導性を与える。

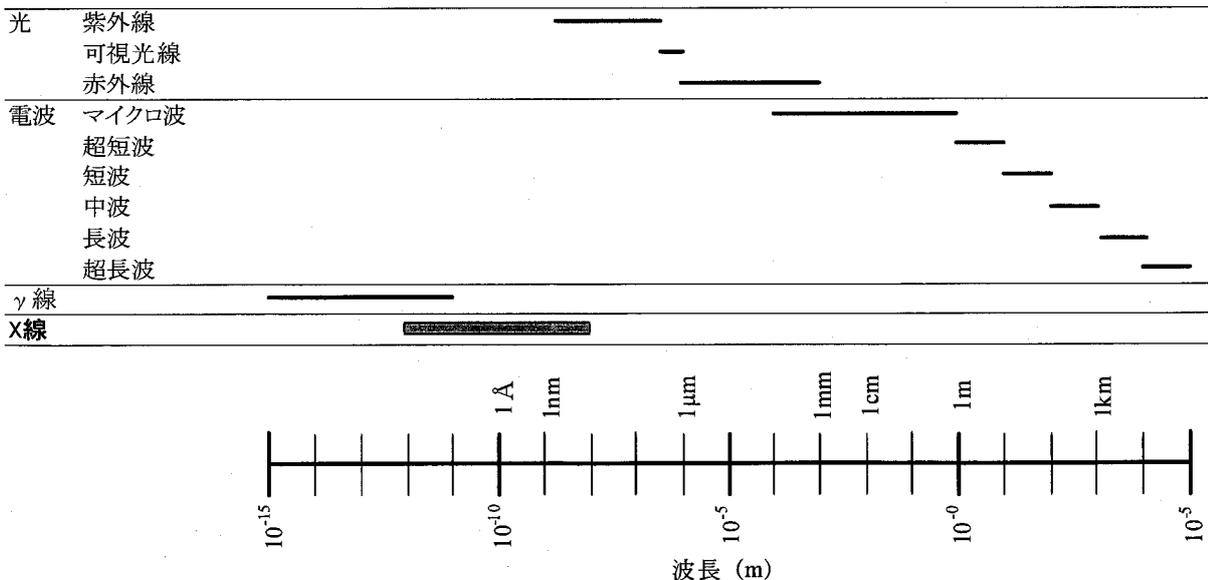


図-3.1 X線の波長

3. 2. 2 X線の発生

X線管の構造を図-3.2に示す。管体の外側はガラスで作られ、内部は電子の運動が自由に行われ、また陽極、陰極が酸化されないように真空中に保たれている。X線を発生させるには、真空中で陰極のコイル状のフィラメントを加熱し、高速度の電子を放射して、これを陽極の銅塊の表面に張付けたターゲットに衝突させる。この時、高速度で運動していた電子は運動を止め、電子の持っている運動エネルギーの一部が変換されて、ターゲットからX線が発生する。その際には電子の運動エネルギーの大部分が熱に変換され、X線に変わるのはわずか数%である。このため、通常のX線管ではターゲットに高融点のタングステンをを使う。また、ターゲット支持体には高熱伝導率の銅を使って高い放熱効率を保ち、絶えず冷却をする必要がある。

焦点は、図-3.2に示すように熱電子がターゲットに衝突してX線を発生した場所をいい、この場所を実焦点という。一方、放射窓側から見たときの焦点を実効焦点といい、見る角度によって形状、大きさが異なる。

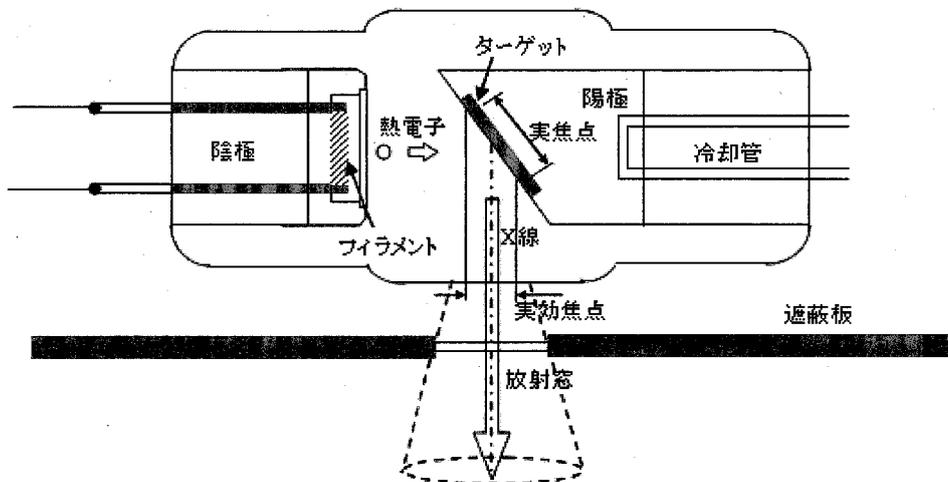


図-3.2 X線管の構造

3. 2. 3 X線の利用法

(1) X線透過法

X線透過法(X-ray radiography)は、本研究で扱うX線CT法の基本となるX線の利用法といえる。X線が物体を透過する能力はX線の波長が短いほど大きい。波長の短いX線を硬いX線、波長の長いX線を軟らかいX線という。また、吸収係数が大きい材料ほど、そして厚い材料ほど吸収が大きい。X線透過法は、これらの性質を利用して各種の組織や欠陥を調べる方法である。

X線透過法ではほとんどの場合に連続X線が使用される。X線管球はタングステン陽極が大部分で、印加電圧が高いほど硬いX線が得られる。生物組織など構成元素の原子番号が小さくて密度の差が小さい場合には軟らかいX線を使用し、地盤材料や金属材料などを調査する際には硬いX線を使用する。

(2) X線回折法

X線は物体によって散乱される。X線回折(X-ray diffraction, XRD)で用いる特性X線の波長は原子の半径と同程度であるから、物体を構成する原子が規則正しく並んでいる場合には、各原子によって散乱されるX線が互いに干渉して回折線が観測される。回折現象は原子の並び方に密接に関係しており、X線回折図形は物体の結晶構造によって決まる。

粉末X線回折法は粉末試料または多結晶試料を用いて測定する方法で、試料についての制限がなく、非破壊的に結晶構造や結晶状態、すなわち原子の並び方に関する何らかの情報が得られるので広く利用されている。粉末X線回折図形は試料の結晶状態によって著しい影響を受けるから、結晶の配向性、結晶子の大きさ、結晶化度、結晶の内部歪などの測定にも用いられる。

(3) X線分光法

いろいろの波長が混ざっているX線を、それぞれの波長成分に分離して測定する方法をX線分光法(X-ray spectroscopy)という。X線を物体に照射すると、物体を構成している各元素に特有な波長の2次X線が発生する。したがって、このX線を分光分析することによって物質を構成している元素の種類を知ることができる。

蛍光X線分析装置は強力なX線を試料に照射して、試料から発生する特性X線を分光して定量する方法である。この方法は濃度が大きい領域でも正確な分析値が得られるという特徴を持っており、セメントや合金鉄の組成分析などに広く用いられている。

X線マイクロアナライザー(XMAまたはEPMA)は微小な電子ビームを試料に照射して、発生する特性X線を分光分析する方法である。電子ビームで試料表面を走査して各元素の2次的分布を知ることができる。

分析電子顕微鏡は電子顕微鏡とエネルギー分散型X線検出器を組み合わせたもので、試料の微構造と同時に各微小部分の組成を知ることができる。

3. 2. 4 連続X線と特性X線

X線管球から発生するX線は、電子の制動放射による連続X線と輝線スペクトルである特性X線とからなる。

(1) 連続X線

X線を分光計に通してみると、図-3.3のように連続波長スペクトルを示す。それぞれの曲線について見ると、ある波長より短い成分はなく、その最短波長より長くなるとしだいに強さが増し、ある波長で最高の波長を示す。さらに波長が長くなると逆に強さが減少する。このように、種々の波長からなる連続波長スペクトルを示す連続X線は白色X線または制動X線ともいう。図-3.3から管電圧の変化によって以下のことがわかる。

- ・ 管電圧が高くなると曲線と横軸で囲まれた面積が大きくなる。この面積はX線の全強度を表すことから、X線の全強度は管電圧の値の増大と共に急速に増大する。
- ・ 曲線の頂点の位置はX線の最高強度を示す波長を表し、管電圧が高くなるほど波長の短い側に移動する。
- ・ それぞれの管電圧における最短の波長を λ_{\min} とすると、管電圧が高くなるほど短い側に移動する。

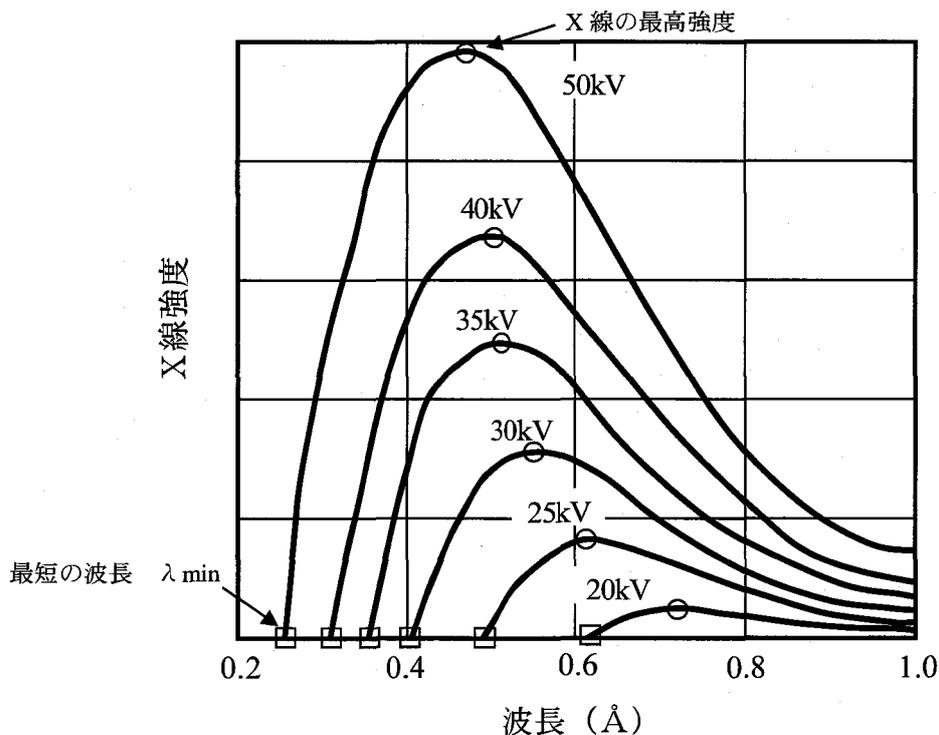


図-3.3 連続X線の波長スペクトル

(2) 特性X線

特性X線は、図-3.4に示すようにX線と物質の相互作用によって発生する。電子がターゲットに衝突すると、陽電極中の原子の原子核に近い電子にエネルギーを与えてこれを原子の外に飛び出させ、光電子が失われると電子殻に孔ができるので、これを埋めるために外側の電子が移動してきて特性X線が発生する。

図-3.5は、モリブデンをターゲットとしたX線管から発生したX線の波長スペクトルを示す。連続X線の連続スペクトルの中に波長 0.71\AA と 0.63\AA の位置に2本のピークが現われる。さらに、精度の高い分光計にかけると $K\alpha$ は2本の線、 $K\alpha_1$ と $K\alpha_2$ が現われる。これらの線スペクトルの波長は、管電圧を変えても変化せず、モリブデンに特有なものなので、特性X線と呼ばれる。特性X線はその金属に固有な波長なことから、固有X線または示性X線とも呼ばれる。

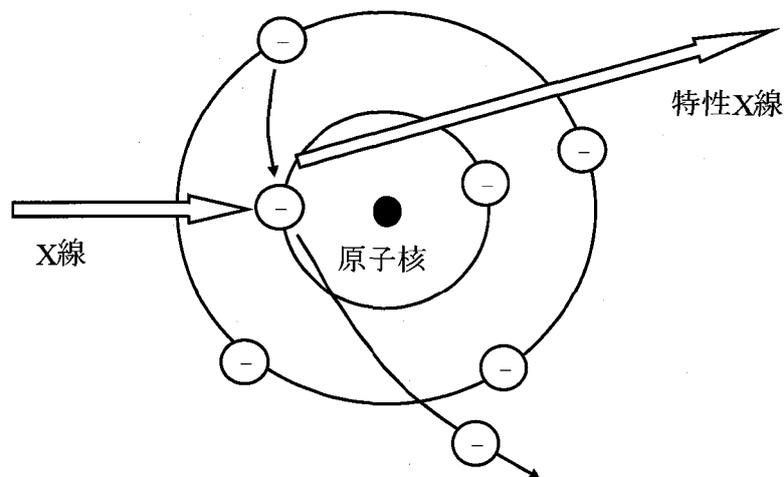


図-3.4 特性X線の発生

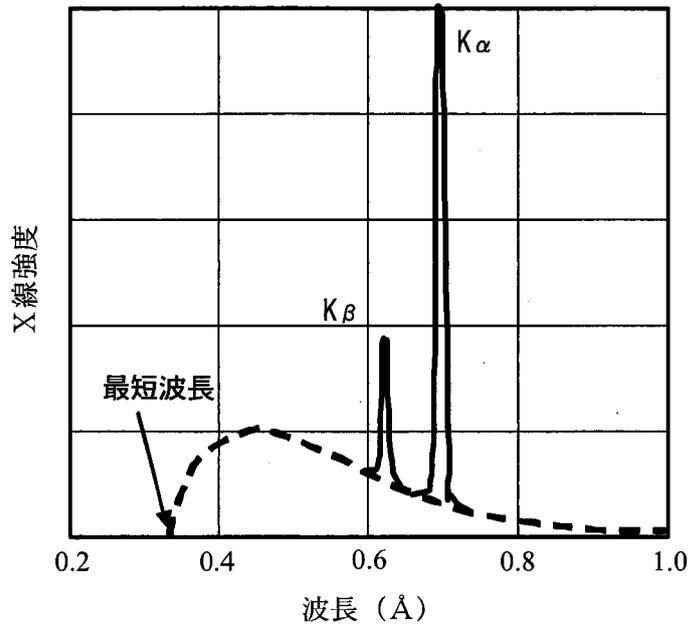


図-3.5 特性X線の波長スペクトル

3. 2. 5 X線の線質

X線の線質とは、可視光線という青や赤という色に相当する。光は目で区別することができるが、X線は目に感じないので、物質を透過しやすいか、あるいはしにくいかの程度によって線質を表す。線質を定性的に表すには、物質を透過しやすいX線を「硬い」X線、透過しにくいX線を「軟らかい」X線という。表-3.1にX線の線質の表し方を示す。

半価層とはある物質にX線を透過して、その強さが半分に減ったときのその物質の厚さのことである。また、実効エネルギーは連続X線の線質を表し、波長とは反比例の関係にある。

表-3.1 X線の線質の表し方

	透過力	半価層	波長	実効エネルギー
硬いX線	強い	厚い	短い	高い
軟らかいX線	弱い	薄い	長い	低い

3. 2. 6 X線の吸収と散乱

X線が物体を通過するときは、図-3.6のような現象によって、X線は減弱する。透過装置で必要なものは直進する透過X線のみであり、CT装置でもこの減弱したX線量を計測し、その線量をA/D変化後にデジタル断面画像として再構成する。減弱の作用として、以下に概要を述べる。

(1) 光電効果

光電効果は、X線の光子が原子の原子核に近い電子エネルギーを与えてこれを原子の外に飛び出させ、光子自らはエネルギーを失って消滅してしまう現象である。この現象を光電吸収ともいう。これによって放出される電子を光電子といい、光電子が失われると電子殻に孔ができるので、これを埋めるために外側の電子が移動してきて特性X線が発生する。このように、特性X線は電子を照射することによって発生するばかりでなく、X線を照射することでも発生する。

(2) 弾性散乱（トムソン散乱）

X線の光子が原子と弾性的に衝突して、光子の運動の方向が変わる現象をいう。このとき、光子は電子にエネルギーを与えないので、X線光子のエネルギーも変わらない。よって、弾性散乱によってX線の線質は変化しない。

(3) 非弾性散乱（コンプトン散乱）

非弾性散乱とは、X線の光子が原子と衝突して電子を原子の外に飛び出させ、自らは運動の向きを変える現象をいう。この電子のことを反跳電子というが、この電子を生み出すためにエネルギーが必要となることから、その分だけ光子のエネルギーが減少する。

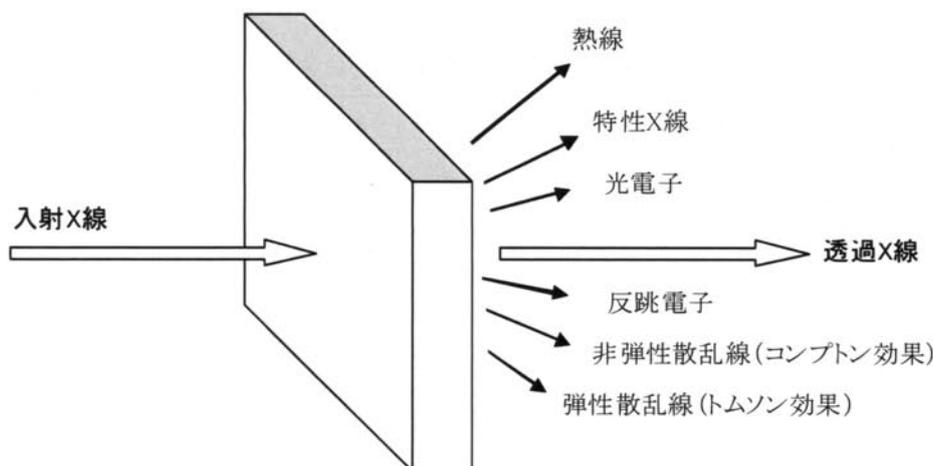


図-3.6 X線の透過と相互作用

3. 2. 7 X線の減弱と吸収

X線が物質を透過した後のX線の強度は、図-3.7に示すように、物質の厚さが増すほど現象する。この物質透過後のX線強度 I は次に示す指数関数で表すことができる。

$$I = I_0 e^{-\mu T} \quad (3.1)$$

ここに、

I : 物質を透過後のX線強度

I_0 : 物質を透過前のX線強度

μ : 吸収係数

T : 物質の厚さ (X線が透過した距離)

また、 $I/I_0 = y$ と置き、両辺の対数をとると、以下のように表せる。

$$\log_e y = \log_e e^{-\mu T} = -\mu T \quad (3.2)$$

よって、物質の厚さ T は次式で表せる。

$$T = -\frac{1}{\mu} \log_e y \quad (3.3)$$

X線がある物質を透過してその強さが半分に減る厚さを半価層 $T_{0.5}$ とすると、

$$T_{0.5} = -\frac{1}{\mu} \log_e \frac{1}{2} = -\frac{1}{\mu} \cdot (-0.693) = \frac{0.693}{\mu} \quad (3.4)$$

となり、実験で $T_{0.5}$ を求めれば、 μ を計算できる。

一方、図-3.8に示すように被検体の物質が均質でない場合には、位置 s における線減弱係数を $\mu(s)$ とすると、式(3.1)は次式のようなになる。

$$I = I_0 \exp \left[\int_{-\infty}^{\infty} \mu(s) ds \right] \quad (3.5)$$

ここで、式(3.1)の両辺を整理し、対数をとると投影関数 p に関する次式が得られる。

$$p = -\ln(I/I_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu(s) ds \quad (3.6)$$

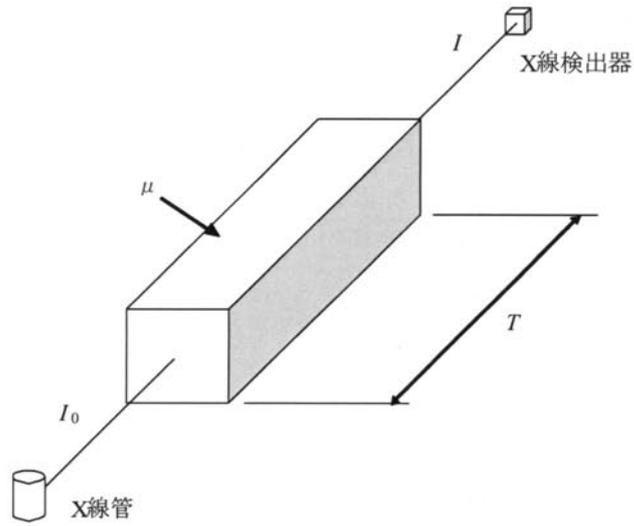
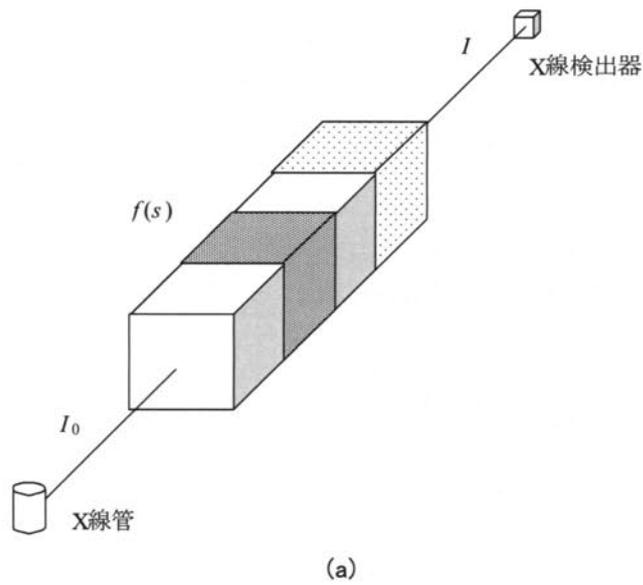
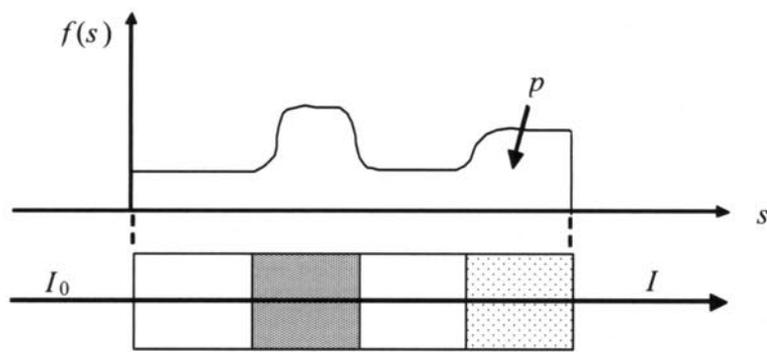


図-3.7 均質な物質へのX線の照射



(a)



(b)

図-3.8 均質でない物質へのX線の照射

3. 2. 8 X線の吸収係数

X線が物質を透過する際のX線強度の減少の程度は物質の吸収係数（減弱係数）による。この吸収係数は、X線エネルギー、物質の密度、物質を構成する原子番号などの影響を受ける。このときX線エネルギーを消費する最大の要因は、光電効果と非弾性散乱（コンプトン効果）による。式(3.1)で示した吸収係数 μ は次式で表すことができる。

$$\mu = \tau + \sigma_T + \sigma_C + \tau_p \quad (3.7)$$

ここに、

τ : 光電吸収係数

σ_T : 弾性散乱係数

σ_C : 非弾性散乱係数

τ_p : 電子対生成吸収係数

このうち、光電吸収係数 τ は物質の原子番号 Z 、密度 ρ と入射させるX線の波長 λ との間に次式に示すような関係がある。

$$\tau \propto Z^3 \rho \lambda^3 \quad (3.8)$$

また、 σ_T 、 σ_C は、光子エネルギーまたは波長によって変化する。 Z が20よりも大きい元素では、エネルギーが増すほど σ_T 、 σ_C も減少するが、その減り方は τ の減り方ほど急激ではないので、エネルギーが大きくなる光電吸収よりも散乱の方が大きくなる。また、エネルギーがある程度大きくなると σ_T はほとんど0になるから、X線の減弱は主として非弾性散乱によって起こることになる。材料の吸収係数は、National Institute of Standards and Technologyのウェブサイト“XCOM database”によって参照できる。

吸収係数 μ 、密度 ρ のとき、 μ/ρ (cm²/g)を質量吸収係数という。これは物質固有の値をもち、一定の入射X線波長に対して、物質ごとに一定の値をもつ。二つ以上の元素からなる化合物、合金、混合物、溶液などの質量係数は重量比によって次式で求められる。

$$\mu/\rho = W_A(\mu/\rho)_A + W_B(\mu/\rho)_B + W_C(\mu/\rho)_C + \dots \quad (3.9)$$

ここに、

W_A : A物質の重量比

$(\mu/\rho)_A$: A物質の質量吸収係数

以下、 $W_B \dots$ 、および $(\mu/\rho)_B \dots$ 、について同様

3.3 X線CTの画像構成法^{9), 10), 11)}

3.3.1 画像再構成の概念

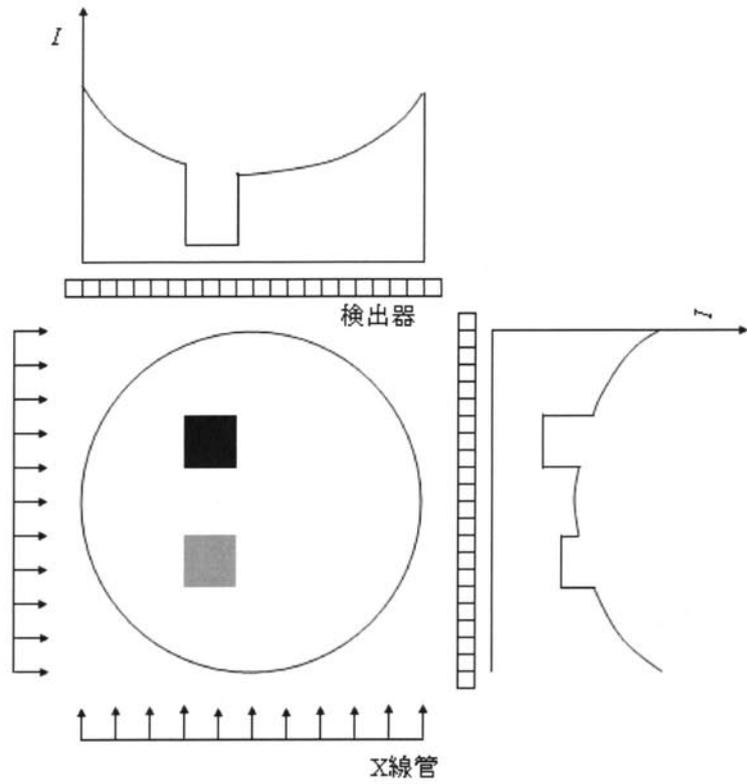
一般のX線撮影とCT撮影の決定的な違いは画像の再構成である。X線撮影では被写体を透過したX線は、感光材料上にそのまま透過像として結像する。CT撮影では被写体を透過したX線は検出器により信号に変換され、コンピュータにより画像再構成され、画像表示が行われる。画像構成ではCT特有の技術が使用され、画像表示でCT特有の画像特性が現われる。画像構成の原理自体は比較的シンプルであるが、巨大な行列演算であり、画像を構成するのにかかる時間はコンピュータの処理速度に大きく依存している。X線CTの実用化当初は撮影してから画像が出力されるまでに大きな待ち時間を要していたが、現在はかなり高速化している。

マルチスライスCTが開発されて、三次元CTといわれているが、画像構成からみれば、二次元画像の再構成をしていることになる。ラドンの画像再構成則¹²⁾によれば、三次元再構成には三次元的なあらゆる方向からの投影データが必要となり、これは現状では不可能である。すなわち、X線CTでは常に二次元的な画像再構成が行われており、二次元断面画像を再び構成して三次元的な画像を作り出している¹³⁾。

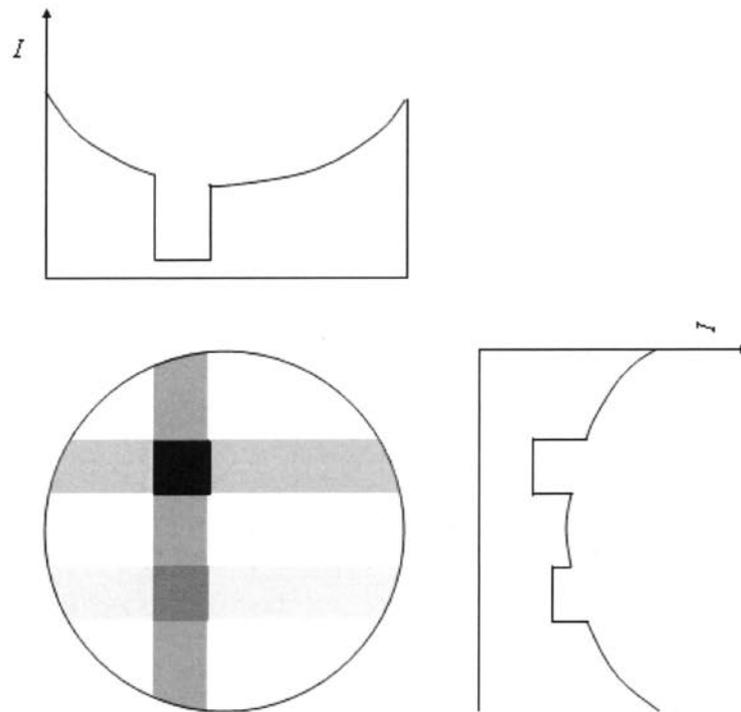
図-3.9(a)は、X線CT装置における均質な物体の投影を示したものである。ただし、物体中には2種類の密度の高い含有物が存在している。高い領域を含む箇所を通過した投影データはX線の減弱が大きい分、小さくなる。これより、投影した方向から見た含有物の位置が特定できる。

一方、図-3.9(b)は単純な逆投影の結果である。画像再構成では、検出器により収集された投影データを検出時と逆方向に投影し、重ね合わせることで被検体の内部の形状を再現する。したがって、投影データを密に収集することにより詳細な画像を再現することが可能となる。

図-3.10(a)は中心画素のX線吸収係数が1、その他は0である9つの画素からなる(3×3)の断面を示している。また、図中の(-2)から(2)は、投影関数を定義する1次元方向の空間座標値とする。図-3.10(a)はX線を4方向から投影したことにより、4つの各検出器にはX線の伝播方向に沿ってX線吸収率が加算されたものが示されている。次にこれを逆投影する。全投影データをその投影のX線伝播方向に沿って重ね合わせ、各画素を通る全ての投影データを加算する。図-3.10(a)の逆投影の結果を図-3.10(b)に示す。中心の画素を通る4方向の投影データは全て1であるから、それを加算すると4になる。中心以外の8個の画素を通る投影データはそれぞれ1方向だけが1であり、他は0であるから合計は1になる。これらの値の全てに1/4の係数を乗じて正規化すると、中心のみが1、残りの画素は0.25となる。元のデータと比べると中心部では一致するが、他の画素は0であるべきものが0.25となっており、原画像と一致していない。このように、単純投影法では原画像周辺に放射状の擬像を伴った画像を再構成する。

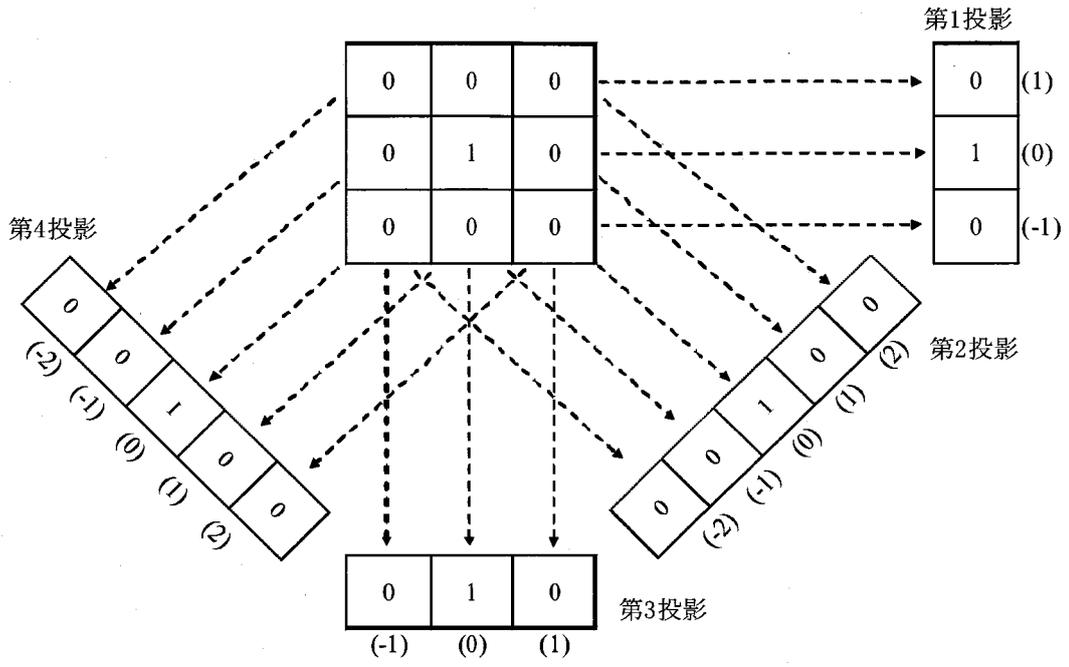


(a) 物体の投影

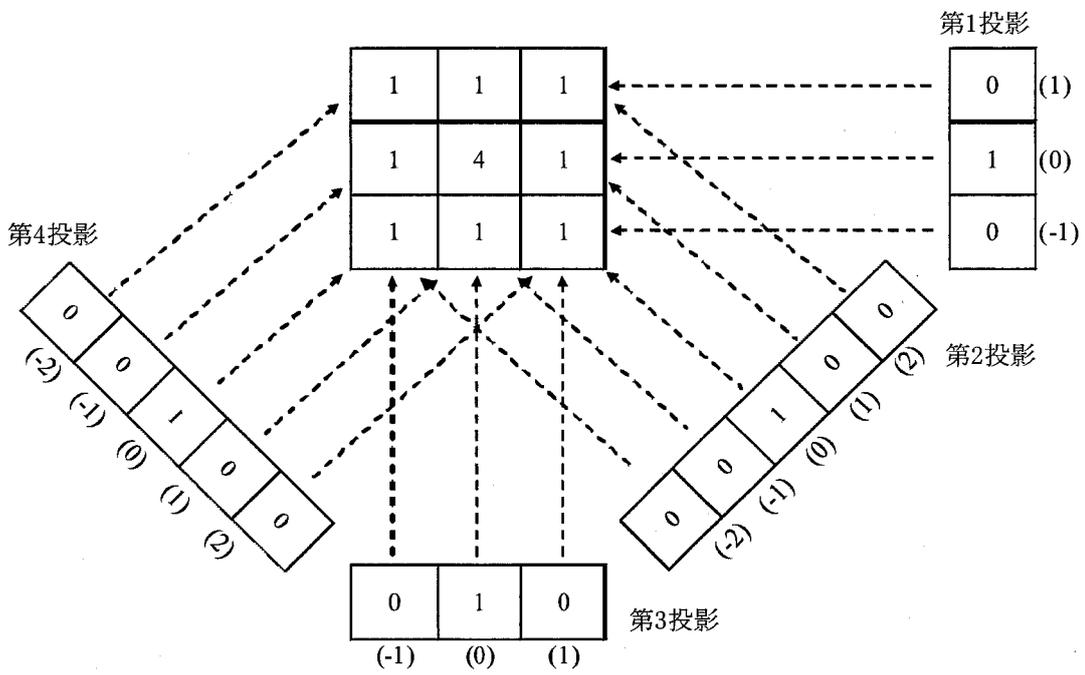


(b) 逆投影

図-3.9 画像再構成の概念



(a) 投影



(b) 単純投影法による逆投影

図-3.10 単純投影法⁹⁾

3. 3. 2 畳込み逆投影法(CBP 法)

畳込み逆投影法は、単純投影法の擬像を補正して再構成するアルゴリズムである。現在、ほとんどの CT 装置の画像再構成には、畳込み逆投影法 (Convolution Backprojection Method : CBP 法) が用いられている。畳込み逆投影法ではその名のとおり、畳込み (Convolution) と逆投影 (Backprojection) が行われる。畳込み逆投影法の特徴として、計算量が少なく、透過データに含まれるノイズに対して安定であるなどの利点がある。

図-3.11 は畳込み逆投影法による画像再構成の概念図である。畳込み投影法では投影データにフィルタをかけ、画像を再構成する。投影データとフィルタを畳込むことから、コンボリューション (Convolution)¹⁴⁾ という。

図-3.12 は畳込み逆投影法を説明している。単純逆投影法のままでは中心画素の値は4であり、原画像の値である1の4倍になっている。最も単純なフィルタとしてはこれを1/4倍して正規化することであり、これが畳込みを行うフィルタ値である。

ここでは、表-3.2の中の(a)に示した関数を使用する。例えば表-3.2の(a)と(b)について畳込みを行う場合、まず投影関数を定義する一次元座標中の(-2)の位置について計算する。このために、畳込み関数(a)の中心値が(-2)の位置に来るように関数を移動して表-3.2(c)を作成する。そして表-3.2(b)と(c)のすべての位置(-2)～(2)の値を互いに掛け算して、その合計を求める。具体的に計算すると、

$$(0 \times 0.25) + \{0 \times (-0.125)\} + (1 \times 0) + (0 \times 0) + (0 \times 0) = 0 \quad (3.10)$$

となる。この計算結果を表-3.2(h)に書く。次に(-1)の位置を計算する。この場合は、畳込み関数の中心が(-1)の位置に来るように関数を移動して表-3.2(d)を作成し、同様の計算を行うと、

$$\begin{aligned} & \{0 \times (-0.125)\} + (0 \times 0.25) + \{0 \times (-0.125)\} + (0 \times 0) + (0 \times 0) \\ & = -0.125 \end{aligned} \quad (3.11)$$

となる。これを表-3.2(h)の(-1)に示す。以下、同様のことを各位置について計算していく。これより1方向の投影データに対する畳込みが完成する。今回は4方向の投影が全て同じなので、畳込み結果も同じである。

次にこれを逆投影するために、畳込み結果を図-3.12(b)に示した。逆投影をすると、中心画素を通る投影データは4方向とも0.25であるから、加算すると1になる。また、中心の上下左右の画素値は、

$$0.25 + (-0.125) + (-0.125) + (-0.125) = -0.125 \quad (3.12)$$

となり、四隅の画素は、

$$-0.125 + (-0.125) + 0.25 = 0 \quad (3.12)$$

となる。この結果を図-3.10 (b)と比較すると、擬像が幾分解消されていることがわかる。さらにデータ数を増やせば、この擬像は限りなく0に近づけることが可能である。

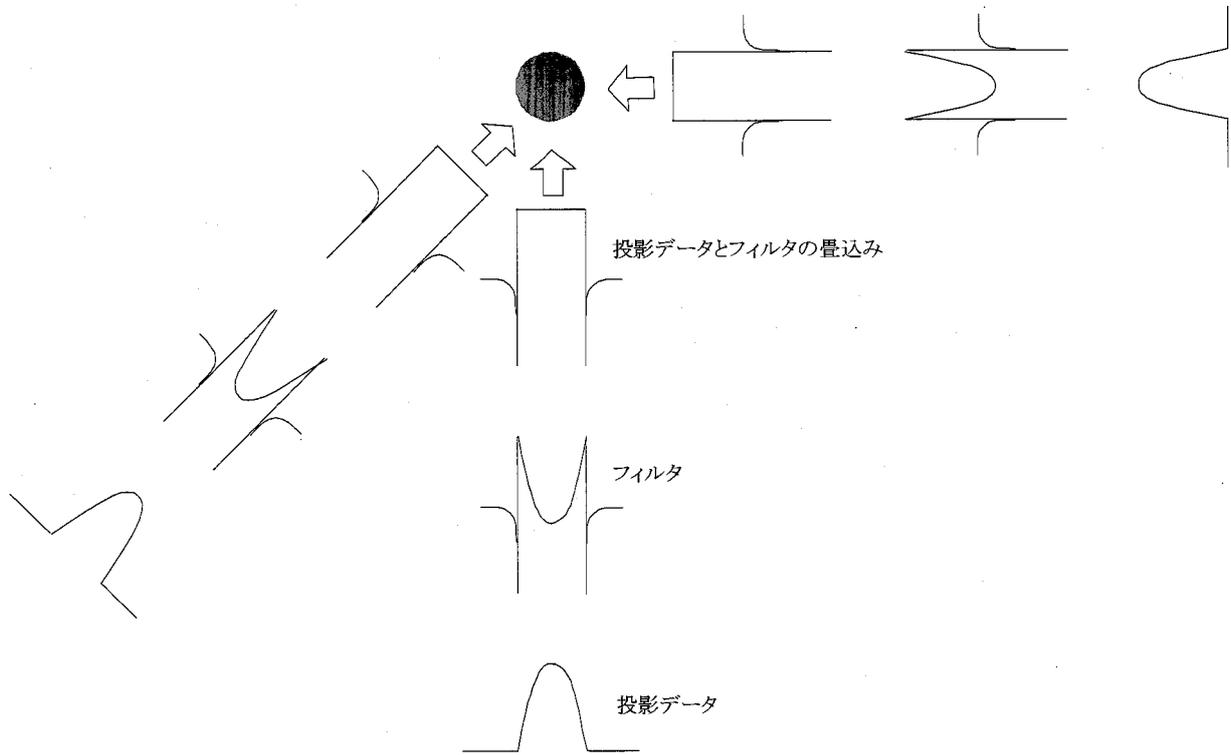


図-3.11 畳込み逆投影法による画像再構成の概念図

表-3.2 畳込み逆投影法の計算例

投影座標	(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)
(a) 畳込み関数	0	-0.125	0.25	-0.125	0
(b) 投影データ	0	0	1	0	0
(c) 座標(-2)のデータ	0.25	-0.125	0	0	0
(d) 座標(-1)のデータ	-0.125	0.25	-0.125	0	0
(e) 座標(0)のデータ	0	-0.125	0.25	-0.125	0
(f) 座標(1)のデータ	0	0	-0.125	0.25	-0.125
(g) 座標(2)のデータ	0	0	0	-0.125	0.25
(h) 畳込み結果	0	-0.125	0.25	-0.125	0

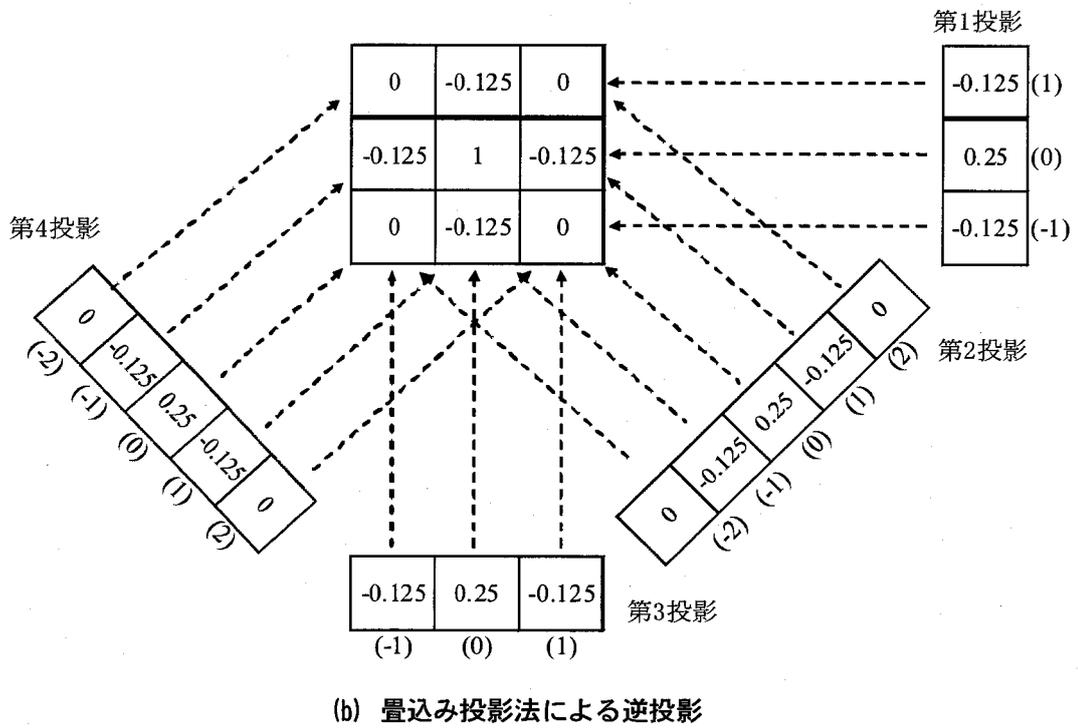
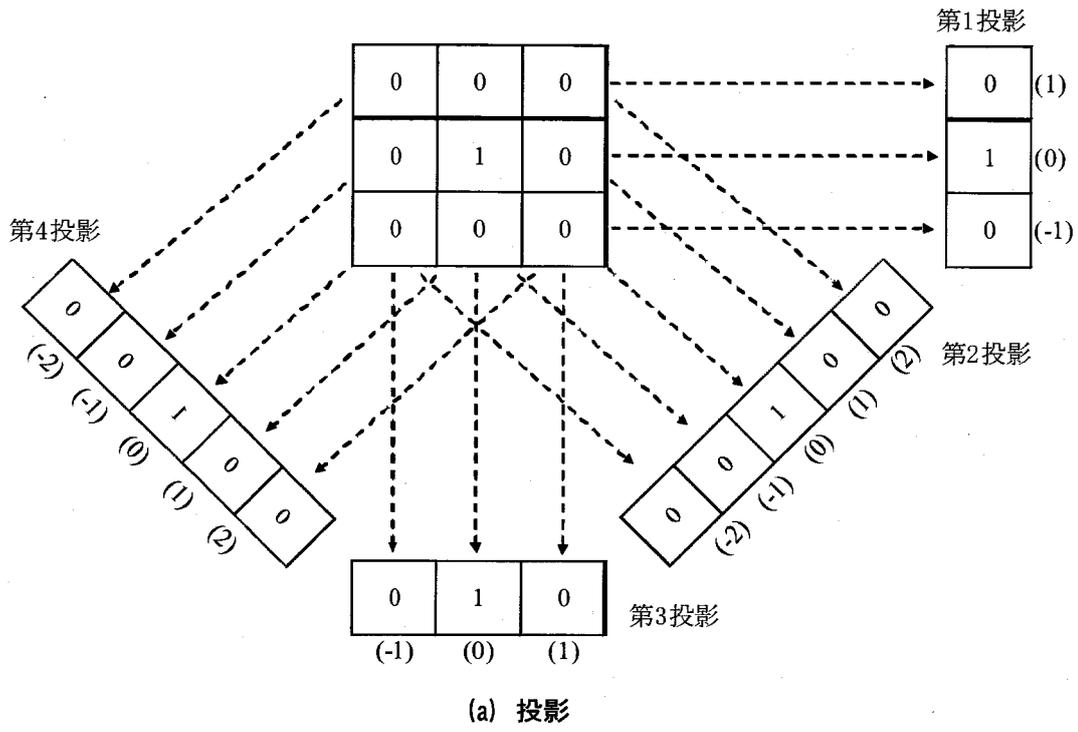


図-3.12 畳込み逆投影法⁹⁾

3.4 本研究で用いたX線CT装置

3.4.1 X線CT装置の概要

本研究で使用した産業用X線CT装置は熊本大学X-Earth Center 所有の装置で1996年に同大学工学部環境システム工学科に導入された。当時導入された装置，東芝製産業用X線CTスキャナTOSCANER-23200は，2006年に計算機システム，制御装置などを更新し，最新モデルTOSCANER20000AVシリーズのソフトウェアに更新することでCTシステムの性能，機能が向上した。本研究で使用した東芝製産業用X線CTスキャナTOSCANER20000RE4の外観を写真-3.1に遮蔽室内の様子を写真-3.2に示す。また，装置全体の概略図を図-3.13に，仕様を表-3.3に示す。



写真-3.1 TOSCANER2000RE4(TOSHIBA)



写真-3.2 遮蔽室内の状況

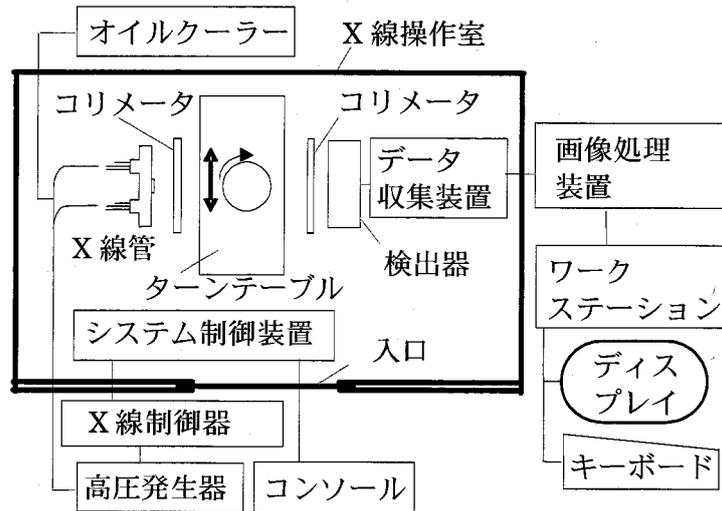


図-3.13 X線CT装置システム概要図

表-3.3 X線CT装置の仕様

スキャンタイプ	Traverse/Rotation
管電圧	150kV : 2mA 200kV : 3mA 300kV : 4mA
検出器	176 ch
データ加算角度	180° (half) 360° (full) 720° (double full)
時間分解能	Normal : 1min (half), 2.5min (full), 5min (double full) Fine : 2.5min (half), 5min (full), 10min (double full)
撮影領域	φ 150mm, φ 400mm
画像再構成マトリクス数	512×512, 1024×1024 (1Mega pixels) 2048×2048 (4Mega pixels)
最小画素サイズ	73 μm
供試体の最大寸法	φ 40cm, 高さ 60cm
スライス厚 (X線厚さ)	0.3mm, 0.5mm, 1mm, 2mm, 4mm
撮影ピッチ	0.1mm の整数倍
データの階調	14bit
最大積載重量	981N

3. 4. 2 X線CT装置の構造と特徴^{1), 9), 15)}

(1) X線発生起電力

X線は、放射線の一種であるため、人間がX線を浴びることはしばしば被爆と表現されることがある。そこで、医療用X線CT装置では人体をX線CT撮影可能な程度のX線発生起電力しか備えていない。一般の医療用X線CT装置のX線発生起電圧は140kV程度である。

一方、本研究で使用している産業用X線CT装置では対象物が工学材料であるので医療用のX線発生起電圧と比較して大きなX線発生起電圧装置を備えている。本装置では、X線発生起電圧を150kV、200kV、300kVに変換して撮影を行うことができる。

(2) X線

撮影は写真-3.2に示すように遮蔽室内のターンテーブルに供試体を設置し、完全密閉してから行う。X線の照射が開始すると、X線操作室内ではX線がX線管から連続照射され、X線発生装置と検出器の間を試料台が併進移動する。一般に、X線管によって発生するX線は、図-3.14に示すように円錐状に発生する。これは、散乱X線が発生しているためである。検出器が散乱X線を検出してしまうと、被検体のX線吸収分布以外の情報を取り込むことになり、画質の低下を引き起こすことが知られている。この影響をできるだけ少なくするために、X線を吸収するタンゲステン製のスリット（コリメータ）を設けて、円錐状のX線を扇型に加工する工夫がなされている。さらに、これを通過したX線にも散乱X線が発生するため、検出器側にも被検体を通過したダイレクトX線のみを検出するように各検出器にコリメータが設けられている。X線CT装置におけるX線の照射状況を図-3.15に示す。なお、本装置におけるコリメート可能なX線照射厚は、0.3mm、0.5mm、1.0mm、2.0mm、4.0mmの5種類であり、X線の照射角度は30度である。

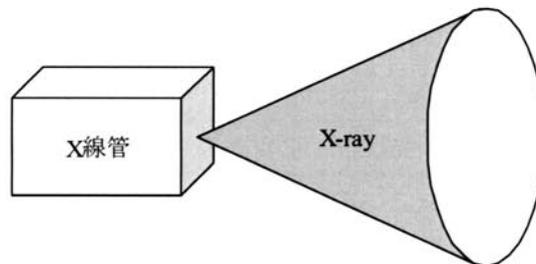


図-3.14 X線の形状

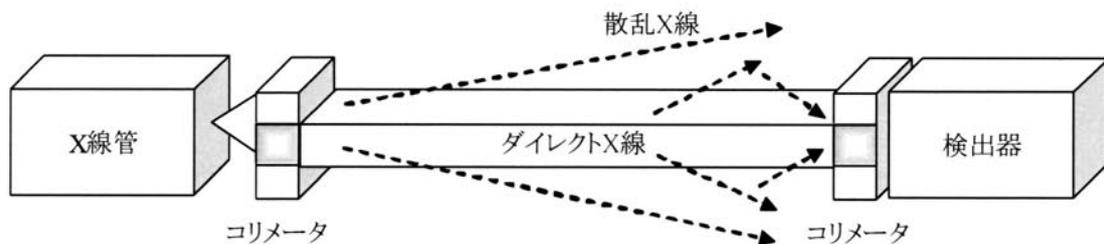


図-3.15 X線CT装置におけるX線の照射状況

(3) 検出器

X線が照射を開始すると、試料台は1100mmのストロークで往復併進移動する。試料台が併進移動して端点に到達すると、試料台は30度回転し、引き続いて併進運動する。この操作を繰り返すことにより、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。そして、6回繰り返すことにより180度からX線を照射されたことになる。この間にかかる時間は約5分間である。この情報を線対称に対応させることで360度の方向から情報を得たことになる。

本装置の検出器の個数は176個あり、データ加算角度が180度の場合、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。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6往復を12往復あるいは24往復することによってデータ数を増やすことができる。

(4) X線データのA/D変換

一般に、各検出器にはX線に触れると光を発生するシンチレータという材料が設置されており、これにより微量な発光現象が生じる。この光は、フォトダイオードによって光電変換され、その電流はデータ収集装置に格納される。その中で、増幅器により得られた電流を増幅し、これがA/D変換されてコンピュータの中に取り込まれていく仕組みになっている。また、取り込まれた情報はCTアルゴリズムによりX線吸収係数が算出され、これに基づいてX線CT画像が再構成される。

3.5 X線CT画像

3.5.1 X線CT画像を構成するボクセル^{9), 15)}

一般的に平面画像を構成する最小要素は、ピクセル(pixel)と呼ばれる。本装置におけるX線CT画像は、 512×512 個、 1024×1024 個、 2048×2048 個のいずれかの選択可能な正方格子から構成されている。例えば撮影領域が $\phi 150\text{mm}$ 、画像構成マトリクス数が 512×512 の場合は、1ピクセルが $0.293 \times 0.293\text{mm}^2$ の正方格子、撮影領域が $\phi 400\text{mm}$ の場合は $0.78 \times 0.78\text{mm}^2$ の正方格子となる。このように画像は面要素の集合体である。

ところが、X線CT画像においてはボクセル(voxel)という構成要素で成り立っている。ボクセルとは、2次元的な情報を持つピクセルとは違い、スライス厚分の高さを持つ3次元的な単位である。例えば、撮影領域が $\phi 150\text{mm}$ 、画像構成マトリクス数が 512×512 、設定スライス厚 1mm の場合、1ボクセルのサイズは $0.293 \times 0.293 \times 1\text{mm}^3$ となる。図-3.16にX線CT画像(ボクセル)の概念を示す。

図-3.17は連続撮影して得られた画像がコンピュータ上で重ね合わせることにより3次元画像が再構成できることを示している。

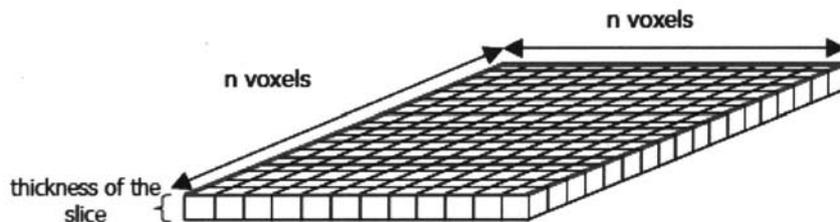


図-3.16 X線CT画像の概念

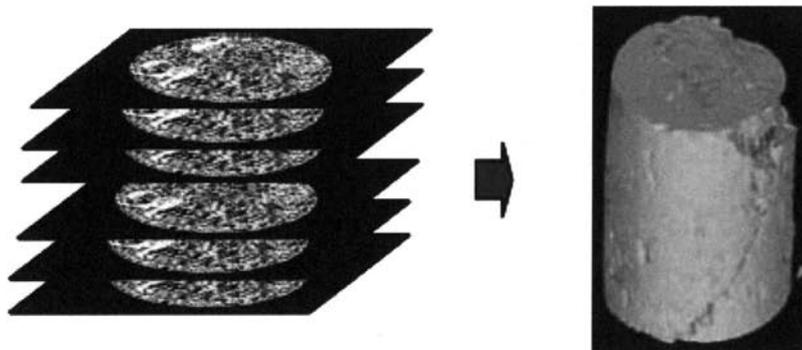


図-3.17 CT画像の再構成による3次元画像

3.5.2 X線CT画像とCT値

φ125mmのコンクリート円柱供試体のX線CT画像の一例を図-3.18に示す。画像上でコンクリート中の骨材や空隙、モルタルが確認できる。この画像では撮影領域のφ150mmに対して撮影画素数が 1024×1024 pixelで、設定スライス厚が2.0mmであるため、1ボクセルの大きさは $0.146 \times 0.146 \times 2.0$ mm³である。

各ボクセルのX線吸収率は次式でCT値と定義される数値に変換される。

$$\text{CT 値} = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \quad (3.13)$$

ここで、

μ_t : 求める点のX線吸収係数

μ_w : 水の吸収係数

である。 K は本装置の場合、1000、250、125から任意に設定できる係数であるが、表示可能なCT値は-2000から4000であるため、骨材などを撮影する場合は通常 $K=1000$ と設定する。本研究でも K は1000とした。この場合、X線吸収係数が0である空気のCT値は-1000、被写体の中で密度の大きい骨材のCT値(約 2.5g/cm^3)は1500程度となり、-2000から4000の範囲で表示可能である。ちなみに、被写体の密度が 5g/cm^3 を超える例えば鉄のような物体を撮影する場合には、 K を1000とするとCT値は表示限界の4000を超えてしまうため、小さい K を設定する。

CT画像では、CT値が高い(密度が大きい)場合白色に、反対にCT値が小さい(密度が小さい)場合黒色に表示される。

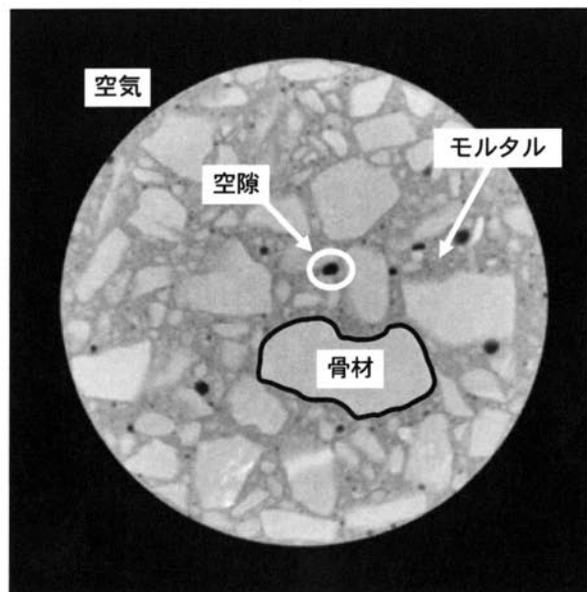


図-3.18 コンクリートのX線CT画像

3.5.3 密度とCT値の関係

X線吸収係数が物体の密度に比例することから、CT値と密度は比例関係にある。例としてコンクリート材料を別々に単体で撮影した時の密度とCT値の関係を図-3.19(a)に示す。図よりコンクリートの材料を構成する骨材やセメントペースト、水、空気の密度とCT値の関係には正の相関関係があることがわかる。また、セメントペーストは水セメント比などの配合によって密度が変化するが、それもCT値の変化として顕著に表れていることがわかる。

図-3.19(b)に示されるコンクリート材料は図-3.18に示すようなコンクリートの断面画像中の各材料である骨材やセメントペースト、空気の平均CT値を表している。図-3.19(a)と比較すると、同じ材料で同じ密度にも関わらずCT値が減少していることがわかる。セメントペースト(a)は直径30mmであるが(b)のコンクリート円柱供試体の直径は125mmである。このようにCT値は密度と比例関係にあるが、図-3.19のように撮影する条件によって多少の変動があることから、CT値は絶対的な値ではなく相対的な値であることに留意しなければならない。

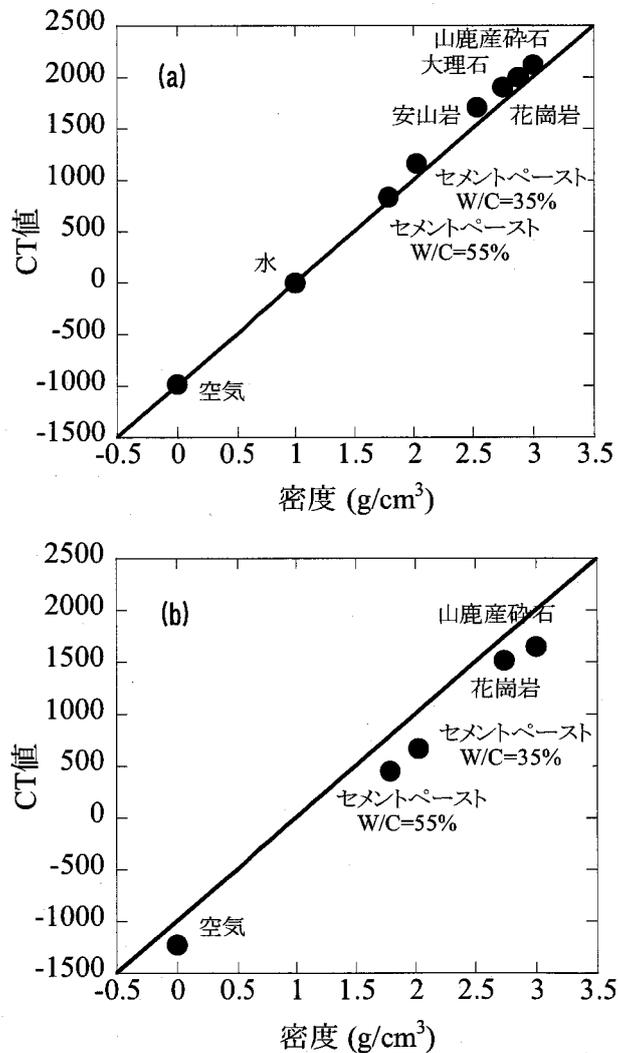
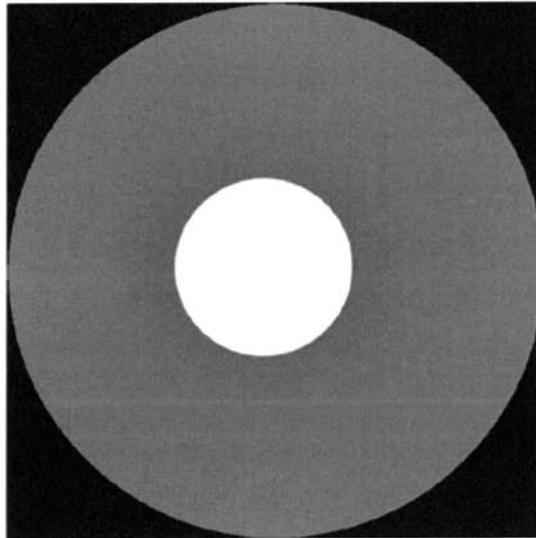


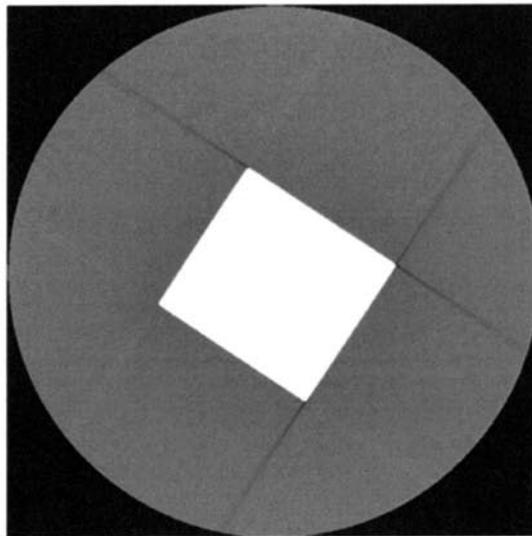
図-3.19 物体の密度とCT値

3. 5. 4 供試体形状の影響

供試体の形状がCT画像に及ぼす影響を調べるために、断面が円形と四角形の供試体についてX線CT撮影を行った。図-3.20に円形と四角形の供試体CT画像を示す。四角形の供試体の四隅に擬像が発生していることがわかる。このように角がある供試体を撮影したときには、角の先端で擬像が発生することに留意する必要がある。したがって、供試体の形状は円形など丸みを帯びたものが望ましい。しかし、直方体などの角のある供試体を用いる場合には、角の部分にワックスや粘土などを張り付けて丸みを帯びさせることにより擬像の影響を低減することが可能である。



(a) 円形断面



(a) 四角形断面

図-3.20 供試体形状の影響

3.5.5 同一断面の連続撮影

X線 CT装置で同じ断面を連続して撮影した場合の画像のデータ、すなわち CT 値の変化について検討した。直径 125mm、高さ 250mm のモルタル供試体の一断面を管電圧 300kV、設定スライス厚 2mm、データ加算角度 180 度 (half) で連続して 10 回撮影を行い、得られた CT 値のデータをデータ 1 からデータ 10 とした。撮影した CT 画像の一例を図-3.21 に示す。

図-3.21 に示す円形の供試体断面内の CT 値について、データ 1 からデータ 10 までの CT 値のヒストグラムを図-3.22 (データ 1~データ 10) に示す。同じ断面であるにも係わらず、ヒストグラムの形はわずかな違いであるが、少しずつ異なることがわかる。このことから、すべての撮影条件を全く同じにして撮影した場合でも完全に同じ画像のデータは得られないことがわかる。

次に、データ 1 とデータ 10 について、図-3.21 に白い点線で示した直径方向の CT 値の分布形状を図-3.23 (a) に示す。また、このうち中心部を拡大したものを図-3.23 (b) に示す。これらの図より、同じ断面の同じ位置でも撮影毎により、わずかに CT 値が異なることが確認できる。

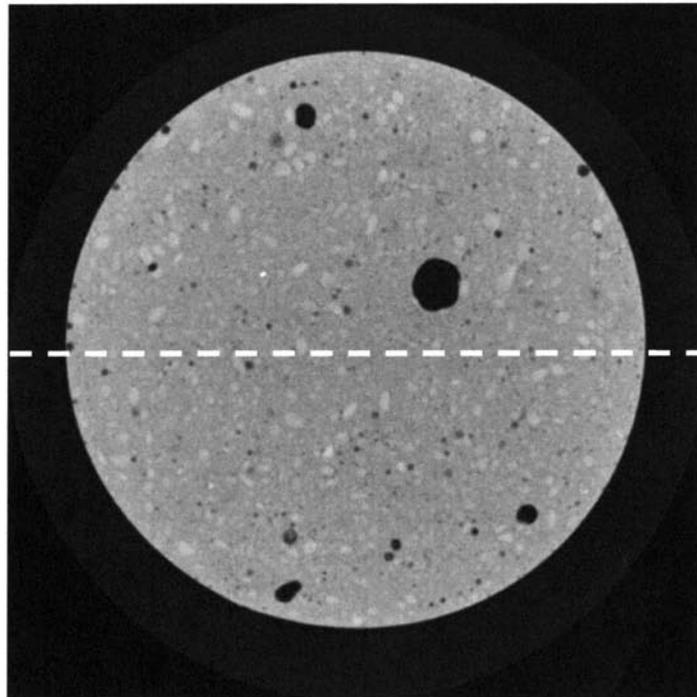


図-3.21 モルタルの CT 画像

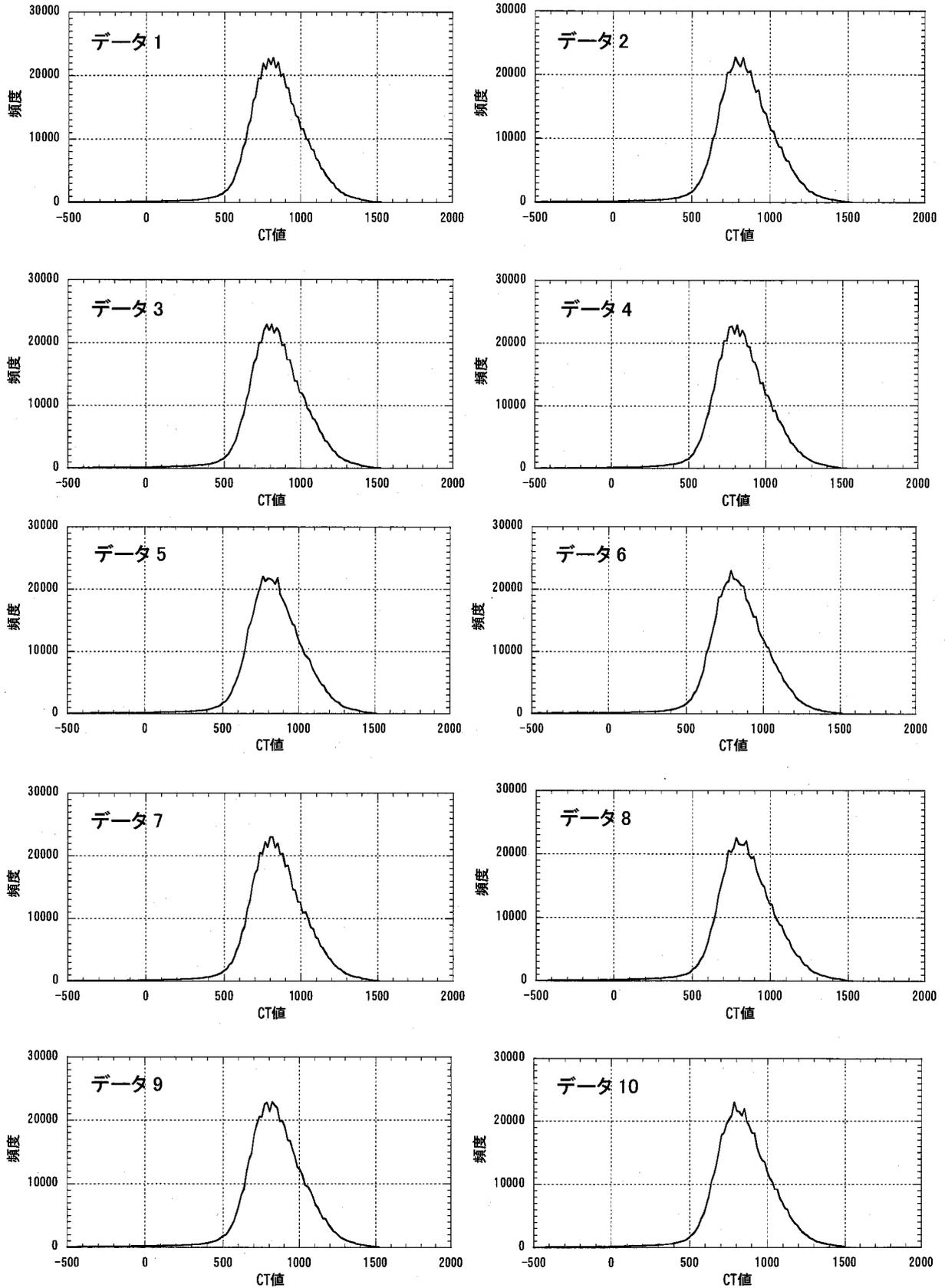
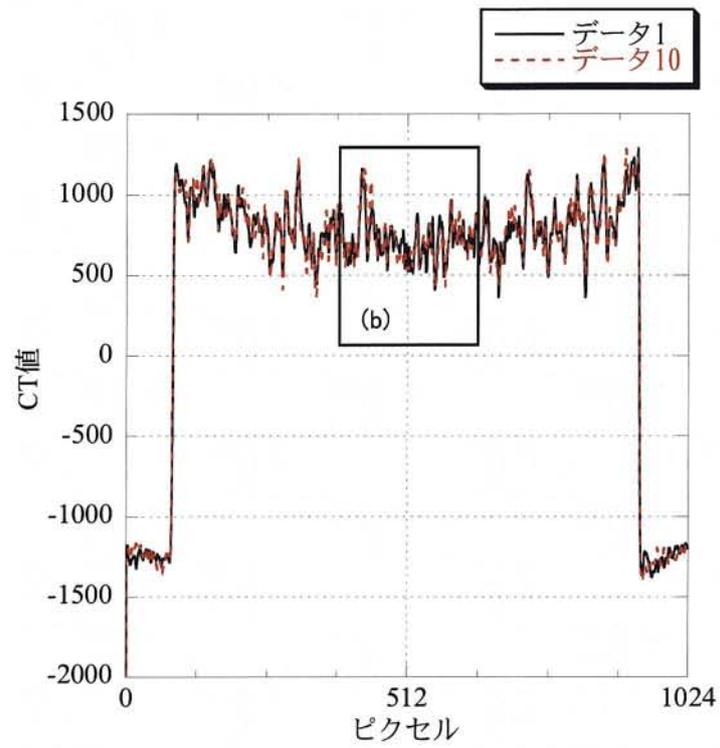
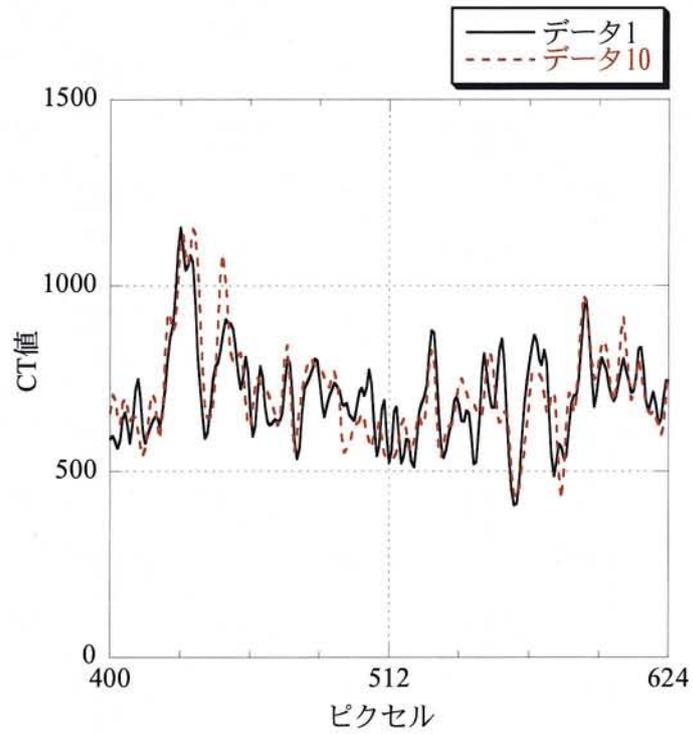


図-3.22 CT値のヒストグラム



(a) 全体



(b) 拡大図

図-3.23 供試体の直径方向のCT値の分布形状

同じ断面を連続してX線CT撮影した場合、CT値のわずかな変動が確認できたが、この変動の程度を把握するためにCT値の最大値、最小値および平均値、標準偏差を求めた。φ150mmの撮影領域内のヒストグラムについて、データ1からデータ10までのCT値の最大値、平均値、最小値と標準偏差を図-3.24に示す。

図-3.24に示したデータ1からデータ10までのCT値の最大値の変動は2591から2701、最小値の変動は-1522から-1585であるが、CT値の平均値は最小値が826.63、最大値が828.62であり、その差は1.99である。標準偏差は最小値299.27と最大値299.62の差が0.35である。同じ断面を連続撮影した平均CT値の最小値と最大値の差1.99は、CT値の差が1000で密度の差が 1g/cm^3 とすると、 0.00199g/cm^3 のわずかな相違となる。このことから、コンクリート供試体断面の画像や密度を評価する際には、各ピクセルの最大値や最小値ではなく、平均CT値で評価することが

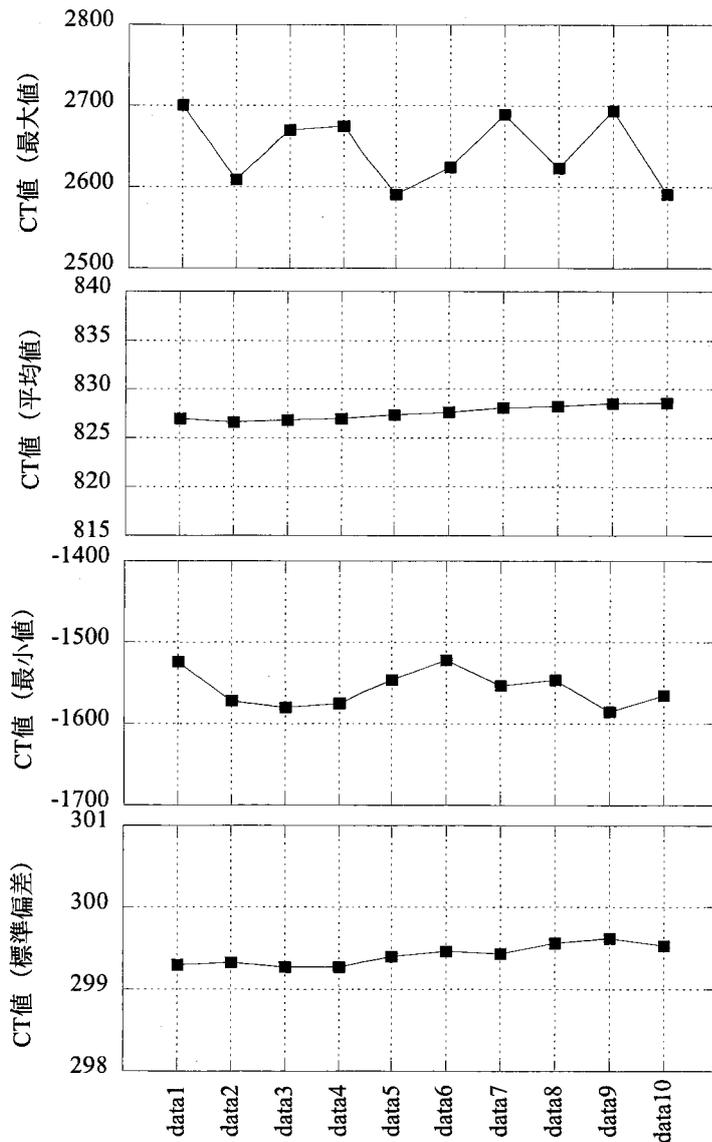


図-3.24 CT値の最大値、平均値、最小値と標準偏差

望ましいといえる。

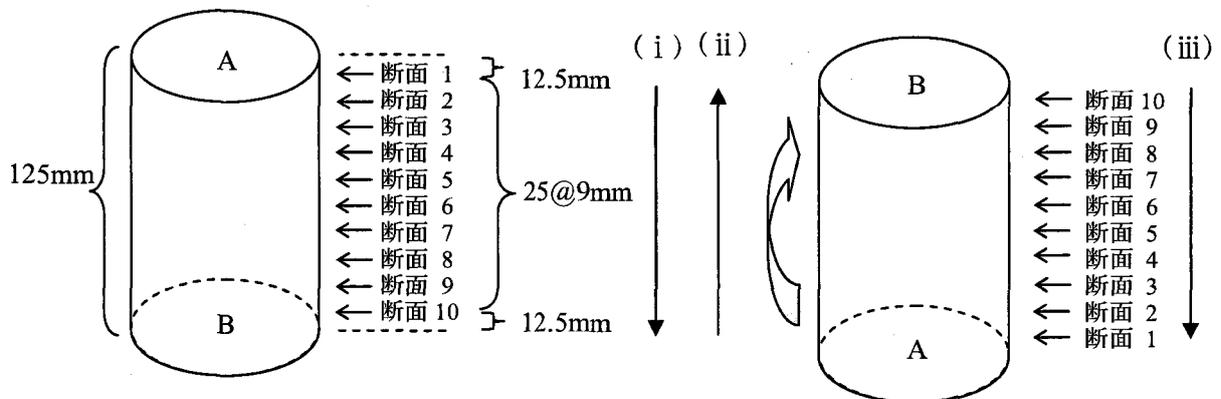
以上の結果より、同じ断面を連続して撮影した場合、すべての撮影条件を同じにして撮影してもわずかな違いではあるが全く同じ画像の撮影データは得られないことがわかった。ただし、平均CT値で評価を行うことにより、コンクリート材料の密度の評価には影響を与えないことが明らかとなった。

3. 5. 6 供試体の断面撮影

(1) 各断面の供試体の画像データ

直径125mm、高さ250mmのモルタル供試体の10断面を管電圧300kV、設定スライス厚2mm、データ加算角度180度(half)で連続撮影した。撮影方法は図-3.25に示すように(i)上から下へ、(ii)下から上へ、(iii)供試体を上下逆にして上から下へ向けて、各10断面を撮影した。1断面の撮影回数は1回である。各撮影時における10断面の撮影箇所はAからBへ断面1~断面10とする。

図-3.26に供試体断面内の断面1から断面10までのCT値のヒストグラムから求めた平均CT値を示す。図-3.26の各断面にプロットされているCT値は同じ断面である。



- (i) 供試体の上 (A) から撮影
- (ii) 供試体の下 (B) から撮影
- (iii) 供試体を上下逆にし、上 (B) から撮影

図-3.25 撮影方法

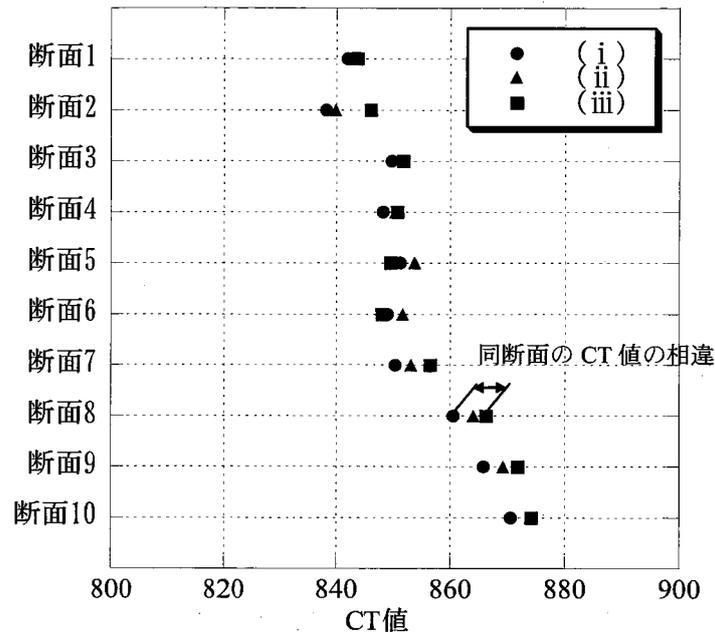


図-3.26 供試体各断面の平均CT値

図-3.26より、1本のコンクリート供試体の上方と下方では平均CT値が異なることがわかる。すなわち、1本の供試体でも撮影する断面が異なると、断面により平均CT値は異なる。これは同じ配合のコンクリートで供試体を作製しても、位置により供試体断面の平均密度にばらつきが生じることを示している。特にコンクリートの場合は打込み直後のブリーディングにより重い骨材が沈降し、軽い水や空隙が上昇することにより高さ方向でばらつきが生じることが考えられる。このことから、1本の供試体全体の平均CT値を求める場合には、このように複数断面の撮影を行うことが重要である。

一方、(i)、(ii)、(iii)のように、供試体の撮影順序やX線CT装置に設置する方法を変えた場合においても、同じ位置を撮影する場合には平均CT値はほぼ同じである。各断面において、同じ位置の撮影でもわずかに平均CT値が異なるが、CT値の相違は5~10程度である。同じ位置を連続撮影した場合に比べると大きい値であるが、密度に換算すると $0.005\sim 0.010\text{g/cm}^3$ であり、コンクリート材料の密度の評価には影響を及ぼさないといえる。

(2) 各断面の周辺空気の画像データ

次に、(1)と同じ条件で周辺空気のCT値を測定した。周辺空気は図-3.27に示すように、供試体の上下左右 $60\times 60\text{pixel}$ の正方形で指定し、その領域のヒストグラムから平均CT値を求めた。図-3.28に供試体断面内の断面1から断面10までの周辺空気のCT値のヒストグラムから求めた周辺空気の平均CT値を示す。

図-3.28より、周辺空気のCT値は図-3.26と同様の傾向を示しており、上方から下方に従い

CT 値が増加していることがわかる。CT 値の増加は約-1265～約-1255 と 10 程度でわずかであるが、本来、空気の CT 値は同じで一定と考えられるにも係わらず、このような傾向が確認された。これは周辺空気の CT 値がモルタル供試体の影響を受けて変化していることが理由として考えられる。

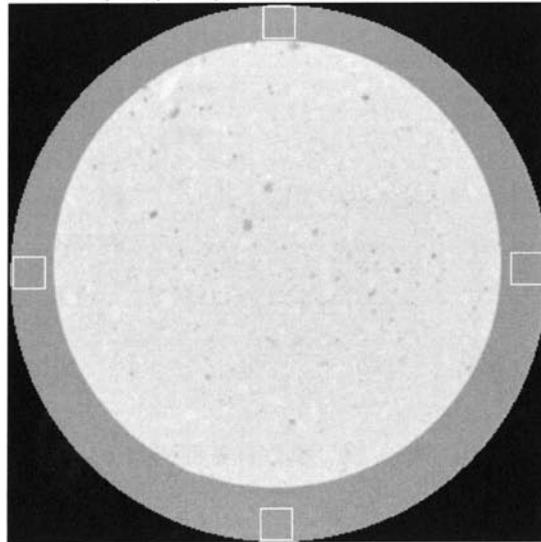


図-3. 27 周辺空気の CT 値の算出位置

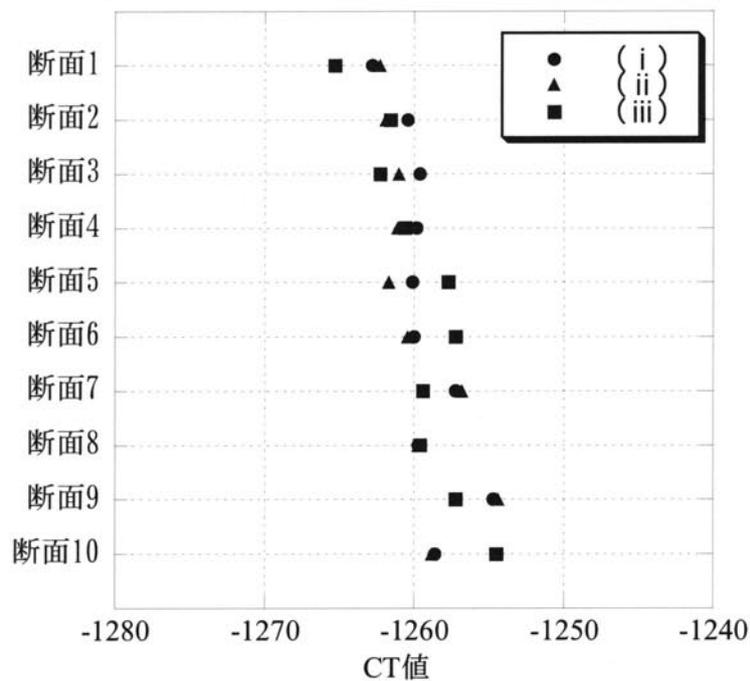


図-3. 28 周辺空気の平均 CT 値

3.6 X線CT法をコンクリートに適用するための基礎試験¹⁶⁾

3.6.1 試験概要

X線CT法は可視化技術として優れており、非破壊検査では非常に有効なツールであるが、適切に使用するにはX線CTの特性や撮影対象物との相性をよく知る必要がある。例えば、産業用X線CT装置は医療用X線CT装置と比較して、高い管電圧、小さい電流でX線を照射する。透過性は産業用X線の方が高いものの、撮影時間が多くかかるという特徴がある。

X線CT法をコンクリート供試体に適用するには、X線の管電圧やスライス厚を適切に設定する必要があるが、これには供試体の大きさも影響する。このため、これらの設定パラメータの違いが撮影画像に及ぼす影響を検討するために基礎試験を行った。

3.6.2 試験方法

(1) 供試体

供試体のコンクリートにはフレッシュコンクリートを5mmのふるいでウェットスクリーニングしたモルタルを使用した。コンクリートの配合を表-3.4に示す。供試体はφ125mm×250mmの円柱供試体であり、この供試体を図-3.29に示すように高さ100mmに切断する。供試体は、まず

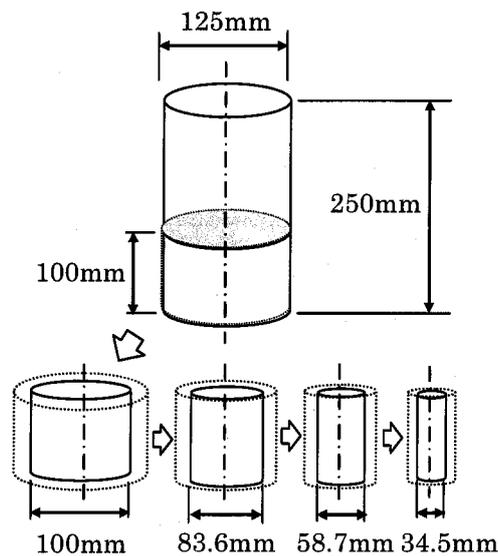


図-3.29 モルタル供試体

表-3.4 コンクリート供試体の配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	目標スランプ (cm)	水セメント比 (%)	目標空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
					水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材		混和剤	
								40-20mm <i>G1</i>	20-5mm <i>G2</i>		
40	8	55	4.5	40	146	265	777	583	583	0.664	0.027

直径 125mm で撮影し、次に軸をほぼ一致させて直径 100mm にコアリングを行う。コアリング時には水を使用するため、コアリング後は温度 110℃の炉の中で1日間乾燥させたものを撮影する。供試体の撮影断面は直径 125mm の時と同じ位置である。直径 100mm の供試体の撮影後は直径 83.6mm にコアリングを行い、再び炉乾燥後に撮影を行う。このように供試体のコアリングを実施しながらひきつづき直径 58.7mm, 34.5mm の供試体の撮影を行った。供試体の撮影は全て同じ位置の断面で実施した。

(2) 撮影条件

各直径のモルタル供試体に対し、管電圧と設定スライス厚を変化させて撮影を行った。

管電圧は 150kV, 200kV, 300kV の3種類であり、スライス厚は 4.0mm, 2.0mm, 1.0mm, 0.5mm, 0.3mm の5種類である。撮影断面は各ケースについて上部から 10mm, 30mm, 50mm, 70mm, 90mm の5断面で行った。試験ケースの一覧を表-3.5 に示す。撮影枚数は全部で 375 枚である。

表-3.5 試験ケース一覧

直径	スライス厚	管電圧					
		150kV		200kV		300kV	
125mm	4.0mm	D125E150T40	5断面	D125E200T40	5断面	D125E300T40	5断面
	2.0mm	D125E150T20	5断面	D125E200T20	5断面	D125E300T20	5断面
	1.0mm	D125E150T10	5断面	D125E200T10	5断面	D125E300T10	5断面
	0.5mm	D125E150T05	5断面	D125E200T05	5断面	D125E300T05	5断面
	0.3mm	D125E150T03	5断面	D125E200T03	5断面	D125E300T03	5断面
100mm	4.0mm	D100E150T40	5断面	D100E200T40	5断面	D100E300T40	5断面
	2.0mm	D100E150T20	5断面	D100E200T20	5断面	D100E300T20	5断面
	1.0mm	D100E150T10	5断面	D100E200T10	5断面	D100E300T10	5断面
	0.5mm	D100E150T05	5断面	D100E200T05	5断面	D100E300T05	5断面
	0.3mm	D100E150T03	5断面	D100E200T03	5断面	D100E300T03	5断面
83.6mm	4.0mm	D83.6E150T40	5断面	D83.6E200T40	5断面	D83.6E300T40	5断面
	2.0mm	D83.6E150T20	5断面	D83.6E200T20	5断面	D83.6E300T20	5断面
	1.0mm	D83.6E150T10	5断面	D83.6E200T10	5断面	D83.6E300T10	5断面
	0.5mm	D83.6E150T05	5断面	D83.6E200T05	5断面	D83.6E300T05	5断面
	0.3mm	D83.6E150T03	5断面	D83.6E200T03	5断面	D83.6E300T03	5断面
58.7mm	4.0mm	D58.7E150T40	5断面	D58.7E200T40	5断面	D58.7E300T40	5断面
	2.0mm	D58.7E150T20	5断面	D58.7E200T20	5断面	D58.7E300T20	5断面
	1.0mm	D58.7E150T10	5断面	D58.7E200T10	5断面	D58.7E300T10	5断面
	0.5mm	D58.7E150T05	5断面	D58.7E200T05	5断面	D58.7E300T05	5断面
	0.3mm	D58.7E150T03	5断面	D58.7E200T03	5断面	D58.7E300T03	5断面
34.5mm	4.0mm	D34.5E150T40	5断面	D34.5E200T40	5断面	D34.5E300T40	5断面
	2.0mm	D34.5E150T20	5断面	D34.5E200T20	5断面	D34.5E300T20	5断面
	1.0mm	D34.5E150T10	5断面	D34.5E200T10	5断面	D34.5E300T10	5断面
	0.5mm	D34.5E150T05	5断面	D34.5E200T05	5断面	D34.5E300T05	5断面
	0.3mm	D34.5E150T03	5断面	D34.5E200T03	5断面	D34.5E300T03	5断面

3.6.3 試験結果

(1) カッピング効果

管電圧 150kV, 設定スライス厚 1.0mm の条件で撮影を行ったときの直径 125mm の撮影断面の画像を図-3.30 に示す。CT 画像は 1024×1024 のピクセルであり、CT 値を白黒の 256 階調濃淡レベルに置き換えられ表示される。CT 値が高い領域であるほど白く表示され、低い領域であるほど黒く表示される。また、供試体の縁の部分がぼんやりと白く見えていることがわかる。

同図中には白い点線で示す直径方向の CT 値の分布形状を合わせて示している。CT 値の分布形状からも供試体の縁の部分について CT 値が高くなっていることが確認できる。

なお、150kV, 200kV, 300kV の各管電圧でスライス厚を 0.3mm~4.0mm に変化させ、さらに直径を 125mm~34.5mm と変えた場合の X 線 CT 画像と供試体直径方向の CT 値の分布形状及び供試体内の CT 値のヒストグラムを付録-1 (巻末資料) に示す。

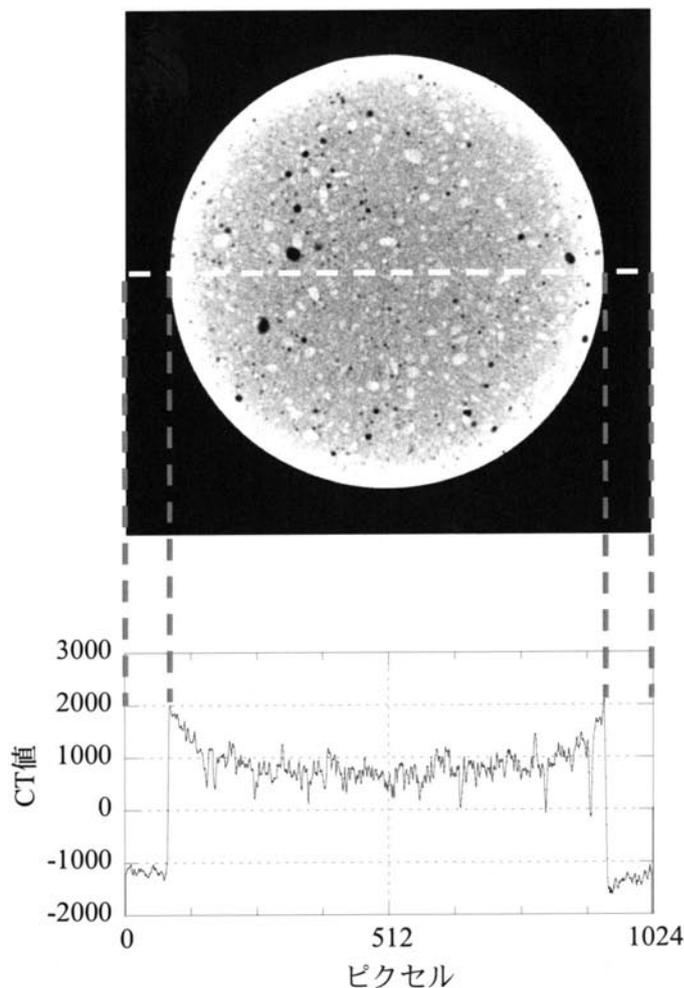


図-3.30 モルタル供試体の撮影画像
(管電圧 150kV, 設定スライス厚 1.0mm)

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線が発生するために、単波長しか持たない単色X線とは異なった特性の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、被検体断層面のX線吸収係数 μ 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」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て現われた画像は、擬像 (Artifact)^{17), 18)} と呼ばれる。

被検体をX線が透過する限り、X線は吸収され続けるため、被検体の寸法が大きいほどX線ビームハードニング現象の影響を強く受けてしまう。また、被検体を透過する際のX線の吸収は、周波数が小さく、波長が長いX線ほど顕著である。このため、X線発生起電圧が大きくなると高周波のX線が発生するためにX線ビームハードニング現象の影響は小さくなる。また、被検体の密度が小さい場合や原子量が小さい場合でも同様にX線ビームハードニング現象の影響は小さくなる。

図-3.31はX線吸収係数 μ とX線伝播距離の関係を模式的に示したものである。同図に示されるように、X線ビームハードニング現象はどんな被検体の場合でも、X線の入射領域から生じる。したがって、被検体の輪郭ほどX線吸収係数が高くなるという現象が起きている。したがって、X線ビームハードニング現象を受けた画像は、CT値がなべ底型に分布するため、「カップング効果」と呼ばれる。

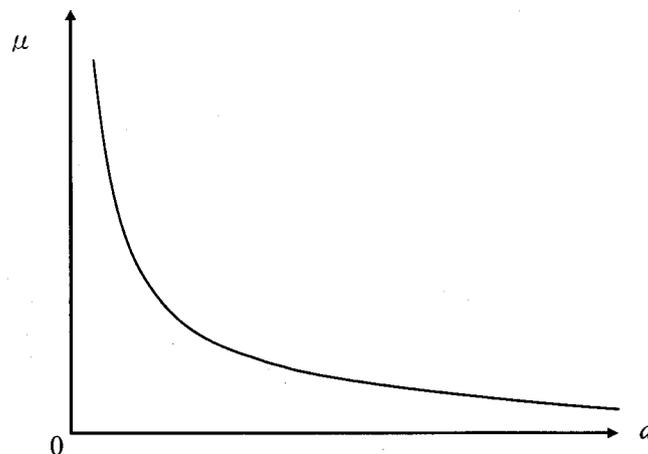


図-3.31 X線の透過距離 d と吸収係数の関係

(2) 管電圧による影響

1) CT画像

直径 100mm の供試体を設定スライス厚 1.0mm、管電圧 150kV、200kV および 300kV で撮影を行ったときの各撮影断面の画像を図-3.32 に示す。各画像は 1024×1024 のピクセルで構成され、明るさやコントラストの設定を一定にして表示している。各供試体について 5 断面ずつ撮影を行っているが、同図に示すのは供試体の上部から 50mm の中央部における断面画像である。それぞれの X 線 CT 画像の下には直径方向の CT 値の分布形状を示している。

管電圧 150kV の撮影画像は管電圧 300kV の画像に比べて明度が高いことがわかる。また、CT 値も管電圧 150kV の方が高い。これは管電圧が小さいと発生する X 線の透過エネルギーが弱いため、X 線が供試体に吸収されやすく、その結果 CT 値が高くなるためと考えられる。

また、管電圧 150kV の撮影画像は供試体の縁が白く、カッピング効果の影響を受けていることがわかるが、管電圧 300kV の画像では、供試体の縁は白く見えない。図の CT 値の分布形状には、放物線による近似線を示しているが、CT 値の分布形状からも、管電圧の小さい CT 画像ほどカッピング効果が顕著であることがわかる。

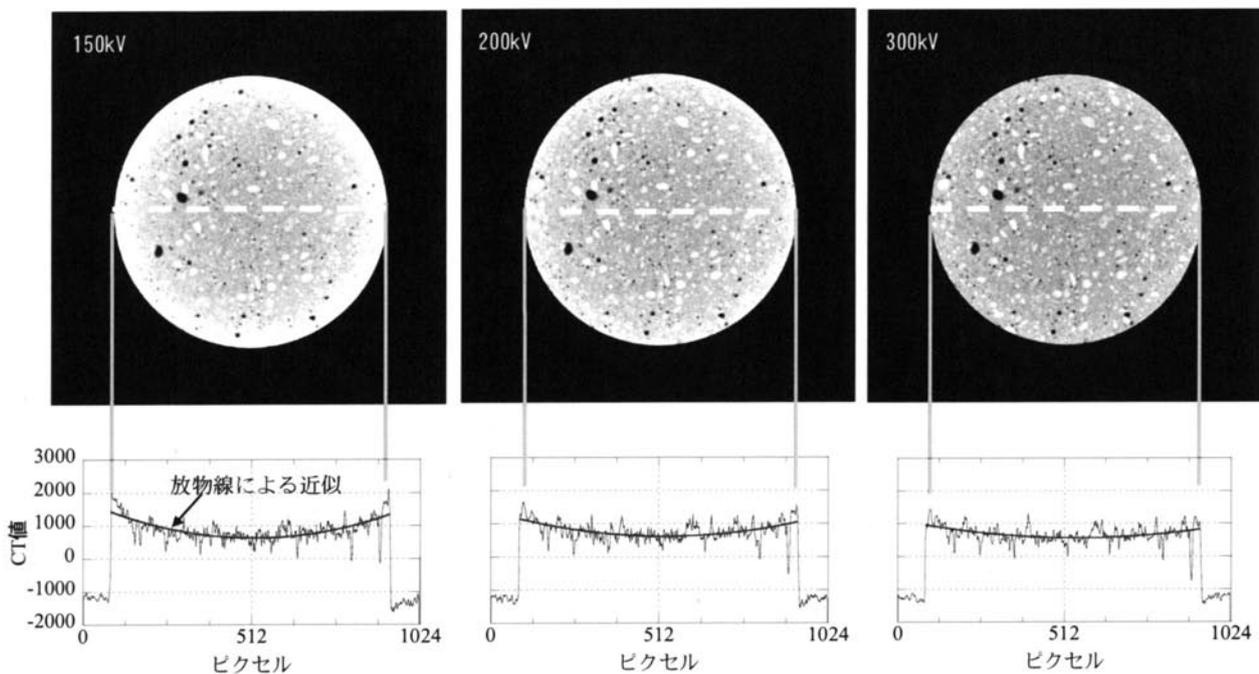


図-3.32 撮影画像と CT 値の分布形状 (直径 100mm)

2) CT 値のヒストグラム

150kV、200kV および 300kV の各管電圧における直径 100mm の供試体断面の CT 値のヒストグラムを図-3.33 に示す。同図より、設定する管電圧が大きくなると、ヒストグラムは小さいほうに移動し、その形状は中心部の山の頂部で鋭角に高くなり、ばらつきが小さくなっている。また、管電圧が 150kV のヒストグラムでは、特に CT 値の高い部分の頻度が大きい。これは、管電圧が小さい場合には、カップリング効果により供試体の縁の部分の CT 値が高くなっていることが影響していると考えられる。なお、これらヒストグラムの特徴は他の寸法の供試体においても同様であった。

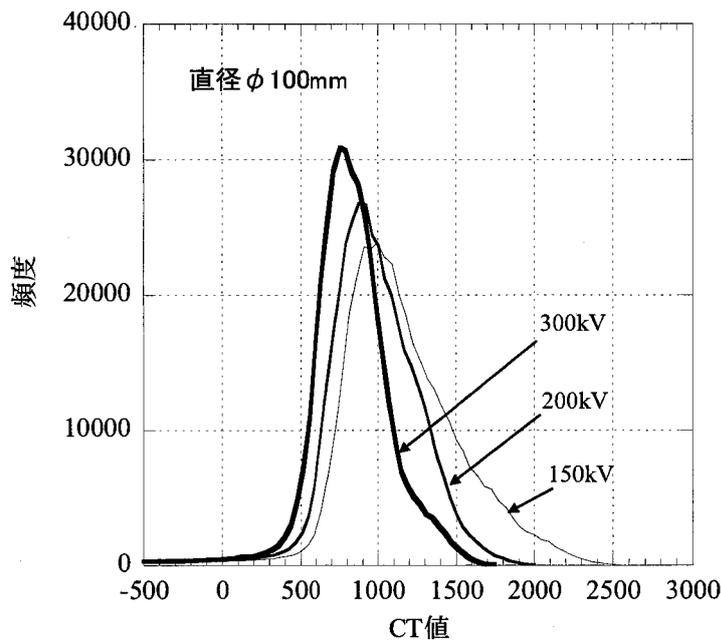


図-3.33 供試体の CT 値のヒストグラム (管電圧の相違)

3) 管電圧と平均 CT 値

図-3.33 の CT 値にヒストグラムに示されている φ100 の供試体について、CT 値の平均値とばらつきを示す標準偏差を管電圧で比較したものを図-3.34 に示す。同図より、管電圧が大きくなると平均 CT 値は小さくなり、ヒストグラムのばらつきを表す標準偏差も小さくなるのがわかる。ヒストグラムの標準偏差が大きい場合には、広い範囲の CT 値で同じ供試体断面の密度分布を評価できるため、供試体断面の分析を行う場合には精度が高くなると考えられるが、管電圧が小さい場合にはカップリング効果が影響を及ぼすため、注意が必要である。

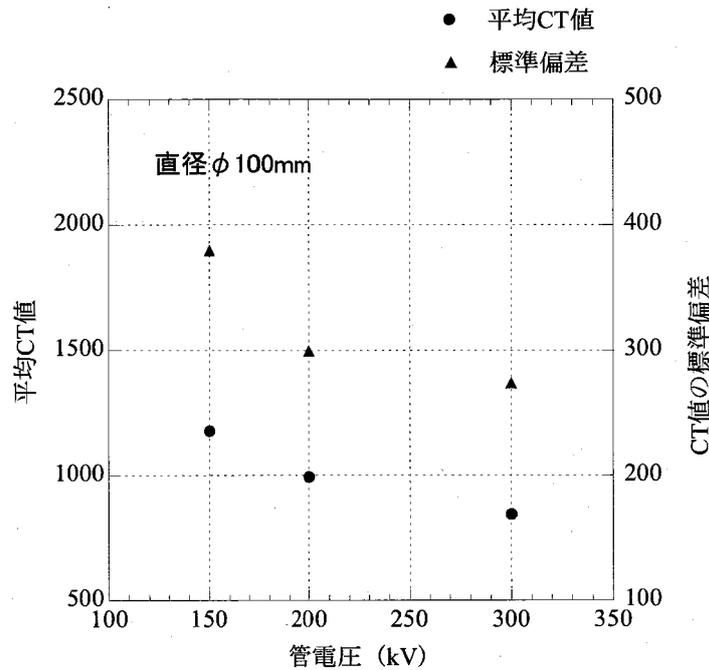


図-3.34 管電圧と平均CT値, 標準偏差

(3) 供試体の寸法による影響

1) CT画像

管電圧を300kVと一定とし、直径を変化させた供試体の撮影を行ったときの各撮影断面の画像を図-3.35に示す。同図には直径125mm, 100mm, 83.6mm, 58.7mm, 34.5mmの各供試体の直径方向のCT値の分布形状を示している。CT値の分布形状から、分布φ125mmの供試体の縁の部分でCT値の高いカッピング効果が認められる。

一方、図-3.35において、φ125mmの撮影領域内の供試体周囲の空気部のCT値の分布形状を囲んで示しているが、供試体の寸法が大きい周辺の空気はCT値が-1000よりも小さく、しかも変動し、供試体から遠くなるに従って、-1000に近づく。一方、供試体の寸法が小さい周辺の空気はCT値がほとんど-1000付近にあり、変動は少なく一定である。このことから、供試体の寸法は周辺の空気にも影響を与えることが確認できる。

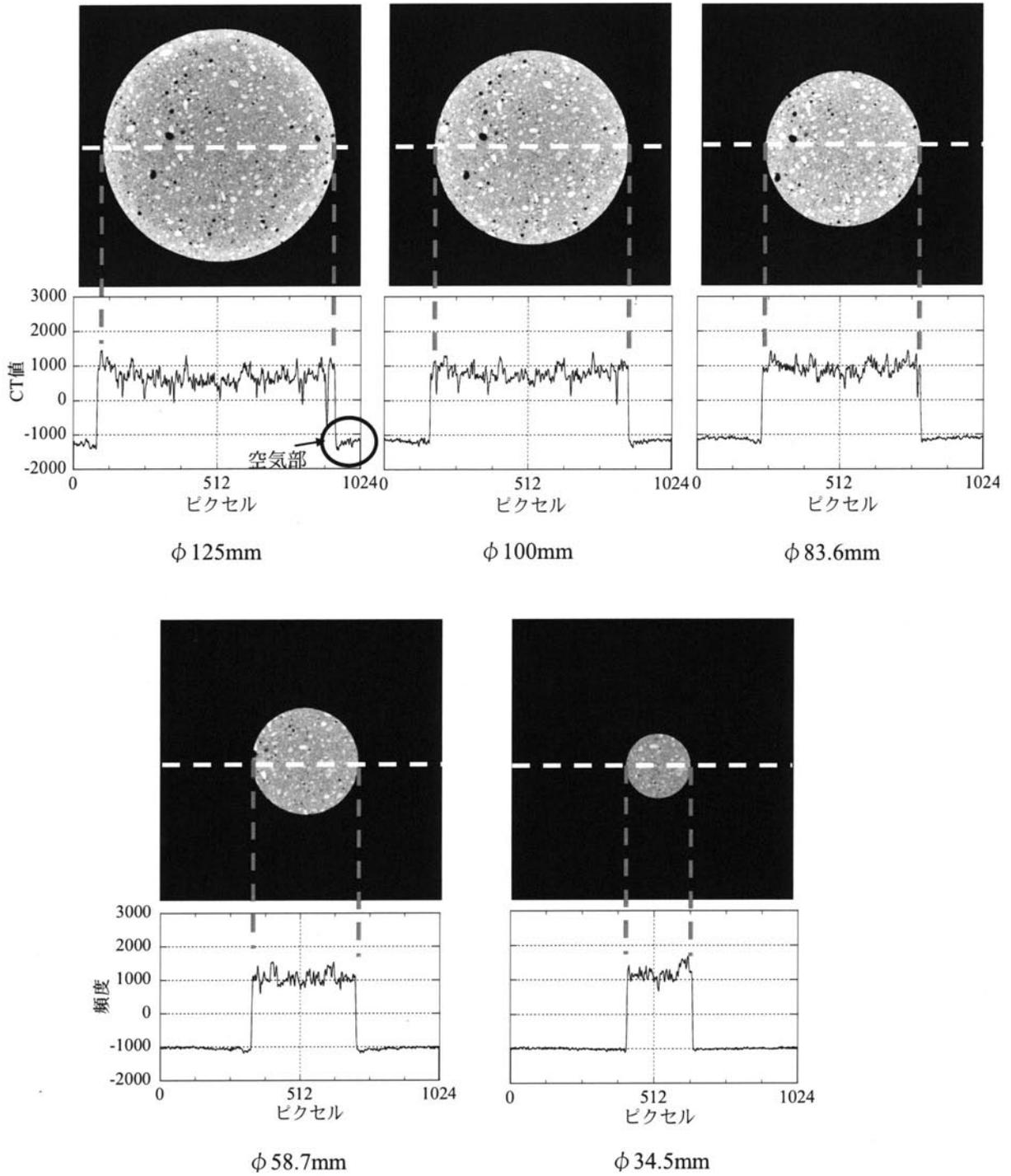


図-3.35 撮影画像とCT値の分布形状
(管電圧 300kV, スライス厚 1.0mm)

2) CT 値のヒストグラム

設定管電圧 300kV, 設定スライス厚 1.0mm の条件で撮影した, 各直径の供試体の CT 値のヒストグラムを図-3.36 に示す。同図より, 管電圧が同じであれば, 供試体の寸法が小さくなるとヒストグラムで囲まれた面積が小さくなると同時に CT 値が高くなるのがわかる。

3) 供試体の直径と平均 CT 値

管電圧 150kV, 200kV, 300kV で撮影した各供試体について, 供試体の直径と CT 値の平均値および標準偏差との関係を図-3.37 に示す。同図より, 供試体全体の平均 CT 値に関して, 同じ管電圧では直径が大きくなるほど供試体領域の平均 CT 値は小さくなるのがわかる。また, 供試体の直径の増加に対する平均 CT 値の減少の程度が異なり, 直径が大きくなるほど平均 CT 値の減少の割合は少なくなっている。一方, CT 値のばらつきを表す標準偏差は供試体の直径とともに大きくなっている。同じ管電圧の場合にはヒストグラムで囲まれた部分の面積が変わるだけで, 分布形状はほぼ同じであるため, 供試体の面積にほぼ比例して標準偏差が大きくなっている。

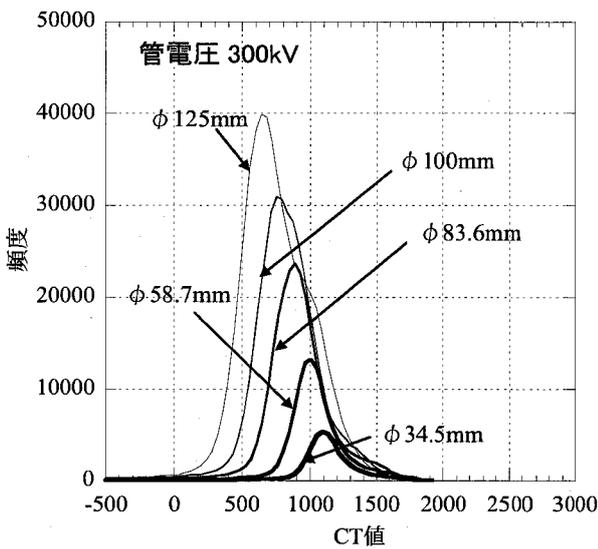


図-3.36 供試体の CT 値のヒストグラム

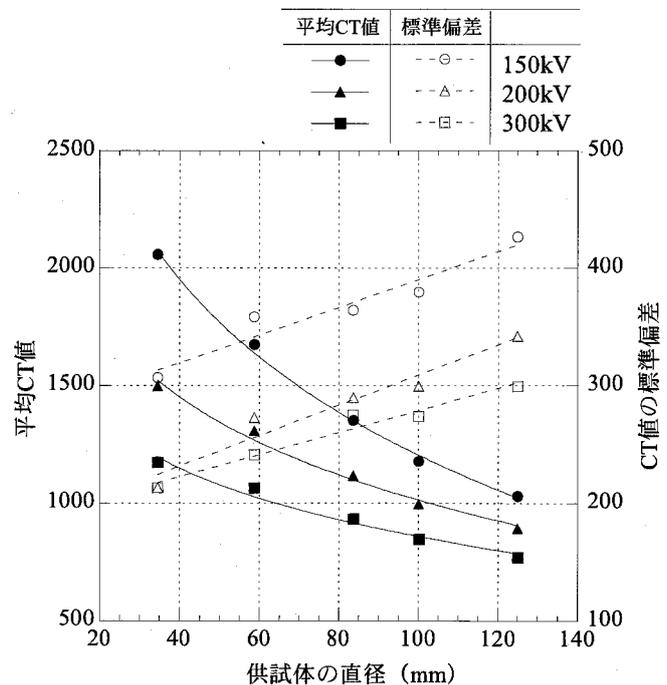


図-3.37 供試体の直径と平均 CT 値, 標準偏差

次に、管電圧 300kV のケースにおいて供試体中心部の直径 30mm の円に相当する領域の平均 CT 値を求めた。供試体の直径に対する供試体全体の平均 CT 値および供試体中心部の直径 30mm の円内の平均 CT 値の関係を図-3.38 に示す。

供試体全体の平均 CT 値と中心部の直径 30mm の平均 CT 値を比較すると、供試体の直径が大きくなるほど平均 CT 値は減少しているが、直径が大きくなるに従い、中心部の平均 CT 値の方が小さくなっている。これは、カップング効果により供試体の直径が大きい場合には外側ほど CT 値が高くなっていることが影響しているためと考えられる。

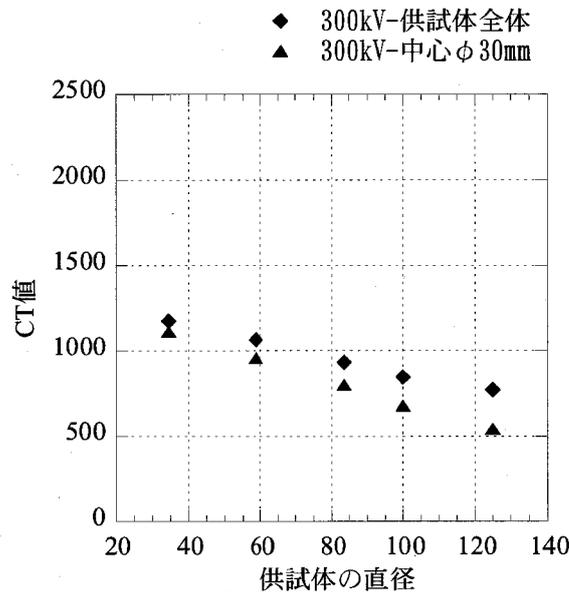


図-3.38 供試体の直径と平均 CT 値

4) 本研究での設定管電圧

通常、コンクリート円柱供試体の作製時や、コンクリート構造物からのボーリングコア採取時の供試体の寸法は、使用している骨材の最大寸法の 3 倍以上の直径とする。一般的な土木構造物は骨材の最大寸法が 20mm~40mm であり、円柱供試体の寸法は骨材の最大寸法の 3 倍以上として直径 100mm~125mm とすることが多い。本研究でもコンクリートの円柱供試体の寸法は最大で 125mm と比較的大きな供試体を用いているが、そのためには十分な電圧が必要であり、本研究での管電圧は 300kV と設定した。

(4) スライス厚による影響

1) スライス厚の設定概要

X線管から発生したX線はコーン状の広がりをもつが、タングステン製のコリメータにより扇状にコリメートされる。また、検出器側にも散乱X線を除去し、被検体を通過したX線のみを検出するようにコリメータが設置されている。コリメート可能なX線のスライス厚は本装置の場合、0.3mm、0.5mm、1.0mm、2.0mm、4.0mmである。このスライス厚はコリメータを通過時のX線厚であり、実際に被検体にX線が到達するときにはその厚さにはわずかながら変化が生じており、計測されるX線照射厚はスライス厚よりも若干小さくなることがわかっている。

図-3.39に異なるスライス厚でX線が空隙や骨材などを透過する際のイメージを示す。X線透過の対象となる空隙や骨材が小さい場合には、スライス厚が大きいとX線吸収率は周辺部分のX線吸収率と平均化されることを示している。

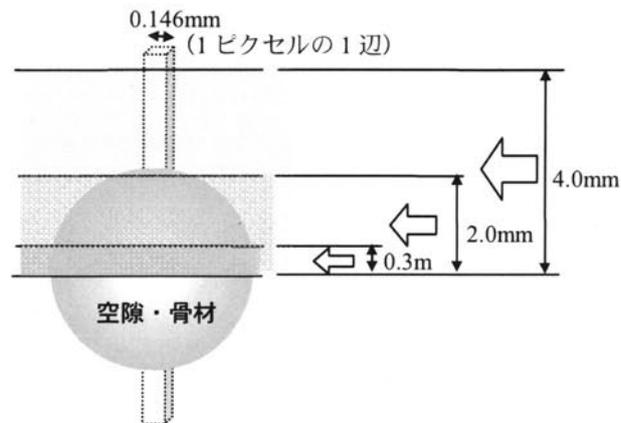


図-3.39 スライス厚の概要図

2) CT画像

管電圧 300kV で直径 125mm の供試体をスライス厚 0.3mm、0.5mm、1.0mm、2.0mm、4.0mm で撮影した X 線 CT 画像を図-3.40 に示す。同図には、画像中に白い点線で示した直径方向の CT 値の分布形状も示している。図-3.40 より、スライス厚が薄いほど撮影画像は鮮明であることがわかる。また、CT 値の分布形状を見るとスライス厚が薄いほど CT 値の変動が大きいことがわかる。

図-3.41 は図-3.40 の白い四角で囲んだ部分を拡大した X 線 CT 画像および、画像中の白い点線で示した線分上の CT 値の分布形状を示している。図-3.41 によると、スライス厚による画像の鮮明度の相違がより明確になるが、スライス厚が 0.3mm と小さい画像は、高感度のフィルムで撮影した画像のようにざらついた画像となる。また、CT 値の分布形状においても画像中の黒い空隙の部分の分布形状が相違していることが明らかであり、スライス厚が大きくなると、CT 値の分布形状の曲線は滑らかになる。

図-3.40 に示した CT 値の分布形状において、スライス厚が 0.3mm の場合には供試体周辺の空気の部分の CT 値の変動が大きいことがわかる。本来空気の部分の CT 値は均一であることから、スライス厚 4.0mm の CT 値の分布形状で示されるように供試体の周辺空気の部分の CT 値はほぼ一定であるはずである。ところが、スライス厚 0.3mm の供試体の周辺空気の部分の CT 値は、スライス厚を非常に小さく設定したためにノイズが発生し、CT 値が変動していると考えられる。図

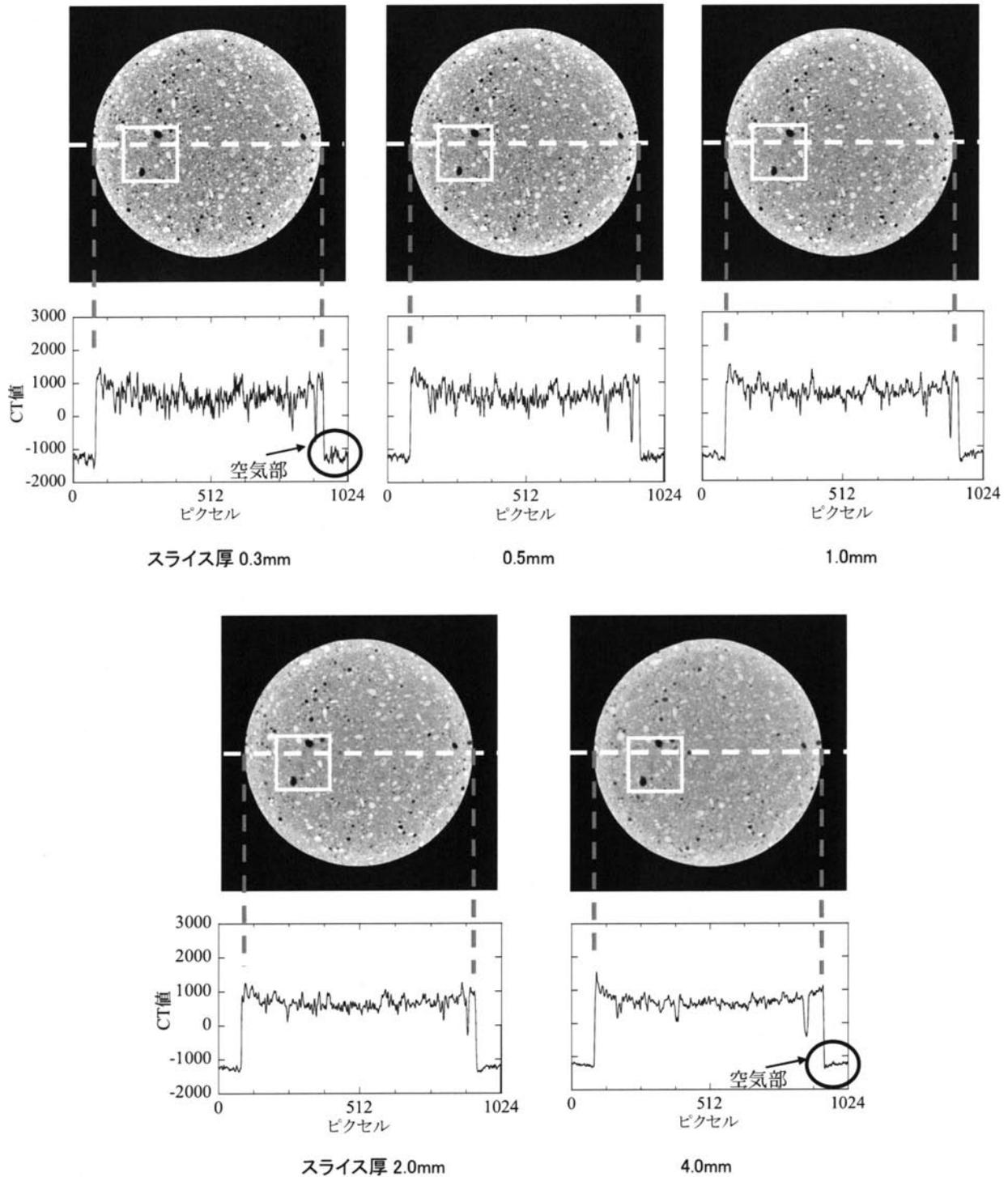


図-3.40 各スライス厚の画像および CT 値の分布形状

-3.40 に示した供試体周辺空気部の CT 値の分布形状によると、管電圧 300kV の場合、スライス厚が 1.0mm 以下になるとノイズによる影響が大きくなるといえる。スライス厚は最小で 0.3mm と設定可能であり、厚さ方向の影響を少なくして観察するためにはスライス厚を小さくすることが有効であると考えられるが、ノイズが発生して画像がざらつき、CT 値が変動する懸念がある。

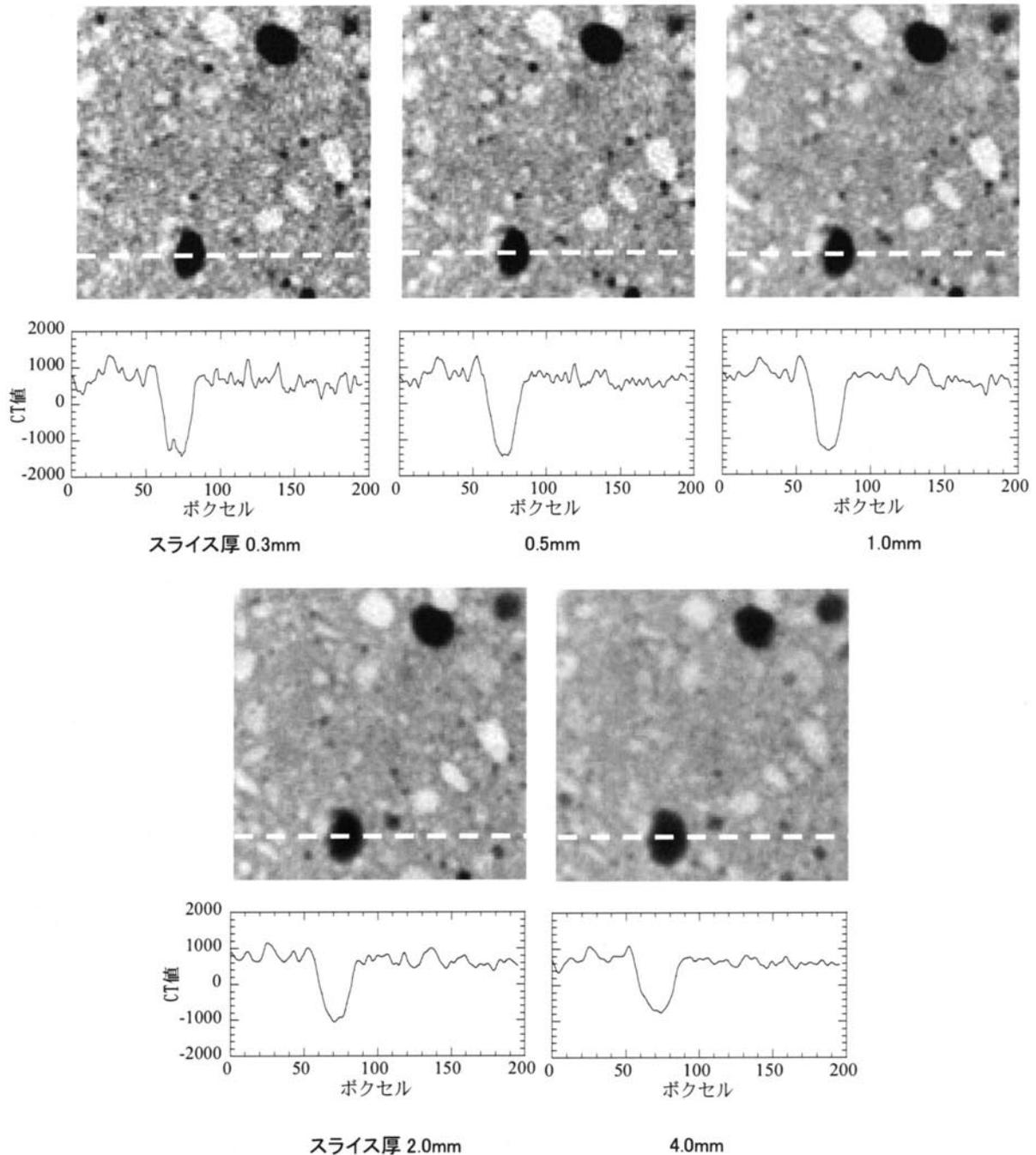


図-3.41 スライス厚毎の拡大 X 線 CT 画像と CT 値の分布形状

3) スライス厚の設定とCT画像の分解能

コンクリート供試体にX線CT法を適用する場合、セメント粒子は粒径が40 μm 以下であることからX線CT画像による判別は不可能である。また、土木学会標準示方書によると細骨材の標準粒度は1.2mmの通過百分率は50~90%であり、スライス厚を1mmもしくは2mmと設定した場合には大部分の細骨材はX線CT法による判別が困難であることがわかる。セメントと大部分の細骨材の判別が不可能であることから、X線CT法ではセメントと細骨材と水の混合物すなわちモルタルをひとつの構成材料として判別することが適当であると考えられる。一般的なコンクリートの粗骨材の密度は2.6g/cm³程度、モルタルの密度は1.9g/cm³程度であり、X線CT法では画像でこの判別が十分に可能である。

一方、コンクリートの練混ぜにより連行される空気によって生じる空隙もX線CT画像で判別できる。コンクリートの空隙には、コンクリートの練混ぜ時にモルタルに閉じ込められる比較的大きな空気泡であるエントラップドエア (entrapped air) とAE剤またはAE減水剤を用いて計画的にコンクリート中に均等に分布させた微小な独立した空気泡であるエントレインドエア (entrained air) がある。エントラップドエアの大きさは100 μm 程度以上であり、気泡の平均間隔を示す気泡間隔係数は400~700 μm 程度とされている。一方、エントレインドエアは数10~100 μm 程度であり、気泡間隔係数は150~200 μm 程度とされている¹⁹⁾。エントレインドエアはコンクリートのワーカビリティを改善するとともに、耐凍害性を著しく増加させることができる。

コンクリートの空隙は通常の場合、空気(エントレインドエア)連行剤を用いたコンクリートで4~5%、そうでない場合には2%程度である。笠井、池田編著「コンクリートの試験方法」²⁰⁾では、コンクリート中の空気の粒径別の測定方法を参考として表-3.6を示している。これによると、X線CTによる空気量の測定では粒径1mm以上のエントラップドエアが測定可能となっている。

以上より、本研究で使用したX線CT装置を用いてコンクリート供試体にX線CT法を適用する際に設定するスライス厚は1mm以上とすることが適当であり、これによって、コンクリートを粒径約1.0mm以上の骨材、モルタル、粒径約1mm以上の空隙(エントラップドエア)に分けて判別することが可能であるといえる。

表-3.6 硬化コンクリート中の空隙径の範囲と対応する測定方法¹⁹⁾

空隙の種類	空隙径の範囲								測定方法
水隙	←-----→								窒素ガス吸着脱着法 水銀圧入法
・ゲル空隙 ・毛細管空隙	←-----→								
気泡	←-----→								光学顕微鏡法
・小径エントラップドエア (AE剤によるものを含む)	←-----→								
・大径エントラップドエア	←-----→							←-----→	X線CT法
	1nm	10nm	100nm	1 μm	10 μm	100 μm	1mm	10mm	

3. 6. 4 基礎試験のまとめ

X線 CT法をコンクリートに適用するために、その基礎的事項を把握する目的で、供試体の大きさや管電圧、スライス厚を変えてX線 CT撮影を行い、CT画像、CT値の分布状況を検討した。

その結果、管電圧150kVの撮影画像は管電圧300kVの画像に比べて明度が高く、CT値も管電圧150kVの方が高いことがわかった。これは管電圧が小さいと発生するX線の透過エネルギーが弱いため、X線が供試体に吸収されやすく、その結果CT値が高くなるためと考えられる。また、管電圧150kVの条件で撮影をした場合にはビームハードニング現象によりカップリング効果が生じることがわかった。

同じ供試体を撮影した場合、管電圧を高くすると供試体断面の平均CT値は小さくなるが、同時にCT値のばらつきを示す標準偏差も小さくなる。また、同じ管電圧の場合には、供試体の寸法が大きくなると供試体断面の平均CT値は小さくなる。そして、供試体の直径の増加に対する平均CT値の減少の程度は異なり、直径が大きくなるほど平均CT値の減少の割合は少なくなるということが明らかとなった。

次に、スライス厚を変化させてX線 CT撮影を行った結果、スライス厚が薄いほど撮影画像は鮮明になり、CT値の分布形状においてもスライス厚が薄いほどCT値の変動が大きくなった。しかし、スライス厚が小さくなり、管電圧300kVの場合にスライス厚が1.0mm以下になると、ノイズの与える影響によって周辺空気のCT値が変動し、画像がざらつくことが明らかとなった。

以上のことから、本研究では、コンクリートの円柱供試体の寸法は最大で125mmと比較的大きな供試体を用いているため、十分な電圧が必要であり、管電圧は300kVと設定した。また、スライス厚は細かいものを観察するためには0.3mmと小さく設定できるが、ノイズが発生するため、1.0mm程度以上と設定した。スライス厚を1.0mm以上に設定すれば、コンクリートを粒径約1.0mm以上の骨材、モルタル、粒径約1mm以上の空隙（エントラップドエア）に分けて判別することが可能となる。

3.7 結言

本章では、X線CT法をコンクリートに適用するにあたり、X線やX線CT法の基本的な概念、画像の構成方法、本研究で用いたX線CT装置について述べた。また、後半ではコンクリート供試体のX線CT画像についてその特徴や留意点について述べ、最後に直径の異なるコンクリート供試体を用いて行った基本試験について述べた。各節の結論を以下に述べる。

第2節ではX線CT法の基本となるX線の性質と利用法の概要についてまとめた。X線CT法ではX線の多様な利用方法のうち、X線透過法を基本として画像再構成を行うが、これに関連する、X線の吸収と散乱、X線の減弱と吸収、X線の吸収係数について述べた。X線が物質を透過した後のX線の強度は、物質の厚さが増すほど現象する。また、X線が物質を透過する際のX線強度の減少の程度は物質の吸収係数（減弱係数）による。この吸収係数は、X線エネルギー、物質の密度、物質を構成する原子番号などの影響を受ける。

第3節ではX線CTスキャナ装置による画像の構成法について述べた。画像の再構成では畳込み逆投影法（Convolution Backprojection Method : CBP法）が用いられている。畳込み逆投影法ではその名のとおり、畳込み（Convolution）と逆投影（Backprojection）が行われる。畳込み逆投影法の特徴として、計算量が少なく、透過データに含まれるノイズに対して安定であるなどの利点がある。

第4節では本研究で用いた熊本大学所有のX線CT装置の性能および構造上の特徴などについて述べた。本研究で使用している産業用X線CT装置では対象物が工学材料であるので医療用のX線発生起電圧と比較して大きなX線発生起電圧装置を備えており、X線発生起電圧を150kV、200kV、300kVに変換して撮影を行うことができる。

第5節ではX線CT画像について述べた。CT画像は密度分布を定性的表したデジタル画像であり、画像構成要素の画素値として与えられるCT値は密度分布を定量化したものである。また、CT値は1ピクセルの面積を底面積、X線照射厚を高さとする直方体（ボクセル）に対して与えられる。

第6節ではX線CT法をコンクリートに適用するための基礎的な条件を検討する目的で実施した試験についてその方法と結果を述べた。試験は、直径の異なるコンクリート供試体を用い、管電圧やスライス厚などの条件を変化させてX線CT撮影を行った。この結果、本研究では、コンクリートの円柱供試体の寸法は最大で125mmと比較的大きな供試体を用いているため、十分な電圧が必要であり、管電圧は300kVと設定した。また、スライス厚は細かいものを観察するためには0.3mmと小さく設定できるが、ノイズが発生するため、1.0mm程度以上と設定した。これによってコンクリートを粒径約1.0mm以上の骨材、モルタル、粒径約1mm以上の空隙（エントラップドエア）に分けて判別可能なことが明らかとなった。

【参考文献】(第3章)

- 1) 岩井喜典, “CT スキャナ”, コロナ社, pp.1-186, 1979
- 2) Avinash C. Kak and Malcolm Slaney, “Principles of Computerized Tomographic Imaging”, Published under the sponsorship of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1987.
- 3) 久保司郎, “逆問題”, 培風館, 1992.
- 4) 岡本良夫, “逆問題とそのとき方”, オーム社, 1993.
- 5) J.Radon “Über die Bestimmung von Fnkction durch ihre Integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten”, Berichte Schsische Akademie der Wissenschaften 69, pp.262-267, 1917.
- 6) 長倉三郎ほか(編): “理化学辞典第5版”, 岩波(2000年4月)
- 7) 加藤誠軌, “X線で何がわかるか”, 内田老鶴圃, 1990
- 8) 川高喜三郎, “エックス線作業主任者試験 完全対策”, オーム社, 2002
- 9) 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, 博士学位論文, 2001
- 10) 辻岡勝美, “X線CT装置の機器工学(2)画像再構成と画像表示”, 日本放射線技術学会雑誌, pp.355-359, 2002.3
- 11) 内田勝, “基礎放射線画像工学”, オーム社, 1998
- 12) Oleh J. Tretiak, “Attenuated and Exponential Radon Transfoams”, Proc. of Symposia in Applied Mathematics, Vol.27, pp.25-33, 1982
- 13) 田村秀行, “コンピュータ画像処理入門(応用編)”, 総研出版, 1985
- 14) G.T. Herman et al., “Convolution reconstruction techniques for divergent beams”, Computers in Biology and Medicine, Vol.6, pp.259-270, 1976
- 15) GeoX CT Center, Kumamoto University, “Introduction to X-ray Computed Tomography (CT) Method”, Geo X seminar, short course program, June, 2006
- 16) 天明敏行, 尾原 祐三, 伊藤 剛, 村上祐治, “コンクリート円柱供試体にX線CT法を適用する際の管電圧と供試体寸法の影響について”, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, 2009, 投稿中
- 17) T. Mukunoki, J. Otani, Y. Obara and K. Kaneko, “Artifacts of X-ray CT data in the analysis of geomaterial properties”, X-ray CT for Geomaterials; Soils, Concrete, Rocks, pp.95-101, 2003
- 18) 大槻義彦, “エックス線”, 大月書店, 1982
- 19) 社団法人日本コンクリート工学会編, “コンクリート技術の要点96”, p.52, 1996
- 20) 笠井芳夫, 池田尚治, “コンクリートの試験方法(下)”, 技術書院, p.37, 1993