

2022 年度（令和 4 年度）

博士論文

粒子ファブリック解析手法の開発と X 線 CT 画像解析による
砂のせん断帯の微視構造評価に関する研究

2023 年 3 月

熊本大学大学院 自然科学教育部

工学専攻 広域環境保全工学教育プログラム

野原 慎太郎

Doctoral Thesis

Development of 3-D particle fabric analysis method and evaluation
of microstructure of shear zone in sand by X-ray CT image analysis

March 2023

Graduate School of Science and Technology

Kumamoto University

Japan

Shintaro NOHARA

目次

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的.....	1
1.2 本論文の構成.....	3
参考文献.....	5

第2章 X線 CT

2.1 概説.....	7
2.2 X線の発生メカニズム.....	7
2.3 X線 CTの撮影原理.....	9
2.4 CT画像.....	12
2.5 本研究で使用するX線 CT.....	12
参考文献.....	15

第3章 先行研究調査

3.1 概説.....	16
3.2 地盤の力学特性に係る諸要因.....	16
3.3 地盤のせん断帯内部の微視構造評価に関する既往研究.....	20
3.4 画像解析に関する既往研究.....	23
3.4.1 DIC解析, PIV解析.....	23
3.4.2 画像セグメンテーション.....	25
3.4.3 粒子の形状や方向を評価する画像解析技術.....	27
3.5 第3章のまとめ.....	29
参考文献.....	30

第4章 3次元粒子ファブリック解析手法の開発

4.1 概説	33
4.2 楕円体近似手法	33
4.2.1 理論	33
4.2.2 最適化計算	35
4.3 楕円体近似手法の妥当性検証	37
4.3.1 検証方法	37
4.3.2 検証結果	39
4.4 考察	45
4.5 第4章のまとめ	46
参考文献	47

第5章 一面せん断試験によるせん断の進行に伴う粒子構造の変化の評価

5.1 概説	48
5.2 試験方法	48
5.2.1 材料特性	48
5.2.2 試験装置と試験方法	49
5.3 画像解析方法	50
5.3.1 間隙率, 接触面率の計算	50
5.3.2 DIC 解析	51
5.3.3 粒子ファブリック解析	51
5.4 試験結果	52
5.4.1 試験結果	52
5.4.2 CT 画像および画像セグメンテーション	53
5.5 画像解析結果	58
5.5.1 代表体積要素の大きさ	58

5.5.2 間隙率, 接触面率	58
5.5.3 体積ひずみ, せん断ひずみ.....	65
5.5.4 粒子ファブリック解析.....	69
5.6 考察.....	72
5.7 第5章のまとめ.....	77
参考文献.....	78

第6章 X線CT用リングせん断実験装置の開発

6.1 概説.....	79
6.2 リングせん断容器.....	79
6.3 実験装置.....	83
6.4 実験手順の検討方法.....	85
6.5 実験手順の検討結果.....	87
6.6 第6章のまとめ.....	90
参考文献.....	91

第7章 リングせん断実験によるせん断の進行に伴う粒子構造の変化の評価

7.1 概説.....	92
7.2 実験材料.....	92
7.3 実験条件.....	92
7.4 画像解析方法.....	94
7.4.1 円周方向断面図の作成.....	94
7.4.2 画像変位計測.....	94
7.4.3 間隙率.....	95
7.4.4 粒子ファブリック解析.....	95
7.5 結果.....	97
7.5.1 実験結果.....	97

7.5.2 CT 画像.....	98
7.5.3 画像変位計測.....	107
7.5.4 間隙率.....	113
7.5.5 粒子ファブリック解析.....	127
7.6 考察.....	158
7.7 第7章のまとめ.....	164
参考文献.....	165

第8章 結論

8.1 本研究で得られた成果.....	166
8.2 今後の展望.....	168
参考文献.....	169

付録

付録 A 楕円体断面積の理論式の導出.....	170
付録 B 楕円体の一般式からの軸長さ, 回転軸, 回転角度を計算する方法.....	172
付録 C Gauss-Newton 法における計算方法.....	174

謝辞

論文目録

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

地盤に荷重が載荷されると、ひずみの増加に伴ってせん断応力が増加する。せん断が始まった直後は、応力とひずみは線型関係にあり、この状態はひずみ硬化と呼ばれる。変形が進行しせん断応力がピークを迎える頃より、地盤内部ではせん断帯が形成されてひずみが局所化し、ひずみ軟化と呼ばれる状態に移行してせん断応力が減少し始める。更に変形が進行すると、せん断応力がほとんど変化しなくなり、残留状態に移行する。地盤の支持力を正確に評価するためには、地盤内部に起きている現象をよく理解して応力とひずみの関係をモデル化し、力学特性を評価することが望ましい。しかし、荷重の載荷に伴う地盤内部の構造変化を捉えることは簡単ではない。また、地盤は異なる大きさや形状を有する無数の粒子の集合体（粒状体）であり、粒状材料におけるせん断帯の形成は局所性や不均質性を伴い^{1),2),3)}、全ての粒子が外力を支持する訳ではないことから^{4),5)}、粒子間の接触関係を理解し、微視的な構造を評価することが重要である。

ひずみの局所化を伴う地盤の破壊現象に対しては、数値解析を行うことでせん断破壊メカニズムを解明する試みが行われている。特に、個別要素法（DEM: Distinct Element Method）は、粒子を個々にモデル化し粒子の挙動を計算するため、応力とひずみの関係をモデル化する必要がなく、せん断帯の形成過程を再現することができる^{6),7)}。最近では、コンピューターの計算能力が飛躍的に向上し、取り扱う粒子数が増え、実際の砂粒子の形状に近い計算粒子がモデル化されることもある⁸⁾。但し、計算の妥当性は実データと比較し検証するべきであるが、比較対象となる実データが圧倒的に不足しているのが現状である。一方、実現象からせん断破壊メカニズムの解明を試みる研究としては、室内実験後の供試体や、現地から採取した自然の断層面もしくは地すべり面のサンプルから薄片のような観察用試料を作成し、顕微鏡を使ってせん断帯の微視構造を観察する手法が代表的である^{9),10)}。しかし、粒状体の変形は粒子間の接触関係に大きく影響されるため、2次元ではなく、3次元でせん断帯の粒子構造を評価することが望ましい。加えて、地盤のせん断破壊は進行性破壊であることから、せん断帯が形成される過程も含めて粒子構造の変化を定量的に評価することが必要であるが、先行研究の大半はせん断帯が形成された後の評価に留まっている。

また、ひずみ軟化挙動に焦点を当てた研究に比べ、ひずみ軟化が進行し残留強度に至った状態に着目して行われた研究は少ない。大変形後の挙動が問題となるような場面においては、残留状態を想定して力学特性を評価しなければならない。例えば、土構造物であるフィルダムの耐震性能照査においては、三軸圧縮試験を行って得られた堤体材料のピーク強度を物性値として与えることが一般的であるが、一定以上の変形量が想定される場合、ピーク強度以降のひずみ軟化状態もしくは残留状態の強度定数を用いることが望ましいとされている¹¹⁾。さらに、地すべりや断層のような自然環境の中でのせん断現象においても、残留状態を想定することが重要である。我が国の地すべりの多くは、過去に滑りを経験しており、人工的な掘削や侵食の

進行によって再び滑り出す再活動型の地すべりである¹²⁾。従って、すべり面は既に残留状態に至っていると考えられ、現実的な安定評価を行うには残留強度を評価することが重要である。また、現在のすべり面付近の微視的構造から、土が経験した応力履歴や今後の挙動を推定する試みもなされている¹³⁾。例えば、断層露頭から採取した断層ガウジ（断層運動によって岩石が破碎され、粘土のように細かくなった領域）を対象に、断層運動によって破碎された母岩の岩片粒子の配向性（SPO: Shape Preferred Orientation）を評価し、断層の運動メカニズムを推定する試みがなされている^{14), 15)}。

これらの課題に対し、砂の内部構造を非破壊で評価する手法として、X 線 CT (Computed Tomography) が注目されている¹⁶⁾。2000 年代には、地盤材料における X 線 CT の国際会議が複数開催され、地盤工学分野における X 線 CT の有用性が広く認識された^{17), 18)}。また、焦点寸法が数十 μm 以下のマイクロフォーカス X 線 CT が実用化されたことで、数百 μm 程度の砂粒子を鮮明に判別できる高解像度の CT 画像を取得することが可能になっている^{19), 20)}。2010 年代半ばには、デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation; DIC) や粒子画像速度測定法 (Particle Image Velocimetry; PIV) のような画像解析技術が普及した。このことによって、実験と CT 撮影を連動して行うことで、载荷に伴う変位やひずみを定量的に評価することが可能になり^{21), 22)}、実際の現象に応じてせん断帯の形成メカニズムを理解できるようになった。今後も、ハードウェア側の開発だけでなく、ソフトウェア側を充実させ、ひずみの局所化に応じた粒子構造の変化を定量的に評価する必要がある。

以上のことを背景とし、本研究では砂内部にせん断帯が形成される過程について X 線 CT で可視化し、CT 画像の画像解析を行ってせん断帯内部の微視構造を定量的に評価する。まず、粒子の形状や方向を 3 次元で評価する画像解析手法の開発を行う。粒子個々の配列や配向は、粒状体の力学挙動に影響を及ぼす重要な要素の一つである。また、過去の研究において、せん断帯内部では粒子回転が高頻度で起きている可能性が指摘されており^{1), 2)}、せん断帯の形成メカニズムを理解するためには、せん断帯内部における粒子の方向を評価することが必要不可欠である。一方、CT 画像のデータは膨大であり、評価対象となる粒子の数も多く、手作業で計測することは非現実的である。ゆえに、粒子の 3 次元形状や方向を体系的かつ客観的に評価できる画像解析手法の開発が必須である。また、他分野においても、粒子の 3 次元形状や方向を評価するニーズは多い。例えば、堆積学においては、堆積物粒子の卓越方向から、当時の堆積環境を推定する試みがなされている²³⁾。つまり、粒子の 3 次元形状や方向を評価可能な画像解析手技術は、本研究の分野以外においても貢献できる要素が多いと考えられる。

次に、砂を対象に行われた一面せん断試験の CT 画像を対象に、せん断帯内部の構造を定量的に評価する。DIC 解析を行ってひずみを定量的に評価するとともに、本研究で開発した画像解析手法を適用し、せん断の進行に伴って変化する粒子の方向を評価し、ひずみの局所化と粒子構造の相互関係について検討する。さらに、X 線 CT を使って内部構造を可視化できる新たな力学試験装置として、リングせん断実験装置の開発を行う。リングせん断実験は、せん断変位を円周方向に行う試験方法であり、長いせん断変位を与えて残留強度に至った状態を室内で

再現できる実験方法である。本研究では、X 線 CT による撮影に対応した X 線 CT 用のリングせん断実験装置を開発し、一般的な力学試験装置では再現することが難しかった大変形現象を室内で再現し、ひずみ硬化に始まってひずみ軟化を経て残留状態に至る過程の粒子構造を画像解析によって定量的に評価する。

本研究の遂行によってせん断帯内部の粒子構造やひずみの局所化に関する知見が蓄積され、将来的には、数値計算等の方法と連携することによって、X 線 CT で取得された CT 画像データから局所的な応力場を評価できる可能性もあり、実現現象に即した応力-ひずみモデルを構築することも期待できる。また、せん断による土の微視構造の変化を定量的に明らかにすることにより、現地で採取したサンプルの微視構造から今後の挙動を推定するような評価にも役立つと考えられる。

1.2 本論文の構成

本論文の各章における内容を以下に列挙し、その構成を図 1-1 に示す。

第 1 章 序論

本研究の背景と目的を示し、本論文の構成について述べる。

第 2 章 X 線 CT

X 線発生メカニズムと X 線 CT の撮影原理について述べる。また、本研究で使用するマイクロフォーカス X 線 CT の機器仕様を示す。

第 3 章 先行研究調査

地盤のせん断帯の内部構造を評価した既往研究及び CT 画像を対象とした画像解析に関する既往研究を調査した結果について述べる。

第 4 章 3次元粒子ファブリック解析手法の開発

本研究で開発した粒子の 3次元形状や方向を評価可能な CT 画像を対象とした画像解析手法（3次元粒子ファブリック解析手法）の詳細について述べる。また、開発した画像解析手法の妥当性を検証し、本手法の特徴について整理する。

第 5 章 一面せん断試験によるせん断の進行に伴う粒子構造の変化の評価

砂を用いて行われた一面せん断試験の CT 画像に対して、本研究で開発した粒子ファブリック解析を適用し、せん断の進行に伴って変化する粒子の方向について定量的に評価する。また、DIC 解析を行ってひずみ分布を求め、せん断帯における粒子構造の変化とひずみの関係について整理する。

第6章 X線CT用リングせん断実験装置の開発

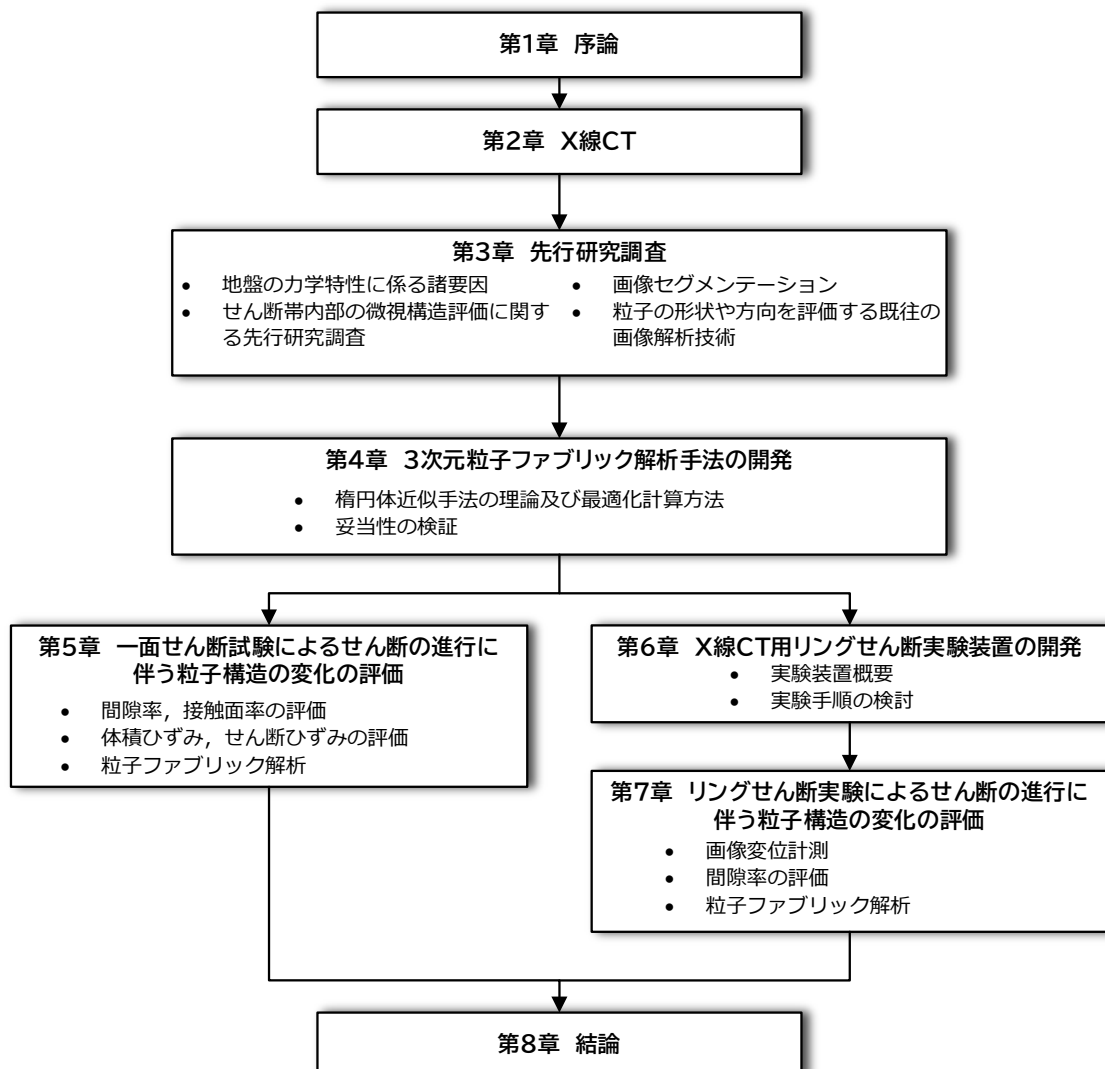
本研究で開発したX線CT用のリングせん断実験装置の詳細について述べる。また、開発したリングせん断実験装置を用い、実験手順について検討した結果を示す。

第7章 リングせん断実験によるせん断の進行に伴う粒子構造の変化の評価

本研究で開発したX線CT用のリングせん断実験装置を用いて実験を行い、大変形を与えた場合の粒子構造の変化について定量的に評価する。

第8章 結論

各章で得られた知見をまとめ、今後の展望について述べる。



付録A: 楕円体断面面積の理論式の導出

付録B: 楕円体の一般式から軸長さ, 回転軸, 回転角度を計算する方法

付録C: Gauss-Newton法における計算方法

図 1-1 論文の構成

参考文献

- 1) Matsuoka, H. (1974): A microscopic study on shear mechanism of granular materials, *Soils and Foundations*, Vol.14, No.1, pp.29-43.
- 2) Oda, M.; Kazama, H. (1998): Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils, *Geotechnique*, Vol.48, No.4, pp.465-481.
- 3) Soga, K., O'Sullivan, C. (2010): Modeling of Geomaterials Behavior, *Soils and Foundations*, Vol.50, No.6, pp.861-875.
- 4) Maeda, K., Hirabayashi, H. (2006): Influence of Grain Properties on Macro Mechanical Behaviors of Granular Media by DEM, *Journal of Applied Mechanics*, Vol.9, pp.623-630.
- 5) 佐竹正雄(2004): 粒状体の誘導異方性について, *応用力学論文集*, Vol.7, pp.725-736.
- 6) Iwashita, K., Oda, M. (2000): Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method, *Powder Technology*, Vol.109, pp.192-205.
- 7) 榑原辰雄, 加藤昭二, 吉村優治, 澁谷啓(2008): 砂のような粒状材料のせん断挙動およびせん断層に与える粒子形状の影響, *土木学会論文集 C*, Vol.64, No.3, pp.456-472.
- 8) ヤンリ, 大坪正英, 桑野玲子, サデックナディミ, バシリオスアンジェリダキス(2021): 粒状体の粒子形状を再現した個別要素法解析, *生産研究*, Vol.73, No.5, pp.355-358.
- 9) Yang, Z.X., Lit, X.S., Yang, J. (2008): Quantifying and modelling fabric anisotropy of granular soils, *Geotechnique*, Vol.58, No.4, pp.237-248.
- 10) 相山光太郎, 田中姿郎, 佐々木俊法(2017): 断層破碎帯の詳細構造解析に基づく断層の活動性の検討, *応用地質*, Vol.58, Np.1, pp.2-18.
- 11) 猪股純, 安田成夫, 金銅将史ほか(2005): 大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料, *国土技術政策総合研究所試料*, No.244.
- 12) 農林水産省農村振興局 (2021): 土地改良事業計画設計基準 農地地すべり防止対策 4.地すべりのメカニズム, pp.430-451.
- 13) 村尾英彦, 釜井俊孝, 野坂徹: リングせん断試験のせん断面と地すべり面における微視的構造の比較(2015), *日本地すべり学会誌*, Vol. 52, No.3, pp.123-131.
- 14) Cladouhos, T.T. (1999): Shape preferred orientations of survivor grains in fault gouge, *Journal of Structural Geology*, Vol.21, No.4, pp.419-436.
- 15) Nohara, S., Tanaka, S., Aiyama, K. (2019): Three-dimensional shape and orientation analysis of rock fragments in fault gouge by using micro focus X-ray CT scanner, 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future YSRM2019, pp.766-770.
- 16) Ketcham, R.A., Carlson, W.D. (2001): Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery -Applications to the geosciences-, *Computers and Geosciences*, Vol.27, No.4, pp.381-400.
- 17) Otani, J., Obara, Y. (2004): X-ray CT for geomaterials *Soils, Concrete, Rocks.*, Taylor & Francis.

- 18) Desrues, J. Viggiani, G., Besuelle, P. (2010): *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials*, Wiley-ISTE.
- 19) Cnudde, V., Boone, M.N. (2013): *High-resolution X-ray computed tomography in geosciences -A review of the current technology and applications-*, *Earth-Science Reviews*, Vol.123, pp.1-17.
- 20) Plessis, A., Roux, S.G., Guelpa, A. (2016): *Comparison of medical and industrial X-ray computed tomography for non-destructive testing*, *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol.6, pp.17-25.
- 21) Watanabe, Y., Lenoir, N., Otani, J., Nakai, T. (2012): *Displacement in sand under triaxial compression by tracking soil particles on X-ray CT data*, *Soils and Foundations*, Vol.52, No.2, pp.312-320.
- 22) Tudisco, E., Ando, E., Cailletaud, R., Hall, S.A. (2017): *TomoWarp2 A local digital volume correlation code*, *SoftwareX*, Vol.6, pp.267-270.
- 23) 横川美和(1998): *堆積粒子の配列が語るもの*, *地球科学*, Vol.52, No.5, pp.370-377.

第2章 X線CT

2.1 概説

本研究は、地盤内部に形成されたせん断帯の構造を評価するため、X線CT (Computed Tomography) を用いる。X線CTは、X線が物体を透過する際にエネルギーの一部が吸収される特性を利用し、X線の線吸収係数の濃淡を3次的に描写することで、物体内部の構造を非破壊の状態で見ることが出来る。1895年にRöntgenによってX線が発見され、1972年に英国EMI社のHounsfieldによって第1号機となる医療用のX線CTが開発された¹⁾。その後、撮影時間の短縮、画質の改良といった改良が施され、現在は医療診断において欠かせない装置となっている。一方、物体内部を非破壊で見るといったニーズは多くの分野で共通しており、様々な分野でX線CTの導入が進められている。医療分野では人体へのX線被曝量を極力抑える必要があるため、X線の照射時間やX線強度に制約が多いが、人体以外の「物」を対象とする場合、X線被曝は考慮する必要がない。そのため、高解像度のCT画像を取得することを主な目的として装置開発が進められ、自動車部品に代表される鋳物部品のような大型試料に対しては透過能力が大きい産業用X線CTが、小型の工業用部品や電子部品のような小型試料に対しては高解像度のCT画像が取得できるマイクロフォーカスX線CTが適用されることが多い。また、地盤工学、岩盤工学、地質学においてもX線CTの適用が進められている^{2),3)}。1990年代後半には、Desrués(1996)によって三軸圧縮試験後の砂の供試体を対象としてCT撮影がなされた⁴⁾。国内においては、1990年代後半から2000年代前半にかけて砂及び岩石を対象としてX線CTの適用が図られた。その後も地盤工学、岩盤工学、地質学分野において、X線CTを活用する試みがなされている⁵⁾⁻⁸⁾。

本章では、まずX線の発生メカニズムについて述べる。次に、X線CTの撮影原理について記載する。最後に、本研究で使用するX線CTの機器仕様について整理する。

2.2 X線の発生メカニズム

X線は電磁波の一種であり、連続X線と特性X線に大別される。X線CTでは連続X線が用いられ、X線回折分析のような鋳物組成を同定する際には特性X線が用いられるが、X線の発生原理はいずれも共通である。図2-1にX線の発生原理に関する模式図を示す。X線は、真空状態を維持したX線源において発生する。フィラメントに電流を流して加熱し、フィラメントを陰極、ターゲットを陽極として高電圧をかけると、フィラメントから熱励起された電子が飛び出し、加速された電子がターゲットに拘束で衝突する。この時、陽極と陰極の間にかけた電圧は管電圧、流した電流は管電流と呼ばれる。電子がターゲットに衝突する際、電子エネルギーの大部分は熱に変わるが、一部はX線としてターゲットから発生する。発生したX線には2種類のX線が含まれており、連続的なスペクトルを有するX線は連続X線、特定の波長だけが強い不連続なX線は特性X線と呼ばれる。連続X線は、電子がターゲットに衝突し急激

に減速されて発生したものであることから制動X線，あるいは様々な波長を有するX線であり，白色光になぞらえて白色X線と呼ばれることもある．一方，特定の波長を有するX線は特性X線または単色X線と呼ばれる．

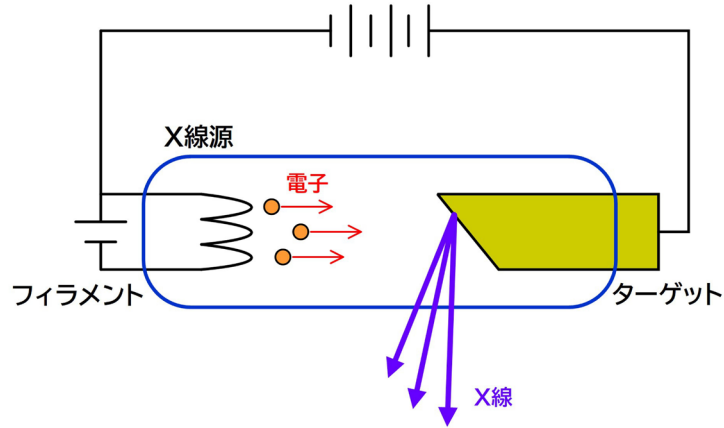


図 2-1 X線の発生原理の模式図

ここで，管電圧に応じた連続X線のスペクトル変化の概念図を図 2-2 に示す．管電流が一定であり，管電圧が V_a, V_b, V_c の順に高い場合，連続X線のスペクトルは図 2-2 のように変化する．管電圧を変えると，連続X線のピーク位置は変わるが，特性X線のスペクトル位置は変わらない．また，管電圧を高くするほど，連続X線の最短波長は短くなり，透過能力が大きくなる．さらに，管電圧が低いほど線質が軟らかい，管電圧が高いほど線質が硬いと表現することがある．なお，本研究で使用するX線CTは連続X線が用いられていることから，特に断りがない限り，X線は連続X線を指すものとする．

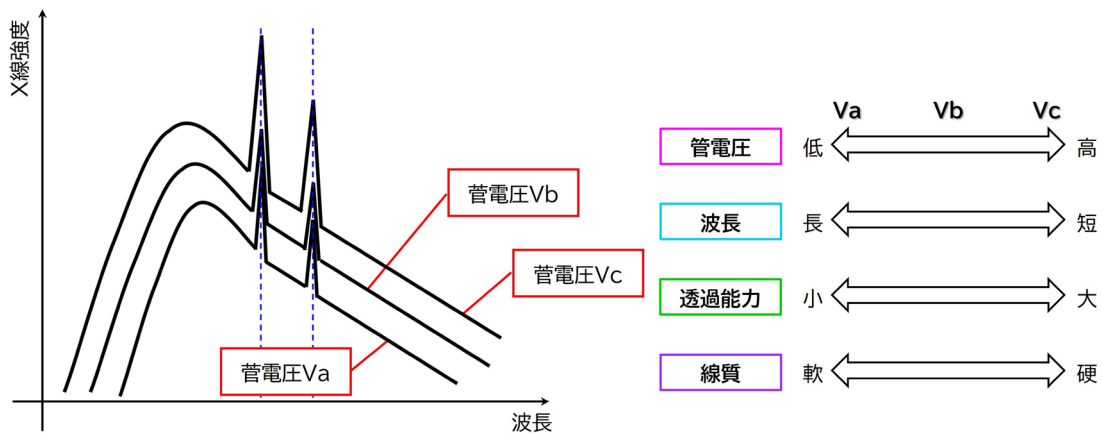


図 2-2 連続X線のスペクトル変化に関する概念図

X線は物体を透過する際，そのエネルギーの一部が吸収されるが，吸収量は物体の種類や大きさによって異なる．この関係は，式(2.1)の関係式によって表される．これは，物体の線吸収係数や透過距離に応じて，X線が指数的に減衰することを意味している．

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (2.1)$$

ここに、 I は透過後のX線強度、 I_0 は透過前のX線強度、 x はX線の透過距離、 μ は物質の線吸収係数を表す。

式(2.1)の線吸収係数 μ は、質量吸収係数 μ_m を用いて式(2.2)で表すことができる。

$$\mu = \mu_m \rho \quad (2.2)$$

ここに、 ρ は物体の密度である。

式(2.2)は、質量吸収係数 μ_m が同じであれば、密度が高いほどX線の減衰率が大きいことを意味している。また、質量吸収係数 μ_m は、照射するX線のエネルギーや物体の原子番号に依存するとされており、式(2.3)が提案されている⁹⁾。

$$\mu_m = a \frac{Z^{3.8}}{E^{3.2}} + b \quad (2.3)$$

ここに、 E はX線エネルギー、 Z は原子番号、 a と b は定数である。

式(2.3)は、質量吸収係数 μ_m は原子番号 Z の影響を強く受けることを意味しており、X線エネルギーが低いほどその影響が顕著に表れることを意味している。反対に、X線エネルギーが高いと、原子番号の差が有意ではなくなる。従って、鉍物組成の違いを明瞭にするためには、低エネルギーのX線を物体に照射する必要がある。

2.3 X線CTの撮影原理

X線CTは、医療用X線CT、産業用X線CT、マイクロフォーカスX線CTに大別される。撮影原理は医療用X線CTと産業用X線CT・マイクロフォーカスX線CTで大きく異なっている。医療用X線CTは、撮影対象は寝台で固定され、X線源と検出器が回転することによってCT撮影が行われる。以前は、1回のスキャンを行った後、次の断面に撮影対象を動かすといった動作を繰り返すことでCTスキャンが行われていたが、最近では撮影対象を定速で移動させ、X線源と検出器を高速回転することでCTスキャンが行われており（ヘリカルスキャン）、撮影時間の短縮化が図られている。一方、産業用X線CTとマイクロフォーカスX線CTは、X線源と検出器は固定であり、ターンテーブルに載せられた撮影対象が360°回転することでCT撮影が行われる。一般的に、産業用X線CTは管電圧が最大450kV程度、管電流が数mA程度、焦点寸法が数mm程度であり、透過力を必要とする金属材料や大型試料を撮影する場合に用いられる。一方、マイクロフォーカスX線CTは管電圧が最大450kV程度、管電流が500 μ A程度、焦点寸法が100 μ m以下であり、樹脂製品や小型試料を高解像度で撮影する場合に用いられる。

焦点寸法の違いによる画像の差について、**図 2-3**に概念図を示す。フィラメントから飛び出した電子がターゲットに衝突すると、X線が発生する。この時、X線の発生ポイントは理想では点であるが、実際には有限の大きさ（焦点寸法）を持っている。焦点寸法が小さいほど、拡大率が高い条件であっても輪郭部が鮮明なCT画像を取得することができる（**図 2-3(a)**）。し

かし、焦点寸法が大きいほど輪郭部がぼやけて不鮮明な CT 画像となる (図 2-3(b)). 焦点寸法は、消費電力 (管電圧と管電流の積) によっても変化する. 消費電力が小さいほど焦点寸法は小さくなり、高解像度の CT 画像を取得できる. しかし、密度が高い試料や大きな試料を CT 撮影する場合、入射する X 線のエネルギーが不足すると、画像の S/N 比が低下してノイズの多い画像になってしまう. 従って、焦点寸法は大きくなるものの、密度が高い試料や大きな試料を対象にする場合は、管電圧もしくは管電流を大きくしなければならない.

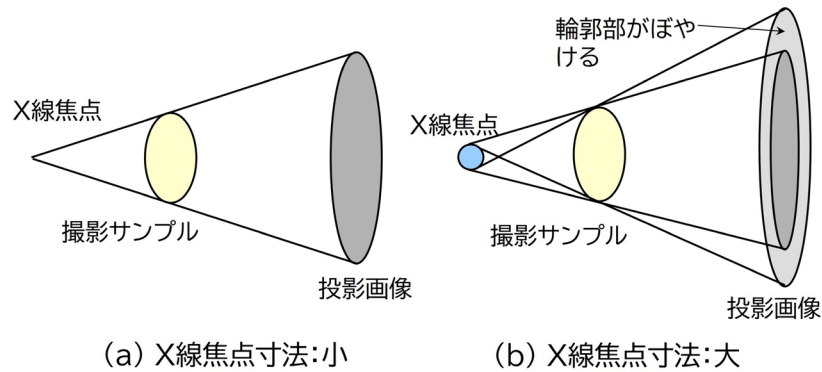


図 2-3 焦点寸法の違いによる画像の差

産業用 X 線 CT の主な用語の定義について規定された JIS 規格によると¹⁰⁾、焦点寸法の大きさに応じて、線源の呼び名が以下のように変わる. 本研究では、マイクロフォーカス X 線 CT を主に用いることから、特に断りがない限り、X 線 CT と記述された場合、マイクロフォーカス X 線 CT を指すものとする.

- (a) ミリフォーカス：焦点寸法が 0.5mm 以上のもの.
- (b) ミニフォーカス：焦点寸法が概ね 0.1~0.5mm のもの.
- (c) マイクロフォーカス：焦点寸法が 1~100 μm のもの.
- (d) ナノフォーカス：焦点寸法が 1 μm 未満のもの.

X 線 CT は、試料を 360° 回転する間に、所定の枚数の X 線投影画像が検出器で取得される. X 線投影画像を対象に再構成計算を行うことで、3次元の CT 画像を取得される. 一方、試料を 180° だけ回転することでも、CT 画像を取得することができる. 360° の方向から X 線投影画像を取得する撮影方式をノーマルスキャンと呼ぶのに対し、180° の方向から X 線投影画像を取得する撮影方式をハーフスキャンと呼ぶ. ハーフスキャンは、ノーマルスキャンに比べて撮影時間が半分に短縮できるが、撮影対象を X 線に露光させる時間も半分になってしまうので、画像の S/N 比が低下する. ここで、X 線 CT の撮影原理に関する概念図を図 2-4(a)に示す. 図 2-4(a)に示すように、X 線源から検出器までの距離は SID (Source to Image Distance)、X 線源からサンプルまでの距離は SOD (Source to Object Distance)、撮影視野は FOV (Field Of View) と呼ばれる. 拡大率、FOV、画素サイズは、式(2.4)によって計算される.

$$\text{拡大率} = \text{SID} / \text{SOD}$$

$$\text{FOV} = \text{検出器サイズ} / \text{拡大率} \quad (2.4)$$

$$\text{画素サイズ} = \text{FOV} / \text{検出器画素数}$$

式(2.4)によれば、撮影対象をX線源に近づけSODを小さくすることで、CT画像の拡大率は高くなり、画素サイズが小さいCT画像を取得できる。しかし、その分FOVは小さくなり、撮影視野が狭くなってしまうため、試料の大きさによっては全体が映らない。この場合、撮影対象をX線源から離してSODを大きくし、FOVを大きくした状態で撮影しなければならない。あるいは、図2-4(b)に示したように、検出器の位置を中心からずらすことで、FOVを大きくすることも可能である。この撮影方式は、オフセットスキャンと呼ばれる。オフセットスキャンは、回転中心を検出器中心からずらすことで、検出器の幅が仮想的に広がる。従って、拡大率を維持したまま、FOVを広くしたい場合に有効な撮影方式である。但し、ノーマルスキャンに比べると画像のS/N比は低下するため、撮影条件に工夫が必要である。

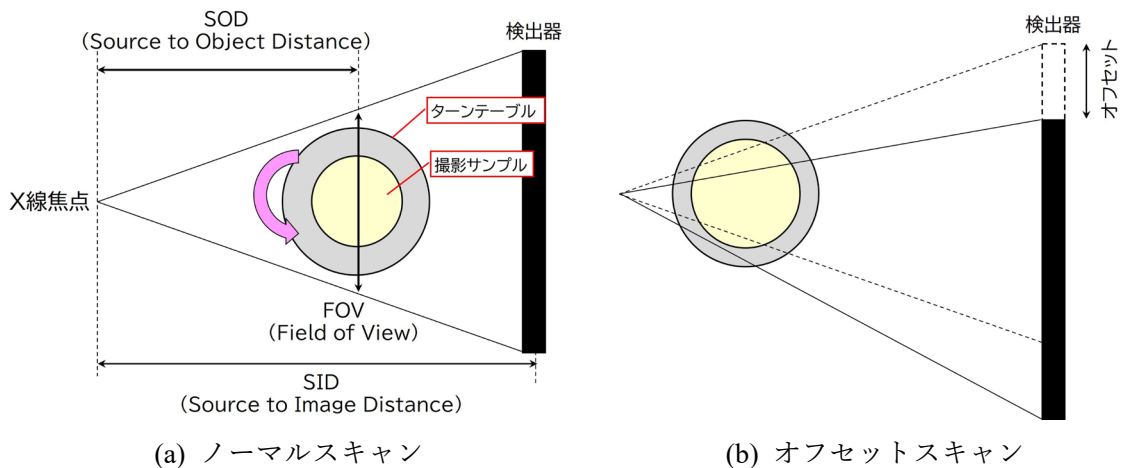


図 2-4 X線CTの撮影方式

ここで、CT撮影を行う際に設定される代表的な撮影条件について、以下に整理する。なお、使用する機器によって名称が異なる可能性がある。

(a) 管電圧 (V)

X線源において陰極と陽極の間にかかる電圧値。

(b) 管電流 (A)

X線源において流す電流値。

(c) SID, SOD (mm)

X線源から検出器までの距離 (SID) 及びX線源から撮影対象までの距離 (SOD)。

(d) プロジェクション

サンプルを360°回転する間に撮影するX線投影画像の枚数。

(e) 露光時間 (sec)

1枚のX線投影画像を取得する間のX線照射時間。

(f) 積分回数

1枚のX線投影画像を取得する間に撮影される回数。

(g) ゲイン

検出器の感度に関する設定値。検出器で測定された値は、ゲインを大きくすることで電氣的に増幅されるが、ノイズ成分も同様に増幅される。

(h) 金属フィルター

ビームハードニングを抑制する目的でX線源直近に設けられる金属のフィルター。金属フィルターを設けることによって、X線が物体を透過する前に軟X線をカットできる。但し、軟X線に感度の高い物質のコントラストは低下する。

撮影時間は、プロジェクション、露光時間、積分回数の積によって計算される。プロジェクション、露光時間、積分回数を大きくするほどノイズが少ないCT画像を得られる。しかし、撮影時間が長くなるほどX線源内部の真空状態が低下し、撮影が失敗する可能性が高くなる。一般的には、1回当たりの撮影時間が30～60分程度に収まるよう撮影条件が設定される。

2.4 CT画像

物体を透過したX線は検出器によって計測され、デジタル変換されることによってCT画像が出力される。検出器は、X線が入射すると発光するシンチレーターによって成る。近年は検出器としてフラットパネルディテクタ (FPD: Flat Panel Detector) が用いられることが多くなっている¹¹⁾。FPDは、X線検出器素子が平面上に並んだ構造になっており、1回のスキャンで広範囲を撮影できる検出器である。FPDは、大きさが大きいほど1回の撮影における撮影視野が広く、出力階調が大きいほどコントラスト分解能が良い。

2次元画像における最小要素はピクセル (pixel) と呼ばれるが、3次元のCT画像を構成する最小要素はボクセル (voxel) と呼ばれる。ボクセルには、物体の線吸収係数に相当する値が格納されている。CT撮影時に設定したSIDやSODによって決定した画素サイズは、ボクセルにおける1辺当たりの大きさに相当する。

2.5 本研究で使用するX線CT

本研究では、熊本大学に設置されているマイクロフォーカスX線CT (東芝社製TOSCANNER-32300FPD) 及び電力中央研究所に設置されているマイクロフォーカスX線CT (テスコ社製TXS-CT 450/160) を使用する。TOSCANNER-32300FPDの外観写真を図2-5に、TXS-CT 450/160の写真を図2-6に示す。また、TOSCANNER-32300FPDの機器仕様を表2-1に、TXS-CT 450/160の機器仕様を表2-2に示す。



図 2-5 TOSCANER-32300FPD の外観図 (熊本大学)¹²⁾

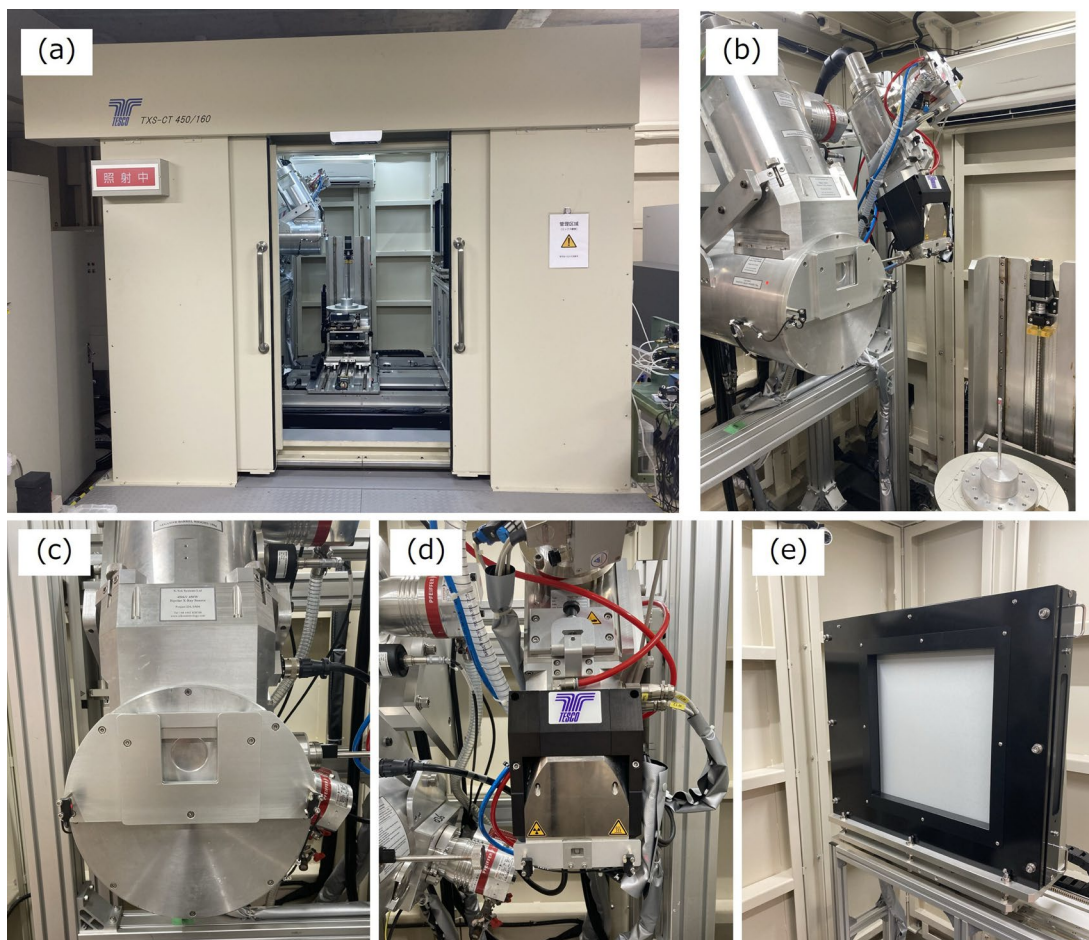


図 2-6 TXS-CT 450/160 (電力中央研究所)¹³⁾

表 2-1 TOSCANNER-32300FPD の機器仕様¹²⁾

項目	仕様
X線源	管電圧：20～230kV 管電流：0～0.61mA X線照射厚 2～4 μ m
検出器	FPD 出力階調：16bit
ステージ	最大積載荷重：25kg

表 2-2 TXS-CT 450/160 の機器仕様¹³⁾

項目	仕様
X線源 (450kV線源)	最大管電圧：450kV 最大管電流：500 μ A 最小焦点寸法：50 μ m
X線源 (160kV線源)	最大管電圧：160kV 最大管電流：500 μ A 最小焦点寸法：4 μ m
検出器	FPD 画素数：2048 \times 2048 サイズ：409.6mm 出力階調：16bit
ステージ	大きさ： ϕ 350mm 耐荷重：60kg

TXS-CT 450/160 の照射ボックスは、人が中に立ち入って作業可能なスペースが確保されている（図 2-6(a)）。また、コンビネーションタイプのマイクロフォーカス X 線 CT であり（図 2-6(b)）、撮影する材料の大きさや材質によって線源を使い分けることが可能である。450kV 線源は、最大管電圧が 450kV、最大管電流が 500 μ A であり、透過力を必要とする岩石試料や大きなサンプルの CT 撮影に適している（図 2-6(c)）。160kV 線源は、最大管電圧が 160kV、最大管電流が 500 μ A であり、砂試料や小さなサンプルを高精細に CT 撮影することが可能である（図 2-6(d)）。なお、本研究では、450kV 線源は使用しておらず、160kV 線源のみを使用している。検出器としてはフラットパネルが搭載されており（図 2-6(e)）、前後左右に移動が可能で、図 2-4(b)に示したようなオフセットスキャンによる CT 撮影も行うことができる。TXS-CT 450/160 には画像再構成ソフトウェアとして Tomoshop（株式会社緑野リサーチ）がインストールされており、フラットパネルで取得した X 線の投影画像を基に、Tomoshop を使って再構成計算し、CT 画像が取得される。

参考文献

- 1) 平尾芳樹(2008): 医療用 X 線 CT 技術の系統化調査報告, 国立科学博物館技術の系統化調査報告 (第 12 集) .
- 2) 大谷順(2017): X 線 CT から見る土質力学 1. 講座を始めるにあたって, 地盤工学会誌, Vol.65, No.10(717), pp.39-40.
- 3) 佐藤晃, 棕木俊文(2015): X 線 CT の基礎知識と岩盤工学への適用, Journal of MMIJ, Vol.131, pp.277-284.
- 4) Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M., Mazerolle, F. (1996): Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography, Geotechnique, Vol.46, No.3, pp.529-546.
- 5) Ketcham, R.A., Carlson, W.D. (2001): Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences. Computers and Geosciences, Vol.27, No.4, pp.381-400.
- 6) Otani, J., Obara, Y. (2004): X-ray CT for geomaterials Soils, Concrete, Rocks, Taylor & Francis.
- 7) Desrues, J., Viggiani, G., Besuelle, P.(2010): Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, Wiley-ISTE.
- 8) Cnudde, V., Boone, M.N.(2013): High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications, Earth-Science Reviews, No.123, pp.1-17.
- 9) 肥後陽介, 高野大樹, 棕木俊文(2017): X 線 CT から見る土質力学 2. X 線 CT の概要と研究動向, 地盤工学会誌, Vol.65, No.10(717), pp.41-48.
- 10) 日本工業標準調査会(2013): 産業用 X 線 CT 装置 -用語- JIS B 7442.
- 11) 東田善治(2002): 日本におけるフラットパネルディテクタの現状と今後について, 医学物理, Vol.22, No.2, pp.210-215.
- 12) 渡邊陽一(2011): 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, 熊本大学大学院博士論文.
- 13) 野原慎太郎, 濱田藍(2017): マイクロフォーカス X 線 CT による地質試料の内部構造評価のための基礎的研究, 電力中央研究所報告, N17011.

第3章 先行研究調査

3.1 概説

本章では、地盤のせん断帯内部の微視的構造に着目して行われた先行研究を概説する。まず、地盤のせん断帯形成に関係する諸要因について整理する。次に、室内試験及び数値解析によってせん断帯内部の微視的構造を評価した既往研究について概説する。最後に、本研究と関連する画像解析の既往技術として、DIC解析、PIV解析、画像セグメンテーション、粒子の形状や方向を評価する画像解析技術について概説する。

3.2 地盤の力学特性に係る諸要因

第1章でも述べたように、地盤は異なる大きさ、形状、性質を有する無数の粒子の集合体であり、粒状体を構成する粒子の基本的性質や集合状態によって、粒状体の力学的性質が大きく異なる。小田(1978)を参考にすると¹⁾、粒状体の物理的・力学的性質に大きく関与する因子は表3-1のように整理することができる。

表 3-1 粒状体の物理的・力学的性質に関する因子

粒子の基本的性質	(1) 粒子の材質 (2) 粒度組成 (3) 粒子形状 (4) 吸着イオンの質と量
粒子の集合状態	(5) 密度 (6) 含水状態 (7) 構造

以下に、表3-1に基づき、各因子について簡単に説明する。なお、本研究で行った実験は、乾燥した砂質土を使用していることから、(4) 吸着イオンの質と量、(6) 含水状態には言及しない。

(1) 粒子の材質

せん断応力下にある粒状材料は、全ての粒子が外力を支持せず、粒子間の接触関係によって応力が局所的に作用する。従って、応力を受け持つ単粒子の強度特性、変形特性、摩擦特性が、粒状材料全体の力学挙動に大きく影響する。特に、火山灰土やマサ土のような脆性材料は、低応力下でも粒子破砕が起きることが知られている²⁾。このような破砕性材料のせん断挙動は、粒子破砕によって粒度分布や粒子形状が不可逆的に変化するため、複雑な力学挙動が表れる。

(2) 粒度組成

異なる粒径が含まれる粒状体では、外力の作用による粒子間力の伝達機構は、単一粒径の

みで構成される粒状体よりも複雑である，地盤の力学特性を評価する場合には，大きさが異なる個々の粒子の粒状体の中での役割を理解することが重要である³⁾。

土の粒度組成を知るための一般的な方法は，ふるい分析や沈降分析である。ふるい分析は，目開き寸法が異なる金属製のふるいを使い，ふるいに残った試料の重量を測定して通過質量百分率を求める方法である。目開き寸法が75 μm のふるいに残った試料は，沈降分析によって粒子径を測定する。また，サブミクロンオーダーの粒子径も測定可能なレーザー回折式粒子径分布測定装置や，画像解析法を用いた分析機器によっても粒度を測定可能である。本研究においても，自由落下中の粒子の2次元投影画像をハイスピードデジタルカメラで撮影し，画像解析を行うことで粒度を測定可能な画像解析粒度分布測定装置（ジャスコインタナショナル株式会社 FF-30micro, 計測範囲30 μm ～30mm）を使用し粒度を測定した。画像解析粒度分布測定装置では，粒子径だけでなく，円磨度や凹凸度といった粒子形状に関するデータも計測することができる。

(3) 粒子形状

砂のような自然の粒子は，粒子形状がいびつであり，粒子形状がせん断強度に大きく影響する。粒子形状は，粒子の鉱物組成，強度特性に加え，流体の運搬作用によって粒子の角が取れて丸みを帯びるように，堆積環境によっても影響を受ける。粒子形状の指標としては，①平均的な粒子形状，②詳細な粒子形状，③微視的な粒子表面の構造によって大別される⁴⁾。

(1) 平均的な粒子形状

粒子を取り囲むような矩形の箱を定義し，その各辺の長さを計測して長軸 d_1 ，中間軸 d_2 ，短軸 d_3 によって粒子形状を表現する。Zingg(1935)は，**図 3-1**に示すように，細長率 d_2/d_1 ，扁平率 d_3/d_2 を使って粒子形状を球状 (Spheres)，棒状 (Rods)，円盤状 (Disks)，小判状 (Blades) に分類する方法を提案している⁵⁾。直観的な方法ではあるが，砂のような粒子は形状が複雑であり，長軸，中間軸，短軸を一意に決定するのは難しく，個人誤差が生じやすい。

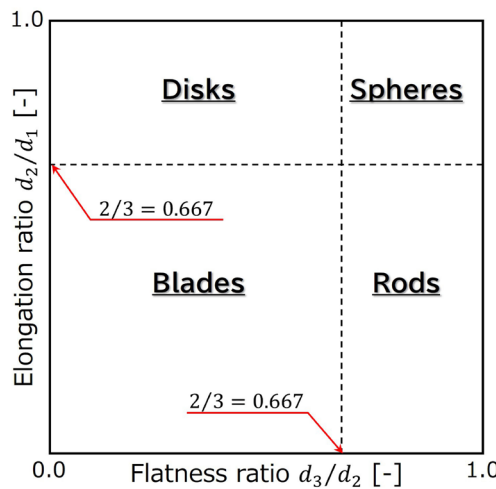


図 3-1 Zingg(1935)による粒子形状の分類方法概念図

(2) 詳細な粒子形状

粒子の詳細な形状を定量的に表現するパラメーターとしては、球形度、円磨度、角張り度、凹凸係数 FU が代表的である。

a) 球形度 (sphericity)

Wadell(1932)は、式(3.1)に示すように、粒子の表面積 S_{real} とそれと同等の体積を有する球の表面積 S_{sphere} の比を球形度として定義した⁶⁾。片桐(2014)は、CT 画像から抽出した粒子のボクセル画像を三角メッシュから成るメッシュモデルに変換することで粒子の表面積を求め球形度を評価しているが⁷⁾、一般には粒子の表面積を求めることは容易ではない。そこで、実用的には、粒子の投影面積に等しい円の直径と粒子の投影増に外接する最小円の直径の比を球形度とすることが多い。また、式(3.2)に示したような、長軸 d_1 、中間軸 d_2 、短軸 d_3 を使って計算される球形度も提案されている⁸⁾。

$$\frac{S_{sphere}}{S_{real}} \quad (3.1)$$

$$\sqrt[3]{\frac{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3}{d_1^3}} \quad (3.2)$$

b) 円磨度 (roundness)

Wadell(1932)は、粒子の長軸と中間軸を含む方向から平面に粒子を投影し、突起に内接する円の半径 r_i と粒子に内接する円の半径 R_0 との比を全ての突起に対して計測し (図 3-2(a))、その平均値を円磨度として定義した⁶⁾。円磨度を視覚的に決定するための視覚印象図も提案されている (図 3-2(b))。

$$\frac{1}{nR_0} \sum_{i=1}^n r_i \quad (3.3)$$

ここに、 n は一つの粒子において計測された突起の個数を表す。

c) 角張り度 (angularity)

Lees(1964)は、図 3-2(c)に示すように、粒子の角張り度合を表現するため、突起の角度を α 、突起先端と内接円の距離を x 、内接円の半径を r とし、角張り度を定義した¹⁰⁾。角張り度は、突起の先端がとがっているほど大きくなる。

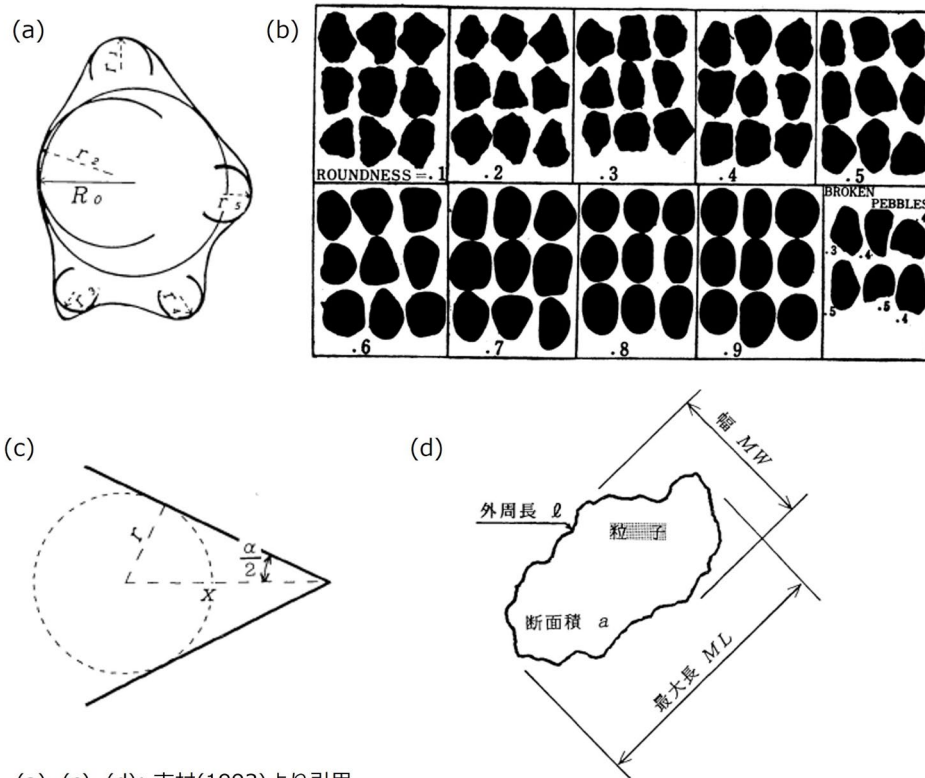
$$(180^\circ - \alpha) \frac{x}{r} \quad (3.4)$$

d) 凹凸係数 FU (the coefficient of form unevenness)

砂のような粒子は粒径が小さいため、円磨度や角張り度のように、個々の突起物に対して形状を評価するのは容易ではなく、個人誤差が生じ易い。吉村(1993)は、図 3-2(d)に示すように、取り扱いが比較的容易な粒子の周囲長 l と投影断面の面積 a を使い、粒子の形状を定量的に表現するパラメーターとして(3.5)に示す凹凸係数 FU を定義した¹¹⁾。

凹凸係数 FU は、粒子の凹凸度合が増すにつれて投影断面上の粒子の周囲長 l が増加し、断面積 a との比が大きくなる。

$$\frac{a}{l^2} \tag{3.5}$$



(a), (c), (d): 吉村(1993)より引用。
(c): 沢田(1971)より引用。

図 3-2 粒子形状を表す指標の概念図

(3) 微視的な粒子表面の形状

微視的な粒子表面の形状は、走査型電子顕微鏡を使って観察できるレベルの微細な凹凸性状のことを指す。砂粒子の表面は決して滑らかではなく、粒子接触点での摩擦特性に大きく影響するものと考えられている。

(4) 密度

粒子単体としての密度は土粒子密度や真密度として呼ばれるが、粒状材料の力学的性質に大きく影響するのは、ある一定の体積においてどの程度粒子が存在するか、つまり粒状体の締め具合を表す指標を指す。一般に、密度が大きいほど粒子間の接触面積が大きくなり、噛み合わせ効果が発揮されやすくなるため、せん断強度が大きくなる。密度を表す指標としては、無次元パラメーターである間隙比、間隙率、相対密度、締め固め度や、全体の体積に対する土粒子

の重量比を表す乾燥重量など、いくつかのパラメーターがある。

(5) 構造

粒子の構造を定量的に表す場合、粒子の配向性や粒子間の相互関係に分けて考えることができる¹²⁾。

① 粒子の配向性

砂の形状は、球よりも楕円体に近い形状を示すことが多い。そのため、自然の地盤は、重力や流体の影響を少なからず受けており、長軸や短軸が特定の方向を向くように堆積し、粒状体の変形や強度は少なからず異方性を示すことが知られている。粒子の配向性を評価するには、接着剤等で固定した試料を任意の断面で切断し、顕微鏡等を使ってよく観察し、粒子の方向を評価する方法が代表的である。

② 粒子間の相互関係

粒状体では粒子間の接触関係によって応力が伝達されるため、粒子間の相互関係はせん断挙動に大きく影響を及ぼす。粒子間の相互関係を表す指標としては、配位数や接触面の方向が代表的である¹³⁾。

a) 配位数

配位数とは、一つの粒子が隣接する粒子に接する接触点数のこと指す。配位数は粒子形状や粒度分布などにも影響を受け、配位数が大きいほど密で間隙率が小さい。せん断によって、最小主応力の方向には配位数が減少し、最大主応力の方向には配位数が増加することが知られている¹⁴⁾。

b) 接触面の方向

配位数は間隙率同様にスカラー量であるが、粒子と粒子の接触には方向を有している。そこで、接触面の方向を表す指標として、ファブリックテンソルが用いられる。ファブリックテンソルによって、粒状体内部の接触方向の分布に関する異方性が表現される。

3.3 地盤のせん断帯内部の微視的構造評価に関する既往研究

本節では、せん断帯内部の微視的構造を評価するために行われた先行研究について、(1) 砂の代替要素を使ったモデル実験、(2) 顕微鏡を使った詳細観察、(3) 数値解析による方法、(4) X線CTを活用した研究に大別し、それぞれの手法の特徴を概説する。

(1) 砂の代替要素を使ったモデル実験

砂は粒径が小さいため、粒子の移動量や回転量を直接観察するのは難しい。そこで、砂の代替要素として、直径が数 mm 程度、長さが数 cm 程度のアルミ棒を使い、せん断時の微視構造を考察する試みが行われてきた¹⁵⁾。それぞれのアルミ棒に目印を付ければ、アルミ棒の回転量や移動量を簡便に計測することもでき、扁平形状や角形状のアルミ棒を使って粒子形状に効果

を検討する試みも行われている¹⁶⁾。但し、三次元場へ拡張性や砂粒子間の摩擦の考慮などに課題がある。また、砂を光弾性材料によって模擬し、応力の伝達機構を解明する試みも行われている¹⁷⁾⁻¹⁹⁾。光弾性材料は、ガラスやプラスチックのように、透明で均一な物質に力を加えると、複屈折の大きさや向きが変化する材料であり、材料の応力分布を可視化することができる。光弾性材料を使ったせん断実験によって、せん断応力下にある粒状材料には不均質で網目状の応力が分布することが明らかにされてきた¹⁷⁾。砂のようないびつな形状の粒子に対する再現性には課題はあるが、応力の伝達を可視化できる唯一の方法であると考えられる。さらに、最近では3Dプリンターを使って実際の砂の形状に近い粒子を作成して力学実験を行うことで、砂のいびつな形状が力学挙動に及ぼす影響を検討する試みもなされている²⁰⁾。

(2) 顕微鏡を使った詳細観察

せん断帯内部の微視構造を詳細に観察するためには、評価断面を露出して目視で観察を行う方法が最も単純である。顕微鏡等を使うことにより、粒子レベルでの観察を行うことができ、画像解析のソフトウェアを活用すれば、粒子構造を定量的に評価することが可能である。Oda(1998)は、平面ひずみ圧縮試験後の供試体から作成した薄片を作成し、光学顕微鏡を使って詳細な観察を行っている。図3-3に示すように、せん断面に直交する面と平行な面の観察試料を作成し、準3次元での観察を行うことで、せん断帯内部は局所的に大きな空隙が形成されていることや、せん断帯内部における見かけの長軸方向がせん断帯外部の傾向と変わっていることを明らかにした。この方法は、空隙を接着剤で置換して固定する必要がある。また、評価断面を露出させなければならないので、せん断帯が形成される過程を同一の供試体で評価することは不可能である。

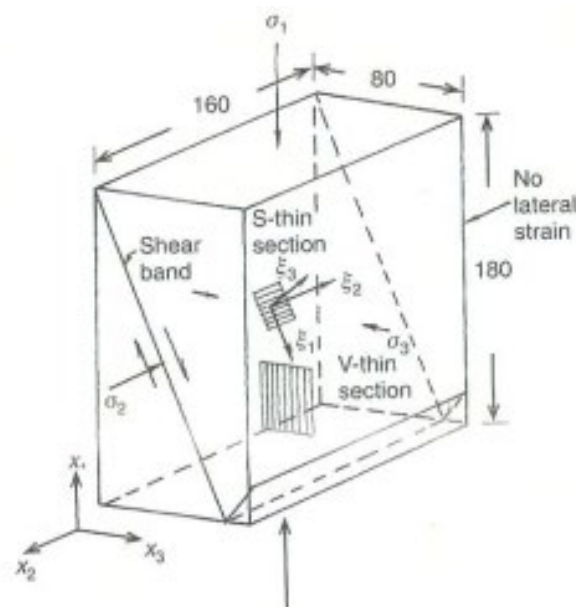


図 3-3 Oda(1998)による観察試料の作成方法

(3) 数値解析による方法

数値解析によってせん断のメカニズムを検証する研究としては、個別要素法(DEM: Distinct Element Method)を使った研究が多い。DEMは、多数の個体粒子の運動を、粒子ごとの並進や回転の運動方程式に基づいて時刻歴に計算する手法である。連続体解析で必要となる応力とひずみの関係をモデル化する必要はなく、地盤が粒子の集合体から成るという考えに基づき、せん断帯の形成過程に関する検討に用いられている。当初は計算要素として球要素が用いられてきたが、砂粒子の形状に近づけるべく、計算要素として楕円体要素を用いる試みや^{22),23)}、複数の球要素を結合させて砂粒子の形状を可能な限り再現して計算を行う試み²⁴⁾がなされている。各粒子の移動量や回転量等の詳細なデータを検証できる一方、計算結果を検証できる実データの取得が急務である。

(4) X線CTを活用した研究

第2章でも述べたように、Desrues(1996)によってX線CTを使って三軸圧縮試験後の砂の供試体が撮影され、X線CTを使ってせん断帯の形成メカニズムを検証する試みが広まった²⁵⁾。ここで、X線CTを地盤工学分野に適用した研究について、エルゼビアが運営する書誌データベース Scopus を使い公開年毎に文献数を調査した結果を図 3-4 に示す。図 3-4(a)は、「X-ray CT」と、「sand」、「soil」、「rock」をキーワードとして検索した結果であり、図 3-4(b)は、「shear」を検索語として追加した結果である。

図 3-4 によると、2000年代半ばから2010年にかけて、文献数が増加している。これは、地盤材料におけるX線CTの国際ワークショップ「地盤工学におけるX線CTの応用に関する国際ワークショップ GeoX2003²⁶⁾」が熊本県において世界で初めて開催されたのを皮切りに、様々な国際会議を通してX線CTを利用した成果が報告され、地盤工学分野におけるX線CTの有用性が認識されたためである²⁷⁾。また、高解像度のCT画像が取得可能なマイクロフォーカスX線CTが実用化された事も大きく関係していると考えられる。その後、2010年代半ばから現在にかけて、更に文献数が増加する傾向にしている。これは、高解像度のCT画像を取得できるようになってせん断帯の細部まで可視化できるようになったことに加え、CT画像を対象とした画像解析ソフトウェア、特にデジタル画像相関法(DIC: Digital Image Correlation)や粒子画像流速測定法(PIV: Particle Image Velocimetry)による評価が可能な画像解析ソフトウェア²⁸⁾、²⁹⁾の整備が進み、供試体内部の変位量やひずみ量を3次元で定量的に評価できるようになったことが関係していると考えられる。

現在のところ、供試体内部を非破壊の状態でも可視化し、せん断帯が形成される過程を同一の供試体で評価できるのは、X線CT以外になく、今後もX線CTを活用した研究の進展が期待される。特に、画像からせん断帯の内部構造を定量的に評価できるようになると、応力-ひずみの関係にせん断帯内部の微視構造を含めた議論が可能になると考えられる。

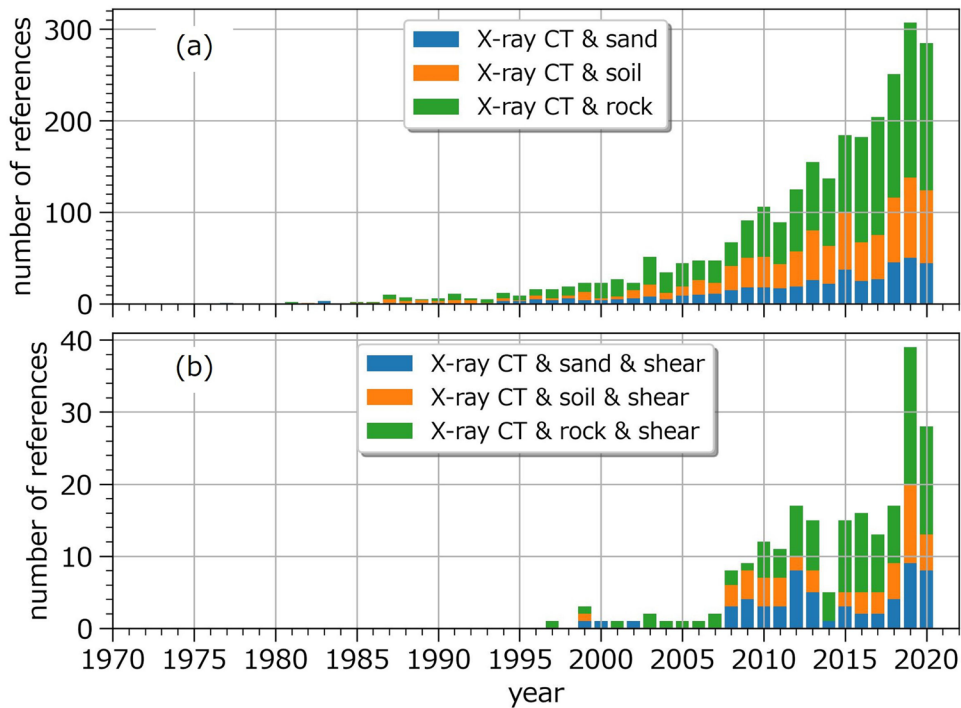


図 3-4 Scopus を使った X 線 CT 関連研究の動向調査結果

3.4 画像解析に関する既往研究

本節では、CT 画像を対象とした画像解析技術について既往研究を整理する。まず、CT 画像に対して展開が進められている DIC 解析と PIV 解析の基本原理解について概説する。次に、本研究において、CT 画像に対して実施する画像セグメンテーションの手順を示す。最後に、粒子の三次元形状や方向を評価する先行研究について概説し、既往の画像解析技術における課題を整理する。

3.4.1 DIC 解析, PIV 解析

DIC 解析は、変形前後のデジタル画像から変位量や変位方向を評価し、ひずみを計算できる画像解析技術である。DIC 解析の手法自体は、2次元画像を対象として1980年代に開発されたが³⁰⁾、CT画像のような3次元画像を対象としたDIC解析技術が普及したのは、2010年代に入ってからである。図3-5にDICの基本原理解に関する概要図を示す³¹⁾。DIC解析では、まず変形前の画像に対して節点が定義され、節点を中心に相関窓、もしくはサブセットと呼ばれる領域が定義される。その後、検索領域内で相関窓を移動させながら計算し、相関係数が最も高くなる変位量を求める。最後に、求められた変位量からひずみが計算される。

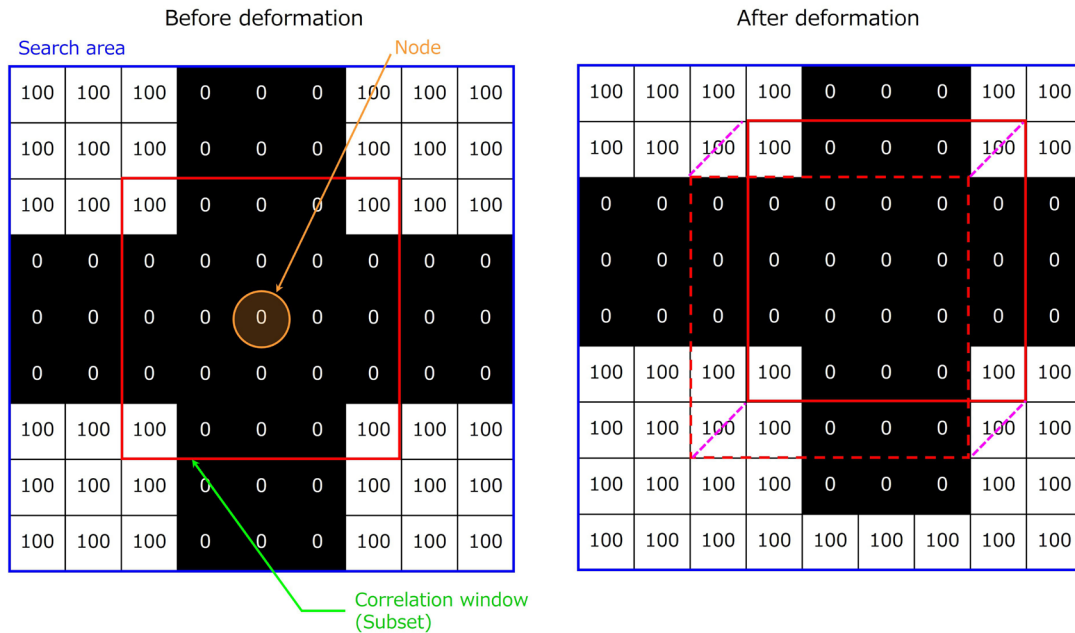


図 3-5 DIC の基本原理³¹⁾

近年は、オープンソースのプログラミング言語 Python をベースとする、CT 画像を対象とした DIC 解析ツール Tomowarp²⁸⁾や Spam²⁹⁾が開発され、ユーザーは DIC 解析の導入をし易い環境が整いつつある。2次元デジタル画像を対象とした DIC 解析では、画像の取得間隔を短くすることで、精度良くひずみを求めることができる。しかし、CT 画像を使って DIC 解析を行う際は、データが膨大になってしまうため、単純に画像の取得間隔を短くできない場合がある。そのような場合は、精度良く相関係数の高い変位量を同定できない可能性がある。また、多くの DIC 解析では、変形前に定義する節点の間隔は等間隔に配置される。そのため、変位が滑らかに分布する領域では良好な結果を得ることができるが、例えば亀裂のように、不連続で幾何学的に複雑なオブジェクトを含む画像を対象とするような場合、相関窓内で平均化されたような変位分布になってしまうため、精度良くひずみを定量化できない可能性があり、最近では有限要素メッシュを利用して画像相関を計算する方法などが提案されている³²⁾。

一方、PIV 解析も、DIC 解析と同じく、局所領域の相関を計算して変形前後の変位量を評価する手法であるが、時間で割ることによって速度場を求めることを目的に行われる画像解析を PIV 解析と呼ぶ。特に、流体中のトレーサー粒子群をビデオカメラで連続的に撮影し、速度ベクトル分布を評価して流れ場を解明するために用いられることが多い。また、PIV 解析に類似する画像解析技術として、粒子画像追跡法 (PTV: Particle Tracking Velocimetry) がある。PIV 解析は一定領域の粒子群の平均的な速度を求める方法であるのに対し、PTV 解析は、粒子個々の追跡を行う画像解析手法である³⁴⁾。

3.4.2 画像セグメンテーション

画像セグメンテーションとは、画素を物体毎に分類する領域分割のことである。本研究の場合で言えば、CT 画像から砂粒子に相当する画素を分離し、個々の粒子毎に色塗りをするようにラベリングする工程のことを指す。ImageJ のようなソフトウェアを使って粒子の輪郭をなぞるようにして粒子を抽出することも不可能ではないが、抽出する粒子の数が数千～数万となると、手作業で粒子を抽出することは現実的ではない。従って、プログラムを活用した画像処理を行って、画像セグメンテーションを行う必要がある。本研究においては、Watershed 法に基づく画像セグメンテーションを実施する。

Watershed 法とは、画像を地形図とみなし水を流し込んで貯めるようにして領域を分割する手法である。Watershed 法は、画像セグメンテーションの方法として広く普及し、多くの画像解析ソフトウェアに実装されている³⁵⁾。但し、古典的な Watershed 法は、一つの粒子であっても複数の粒子として分割してしまう過分割が起きやすい。そこで、過分割を抑制するため、画像上にマーカーを配置する Marker-Controlled Watershed 法を行って CT 画像から粒子を抽出する。以下に画像セグメンテーションの手順を記載する。また、**図 3-6** に Marker-Controlled Watershed 法の概念図を示す。なお、画像セグメンテーションには、オープンソースのプログラミング言語 Python3.4 を使用し、画像解析ライブラリとして Scipy, Scikit-image を使用する^{36),37)}。

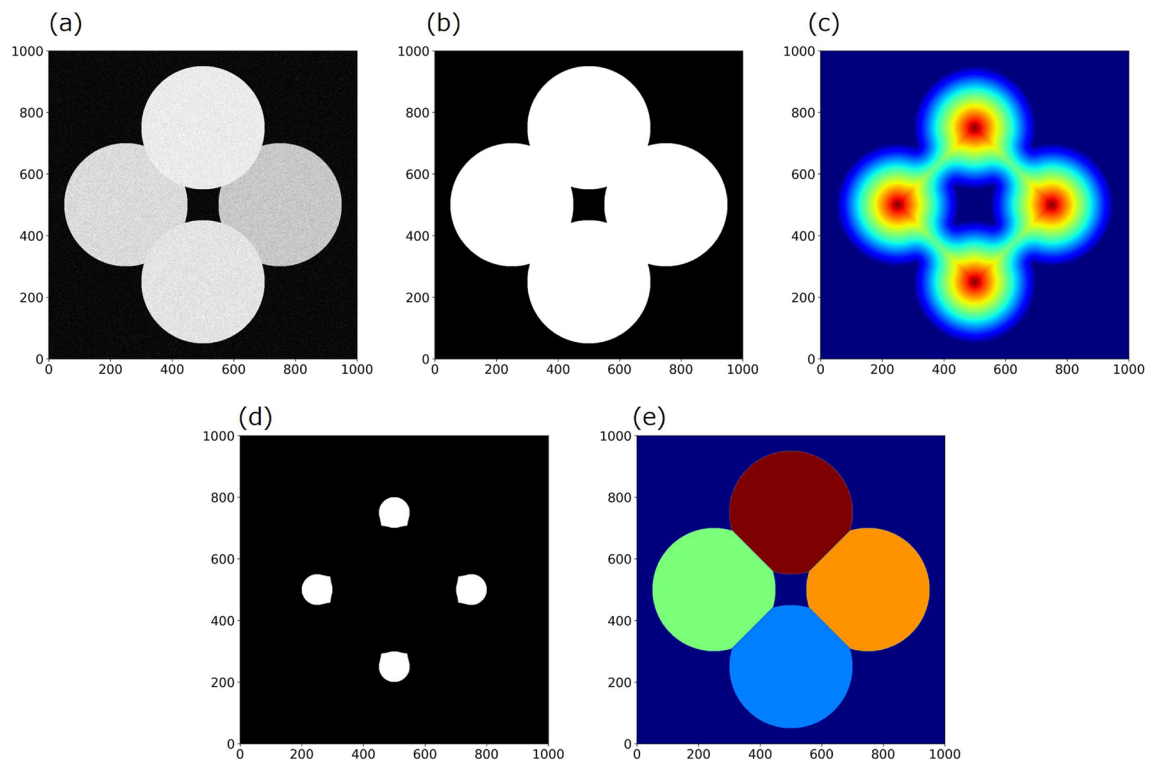


図 3-6 Marker-Controlled Watershed 法による画像セグメンテーションの概念図

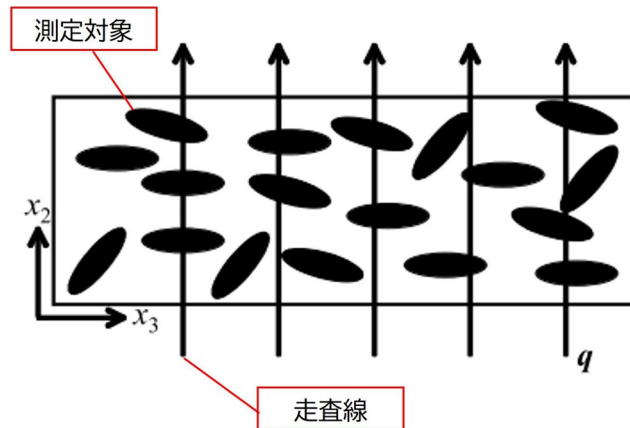
- 1) ノイズ軽減処理
原画像 (図 3-6(a)) に対し, Scipy の `median_filter` モジュールを使い, メディアンフィルタ処理を行って原画像のノイズを軽減する.
- 2) 二値化画像の作成
Scikit-image の適応型二値化処理に関するモジュール `threshold_sauvola` を使い, 二値化画像を作成する. その後, 作成された二値化画像に対してオープニング処理を行い, ホワイトノイズを取り除く (図 3-6(b)).
- 3) 距離変換画像の作成
二値化画像から距離変換画像を作成する. その後, 過分割を抑制するため, 距離変換画像に対しガウシアンフィルタ処理を行う (図 3-6(c)).
- 4) マーカー画像の作成
距離変換画像に対して Scikit-image の `peak_local_max` モジュールを使って局所極大値を検出し, マーカー画像を作成する (図 3-6(d)).
- 5) 画像セグメンテーション
二値化画像, 距離変換画像, マーカー画像より, Scikit-image の `watershed` モジュールを使ってセグメンテーションを行う (図 3-6(d)). Scikit-image の `watershed` モジュールでは, `watershed_line` (隣接する粒子を分割する幅 1voxel の境界線) の設定の有無を選択できる. 本研究では, `watershed_line` 有りの画像, `watershed_line` 無しの画像, いずれについても作成する.

粒子の形状や方向を精度良く評価するには, 画像セグメンテーションを慎重に行い, 精度良く粒子を抽出する必要がある. 上に述べた画像セグメンテーションの手順だけでなく, フィルタサイズ等のパラメーター等は, 撮影対象となるオブジェクトの性質, 画素サイズ, ノイズの影響によって変わるため, 時間をかけて検討しなければならない. また, 自然のサンプル, 例えばポーリングコアのようなサンプルの CT 画像から粒子を抽出する場合, 抽出する粒子の大きさや形状がバラバラであり, 熱水変質や鉱物組成の不均質性の影響を受けている可能性もあることから, 上述した手順だけでは精度良く粒子を抽出できない場合がある. 最近では, 深層学習を活用し, 人間のイメージに近づけて画像セグメンテーションを行う試みも行われており³⁵⁾, 今後も研究開発が必要不可欠である.

3.4.3 粒子の形状や方向を評価する画像解析技術

(1) Takemura(2007)による研究³⁸⁾

Takemura(2007)は、評価対象の構造異方性を評価するため、多方向走査線による測定を行うことを提案した。図 3-7 に評価手法の概念図を示す。Takemura(2007)による手法では、二値化画像から作成した代表体積要素に対し、走査線と呼ばれる測線を引き、走査線に交わる粒子の個数をカウントする。この測定を多方向から行うことで、評価対象の構造異方性が評価できることを報告している。また、佐藤(2013)は、断層ガウジの CT 画像中に存在する石英や岩片粒子などの粒子を対象とし、多方向走査線による評価を行うことで、粒子の配向と断層の運動センスが調和的となったことを報告している³⁸⁾。この手法は、画像セグメンテーションを行う必要はないので、CT 画像の二値化のみ行うことで、代表体積要素における粒子方向の傾向を評価できるといった特徴を有する。但し、粒子個々の形状や方向を評価することはできない。



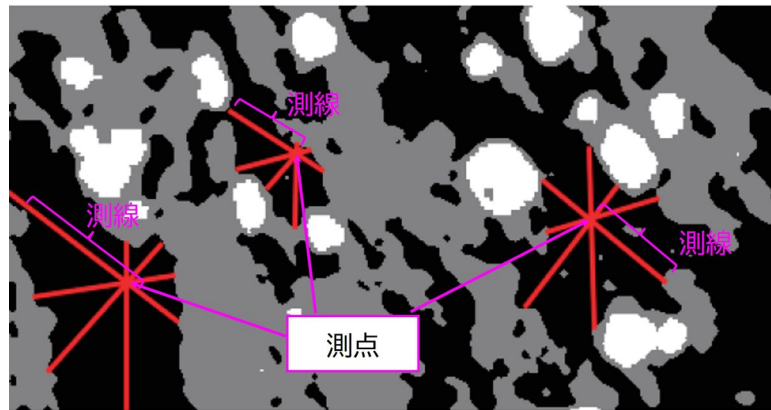
※Takemura(2007)に追記

図 3-7 多方向走査線による構造異方性評価

(2) Ketcham(2005)による研究³⁹⁾

Ketcham(2005)は、粒子の 3 次元ファブリック解析を行うため、Stat Analyses と呼ばれる手法を提案し、岩石中の石英や長石の 3 次元形状や方向を評価している。図 3-8 にファブリック解析の概念図を示す。まず始めに CT 画像をセグメンテーションして評価対象物を抽出した後、評価対象物内に測点を置き、測点から境界までの測線を引いて距離を測定する。この測定を多方向で行い、距離が最も長い方向を長軸の方向、距離が最も短い方向を短軸の方向として判定され、対象粒子のファブリック性状が評価される。放射状に測線を引き、星状に粒子の形状を測定することから、Ketcham(2005)は Stat Analyses と呼んでいる。

この手法は、粒子個々のファブリック性状を評価でき、同手法に基づいた解析プログラムが開発され、Quant3D という名称でプログラムを公開していることから⁴⁰⁾、比較的簡便に粒子のファブリック性状を評価することができる。一方、ノギスを使うように直接的に粒子の形状を測定する手法であることから、自然の砂粒子のように、表面に凹凸を富む粒子や、形状がいびつな粒子を対象とする場合、特異な形状の影響を受けやすいといった可能性が考えられる。



※Ketcham(2005)に追記

図 3-8 Stat Analyses によるファブリック解析

(3) 片桐(2014)による研究⁷⁾

片桐(2014)は、兵庫県の大型放射光施設 SPring-8 の X 線 CT を使い、5 種類の砂とガラス球を CT 撮影し、粒子の 3 次元形状を評価した。CT 画像を対象とした画像セグメンテーションによって粒子を抽出した後、各粒子のボクセル画像は STL 形式のメッシュモデルに変換される。その後、中野(2006)によって開発された STL 形式のデータを対象としたプログラム⁴¹⁾を使って、粒子を楕円体近似し、粒子の 3 次元形状を評価している。

この手法は、粒子表面を三角メッシュとして表現するため、総和を計算することによって簡単に粒子表面積を計算することができる。片桐(2014)は、近似楕円体の表面積と、CT 画像から抽出した表面積の比を楕円体表面積比と呼び、粒子形状特性を適切に表すパラメーターの一つであることを報告している。一方、ボクセル画像を STL 形式に変換しなければならないため、変換方法や精度に関して別途検証することが必要である。

(4) Fonceca(2012)による研究⁴²⁾

Fonceca(2012)は、三軸圧縮試験後の供試体にエポキシ樹脂を含浸し、せん断帯を含む直径 5mm 程度の試料を作成した後、マイクロフォーカス X 線 CT を使って撮影した。CT 画像を対象とした画像セグメンテーションが行われた後、土粒子の形状や方向が評価された。この時、Fonceca(2012)は、Phillion(2008)の研究を参考にし⁴³⁾、粒子の点群の主成分分析を行うことで、粒子の方向を評価している。また、粒子の軸長さは、粒子の長軸、中間軸、短軸が X, Y, Z 軸に一致するように粒子を回転させた後、X, Y, Z 方向の最小値、最大値を計算することで決定している。本手法は、粒子個々のファブリック性状を評価できる。一方で、粒子を楕円体の定義に基づいて厳密に近似していない点や、自然の砂粒子のように、表面凹凸に富むような粒子や、形状がいびつな粒子への適用性については注意が必要である。

以上に述べたように、先行研究においても、CT 画像を対象として粒子の形状や方向が評価

可能な画像解析手法が提案されている。但し、本研究で対象とするような自然の砂粒子は、形状がいびつであり、そのような粒子への適用性には課題が残されていることが分かった。さらに、CT 画像はボクセル画像であり、メッシュモデルのような別形式のモデルに変換するには、別途変換パラメーターを検討する必要がある。従って、ボクセル画像を別形式のモデルに変換することなく、直接粒子の形状や方向を評価することが望ましいと考えられる。

3.5 第3章のまとめ

本章では、地盤のせん断帯内部の微視構造に着目して行われた先行研究を整理するとともに、本研究と関連する既往の画像解析技術について概説した。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 粒状体の物理的・力学的性質に関係する影響因子を整理し、それぞれの影響因子の内容について概説した。
- 2) せん断帯内部の微視構造を評価した先行研究を調査し、それぞれの特徴について整理した。その結果、供試体内部を非破壊の状態で見視化し、せん断帯が形成される過程を同一の供試体で評価できるのは X 線 CT 以外に無いことが明らかになった。CT 画像からせん断帯の内部構造を定量的に評価できるようになると、応力-ひずみモデルに微視構造の変化を取り入れた新たなモデルを構築できることが期待される。
- 3) 本研究で行う画像セグメンテーションとして、Marker-Controlled Watershed 法の手順を示し、画像セグメンテーションを精度良く行うことの重要性を述べた。
- 4) CT 画像を対象とする粒子の形状や方向を評価できる既往の画像解析技術の特徴を整理した。その結果、既往の画像解析技術は、特異な形状の影響を受けやすく、砂のように形状がいびつな粒子に対する適用性には課題があることが分かった。

参考文献

- 1) 小田匡寛(1978): 粒状体力学の現状と応用 3.粒状体の基本的特性とその土質工学的意義, 土と基礎, Vol.26, No.8, pp.63-70.
- 2) 三浦哲彦, 山内豊聡(1977): 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文集, No.260, pp.109-118.
- 3) 石川達也, 兵動正幸, 陳光斉(2007): 粒子特性の評価と工学的意義 3. 粒径・粒度の評価と土の力学挙動, 土と基礎, Vol.55, No.5, pp.47-52.
- 4) 松島亘司, 前田健一, 石川達也(2007): 粒子特性の評価と工学的意義 4. 粒子形状の評価と土の力学挙動, 土と基礎, Vol.55, No.6, pp.37-44.
- 5) Zingg, T. (1935): Beitrag zur schotteranalyse, Schweizerische Mineralogische and Petrographische Mitteilungen, No.15, pp.39-140.
- 6) Wadell, H.A. (1932): Volume, Shape, and Roundness of rock particles, Journal of geology, Vol.40, No.5, pp.443-451.
- 7) 片桐淳, 松島亘志, 竿本英貴, 宇津野衛, 山田恭央(2014): SPring-8 の X線マイクロ CT を用いた 3次元土粒子形状の定量的評価, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.70, No.2, pp.265-274.
- 8) Krumbein, W.C. (1941): Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles, Journal of Sedimentary Research, Vol.11, No.2, pp.64-72.
- 9) 沢田敏夫, 斉藤実, 横瀬広司(1971): 粒状物の形状特性の表現方法について 土, 砂, レキのような粒状土木材料の集合特性に関する研究(2), 農業土木学会論文集, Vol.38, pp.72-79.
- 10) Lees, G. (1964): A new method for determining the angularity of particles, Sedimentology, Vol.3, No.1, pp.2-21.
- 11) 吉村優治, 小川正二(1993): 砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化方法, No.463, III-22, pp.95-103.
- 12) 小田匡寛(2002): 土の構造とメカニクス -ミクロからマクロへ- 2. 土の微視的構造を探るための実験的研究(その3), 土と基礎, Vol.50, No.4, pp.42-47.
- 13) 前田健一, 金子賢治, 榊原辰雄, 木全卓(2007): 粒子特性の評価と工学的意義 7. 粒子の集合体としての評価と力学挙動, Vol.55, No.9, pp.31-39.
- 14) 佐竹正雄(1988): 微視構造を有する材料の力学(1) 粒状体とき裂体, 精密工学会誌, Vol.54, No.6, pp.1017-1022.
- 15) Matsuoka, H. (1974): A microscopic study on shear mechanism of granular materials, Soils and Foundations, Vol.14, No.1, pp.29-43.
- 16) 吉村優治, 松岡元, 上田雅章(1994): 粒子形状の異なるアルミ棒積層体のせん断特性とその解釈, 土木学会第49回年次学術講演会, pp.366-367.
- 17) Oda, M., Konishi, J. (1974): Microscopic deformation mechanism of granular material in simple shear, Soils and Foundation, Vol.14, No.4, pp.25-38.

- 18) 吉岡直人, 阪口秀(2009): せん断応力下にあるガウジ層の内部構造解析とすべり予測の試み, 深田地質研究所年報, No.10, pp.109-121.
- 19) 吉岡直人(2010): 固体地球科学における光弾性技術利用のおすすめ, 深田地質研究所年報, No.11, pp.117-127.
- 20) Nakata, Y., Moriguchi, S., Kajiyama S., Kido, R., Kikkawa, N., Saomoto, H., Takano, D., Higo, Y. (2022): Experimental data of 3D printed granular material for verification of discrete element modeling simulation, *Soils and Foundations*, Vol.62, No.4, 101178.
- 21) Oda, M.; Kazama, H. (1998): Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils, *Geotechnique*, Vol.48, No.4, pp.465-481.
- 22) Lin, X., Ng, T.-T. (1997): A three-dimensional discrete element model using arrays of ellipsoids, *Geotechnique*, Vol.47, No.2, pp.319-329.
- 23) Yan, B., Regueiro, R.A., Sture, S. (2009): Three-dimensional ellipsoidal discrete element modeling of granular materials and its coupling with finite element facets, *Engineering Computations*, Vol.27, No.4, pp.519-550.
- 24) Angelidakis, V., Nadimi, S., Otsubo, M., Utili, S. (2021): CLUMP A code library to generate universal multi-sphere particles, *SoftwareX*, No.15, 100735.
- 25) Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M., Mazerolle, F. (1996): Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography, *Geotechnique*, Vol.46, No.3, pp.529-546.
- 26) Otani, J., Obara, Y. (2004): X-ray CT for geomaterials *Soils, Concrete, Rocks*, Taylor & Francis.
- 27) 大谷順(2017): X線CTから見る土質力学 1. 講座を始めるにあたって, *地盤工学会誌*, Vol.65, No.10(717), pp.39-40.
- 28) Tudisco, E., Ando, E., Cailletaud, R., Hall, S.A. (2017): TomoWarp2 A local digital volume correlation code, *SoftwareX*, Vol.6, pp.267-270.
- 29) Stamati, O., Ando, E., Roubin, E. et al. (2020): spam: Software for Practical Analysis of Materials, *SoftwareX*, Vol.5, No.51, 2286.
- 30) 有川秀一, 村田学, 吉田陸, 米山聡, 藤本康久, 大本洋平(2016): 画像相関法の測定精度に対するサブセットサイズとゲージ長の影響, *実験力学*, Vol.16, No.2, pp.162-167.
- 31) 谷口聡, 木村孝司, 大谷順: X線CTスキャナ及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, *寒地土木研究所月報*, No.741, pp.15-23.
- 32) 米山聡, 小柳潤, 有川秀一(2014): 有限要素メッシュを利用した画像相関法による不連続変位・ひずみ分布の測定, *日本複合材料学会誌*, No.4, pp.180-188.
- 33) Kornilov, A.S., Safonov, I.V. (2018): An Overview of Watershed Algorithm Implementations in Open Source Libraries, *Journal of Imaging*, Vol.4 No.10, 123.
- 34) 大川原真一(1998): 粒子画像流速計測法(PIV)の工学的基礎 -原理及びトレーサー粒子の選定-, *日本バイオレオロジー学会誌*, Vol.12, No.3, pp.1-9.

- 35) Rahmani, H., Scanlan, C., Nadeem, U., Bennamoun, M., Bowles, R. (2019): Automated segmentation of gravel particles from depth images of gravel-soil mixtures, *Computers & Geosciences*, Vol.128, pp.1-10.
- 36) Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T.E. et al. (2020): SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python, *Nature Methods*, Vol.17, No.3, pp.261-272.
- 37) Van der Walt, S., Schönberger, J.L., Nunez-Iglesias, J., Boulogne, F., Warner, J.D., Yager, N., Gouillart, E., Yu, T. (2014): scikit-image: image processing in Python, *PeerJ*, e453.
- 38) Takemura, T., Takahashi, M., Oda, M., Hirai, H., Murakoshi, A., Miura, M. (2007): Three-dimensional fabric analysis for anisotropic material using multi-directional scanning line - Application to X-ray CT image, *Materials Transactions*, Vol.48, No.6, pp.1173-1178.
- 39) 佐藤稔, 竹村貴人, 高橋学, 柴山愛 (2013): マイクロフォーカス X 線 CT を用いた断層ガウジの 3 次元構造解析-南下浦断層の事例-, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp.213-214.
- 40) Ketcham, R.A. (2005): Three-dimensional grain fabric measurements using high-resolution X-ray computed tomography, *Journal of Structural Geology*, Vol.27, No.7, pp.1217-1228.
- 41) The University of Texas High-Resolution X-ray Computed Tomography Facility, QUANT3D, <https://www.ctlab.geo.utexas.edu/software/quant3d/> (最終アクセス日：2022/9/26) .
- 42) 中野司(2006): STL データ処理用のプログラムについて, 地質調査総合センター研究資料集, No. 448, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 43) Fonseca, J., O'Sullivan, C., Coop, M.R., Lee, P.D. (2012): Non-invasive characterization of particle morphology of natural sands, *Soils and Foundations*, Vol.52, No.4. pp.712-722.
- 44) Phillion, A., Lee, P., Maire, E., Cockcroft, S.L. (2008): Quantitative Assessment of Deformation-Induced Damage in a Semisolid Aluminum Alloy via X-ray Microtomography, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 39, pp.2459-2469.

第4章 3次元粒子ファブリック解析手法の開発

4.1 概説

2次元画像を対象とする場合、ImageJに代表される画像解析ソフトウェアを使うことで、簡便に粒子の形状や方向を評価することができる。一方、3次元画像における粒子を対象に形状や方向を評価する場合、汎用的なソフトウェアはほとんど無いのが現状である。そこで、本研究では、3次元画像中の粒子を楕円体として近似し、粒子の形状や方向を評価する手法を構築する。さらに、構築した手法に基づく解析プログラムの開発を行った。粒状材料を対象とした個別要素法を使った数値計算においては、計算要素として楕円体を用いることの有効性が報告されている⁷⁾⁴⁾。従って、複雑な形状を有する砂粒子を単純な楕円体として近似する手法を開発することにより、楕円体粒子を使用した数値計算におけるモデル開発に役立てることができると考えられる。

本章では、本研究で開発した楕円体近似手法の詳細について示す。さらに、4種類の粒状材料を対象に、マイクロフォーカスX線CTを使ってCT画像を取得し、本手法の妥当性を検証する^{5),6)}。

4.2 楕円体近似手法

4.2.1 理論

本研究では、粒子を楕円体として近似することによって、粒子の形状や方向を評価する。楕円体の重心と原点が一致する場合、楕円体の一般式は式(4.1)で表される^{7),8)}。式(4.1)において未知数は7つである。つまり、3次元空間で楕円体を定義するには、未知数7つを決定することが必要である。本手法では、CT画像から抽出した粒子の断面積を評価することで、粒子を楕円体として近似する。

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Fyz + 2Gzx + 2Hxy + D = 0 \quad (4.1)$$

ここに、 A, B, C, D, F, G, H は係数である。

図4-1に、本研究で開発した3次元粒子ファブリック解析手法の流れを示す。まず初めにCT画像(図4-1(a))の画像セグメンテーションを行い、粒子をラベリングする(図4-1(b))。次に、セグメント画像から粒子を抽出し(図4-1(c))、粒子の断面積を複数評価する(図4-1(d))。最後に、評価された粒子の断面積と、楕円体断面積の理論式から求められる断面積との誤差を計算し、誤差が最も小さくなる未知数の組み合わせを決定する。

図4-2に示したように、楕円体はX軸、Y軸、Z軸方向の軸長さを d_x, d_y, d_z 、回転軸の方向ベクトルを n_{ex}, n_{ey}, n_{ez} 、回転角度を θ_e とする。楕円体を切断する平面の方程式が式(4.2)、(4.3)で表される場合、式(4.1)で示した係数を使って計算される楕円体の断面積は、式(4.4)、(4.5)で表される。

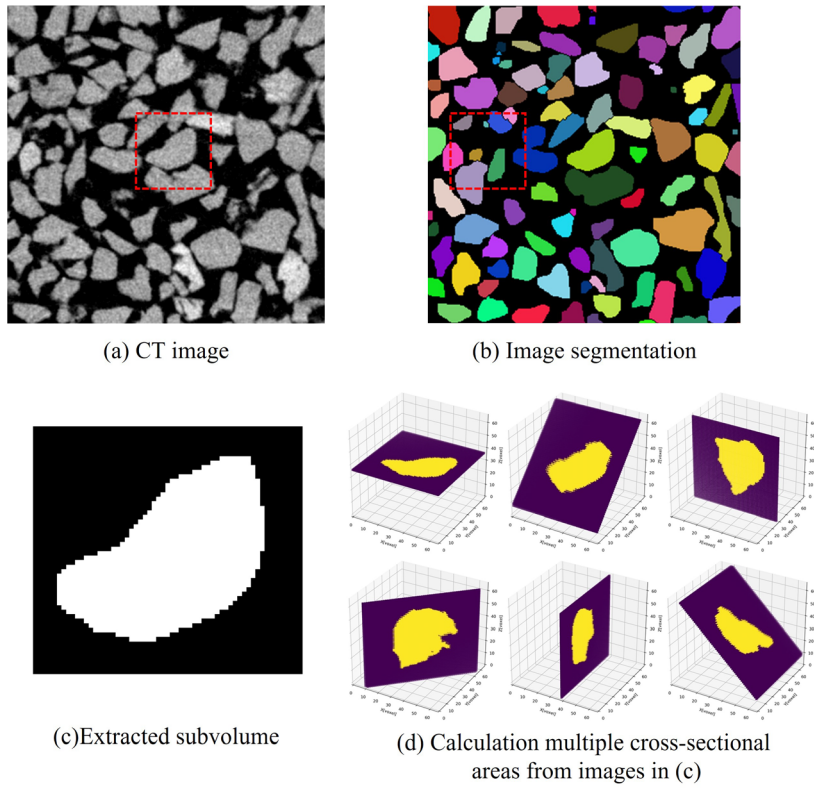


図 4-1 3次元粒子ファブリック解析の流れ

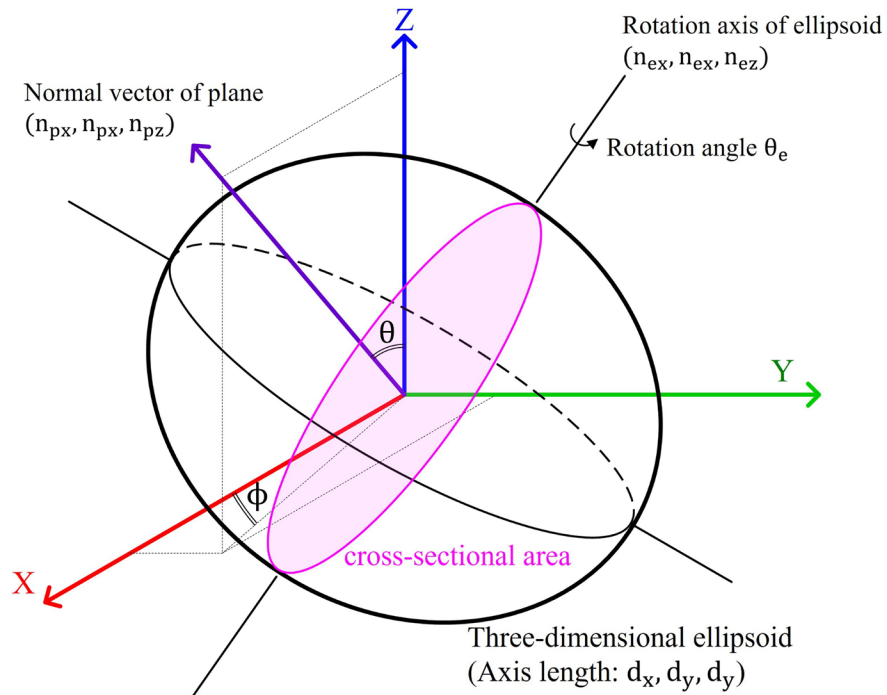


図 4-2 楕円体断面積の計算方法に関する概念図

$$n_{px}x + n_{py}y + n_{pz}z = 0 \quad (4.2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} n_{px} &= \sin \theta_i \cos \phi_i \\ n_{py} &= \sin \theta_i \sin \phi_i \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$n_{pz} = \cos \theta_i$$

$$S_e = \frac{-D\pi}{\sqrt{e_1 + e_2 + e_3 + e_4 + e_5 + e_6}} = \frac{-D\pi}{\sqrt{e}} \quad (4.4)$$

ここで、

$$\begin{aligned} e_1 &= (BC - F^2)n_{px}^2 \\ e_2 &= (AC - G^2)n_{py}^2 \\ e_3 &= (AB - H^2)n_{pz}^2 \\ e_4 &= 2(FG - CH)n_{px}n_{py} \\ e_5 &= -2(BG - FH)n_{px}n_{pz} \\ e_6 &= -2(AF - GH)n_{py}n_{pz}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

ここに、 θ_i と ϕ_i は、**図 4-2**に示したように、法線ベクトルを定義するための角度である ($0 \leq \theta_i, \phi_i \leq 180^\circ$)。また、下付き添え字の i は各粒子において計算する断面積のインデックス番号である。式(4.4)、(4.5)の導出過程に関しては、本文末尾の付録Aに詳細を示す。また、式(4.1)に示した楕円体の一般式から、楕円体の軸長さ、回転軸、回転角度を求めるための計算式は、本文末尾の付録Bに示す。

なお、CT画像はボクセル画像であり、直交断面 (XY 面, XZ 面, YZ 面) における断面積を評価するのは比較的簡単であるが、直交軸に対して斜交する断面積を直接的に計算するのは非常に難しい。そこで、本手法では、計算の過程で、平面の方程式を決定する法線ベクトル n_{px} , n_{py} , n_{pz} が、X, Y, Z 軸のいずれかに一致するような回転ベクトルを求めた後、評価対象となる断面が直交断面に一致するように粒子を回転するアフィン変換を行うことで、粒子の断面積を計算する。

4.2.2 最適化計算

CT 画像から抽出した粒子において計算される粒子の断面積を $S_{p,i}$ 、楕円体の断面積を $S_{e,i}$ 、とする場合、最適化計算によって最小化する目的関数 f_{obj} は、式(4.6)で表される。

$$f_{obj} = \sum_{i=1}^n (S_{p,i} - S_{e,i})^2 \quad (4.6)$$

ここで、 n は各粒子において計算する断面積の数を表す。**図 4-2**において、 θ_i と ϕ_i を設定すると ($0 \leq \theta_i, \phi_i \leq 180^\circ$)、法線ベクトルが定義され、粒子の断面積を計算することが可能となる。本研究においては、 θ_i 及び ϕ_i を 15° 毎に設定することを基本とする。この時、重複を除くと、粒子 1 個につき 132 組の断面積を計算される ($n = 132$)。

本研究では、式(4.6)を最小化するため、非線形最小二乗法の一つである Gauss-Newton 法を使って式(4.1)の未知数を評価する。**図 4-3**に最適化計算の流れを示す。以下に、最適化計算の詳細について述べる。

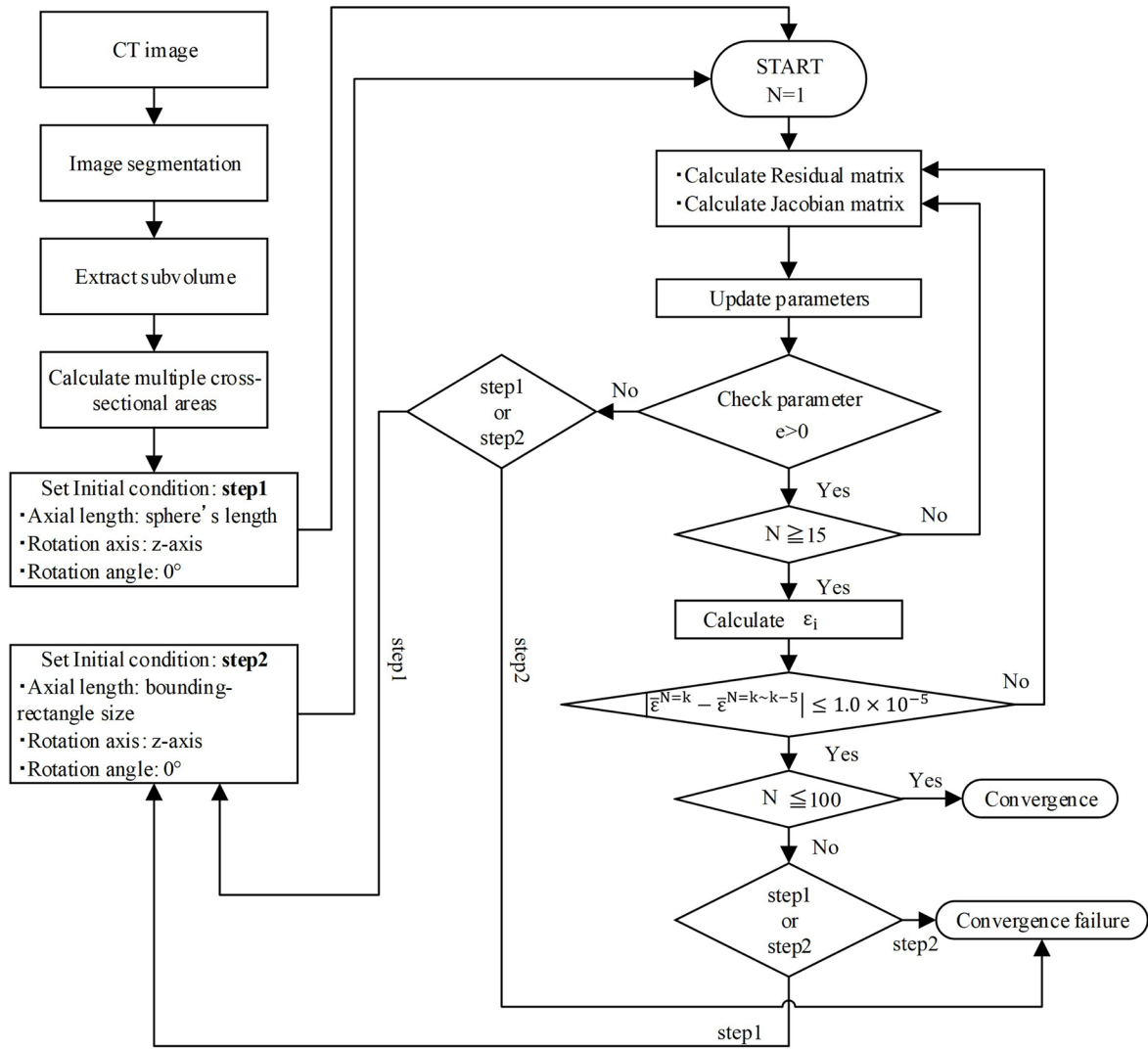


図 4-3 最適化計算の計算フロー

(1) Step1

まず始めに、楕円体の軸長さ、回転軸の方向ベクトル、回転角度の初期値を与え、式(4.1)内の係数を計算する。軸長さは、画像セグメンテーションによって抽出された粒子の体積から求めた球相当径を、回転軸の方向ベクトルはZ軸、回転角度は0°を初期値とする。次に、Gauss-Newton法の定義に基づいてパラメータを更新する。その後、更新されたパラメータを使い、式(4.7)で表される収束判定基準を各断面において計算する。反復計算は、収束判定基準に概ね変化が無くなった時点で計算を終える。つまり、現在の計算段階における収束判定基準の平均値 $\bar{\epsilon}^{N=k}$ を粒子について計算し、5回前までの計算段階における収束判定基準の平均値 $\bar{\epsilon}^{N=k-5}$ との差が 10^{-5} より小さければ、パラメータがこれ以上更新されないと判断し、計算を終える。但し、反復計算の最小値は15回、最大値は100回とする。

$$\begin{aligned}\varepsilon_i &= 1.0 - S_{p,i}/S_{e,i} \quad (S_{p,i} < S_{e,i} \text{ の場合}) \\ \varepsilon_i &= 1.0 - S_{e,i}/S_{p,i} \quad (S_{p,i} \geq S_{e,i} \text{ の場合})\end{aligned}\tag{4.7}$$

(2) Step2

Step1 の計算によって反復計算が収束した場合はそこで計算を終えるが、収束しなかった場合、初期値を変えて再度計算を行う。回転軸及び回転角度は Step1 と同様であるが、軸長さは対象粒子を囲む直方体の境界枠（バウンディングボックス）を使って計測された X 軸、Y 軸、Z 軸に対する粒子サイズを初期値とする。初期値の与え方以外の計算方法は、Step1 と同じである。Step2 においても収束しなかった場合、計算を打ち切ることとした。

なお、本手法によって粒子を楕円体として近似する前に、バウンディングボックスを使って X 軸、Y 軸、Z 軸に対する粒子サイズを計測する。この時点で、粒子サイズが 10voxel 未満の粒子は計算対象外とした。これは、事前に検討を行った結果、粒子を表現するボクセル数が不足すると、断面積を正確に求めることができず、楕円体への近似精度が低下したことが理由である。Gauss-Newton 法の具体的な計算式は、本文末尾の付録 C に記載する。

4.3 楕円体近似手法の妥当性検証

4.3.1 検証方法

本研究で構築した楕円体近似手法の妥当性を検証するためには、自然の砂粒子だけでなく、粒子形状がはっきりと分かっている粒子を対象に評価を行って精度検証する必要がある。そこで、本研究では 4 種類の試料（樹脂粒子：RP1, RP2, ガラスビーズ：GB, 鹿島珪砂 3 号：KS）について CT 撮影を行い、楕円体近似を行って粒子形状の評価を行う。RP1 と RP2 は楕円体形状の樹脂粒子であり、3D プリンター（KEYENCE AGILISTA-3200）を使って作製した。RP1 は長軸 d_1 、中間軸 d_2 、短軸 d_3 の粒子長さが 16, 12, 4mm であり、RP2 は d_1 , d_2 , d_3 が 16, 8, 4mm である。また、RP1, RP2 の真密度は $1,060\text{kg/m}^3$ である。GB は市販されているガラスビーズであり、表面が滑らかで粒子形状はほぼ球である。GB の粒子径は 0.71~1.00mm であり、真密度は $2,500\text{kg/m}^3$ である。KS は乾燥状態の自然砂で、表面に凹凸を有しており、自然砂特有の複雑な形状を示す。KS の真密度は $2,640\text{kg/m}^3$ であり、粒子径が 1~3mm 程度の砂粒子から成る。使用した試料の写真を図 4-4 に示す。4 種類の試料は、水平な机の上に置いたアクリル容器（内径 30mm, 高さ 60mm）に空中落下法を使って充填した。試料を充填したアクリル容器は、（一財）電力中央研究所に設置されたマイクロフォーカス X 線 CT（TXS-CT 450/160, テスコ社製）の 160kV 線源を使って CT 撮影を行った。

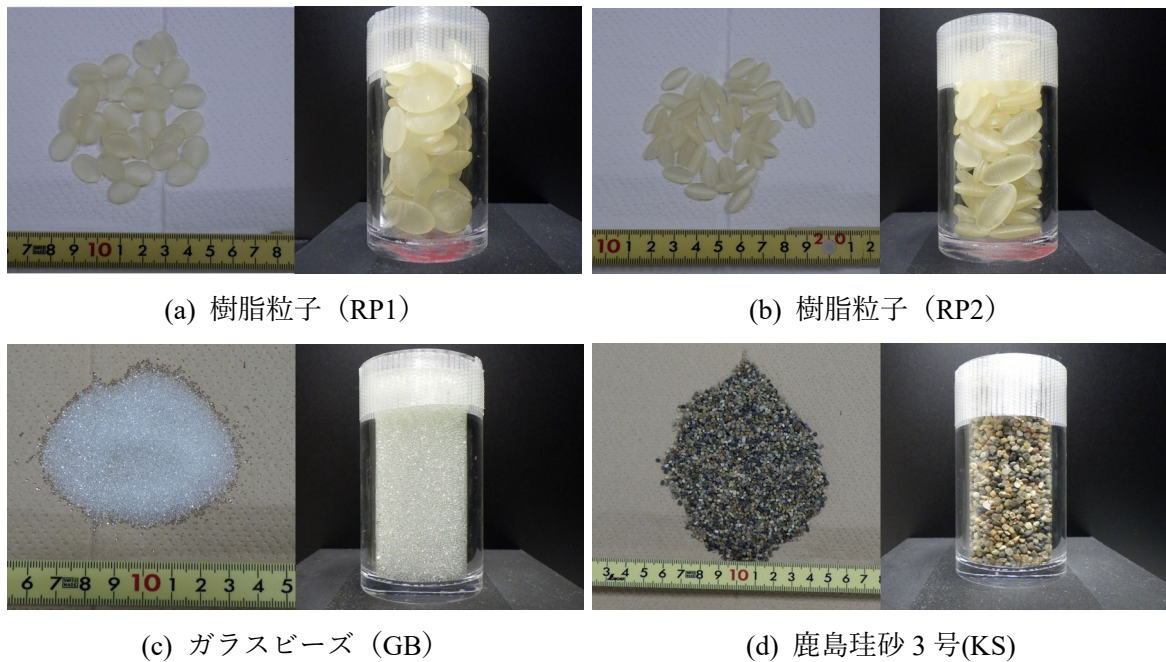


図 4-4 試験試料の写真

砂に関しては、画像解析式粒度分布計（ジャスコインタナショナル株式会社 FF-30micro）を使って粒子形状の測定を行った。画像解析式粒度分布計は、自由落下中の粒子の2次元投影画像をハイスピードデジタルカメラによって撮影し、2次元投影画像の画像解析を行うことで個々の粒子形状を計測する装置である。FF-30 micro の計測範囲は $30\mu\text{m}$ から 30mm である。計測対象粒子の材質がガラスや樹脂であると、計測光が粒子を透過してしまい、正確な値を計測できないため RP1, RP2, GB のような材料は画像解析式粒度分布計を使った計測に適さない材料である。ここでは、KS のみ対象とし、画像解析式粒度分布計による粒径を計測した。画像解析式粒度分布計では、面積相当径 d_m 、粒子を楕円近似した際の幅 e_w 及び長さ e_l の比 e_w/e_l を計測し ($e_w > e_l$)、CT 画像から評価した楕円体近似結果と比較する。

4.3.2 検証結果

(1) CT画像

試料をアクリル容器に入れて撮影したCT画像を図4-5に示す。図4-5(a),(b)の画素サイズは $45\mu\text{m}/\text{voxel}$ 、画像のサイズは $930\times 930\times 1,360\text{ voxel}$ である。また、図4-5(c),(d)の画素サイズは $25\mu\text{m}/\text{voxel}$ 、画像のサイズは $1,560\times 1,560\times 1,360\text{ voxel}$ である。GB, RP1, RP2は表面が滑らかであり、形状が単純な球もしくは楕円体から成ることが画像から分かる(図4-5(a),(b),(c))。一方、KSは自然の砂であるため、RP1, RP2, GBよりも複雑な形状を示す(図4-5(d))。

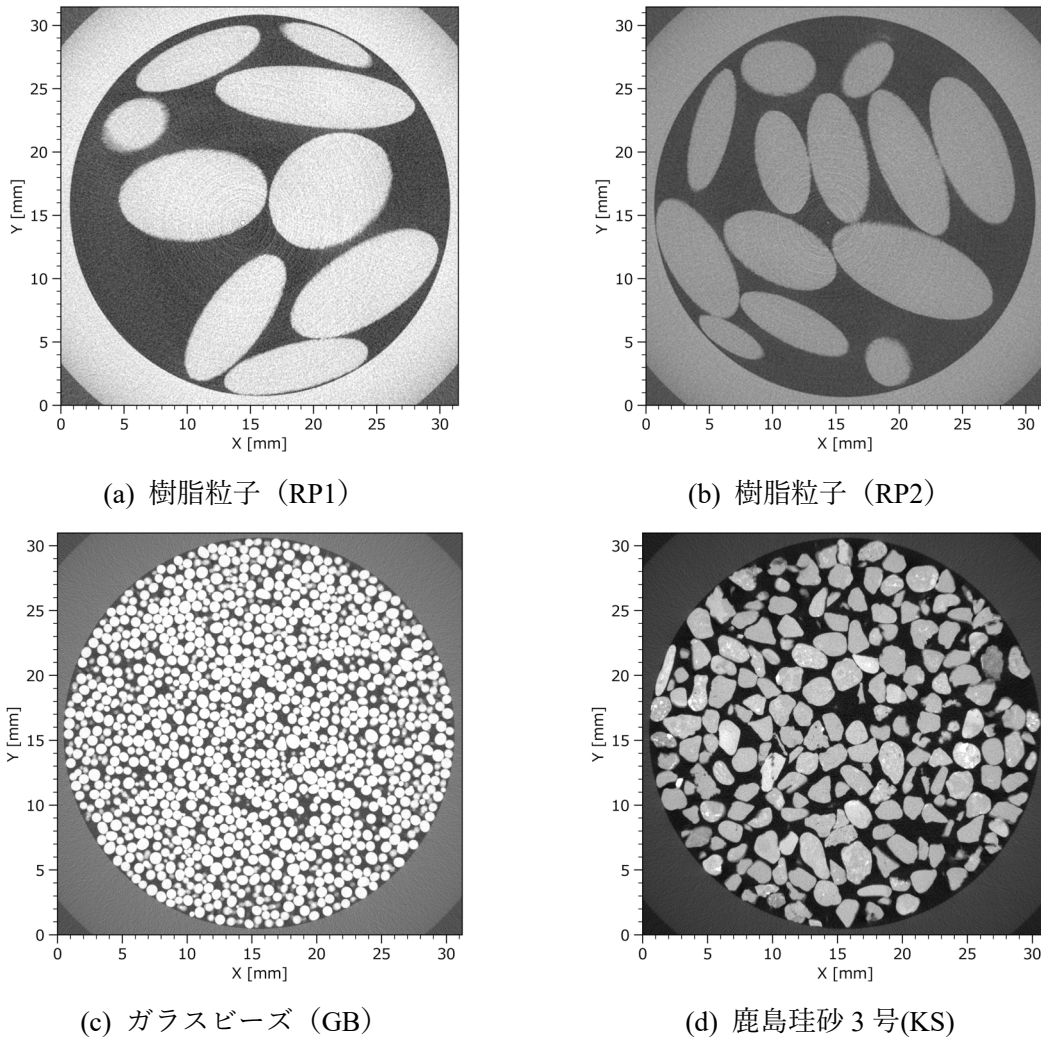


図4-5 CT画像

(2) 画像セグメンテーション

CT画像に対し、画像セグメンテーションを行った結果を図4-6に示す。画像セグメンテーションは、3.4.2節で述べたMarker-Controlled Watershed法を用いた。KSやGBにおいては、複数の粒子を一つの粒子として抽出された粒子、もしくは、一つの粒子が複数の粒子として抽出された粒子が散見されるが、概ね良好にセグメンテーションを行うことができた。セグメンテーションを行った結果、RP1においては46個、RP2においては76個、GBにおいては47,643個、KSにおいては3,381個の粒子が抽出された。

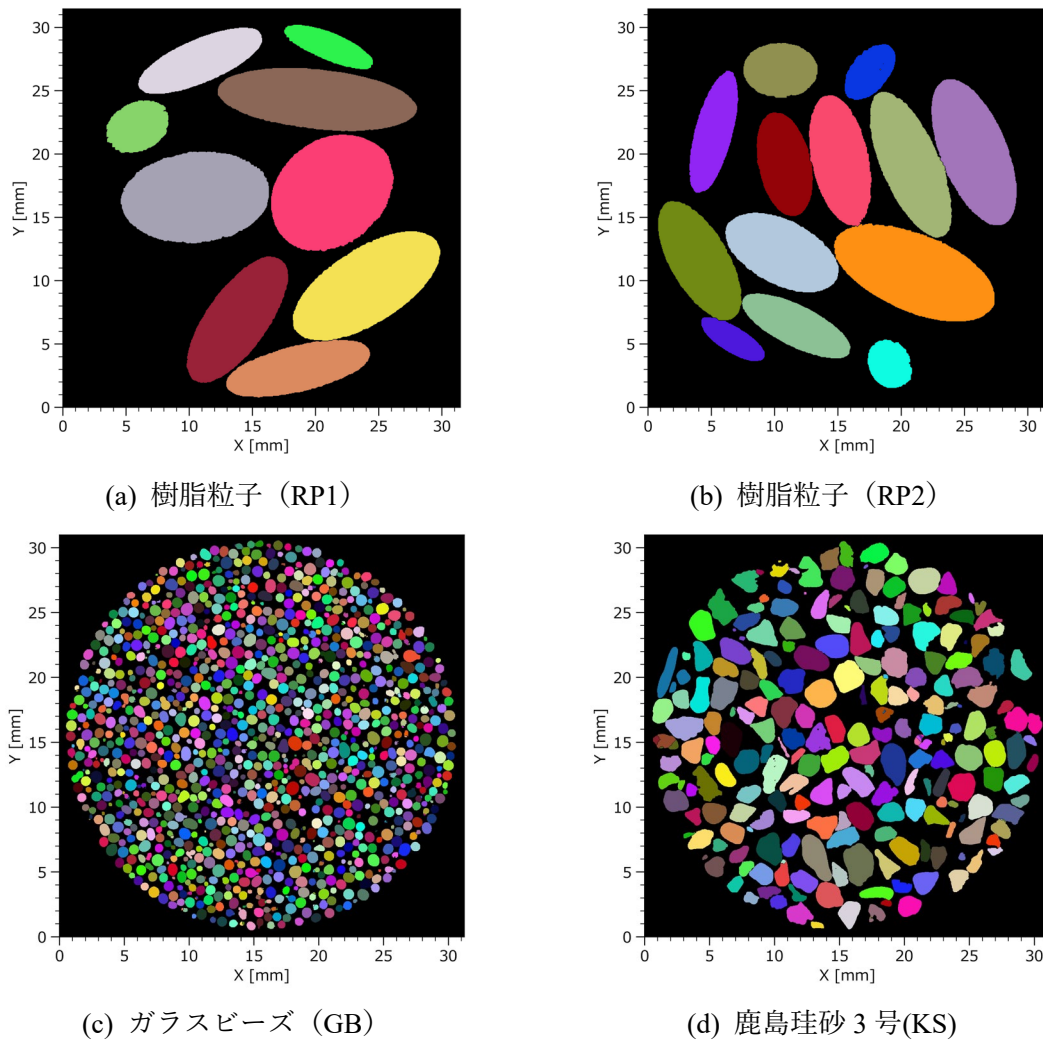


図4-6 セグメント画像

(3) 楕円体近似結果

図4-6に示したセグメント画像に対し、本研究で構築した手法を使って粒子を楕円体として近似する。4.2.2において述べたように、解析対象の粒子サイズが小さいと、粒子を表現するボクセルが不十分となり、正確に粒子の断面積を計算することができず、楕円体への近似精度が低下する。そこで楕円体近似計算を行う前に、画像セグメンテーションによって抽出された

粒子に対し、バウンディングボックスを使って粒子サイズを簡易評価し、X軸、Y軸、Z軸に対する粒子サイズが10voxel未満の粒子については、評価対象から除外した。その結果、RP1においては44個、RP2においては76個、GBにおいては46,899個、KSにおいては3,100個の粒子を楕円体として近似することができた。

図4-7に4種類の試料(RP1, RP2, GB, KS)における楕円体近似結果の一部を示す。各画像において、左側は2次元断面図を、右側は3次元画像を表す。RP1, RP2は、3Dプリンターで製作された楕円体形状の粒子であるが、いずれも精度良く楕円体として近似できた。また、GBは形状がほぼ球のガラスビーズであるが、一部の粒子は突起が確認される。但し、本研究で構築した手法は、突起の影響を受けずに良好に楕円体として近似することができている。KSは自然の砂であり、RP1, RP2, GBに比べて形状が複雑であり、一部に突起もしくはくびれが確認され、複雑な形状を示すものの、平均的な楕円体として良好に近似することができた。

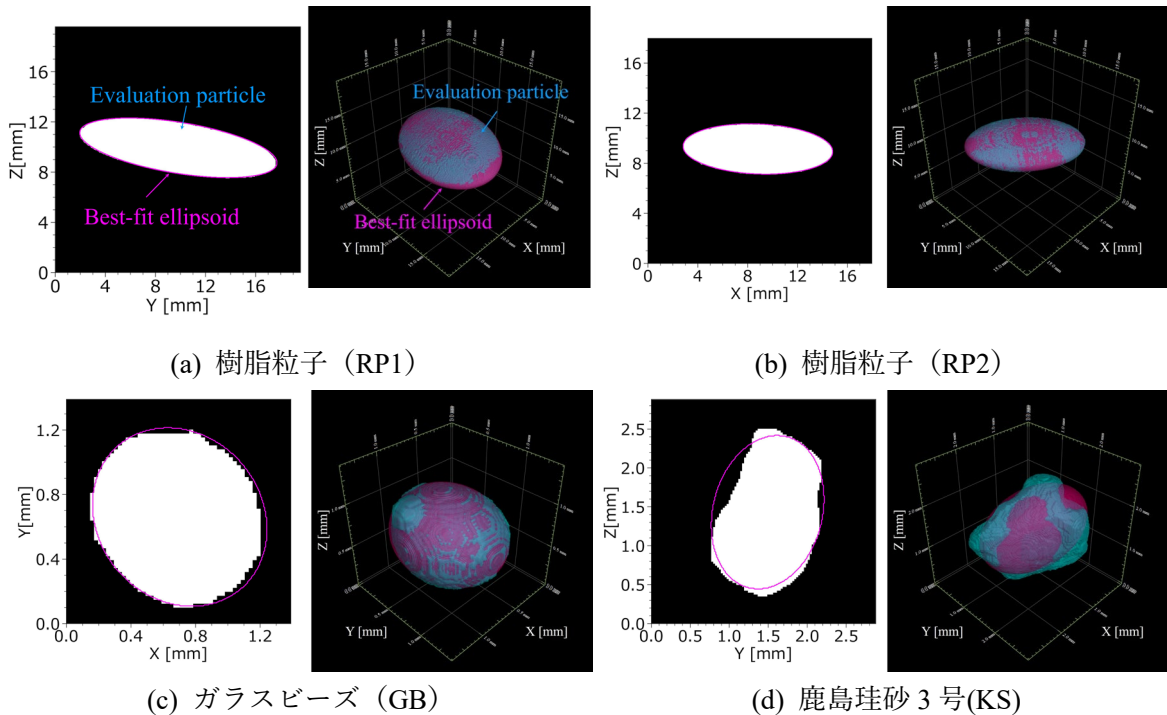


図 4-7 楕円体近似結果

(4) 統計解析結果

評価対象となる全ての粒子を楕円体近似し、統計量を整理した結果を表4-1に示す。統計量としては、算術平均 (Mean)、標準偏差 (Std)、第1四分位数 (Q_{25} , 25%)、第2四分位数 (Q_{50} , 50%)、第3四分位数 (Q_{75} , 75%)であり、母数は画像セグメンテーションによって抽出された粒子の数 (RP1: 46個, RP2: 76個, GB: 47,643個, KS: 3,381個)である。また、楕円体近似によって評価された長軸 d_1 、中間軸 d_2 、短軸 d_3 に加え、式(4.8)で計算されるKrumbein球形度 S_k も示した⁹⁾。さらに、画像解析式粒度分布計を使って計測されたKSの面積相当径 d_m の統計量についても併せて示す。

表 4-1 楕円体近似結果の統計量

Material	Parameter	Unit	Mean	Std	Q ₂₅	Q ₅₀	Q ₇₅
RP1	d_1		15.63	0.581	15.67	15.87	15.94
	d_2	[mm]	11.72	0.422	11.79	11.85	11.90
	d_3		3.91	0.127	3.84	3.88	3.90
	S_k	[-]	0.57	0.015	0.57	0.57	0.57
RP2	d_1		15.52	0.706	15.47	15.84	15.90
	d_2	[mm]	7.85	0.239	7.83	7.93	7.97
	d_3		3.87	0.126	3.82	3.83	3.85
	S_k	[-]	0.50	0.017	0.49	0.50	0.50
GB	d_1		0.88	0.141	0.81	0.87	0.96
	d_2	[mm]	0.78	0.100	0.74	0.79	0.84
	d_3		0.76	0.097	0.72	0.76	0.82
	S_k	[-]	0.92	0.065	0.89	0.94	0.97
KS	d_1		2.55	0.451	2.24	2.48	2.78
	d_2	[mm]	1.90	0.221	1.75	1.89	2.05
	d_3		1.39	0.213	1.26	1.39	1.54
	d_m		2.02	0.405	1.91	2.05	2.20
	S_k	[-]	0.75	0.079	0.70	0.75	0.80

$$S_k = \sqrt[3]{\frac{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3}{d_1^3}} \quad (4.8)$$

RP1 及び RP2 は、3D プリンターを使って d_1 , d_2 , d_3 がそれぞれ 16, 12, 4mm 及び 16, 8, 4mm となるように製作された粒子であるが、表 4-1 に示すように、CT 画像から評価した RP1 及び RP2 の d_1 , d_2 , d_3 の中央値は粒子の製作条件に概ね等しく、その誤差は最大 0.17mm (4voxel) であった。また、CT 画像から評価した GB の d_1 , d_2 , d_3 の中央値は、ガラスビーズの粒子サイズの仕様である 0.7~1.0mm の範囲に収まった。さらに、CT 画像から評価した KS の d_1 , d_2 , d_3 の中央値は、画像解析式粒度分布計を使って計測された KS における d_m の中央値と大差ない結果が得られた。式(4.8)によって計算される Krumbein の球形度 S_k の中央値は、GB が 0.94 となった。これは、GB は形状がほぼ球のガラスビーズであることから、球形度が 1 に近くなったと考えられる。しかし、図 4-6(c)をよく見ると、ガラスビーズの中には形状が球ではなく楕円体の形状をしている粒子も散見され、この影響によって球形度は完全に 1 とはならなかったと考えられる。

本研究で開発した粒子ファブリック解析で評価した結果は、3Dプリンターで製作した粒子(RP1, RP2)は粒子の製作条件と、ガラスビーズは粒子の仕様と、砂は画像解析式粒度分布計で計測された結果との統計量を比較し、両者に有意な差はなく、精度良く粒子の性状を評価できることが確認された。

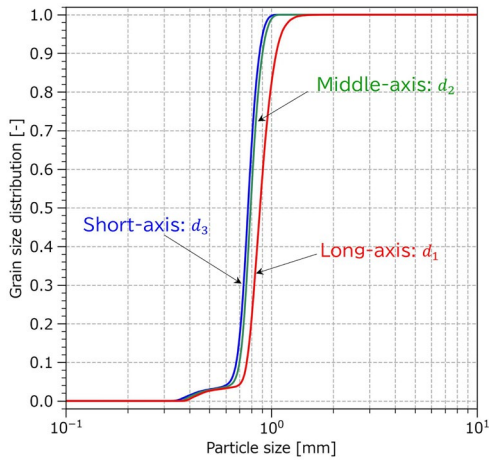
(5) 粒径加積曲線, 粒子形状の評価結果

図 4-8(a)は、GB 及び KS の粒径加積曲線であり、図 4-8(a2)においては、画像解析式粒度分布計を使って計測した KS の面積相当径 d_m の粒径加積曲線も併せて示す。図 4-8(b)は、GB 及び KS の形状指標 (アスペクト率 d_3/d_1 , 細長率 d_2/d_1 , 扁平率 d_3/d_2) のヒストグラムであり、図 4-8(b2)においては、画像解析式粒度分布計を使って KS を計測し、粒子を楕円近似した際の幅 e_w 及び長さ e_l の比 e_w/e_l のヒストグラムについても併せて示す。図 4-8(c)は、Zingg(1935)によって提案された粒子の形状を分類するダイアグラム図であり¹⁰⁾、縦軸を d_2/d_1 、横軸を d_3/d_2 とする 2次元ヒストグラムコンター図である。 d_2/d_1 及び d_3/d_2 が $2/3$ (≈ 0.67)となる値を境界とし、粒子形状が球状 (Sphere), 棒状 (Rods), 円盤状 (Disks), 小判状 (Blades) に分類される。

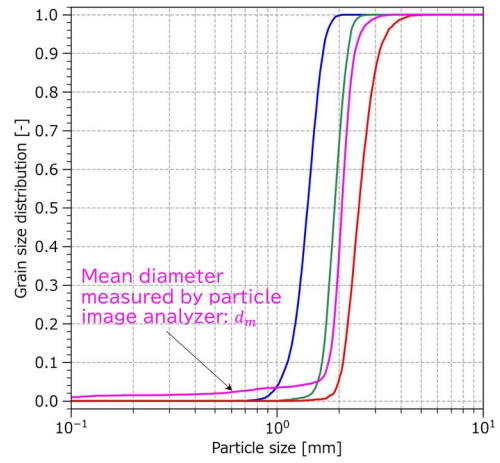
図 4-8(a1)においては、GB における d_1 , d_2 , d_3 の粒径加積曲線はほぼ一致した。これは GB の形状がほぼ球であり、 d_1 , d_2 , d_3 の分布に大差が無い事を表している。一方、図 4-8 (a2)においては、KS の d_1 , d_2 , d_3 に関する粒径加積曲線と、画像解析式粒度分布計で計測された d_m の粒径加積曲線は、曲線が立ち上がる前の部分で誤差が生じた。これは、画像解析式粒度分布計の最小径は $30\mu\text{m}$ であるのに対し、CT 画像に対する評価においては、粒子径が 0.25mm ($0.25\text{mm}/\text{voxel} \times 10\text{voxel}$) 以上の粒子を評価対象としたためである。但し、粒子形状が大きくなるに従い、両者の曲線勾配は概ね等しくなった。また、 d_m の粒径加積曲線は、 d_1 もしくは d_2 と近い曲線となったが、これは画像解析式粒度分布計の計測方法が影響していると考えられる。画像解析式粒度分布計は、自由落下中の粒子の投影画像を計測して粒子形状を評価するため、空気抵抗が小さくなるような方向の粒子径を捉えやすいことが報告されている。この理由によって、 d_m の粒径加積曲線は、 d_1 もしくは d_2 と近い結果になったと考えられる。

図 4-8(b1)においては、CT 画像から評価した d_2/d_1 , d_3/d_2 のヒストグラムのピークが 1 付近に集中する結果となったが、これは GB の形状がほぼ球であるためである。しかし、前述したように、ガラスビーズの中には一部楕円体の形状を有している粒子も散見されるため、この影響によって各ヒストグラムが完全には一致しなかったと考えられる。一方、図 4-8(b2)によれば、画像解析式粒度分布計で計測された e_w/e_l のヒストグラムと、CT 画像から評価した d_2/d_1 , d_3/d_2 のヒストグラムの形状はほぼ一致した。

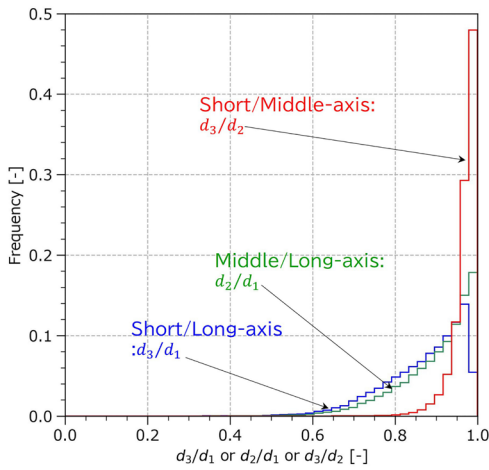
図 4-8(c1)によると、GB はほぼ全ての粒子が球に分類される。一方、図 4-8(c2)によると、KS も大部分の粒子は球に分類される。しかし、GB に比べるとバラつきが大きく、KS においては、球状の粒子だけではなく、円盤状もしくは棒状に近い形状の粒子も含まれていることが分かる。これは、KS が自然の砂であるためであり、様々な形状の砂粒子から構成されることを表している。



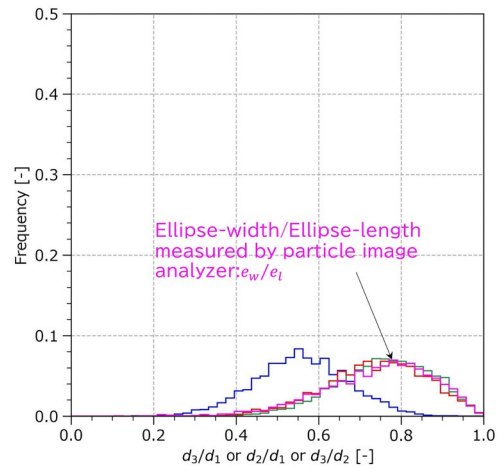
(a1) 粒径加積曲線 (GB)



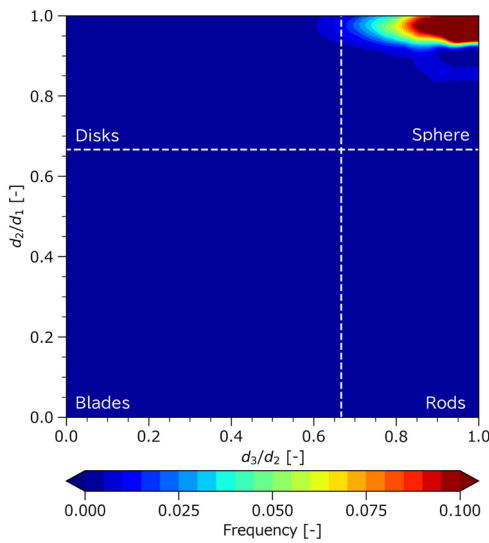
(a2) 粒径加積曲線 (KS)



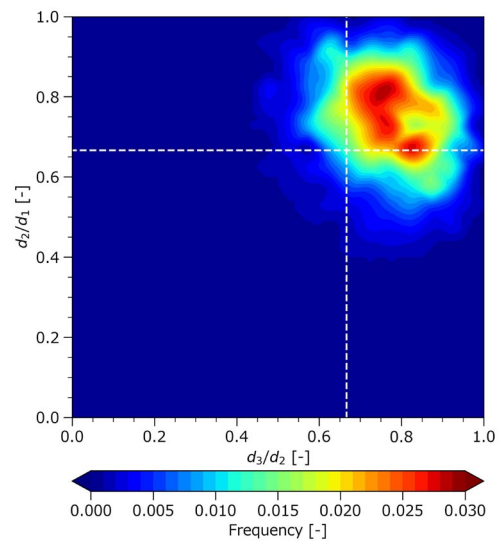
(b1) 形状指標ヒストグラム (GB)



(b2) 形状指標ヒストグラム (KS)



(c1) Zingg ダイアグラム (GB)



(c2) Zingg ダイアグラム (KS)

図 4-8 粒子ファブリック解析結果

4.4 考察

3Dプリンターで作成した粒子とガラスビーズ(RP1, RP2, GB)に対して評価を行った結果、本手法で評価された粒子の長さは、粒子の仕様と概ね一致した。また、自然の砂粒子(KS)に対しては、画像解析式粒度分布計で計測された粒子径や形状と大差ない結果が得られ、複雑な形状を有する粒子を平均的な楕円体として近似できることを確認した。以上のことから、本手法は、表面が滑らかで、球や楕円体のように単純な形状を示す粒子だけではなく、表面に凹凸を有し、複雑な形状を示す自然の砂粒子においても、同じ計算方法を使って精度よく楕円体として近似できることを確認した。本手法の特徴を、以下に整理する。

1点目は、粒子の断面積を指標として楕円体近似する点である。自然の砂粒子は、ガラスビーズのように表面が滑らかであることは殆どなく、少なからず表面に凹凸を有している。従って、ノギスを使って粒子の大きさを直接測定するような方法は^{11),12)}、粒子表面の凹凸の影響を受けやすい可能性がある。一方、本手法は粒子の断面積に基づき楕円体として近似する。つまり、粒子の断面積に対して粒子表面近傍の面積が小さいため、粒子表面の凹凸の影響を受けにくい。このことにより、表面に凹凸を有する粒子であっても、平均的な楕円体として近似することが可能となる。

2点目は、表面が滑らかで、球や楕円体のように単純な形状を示す粒子だけではなく、表面に凹凸を有し、複雑な形状を示す自然の砂粒子においても、同じパラメーターを使って計算方法を変えることなく楕円体として近似できる点である。例えば、球や楕円体のような粒子と、いびつな形状を示す粒子とで、パラメーターや計算アルゴリズムを変えなければならない場合、楕円体近似を行う前に、別途パラメーターを検証しなければならない。しかし、本研究で示した方法は、そういったパラメーターの検証を行う必要がなく、利便性が良いと考えられる。なお、本研究では、 θ_i 、 ϕ_i を 15° 毎に、一つの粒子当たり132組の断面積を計算したが、 θ_i 、 ϕ_i を 5° 毎に、一つの粒子当たり1,261組とした条件も事前に検討した。しかし、計算時間の増加と比較して、楕円体への近似結果はほとんど変わらなかった。

3点目は、セグメンテーションによって抽出した粒子を、直接評価できる点である。先行研究では、セグメンテーションで抽出した粒子のボクセル画像を、STL形式のメッシュモデルに変換することで楕円体として近似する手法が提案されている^{13),14)}。しかし、STL形式への変換を前提とした手法では、ボクセル画像からメッシュモデルへの変換精度について別途検討することが必要である。一方で、本手法はセグメンテーションによって抽出された粒子を、メッシュモデルに変換することなく、直接楕円体として近似することができた。

本研究で構築した手法により、粒子を楕円体として近似し、粒子の長軸、中間軸、短軸の軸長さ及び方向を同時に評価することができた。また、楕円体の一般式における係数を直接評価することができるため、DEM等の数値解析における粒状材料のモデル化とも親和性が高いと考えられる。一方、本研究では、粒子を楕円体として近似する前に、バウンディングボックスを用いた評価を行い、X, Y, Z軸に対する粒子長さを測定し、粒子長さが10voxel未満の粒子は計算対象から除外した。これは、事前検討において、粒子長さが10voxel未満の粒子は粒子を

表現するボクセルが不足し、正確な断面積を計算することができず、楕円体としての近似精度が低下したためである。従って、本手法は、粒子長さが10voxel以上の粒子を評価対象とすることが望ましく、想定される粒子の大きさに応じて拡大率を設定し、CT撮影することが必要である。

4.5 第4章のまとめ

本章では、CT画像中の粒子を対象に形状や方向を評価するため、3次元粒子ファブリック解析手法の開発を行った。さらに、4種類の材料を対象にCT撮影を行い、本手法の妥当性を検証した。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 楕円体の断面積を評価できる理論式を展開し、CT画像から抽出した粒子の断面積を指標とした楕円体近似手法を構築した。また、構築した手法に基づき、非線形最小二乗法の一つである Gauss-Newton 法を使い、楕円体一般式の係数を評価できる解析プログラムを開発した。その結果、多数の粒子の3次元ファブリック性状を体系的に評価することが可能になった。
- 2) 3Dプリンターで作成した粒子とガラスビーズ及び自然の砂粒子を対象に、本研究で開発した手法を用いて粒子のファブリック性状を評価した。評価結果は、3Dプリンターで作成した粒子とガラスビーズにおいては粒子の設計仕様と、自然の砂粒子においては画像解析式粒度分布計の計測結果と比較し、本手法の妥当性を検証した。その結果、本手法はいずれの粒子においても精度良く楕円体として評価できることが確認された。
- 3) 本研究で開発した手法は、ボクセル画像をメッシュモデルに変換する必要はなく、評価対象となる粒子の形状によってパラメーターを変える必要もないことから、利便性の良い評価手法であると考えられる。また、粒子の断面積を指標として楕円体近似するため、粒子表面の凹凸の影響を受けにくく、いびつな形状の粒子であっても平均的な楕円体として近似することが可能である。

参考文献

- 1) Lin, X., Ng, T-T. (1997): A three-dimensional discrete element model using arrays of ellipsoids, *Geotechnique*, Vol.47, No.2, pp.319-329.
- 2) Ng, T-T. (2009): Discrete Element Method Simulations of the Critical State of a Granular Material, *International Journal of Geomechanics*, Vol.9, pp.209-216.
- 3) Yan, W.M. (2009): Fabric evolution in a numerical direct shear test, *Computers and Geotechnics*, Vol.36, No.4, pp.597-603.
- 4) Yan, B., Regueiro, R., Sture, S. (2009): Three-dimensional ellipsoidal discrete element modeling of granular materials and its coupling with finite element facets, *Engineering Computations*, Vol.27, No.4, pp.519-550.
- 5) 野原慎太郎, 棕木俊文(2020): X線CTを用いた砂粒子のファブリック解析, 第55回地盤工学研究発表会.
- 6) Nohara, S., Mukunoki, T. (2021): Quantitative evaluation of soil structure and strain in three dimensions under shear using X-ray computed tomography image analysis, *Journal of Imaging*, Vol.7, No.11., 230.
- 7) Bektas, S. (2015): Least squares fitting of ellipsoid using orthogonal distances, *Boletim de Ciencias Geodesicas*, Vol.21, No.2, pp.329-339.
- 8) Bektas, S. (2016): Intersection of an Ellipsoid and a Plane, *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, Vol.6. pp.273-283.
- 9) Krumbein, W.C. (1941): Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles, *Journal of Sedimentary Research*, Vol.11, No.2, pp.64-72.
- 10) Zingg, T. (1935): Beitrag zur schotteranalyse, *Schweizerische Mineralogische and Petrographische Mitteilungen*, No.15, pp.39-140.
- 11) Ketcham, R.A. (2005): Three-dimensional grain fabric measurements using high-resolution X-ray computed tomography, *Journal of Structural Geology*, Vol.27, No.7, pp.1217-1228.
- 12) The University of Texas High-Resolution X-ray Computed Tomography Facility, QUANT3D, <https://www.crlab.geo.utexas.edu/software/quant3d/> (最終アクセス日: 2022/9/26) .
- 13) 片桐淳, 松島亘志, 竿本英貴, 宇津野衛, 山田恭央(2014): SPring-8のX線マイクロCTを用いた3次元土粒子形状の定量的評価, *土木学会論文集C (地圏工学)*, Vol.70, No.2, pp.265-274.
- 14) 中野司(2006): STL データ処理用のプログラムについて, *地質調査総合センター研究資料集*, No. 448, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

第5章 一面せん断試験によるせん断の進行に伴う粒子構造の変化の評価

5.1 概説

本章では、一面せん断過程にある供試体の内部構造をマイクロフォーカス X 線 CT で可視化し¹⁾、CT 画像の画像解析を行ってせん断の進行に伴って変化する粒子構造の特徴を評価する²⁾。一面せん断試験は、上下に分かれたせん断容器に試料を充填し、垂直応力を載荷した状態で下側のせん断容器を水平方向にずらすことでせん断を行う試験方法である。せん断面の位置を厳密に決定できるため、せん断面からの距離に応じて粒子構造の変化の傾向を明らかにできると考えられる。

粒状材料に荷重が載荷されると、材料内部においてひずみが局所化し、せん断帯を形成して破壊に至る。ひずみの局所化には、粒子間の滑りや粒子自身の回転が大きく影響することが知られている^{3),4)}。また、粒状材料のせん断破壊は、不均質性が高く、粒状材料を構成する全ての粒子が外力を支持する訳ではない^{5),6)}。従って、せん断に伴う粒子構造の変化と粒子間の接触関係をよく理解することが必要である。本章では、まず CT 画像より間隙率及び粒子間の接触状況について評価する。次に、DIC 解析を行って、体積ひずみ及びせん断ひずみの3次元分布を評価する。さらに、本研究で開発した3次元粒子ファブリック解析を適用し、せん断の進行に伴う粒子方向の変化を評価する。最後に、各評価結果を相互に比較し、粒子構造の変化がひずみに及ぼす影響について考察を行う。

5.2 試験方法

5.2.1 材料特性

本試験では、試料として鹿島珪砂 3 号を用いる。砂試料の真密度は $2,640\text{kg/m}^3$ である。画像解析式粒度分布計(ジャスコインタナショナル株式会社 FF-30micro)で粒径を計測した結果、粒径の中央値は 2.02mm であった。図 5-1 に鹿島珪砂 3 号の粒径加積曲線を示す。なお、本試験で使用した砂試料は、第 4 章において CT 画像から 3 次元粒子形状を評価した試料 KS と同じである。

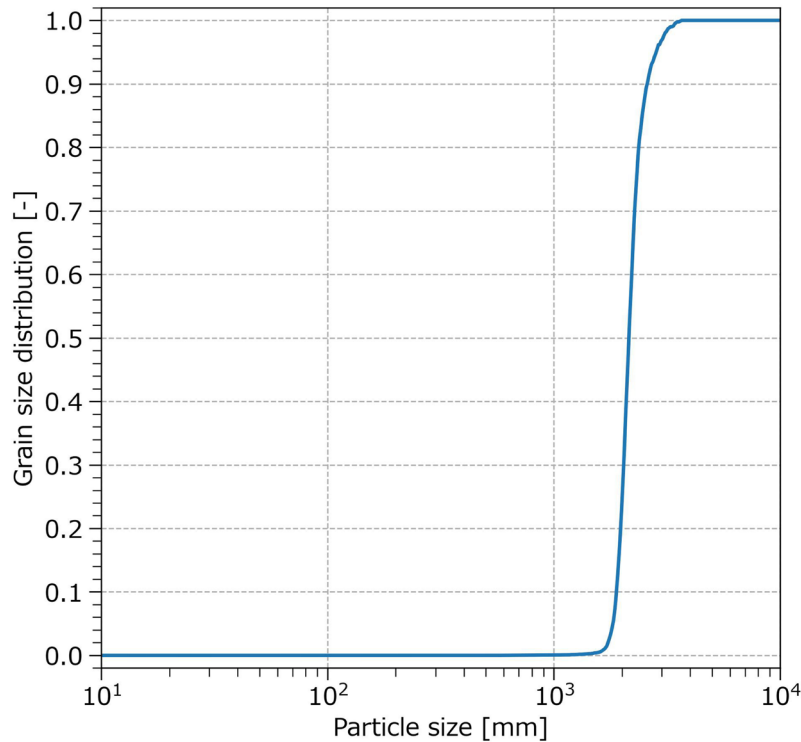
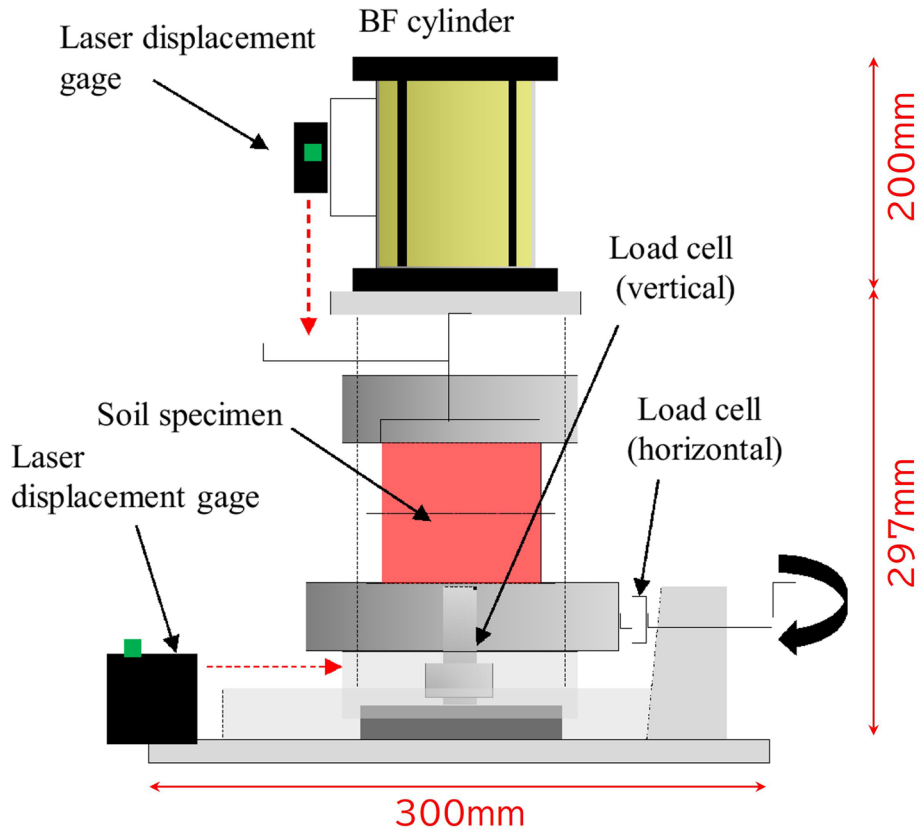


図 5-1 砂試料の粒径加積曲線（画像解析式粒度分布計）

5.2.2 試験装置と試験方法

本試験では、垂直荷重を一定とした定圧型の一面せん断試験を実施する。図 5-2 に実験装置の概要図を示す³⁾。試験装置は、X線の透過性を考慮してアルミ材が用いられており、砂を充填するせん断容器の大きさは、内径が 80mm、高さが 40mm である。砂は、間隙率を 0.39（間隙比は 0.64）とする条件で、乾燥状態の試料を 5 層に分けて容器に充填した。試料を容器に充填した後、試験装置を X 線 CT のテーブル上に設置し、ペロフラムシリンダーを使って垂直荷重 120kPa を載荷し、10 分間の圧密を行った後にせん断試験を行った。なお、試料の乱れや位置ずれを最小限にするため、試験終了まで試験装置は X 線 CT のテーブルから降ろさずに試験を行った。

試験装置は、せん断容器上部が支柱に固定され、せん断容器下部に取り付けられたネジを手動で回転することで水平方向にせん断変位が行われる。せん断速度は 0.80mm/min とし、せん断変位量が 8.0mm に到達した時点で試験終了とする。初期状態 (S0) 及び、せん断変位量 (Dh) が 0.3, 3, 5, 8mm (S1~S4) に到達した時点で一旦せん断変位を止めて CT 撮影を行う。CT 撮影は、熊本大学に設置されているマイクロフォーカス X 線 CT (TOSCANER-32300FPD, 東芝 IT コントロールシステム株式会社製) を用い、画像サイズが 1,024 × 1,024 × 600 voxel, 画素サイズが 91µm/voxel とする条件で CT 撮影を行う。



Chevalier(2019)に追記

図 5-2 一面せん断試験の試験装置概要図³⁾

5.3 画像解析方法

5.3.1 間隙率、接触面率の計算

CT 画像上で 3 次元の構造格子を定義し、各代表体積要素において間隙率や粒子間の噛み合わせ（以下、接触面率と呼ぶ）を評価する。間隙率、接触面率の計算方法を以下に示す。また、接触面率の計算方法の概念図を図 5-3 に示す。

a) 間隙率

画像セグメンテーションを行う際に作成した二値化画像より、各代表体積要素の体積に占める粒子以外の画素の割合を計算する。

b) 接触面率

画像セグメンテーションを行う際に作成した watershed_line 無しの画像（図 5-3(a)）、watershed_line 有りの画像（図 5-3(b)）より、両者の二値化画像を差し引いて接触面に相当する画素を抽出する。その後、各代表体積要素の体積に占める接触面に相当する画素の割合を計算する（図 5-3(c)）。

粒状材料においては、粒子と粒子の接触点において力が伝達されることが知られており⁶⁾、¹⁰⁾、粒子 1 個あたりの接触点数は配位数と呼ばれる。配位数が大きいほど、土構造が密で粒子

間が良く噛み合っている状態であることを表す。本研究では、代表体積要素内の接触面に相当する画素の割合（接触面率）を計算し、粒子と粒子の噛み合わせを単純化して表現する。つまり、接触面率が大きいほど、代表体積要素内の接触面が大きく、土構造が密で噛み合わせが良いことを表す。一方、接触面率が小さいほど代表体積要素内の接触面が小さく、粒子間の噛み合わせが悪いことを意味する。

間隙率、接触面率を計算するにあたり、代表体積要素の大きさを決定しなければならない。そこで、一面せん断実験の初期状態 (S0) の CT 画像に対し、代表体積要素の大きさを 10~100 voxel の範囲で 10voxel 毎に等方性の構造格子を作成し、各代表体積要素において間隙率を計算する。その後、間隙率のヒストグラムを作成し、代表要素体積の大きさについて検討する。

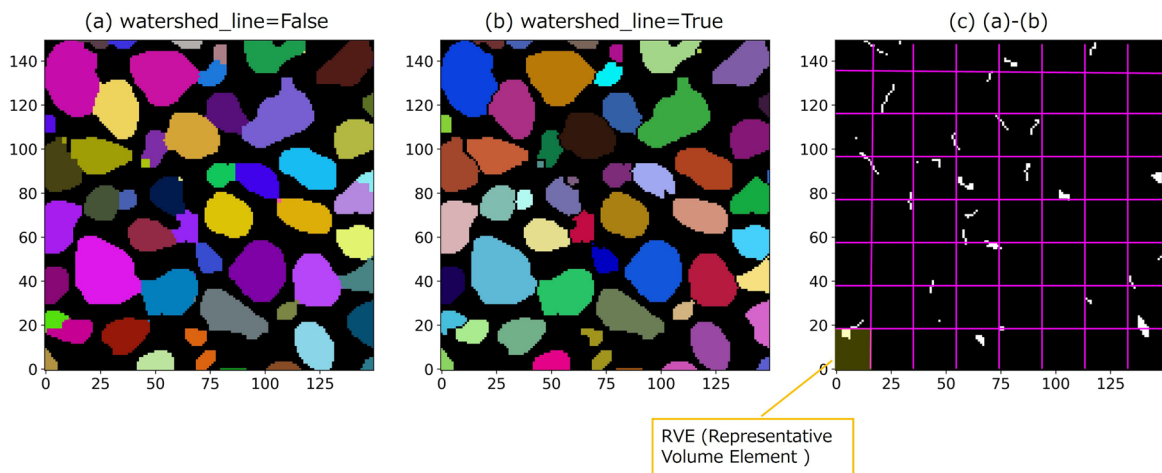


図 5-3 接触面率の計算方法概念図

5.3.2 DIC 解析

デジタル画像相関法 (DIC 法) は、変形前後の画像を比較して相関係数を計算し、画像内の任意の点の移動量を求めることにより、変形前後の変位量及び変位方向を評価する画像解析手法である¹¹⁾。また、評価された各画像間の変位分布より、ひずみの分布を評価することができる。ここでは、変位前後の CT 画像を対象に DIC 解析を実施し、せん断ひずみ及び体積ひずみの 3 次元分布を評価する。DIC 解析は、3 次元画像間の変位とひずみを評価することができる解析コード Tomowarp を使って行い¹²⁾、節点間隔は、x, y, z 方向のいずれについても 10voxel ($0.091\text{mm}/\text{voxel} \times 10\text{voxel} = 0.91\text{mm}$) とする条件で行う。

5.3.3 粒子ファブリック解析

画像セグメンテーションによって抽出された粒子を対象とし、本研究で開発した 3 次元粒子ファブリック解析手法を用いて、粒子の方向を評価する。第 3 章でも述べたように、本研究で開発した粒子ファブリック解析手法は、粒子を表現するボクセル数が不足すると、断面積を正確に求めることができず、楕円体への近似精度が低下する。そこで、画像セグメンテーションを行って抽出した粒子は、バウンディングボックス (粒子を取り囲む最小の矩形領域) によ

る評価を行って、X、Y、Z 軸に対する粒子サイズを事前に評価し、粒子サイズが 10voxel に満たない粒子は評価対象から除外する。

ここで、本章における画像解析のフロー図と、各評価項目に対応する画像を図 5-4 に整理する。図 5-4 中に示した図番号は、5.5 節で示す図の図番号に対応している。なお、画像セグメンテーションについては、3.4.2 節で示した Marker-Controlled Watershed 法を使って行った。

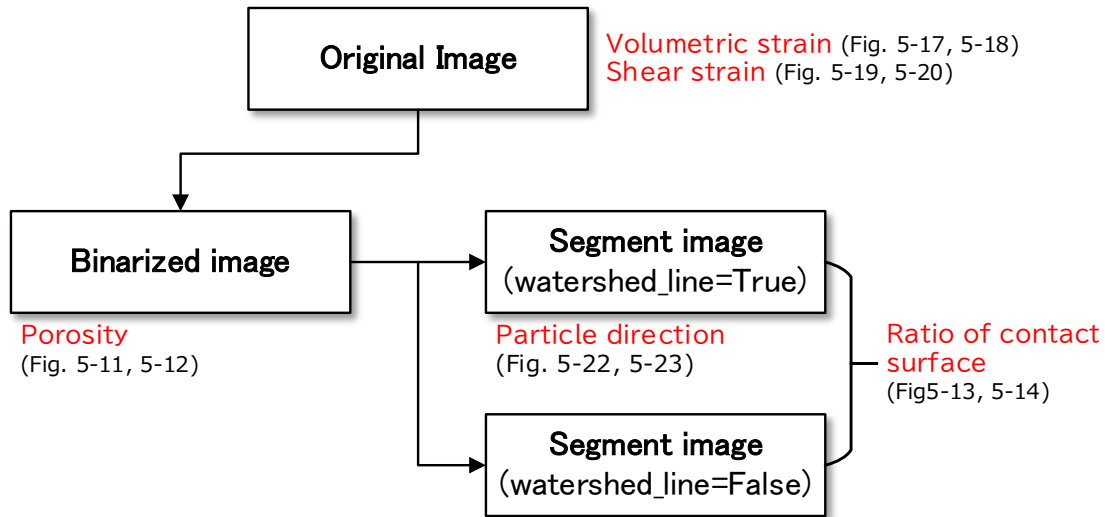


図 5-4 本章における画像解析のフロー図

5.4 試験結果

5.4.1 試験結果

本試験において計測されたせん断応力と鉛直変位の経時変化を図 5-5 に示す。水平変位量が約 1.3mm に到達するとせん断応力がほぼピークを迎え、その後はせん断応力が漸減し、ひずみ軟化過程に移行するという粒状材料特有の試験結果となった。試験開始から水平変位量が 0.6mm に到達するまでは、鉛直変位は減少し供試体全体が体積収縮する傾向にある。しかし、水平変位量が 1.8mm に到達すると、鉛直変位は増加に転じ、供試体全体が体積膨張する結果となった。特に、S1 (Dh=0.3mm) から S2 (Dh=3mm) にかけて、及び S2 から S3 (Dh=5mm) にかけては、鉛直変位量の増加傾向が急であった。本実験では、水平変位量が既定量に達した時に一旦せん断を止め、CT 撮影を行うということを繰り返しているため、少なからずせん断応力緩和の影響を受けていると考えられる。しかし、CT 撮影中も垂直荷重は載荷されており、供試体の内部構造に与える影響は軽微であると考えられる。

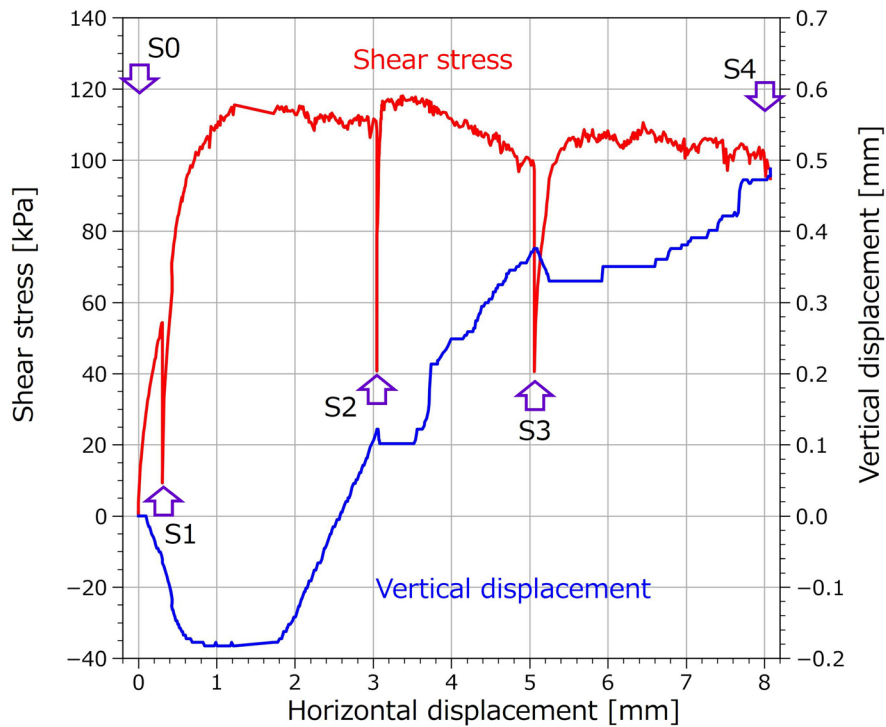


図 5-5 一面せん断試験の試験結果

5.4.2 CT 画像および画像セグメンテーション

S0 から S4 において撮影された CT 画像の XZ 断面図を図 5-6 に示す。また、CT 画像の XZ 断面図、YZ 断面図を 3 次元表示した図を図 5-7 に示す。今回の試験では、水平変位量が約 1.3mm に達した時点でせん断応力がピークに到達しており、S2 以降はひずみ軟化過程における CT 画像である。S0 においては空隙が試料全体で均等であるように見えるが、S2 以降、せん断面付近における空隙が増加する様子が確認できる。

次に、S0～S4 の CT 画像に対し、Marker-Controlled Watershed 法を使って画像セグメンテーションを行った結果を図 5-8 に示す。複数の粒子を一つの粒子として抽出された粒子、もしくは、一つの粒子が複数の粒子として抽出された粒子も散見されるが、概ね良好にセグメンテーションすることができた。セグメンテーションの結果、抽出された粒子の数を表 5-1 に整理する。S4 において粒子数が減少しているが、これは下部容器を水平方向に変位させたことにより、容器の一部が撮影視野から外れた影響であると考えられる。

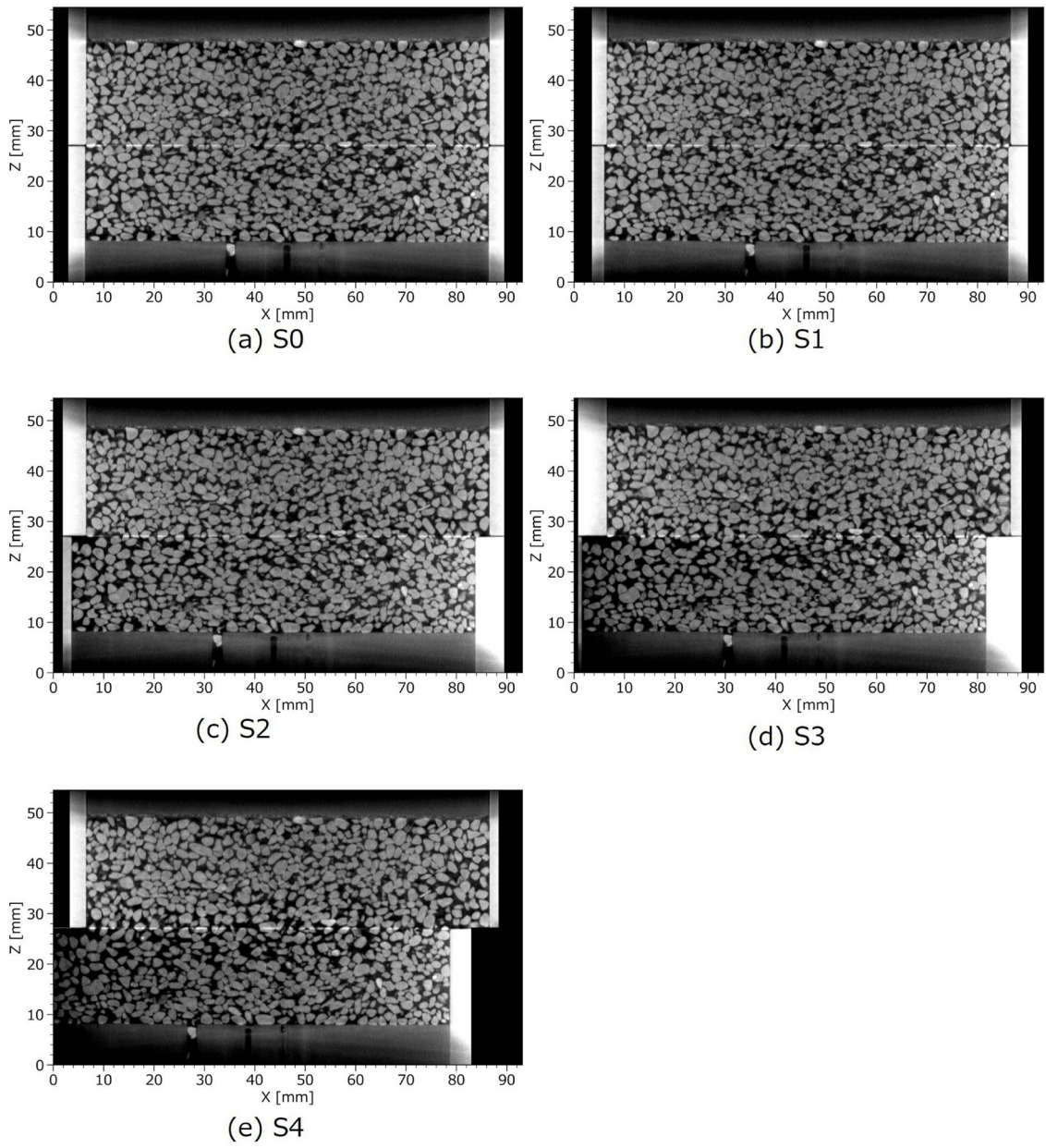


図 5-6 CT 画像 (XZ 断面図)

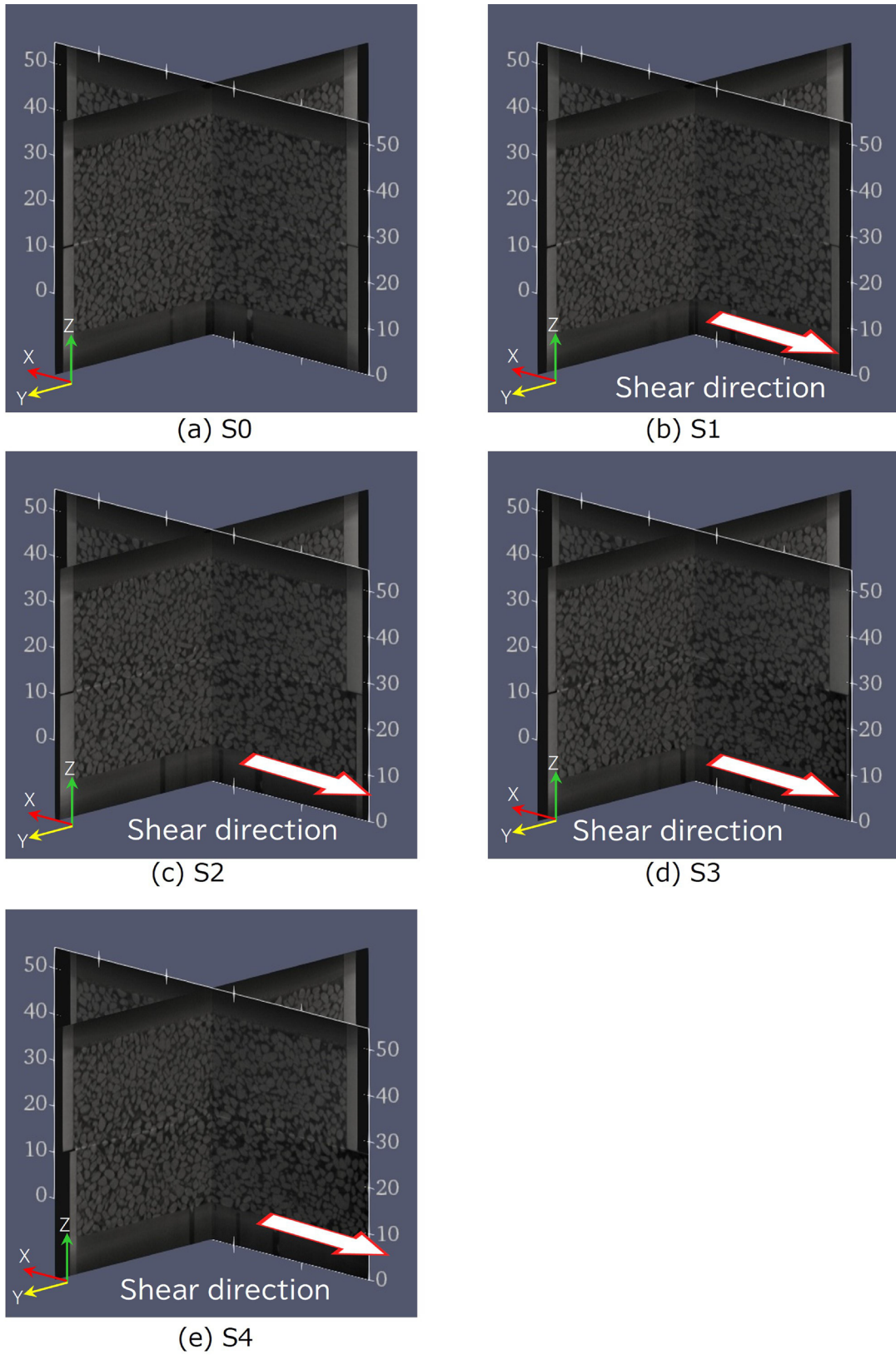


図 5-7 CT 画像 (3次元図)

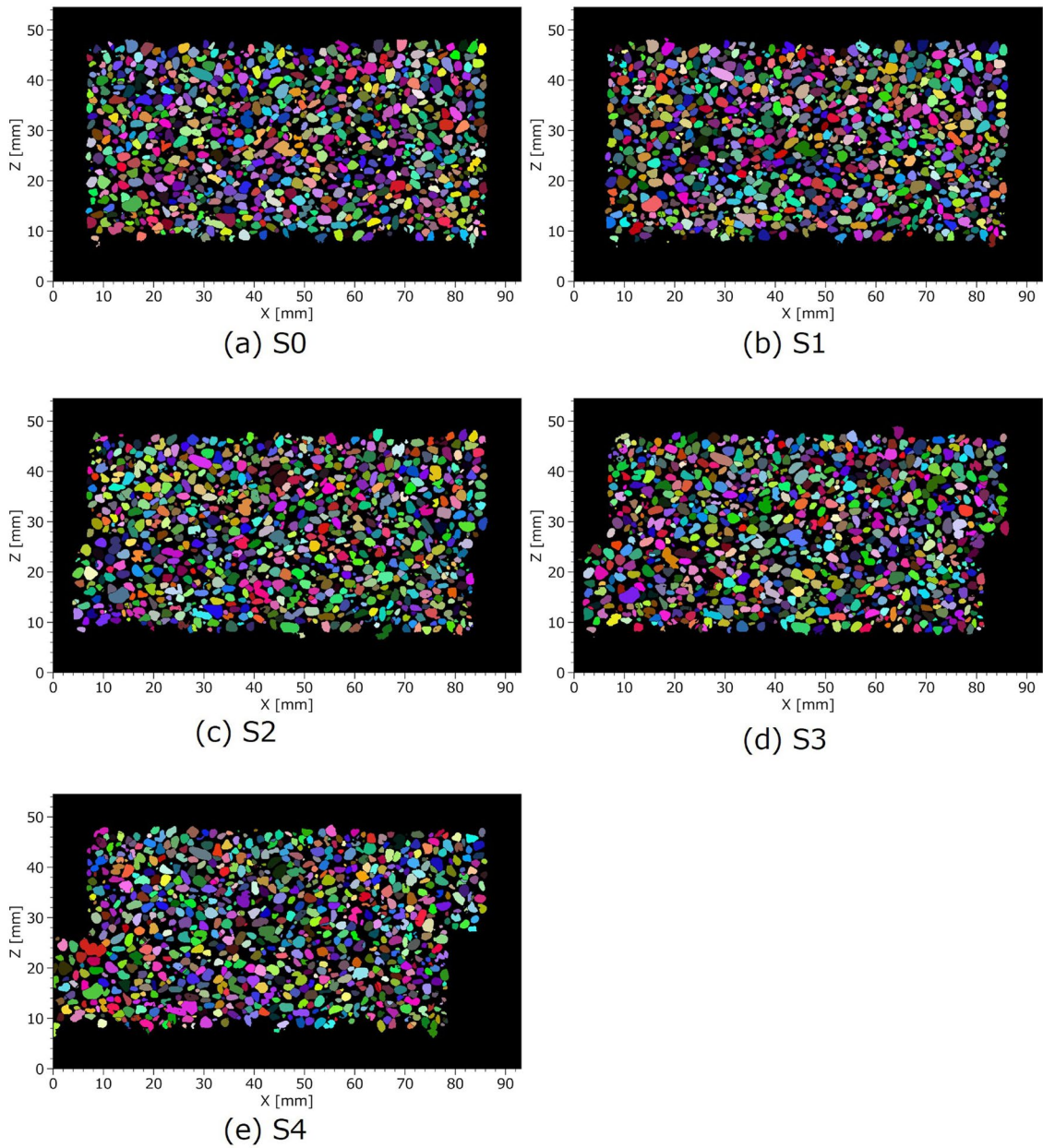


図 5-8 セグメント画像 (XZ 断面図)

表 5-1 各 CT 画像における粒子数

Name	Dh	Number of particles
S0	0.0 mm	24,444
S1	0.3 mm	24,426
S2	3.0 mm	24,136
S3	5.0 mm	23,773
S4	8.0 mm	23,503

S0, S2, S4 の CT 画像において、せん断帯付近の上部容器内において共通する粒子を目視によっていくつか判別して抽出し、XZ 断面図及び3次元図として表示した結果を図 5-9 に示す。S0 において、長軸は水平方向を、短軸は鉛直方向を向く粒子が多い。これは、試験容器に砂を充填する際、水平な机の上に容器を置いて行ったためであり、粒子長軸が力学的に安定な方向に堆積したためであると考えられる。せん断が進行して S2 に移行すると、粒子の鉛直位置に変化は見られるが、顕著な粒子回転は生じていない。しかし、S4 においては、隣接する粒子への乗り上げや落ち込みが生じている様子が確認される。また、P1 のように、せん断の進行に伴って粒子長軸が水平方向を向くように回転する粒子や、P2 のように、せん断の進行に伴って粒子長軸が鉛直方向を向くように回転する粒子が確認できる。一方、P3 のように、せん断が進行したとしても、方向がほとんど変化しない粒子もあり、せん断帯では、複雑に粒子構造が変化していることが分かる。

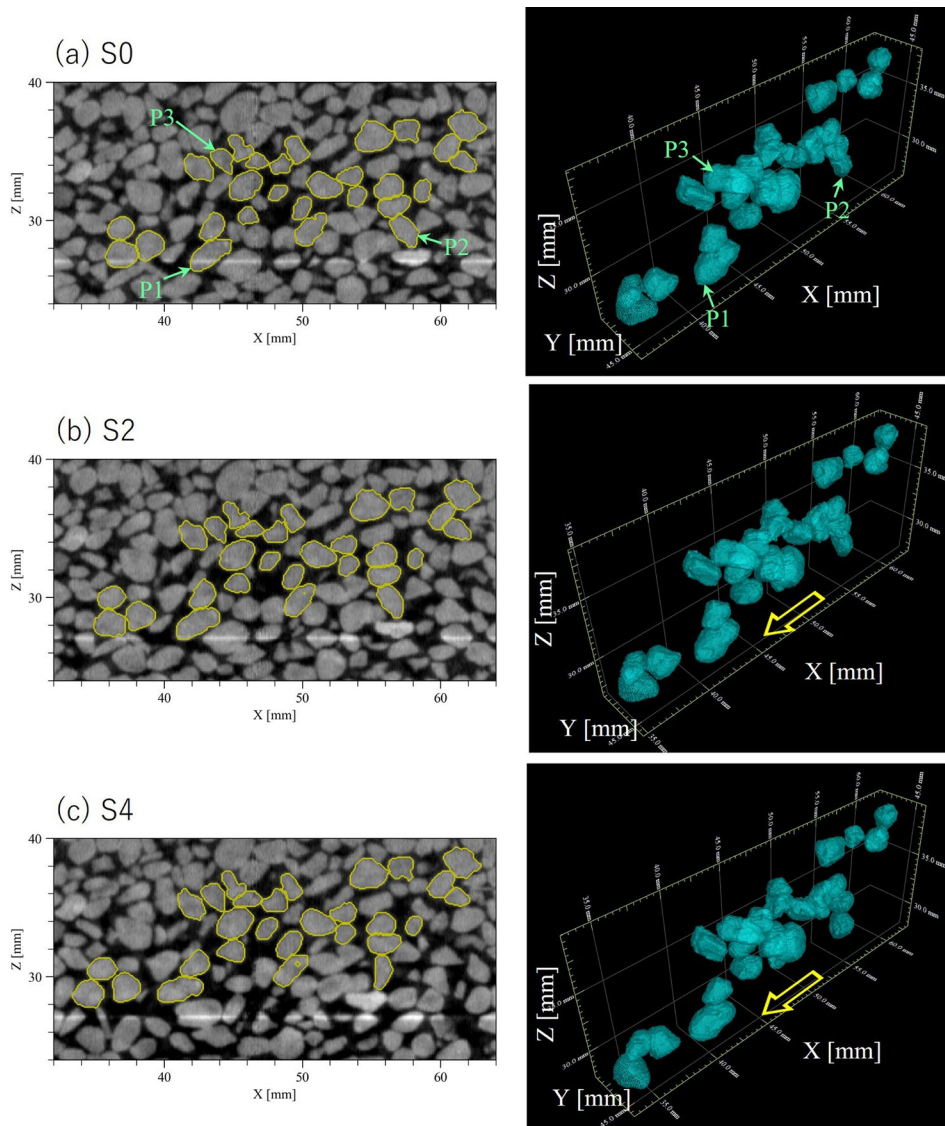


図 5-9 せん断帯の CT 画像拡大図

5.5 画像解析結果

5.5.1 代表体積要素の大きさ

図 5-10 に、初期状態 (S0) の CT 画像に対し、代表体積要素の大きさを 10~100voxel の範囲で 10voxel 毎に等方性の 3 次元構造格子を作成し、各代表体積要素において間隙率を計算し、間隙率のヒストグラムを作成した結果を示す。代表体積要素の大きさが 10voxel である場合、間隙率が 0 である代表体積要素、つまり代表体積要素内が全て粒子で占められる代表体積要素が存在していることから、代表体積要素の大きさとしては適切ではない。一方、代表体積要素の大きさが 10voxel より大きくなると、間隙率が 0.40~0.45 の辺りにおいてピークが表れる。代表体積要素の大きさが 40voxel を超えると、ヒストグラムの裾野部分の形状はほぼ等しいままに、ピークだけが高くなる。これは、これ以上代表体積要素の大きさをこれ以上大きくしたとしても、間隙率の分布に変化が無いということを示している。以上の結果より、データの分解能も考慮し、代表体積要素の大きさを 40voxel ($0.091\text{mm}/\text{voxel} \times 40\text{voxel} = 3.64\text{mm}$) とすることが適切であると考えられる。

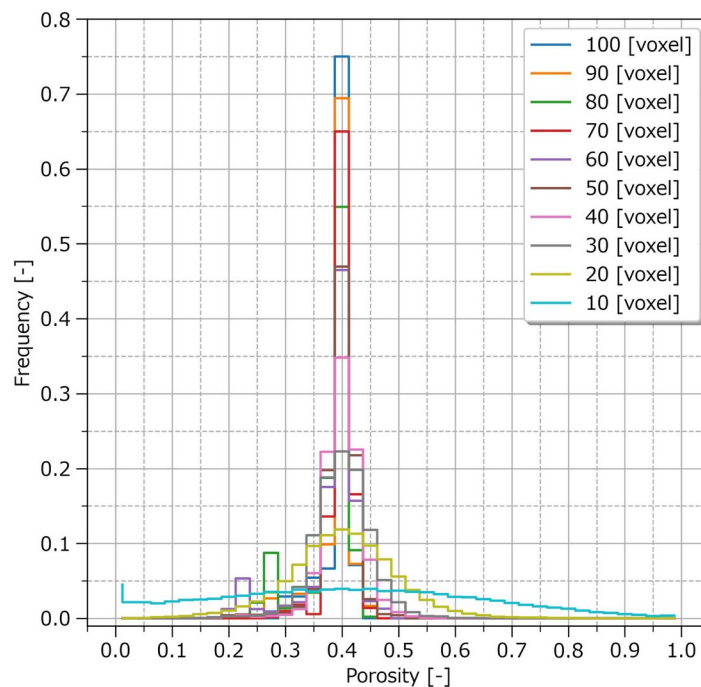


図 5-10 大きさが異なる代表体積要素における間隙率のヒストグラム

5.5.2 間隙率、接触面率

画像セグメンテーションを行う際に watershed_line 有りの画像、watershed_line 無しの画像を作成し、両者の二値化画像を差し引くことで粒子間の接触面に相当する画素を抽出した 3 次元画像例を図 5-11 に示す。図 5-11(b)は図 5-11(a)の中心付近を拡大した図である。図 5-11 より、粒子間の接触面は、平面もしくは湾曲した形状の面であることが分かる。

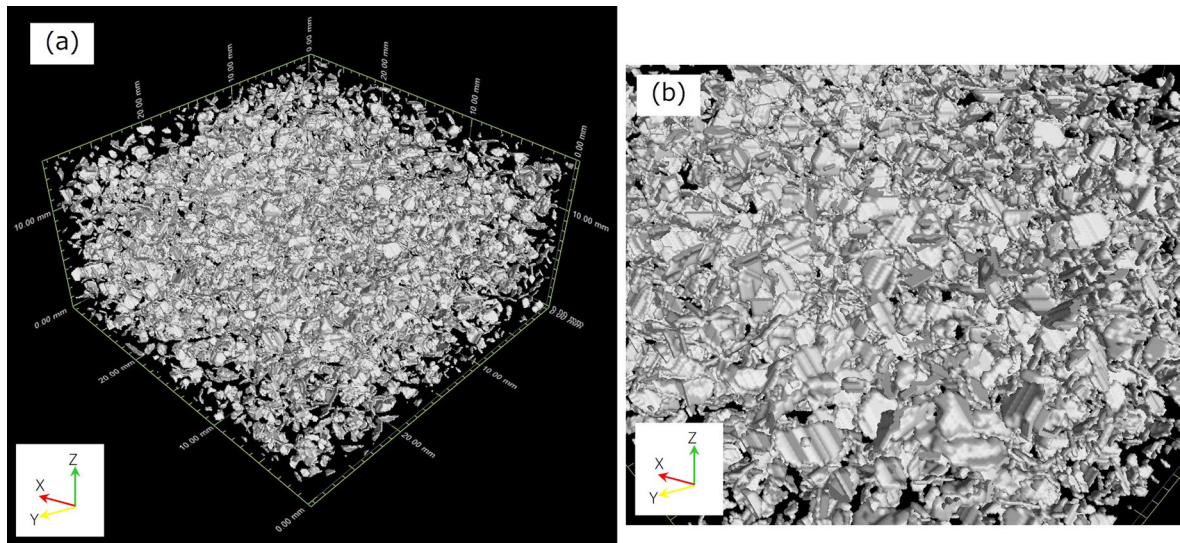


図 5-11 接触面の抽出結果 (3次元図)

5.5.1 節で行った検討結果に基づき、代表体積要素の大きさを 40voxel として間隙率、接触面率を計算した結果を図 5-12～図 5-15 に示す。図 5-12 は間隙率の XZ 断面図であり、図 5-13 は間隙率の XZ 断面図、YZ 断面図を 3次元表示した図である。図 5-14 は接触面率の XZ 断面図であり、図 5-15 は接触面率の XZ 断面図、YZ 断面図を 3次元表示した図である。接触面率は、代表体積要素に占める接触面に相当する画素の割合であり、この値が高いほど粒子間の接触面積が大きく、粒子同士の噛み合い度が高いことを意味している。

図 5-12、図 5-13 によると、初期状態 (S0) においては、砂試料と容器の境界付近を除き、供試体の間隙率は概ね均一である。しかし、せん断が進行しひずみ軟化過程に移行すると、せん断面付近における間隙率が局所的に高くなる。S4 においては、せん断面付近における間隙率がほぼ一様に増加しており、水平方向に間隙率が高い箇所が連続する様子が確認される。

図 5-14、図 5-15 によると、初期状態 (S0) においては、接触面率は不均質に分布しており、供試体全体で接触面率が低い箇所と高い箇所が混在している。一方、せん断が進行にすると、せん断面付近における接触面率が減少している。但し、間隙率のようにほぼ一様に減少する訳ではなく、せん断面付近においても局所的に接触面率が高いグリッドが確認される。

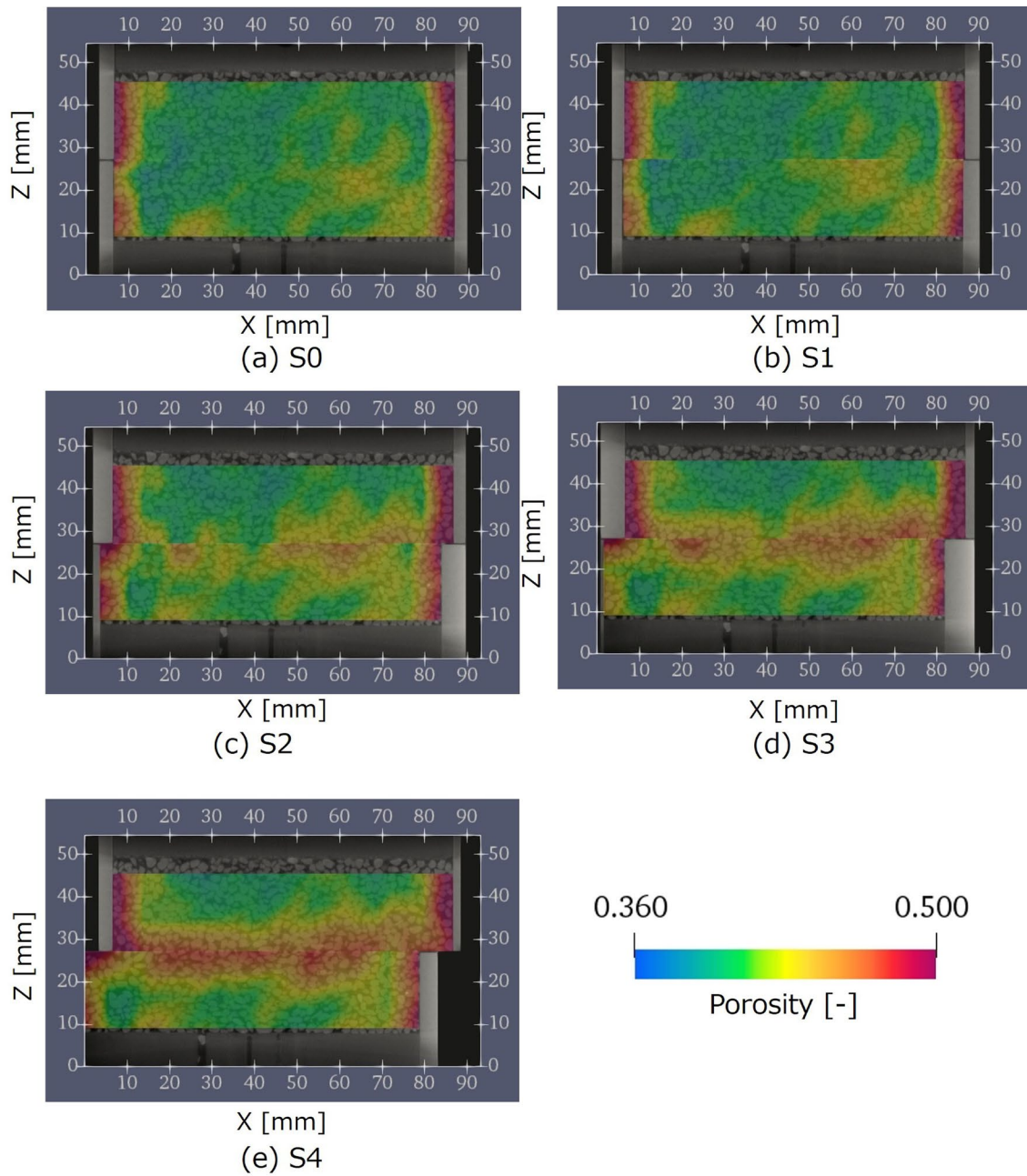


図 5-12 間隙率計算結果 (XZ 断面図)

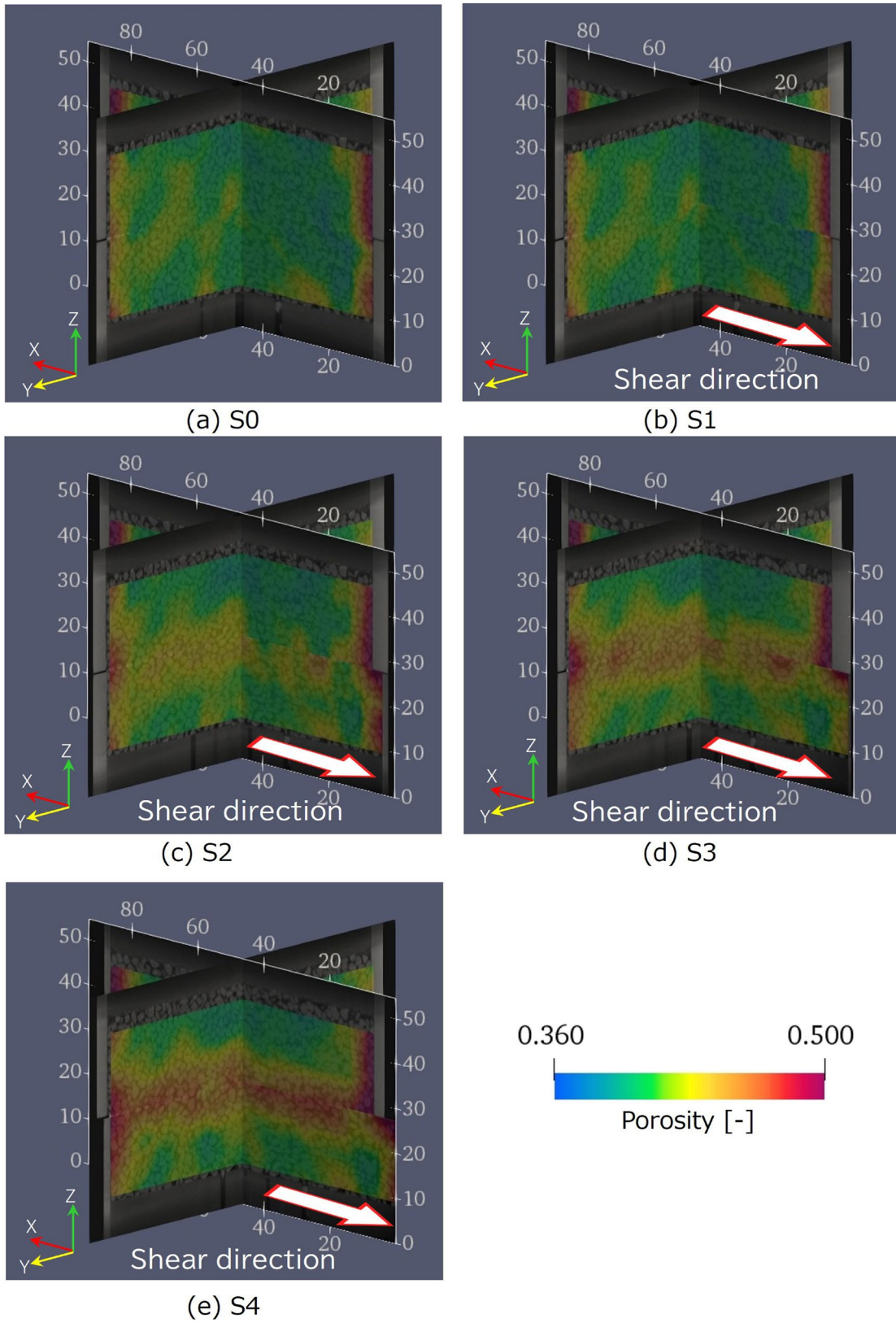


図 5-13 間隙率計算結果 (3次元図)

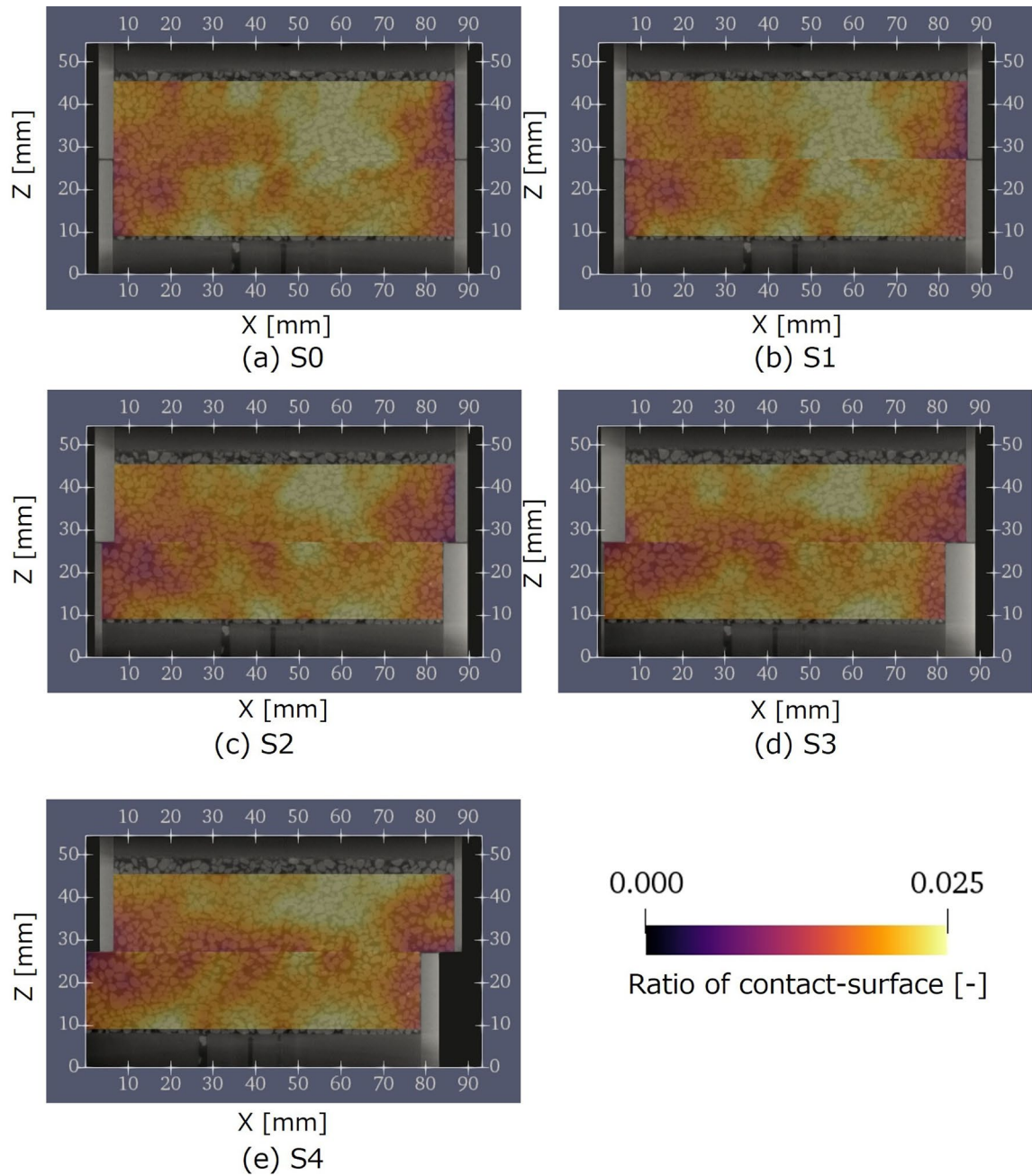


図 5-14 接触面率計算結果 (XZ 断面図)

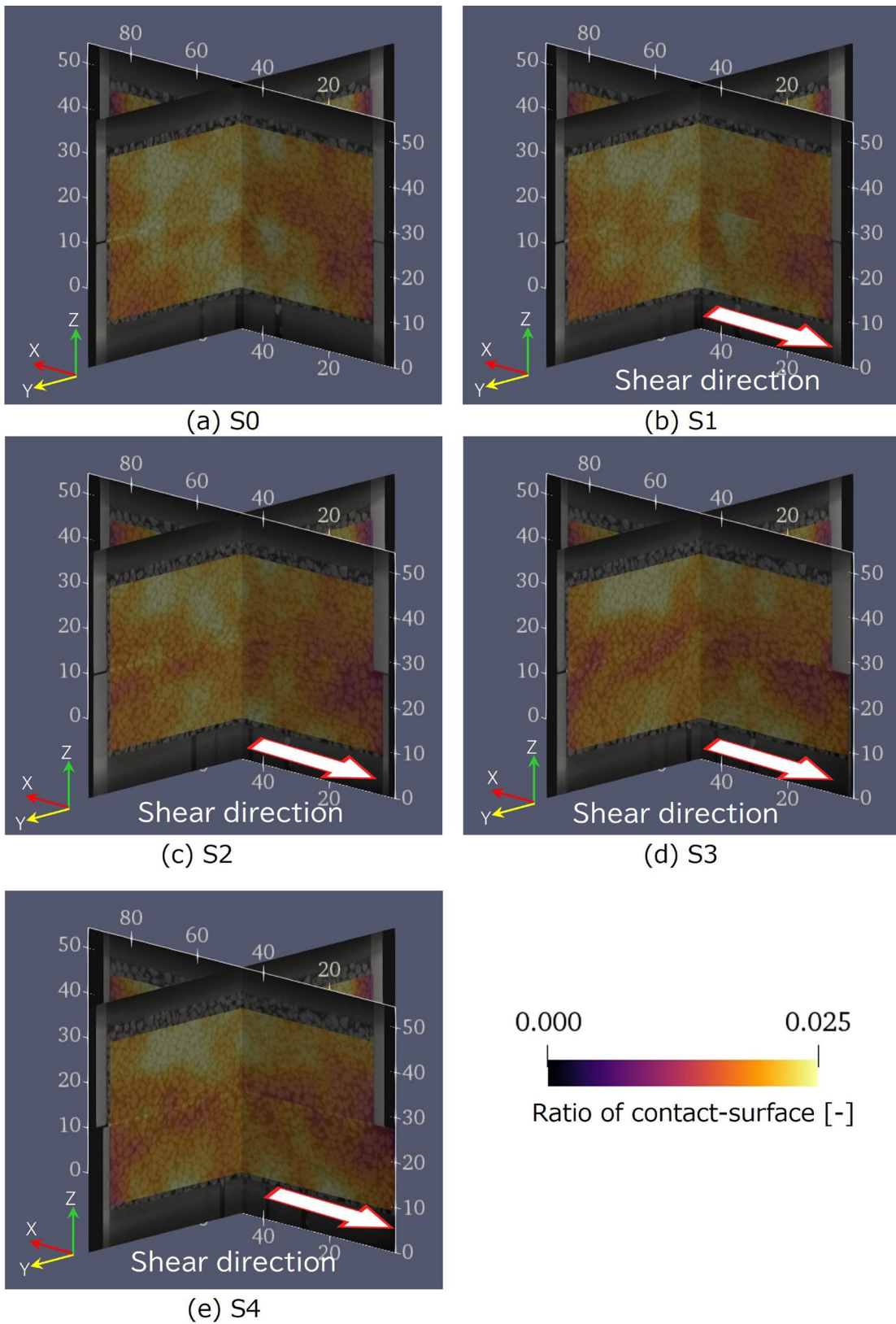


図 5-15 接触面率計算結果(3次元図)

各代表体積要素において計算した間隙率，接触面率について，下部容器の変位を考慮して変位前後の間隙率及び接触面率の変化量を計算した結果を図 5-16，図 5-17 に示す。

S0 (初期状態) から S1 (Dh=0.3mm) にせん断が進行すると，間隙率に大きな変化はないが (図 5-16(a))，接触面率は供試体全体で増加傾向にあることが分かる (図 5-17(a))。これは，せん断応力がピークを迎える前は，粒子間の噛み合い度が高くなっているように見える。S1 (Dh=0.3mm) から S2 (Dh=3mm) にせん断が進行すると，せん断面を中心とし，鉛直方向に広い範囲で間隙率が増加する様子が確認される (図 5-16(b))。接触面率は，せん断面付近における減少傾向が顕著であり (図 5-17(b))，せん断に伴って粒子間の噛み合わせが外れ，粒子間の接触面積が減少したと考えられる。

更にせん断が進行すると，S1 から S2 にかけての変化と同様に，せん断面付近における間隙率が減少した (図 5-16(c), (d))。但し，間隙率が減少する範囲は，S1 から S2 にかけての変化に比べると小さく，せん断面付近に限定されるように見える。接触面率は，S2 (Dh=3mm) から S3 (Dh=5mm) にかけてはせん断面以外の範囲で増加傾向を示しており (図 5-17(c))，S3 (Dh=5mm) から S4 (Dh=8mm) にかけては，せん断面付近において，増加する部分と減少する部分が混在する様子が確認された (図 5-17(d))。

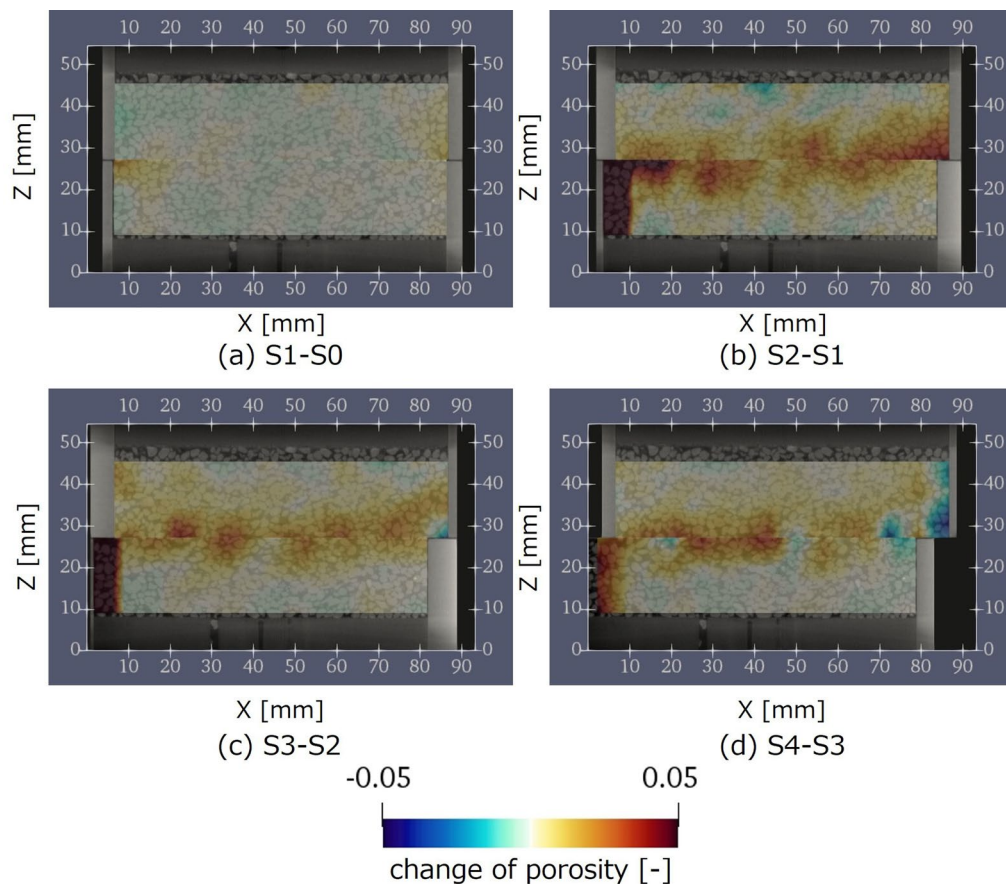


図 5-16 間隙率の変化画像 (XZ 断面図)

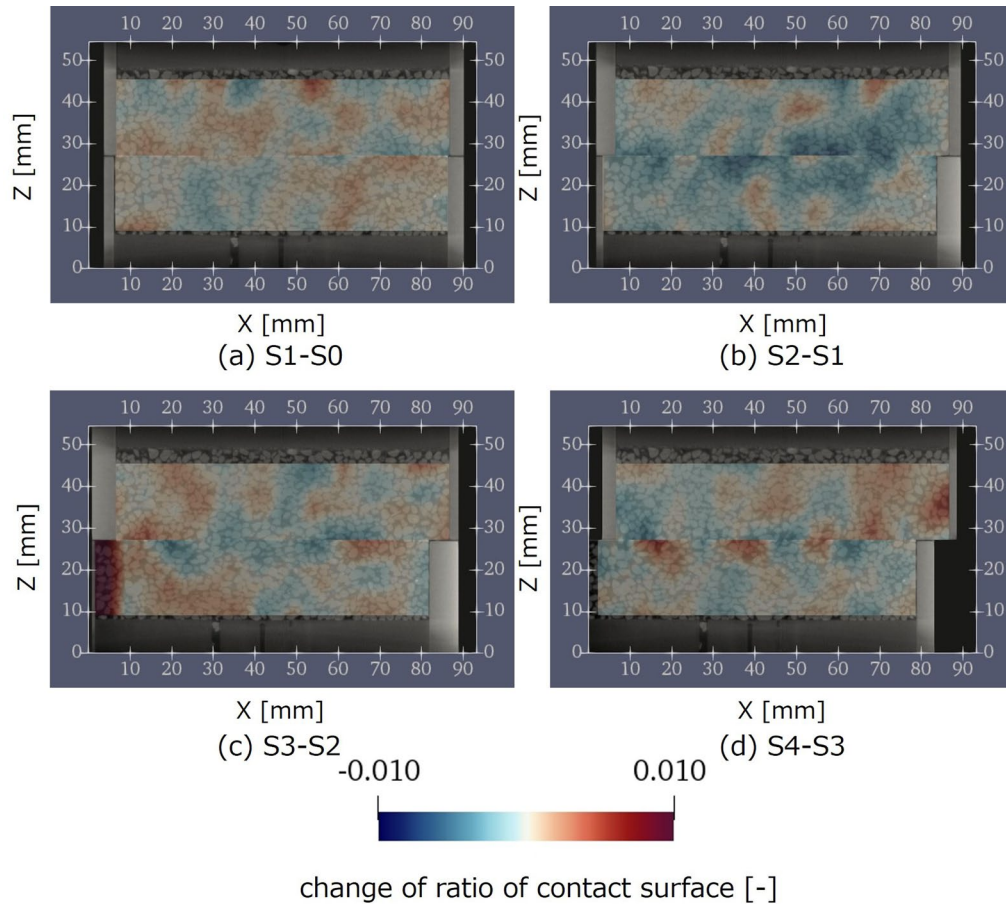


図 5-17 接触面率の変化画像 (XZ 断面図)

5.5.3 体積ひずみ, せん断ひずみ

図 5-18～図 5-21 に, DIC 解析結果における体積ひずみ分布, せん断ひずみ分布の結果を示す。図 5-18, 図 5-20 は, 体積ひずみ及びせん断ひずみの XZ 断面図であり, 図 5-19, 図 5-21 は, 体積ひずみ及びせん断ひずみの XZ 断面図, YZ 断面図を 3 次元表示した結果である。

S1 (Dh=0.3mm) から S2 (Dh=3mm) にかけては, せん断帯において体積膨張が支配的である (図 5-18(b), 図 5-19(b))。これは図 5-5 に示した鉛直変位量の経時変化とも整合する。S2 (Dh=3mm) から S3 (Dh=5mm) 及び S3 (Dh=5mm) から S4 (Dh=8mm) にかけては, 体積収縮する箇所と体積膨張する箇所が混在しており, 粒状材料特有の複雑な破壊形態を示すことが分かる (図 5-18(c), (d), 図 5-19(c), (d))。但し, 試料全体としては, 収縮と膨張が釣り合っているように見える。一方, せん断ひずみにおいては, S1 (Dh=0.3mm) から S2 (Dh=3mm) にかけては, せん断帯以外の範囲においても局所的なせん断ひずみが発生している (図 5-20(b), 図 5-21(b))。しかし, せん断の進行に伴い, せん断ひずみはせん断帯に限定して発生しており, S3 (Dh=5mm) から S4 (Dh=8mm) にかけては, せん断帯付近において水平方向に連続する明瞭なせん断帯が形成されている様子が確認できる (図 5-20(d), 図 5-21(d))。

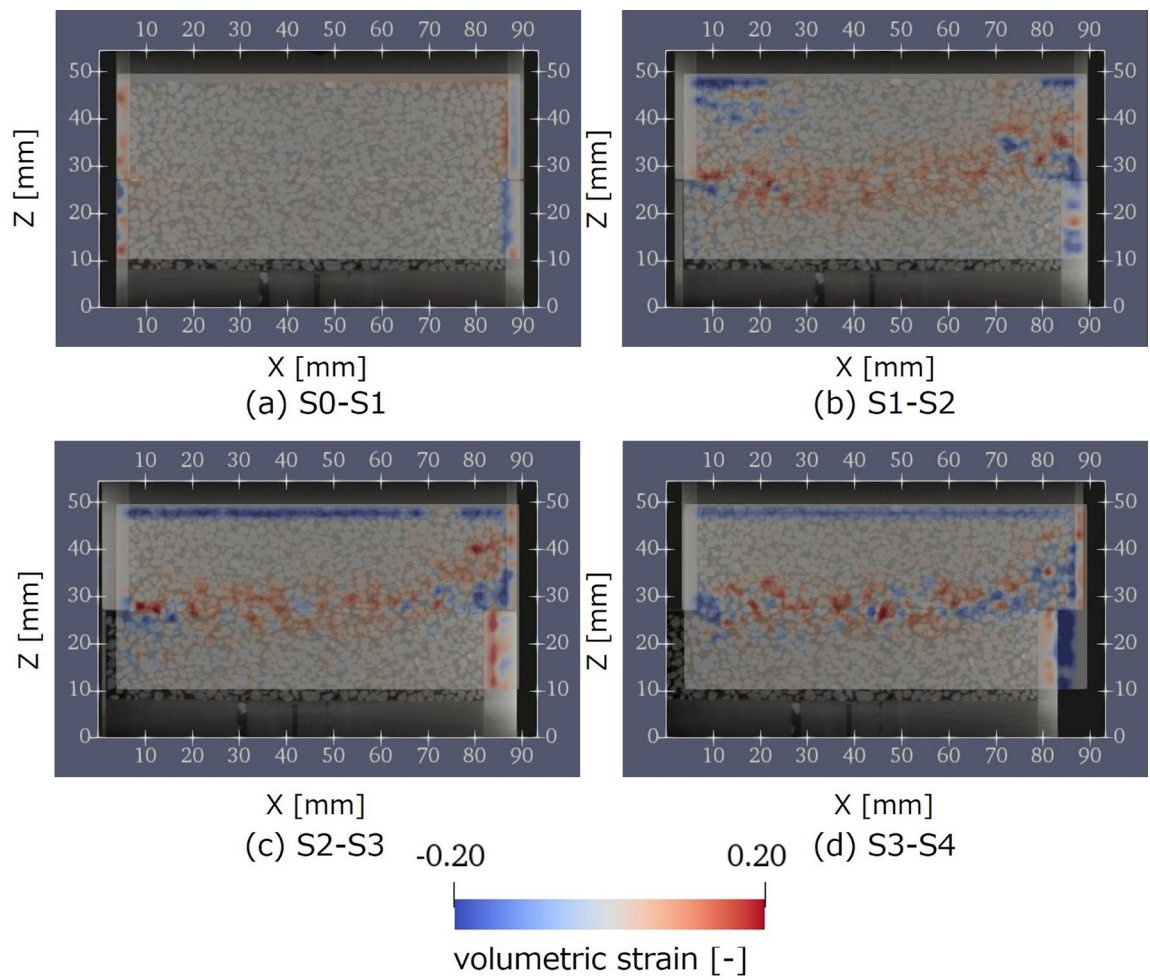


図 5-18 体積ひずみ評価結果 (XZ 断面図)

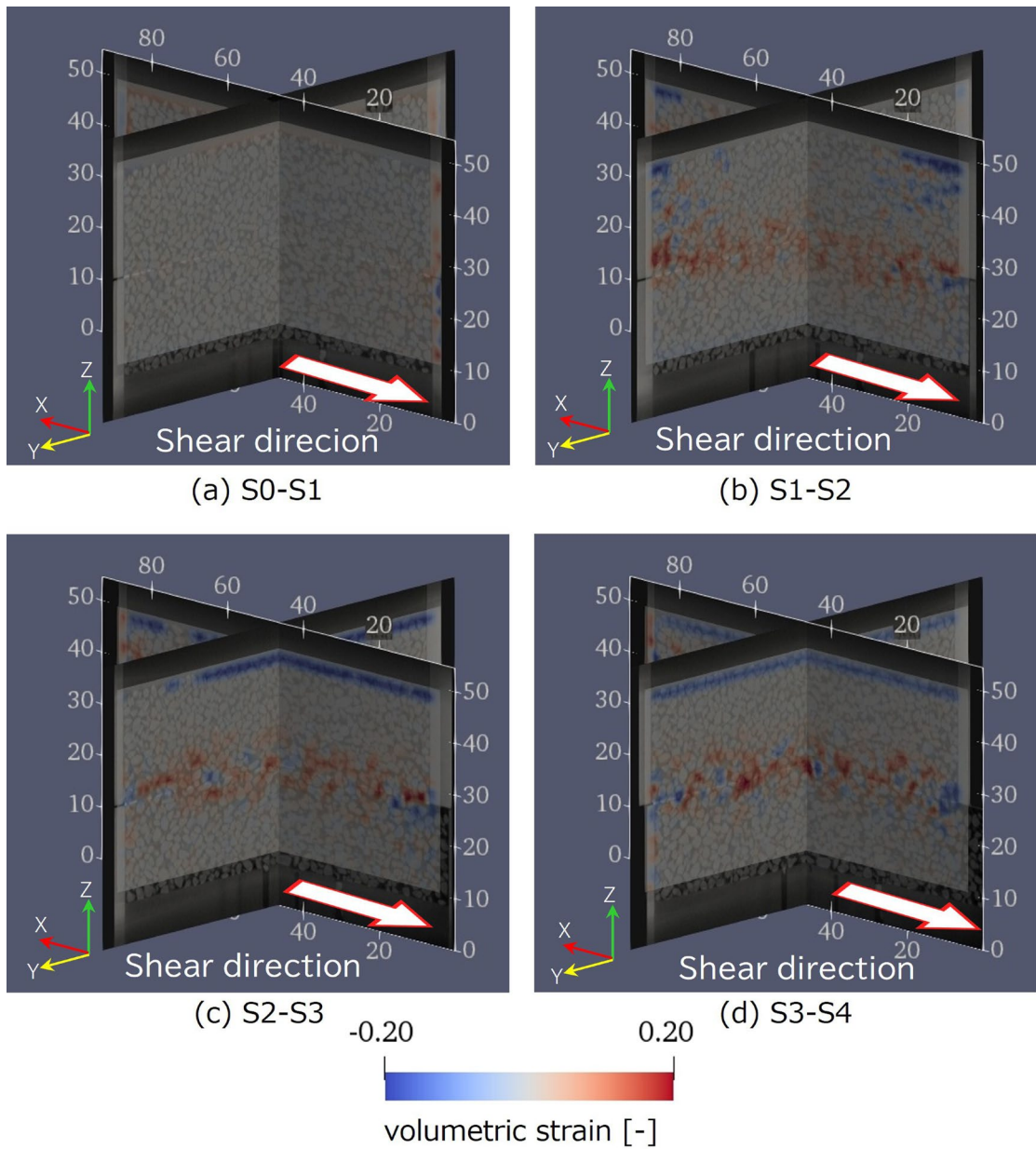


図 5-19 体積ひずみ評価結果 (3次元図)

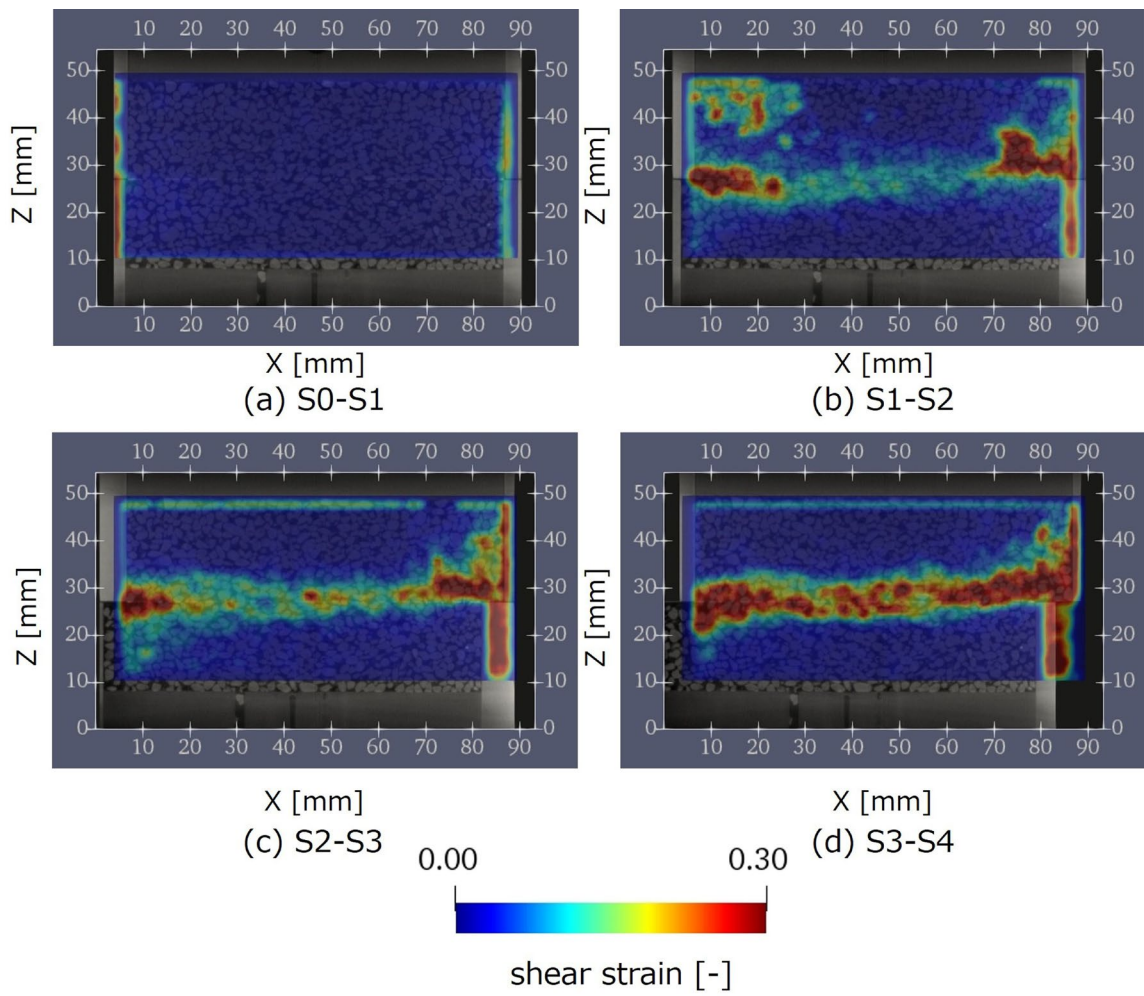


図 5-20 せん断ひずみ評価結果 (XZ 断面図)

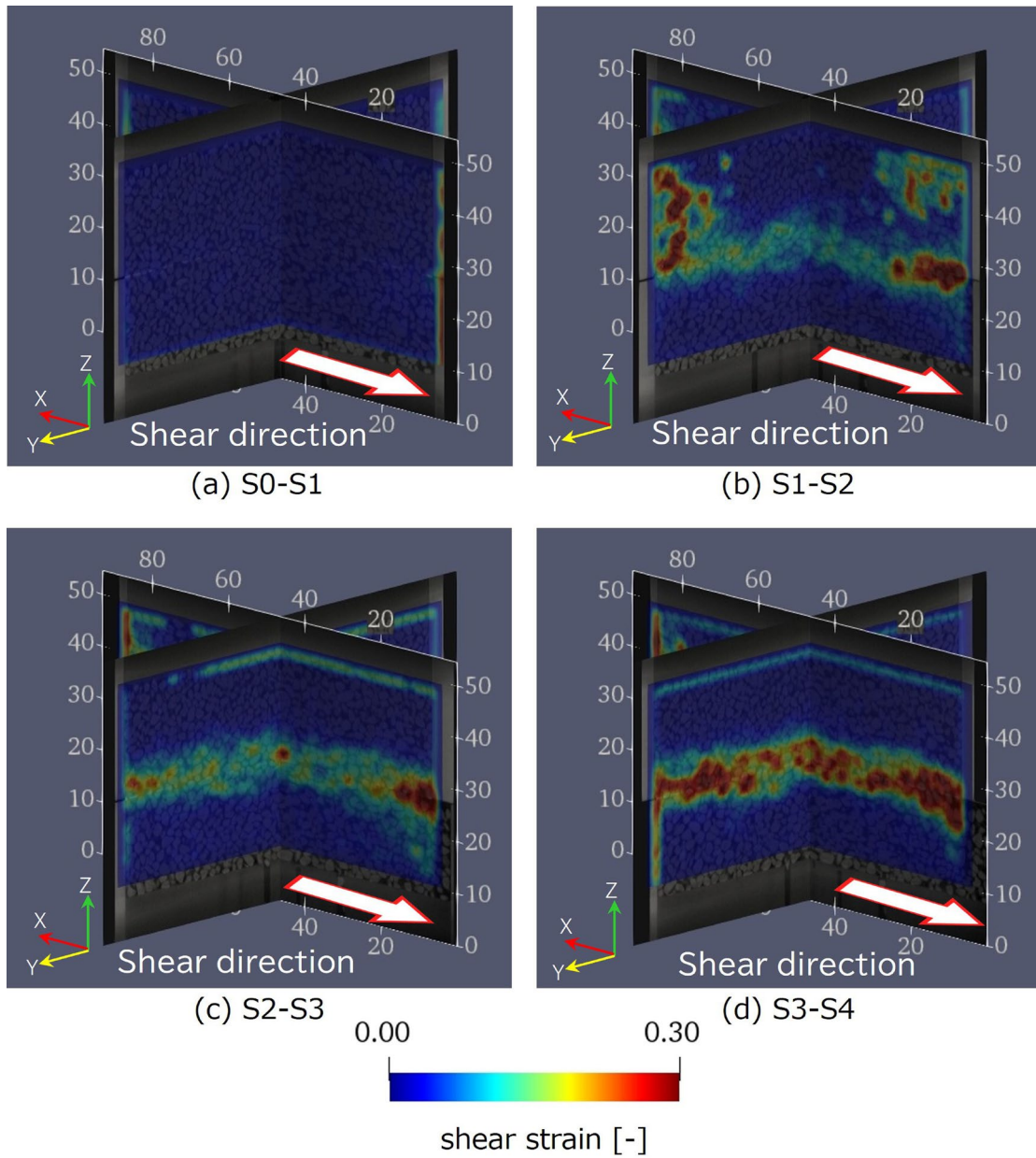


図 5-21 せん断ひずみ評価結果 (3次元図)

5.5.4 粒子ファブリック解析

画像セグメンテーションによって抽出された粒子を対象に、本研究で開発した3次元粒子ファブリック解析手法を用いて粒子の方向を評価し、容器内の位置に応じて結果を整理する。図 5-22 に画像解析結果の整理範囲位置図を示す。評価範囲は、容器中央から半径 320voxel ($0.091\text{mm/voxel} \times 320\text{voxel} = 29.1\text{mm}$)、高さ方向に 320voxel ($0.091\text{mm/voxel} \times 320\text{voxel} = 29.1\text{mm}$) の範囲を、1層の厚さを 40voxel ($0.091\text{mm/voxel} \times 40\text{voxel} = 3.6\text{mm}$) とし、高さ方向に 8つのグループに区分した。また、下部容器の評価範囲は、水平方向への変位量を考慮し範囲を設定し

た. 1層の厚さは, 間隙率の計算において設定した代表体積要素の大きさを考慮し設定した.

図 5-23, 図 5-24 に, せん断面に近い範囲 (G3~G6) に存在する粒子について, 粒子長軸及び粒子短軸の鉛直断面 (XZ 面) における粒子方向を整理した結果を示す. それぞれの粒子について評価された近似楕円体の長軸及び短軸と, 楕円体の重心を中心とする単位球の上半球及び下半球との交点を求め, 交点を鉛直面 (XZ 面) に投影する. 全ての粒子を対象に同様の処理を行った後, 10度毎に頻度を計算し, ローズダイヤグラムを使って円形のヒストグラムとして整理した. ローズダイヤグラムは, 0, 180° が水平方向, 90, 270° が鉛直方向を意味する. なお, G3~G6 には, それぞれ 1,300~1,600 個程度の粒子が存在する.

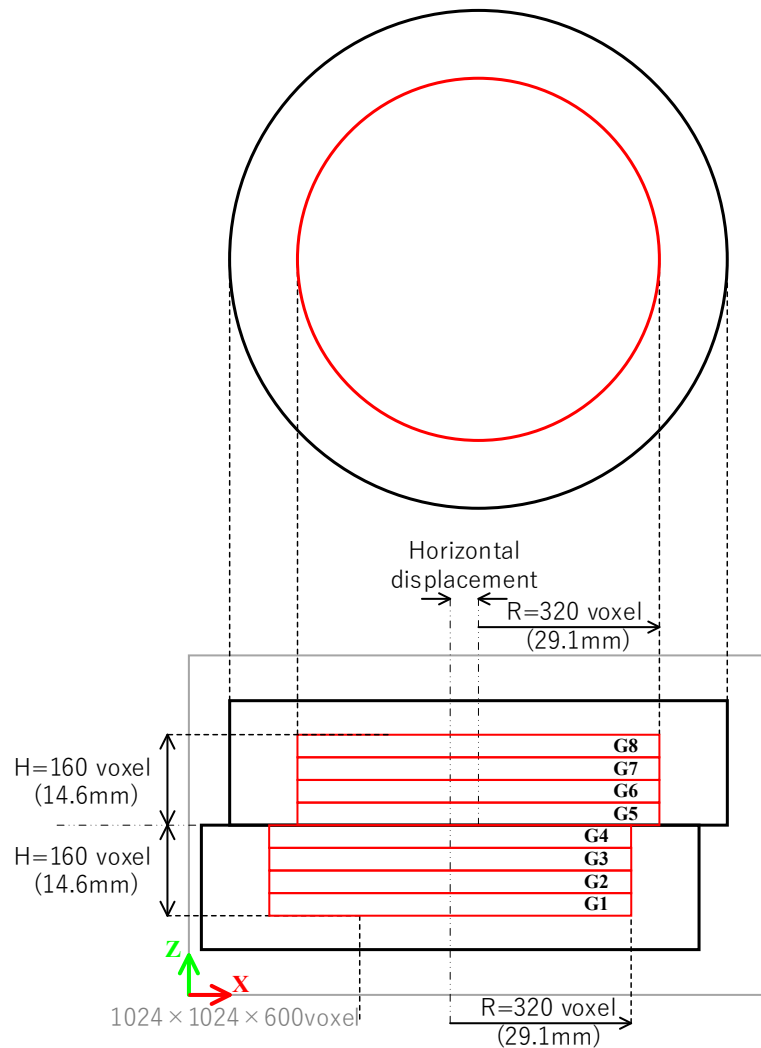


図 5-22 画像解析結果の整理範囲位置図

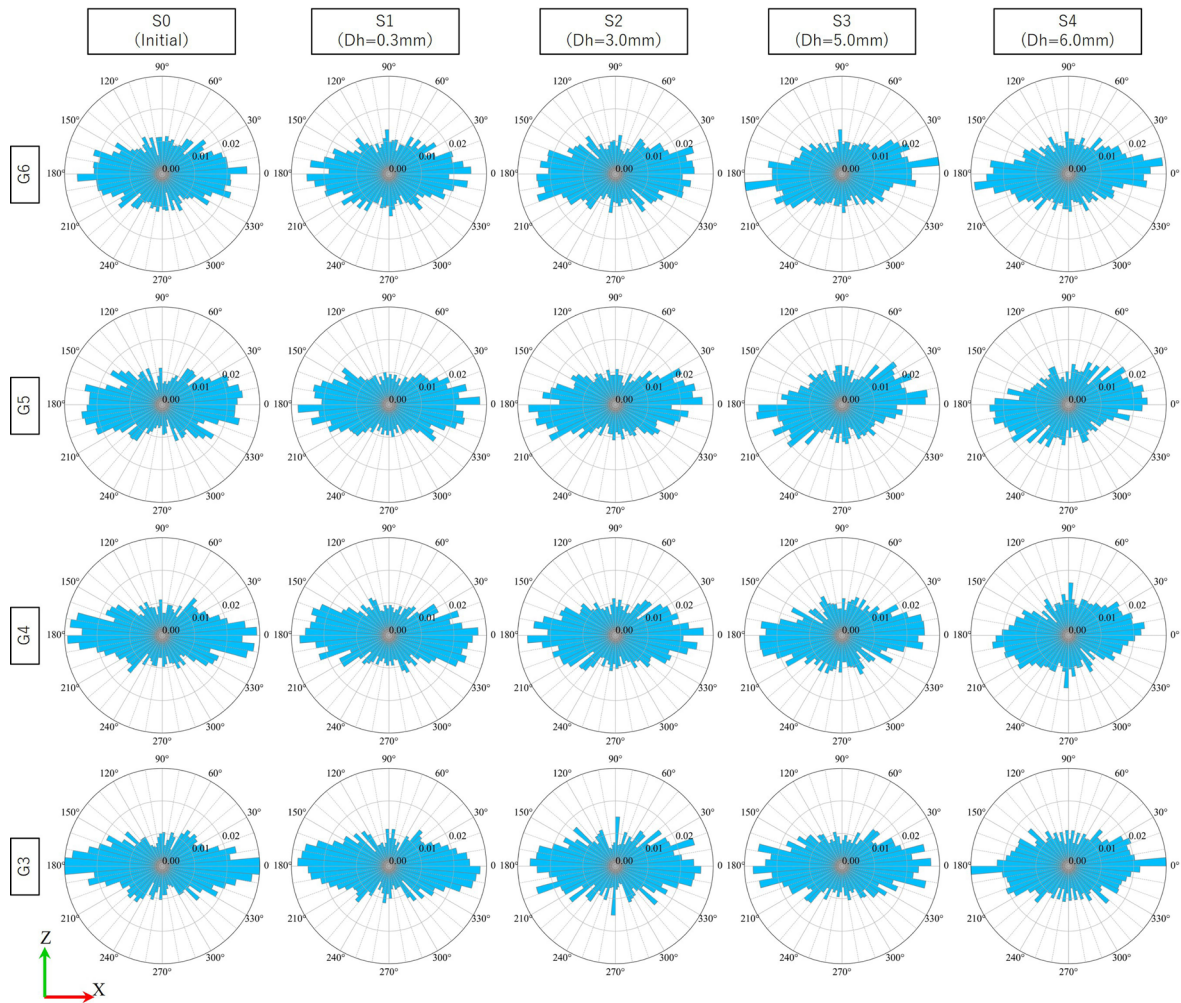


図 5-23 XZ 断面における粒子長軸方向のヒストグラム

全体的な傾向として、XZ 断面において多くの粒子は、長軸が水平方向を、短軸が鉛直方向を向く。これは、試験容器に砂を充填する際、水平な机の上に容器を置いて行ったためであり、粒子長軸が力学的に安定な方向に堆積した影響である。S0 (初期状態) から S2 (Dh=3mm) までは、粒子の方向に大きな変化は見られない。一方、S3 (Dh=5mm) 以降、せん断面に近い G4 及び G5 の範囲において、粒子の方向に変化が確認される。粒子長軸においては、反時計回りに回転するように、水平よりもやや斜交する方向にピーク位置が変化している。また、粒子短軸においても、反時計回りに回転するように、鉛直よりもやや斜交する方向にピーク位置が変化する様子が確認できる。

第5章 一面せん断試験によるせん断の進行に伴う粒子構造の変化の評価

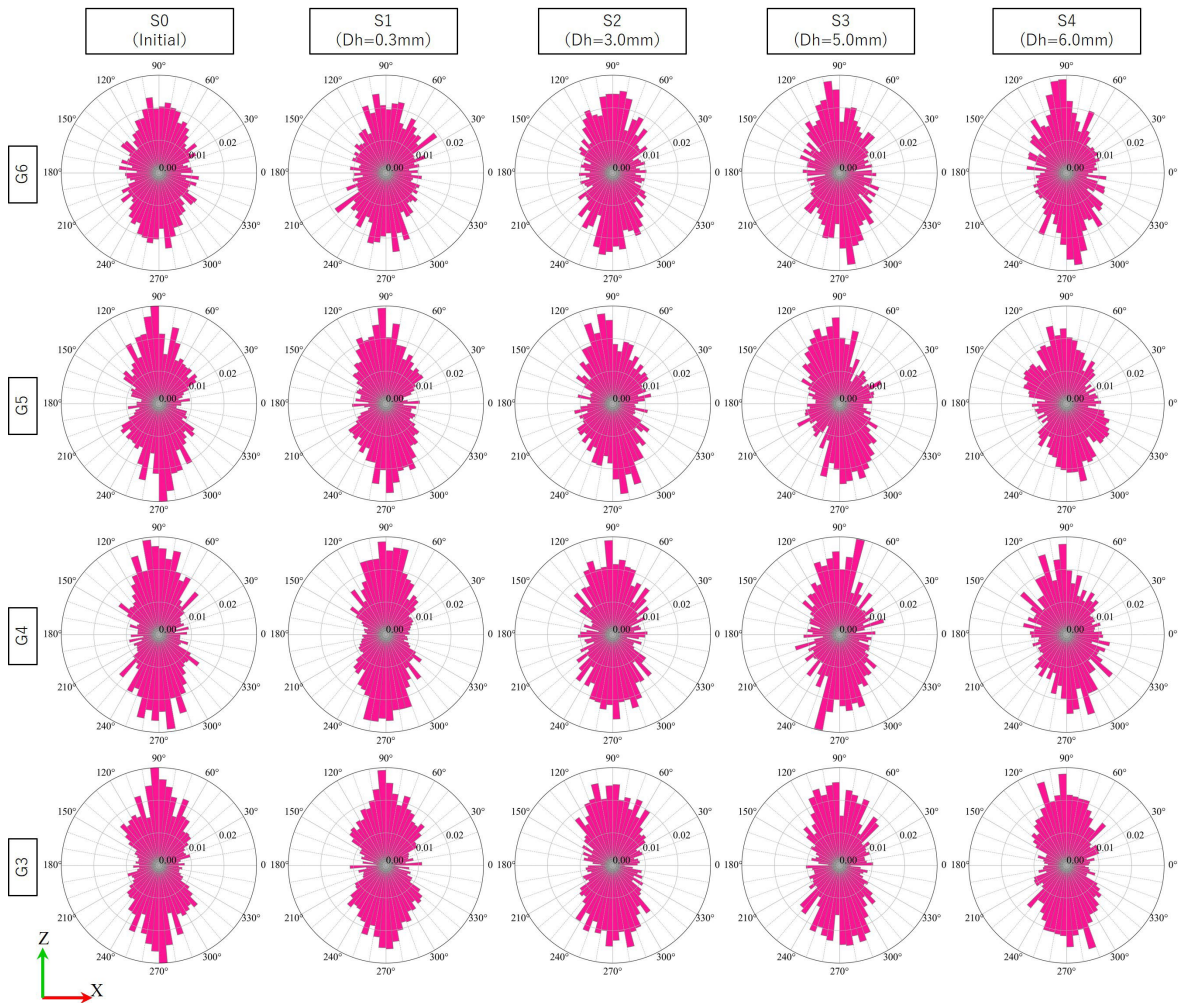


図 5-24 XZ 断面における粒子短軸方向のヒストグラム

5.6 考察

間隙率，接触面率，体積ひずみ，せん断ひずみの結果について，図 5-22 に示したグループ区分に応じて統計解析を行い，箱ひげ図として結果を整理する．間隙率の評価結果を図 5-25 に，接触面率の評価結果を図 5-26 に，体積ひずみの評価結果を図 5-27 に，せん断ひずみの評価結果を図 5-28 に示す．せん断面は，G4 と G5 の間に位置する（図 5-22）．

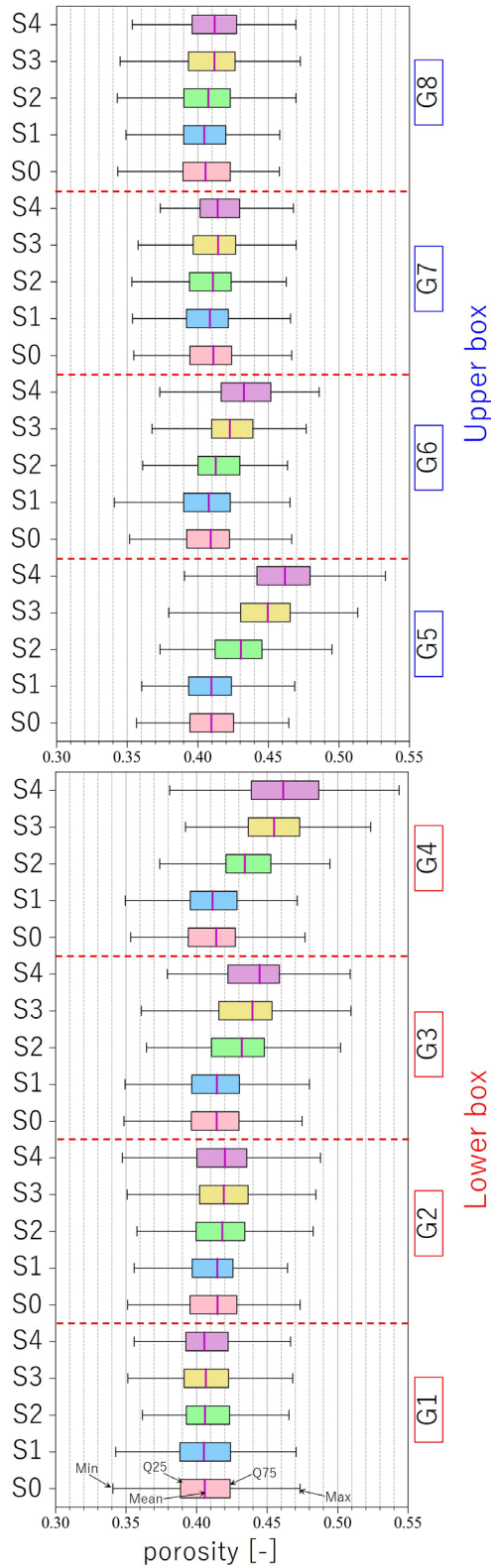


図 5-25 容器の位置に応じた
間隙率の箱ひげ図

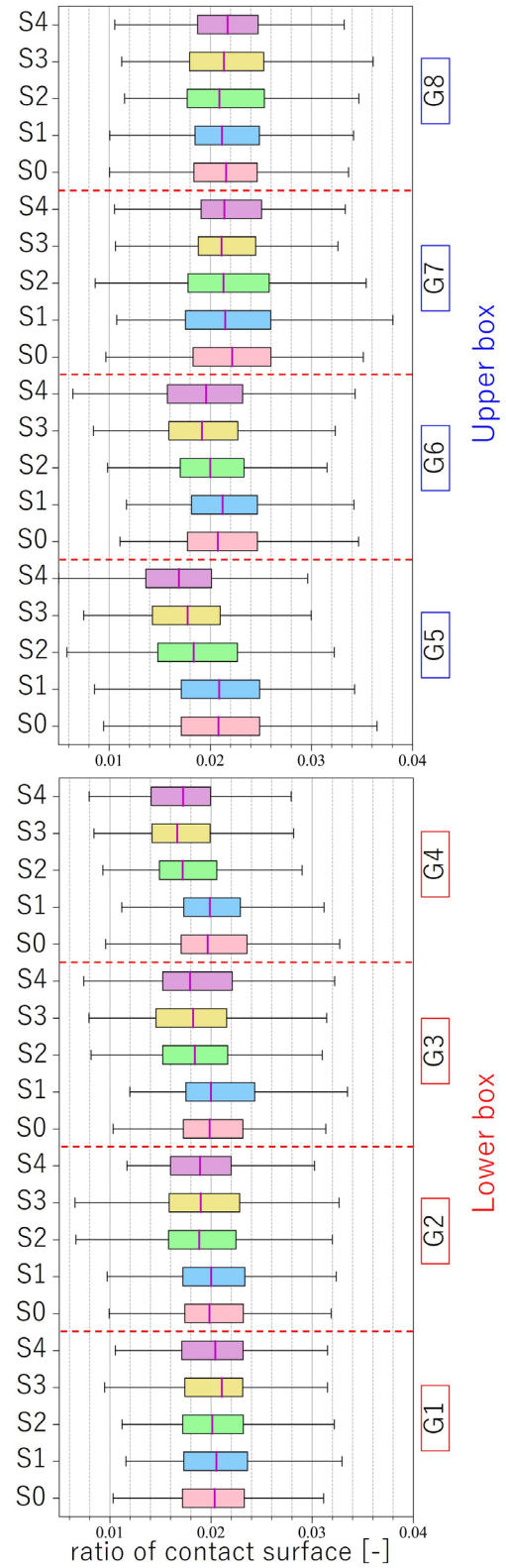


図 5-26 容器の位置に応じた
接触面率の箱ひげ図

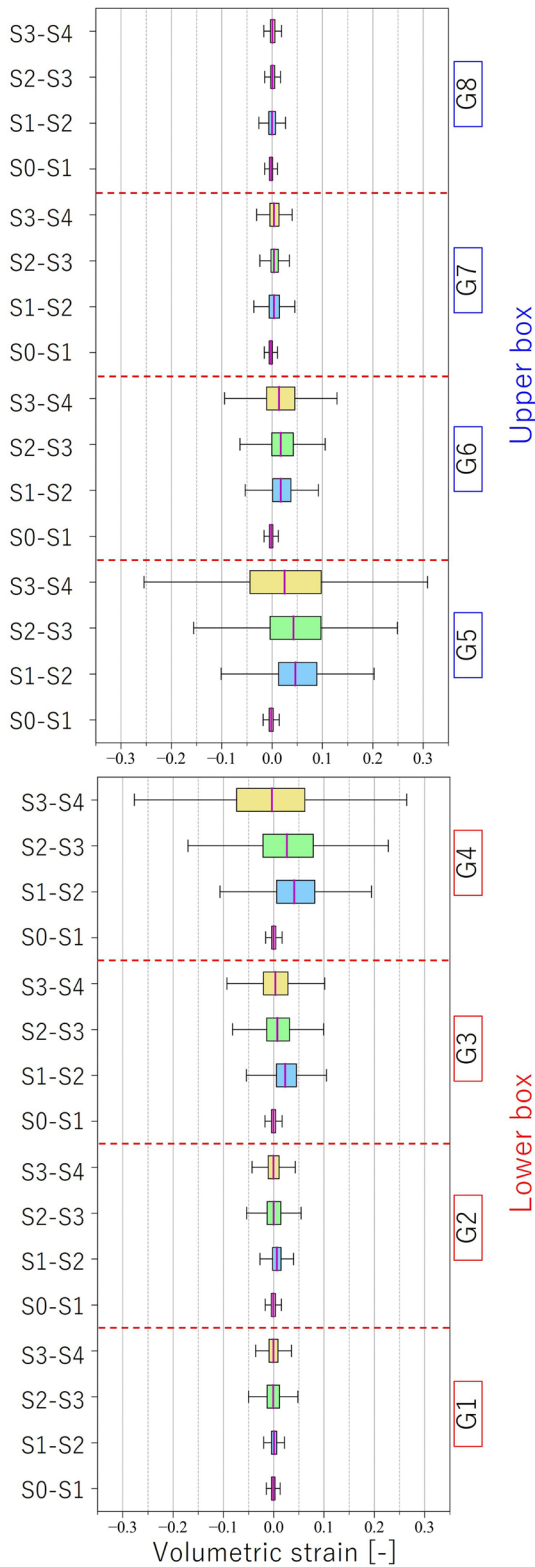


図 5-27 容器の位置に応じた体積ひずみの箱ひげ図

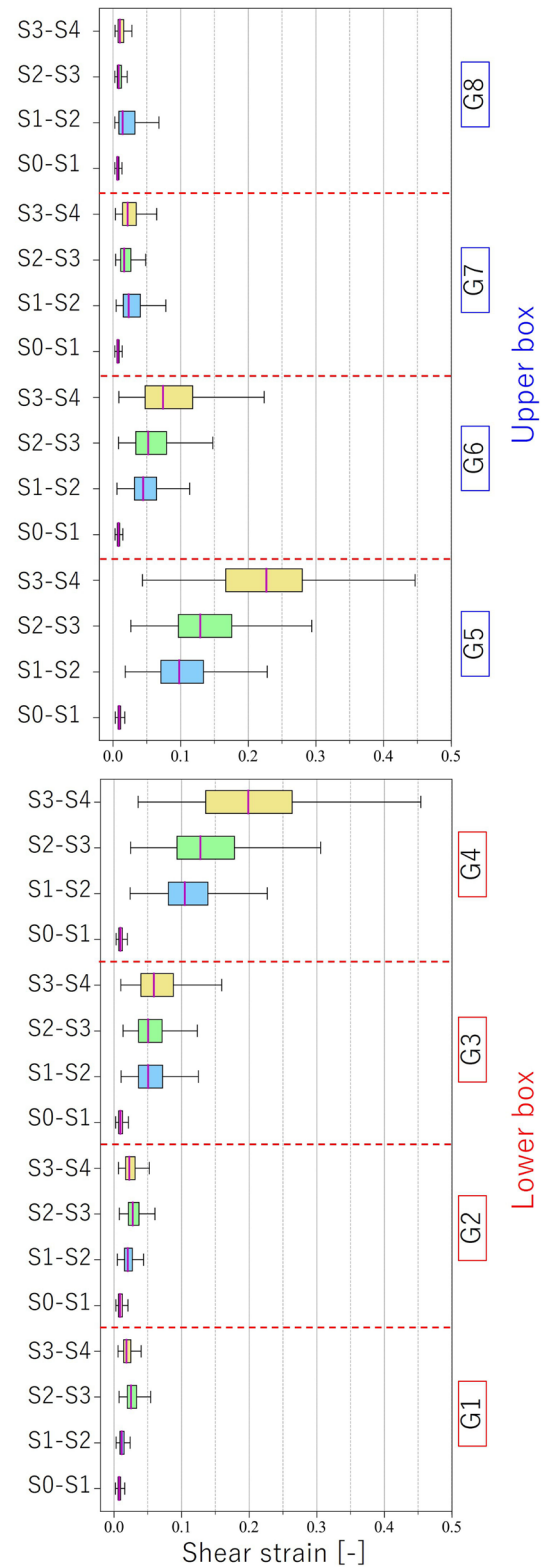


図 5-28 容器の位置に応じたせん断ひずみの箱ひげ図

間隙率は、G3～G6の範囲、つまりせん断面を含む14.6mm程度の範囲において、顕著な変化が生じている(図5-25)。これは、画像解析粒度分布計で計測されたKSの中央粒径(2.05mm)の7倍程度である。Oda(1998)は、Toyoura砂($D_{50}=0.206\text{mm}$)とTicno砂($D_{50}=0.527\text{mm}$)を使って平面ひずみ圧縮試験を行い、せん断後の供試体から観察用の試料を作成し、顕微鏡を使ってせん断帯付近の2次元断面の観察を行っている¹³⁾。その結果、せん断帯の幅は砂の中央粒径の7～8倍になることを報告している。本研究では、3次元で間隙率を評価したが、先行研究と概ね等しいせん断帯の幅となった。間隙率は、S1からS2にかけて急激に増加し、S2以降も間隙率の平均値が単調増加している。しかし、S3からS4にかけての変化は比較的緩やかであり、バラつきが増える傾向にある。一方、接触面率においても、間隙率と同じくG3～G6の範囲において顕著な変化が確認された(図5-26)。但し、接触面率の変化は、間隙率の変化とは異なる傾向を示している。S1からS2にかけては、接触面率が急激に減少している。これは、せん断に伴って粒子間の噛み合わせが失われたことを表している。更にせん断が進行すると、接触面率の減少傾向は緩やかになる、もしくはほとんど変化していない。これは、局所的な粒子間の噛み合わせの再構築や消失が均衡しているためであると考えられる。

体積ひずみ、せん断ひずみにおいても、間隙率や接触面率と同様に、G3～G6の範囲において変化が確認された。体積ひずみは、S3までは体積ひずみの平均値は正の値を示しており体積膨張が支配的である。しかし、S3以降は、体積ひずみのばらつきが増加する一方で平均値は0に近づき、体積膨張と体積収縮が釣り合いの取れた状態に移行していることが分かる(図5-27)。せん断ひずみは、S1からS2にかけて急激に増加し、その後も単調増加する結果となった(図5-28)。

次に、図5-23、図5-24に示した粒子ファブリック解析の結果について、水平方向(337.5～22.5度及び157.5～202.5度)、及び鉛直方向(67.5～112.5度及び247.5～292.5度)の頻度を積算し、図5-22のグループ区分に従って整理した結果を図5-29、図5-30に示す。図5-29は粒子長軸の結果、図5-30は粒子短軸の結果であり、図5-29(a)、図5-30(a)が水平方向(337.5～22.5度及び157.5～202.5度)、図5-29(b)、図5-30(b)が鉛直方向(67.5～112.5度及び247.5～292.5度)の結果である。縦軸はS0(初期状態)からの変化を表し、横軸はせん断変位量を表す。

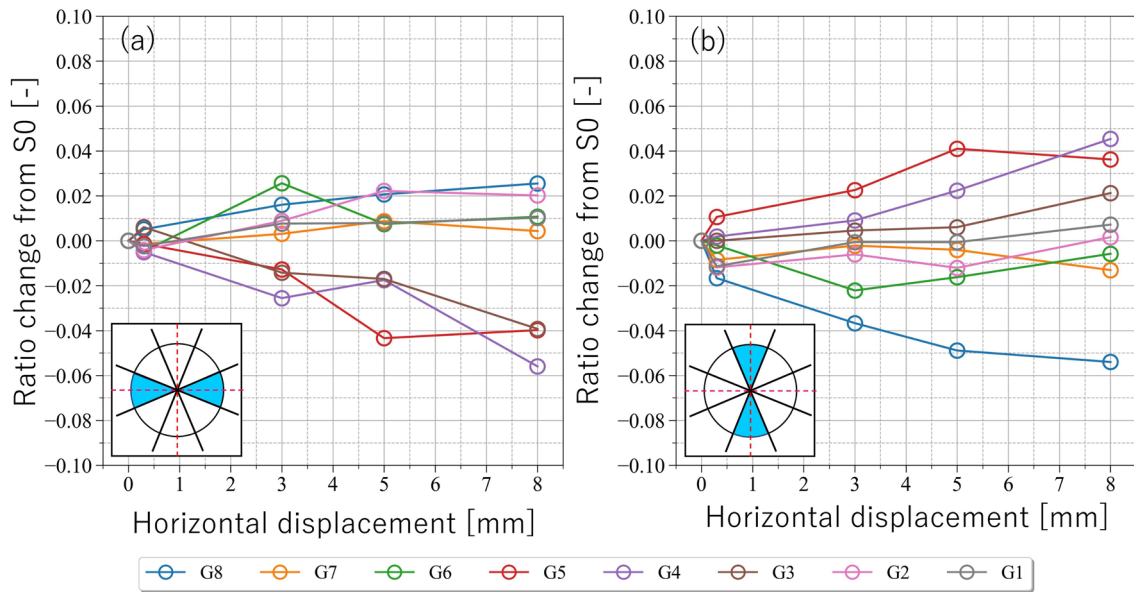


図 5-29 XZ 面における粒子長軸の方向に関する頻度の経時変化

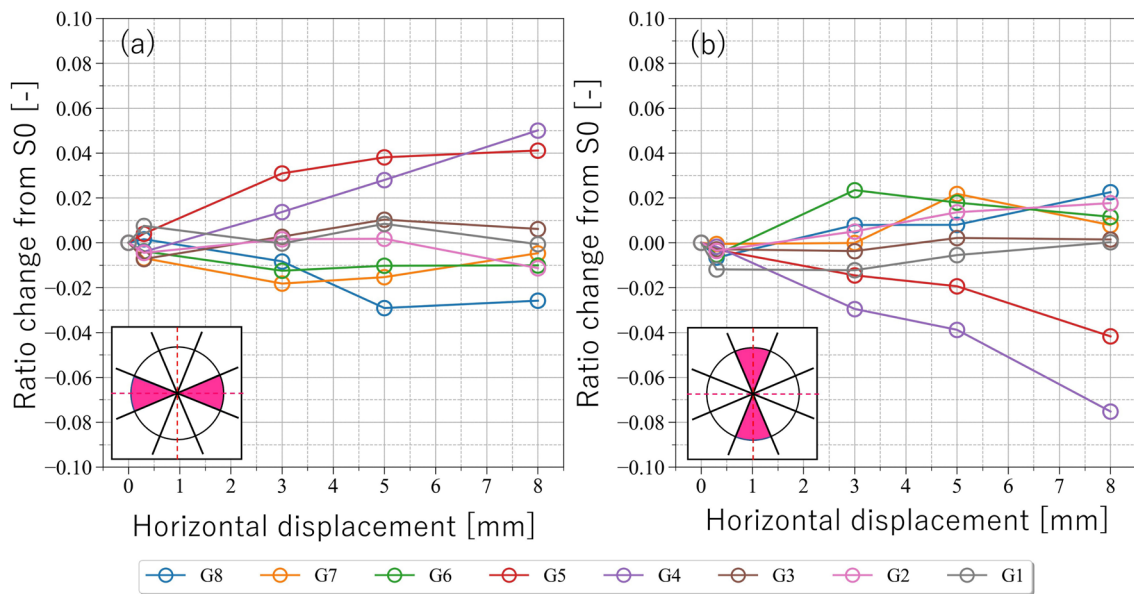


図 5-30 XZ 面における粒子短軸の方向に関する頻度の経時変化

粒子長軸，粒子短軸の方向は，せん断面に最も近い G4 や G5 において顕著な変化が表れているが，これは空隙率，接触面率，体積ひずみ，せん断ひずみよりも狭い範囲であった。粒子長軸の方向は，水平方向を向く粒子が最大 6%程度減少し（図 5-29(a)），鉛直方向を向く粒子が最大 5%程度増加した（図 5-29(b)）。一方，粒子短軸の方向は，水平方向を向く粒子が 5%程度増加し（図 5-30(a)），鉛直方向を向く粒子が最大 8%程度減少した（図 5-30(b)）。

せん断応力がピークを超え，ひずみ軟化過程に移行した直後までは（S2, Dh=3mm），粒子方向の変化は比較的緩やかなように見える（図 5-29，図 5-30）。これは，せん断面付近の CT 画

像の詳細観察結果とも整合する(図 5-9)。但し、せん断帯内部においては顕著な体積変化が表れており、体積膨張が優勢である(図 5-27)。このことから、体積膨張を引き起こすような回転を生じる粒子は、ごくわずかであったと考えられる。ひずみ軟化が更に進行すると(S3, Dh=5mm)、体積ひずみのバラつきはさらに増加するが、体積膨張と体積収縮が釣り合いの取れた状態に移行し、平均値が0に近づく(図 5-27)。一方、粒子の方向は、S3以降に急な変化が表れ、鉛直方向を向く粒子長軸の割合が増加し、水平方向を向く粒子短軸の割合が増加した。

先行研究によると、せん断の進行に伴って生じる体積変化は、粒子が隣接する粒子を乗り越える際に生じる粒子回転の影響が大きいことが報告されている¹⁴⁾。また、粒子間の抵抗を考慮したDEMによる数値計算や¹⁵⁾、粒子形状を考慮したDEMによる数値計算によって¹⁶⁾、せん断帯における体積変化と粒子回転の関連性が指摘されていた。一方、本研究において、実際のせん断帯内部の粒子構造を評価した結果、体積ひずみが生じた範囲において、粒子が回転した形跡が確認され、先行研究と同様に、体積変化と粒子回転は密接に関係することを示唆する結果が得られた。但し、粒子の方向に変化が生じた範囲は、体積ひずみが発生した範囲よりも狭い範囲であることが確認された。

5.7 第5章のまとめ

本章では、マイクロフォーカス X 線 CT による CT 撮影を併用した一面せん断試験を実施し、CT 画像の画像解析を行い、せん断の進行に伴って変化する粒子構造の特徴を明らかにした。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 間隙率、接触面率、体積ひずみ、せん断ひずみは、せん断面に近い範囲で顕著に変化し、その範囲は使用した砂の中央粒径の7倍程度であった。
- 2) せん断面付近の間隙率は、せん断の進行に伴って単調増加する。一方、接触面率は、せん断が始まった直後に急激に減少し、噛み合わせが外れた状態になるが、せん断が進行すると変化がほとんど無くなる。しかし、画像上では接触面率の分布に変化が確認されることから、局所的な粒子間の噛み合わせや消失が均衡した状態にあると考えられる。
- 3) せん断応力がピークを越えてひずみ軟化過程に移行した直後、せん断帯内部では体積膨張が優勢であるが、この時点では粒子方向の変化は緩やかである。このことから、体積膨張を引き起こすような回転を生じる粒子はごくわずかであると考えられる。更にせん断が進行しひずみ軟化状態に移行すると、せん断帯内部において体積膨張と体積収縮が釣り合いの取れた状態に移行し、せん断ひずみが単調増加し、粒子方向の変化が急になる。
- 4) 粒子方向に顕著な変化が確認された範囲は、間隙率、接触面率、体積ひずみ、せん断ひずみが増変した範囲よりも狭かった。せん断が進行すると、鉛直断面において、水平方向を向く粒子長軸の成分が最大6%程度減少し、鉛直方向を向く粒子長軸の成分が最大5%程度増加した。また、水平方向を向く粒子短軸の成分が最大5%程度増加し、鉛直方向を向く粒子短軸成分が最大8%程度増加した。

参考文献

- 1) 牧晃太郎(2019): X線CT法を用いた火山灰質性地盤のせん断強度低減特性の解明, 熊本大学大学院自然科学教育部 修士論文.
- 2) Nohara, S., Mukunoki, T. (2021): Quantitative evaluation of soil structure and strain in three dimensions under shear using X-ray computed tomography image analysis, *Journal of Imaging*, Vol.7, No.11., 230.
- 3) Matsuoka, H.(1974): A microscopic study on shear mechanism of granular materials, *Soils and Foundations*, Vol.14, No.1, pp.29-43.
- 4) Drescher, A.(1976): An Experimental Investigation of Flow Rules for Granular Materials Using Optically Sensitive Glass Particles, *Geotechnique*, Vol.26, No.4, pp.591-601.
- 5) Kanatani, K.(1981): A theory of contact force distribution in granular materials, *Powder Technology*, Vol.28, No.2, pp.167-172.
- 6) Maeda, K.; Hirabayashi, H.(2006): Influence of Grain Properties on Macro Mechanical Behaviors of Granular Media by DEM, *Journal of applied mechanics*, No.9, pp.623-630.
- 7) Chevalier, B., Tsutsumi, Y., Otani, J. (2019): Direct Shear Behavior of a Mixture of Sand and Tire Chips Using X-ray Computed Tomography and Discrete Element Method, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, Vol.5, No.7.
- 8) Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T.E. et al. (2020): SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python, *Nature Methods*, Vol.17, No.3, pp.261-272.
- 9) Van der Walt, S., Schönberger, J.L., Nunez-Iglesias, J., Boulogne, F., Warner, J.D., Yager, N., Gouillart, E., Yu, T. (2014): scikit-image: image processing in Python, *PeerJ*, e453.
- 10) 佐竹正雄 (2004): 粒状体の誘導異方性について, *応用力学論文集*, Vol.7, pp.724-736.
- 11) Lenoir, N., Bornert, M., Desrues, J., Bésuelle, P., Viggiani, G. (2007): Volumetric Digital Image Correlation Applied to X-ray Microtomography Images from Triaxial Compression Tests on Argillaceous Rock, *Strain*, Vol.43, No.3, pp.193-205.
- 12) Hall, S.A., Bornert, M., Desrues, J., Pannier, Y., Lenoir, N., Viggiani, G., Besuelle, P. (2010): Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using X-ray μ CT and volumetric digital image correlation, *Geotechnique*, Vol.60, No.5, pp.315-322.
- 13) Oda, M.; Kazama, H. (1998): Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils, *Geotechnique*, Vol.48, No.4, pp.465-481.
- 14) 小田匡寛 (2002): 土の構造とメカニクス -マイクロからマクロへ- 5. 地盤力学におけるマイクロメカニクスとマクロメカニクスの関係(その1), *土と基礎*, Vol.50, No.2, pp.67-72.
- 15) Iwashita, K., Oda, M. (2000): Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method, *Powder Technology*, Vol.109, No.1-3, pp.192-205.
- 16) 榎原辰雄, 加藤正司, 吉村優治, 澁谷啓 (2008): 砂のような粒状材料のせん断挙動およびせん断層に与える粒子形状の影響, *土木学会論文集 C*, Vol.64, No.3, pp.456-472.

第6章 X線CT用リングせん断実験装置の開発

6.1 概説

第5章では、一面せん断過程における供試体の内部構造について、マイクロフォーカス X線 CT を使って可視化し、せん断の進行に伴って変化する粒子構造を評価した。一面せん断試験は、試験機構が単純であり適用例も多いが、与えることができるせん断変位量には限りがある。従って、残留状態を想定しなければならない土構造物の安全性評価や、地すべりや断層のような自然環境の中でのせん断現象を評価するためには、一面せん断試験では再現できないせん断変位量を室内で与えなければならない。そこで、本研究では、円周方向にせん断を行うリングせん断実験に着目した。リングせん断実験は、環状形状のせん断容器を円周方向に回転させることでせん断を行うため、室内において長いせん断変位量を与えることができる唯一の実験方法であり、地すべりのすべり面から採取した粘土の残留強度を求めるために実施されることが多い^{1),2)}。これまでに X線 CT による CT 撮影と連動させた研究は行われていないことから、本章では、マイクロフォーカス X線 CT による CT 撮影を想定し、X線 CT用リングせん断せん断実験装置を開発した結果について示す。

6.2 リングせん断容器

本実験において、まず初めに製作したリングせん断容器を図 6-1(a1), (a2)に示す。リングせん断容器は、外径が 40mm、内径が 20mm の環状形状であり、上部容器、下部容器ともに高さは 10mm である。砂が充填される範囲の容器は、X線の透過性を考慮してアルミ材が用いられている。垂直荷重が載荷された状態で上部が固定され、下部を回転することによってせん断を行う。円周方向に容器を回転することでせん断を行うため、理論上は無限にせん断変位を与えることが可能である。過去に実施されたリングせん断実験では、外径が 70~350mm、内径が 42~250mm 程度の容器径が用いられている³⁾。しかし、今回は一般的なリングせん断容器よりもサイズを小さくした。これは、実験で使用する砂の粒径を考え、個々の粒子が十分に識別できる拡大率を満足するためには SOD (X線源から撮影対象までの距離) を可能な限り小さくする必要があり、供試体全体が撮影視野 (FOV) に収まるようにするには容器の大きさをなるべく小さくする必要があったことが理由である。

一般的なリングせん断実験では、せん断時に上部リングと下部リングの間に隙間を開けてせん断実験を行う。図 6-2 に隙間の設定方法に関する概念図を示す。垂直荷重が載荷されると、緑色で塗りつぶされた部分を介して砂に垂直荷重が伝わる。この状態で赤点線によって囲まれたネジを締めると、紫色で塗りつぶした部分が吊り上がり、上部リングと下部リングの間に隙間が作られる。

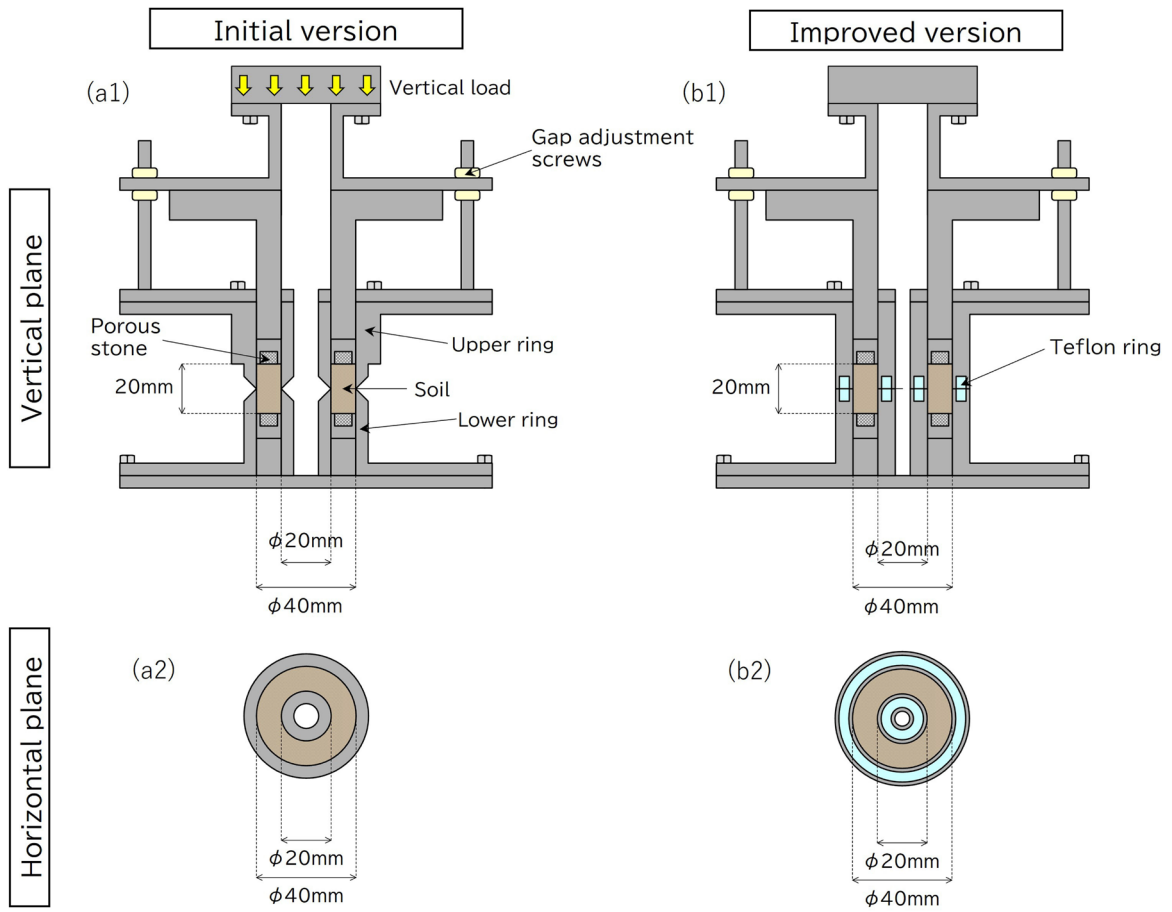


図 6-1 リングせん断容器の概要図

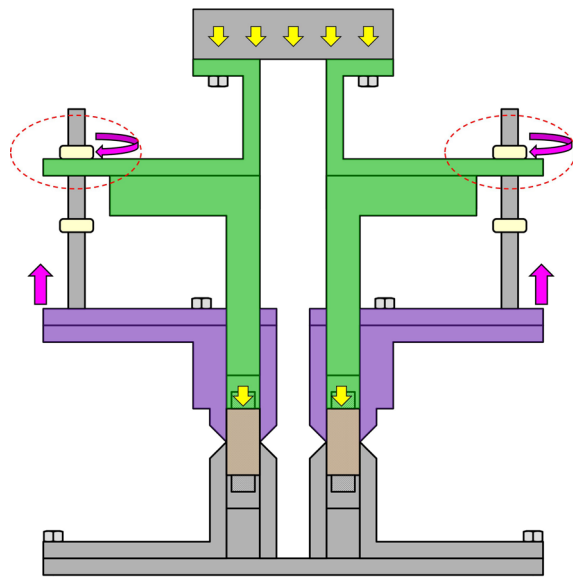


図 6-2 上部リングと下部リング間の隙間設定方法の概念図

リングせん断実験は、せん断変位量が長くなるに従い、上下リング間の隙間から試料漏れが度々起こることが報告されている⁴⁾⁶⁾。本研究においても、上下リング間の隙間を0.1mmとして事前試験を行ったところ、回転角度が30°を越えたあたりで砂試料の漏出が生じた。試料が漏出すると、有効せん断面が減少し、砂粒子の配向に乱れが生じることから、何らかの対策を施す必要がある。先行研究においては、主に以下に示す対策が施されている。

(a) 隙間を小さくする方法

宜保(1994)は、上下リング間の隙間を5~10 μm と可能な限り小さくし、試料漏出の対策を行っている⁴⁾。微小な隙間を設定するためには、隙間を開ける機構と隙間の測定を連携させたシステムが別途必要であり、回転のブレを極力抑える試験機構を必要とする。

(b) 隙間を与えない方法

酒井(2003)は、砂及びカオリン粘土の残留強度を測定するため、初めは上下リング間の隙間を開けずに360°回転し、せん断面に大変位の履歴を与えた⁵⁾。その後、上下リング間の隙間を開けて試験を行い、残留強度の評価を行っている。隙間を開けずにせん断試験を行う場合、上下リング間の摩擦によって正確なせん断応力を測定することができない。

(c) せん断容器の加工

村尾(2002)は、上下リング間の接触面に摩擦の少ないテフロンリングを挟み込めるようせん断容器を加工し、隙間を開けない状態で試験を行うことで試料漏出を防ぐ対策を行っている⁶⁾。

(a)の方法は装置自体が大型化する可能性が高い。本研究では、マイクロフォーカスX線CTのターンテーブル上で実験を行うことを想定しており、装置は極力コンパクトにする必要があることから、(a)の方法は適さない。(b)の方法は、従来装置を使って残留状態の強度を比較的簡便に評価できる。しかし、本研究では、せん断応力がピークに達してひずみ軟化を経て残留強度の状態に移行する過程を同一試料で評価することを目的としていることから、(b)の方法は適さない。(c)の方法は、テフロンリングを挟みこめるようにせん断容器を改良する必要があるが、装置自体の大きさを大型化することなく試料漏出を防ぐことができる可能性がある。以上のことから、本研究においては、摩擦の少ないテフロンリングを挟み込めるようせん断容器を加工し、試料漏出への対策を施す。図6-1(b1), (b2)に改良した容器の概要図を示す。装置の外径、内径、高さは、初期に製作した容器と同じであるが、上部リングと下部リングの接触面にテフロンリングを設置できるよう改良を施している。図6-3に初期容器、改良容器の写真を示す。図6-3(a), (b)は改良前の容器写真、図6-3(c), (d)は改良後の容器写真である。

図6-4に容器外径の形状がCT画像に及ぼす影響を検討した結果を示す。リングせん断実験装置を組み立てる際は、誤って容器が動かないようにガイドリングを取り付け、上部容器と下部容器を固定しなければならない(図6-4(a))。初期容器には、ガイドリングを取り付け

やすいよう、容器外側に加工が行われているが、容器肉厚の厚さが異なることに起因し、CT画像において容器上部に著しくコントラストが低下する範囲が表れてしまうことが分かった（図 6-4(b)）。そこで、容器肉厚を一定とし、さらにガイドリングについても改良することで、CT画像のコントラストが供試体全体で極端に変わらない画像を取得可能になった（図 6-4(c)）。図 6-4(b)、図 6-4(c)は、SIDを1000mm、SODを115mmとし、画素サイズが $23\mu\text{m}/\text{voxel}$ とする条件で撮影を行ったCT画像であるが、容器を小さくし拡大率を極力大きくすることで、珪砂5号程度の砂であれば、個々の粒子が識別可能なCT画像を取得できることを確認した。

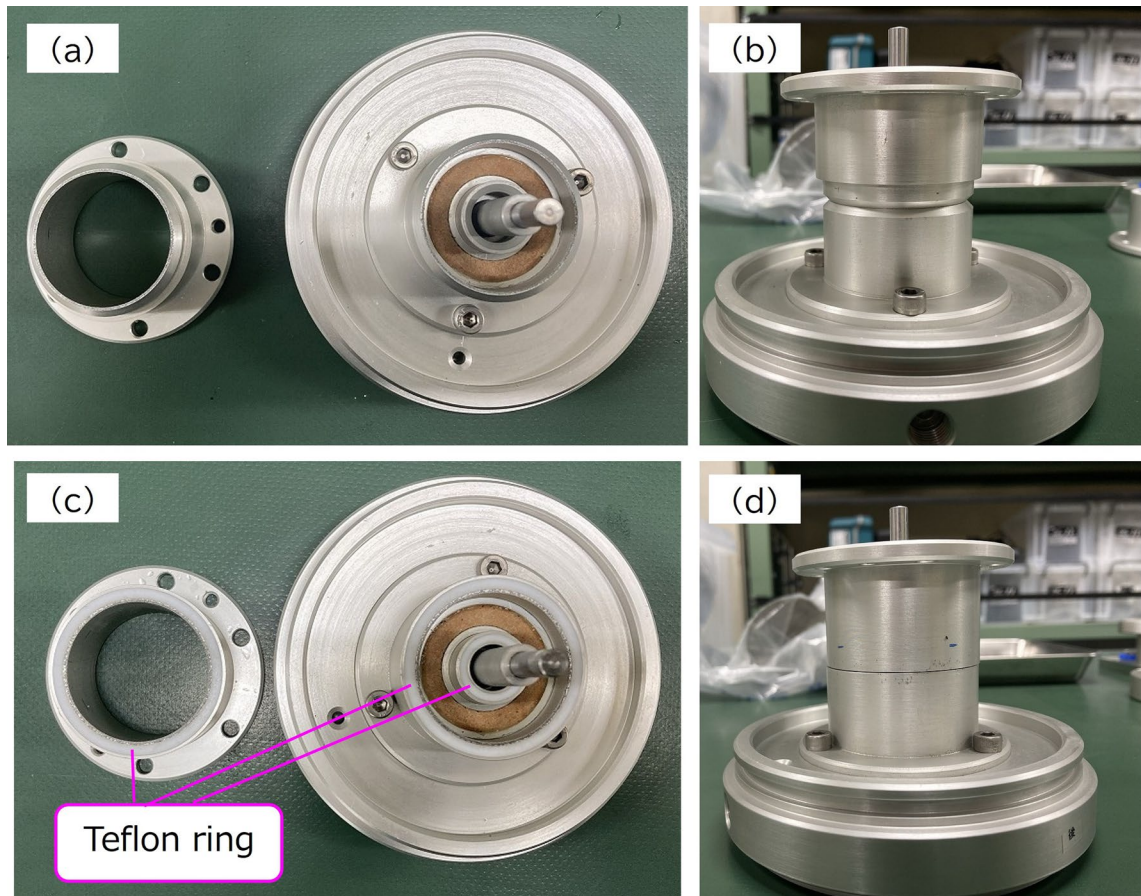


図 6-3 初期容器と改良容器の写真

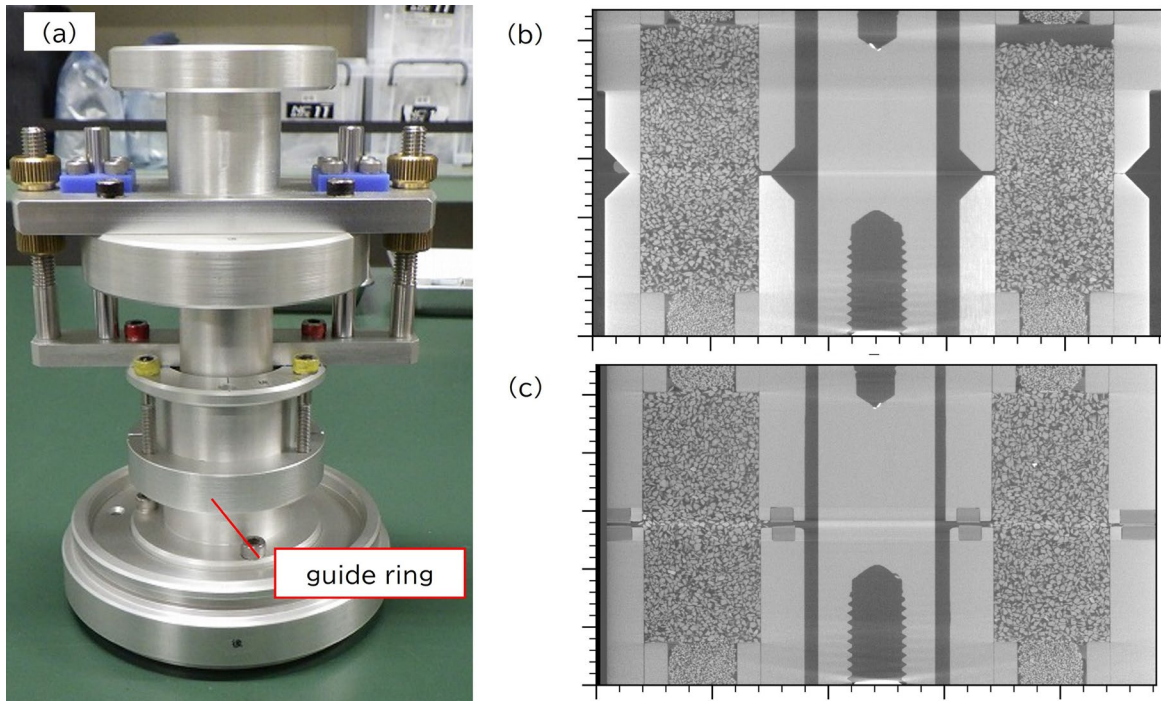


図 6-4 容器外側の形状の改良効果

6.3 実験装置

本研究で使用した実験装置の概要図を図 6-5 に示す。装置はマイクロフォーカス X 線 CT のターンテーブル ($\phi 350\text{mm}$) に収まる大きさとなっており、高さは約 1100mm である。垂直荷重はペロフラムシリンダーによって載荷され、ペロフラムシリンダーにコンプレッサーを使って空気を供給し、レギュレーターを使って空気圧を調整することで垂直圧力を制御する。定圧試験はペロフラムシリンダーの軸方向の変位を許容した状態で、定体積試験はペロフラムシリンダーの軸方向の変位を拘束した状態で試験を行う。せん断（回転）はトルクモーターを使って行う（最大せん断トルク $10\text{N}\cdot\text{m}$ 、せん断速度 $0.025\sim 2.5^\circ/\text{min}$ ）。計測項目は、垂直荷重、トルク、鉛直変位、回転角度であり、垂直荷重とトルクは供試体上部に設置した一体型ロードセルで、回転角度はトルクモーターに接続されたポテンショメータで計測される。垂直荷重及びトルクは、式(6.1)、(6.2)に示す計算式を用い、垂直応力及びせん断応力に換算する。

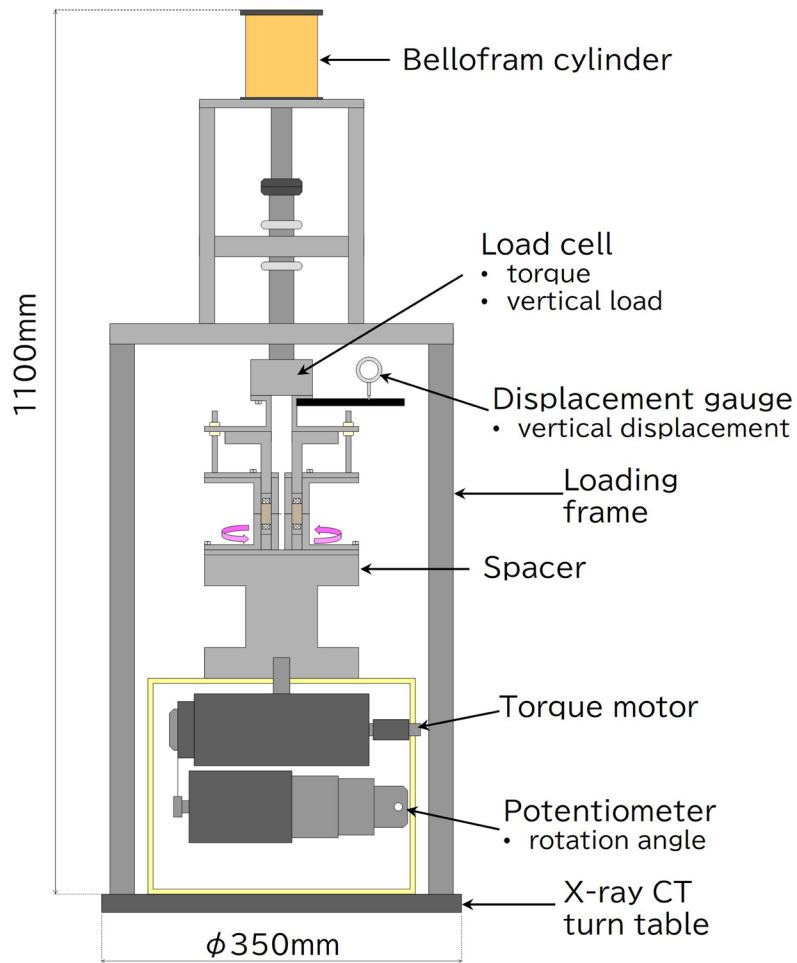


図 6-5 実験装置の全体概要図

$$\sigma = \frac{F}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} \quad (6.1)$$

$$M = 2\pi \int_{r_i}^{r_o} \tau \cdot r^2 dr = \frac{2\pi\tau(r_o^3 - r_i^3)}{3} \quad (6.2)$$

$$\Leftrightarrow \tau = \frac{3M}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)}$$

ここで、 σ は垂直応力[N/m²]、 F は垂直荷重[N]、 r_o は容器外径[m]、 r_i は容器内径[m]、 M はトルク[N・m]、 τ はせん断応力[N/m²]を表す。

本実験においては、(一財)電力中央研究所に設置されたマイクロフォーカス X 線 CT (テスコ社製 TXS-450/160) の 160kV 線源を使って CT 撮影を行う。せん断実験及び CT 撮影時の写真を図 6-6 に示す。実験は X 線 CT のターンテーブル上で行い、実験終了まで供試体は移動しないため、試料の乱れや位置ずれは最小限に抑えられる。せん断実験の際は荷重フレーム

を設置し、垂直荷重を載荷して下部容器を回転するが(図 6-6(a)), CT 撮影を行う際は、垂直荷重を除荷し、X 線透過の障害となるため荷重フレームを取り外すことが必要である(図 6-6(b)). また、高解像度の CT 画像を取得するためには、拡大率を大きくしなければならない。しかし、SOD を極力小さくしようとする、供試体下部に設けられたトルクモーター等の装置駆動部分が X 線源に干渉してしまう。そこで、供試体下部にスペーサーを入れ、装置駆動部分が X 線源の下に入り込んだ状態で CT 撮影を行う。

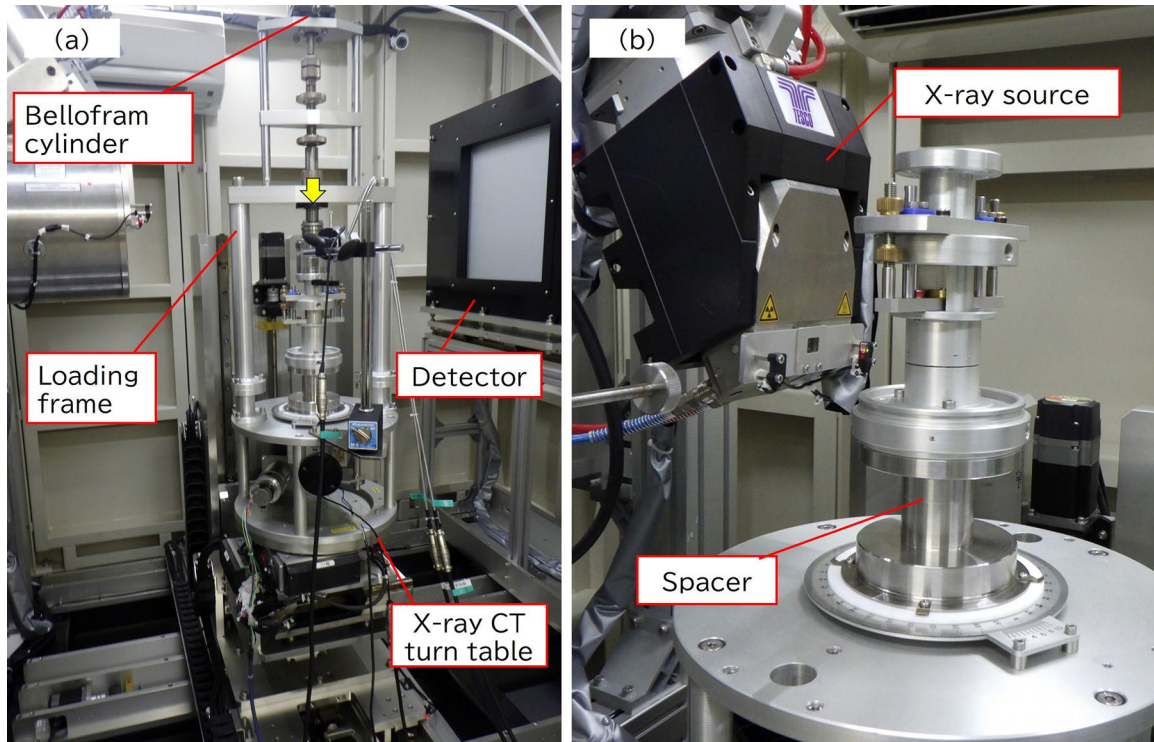


図 6-6 せん断実験及び CT 撮影時の写真

6.4 実験手順の検討方法

CT 撮影と連動した実験を行うにあたり、せん断を一旦停止したことによる影響や、垂直荷重を除荷したことによる影響を明らかにするため、予備実験を行った。実験に使用した砂は、本実験においても使用するいわき珪砂 5 号 (IW5) である。図 6-7 に画像解析式粒度分布計 (ジャスコインタナショナル株式会社 FF-30micro) で計測した IW5 の粒径加積曲線を示す。IW5 の中央粒径は 0.66mm である。表 6-1 に予備実験の実験条件を示す。

P1~P4 は定圧型のせん断実験であり、垂直応力は 300kPa である。V1~V4 は定体積型のせん断実験であり、初期垂直応力は 200kPa である。P1 及び V1 は図 6-1(a1), (a2) に示した初期型のせん断容器を用い、上下リング間の隙間を 0.1mm とする条件である。P2~P4 及び V2~V4 は図 6-1(b1), (b2) に示した改良型のせん断容器を用い、上下リング間の隙間を開けずに試験を行った。また、実験の方式を以下に示す 3 種類設定した。各方式の特徴を以下に示す。

(a) Type1

せん断開始から終了まで回転を停止せずに連続的に行う試験（一般的なリングせん断実験と同じ）。

(b) Type2

回転角度が 10, 40° に到達した時点で一旦せん断を停止する試験。せん断を停止した際、垂直荷重は除荷しない。

(c) Type3

回転角度が 10, 40° に到達した時点で一旦せん断を停止する試験。せん断を停止した後、垂直荷重を除荷する。その後は再び垂直荷重を載荷し、せん断を再開する（CT撮影と連動した実験を想定）。

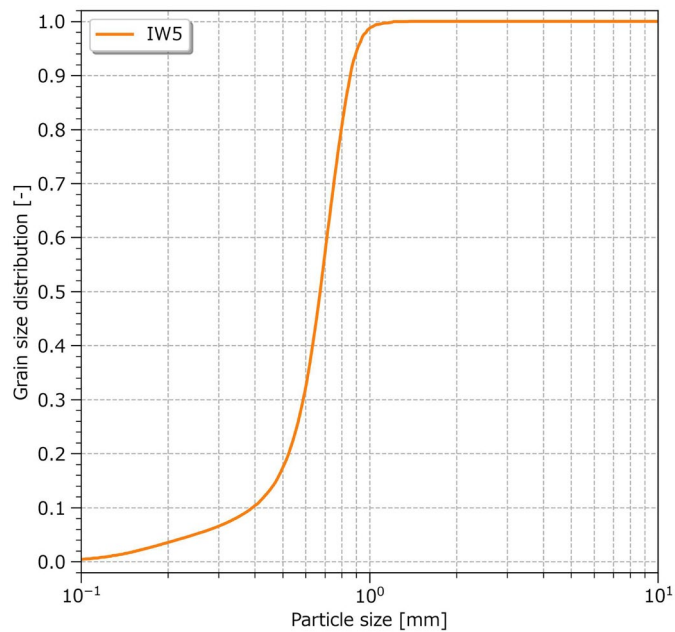


図 6-7 予備検討実験で使した砂の粒径加積曲線

表 6-1 予備実験の実験条件

Name	Apparatus type	Experimental type	Normal stress	Gap	Shear type
P1	Initial version			0.1 mm	Type1
P2		Constant pressure	300 kPa	None	Type1
P3	Improved version				Type2
P4					Type3
V1	Initial version			0.1 mm	Type1
V2		Constant volume	200 kPa	None	Type1
V3	Improved version				Type2
V4					Type3

その他に、共通する実験条件、実験手順を以下に記す。

- ・ 砂は乾燥状態の IW5 を用い、乾燥密度を $1,550\text{kg/m}^3$ とする条件で容器に自由落下法を使って充填する。
- ・ 容器に砂を充填した後、所定の垂直荷重を載荷し、10分間の圧密を行う。
- ・ せん断速度は $0.2^\circ/\text{min}$ とする条件で下部容器を回転し、回転角度が 180° に到達した時点で実験終了とする。

6.5 実験手順の検討結果

定圧型のせん断実験の結果 (P1~P4) を図 6-8 に、定体積型のせん断実験の結果 (V1~V4) を図 6-9 に示す。また、P1 と P2 及び V1 と V2 における実験終了時点の供試体の写真を図 6-10、図 6-11 に示す。図 6-8(a)、図 6-9(a)はせん断応力の結果であり、計測されたトルクの結果から式(6.1)を用いてせん断応力を計算した。図 6-9(b)は垂直応力の結果であり、計測された垂直荷重の結果から式(6.2)を用いて垂直応力を計算した。図 6-8(b)、図 6-9(c)は鉛直変位の計測結果であり、正の値が膨張を、負の値が収縮を表す。また、P4、V4 は、回転を一時停止した時点で一旦鉛直変位の計測をリセットし、再度計測を行っている。なお、P3 においては、回転角度が 40° 以降にデータの計測不良が生じたが、 180° まではせん断を行っている。

リングせん断実験は、その特性上、半径方向にせん断変位量が異なる実験である。ここでは、供試体中央部、つまり容器中心から半径 15mm の位置におけるせん断変位量をグラフ上部の横軸に示した。すなわち、下部容器を 180° 回転させた場合、供試体中央部においてせん断変位量が約 47mm 与えられたことに等しい。

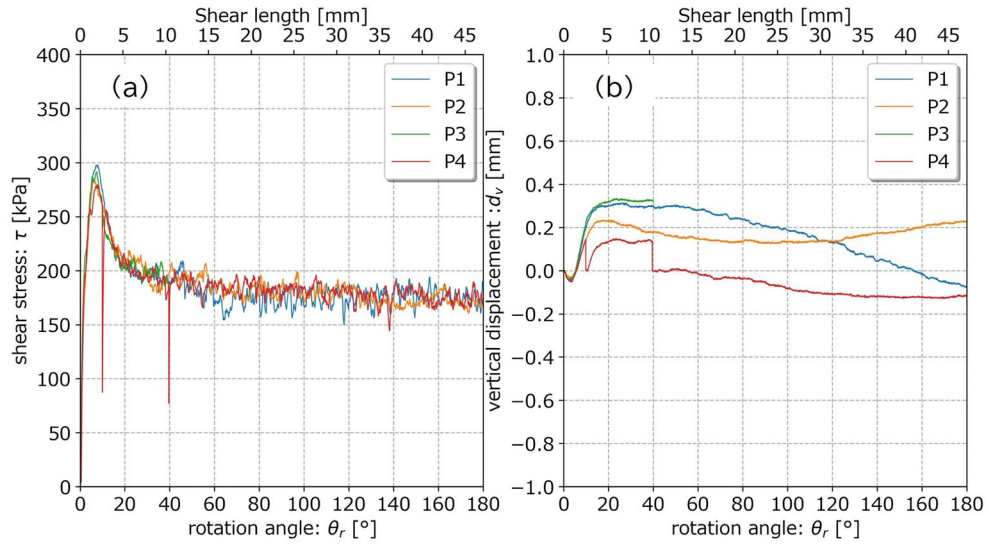


図 6-8 予備実験の結果 (定圧試験)

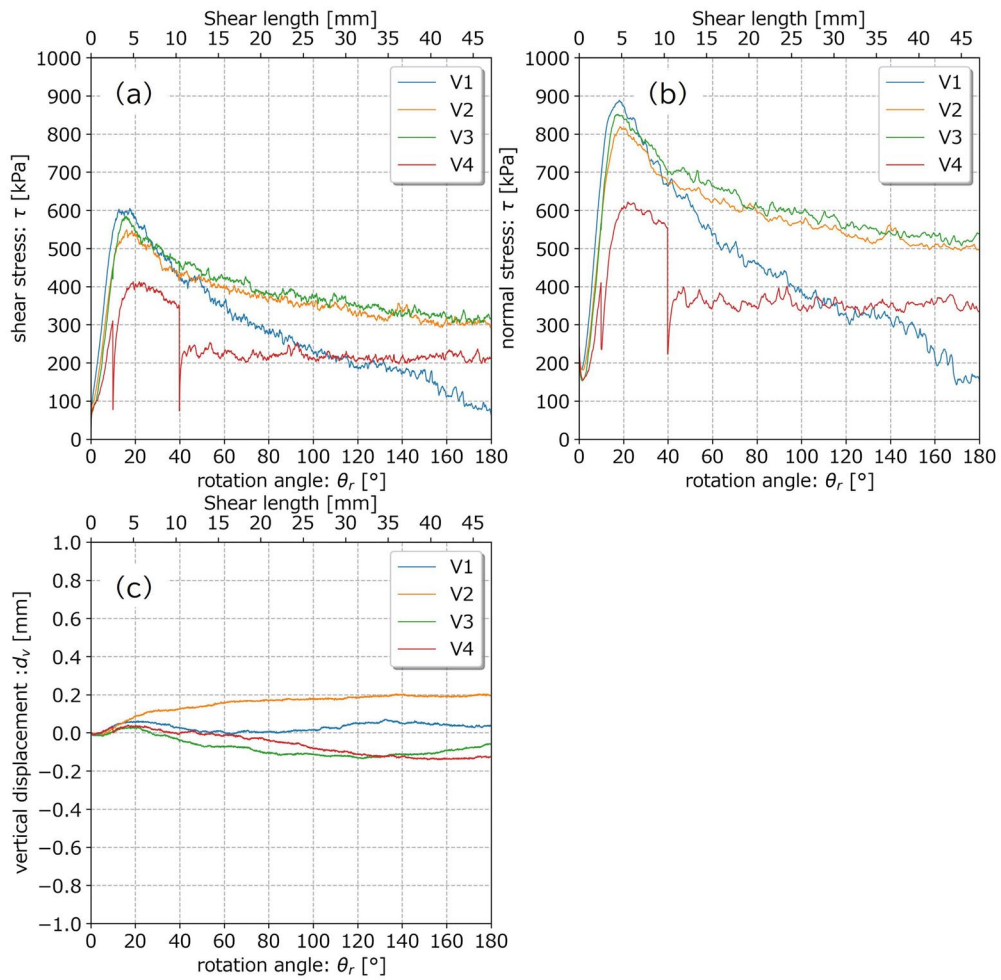


図 6-9 予備実験の結果 (定体積試験)

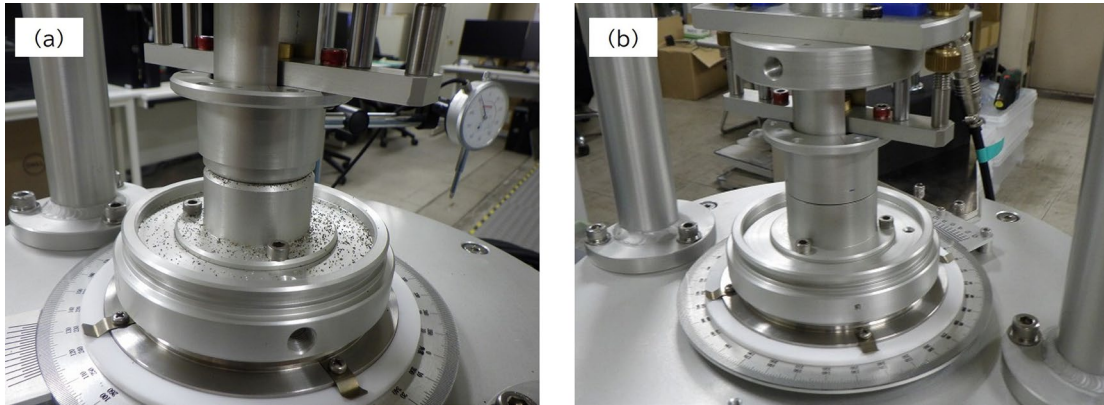


図 6-10 実験後の供試体写真 (P1, P2)

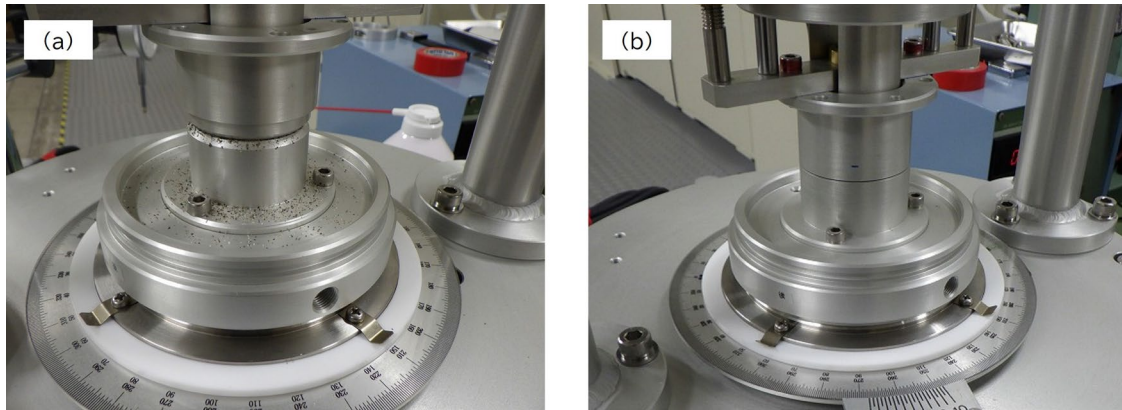


図 6-11 実験後の供試体写真 (V1, V2)

定圧試験の結果によると(図 6-8), せん断応力は $6\sim 8^\circ$ 付近においてピーク強度に到達し, 60° 以降はほぼ一定の値となり, 残留状態に移行したと考えられる. しかし, 初期型の容器を使った実験(P1)では, 実験終了時点において上下リング間の隙間から砂が漏出しており(図 6-10(a)), この影響を受けて鉛直変位は 60° 以降に単調減少しているように見える. 改良型の容器を使った実験(P2~P4)では, 実験終了時点においても砂漏出は発生していない(図 6-10(b)). また, 初期型の容器(P1)と改良型の容器(P2~P4)を使った実験のせん断応力はほぼ等しく, テフロンリングによる摩擦の影響はほとんど無かった. 以上のことから, テフロンリングを挟みこむようにせん断容器の改良を行ったことで, 上下リング間の隙間からの砂漏出を抑制しつつ, 正確なせん断応力を計測できることが確認された.

連続的にせん断を行った P2 と, せん断を一旦停止した P3 の結果を比較すると, せん断応力の結果は概ね等しく, せん断を一時停止したことによる影響はほとんど無いと考えられる. 一方, 連続的にせん断を行った P2 と, せん断を一旦停止した後に垂直荷重を除荷した P4 を比較すると, P4 は回転角度が $10, 40^\circ$ の時点でせん断応力が一時的に減少する. しかし, せん断を再開すると, 2° 程度かけて元のせん断応力に回復する結果となった. 今回の実験システムでは, 偽像の影響が少ない高解像度の CT 画像を取得するためには, 垂直荷重を除荷し,

X線透過の障害となる荷重フレームを取り外す必要があり、せん断応力の緩和の影響は避けられない。しかし、再び垂直荷重を載荷してせん断を再開することによって、概ね元のせん断応力の値に回復することから、粒子構造への影響は限定的であると考えられる。

定体積試験の結果によると(図 6-9), V1~V3 の垂直応力及びせん断応力は、 $16\sim 18^\circ$ 付近においてピーク強度に達する。初期型の容器を使った実験(V1)では、実験終了時点において上下リング間の隙間から砂が漏出したが(図 6-11(a)), 改良型の容器を使った実験(V2~V4)では、実験終了時点においても砂漏出は発生しなかった(図 6-11(b))。また、初期型の容器(V1)と改良型の容器(V2, V3)の結果を比較すると、V2 や V3 の結果は、V1 の結果と比較すると、垂直応力及びせん断応力の最大値がやや低かった。しかし、せん断応力がピークを越えて残留状態に向かうに従い、V1 は徐々に減少しているのに対し、V2 や V3 は一定の値に収束するような結果となっている。つまり、初期型の容器では砂漏出の影響が大きく、正確な残留状態を再現できないと言える。

一方、連続的に試験を行った V2 と、せん断を一旦停止した V3 の結果は概ね等しいことから、定圧型試験と同じく、せん断を一時停止したことによる影響はほとんど無かった。しかし、連続的に試験を行った V2 と、せん断を一旦停止した後に垂直荷重を除荷した V4 の結果は大きく異なっており、V4 は再び垂直荷重を載荷してせん断を再開したとしても、元の垂直応力、せん断応力には回復しないことが分かった。以上のことから、今回開発した実験装置を用い CT 撮影を連動した実験を行うには、定圧型の試験を行うことが適切であると言える。

6.6 第6章のまとめ

本章では、CT 撮影と連動して大変形を室内で再現するため、X線CT用リングせん断実験装置の開発を行った。また、予備実験を行い、CT 撮影を想定した実験手順について検討した。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 実験装置は、試料の乱れや位置ずれを最小限に抑えるべく、X線CTのターンテーブル上で全ての実験を行うことができるよう、コンパクトな設計とした。一般的なリングせん断容器は、外径が70~350mm、内径が42~250mm程度の容器径が用いられているが、本研究で製作したリングせん断容器は、外径が40mm、内径が20mmとし、一般的な容器径よりも小さくした。このことによって、CT撮影時の拡大率を大きくすることができ、珪砂5号程度の砂であれば、マイクロフォーカスX線CTを使って粒子個々を識別可能なCT画像を取得できることを確認した。
- 2) リングせん断実験は、せん断の進行に伴って上下リング間の隙間から砂が漏出する可能性が報告されており、本実験においても同様の事象が確認された。検討の結果、摩擦の少ないテフロンリングを挟み込めるよう容器の改良を行うことで、装置を大型化することなく砂漏出を抑制し、正確なせん断応力を計測できることが分かった。また、容器の外形状を工夫することで、偽像による影響の少ない鮮明なCT画像を取得できることを確認した。

- 3) CT撮影と連動した実験を行うには、垂直荷重を除荷しX線透過の障害となる荷重フレームを取り外さざるを得ず、応力緩和の影響は避けられない。しかし、定圧型の試験の場合は、再度垂直荷重を載荷してせん断を再開すれば、概ね元のせん断応力に回復するため、粒子構造への影響は限定的であると考えられる。

参考文献

- 1) 川本治, 山田康晴, 古谷保(2006): リングせん断試験機による強度測定お大規模地すべり土塊の安定解析, 農村工学研究所報告, No.46, pp.49-65.
- 2) 村尾英彦, 釜井俊孝, 野坂徹: リングせん断試験のせん断面と地すべり面における微視的構造の比較(2015), 日本地すべり学会誌, Vol. 52, No.3, pp.123-131.
- 3) 鈴木素之, 小林孝輔, 山本哲郎, 松原剛, 福田順二(2005): リングせん断試験における粘土の残留強度に及ぼすせん断速度の影響, 山口大学工学部研究報告, No.2, pp.121-134.
- 4) 宜保清一(1994): 残留強度測定のためのリングせん断試験装置とその測定精度, 地すべり, Vol.31, No.3, pp.24-30.
- 5) 酒井直樹, 豊田浩史, 中村公一, 杉本光隆(2003): リングせん断試験による残留状態の評価と残留強度測定法に関する検討, 土木学会論文集, No.743, III-64, pp.223-228.
- 6) 村尾英彦, 飯久保巍, 北野幹夫(2002): リングせん断試験機を用いた地すべり面強度定数決定のための基礎的検討(その1), 第41回日本地すべり学会研究発表講演集, pp.101-104.

第7章 リングせん断実験によるせん断の進行に伴う粒子構造の変化の評価

7.1 概説

本章では、第6章で開発したX線CT用リングせん断実験装置を使って実験を行い、大変形を与えた場合のせん断帯をマイクロフォーカスX線CTで可視化し、画像解析を行って粒子構造を定量的に評価する^{1),2)}。

7.2 実験材料

本実験では、3種類の材料（IW3:いわき珪砂3号，IW5:いわき珪砂5号，GB:ガラスビーズ）を使用する。画像解析粒度分布計（ジャスコインタナショナル株式会社 FF-30micro）を使用してIW3とIW5の粒度を計測した結果、粒径の中央値（ D_{50} ）は1.47mm及び0.66mmであった。また、GBの粒度は0.5~0.71mmである。図7-1に画像解析式粒度分布計で計測した粒径加積曲線を示す。IW3及びIW5の真密度は $2,640\text{kg/m}^3$ ，GBの真密度は $2,500\text{kg/m}^3$ である。

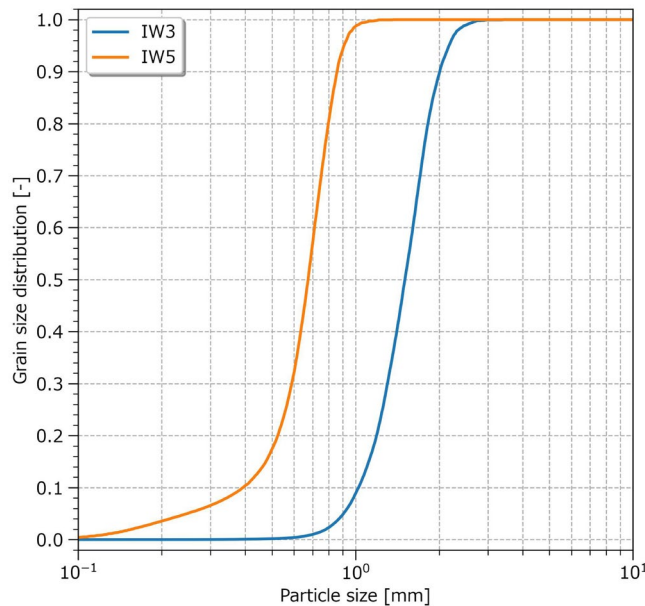


図7-1 砂試料の粒径加積曲線（画像解析式粒度分布計）

7.3 実験条件

第6章で予備実験を行った結果、テフロンリングを挟み込むようにせん断容器を改良したことで、上下リング間からの砂漏出を抑制しつつ、正確なせん断応力を計測できた。また、CT撮影を想定し、せん断を停止した後に垂直荷重を除荷したとしても、垂直荷重を再び载荷してせん断を再開すれば、概ね元のせん断応力の値に回復することを確認した。以上のことから、表7-1に示す条件でCT撮影と連動させた実験を実施する。

表 7-1 実験条件

Name	Material	Specimen preparation Methods
Case1	IW5	free-fall method
Case2	IW5	free-fall and agitation method
Case3	GB	free-fall method
Case4	IW5 (90%), IW3 (10%)	free-fall and agitation method

Case1, 2 は、乾燥状態の自然砂 IW5 ($D_{50}=0.66\text{mm}$) を、Case3 は粒子形状が球に近いガラスビーズ (粒度 $0.5\sim 0.71\text{mm}$) を使った実験である。Case4 は乾燥状態の自然砂 IW5 ($D_{50}=0.66\text{mm}$) と自然砂 IW3 ($D_{50}=1.47\text{mm}$) を重量比 9:1 で混合した試料を用いた実験である。いずれも、乾燥密度が $1,550\text{kg/m}^3$ とする条件で供試体を作成した。地すべりのすべり面粘土や断層ガウジ (断層運動によって岩石が破碎され、粘土のように細くなった領域) では、すべり面に破碎された母岩の岩片粒子が混入することがあり、その岩片粒子の向きがせん断の方向と調和的であることが経験的に知られている^{3), 4)}。本実験においては、供試体の大部分を占める粒径の小さい材料が、粒径の大きい材料の方向に及ぼす影響を検討するため、Case4 の条件を設定した。当初は、IW5 と IW3 の重量を測定して別の容器に入れ、よく振ってから自由落下法によって試料を充填し供試体を作成していた。しかし、この方法では、粒径の大きい粒子が偏在してしまうことが度々あった。そこで、自由落下法を使ってせん断容器に試料を充填した後、葉さじ等によく攪拌することで、粒径が大きい粒子が偏在しないようにした。Case2 は IW5 のみを使った実験であるが、Case4 と同様に、自由落下法を使って充填した後によく攪拌して供試体を作成した実験条件である。一方で、Case1 と Case3 は自由落下法のみで供試体を作成した。

その他に、共通する実験条件、実験手順を以下に記す。

- ・ 定圧型の試験とし、垂直応力は 300kPa とする。
- ・ 容器に砂を充填した後、所定の垂直荷重を載荷し、10 分間の圧密を行う。
- ・ せん断速度は $0.2^\circ/\text{min}$ とし、回転角度が 180° に到達した時点で実験終了とする。
- ・ 初期状態及び回転角度が 2, 6, 12, 20, 40, 90, 180° に到達した時点で回転を停止、垂直荷重を除荷して荷重フレームを取り外して CT 撮影を行う。
- ・ CT 撮影後、再度 10 分間の圧密を行ってから回転を再開する。
- ・ CT 撮影の条件は、管電圧が 150kV 、管電流が $250\mu\text{A}$ 、SID が 1000mm 、SOD が 115mm である。FOV (有効視野) を大きくするため、検出器を 15mm オフセットして撮影する。この時、CT 画像の画像サイズは $2,100\times 2,100\times 1,200\text{voxel}$ 、画素サイズは $23\mu\text{m}/\text{voxel}$ である。

7.4 画像解析方法

7.4.1 円周方向断面図の作成

CT 画像の汎用的なビューワーは、直交断面 (XY, XZ, YZ 面) のみがディスプレイに表示される。しかし、本実験は回転方向にせん断が行われるため、直交断面の表示だけではせん断のイメージを捉えることができない。そこで、本章では図 7-2 に示すように、円周方向の断面図を作成する。供試体中央部 (容器中心から半径 15mm の位置) における画素値を 0.1° 毎に抽出し、縦軸が鉛直座標、横軸が角度とする CT 画像を作成する。

なお、画像セグメンテーションについては、3.4.2 節で示した Marker-Controlled Watershed 法を使って行う。

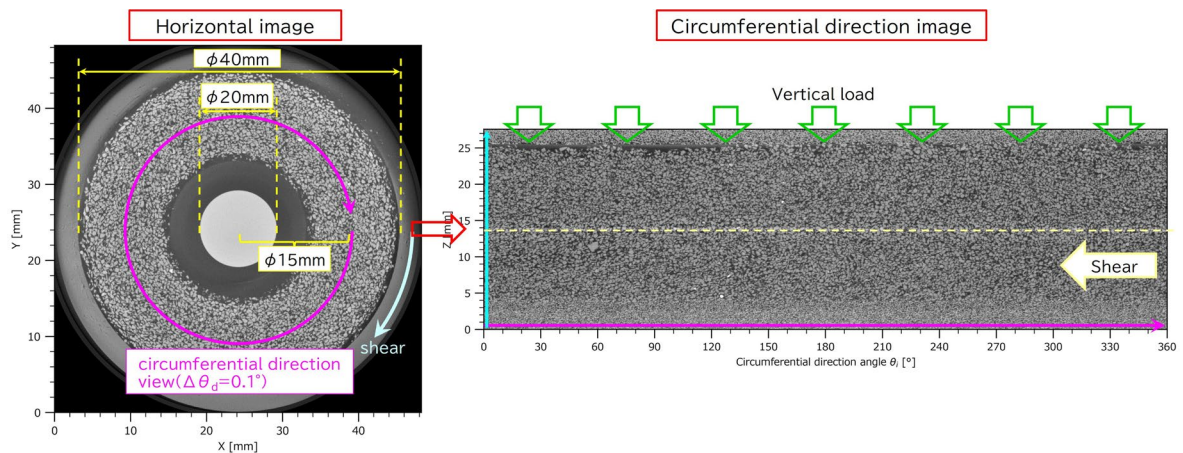


図 7-2 円周方向断面図の作成方法の概要図

7.4.2 画像変位計測

せん断に伴って変化する粒子構造の変位を計測するため、画像変位計測を行う。本実験では評価対象となるデータが多いことから、効率良く評価を行うため、7.4.1 節で示した方法で作成した円周方向の 2 次元断面図を対象に、オープンソースの画像処理ソフトウェア ImageJ の PIV (Particle Image Velocimetry; PIV) プラグインを用いて画像変位計測を行う⁵⁾。画像変位計測は、変形前後の画像において評価点周辺の関心領域における画像相関を計算し、評価点の変位方向や変位量を計算する解析手法である。本章で用いた画像処理ソフトウェアは、変位量が小さい状態では精度良く評価できるが、変位が大きくなるに従って評価精度が低下する可能性がある。特に、回転角度が 90° から 180° にかけては変位量が大きく、単純に変形前後の画像を入力するだけでは計算が収束しなかった。そこで、図 7-3 に示すように、まずは上部せん断容器と下部せん断容器において特徴的な画素に着目し、目視でせん断方向の変位量を求める。その後、上部せん断容器と下部せん断容器においてせん断方向の変位量を考慮した初期データを作成し、初期値を与えることで画像変位計測を行った。この方法を取り入れることによって、計算の収束性を大幅に改善することができた。

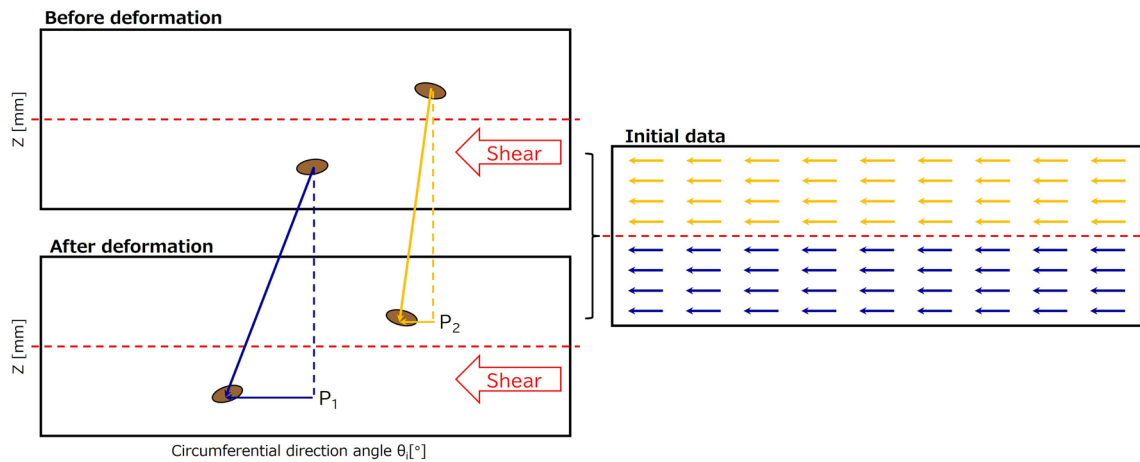


図 7-3 画像変位計測の概念図

7.4.3 間隙率

第5章の場合と同様に、画像セグメンテーションを行う際に作成した二値化画像を対象に、各代表体積要素の体積に占める粒子以外の画素の割合を計算し、間隙率を評価する。代表体積要素の大きさは、Case1における初期状態 ($\theta_r=0^\circ$) におけるCT画像の二値化画像に対し、代表体積要素の大きさを0.5~4.5mmの範囲で0.5mm毎に等方性の構造格子を作成し、各代表体積要素において間隙率を計算する。その後、間隙率のヒストグラムを作成し、代表体積要素の大きさを検討する。

7.4.4 粒子ファブリック解析

画像セグメンテーションによって抽出された粒子を対象に、本研究で開発した3次元粒子ファブリック解析手法を用いて粒子の方向を評価する。解析対象としたのは、Case1, 2, 4の実験で得られたCT画像である。Case3については、ガラスビーズは形状がほぼ球であり、粒子の長軸、中間軸、短軸を一意的に決定できない可能性が高いことから、今回は評価対象としなかった。画像セグメンテーションによって抽出された粒子は、Case1においては約70,100個、Case2においては約71,700個、Case4においては約67,500個である。

第5章では、粒子の方向を円形のヒストグラム（ローズダイヤグラム）として整理し、粒子の方向変化について整理を行った。しかし、本章で行ったリングせん断実験は、円周方向に回転しせん断が行われることから、円形のローズダイヤグラムでは粒子の方向変化の傾向を表現することができないと考えられる。そこで、水平断面における粒子の方向は、せん断の方向と粒子各軸の成す角度を計算する。図7-4に粒子の長軸を例とし、水平断面におけるせん断の方向と粒子長軸の方向の成す角度の計算方法に関する概念図を示す。

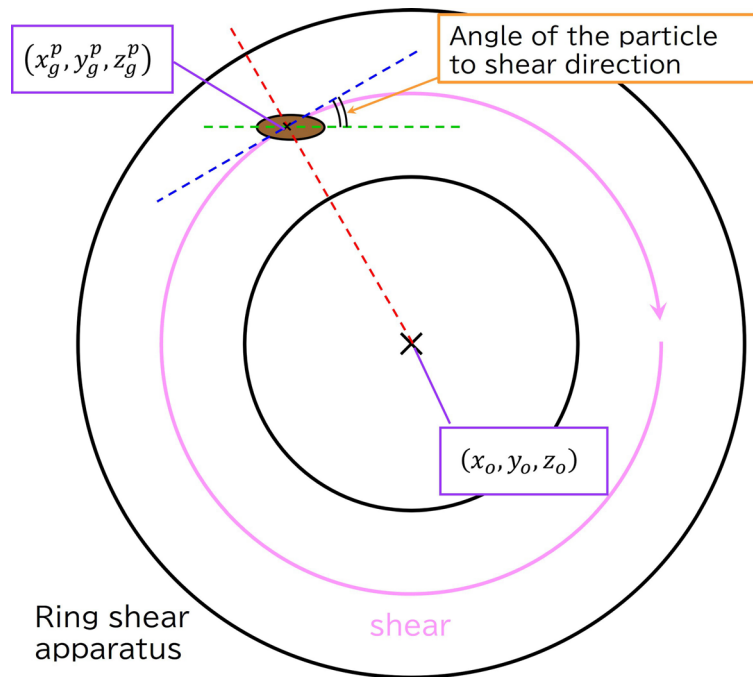


図 7-4 水平断面におけるせん断の方向と粒子長軸の方向の成す角度の計算方法概念図

容器中心の座標を x_0, y_0, z_0 ，粒子重心の座標を x_g^p, y_g^p, z_g^p とすると，水平断面において容器中心と粒子重心を結ぶ直線（図 7-4 内の赤点線）の勾配は式(7.1)のように表される。

$$\frac{y_g^p - y_0}{x_g^p - x_0} \quad (7.1)$$

水平断面において容器中心と粒子重心を結ぶ直線（図 7-4 内の赤点線）に直交する直線，つまりせん断の方向に対する接線（図 7-4 内の青点線）の勾配は，式(7.1)より式(7.2)のように表される。

$$-\frac{x_g^p - x_0}{y_g^p - y_0} \quad (7.2)$$

せん断の方向に対する接線と（図 7-4 内の青点線），粒子ファブリック解析によって評価された近似楕円体の長軸の単位ベクトル（図 7-4 内の緑点線）より，内積を計算することで，水平断面における粒子長軸の方向とせん断の方向の成す角度を計算する。また，鉛直断面においては，粒子長軸と水平面の成す角度を計算する。

上記の計算を粒子長軸，中間軸，短軸に対して行うが，水平断面における粒子各軸とせん断の方向の成す角度は θ_{hi} ，鉛直断面における粒子各軸と水平面の成す角度は θ_{vi} とし，下付き添え字の i は，長軸が 1，中間軸が 2，短軸が 3 を表すものとする。

7.5 結果

7.5.1 実験結果

表 7-1 に示した実験条件に基づいて行った実験結果のうち、図 7-5(a)にせん断応力の経時変化を、図 7-5(b)に鉛直変位の経時変化を示す。せん断応力は、計測されたトルクの結果から式(6.2)を用いて計算した。また、いずれの結果も、容器中心から半径 15mm の位置におけるせん断変位量をグラフ上部の横軸に示した。

砂を用いた実験 (Case1, 2, 4) は、回転角度が 180° に到達するまで実験を行ったが、ガラスビーズを用いた実験 (Case3) は、回転角度が 90° を越えてしばらく経過すると、上下リング間の隙間から試料が漏出した。これは、ガラスビーズは粒子表面が滑らかで粒子間の摩擦が少ないことから、砂よりも試料の漏出が発生しやすかったためであると考えられる。このことから、Case3 においては、試料の漏出が確認された時点で実験を中断したため、回転角度が 180° の時点における CT 撮影は行わなかった。

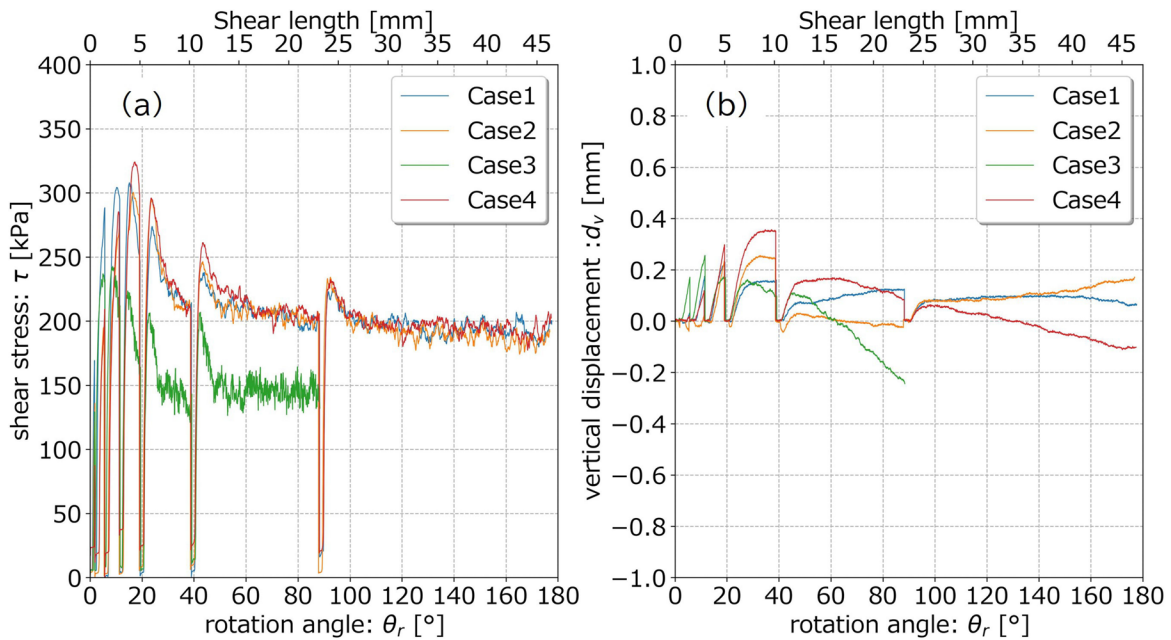


図 7-5 リングせん断実験の結果

いずれの実験結果も、予備実験の場合と同様に、せん断を停止し垂直応力を除荷した時点でせん断応力は一旦減少するが、せん断を再開すると、約 2° かけて概ね元のせん断応力に回復した。ガラスビーズを用いた実験 (Case3) のせん断応力は、砂を用いた実験 (Case1, 2, 4) のせん断応力よりも低くなった。また、砂を用いた実験 (Case1, 2, 4) では、回転角度が $15.2^\circ \sim 17.2^\circ$ (せん断変位量は $4.0 \sim 4.5$ mm) の時にせん断応力がピークに到達したが、ガラスビーズを用いた実験 (Case3) では、砂よりもピークを迎えるのが早く、回転角度が 8.8° (せん断変位量は 2.3 mm) の時にせん断応力がピークに到達した。使用材料によってせん断応力のピーク強度やピーク出現位置に差が生じており、使用する材料の粒子形状や粒子表面の状

態がせん断挙動に強く影響していると考えられる。

IW5のみを用い、自由落下法のみで供試体を作成した Case1 と、試料をよく攪拌し供試体を作成した Case2 を比較すると、ひずみ硬化過程においてせん断応力に僅かに差はあったものの、せん断応力のピーク強度や残留強度に大きな違いは見られなかった。一方、供試体の作成方法は同じであるが、IW5のみを用いて供試体を作成した Case2 と、IW3 と IW5 を混合して供試体を作成した Case4 を比較すると、せん断応力のピーク強度はわずかに Case4 が高かったが、残留強度に大きな違いは見られなかった。

7.5.2 CT 画像

本実験で撮影された CT 画像は、画像サイズが $2,100 \times 2,100 \times 1,200$ voxel、画素サイズが $23\mu\text{m}/\text{voxel}$ である。7.4.1 節で述べたように、供試体中央部（容器中心から半径 15mm の位置）における円周方向の断面図、つまりせん断の方向に沿った鉛直断面図を **図 7-6**～**図 7-13** に示す。**図 7-6**、**図 7-8**、**図 7-10**、**図 7-12** は円周方向の断面図であり、**図 7-7**、**図 7-9**、**図 7-11**、**図 7-13** は円周方向の断面図におけるせん断面付近を拡大した画像である。

砂を用いた実験（Case1, 2, 4）では、回転角度が $15.2 \sim 17.2^\circ$ の時にせん断応力がピークに到達したが（**図 7-5**）、CT 画像上では、回転角度が 20° に到達するまでは、初期の粒子構造が保たれているように見える。しかし、回転角度が 40° の CT 画像では、せん断面付近において局所的に大きな空隙が形成され、粒子構造が乱れている様子が確認された。一方、ガラスビーズを用いた実験（Case3）は、砂を用いた実験に比べると空隙は比較的均一であり、せん断が進行したとしても、粒子構造の変化はほとんど生じていないように見える。

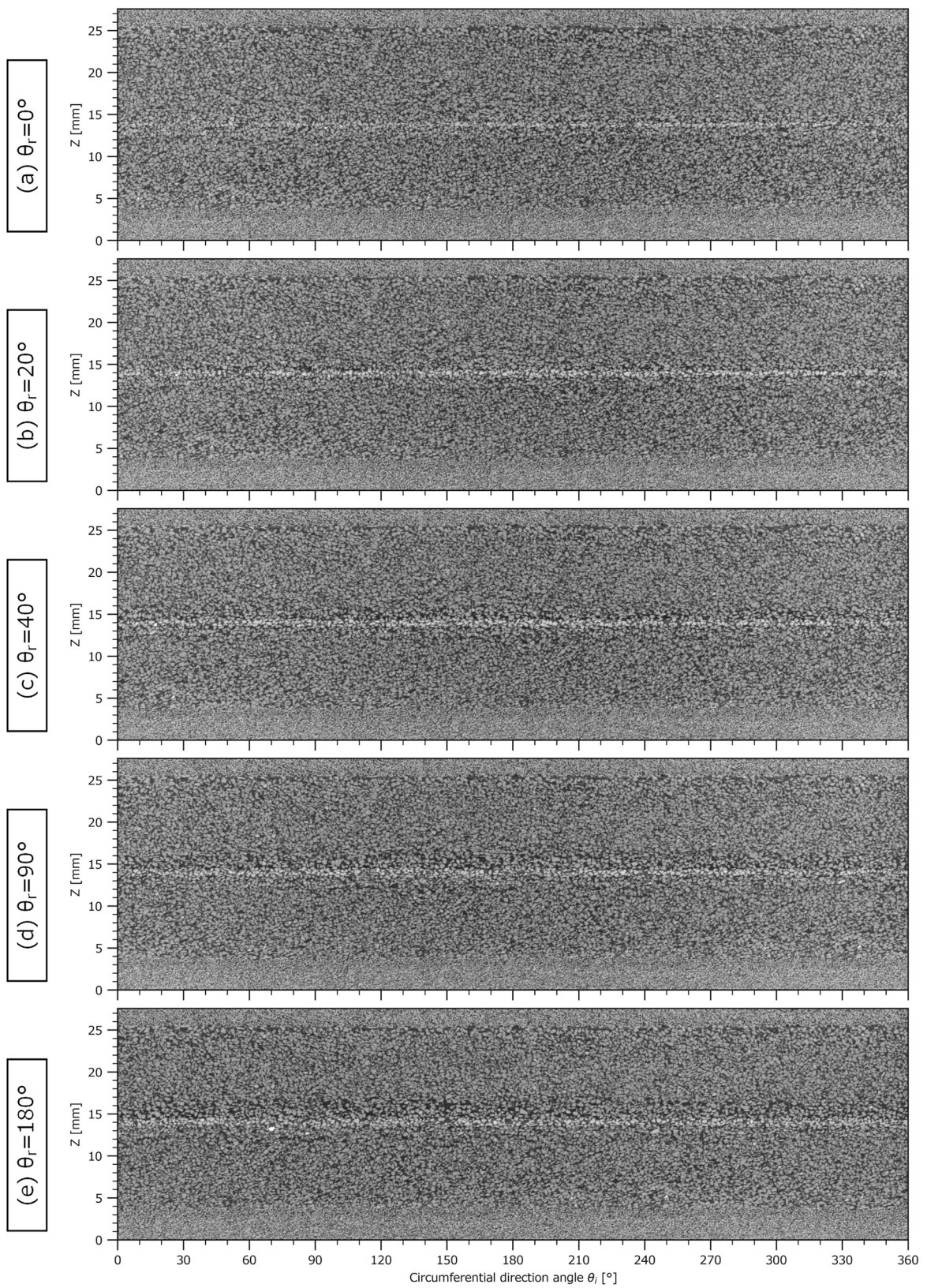


図 7-6 円周方向断面の CT 画像 (Case1)
(使用材料: IW5, 供試体作成方法: 自由落下法)

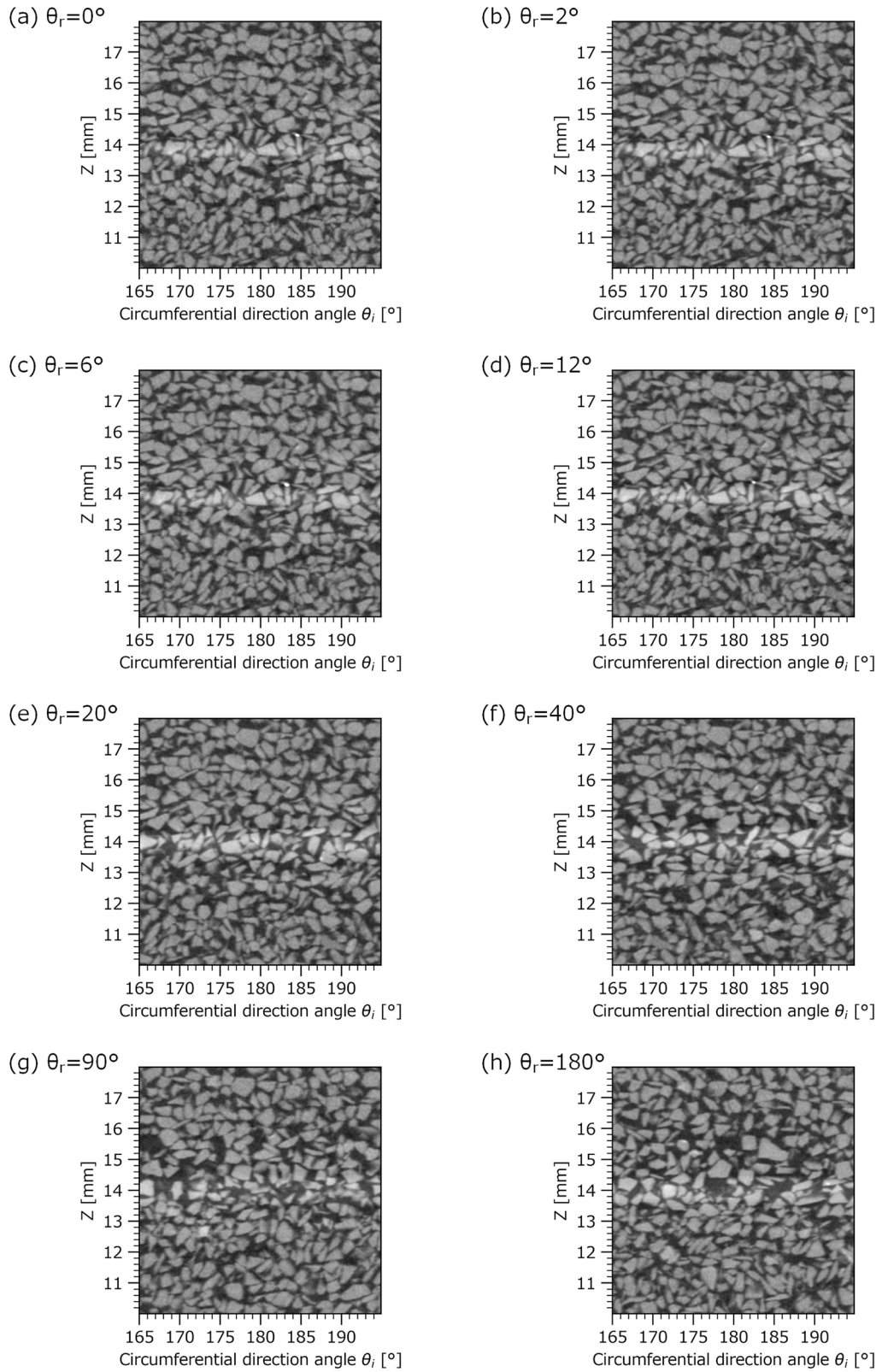


図 7-7 CT 画像の拡大図 (Case1)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法)

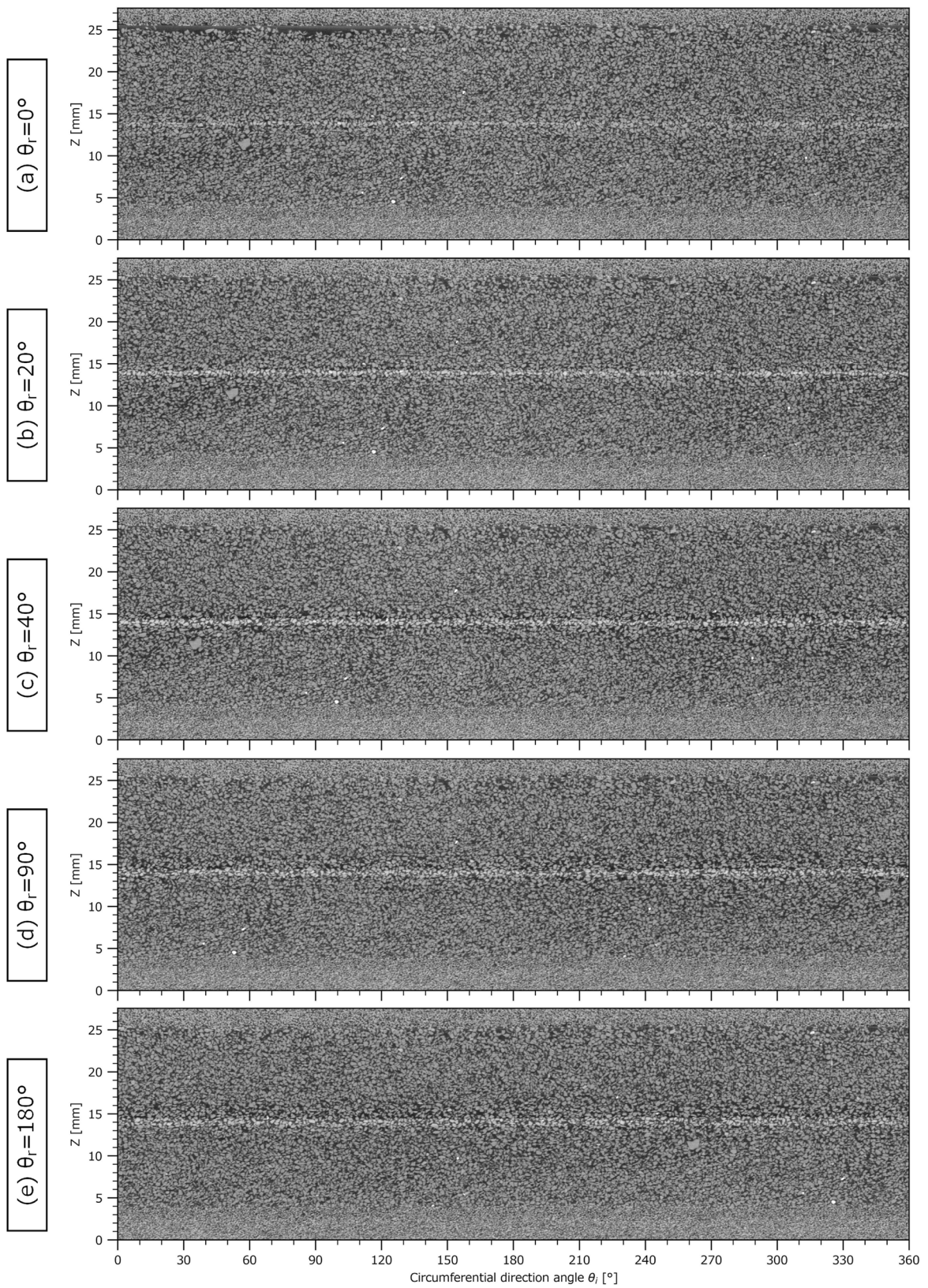


図 7-8 CT画像 (Case2)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法の後, 攪拌)

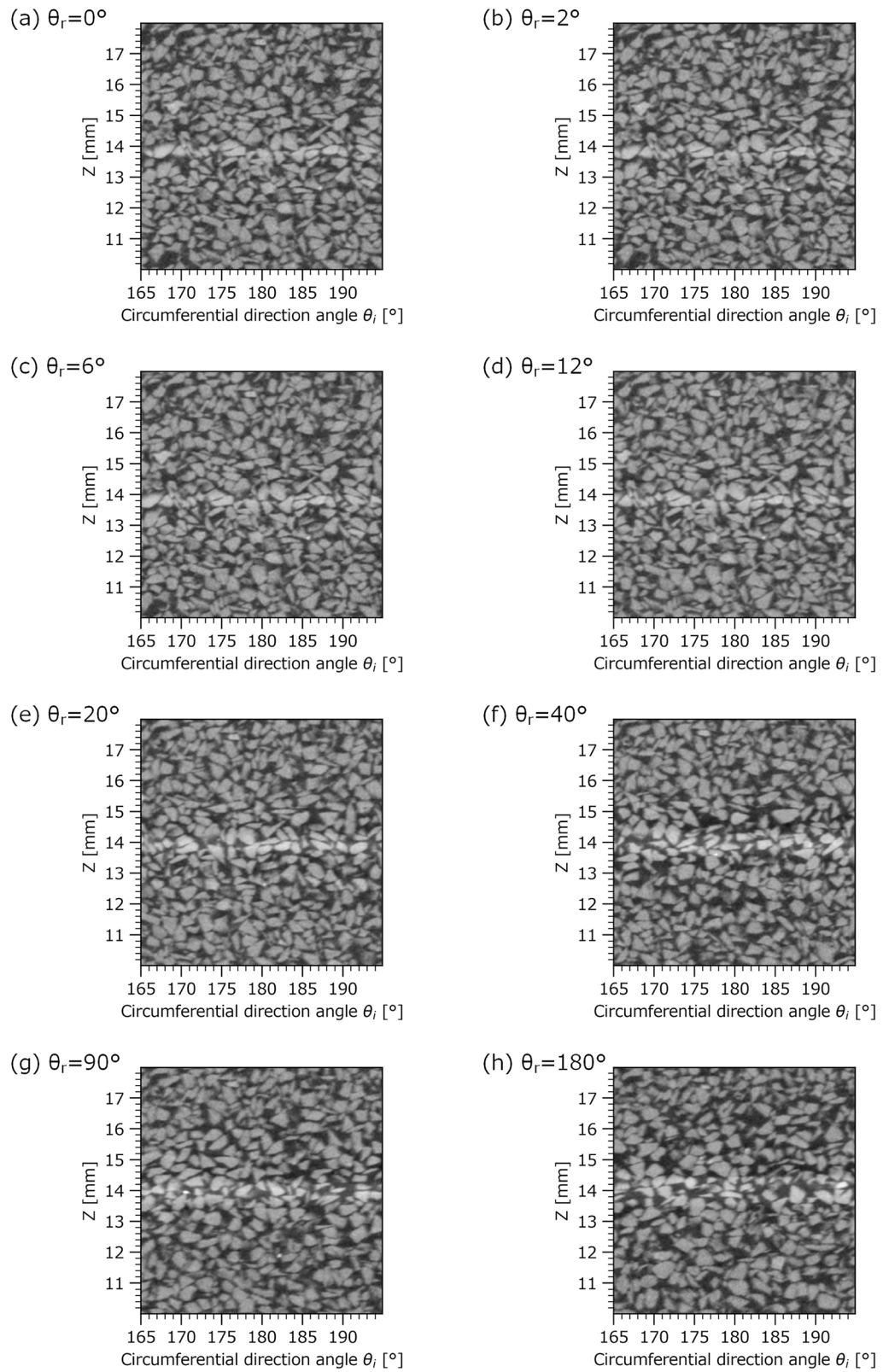


図 7-9 CT 画像の拡大図 (Case2)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法の後，攪拌)

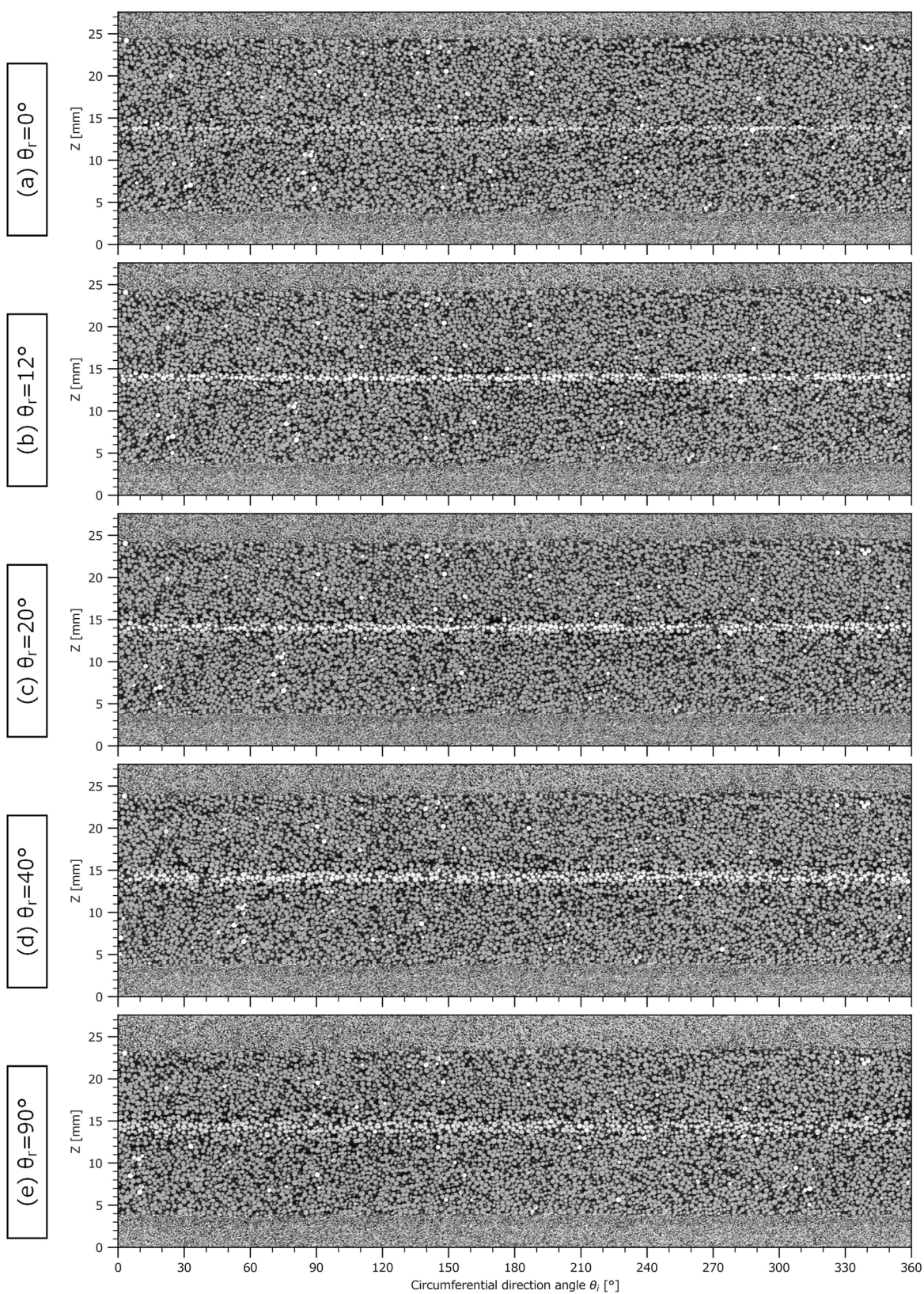


図 7-10 CT 画像 (Case3)

(使用材料: GB, 供試体作成方法: 自由落下法)

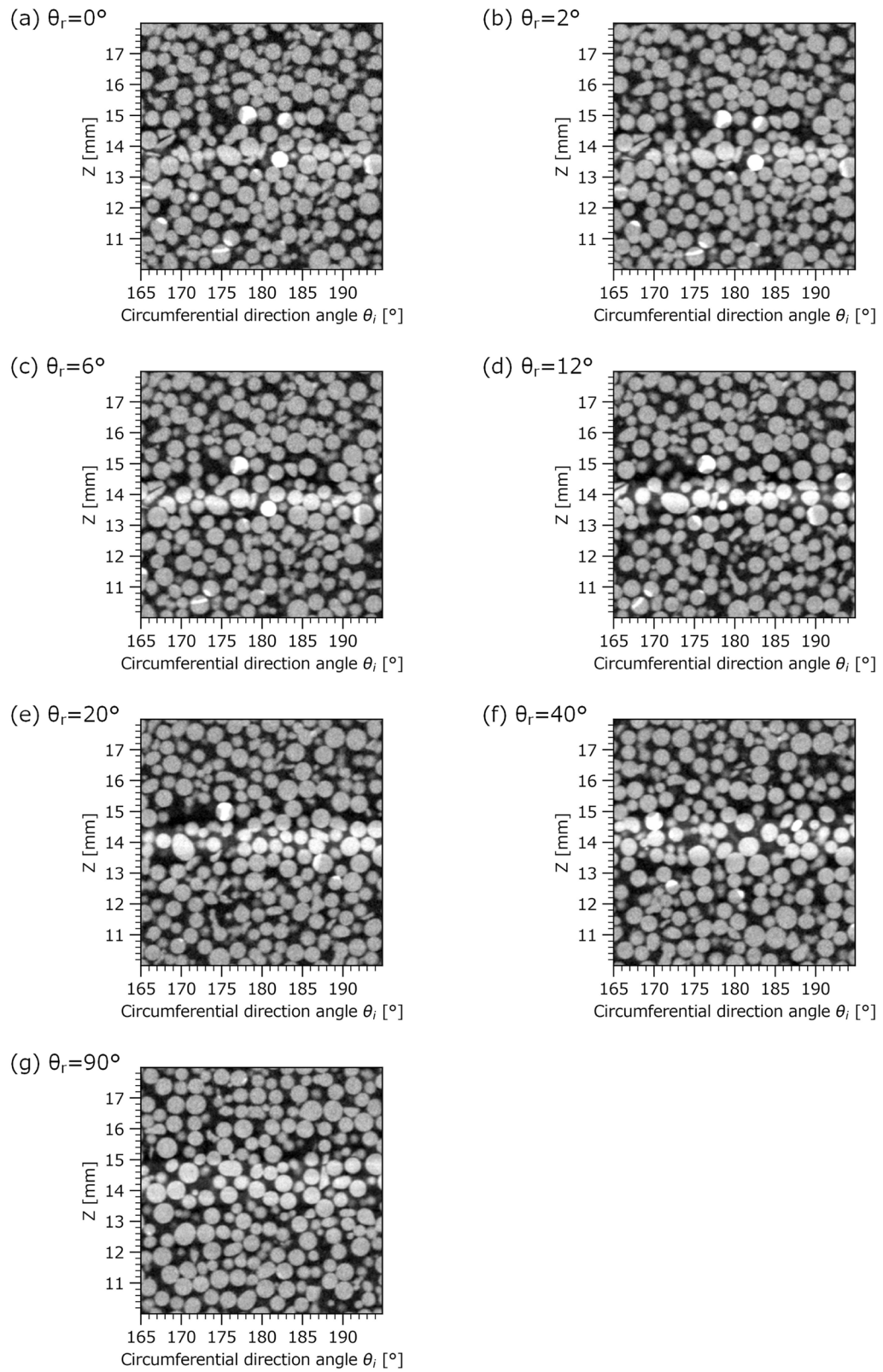


図 7-11 CT 画像の拡大図 (Case3)

(使用材料：GB, 供試体作成方法：自由落下法)

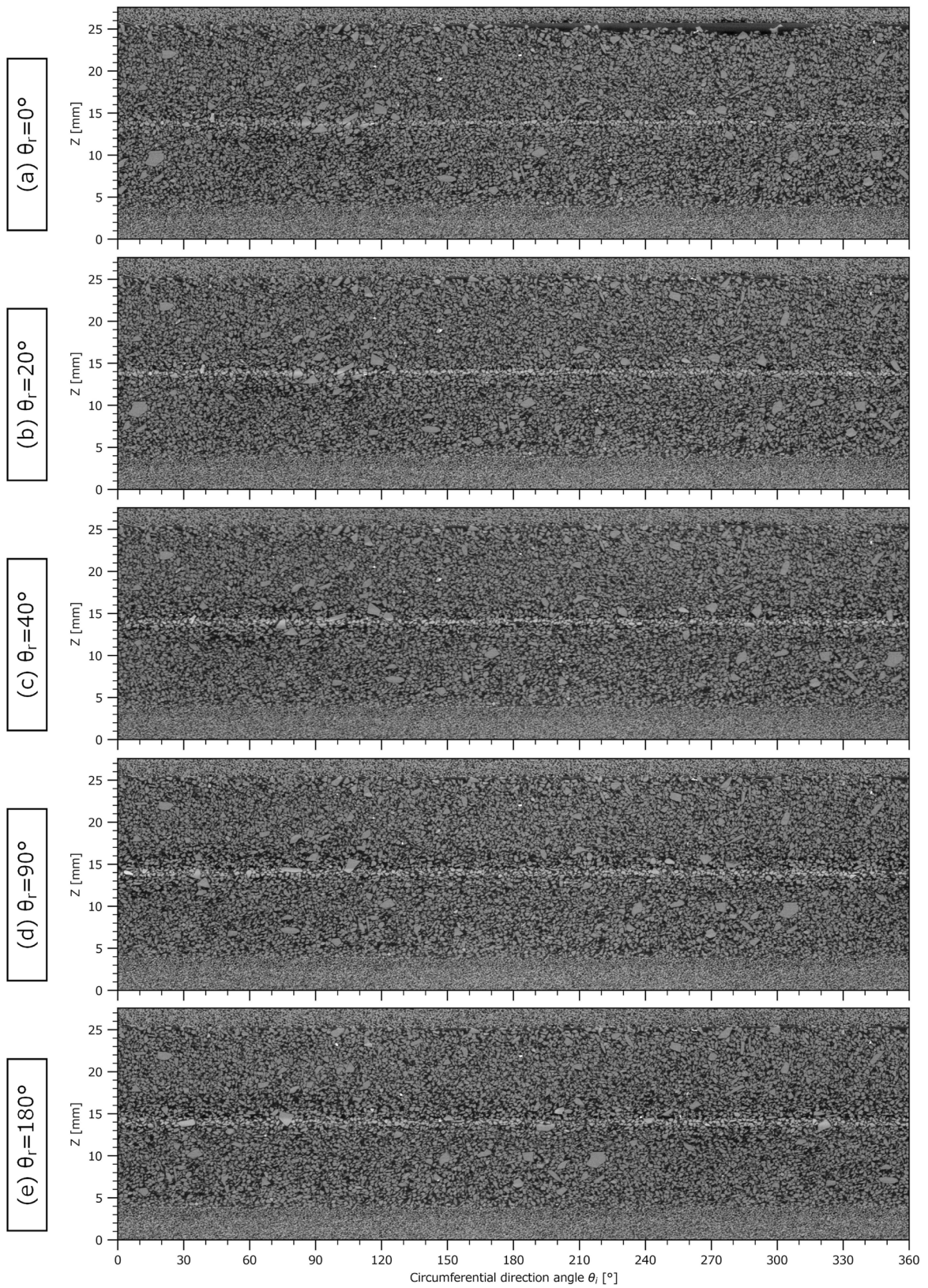


図 7-12 CT 画像 (Case4)

(使用材料 : IW5 が 90%, IW3 が 10%, 供試体作成方法 : 自由落下法の後, 攪拌)

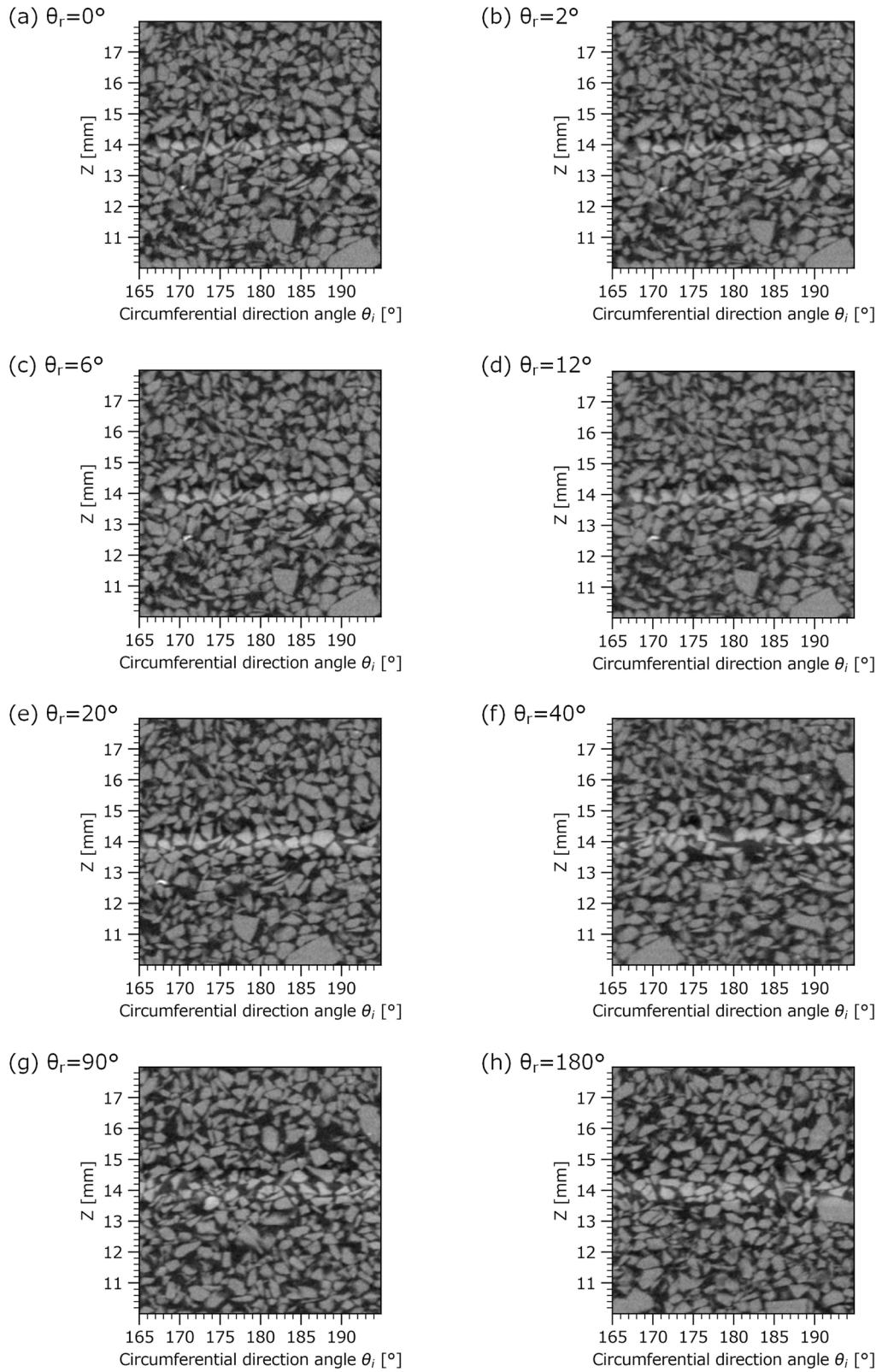


図 7-13 CT 画像の拡大図 (Case4)

(使用材料：IW5 が 90%, IW3 が 10%, 供試体作成方法：自由落下法の後、攪拌)

7.5.3 画像変位計測

図 7-6～図 7-13 に示した円周方向の 2 次元断面図を対象に、画像変位計測を行った結果を図 7-14～図 7-17 に示す。関心領域における画素の変位方向はベクトル図として、画素の変位量は分布図として示した。また、せん断面の位置を白色破線で示している。

砂を用いた実験 (Case1, 2, 4) では回転角度が 20° に到達するまでは、ガラスビーズを用いた実験 (Case3) では回転角度が 12° までは、鉛直上方への変位と鉛直下方への変位ベクトルが部分的に混在している。これは、供試体を作成した時の容器上部の隙間を埋めるような鉛直上方への変位や、せん断の進行に伴って試料が収縮するような鉛直下方への変位の影響であると考えられる。また、全体的に下部容器だけでなく上部容器においても回転方向に平行な変位ベクトル分布が生じており、せん断面付近においても概ね同様に回転方向に平行なベクトル分布が生じている。

せん断が進行すると、砂を用いた実験 (Case1, 2, 4) では回転角度が 20° から 40° にかけて、ガラスビーズを用いた実験 (Case3) では回転角度が 6° から 12° にかけて、せん断面付近において、変位ベクトルの分布に擾乱が生じており、鉛直上方もしくは鉛直下方を向く変位ベクトルが部分的に混在する様子が確認できる。これは、せん断によって、隣接する粒子への乗り上げや落ち込みが局所的に生じた影響であると考えられる。しかし、回転角度が 40° を越えてからは、せん断面付近における変位ベクトルの擾乱は収まっているように見える。つまり、ひずみ軟化を経て残留状態に移行するに従って、隣接する粒子への乗り上げや落ち込みといったような挙動が起きる頻度が少なくなっていると考えられる。

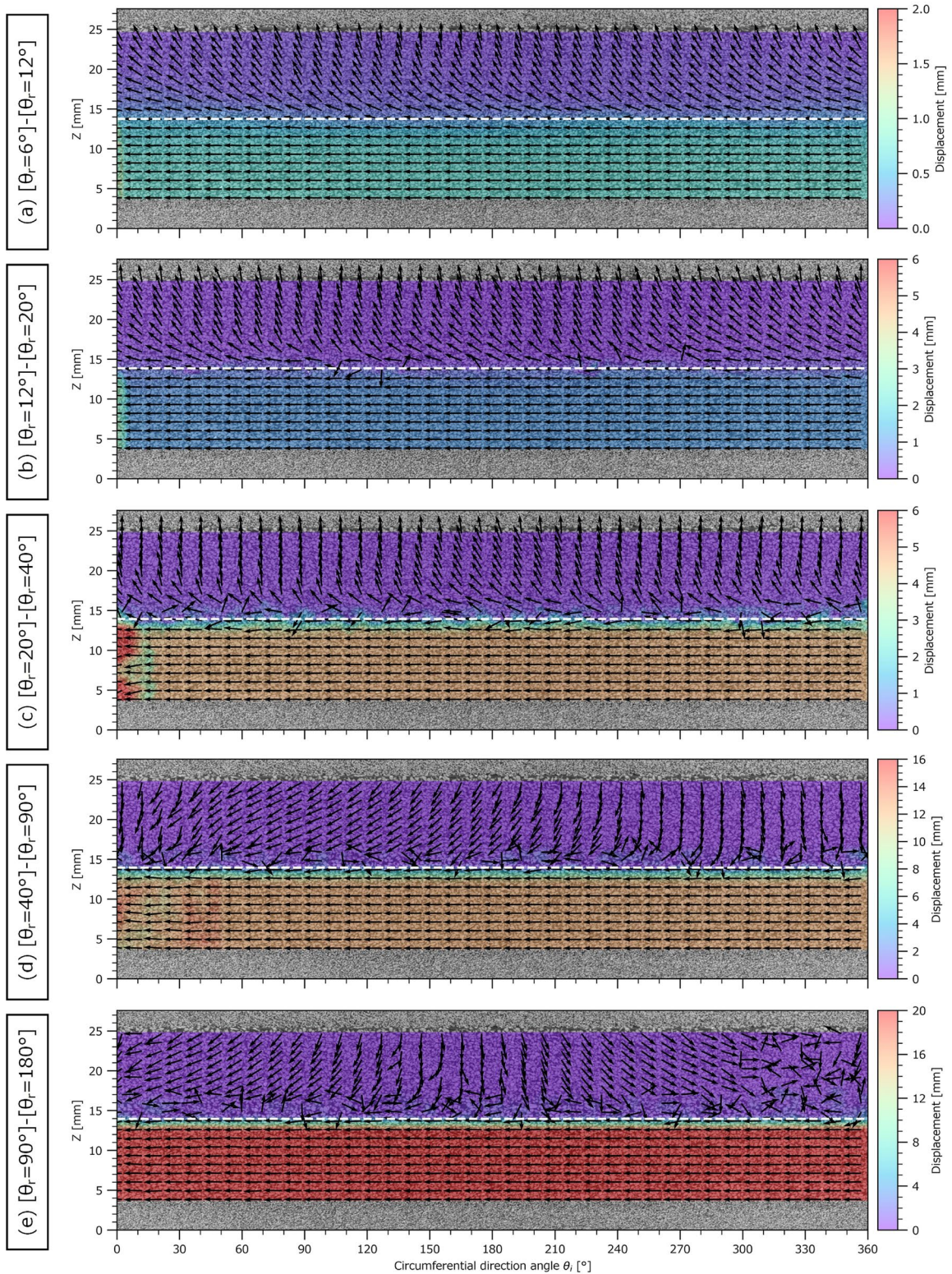


図 7-14 画像変位計測結果 (Case1)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法)

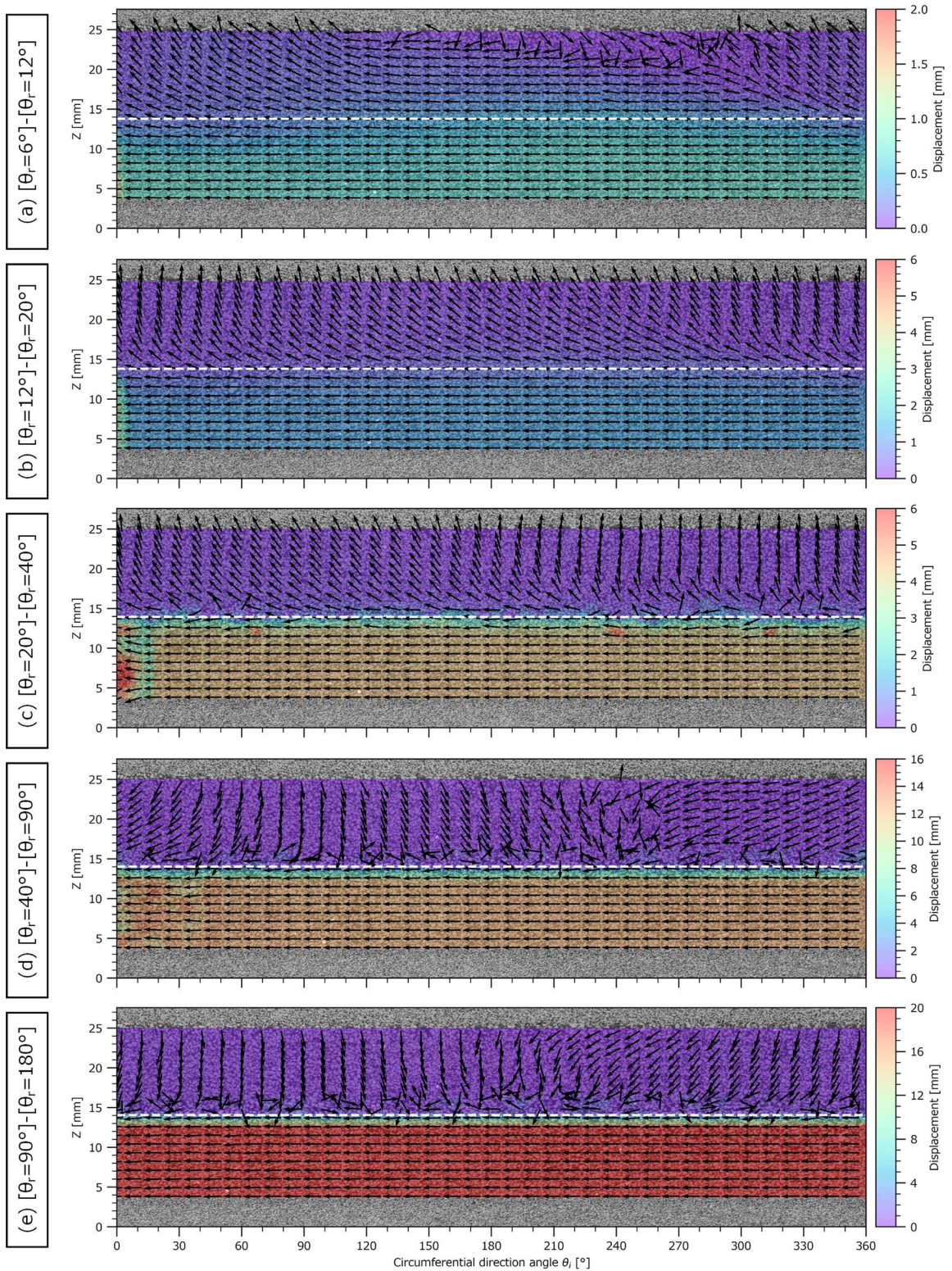


図 7-15 画像変位計測結果 (Case2)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法の後，攪拌)

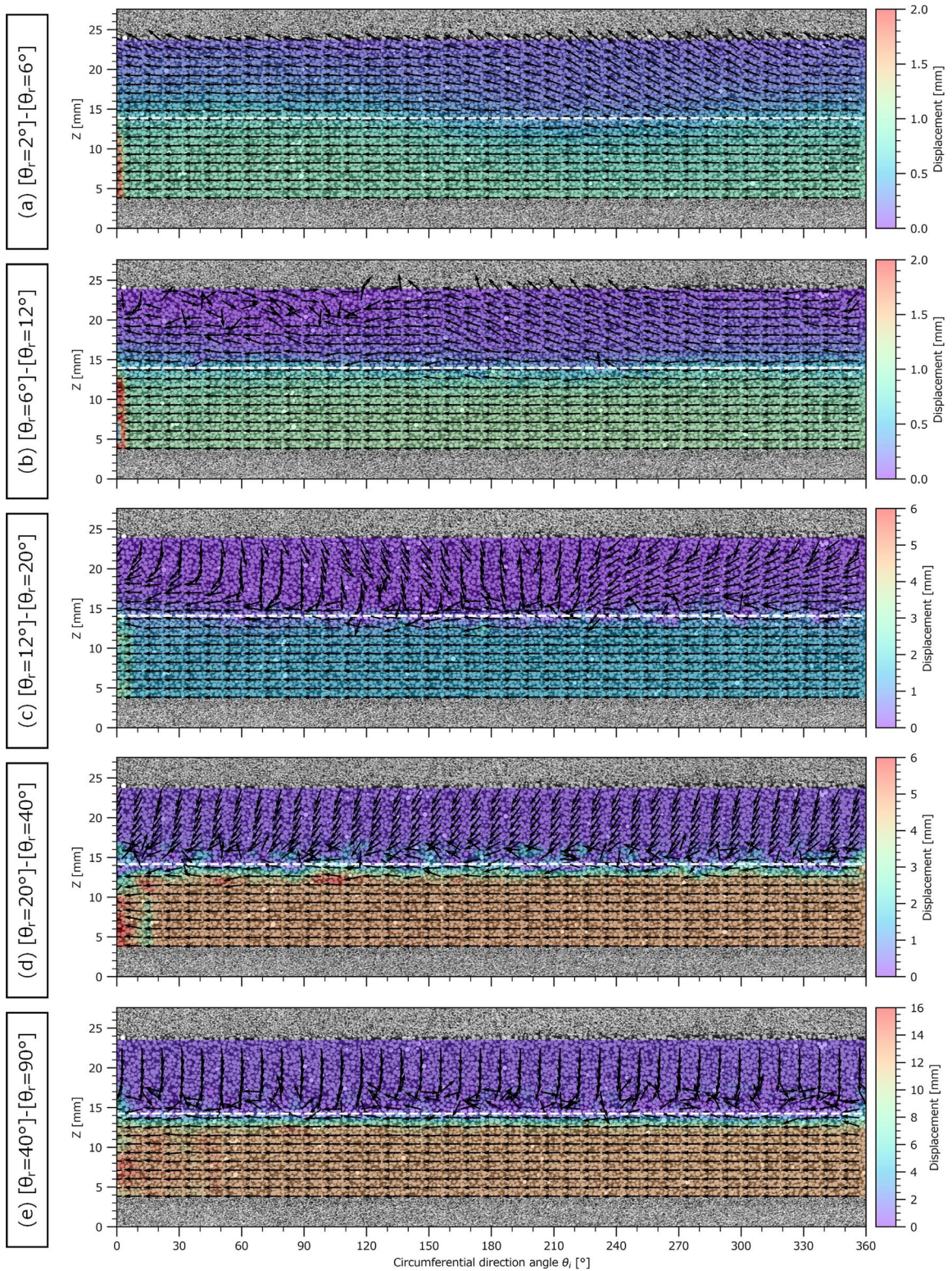


図 7-16 画像変位計測結果 (Case3)

(使用材料：GB, 供試体作成方法：自由落下法)

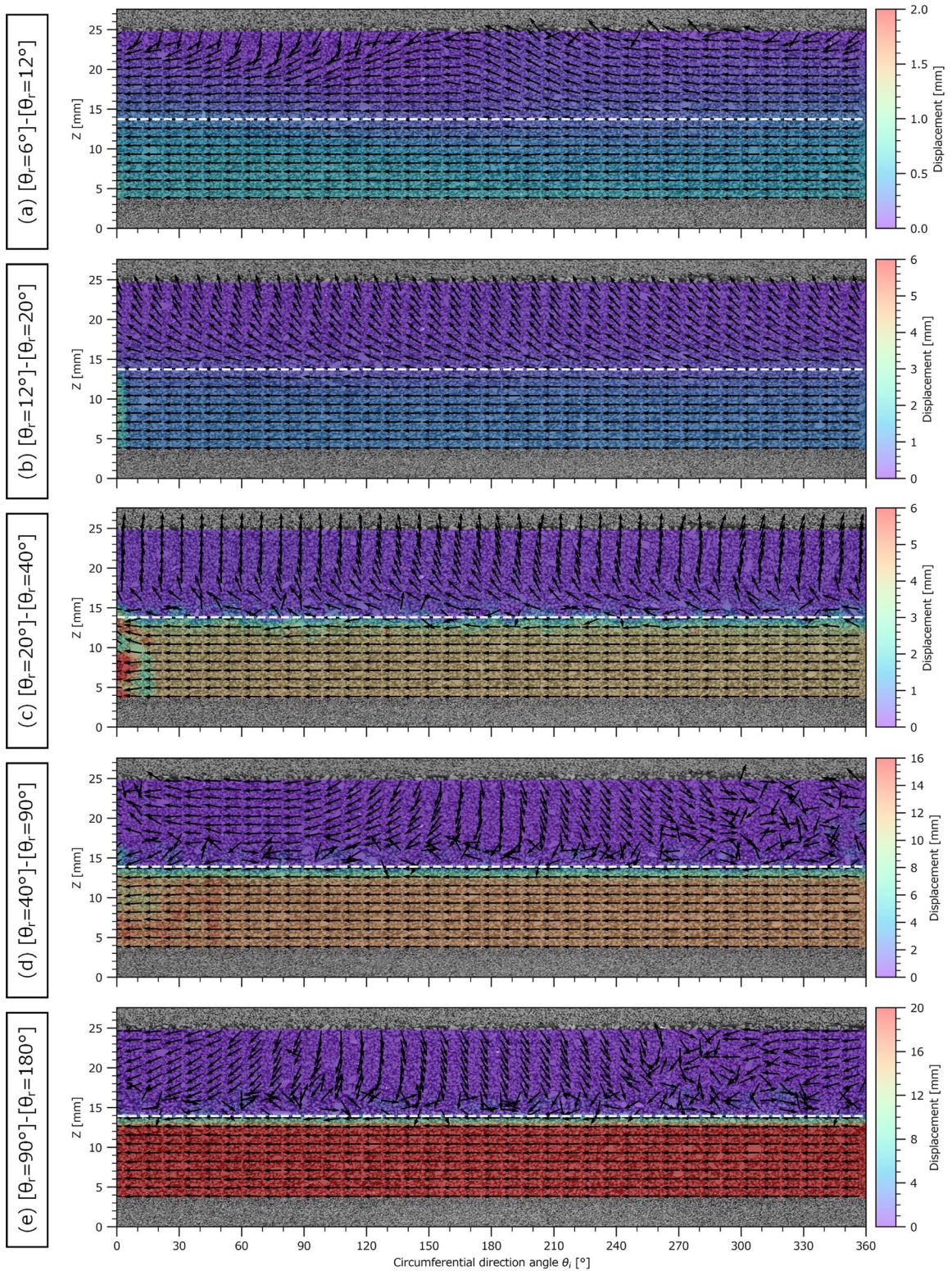


図 7-17 画像変位計測結果 (Case4)

(使用材料：IW5 が 90%, IW3 が 10%, 供試体作成方法：自由落下法の後、攪拌)

図 7-18 は、画像変位計測の結果より、鉛直位置に応じて変位量を平均し、変位量平均値の鉛直分布を整理した結果である。図 7-18(a)~(d)はそれぞれ Case1~4 の結果であり、縦軸は鉛直座標を、横軸は変位量の平均値を表す。なお、変位量の異なる結果を比較し易くするため、式(7.3)に示した式を使い、各画像における変位量の最小値と最大値を使って変位量を正規化している。但し、回転角度が 0° から 2° にかけての結果は、回転量が小さく供試体上部の隙間を埋めるような鉛直方向への変位の影響が大きく、他とは明らかに異なる傾向であったことから、図 7-18 には図示しなかった。

$$\frac{D_{ave} - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} \quad (7.3)$$

ここに、 D_{ave} : 鉛直位置に応じた変位量の平均値、 D_{min} : 変位量の最小値、 D_{max} : 変位量の最大値を表す。

いずれの結果も、せん断面付近に変曲点が表れ、容器上部の変位量が小さく、容器下部の変位量が大きくなっている。これは今回の実験は容器上部が固定され、容器下部が回転することでせん断が行われるためである。回転角度が 12° までは、容器下部だけでなく容器上部にも一定の変位が生じており、漸移的な変化となっている。つまり、せん断が始まってせん断応力がピークを越えるまでは、容器下部の変位に応じて、容器上部でも追随し一定の変位が生じていることを表している。

しかし、回転角度が 20° から 40° にかけては、せん断面付近の遷移帯の幅が狭くなっており、せん断面付近に変位が局所化されている。さらにせん断が進行すると、回転角度が 40° から 90° にかけての変位量鉛直分布と、90° から 180° にかけての変位量鉛直分布は、ほぼ等しくなっている。図 7-18 は正規化された変位量であり、変位の絶対値は異なるものの、回転角度が 40° 以降は相対的な変位量の分布に変化が生じていない。これは、隣接する粒子への乗り上げや落ち込みが起こる頻度が少なくなっているためであると考えられる。

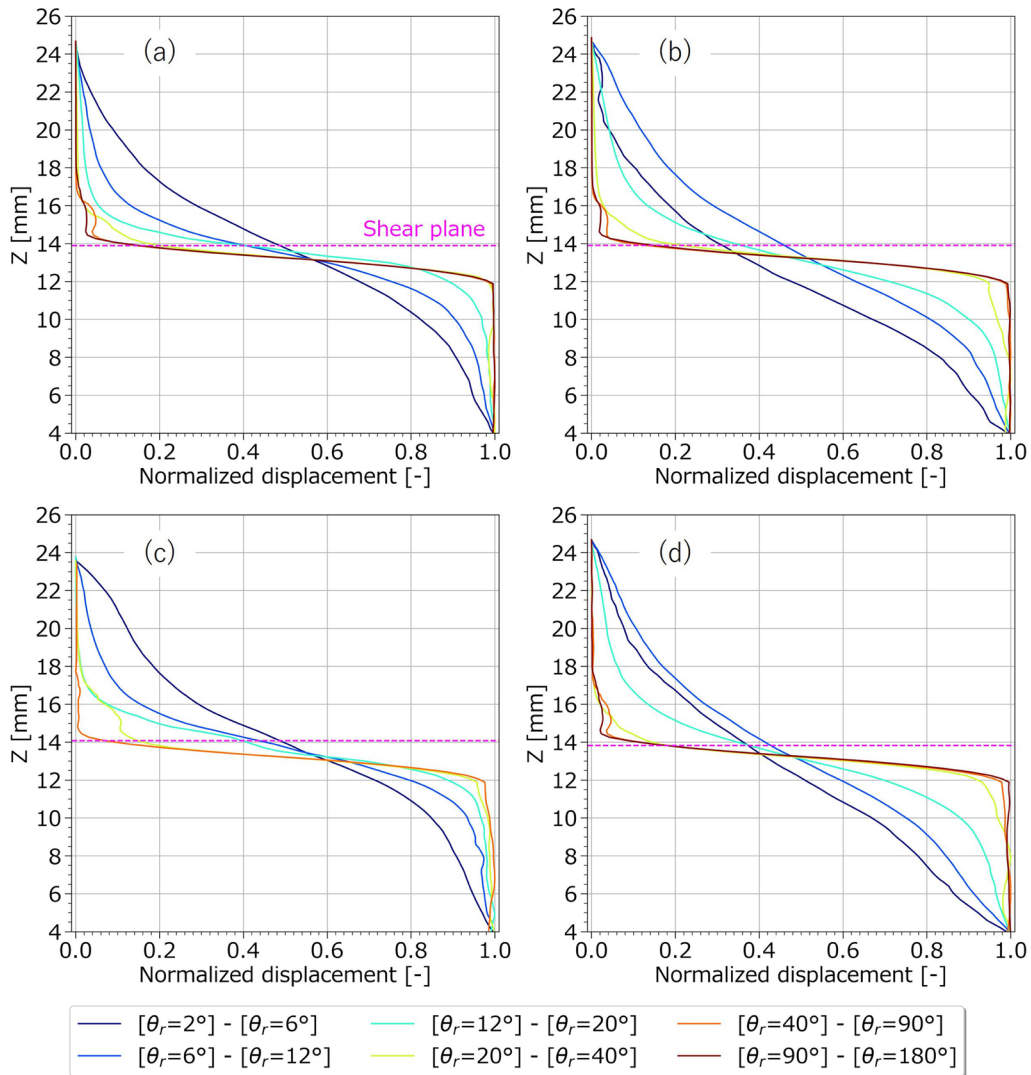


図 7-18 画像変位計測で評価された変位量の鉛直分布

7.5.4 間隙率

画像セグメンテーションを行う際に作成した二値化画像を対象に、各代表体積要素の体積に占める砂もしくはガラスビーズ以外の画素の割合を計算し、間隙率の評価を行った。まず初めに、代表体積要素の大きさを決定するため、Case1における初期状態の二値化画像に対し、異なる大きさの代表体積要素を定義し、間隙率の計算を行った。図 7-19 は、代表体積要素の大きさを 0.5~4.5mm の範囲で 0.5mm 毎に等方性の構造格子を作成して間隙率を計算した結果であり、砂が充填された範囲における間隙率のヒストグラムを表す。

代表体積要素の大きさが 0.5mm の場合、間隙率のヒストグラムは裾野が広く、なだらかな形状を示す。代表体積要素が 1.5mm より大きくなると、ヒストグラムの裾野部分の形状がほぼ等しいままに、間隙率が約 0.45 の辺りににおいて有意なピークが表れる。しかし、代表体積要素が 3.0mm より大きくなると、間隙率が約 0.60 の辺りにもピークが表れ、二峰性のヒスト

グラムとなる。これは、円筒形の供試体に対し構造格子を定義して間隙率を計算したことによって、バックグラウンド（空気）と供試体が混在する領域がヒストグラムに影響したためである。

以上のことから、代表体積要素の大きさとしては 1.5~3.0mm とすることが適切であると考えられるが、データの分解能も考慮し、代表体積要素の大きさは 1.5mm とする。

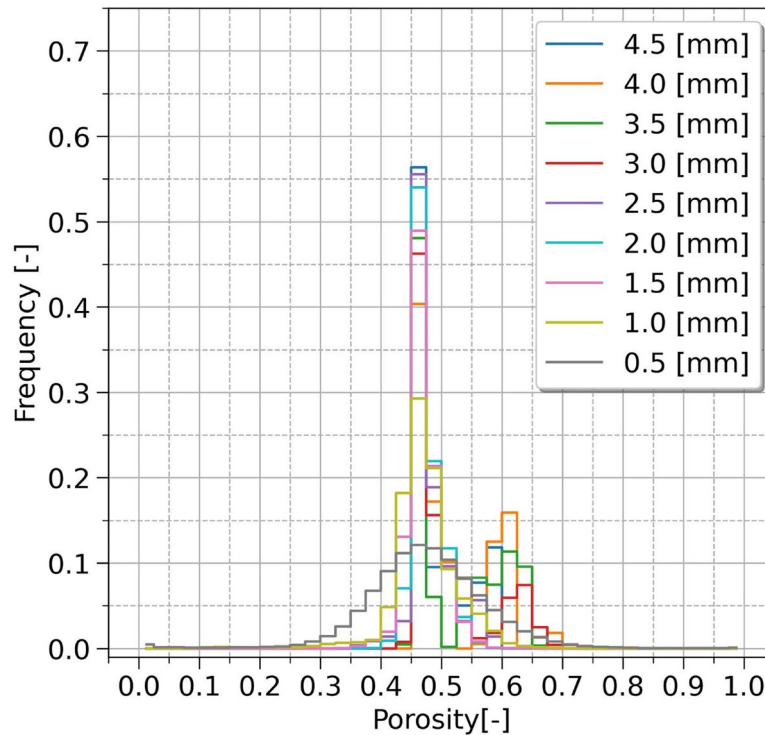


図 7-19 大きさが異なる代表体積要素における間隙率のヒストグラム

代表体積要素の大きさを 1.5mm とし、砂が充填された範囲の間隙率を計算した結果を図 7-20~図 7-23 に示す。いずれも、3次元の構造格子を定義して間隙率の3次元分布を計算しているが、CT 画像の場合と同様に、供試体中央部（容器中心から半径 15mm の位置）における間隙率を補間によって求め、円周方向の断面図として図示した。また、せん断面の位置を白色破線で示している。

ガラスビーズを用いた実験（Case3）では、砂を用いた実験（Case1, 2, 4）よりも全体的に間隙率が低い。これは砂よりもガラスビーズの真密度が小さいが、同じ乾燥密度となるように供試体を作成した影響である。いずれの結果も、せん断開始前は、容器上部を除き、間隙率が供試体全体で比較的均一である。回転角度が 20° に達すると、せん断面付近において局所的に間隙率が高くなる領域が表れる。しかし、この時点では円周方向、つまりせん断の方向に、高間隙率の範囲が必ずしも連続していない。一方、回転角度が 90° を越えると、高間隙率の範囲が更に広がり、円周方向への連続性が高まっているように見える。

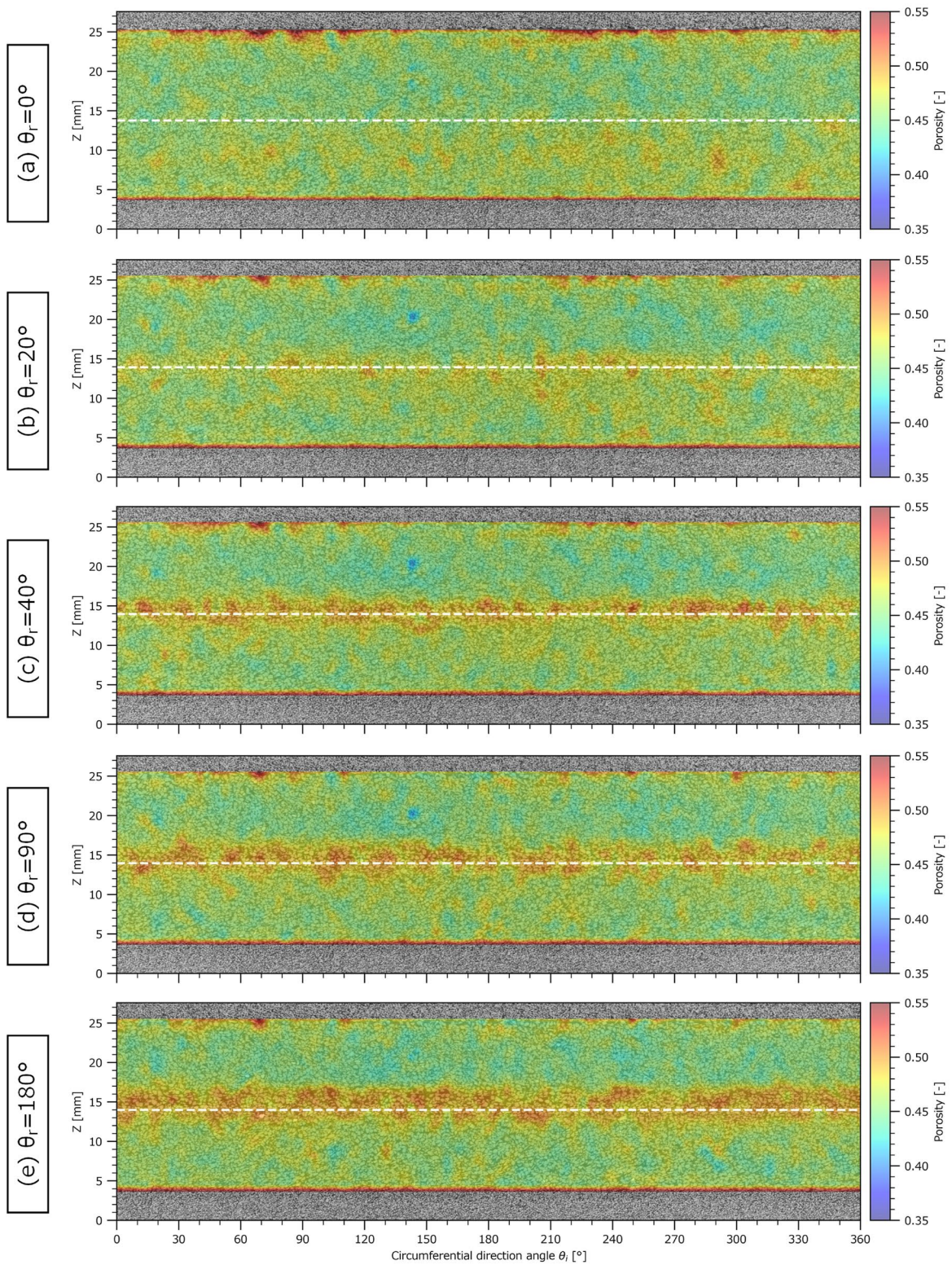


図 7-20 間隙率分布画像 (Case1)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法)

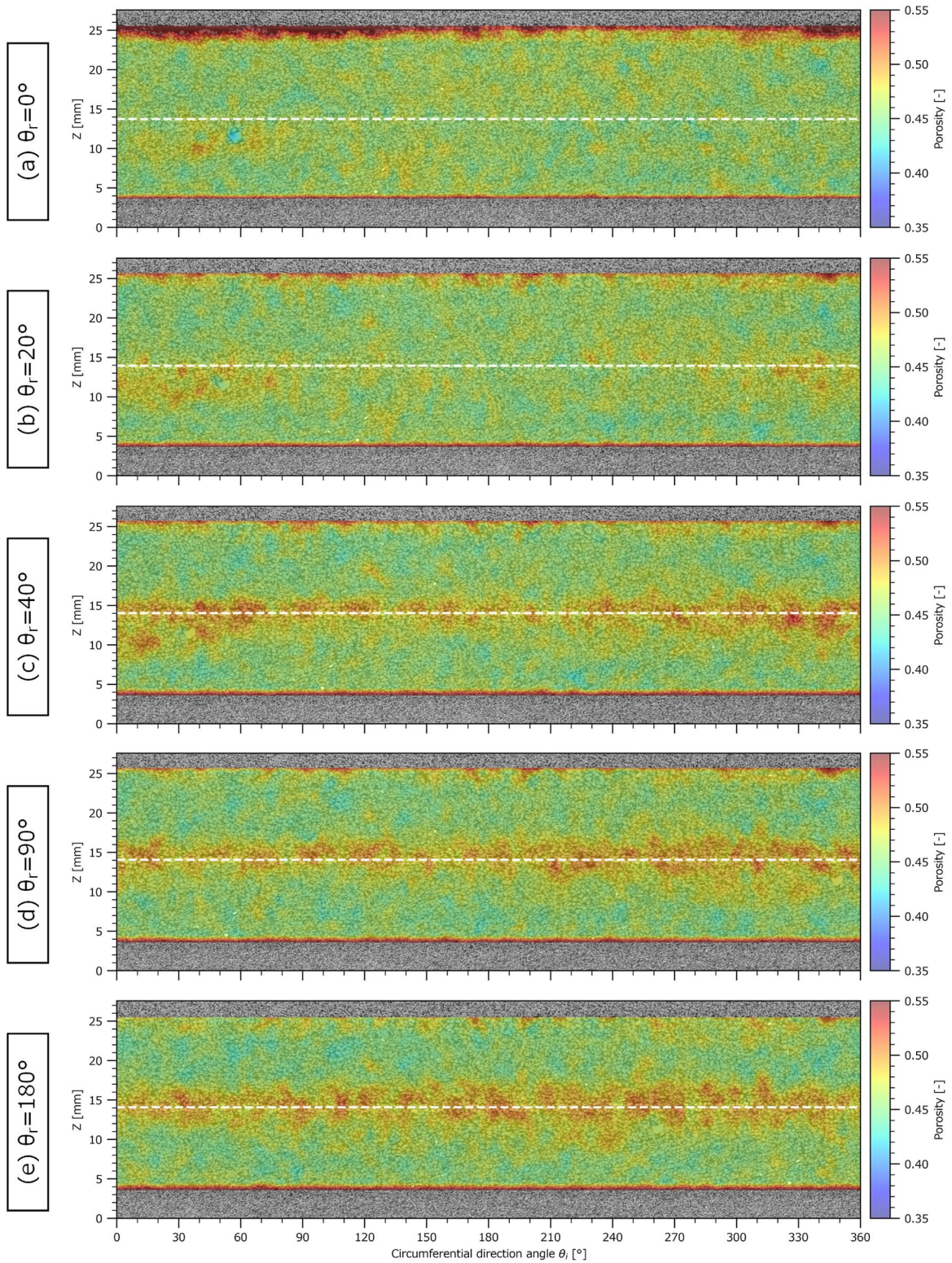


図 7-21 間隙率分布画像 (Case2)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法の後，攪拌)

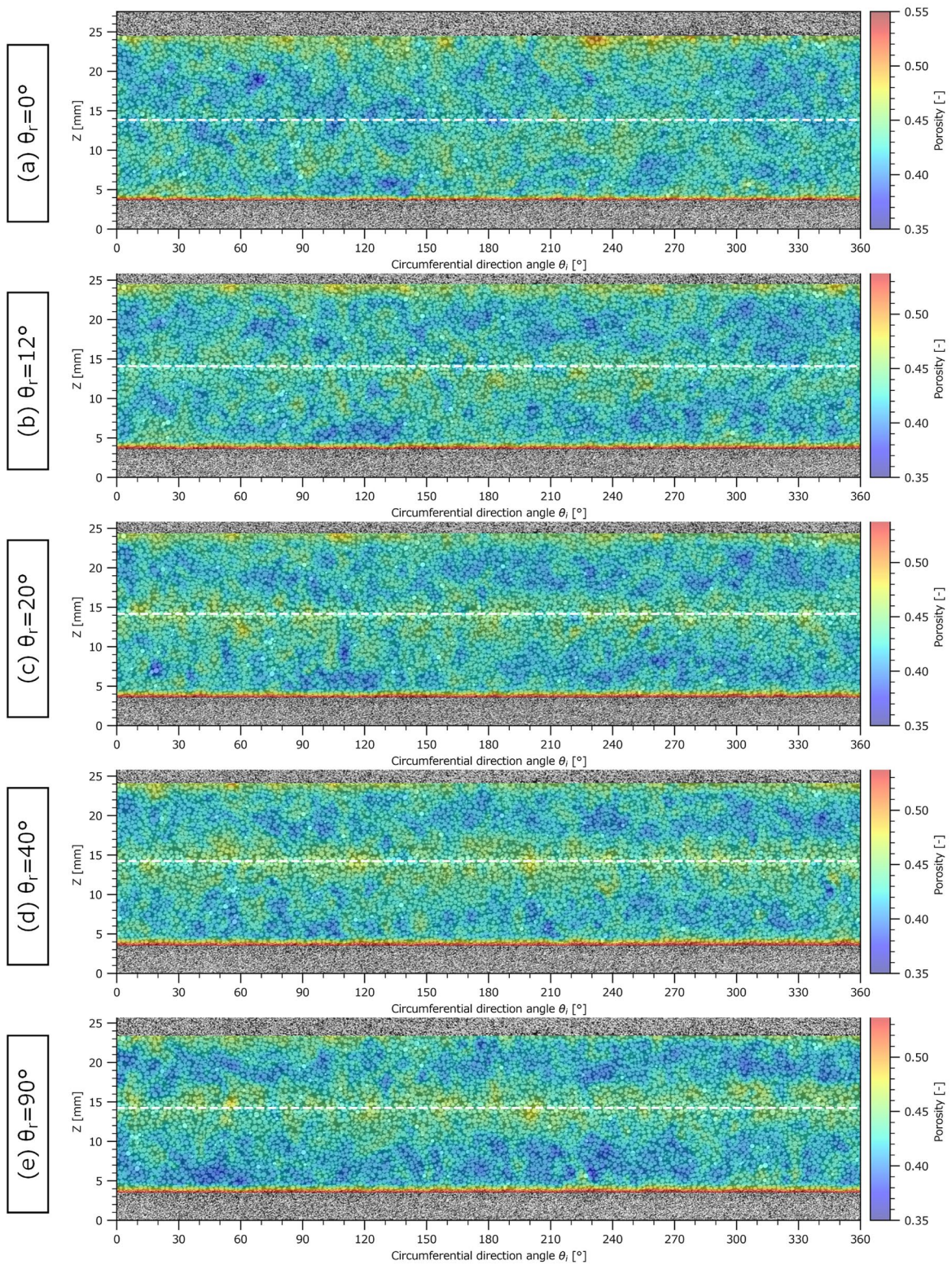


図 7-22 間隙率分布画像 (Case3)

(使用材料：GB, 供試体作成方法：自由落下法)

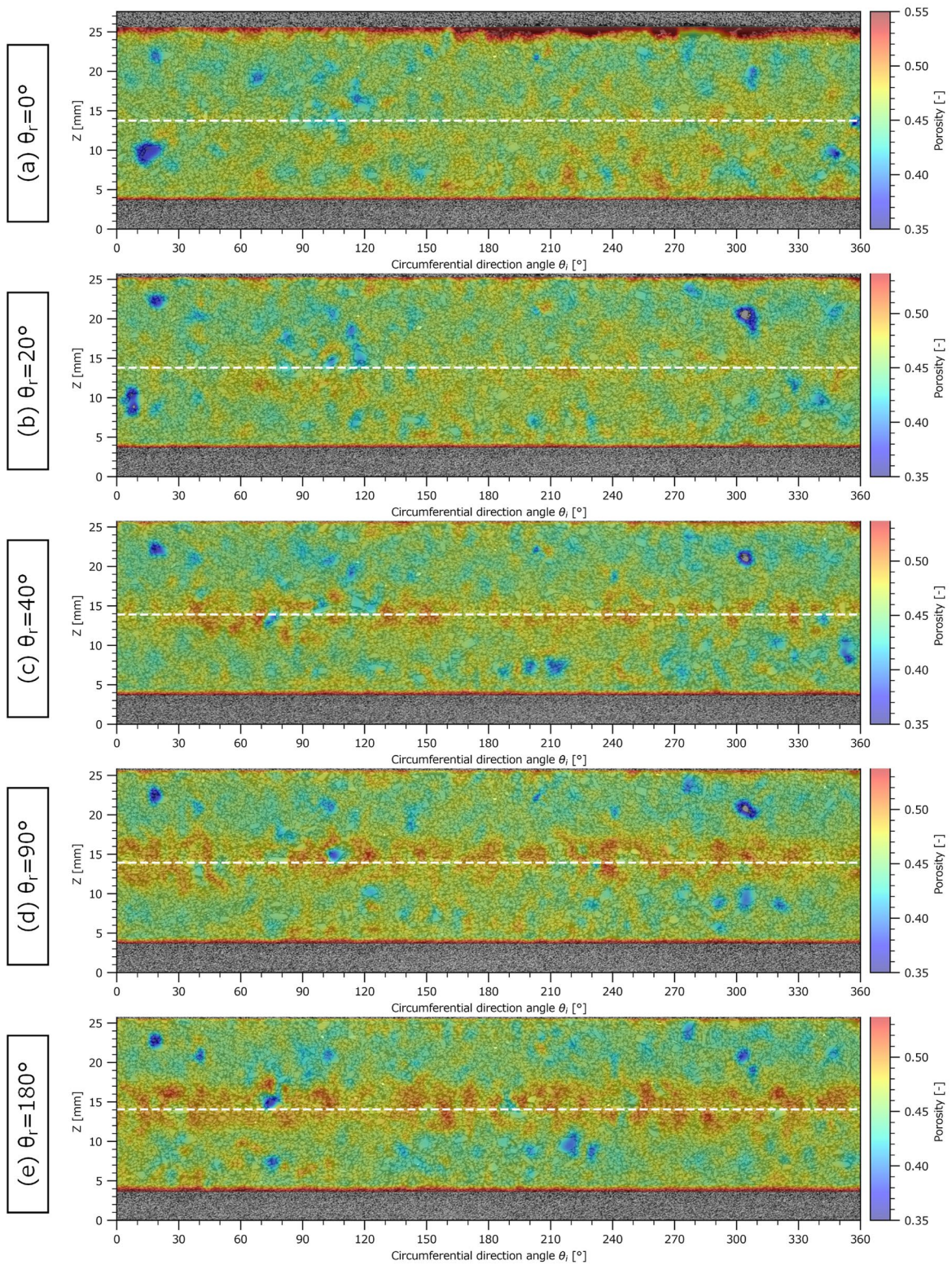


図 7-23 間隙率分布画像 (Case4)

(使用材料：IW5 が 90%, IW3 が 10%, 供試体作成方法：自由落下法の後、攪拌)

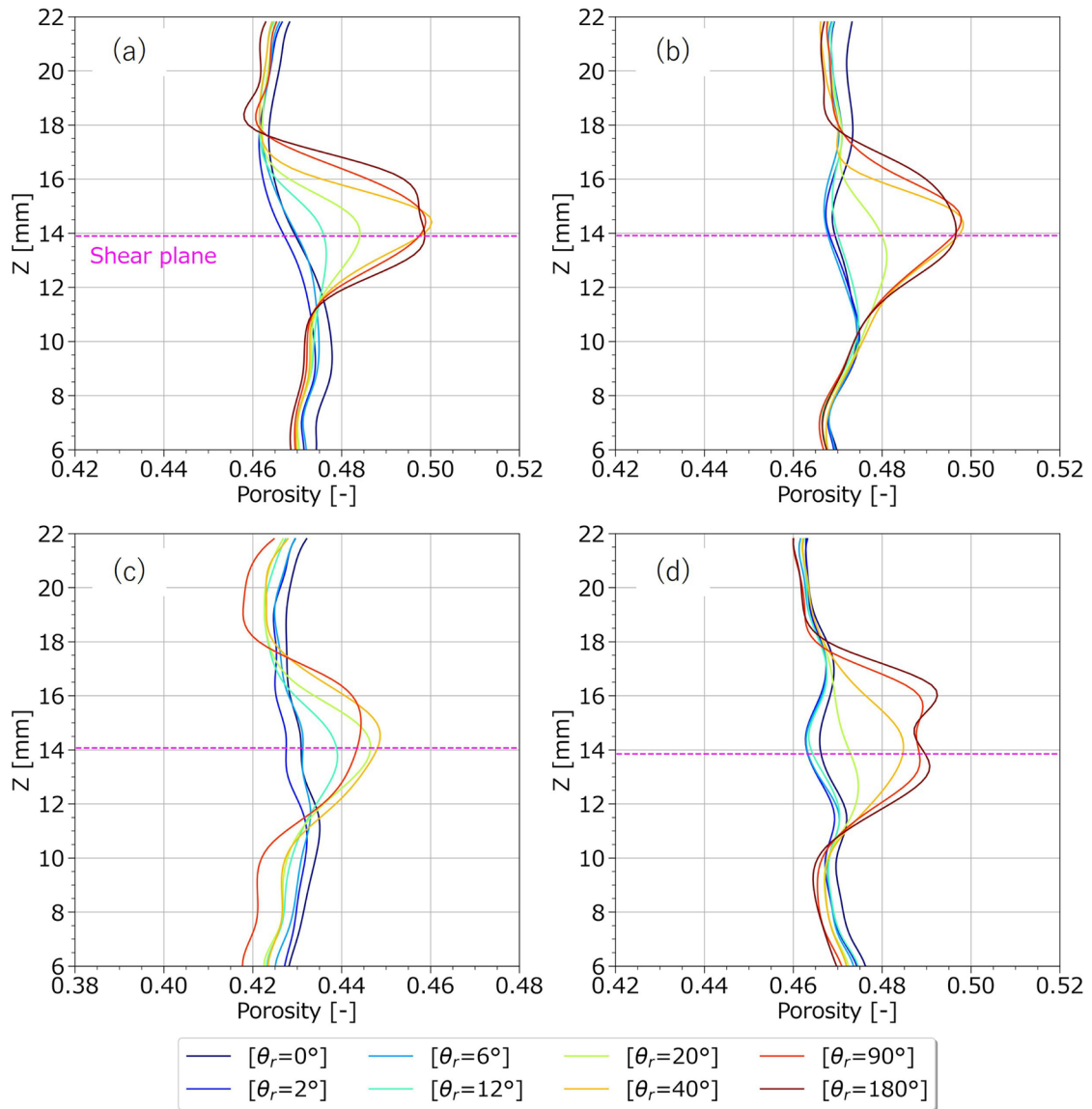


図 7-24 間隙率平均値の鉛直分布

代表体積要素の鉛直位置に応じ、鉛直方向に間隙率の平均値を計算した結果を図 7-24 に示す。図 7-24 (a)~(d)はそれぞれ Case1~4 の結果であり、縦軸が鉛直座標を、横軸が間隙率の平均値を表す。

いずれの実験条件も、せん断が始まった直後は、全体的に僅かに間隙率が減少する。これは、せん断初期において生じた試料収縮の影響である。更にせん断が進行し、回転角度が 6° を超えると、せん断面付近の間隙率が増加に転じる。特に、砂を用いた実験 (Case1, 2, 4) では、回転角度が 20° から 40° にかけて急激に増加している (図 7-24(a), (b), (d))。回転角度が 40° 以降は、せん断面付近における間隙率の最大値はほぼ変わっていないが、せん断面より少し上では、間隙率が高くなる範囲が鉛直上方に向かって徐々に広がっているように見える。

一方、ガラスビーズを用いた実験 (Case3) は、砂の結果と比較すると、間隙率の変化は漸移的であり、間隙率の増加量もガラスビーズの方が小さかった (図 7-24(c)).

次に、図 7-25 に示すように、せん断容器において砂が充填された範囲を、1層辺りの厚さを 2.5mm とし、鉛直方向に 8層 (G1~G8) に区分し、各範囲において間隙率の統計解析を行う。図 7-26~図 7-29 は、間隙率の統計解析結果を箱ひげ図として整理した結果であり、左側が下部容器 (G1~G4) を、右側が上部容器 (G5~G8) を表す。

いずれの結果も、せん断面に最も近い G4 や G5 において、せん断の進行に伴う変化が確認され、せん断面から離れた G2~G3 及び G6~G7 においてはほとんど変化がない、もしくは変化が緩やかであることが確認された。せん断面から最も離れた G1 や G8 においても変化があったが、これは試料を充填した際に生じた砂と加圧盤の間に生じた隙間等の影響によるものと考えられる。

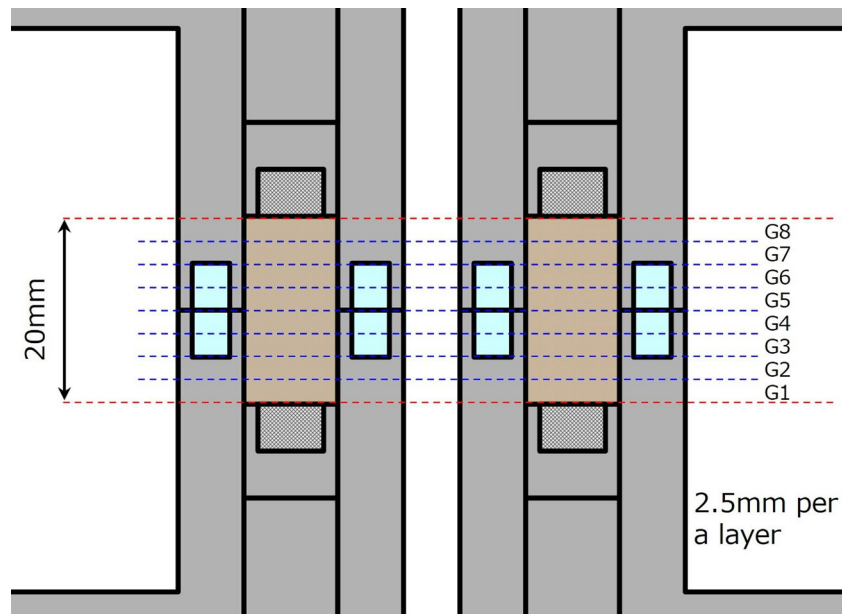


図 7-25 画像解析結果の整理範囲位置図

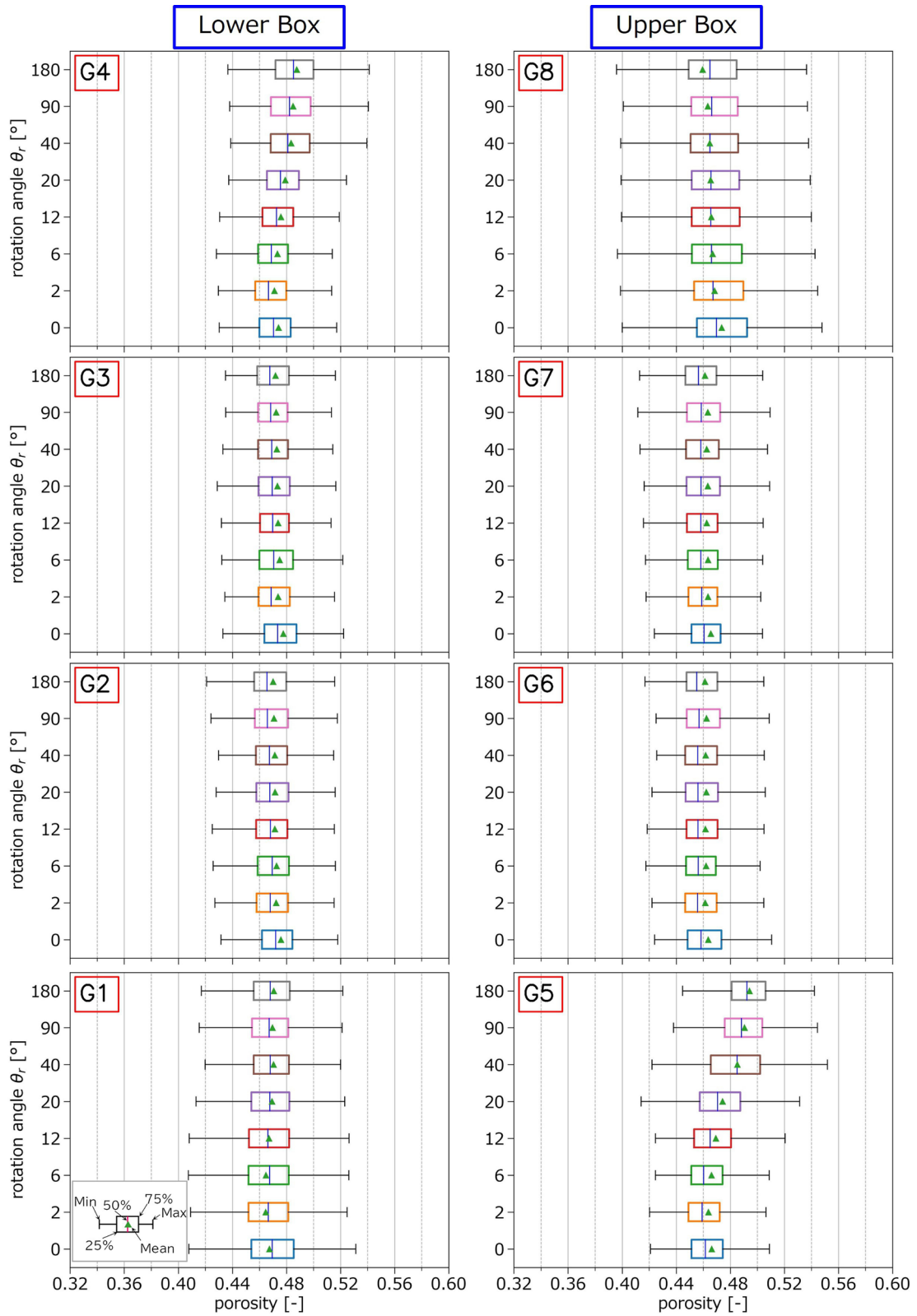


図 7-26 間隙率の統計解析結果 (Case1)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法)

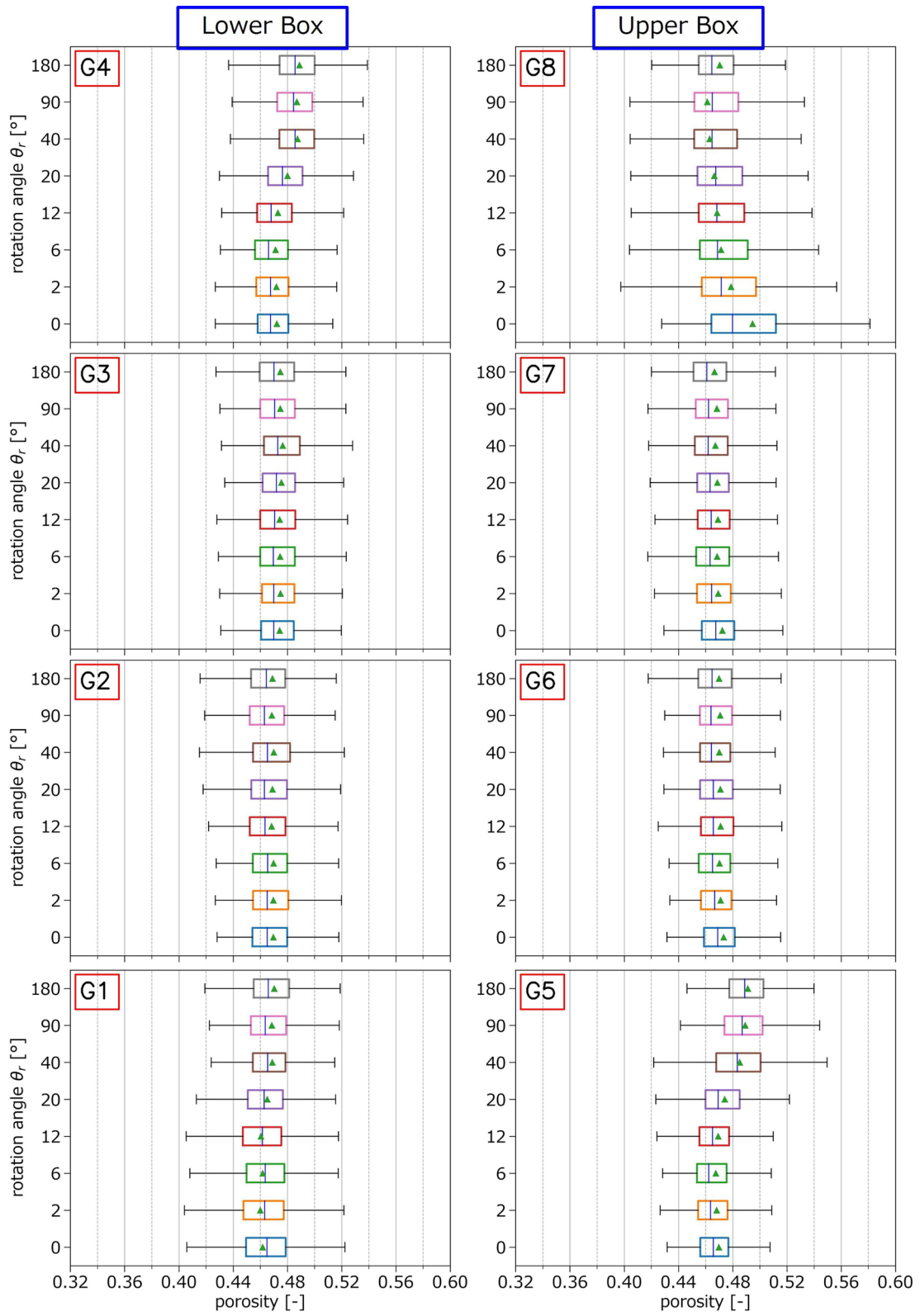


図 7-27 間隙率の統計解析結果 (Case2)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法の後, 攪拌)

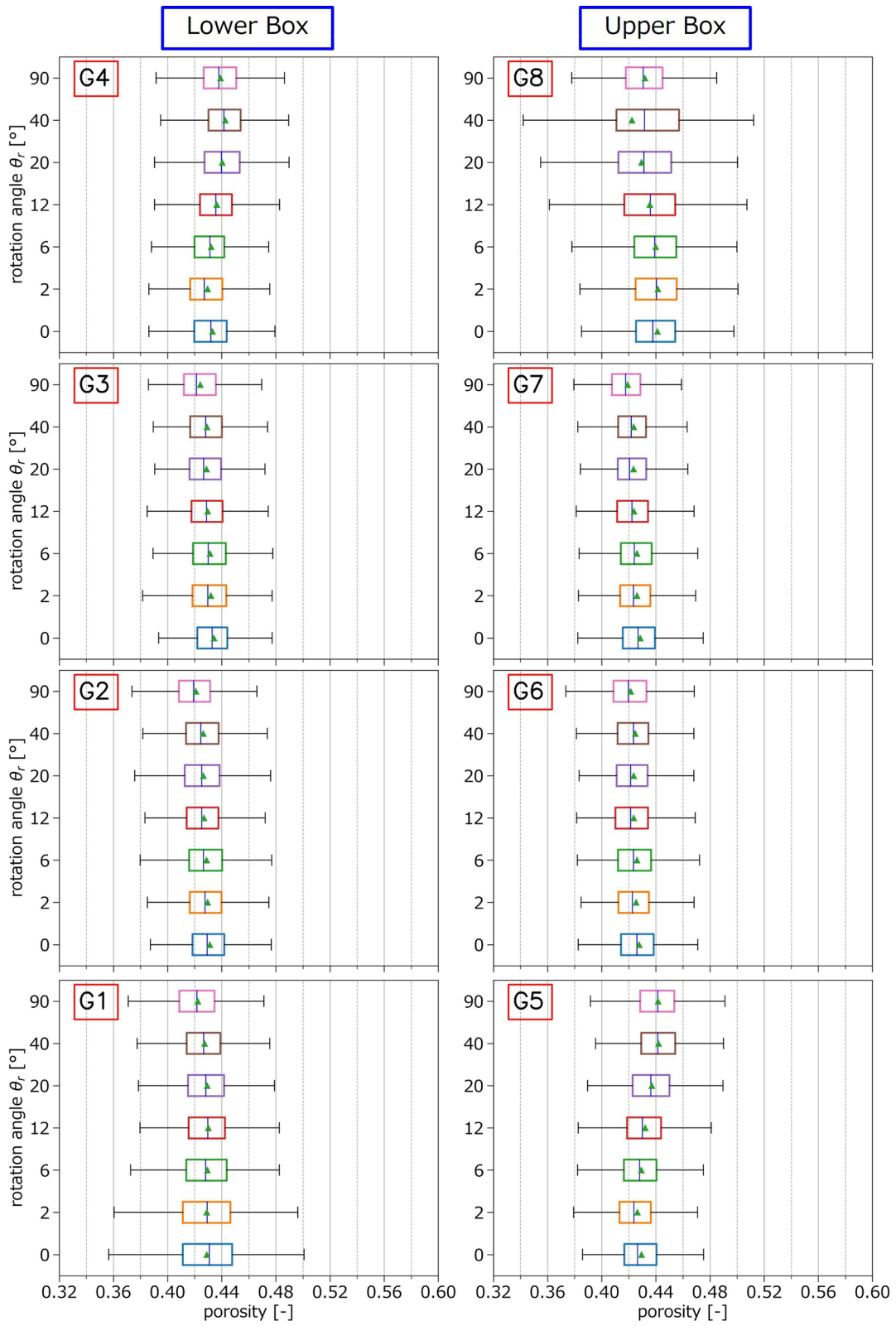


図 7-28 間隙率の統計解析結果 (Case3)
(使用材料: GB, 供試体作成方法: 自由落下法)

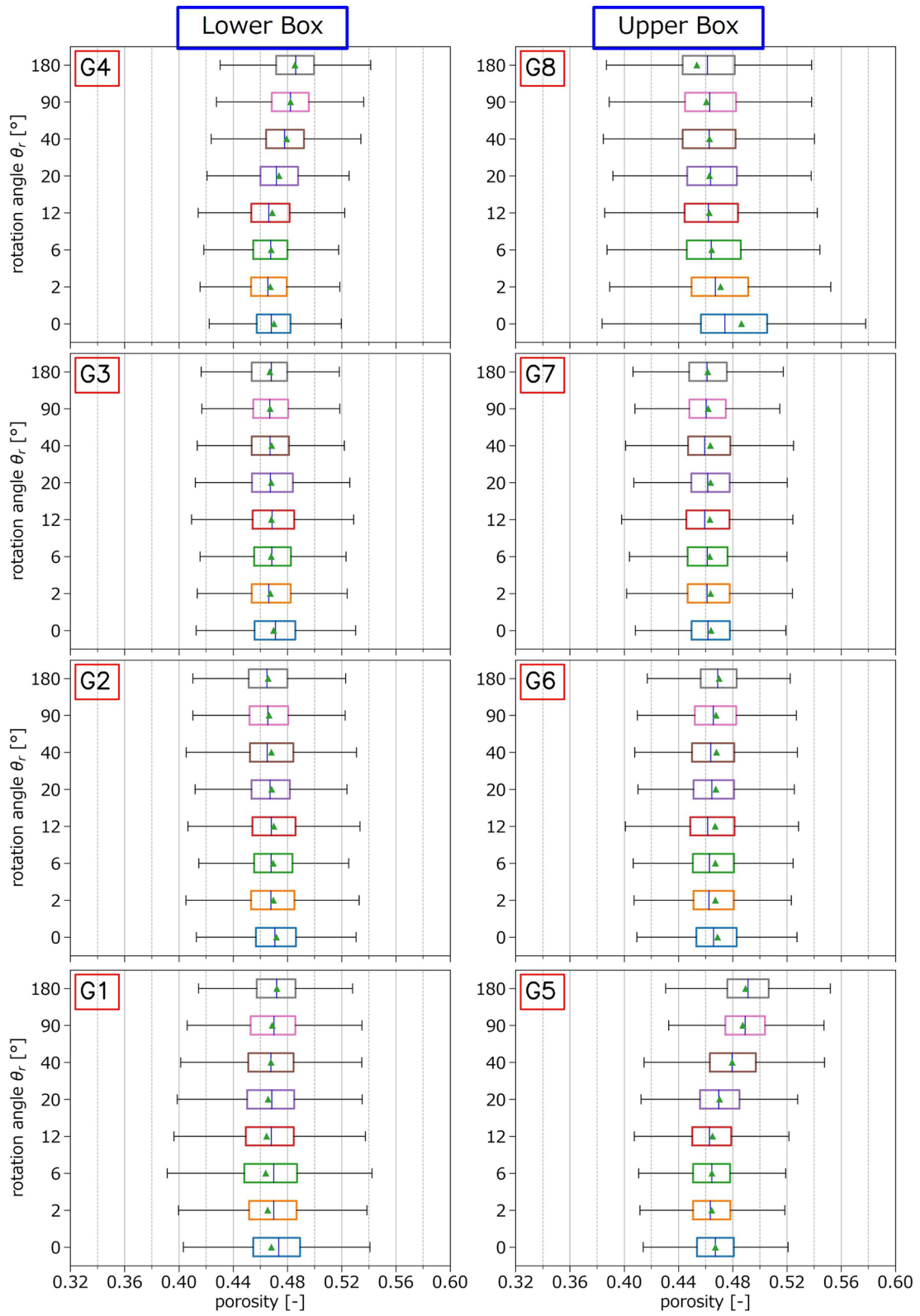


図 7-29 間隙率の統計解析結果 (Case4)

(使用材料：IW5 が 90%, IW3 が 10%, 供試体作成方法：自由落下法の後、攪拌)

砂を用いた実験 (Case1, 2, 4) では、せん断面に近い G4 や G5 において、せん断の進行に伴って間隙率が増加する傾向にあり、間隙率の中央値は、せん断開始前と比較して最大で 3.1%程度増加した。また、G4 や G5 においては、間隙率のバラつきも増える傾向にある。一方、せん断面から離れた範囲 (G2~G3, G6~G7) においては、せん断の進行に伴い間隙率が僅かに減少し、バラつきも僅かに小さくなる傾向にある。

IW5 のみを用い、自由落下法で供試体を作成した Case1 と、試料をよく攪拌し供試体を作成した Case2 を比較すると、せん断面に近い G4 や G5 においては、同じような間隙率の変化が生じている。このことから、本実験においては、供試体の作成方法が間隙率の変化に与える影響はほとんど無かったと言える。

ガラスビーズを用いた実験 (Case3) においても、せん断面に近い G4 や G5 では、せん断の進行に伴って間隙率が増加する傾向にある。しかし、せん断開始前と比較すると、間隙率中央値の増加は 1.5%程度であり、砂を使った実験結果に比べると変化が小さい。また、間隙率のバラつきに関してもほとんど変わっていない。

IW5 のみを用いて供試体を作成した Case2 と、IW3 と IW5 を混合して供試体を作成した Case4 の結果を比較すると、間隙率の中央値は同じような変化の傾向を示す。しかし、Case4 の方が僅かに間隙率のバラつきが大きくなることから、異なる粒径が混合した供試体では、単一粒径の供試体に比べると間隙率が局所的に変化すると考えられる。

ここで、Case4 において大径粒子 (IW3) 周辺の間隙率に着目し、大径粒子が周辺の空隙に及ぼす影響の範囲について検討する。図 7-1 に示した IW3 の粒径加積曲線より、5%粒子径 ($D_5=0.91\text{mm}$) と 95%粒子径 ($D_{95}=2.17\text{mm}$) の値を使って球体積の最小値と最大値を計算し、粒子体積を指標としてセグメント画像から大径粒子を抽出する。そして、図 7-30 に示すように、それぞれの粒径の体積から計算される球近似半径の 1~4 倍の影響半径を設定し、影響半径内の代表体積要素を抽出することで、間隙率の統計解析を行う。図 7-31(a)は、G4 と G5 の範囲における全代表体積要素を対象に間隙率の統計解析を行った結果であり、図 7-31(b)~(d)は、G4 と G5 の範囲において、大径粒子を球近似した半径の 1, 2, 3, 4 倍の影響半径内に位置する代表体積要素のみを抽出し、間隙率の統計解析を行った結果である。

影響半径を大径粒子の球近似半径の 2 倍以下として代表体積要素を抽出して統計解析を行った場合 (図 7-31(b), (c))、全代表体積要素を対象とした統計解析の結果 (図 7-31(a)) と大きく異なっている。一方、影響半径が大きくなるに従い、全代表体積要素を対象とした統計解析の結果に近づく (図 7-31(d), (e))。つまり、異なる粒径が混合した供試体 (Case4) では、せん断に伴い、大径粒子周辺に局所的な間隙率の変化が生じるが、その影響が及ぶ範囲は大径粒子の球近似半径の 2 倍程度であると考えられる。

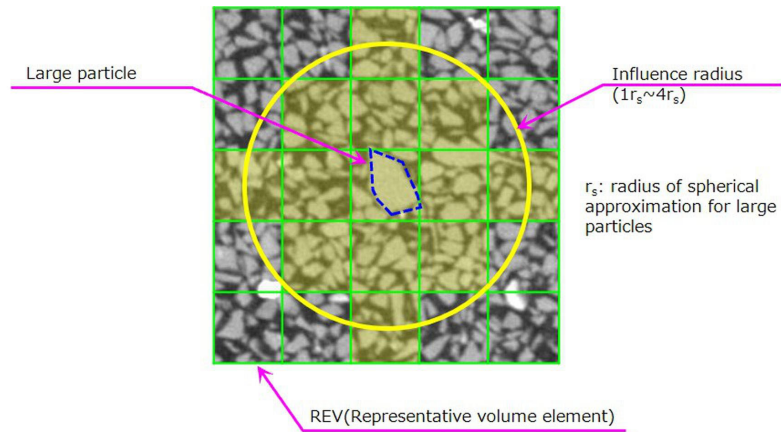


図 7-30 大径粒子周辺に位置する間隙率の統計解析方法

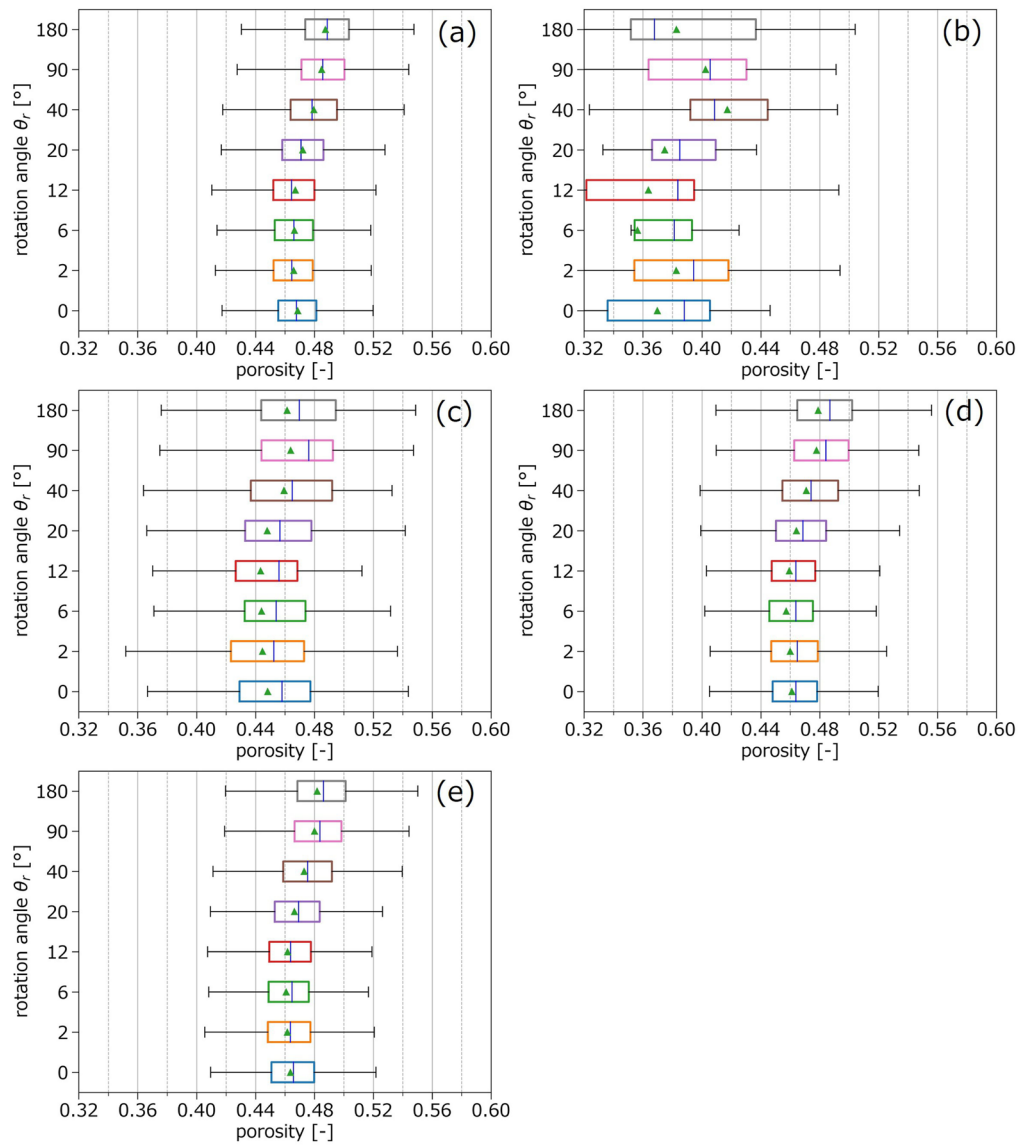


図 7-31 大径粒子周辺の間隙率の統計解析結果 (Case4)

7.5.5 粒子ファブリック解析

砂を用いた実験 (Case1, 2, 4) を対象とし, 本研究で開発した 3 次元粒子ファブリック解析手法を用いて, せん断に伴って変化する粒子の方向について評価を行う. 7.4.4 節で述べたように, 水平断面におけるせん断の方向と粒子長軸, 中間軸, 短軸の成す角度 ($\theta_{h1}, \theta_{h2}, \theta_{h3}$), 及び鉛直断面における水平面と粒子長軸, 中間軸, 短軸の成す角度 ($\theta_{v1}, \theta_{v2}, \theta_{v3}$) を計算し, ヒストグラムとして整理する. 図 7-32 は, 粒子長軸の場合を例とし, θ_{h1} 及び θ_{v1} の粒子方向のイメージを示した図である. θ_{h1} が 0° とは水平断面において粒子長軸の方向とせん断の方向ベクトルが完全に一致している状態を表し, θ_{h1} が 90° とは水平断面において粒子長軸の方向とせん断の方向ベクトルが直交している状態を表す. また, θ_{v1} が 0° とは鉛直断面において粒子長軸が水平方向を向いている状態を表し, θ_{v1} が 90° とは粒子長軸が鉛直方向を向いている状態を表す.

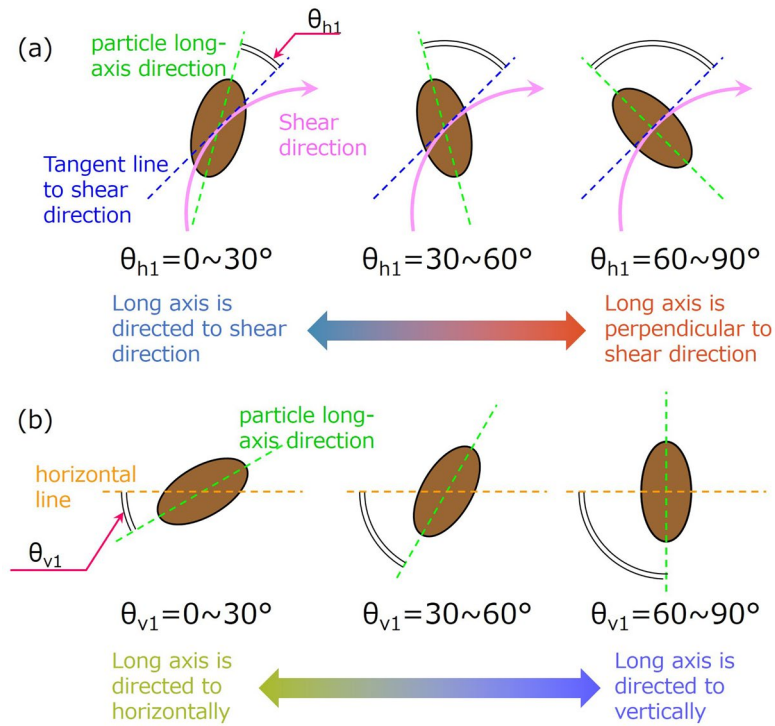


図 7-32 θ_{h1}, θ_{v1} の概念図

水平断面において粒子長軸, 中間軸, 短軸の方向とせん断の方向の成す角度 ($\theta_{h1}, \theta_{h2}, \theta_{h3}$) を計算し, $0 \sim 90^\circ$ の範囲で 30° 毎にヒストグラムを計算した結果について, Case1 は図 7-33 ~ 図 7-35 に, Case2 は図 7-36 ~ 図 7-38 に, Case4 は図 7-39 ~ 図 7-41 に示す. また, 鉛直断面において粒子長軸, 中間軸, 短軸の方向と水平面の成す角度 ($\theta_{v1}, \theta_{v2}, \theta_{v3}$) を計算し, $0 \sim 90^\circ$ の範囲で 30° 毎にヒストグラムを計算した結果について, Case1 は図 7-42 ~ 図 7-44 に, Case2 は図 7-45 ~ 図 7-47 に, Case4 は図 7-48 ~ 図 7-50 に示す. いずれの結果も, 図 7-25 に示した間隙率の統計解析を行った層区分と同じ範囲で結果を整理し, 左側が下部容器 (G1 ~ G4)

を、右側が上部容器 (G5~G8) における結果を表し、CT 撮影を行ったタイミング、つまり回転角度 θ_r によって棒グラフの色付けを行った。

全体に共通する傾向として、せん断面から離れた G1~G3 及び G6~G8 の範囲では、ヒストグラムに大きな変化は生じていない。このことから、せん断に伴って粒子の方向変化はほとんど生じていないと考えられる。一方、せん断面に近い G4 や G5 の範囲では、せん断の進行に伴ってヒストグラムに変化が表れている。特に長軸や短軸の方向に顕著な変化が確認され、回転角度が 12° 、つまりせん断応力がピークを越える頃より、ヒストグラムの傾向が変わっている。以下に、Case1 の結果に着目し、せん断面に近い G4 や G5 の範囲における変化について整理する。

(a) $\theta_r \leq 12^\circ$

- ・ 水平断面における粒子長軸 (θ_{h1}) は、 $0\sim 30^\circ$ 成分が僅かに減少し、 $60\sim 90^\circ$ 成分が僅かに増加する (図 7-33)。また、水平断面における粒子短軸 (θ_{h3}) は、 $0\sim 30^\circ$ 成分が僅かに増加し、 $60\sim 90^\circ$ 成分が僅かに減少する (図 7-35)。つまり、水平断面においては、粒子長軸がせん断の方向に対して直交し、粒子短軸がせん断の方向を向くような変化が生じている。
- ・ 鉛直断面における粒子長軸 (θ_{v1}) は、 $0\sim 30^\circ$ 成分が僅かに増加し、 $30\sim 60^\circ$ 成分及び $60\sim 90^\circ$ 成分が僅かに減少する (図 7-42)。また、鉛直断面における粒子短軸 (θ_{v3}) は、 $0\sim 30^\circ$ 成分が僅かに減少し、 $60\sim 90^\circ$ 成分が僅かに増加する (図 7-44)。つまり、鉛直断面においては、粒子長軸が水平方向を向き、粒子短軸が鉛直方向を向くような変化が生じている。

(b) $\theta_r > 12^\circ$

- ・ θ_{h1} は、 $0\sim 30^\circ$ 成分が単調増加し、 $60\sim 90^\circ$ 成分が単調減少する (図 7-33)。また、 θ_{h3} は、 $0\sim 30^\circ$ 成分が減少し、 $60\sim 90^\circ$ 成分が増加する (図 7-35)。つまり、せん断応力がピークを越えると、水平断面においては、粒子長軸がせん断の方向を向き、粒子短軸がせん断の方向に対して直交するような変化が生じている。
- ・ θ_{v1} は、 $0\sim 30^\circ$ 成分が単調増加し、 $30\sim 60^\circ$ 成分及び $60\sim 90^\circ$ 成分が単調減少する (図 7-42)。また、 θ_{v3} は、 $0\sim 30^\circ$ 成分が単調減少し、 $60\sim 90^\circ$ 成分が単調増加する (図 7-44)。つまり、鉛直断面においては、粒子長軸が水平方向を向き、粒子短軸が鉛直方向を向くような変化が生じており、せん断応力がピークを越える前から変わっていない。

Case2 おいても、概ね Case1 と同じような変化が表れている。Case4 においては、大局的には Case1 や Case2 と同じような変化であったが、増減を伴うような変化が生じている。

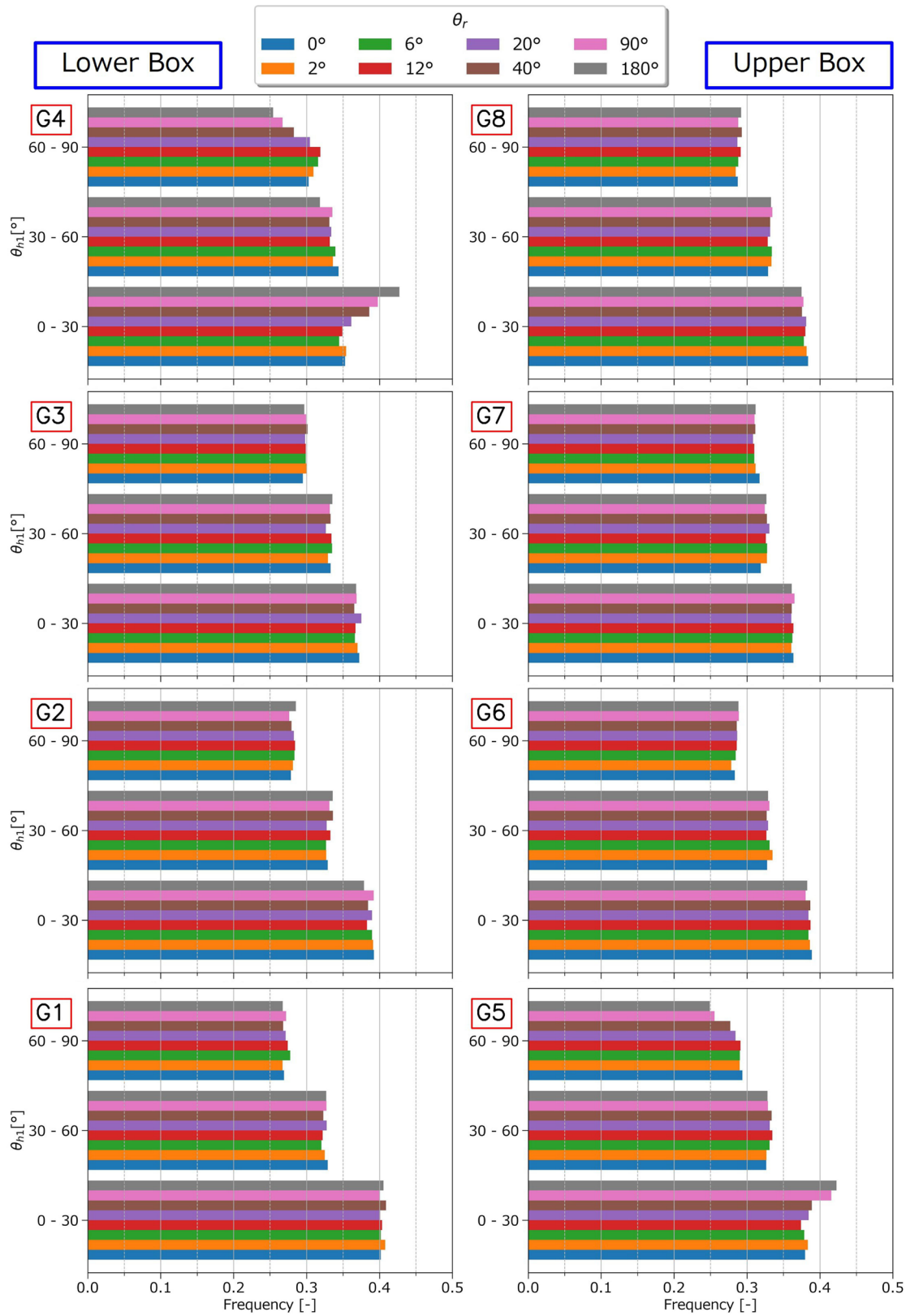


図 7-33 水平断面における粒子長軸の方向とせん断の方向の成す角度 θ_{h1} (Case1)
 (使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法)

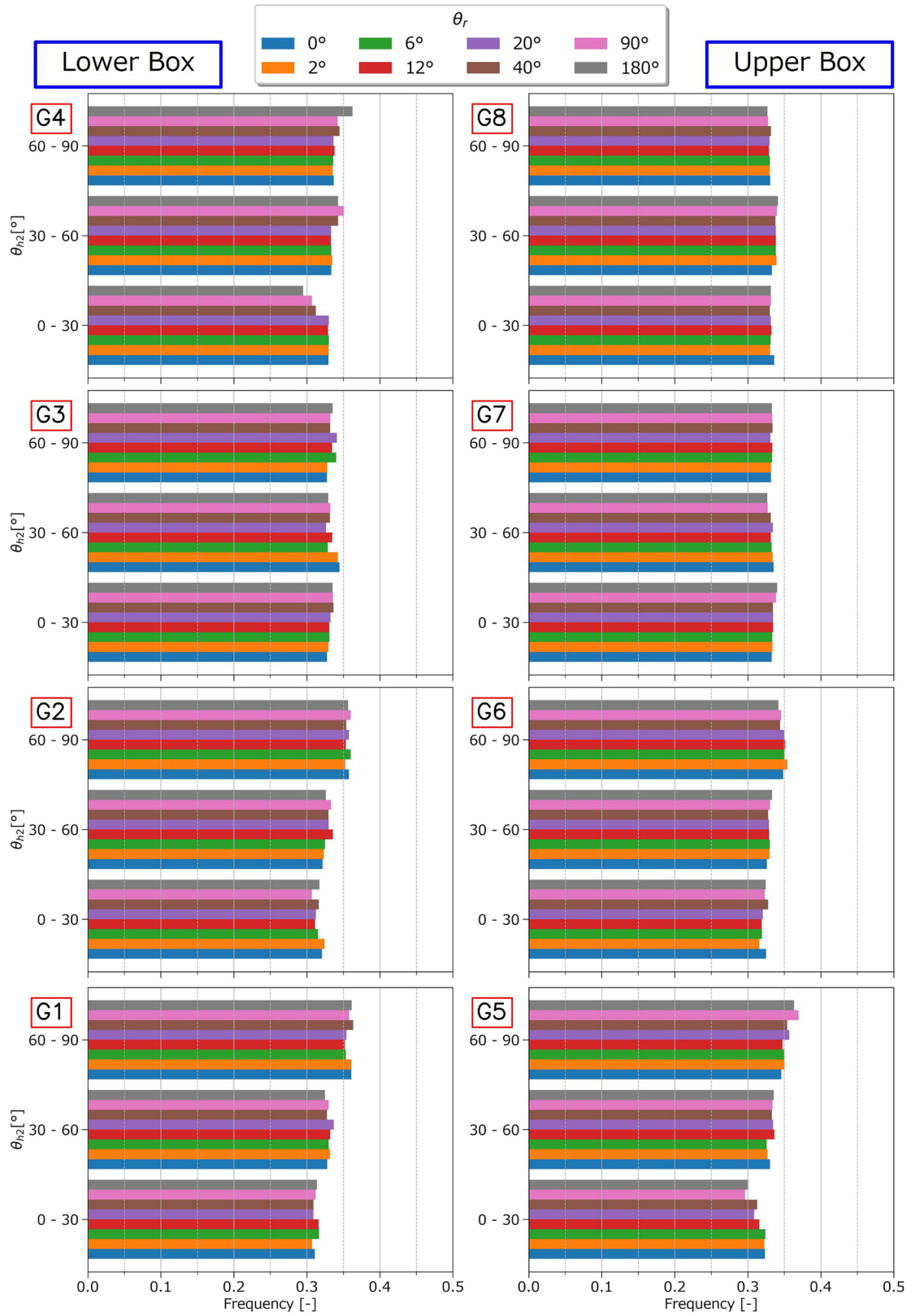


図 7-34 水平断面における粒子中間軸の方向とせん断の方向の成す角度 θ_{h2} (Case1)
 (使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法)

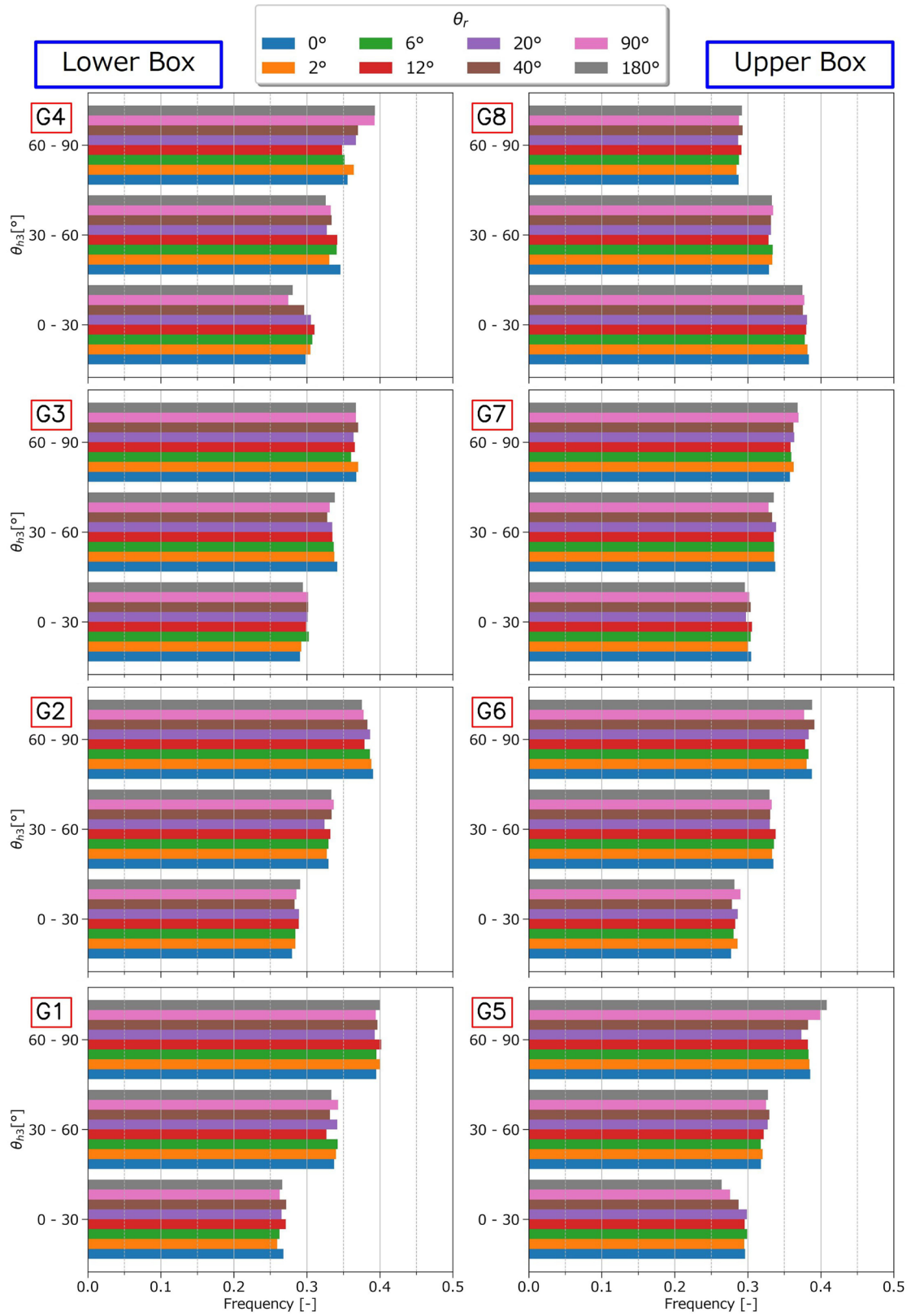


図 7-35 水平断面における粒子短軸の方向とせん断の方向の成す角度 θ_{h3} (Case1)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法)

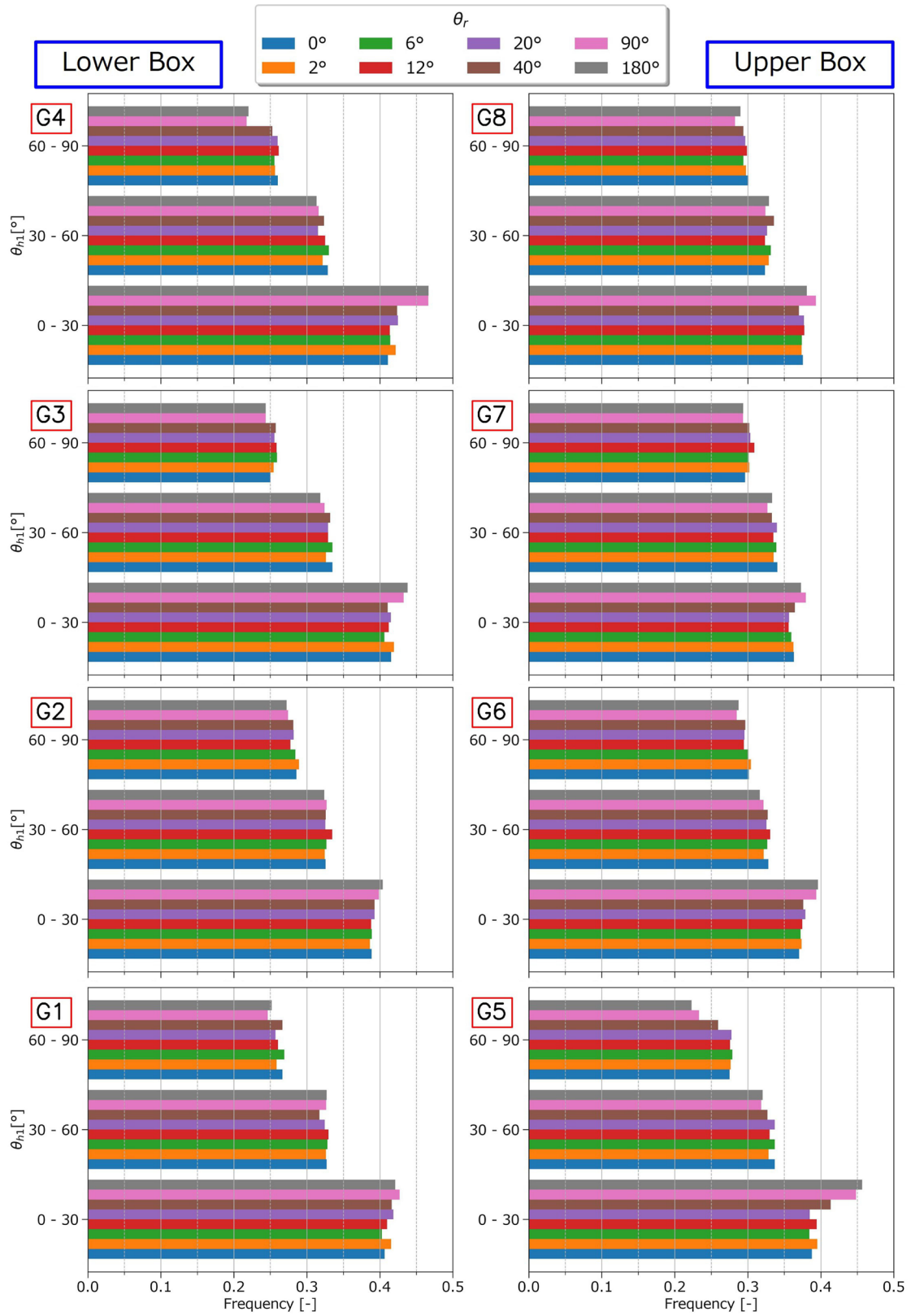


図 7-36 水平断面における粒子長軸の方向とせん断の方向の成す角度 θ_{h1} (Case2)
 (使用材料: IW5, 供試体作成方法: 自由落下法の後, 攪拌)

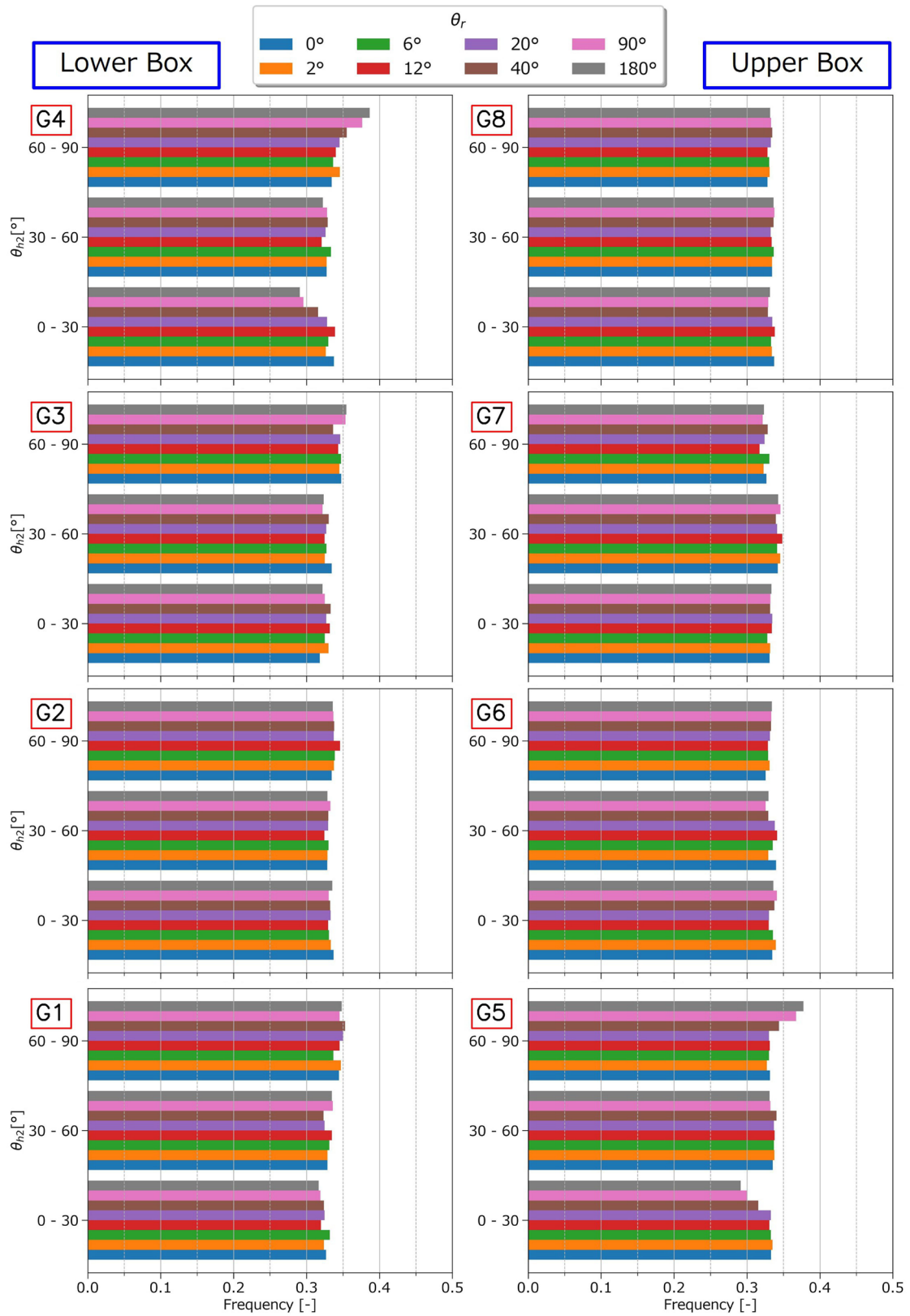


図 7-37 水平断面における粒子中間軸の方向とせん断の方向の成す角度 θ_{h2} (Case2)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法の後, 攪拌)

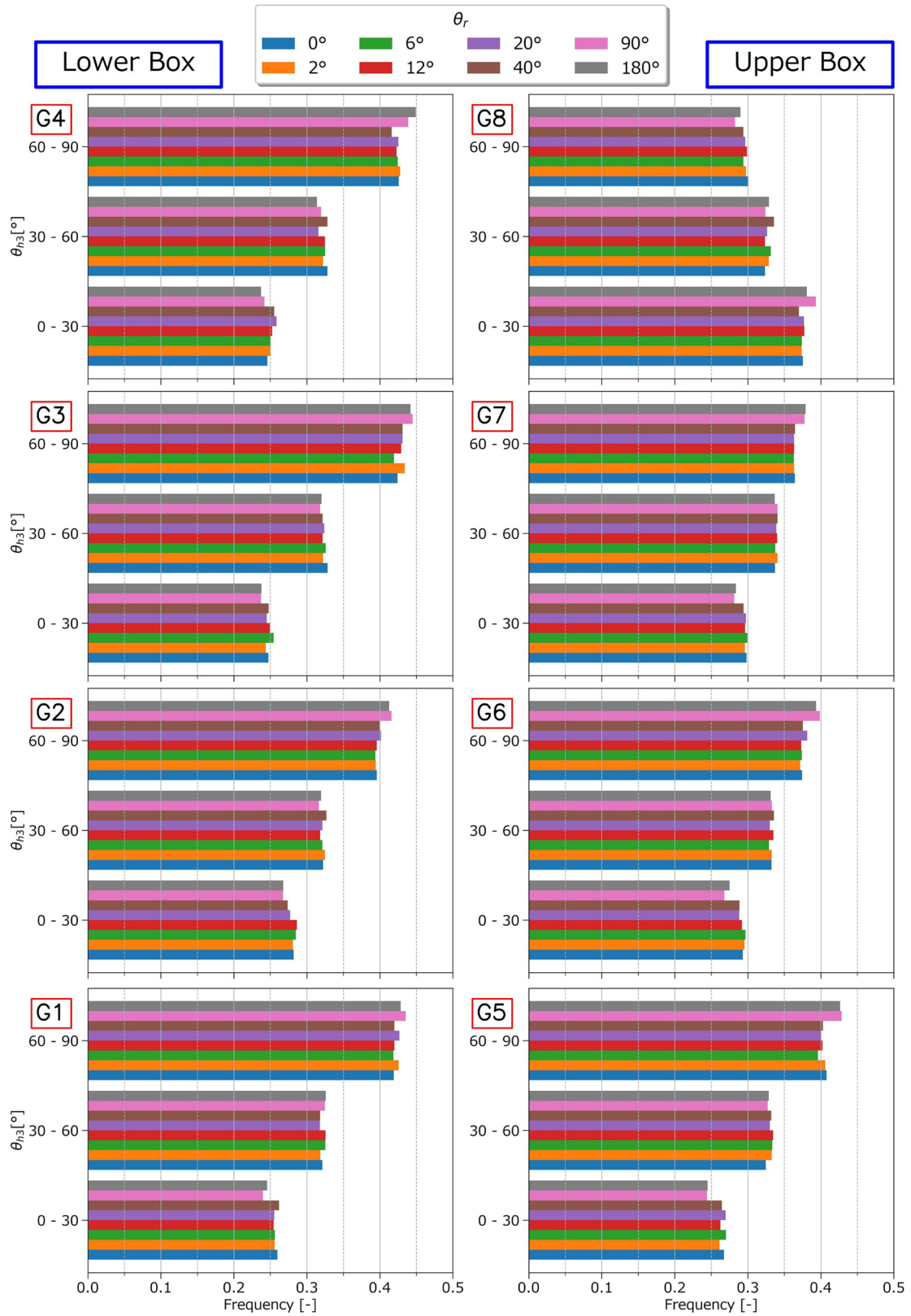


図 7-38 水平断面における粒子短軸の方向とせん断の方向の成す角度 θ_{h3} (Case2)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法の後, 攪拌)

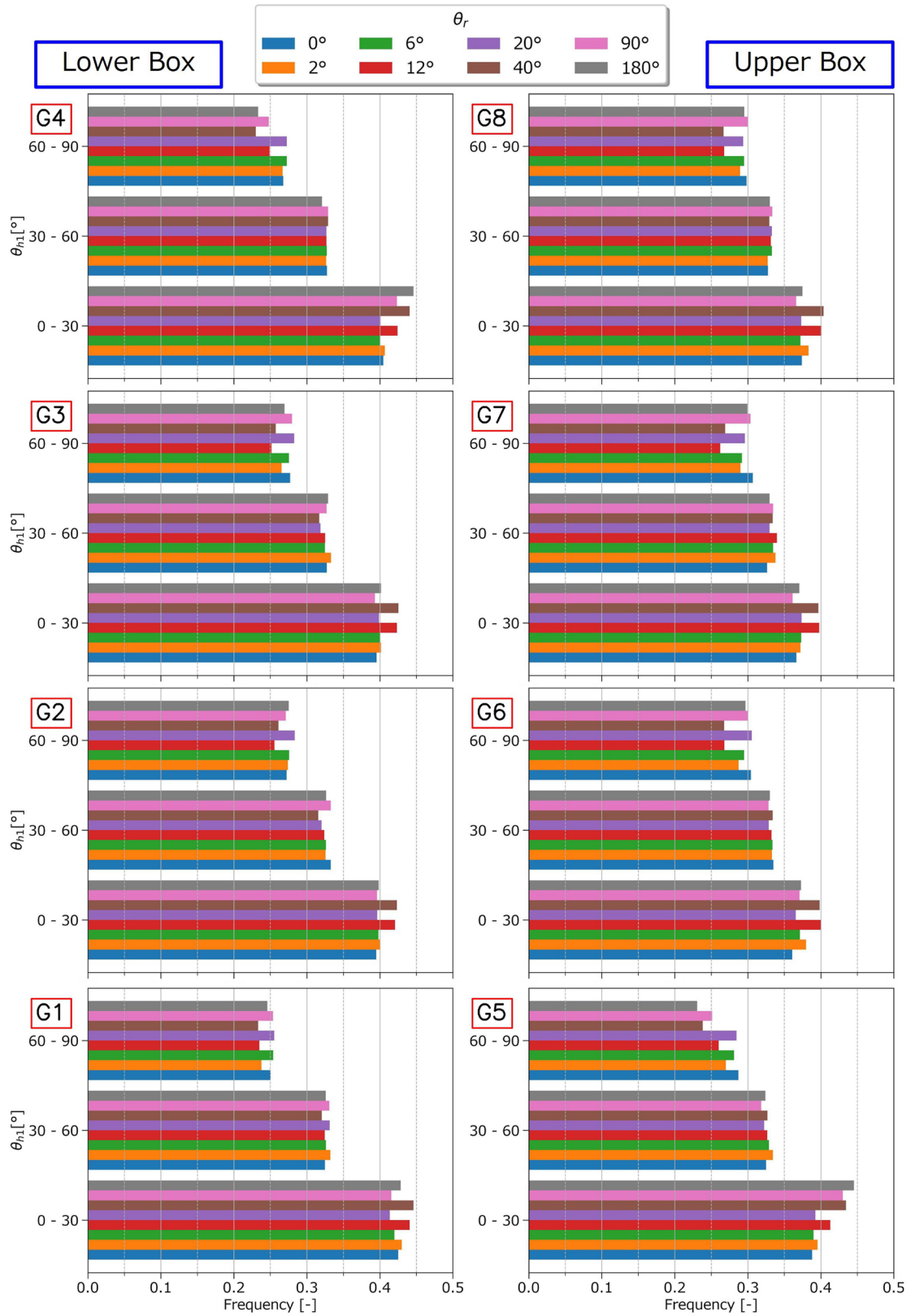


図 7-39 水平断面における粒子長軸の方向とせん断の方向の成す角度 θ_{h1} (Case4)
 (使用材料: IW5 が 90%, IW3 が 10%, 供試体作成方法: 自由落下法の後, 攪拌)

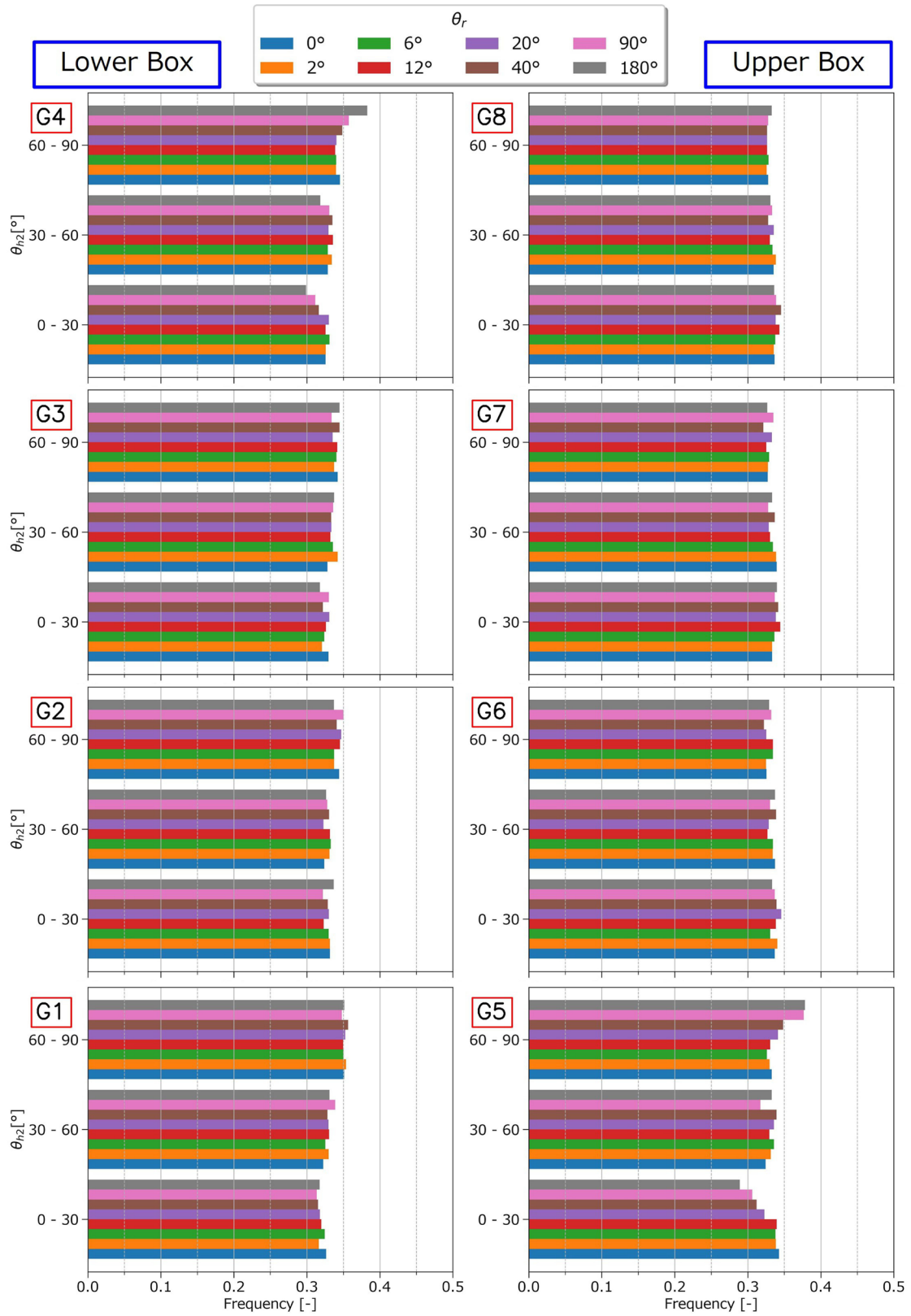


図 7-40 水平断面における粒子中間軸の方向とせん断の方向の成す角度 θ_{h2} (Case4)
 (使用材料：IW5 が 90%, IW3 が 10%, 供試体作成方法：自由落下法の後、攪拌)



図 7-41 水平断面における粒子短軸の方向とせん断の方向の成す角度 θ_{h3} (Case4)
 (使用材料：IW5 が 90%, IW3 が 10%, 供試体作成方法：自由落下法の後、攪拌)

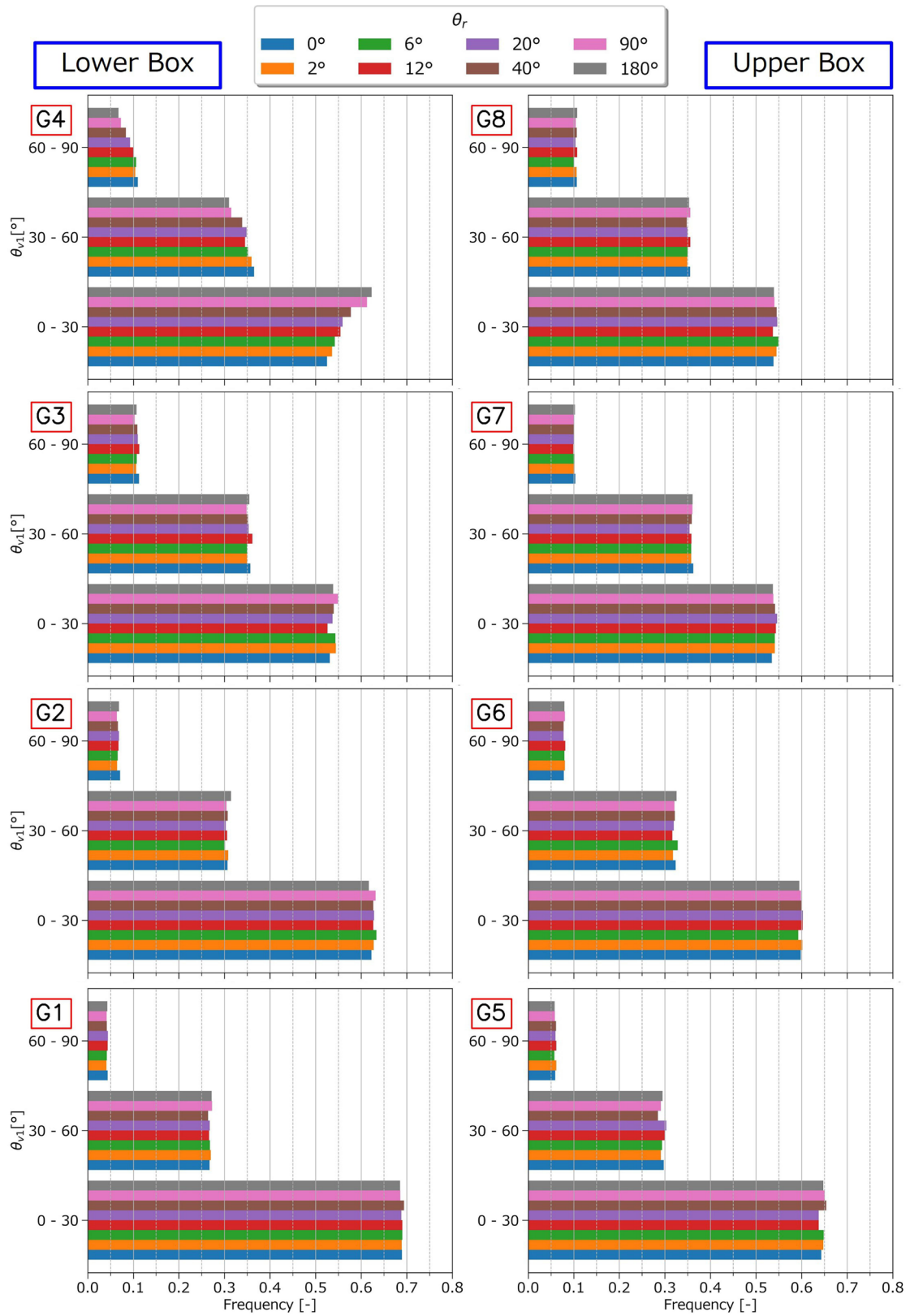


図 7-42 鉛直断面における粒子長軸の方向と水平面の成す角度 θ_{v1} (Case1)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法)

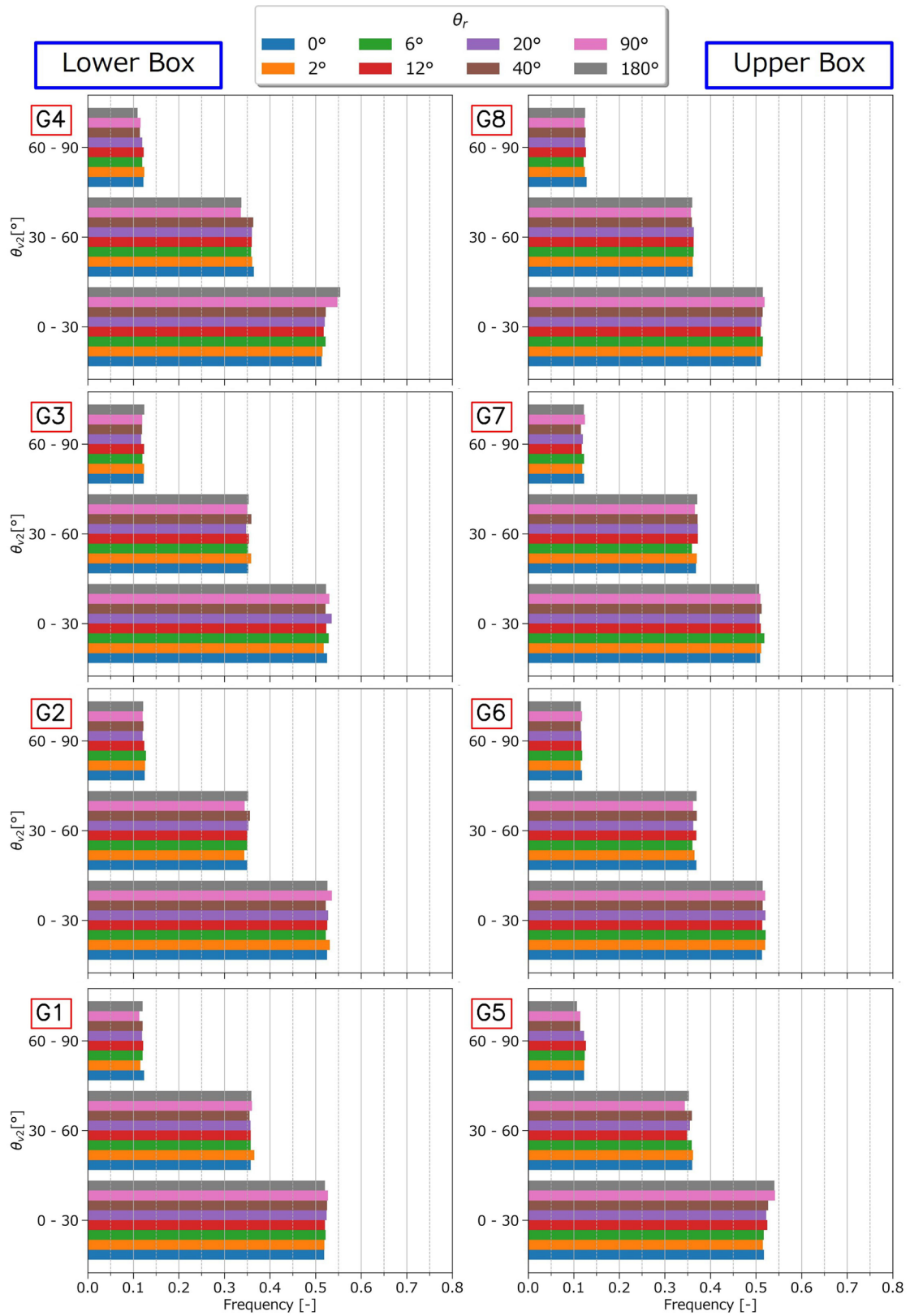


図 7-43 鉛直断面における粒子中間軸の方向と水平面の成す角度 θ_{v2} (Case1)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法)



図 7-44 鉛直断面における粒子短軸の方向と水平面の成す角度 θ_{v3} (Case1)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法)



図 7-45 鉛直断面における粒子長軸の方向と水平面の成す角度 θ_{v1} (Case2)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法の後, 攪拌)

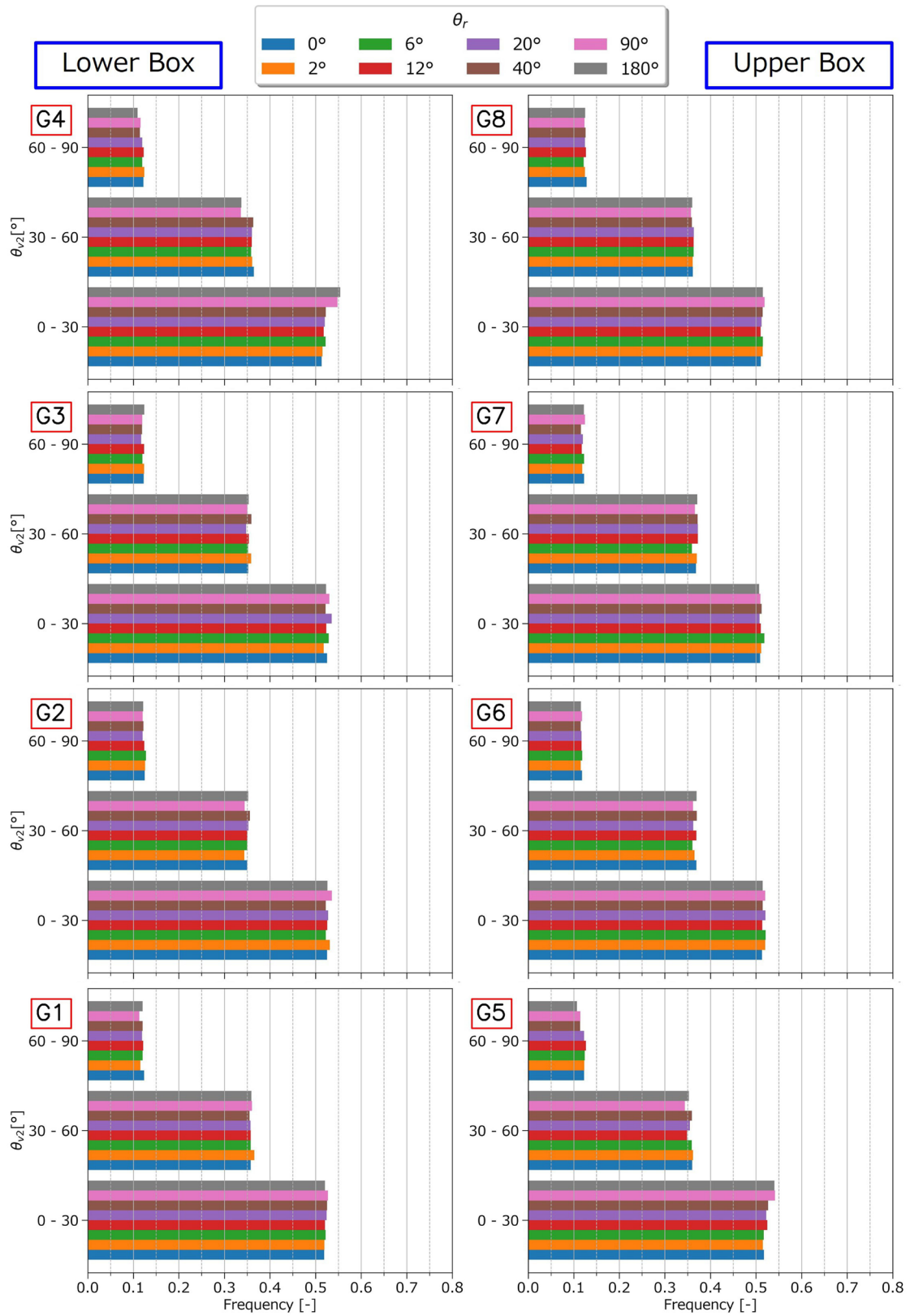


図 7-46 鉛直断面における粒子中間軸の方向と水平面の成す角度 θ_{v2} (Case2)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法の後, 攪拌)

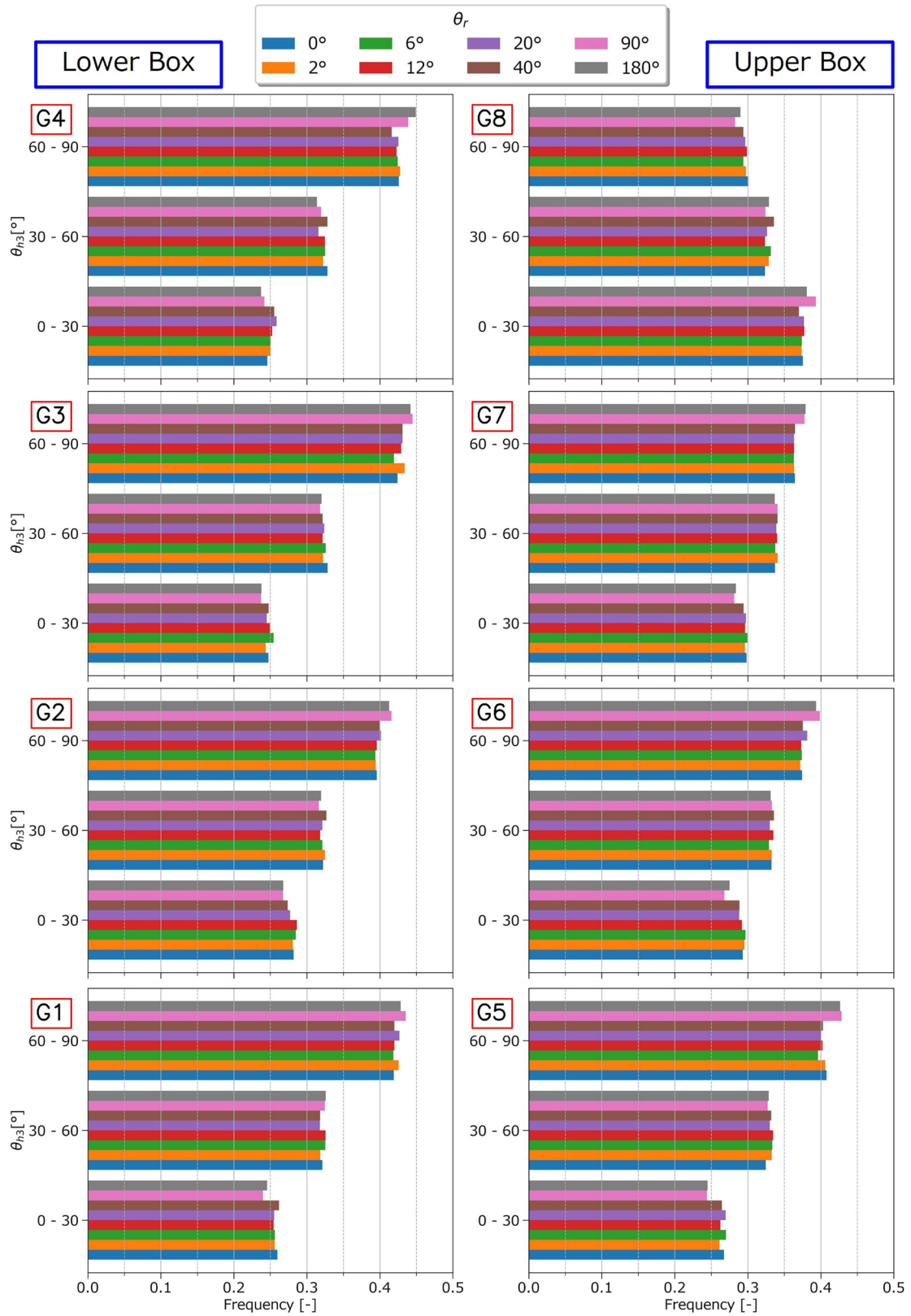


図 7-47 鉛直断面における粒子短軸の方向と水平面の成す角度 θ_{v3} (Case2)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法の後, 攪拌)



図 7-48 鉛直断面における粒子長軸の方向と水平面の成す角度 θ_{v1} (Case4)
 (使用材料: IW5 が 90%, IW3 が 10%, 供試体作成方法: 自由落下法の後, 攪拌)

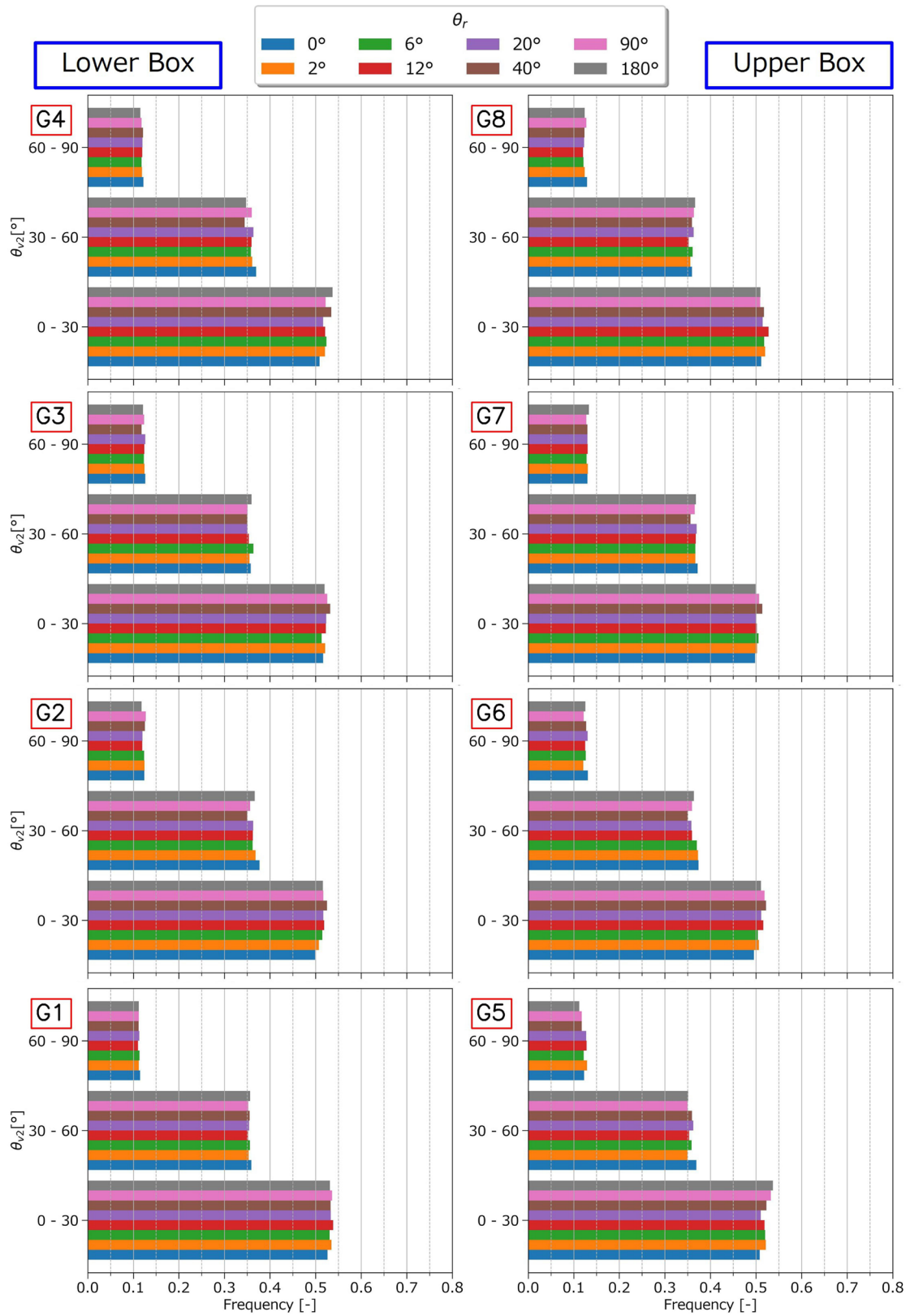


図 7-49 鉛直断面における粒子中間軸の方向と水平面の成す角度 θ_{v2} (Case4)
 (使用材料：IW5 が 90%, IW3 が 10%, 供試体作成方法：自由落下法の後、攪拌)

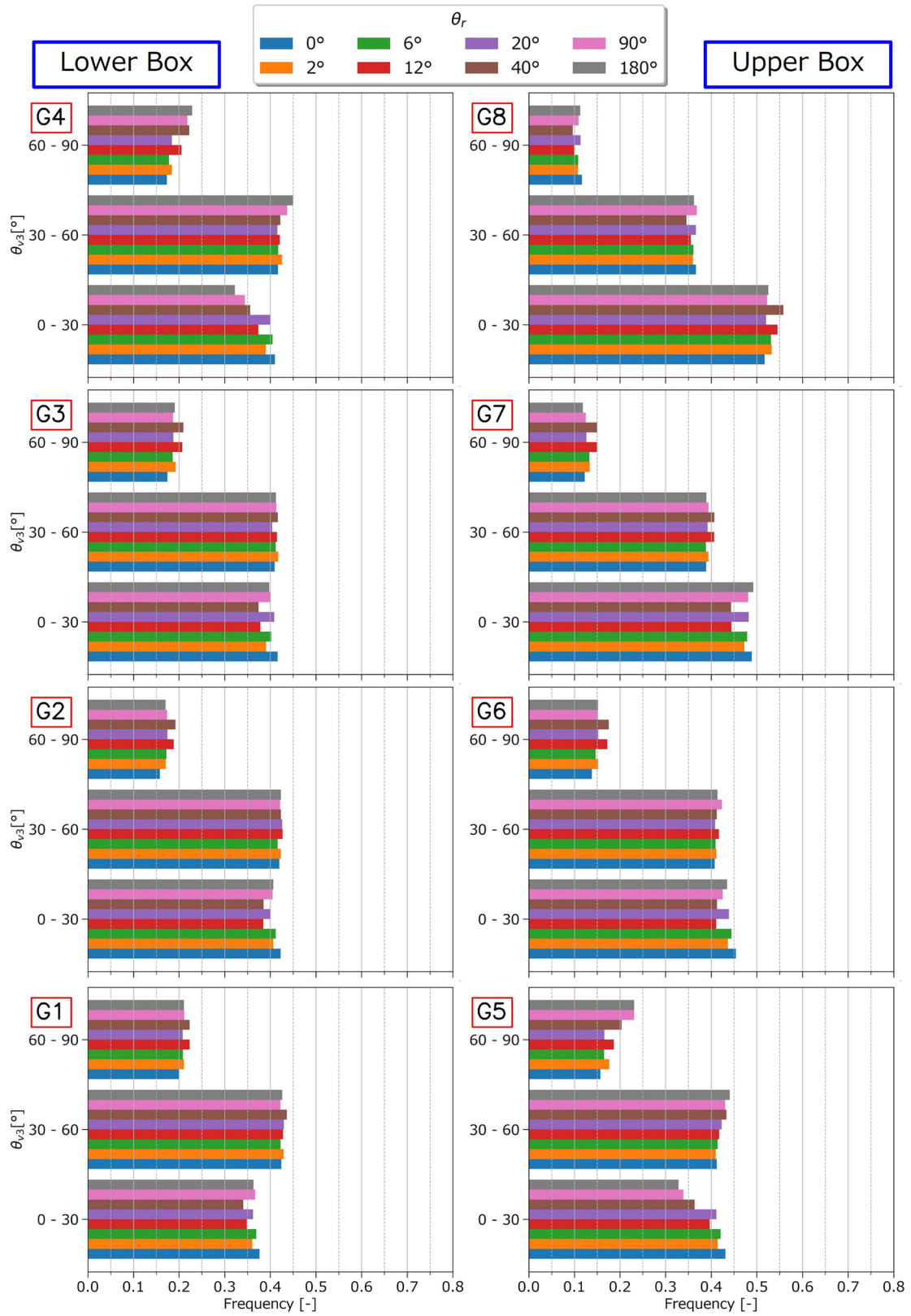


図 7-50 鉛直断面における粒子短軸の方向と水平面の成す角度 θ_{v3} (Case4)
 (使用材料：IW5 が 90%, IW3 が 10%, 供試体作成方法：自由落下法の後、攪拌)

ここで、**図 7-25** に示した G4 (せん断面～せん断面より鉛直下方に 2.5mm の範囲) に着目し、粒子方向のヒストグラムを再整理した結果を**図 7-51**～**図 7-53** に示す。図中の数字は、初期状態 ($\theta_r=0^\circ$) からの変化を表しており、正の値を赤字、負の値を青字で示している。

Case1 の場合、水平断面においては、せん断に伴う粒子の方向変化は長軸に対して最も顕著に表れており、 θ_{h1} の $0\sim 30^\circ$ 成分が最大 7.5%増加している。また、鉛直断面においては、長軸及び短軸に同程度の変化が表れており、 θ_{v1} の $0\sim 30^\circ$ 成分が最大 9.8%増加し、 θ_{v3} の $0\sim 30^\circ$ 成分が最大 10.0%程度減少している (**図 7-51**)。先行研究では、土粒子は過去に経験した応力履歴に応じて配列構造を成す可能性が報告されているが⁶⁾、今回の実験結果も同様のことを表している。つまり、今回の実験結果は、土粒子の配列構造からせん断の方向を決定できる可能性を示唆する結果であると言える。特に、せん断の方向に平行な面においては長軸が、せん断に直交する面では長軸及び短軸がせん断による影響を受けやすいと考えられる。

Case2 においても概ね Case1 と同じような変化となった (**図 7-52**)。しかし、初期状態からの変化は Case1 の方が大きい。また、水平断面における中間軸も、長軸に近いような変化が表れており、土粒子の初期状態における配列構造の影響を受けた可能性が考えられる。Case4 においては、増減を伴う変化が表れているが、水平断面においては θ_{h1} の $0\sim 30^\circ$ 成分が最大 4.1%増加し、鉛直断面においては θ_{v1} の $0\sim 30^\circ$ 成分が最大 7.7%増加し、 θ_{v3} の $0\sim 30^\circ$ 成分が最大 8.8%減少するなど、大局的には Case1 と同じような変化が表れている (**図 7-53**)。

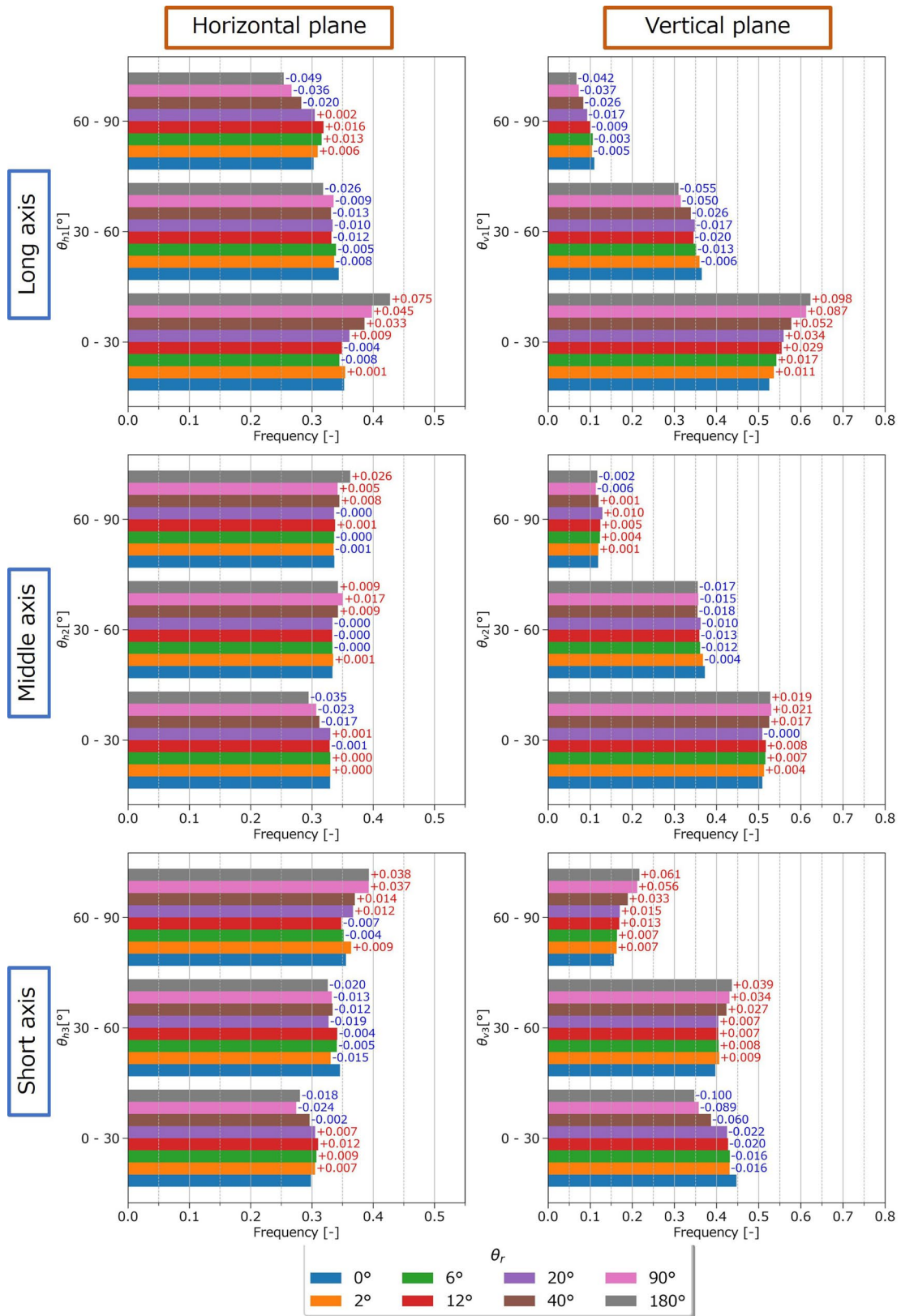


図 7-51 G4 における粒子各軸の方向変化 (Case1)

(使用材料：IW5, 供試体作成方法：自由落下法)

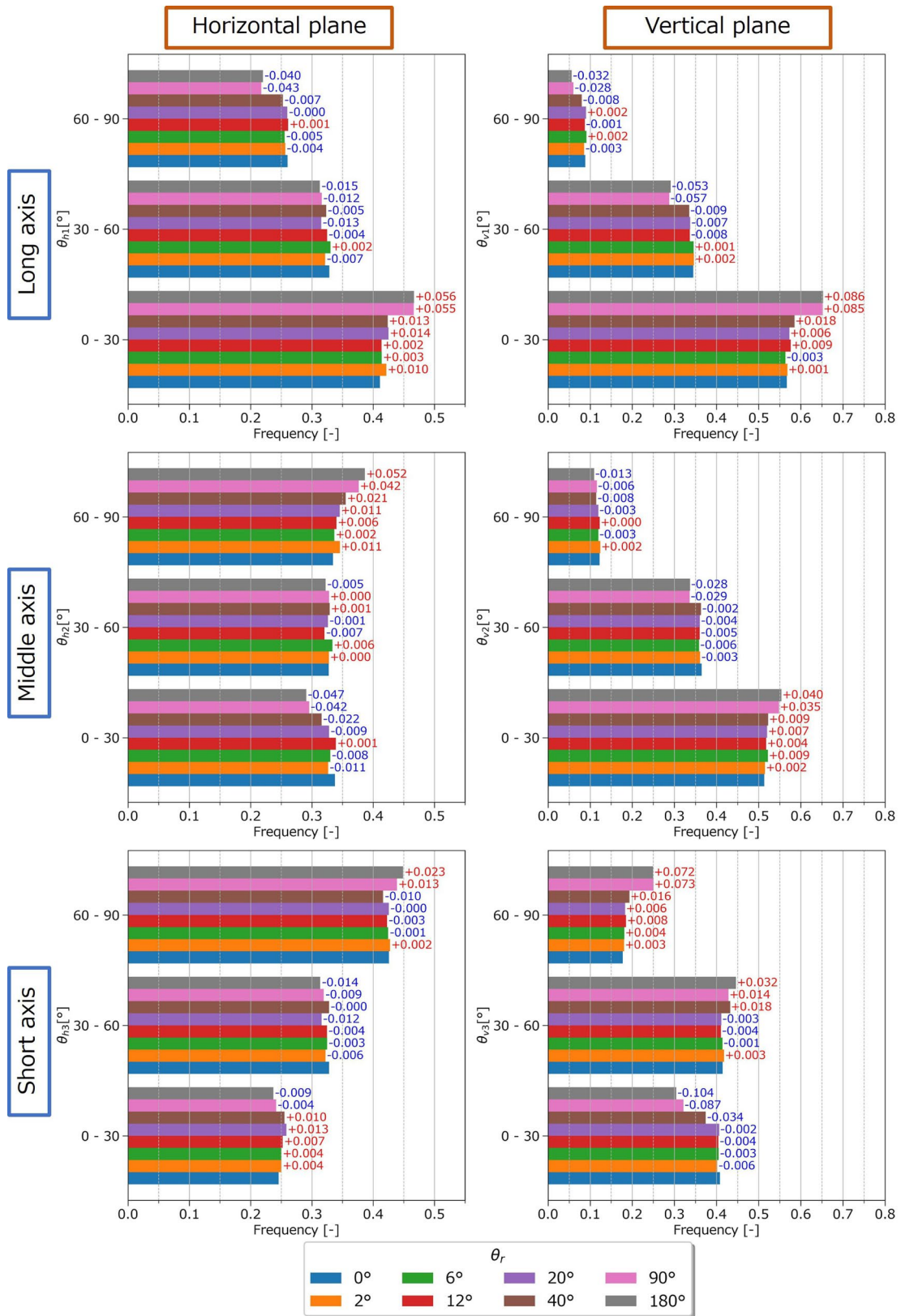


図 7-52 G4 における粒子各軸の方向変化 (Case2)
 (使用材料: IW5, 供試体作成方法: 自由落下法の後, 攪拌)

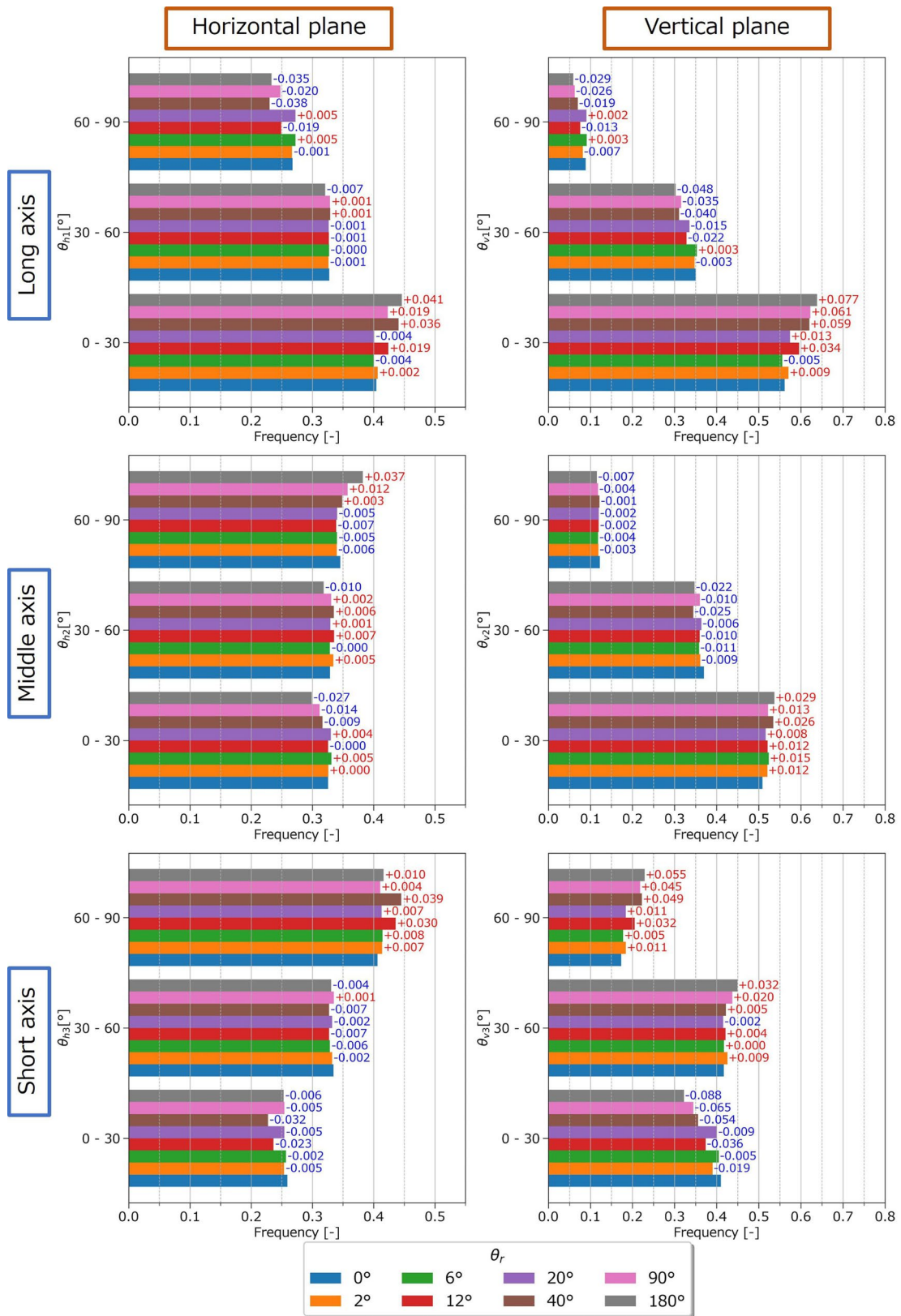


図 7-53 G4 における粒子各軸の方向変化 (Case4)

(使用材料 : IW5 が 90%, IW3 が 10%, 供試体作成方法 : 自由落下法の後, 攪拌)

リングせん断実験は、回転方向にせん断変位を与えるため、せん断距離が長い状態を再現できる試験である。一方で、**図 7-54** に示すように、一定角度せん断を行った場合であっても、回転中心に近い位置ほどせん断距離が短く（**図 7-54** 中の赤線）、回転中心から離れた位置ほどせん断距離が長い（**図 7-54** 中の青線）という特徴を有する。そこで、Case1において、せん断に伴って顕著に変化した θ_{h1} と θ_{v1} を対象に、回転中心からの半径距離に応じた粒子長軸の方向変化について整理する。

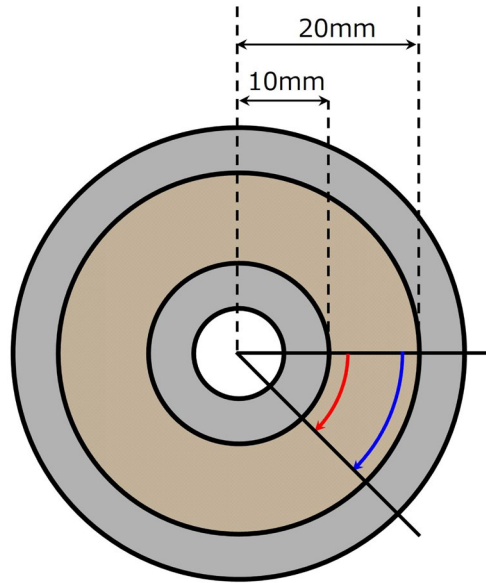


図 7-54 回転中心からの位置によるせん断変位量の違い

図 7-25 に示した G2~G4（下部容器）における θ_{h1} の結果を**図 7-55** に、G5~G7（上部容器）における θ_{h1} の結果を**図 7-56** に、G2~G4（下部容器）における θ_{v1} の結果を**図 7-57** に、G5~G7（上部容器）における θ_{v1} の結果を**図 7-58** に示す。いずれの図も、横軸が回転中心からの半径距離、縦軸が θ_{h1} あるいは θ_{v1} であり、回転中心から各粒子の重心座標までの半径距離を計算した後、 θ_{h1} もしくは θ_{v1} との関係プロットし、2次元のヒストグラムを計算し、コンター図として整理した。

これまでの結果と同様に、せん断面から離れた範囲である G2~G3、G6~G7 においては、せん断が進行したとしても、コンター図に顕著な変化は表れていない。一方、せん断面に近い G4 や G5 においては、せん断に伴ってコンター図に変化が表れてる。以下に、G4 や G5 における特徴を整理する。

(a) 水平断面（**図 7-55**, **図 7-56**）

- ・ θ_r が 20° より前の時点では、 θ_{h1} が $60\sim 90^\circ$ である箇所において、いくつかピークが集中する箇所が確認される。しかし、 θ_r が 20° 以降、赤い部分が無くなりピークが消失している。これは、せん断の進行に伴って、せん断の方向に対して直交する長軸成分が減少する様子を表している。

- ・ せん断の進行に伴い、 θ_{h1} が $0\sim 30^\circ$ となる箇所でピークが集中していくが、特に回転中心から離れた位置（せん断距離が長い位置）ほど、赤い部分が大きくなっている。つまり、せん断の進行に伴ってせん断の方向を向く長軸成分が増加するが、せん断距離が長い位置ほどその傾向が強い。

(b) 鉛直断面（図 7-57, 図 7-58）

- ・ せん断の進行に伴い、 θ_{v1} が $0\sim 30^\circ$ となる箇所でピークが集中していくような変化が確認され、特に回転中心から離れた位置（せん断距離が長い位置）ほど、赤い部分が大きくなっている。つまり、せん断の進行に伴って水平方向を向く長軸成分が増加するが、せん断距離が長い位置ほどその傾向が強い。

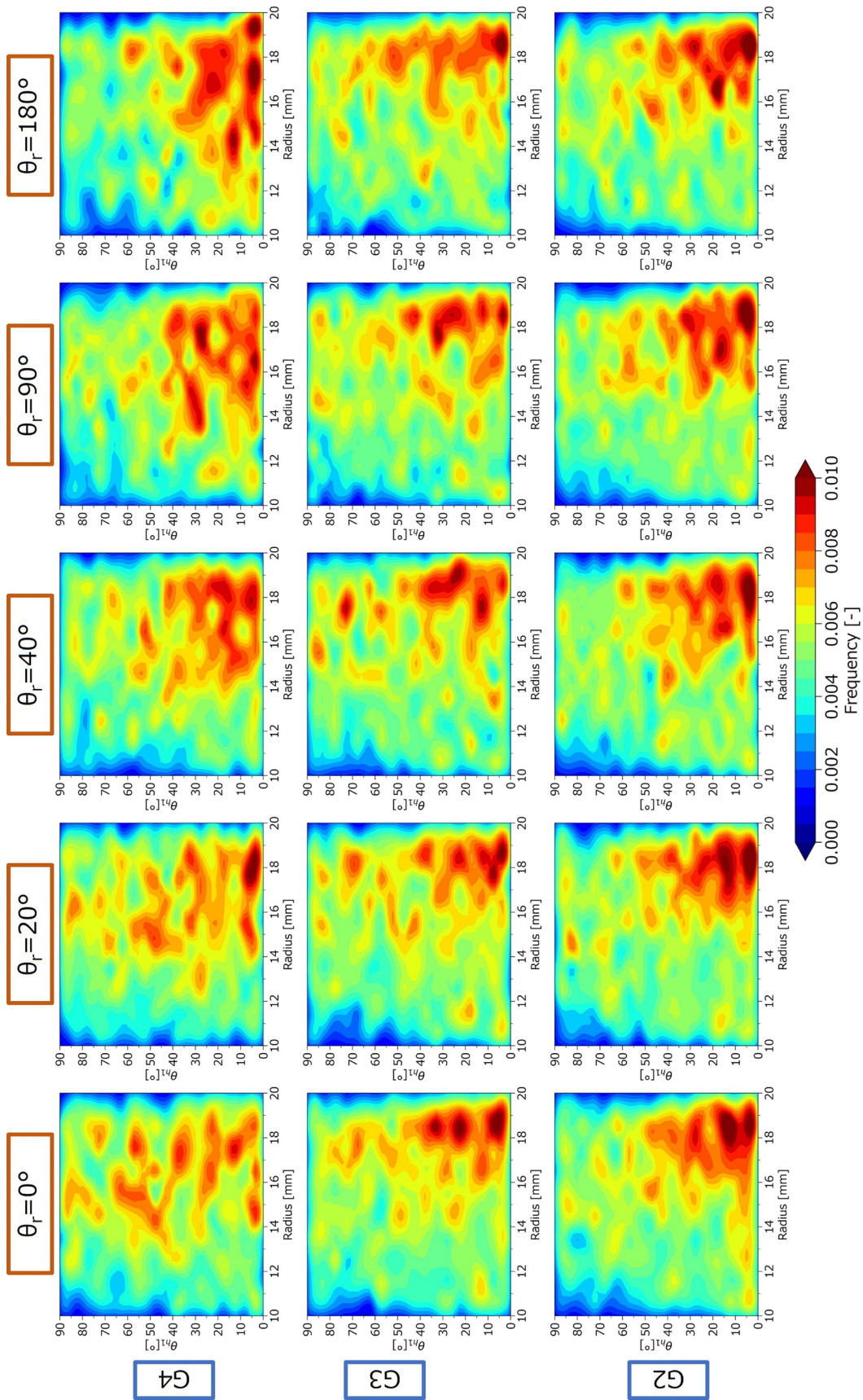


図 7-55 回転中心からの距離と θ_{m1} の関係 (Case1, 下部容器)

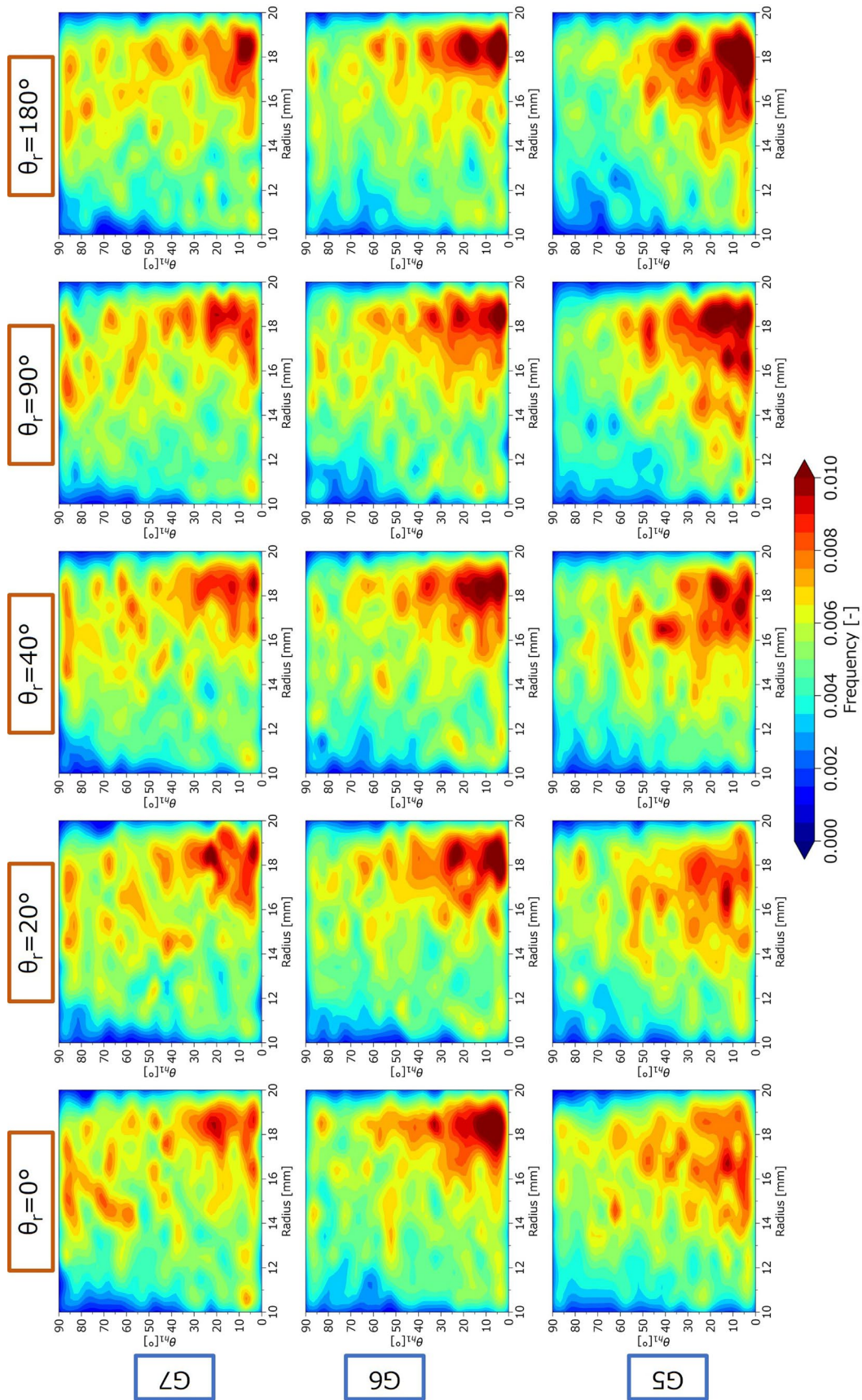


図 7-56 回転中心からの距離と θ_{n1} の関係 (Case1, 上部容器)

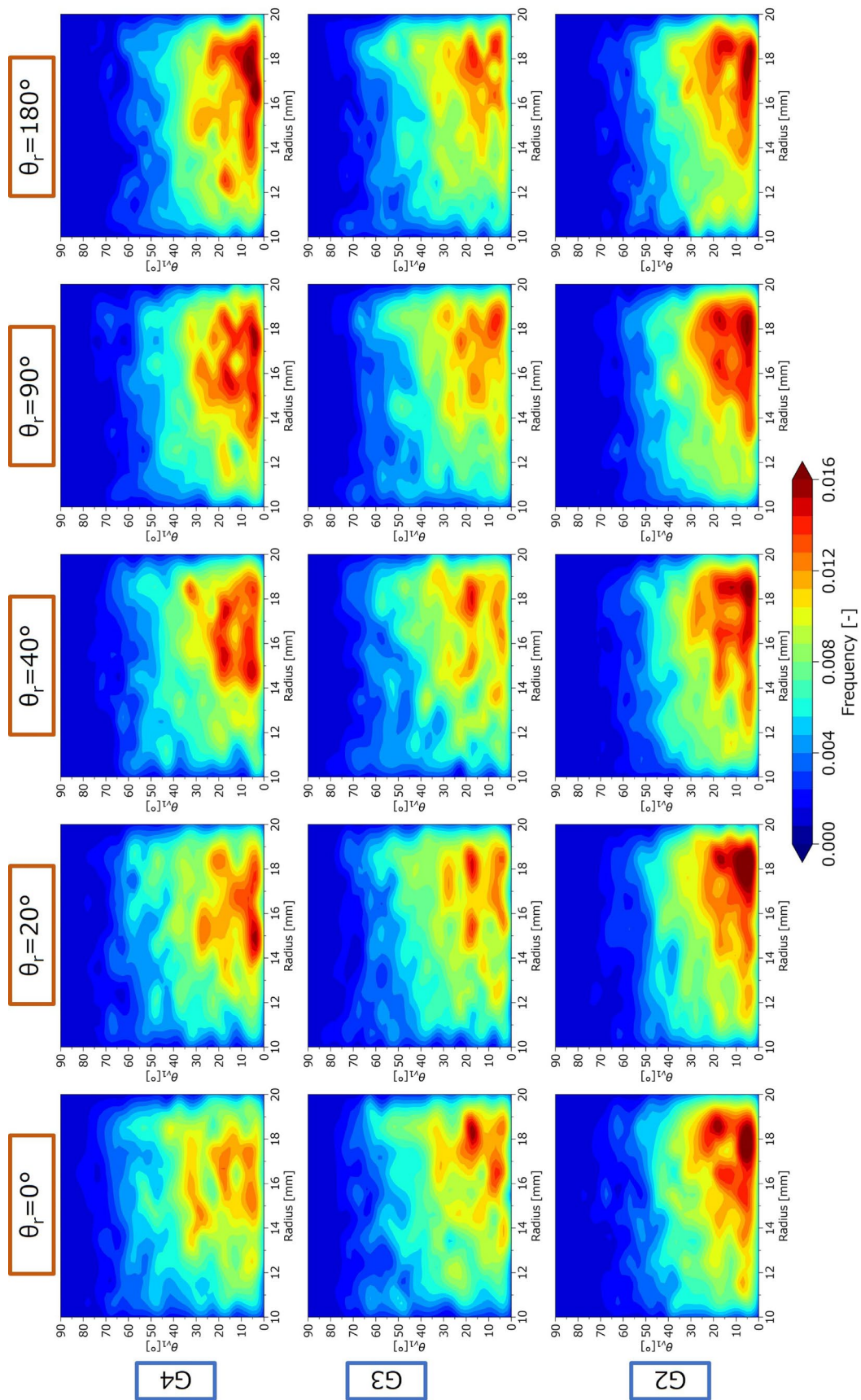


図 7-57 回転中心からの距離と θ_{v1} の関係 (Case1, 下部容器)

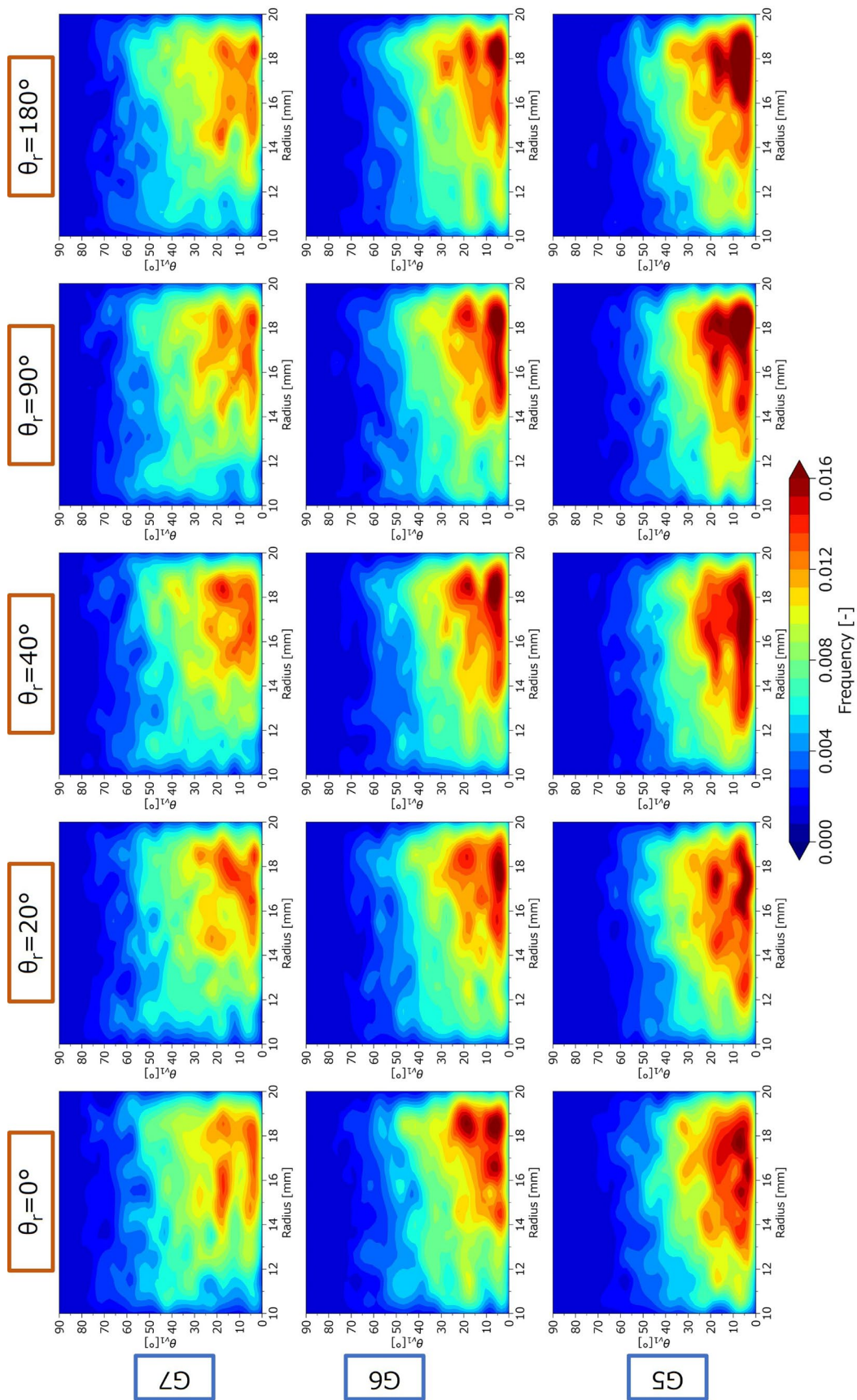


図 7-58 回転中心からの距離と θ_{nl} の関係 (Case1, 上部容器)

Case4 において，図 7-1 に示した IW3 の粒径加積曲線より求められる 5%粒子径 ($D_5=0.91\text{mm}$) と 95%粒子径 ($D_{95}=2.17\text{mm}$) の値を使って球体積の最小値と最大値を計算した後，粒子体積を指標としてせん断面に近い G4 と G5 に位置する大径粒子を抽出し，これまでと同様に θ_{h1} と θ_{v1} の結果をヒストグラムとして整理した結果を図 7-59 に示す．図 7-59 (a) は水平断面における大径粒子の θ_{h1} のヒストグラム，図 7-59 (b) は鉛直断面における大径粒子の θ_{v1} のヒストグラムを表す．

単一粒径の供試体 (Case1, 2) では，回転角度が 12° までは，水平断面においてせん断の方向に直交する長軸成分が僅かに増加するが，回転角度が 12° 以降に傾向が変わり，せん断の方向を向く長軸成分が増加する．また，鉛直断面においては，水平方向を向く長軸成分が増加する様子が確認された．一方，異なる粒径を混合した供試体 (Case4) において，大径粒子のみを抽出して θ_{h1} と θ_{v1} の結果を整理したところ，鉛直断面における θ_{v1} の変化の傾向は単一粒径の供試体 (Case1, 2) と概ね等しく，せん断が進行するにつれて θ_{v1} の $0\sim 30^\circ$ 成分が増加する様子が確認された (図 7-59 (b))．しかし，水平断面においては，単一粒径の供試体とやや異なる傾向が表れている． θ_{h1} の $0\sim 30^\circ$ 成分は，せん断の進行に伴う増加傾向は表れていないが， $30\sim 60^\circ$ 成分が増加しているように見える (図 7-59 (a))．つまり，異なる粒径が混合した供試体では，水平断面におけるせん断の方向と大径粒子の長軸方向の成す角度は，単一粒径の供試体に比べてやや大きくなる可能性が考えられる．但し，大径粒子は小径粒子に比べて数が圧倒的に少ないため，一部の粒子の変化であっても，ヒストグラムに与える影響が大きいことに留意する必要がある．今後詳細に検討する必要があると考えられる．

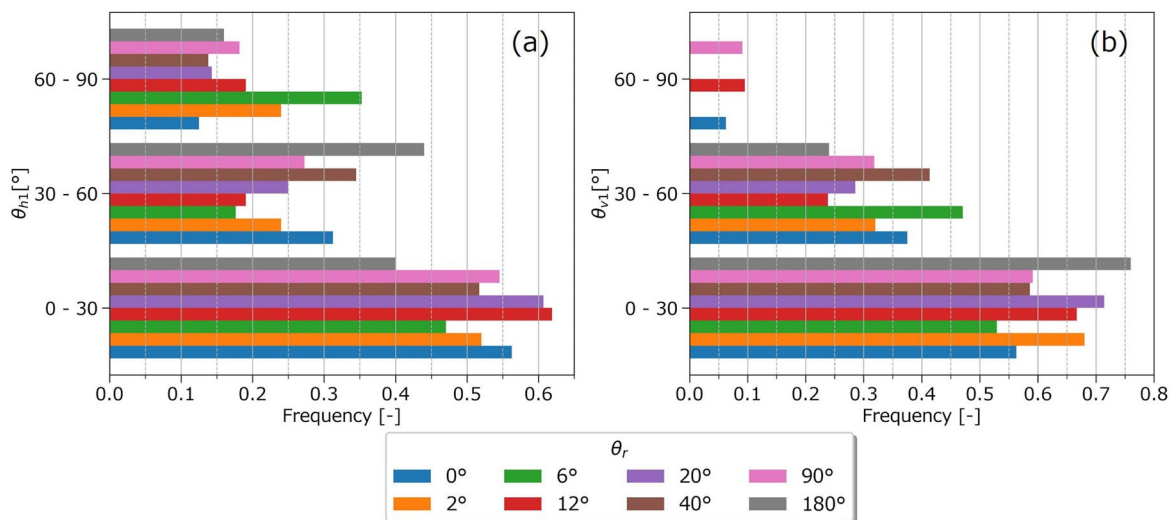


図 7-59 G4 と G5 に位置する大径粒子における長軸の方向変化 (Case4)

7.6 考察

本研究で開発したX線リング用せん断実験を使い、大変形を与えた場合のせん断帯をマイクロフォーカス X 線 CT で可視化し、画像解析を行って、変位置、間隙率、粒子の方向を評価した。本節では、(1)せん断の進行に伴う代表的な粒子構造の変化、(2)供試体作成方の影響、(3)粒子形状による影響、(4)異なる粒径が混合した供試体における変化の4点に分けて考察を行う。なお、各試験条件の評価結果については、本節末尾に図 7-62 として特徴を整理した。

(1) せん断の進行に伴う代表的な粒子構造の変化

Case1 の結果に基づき、せん断の進行に伴って生じた粒子構造の変化を以下に整理する。また、粒子方向のイメージを図 7-60 に示す。

i) ひずみ硬化 ($\theta_r < 6^\circ$)

回転して強制的に変位を与えられた下部容器だけでなく、固定された上部容器内においても回転方向に変位が生じる。また、供試体全体で間隙率が僅かに減少する。

ii) ひずみ硬化～ピーク応力付近 ($6^\circ \leq \theta_r < 20^\circ$)

せん断面付近では、間隙率が増加に転じる。但し、この時点では高間隙率の範囲がせん断の方向には連続しておらず、局所的な変化に留まっている。また、水平断面において、せん断の方向を向く長軸成分がわずかに減少し、せん断の方向に直交する長軸成分がわずかに増加する (図 7-60(a))。さらに、鉛直断面においては、水平方向を向く長軸成分が徐々に増加をし始める (図 7-60(c))。

iii) ピーク応力付近～ひずみ軟化 ($20^\circ \leq \theta_r < 40^\circ$)

ひずみが局所化していくと同じように、鉛直方向の変位置分布における遷移帯の幅が狭くなり、変位がせん断面付近に局所化する。せん断面付近では、変位ベクトル分布に局所的な擾乱が起こり、隣接する粒子への乗上げや落ち込みが生じる。水平断面においては、粒子の方向変化の傾向が変わり、せん断の方向を向く長軸成分が増加し、せん断の方向に直交する長軸成分が減少する (図 7-60(b))。さらに、鉛直断面においては、粒子長軸が水平方向を向くような変化が顕著に表れる (図 7-60(d))。また、間隙率が急激に増加をし始め、間隙率のバラつきが大きくなる。

iv) 残留状態 ($40^\circ \leq \theta_r$)

せん断面付近において、隣接する粒子への乗上げや落ち込みが生じる頻度が少なくなる。粒子の方向変化の傾向が変わることも無くなり、せん断の進行に伴って粒子の配向性が高まっていく。水平面においては、せん断の方向と粒子長軸の成す角度が 30° 以下の粒子が最大 7.5%増加する。また、鉛直面においては、水平面と粒子長軸の成す角度が 30° 以下の粒子が 9.8%増加し、水平面と粒子短軸の成す角度が 30° 以下の粒子が 10%減少する。せん断に伴う粒子の方向変化は、水平断面においては粒子長軸が、鉛直断面においては粒子長軸と短軸が影響を受けやすい。特に、リングせん断実験のように、回転によってせん断を行う試験の場合、回転中心からの半径距離が離れた位

置ほどせん断距離が長いため、外側に位置する粒子の方が粒子の方向が顕著に変化していると考えられる。一方、せん断面付近における間隙率は、せん断前と比べて中央値が 3.1%程度増加するが、回転角度が 40° 以降はほぼ高止まりし、最終的には、せん断の方向に連続するように、せん断面付近の間隙率が帯状に増加する。

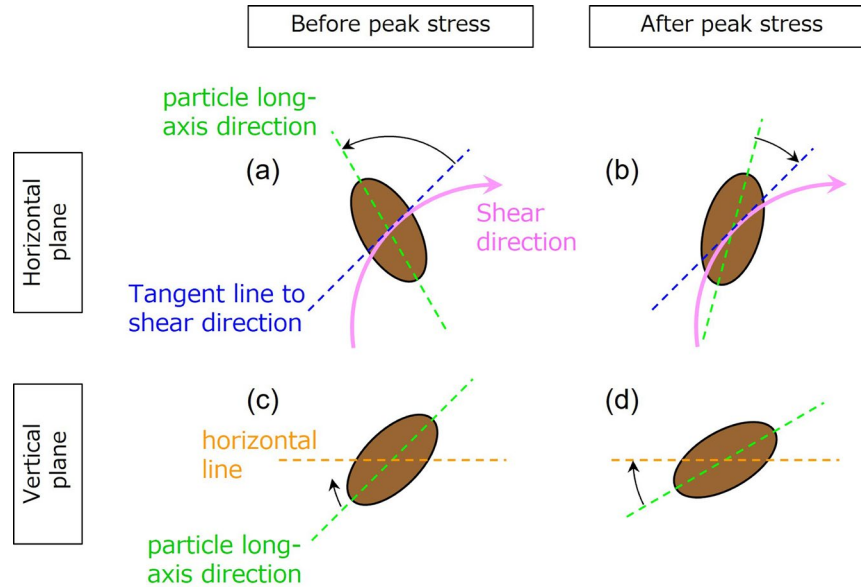


図 7-60 せん断の進行に伴う粒子の方向変化

先行研究によると、せん断帯内部には局所的に大きな空隙が形成されることが DEM 解析によって確認されており、残留状態においても新たな空隙は形成され続けられるが、同時に他の場所では空隙が潰れて消失するため、全体としてバランスが取れた状態になり体積変化が生じなくなるとされている⁷⁾。本実験においても、せん断応力がピークを越えあたりでせん断面付近の間隙率が急激に増加し、間隙率のバラつきが大きくなった。また、残留状態に移行するに従って、間隙率はほとんど変化しなくなっており、DEM 解析と概ね同じ結果となった。また、せん断帯内部では粒子回転が活発に起きていることも特徴の一つとして挙げられる。Oda(1998)は、平面ひずみ圧縮試験後の砂供試体からせん断帯付近の薄片を作成し、光学顕微鏡による観察を行って、せん断帯では一定の方向に粒子長軸が卓越することを明らかにした⁸⁾。また、村尾(2015)は、地すべり地から採取したすべり面の付近の粘土を使ってリングせん断実験を行い、せん断面付近の薄片を作成して電子顕微鏡による詳細観察を行っており、せん断面付近には、せん断の方向と平行に重なり合うように厚さ $80\mu\text{m}$ 程度のせん断層が形成され、細粒化したベッド（粘土粒子の凝集体）が配向することを報告している⁹⁾。本実験においても、せん断面付近では、せん断応力がピークを越える辺りで隣接する粒子への乗り上げや落ち込みが生じ、水平面ではせん断の方向を向く長軸成分が増加し、鉛直面では水平方向を向く長軸成分が増加し、残留状態に向かうに従って粒子の配向性が高まるような結果となった。本研究で行った評価は、粒子の回転を直接評価しているわけではなく、ある時点での

粒子の方向を評価しているという事に留意する必要があるが、せん断帯内部では粒子回転が起こっている事実はまず間違いないと考えられる。また、せん断応力がピークを迎えるより前には、水平面における長軸の方向変化の傾向が変わるような結果が得られた。本実験のように、回転方向にせん断を行うような実験もしくは数値解析を行った先行研究は少ないため、今後も慎重に検討する必要があるが、このような粒子の方向変化がピーク強度の出現に関係している可能性が考えられる。

(2) 供試体作成方の影響

IW5のみを用い、自由落下法で供試体を作成した Case1 と、試料をよく攪拌し供試体を作成した Case2 の結果を比較した結果、粒子の方向変化の程度にわずかな差はあったが、せん断応力の経時変化、間隙率、粒子の方向変化の傾向に大きな違いは見られなかった。これは、Case1 の供試体を作成する際、4回に分けて自由落下法によって砂を充填したが、その都度水平になるように均していたため、結果的には Case2 とほぼ同じような粒子の堆積構造になっていた可能性が考えられる。先行研究においては、置く角度を変えた容器を水浸させて砂を充填することで、異なる堆積構造の供試体を作成する工夫がなされている⁹⁾。従って、異なる堆積構造を有する供試体を作成するには、更に検討する必要がある。

(3) 粒子形状による影響

Case1 (使用材料: IW5) の回転角度が 0° の CT 画像を対象に行った粒子ファブリック解析の結果より、粒子形状指標 (アスペクト率 d_3/d_1 , 細長率 d_2/d_1 , 扁平率 d_3/d_2) の統計解析を行い、算術平均 (Mean), 標準偏差 (Std), 第 1 四分位数 (Q_{25} , 25%), 第 2 四分位数 (Q_{50} , 50%), 第 3 四分位数 (Q_{75} , 75%) を整理した結果を表 7-2 に示す。また、粒子形状指標のヒストグラム及び Zingg ダイアグラムを図 7-61 に示す。

表 7-2 粒子形状指標の統計解析結果

Material	Parameter	Mean	Std	Q_{25}	Q_{50}	Q_{75}
IW5	d_3/d_1	0.518	0.120	0.432	0.515	0.600
	d_2/d_1	0.727	0.126	0.641	0.735	0.823
	d_3/d_2	0.716	0.130	0.625	0.723	0.814
	S_k	0.717	0.089	0.658	0.722	0.781
GB	d_3/d_1	0.871	0.094	0.814	0.894	0.948
	d_2/d_1	0.899	0.089	0.851	0.925	0.970
	d_3/d_2	0.969	0.029	0.960	0.978	0.987
	S_k	0.920	0.065	0.885	0.938	0.972

表 7-2 において、 S_k は Krumbein 球形度であり、式(7.4)で計算される値である。

$$S_k = \sqrt[3]{\frac{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3}{d_1^3}} \quad (7.4)$$

ここに、 d_1 は長軸の粒子長さ [mm]、 d_2 は中間軸の粒子長さ [mm]、 d_3 は短軸の粒子長さ [mm] を表す。

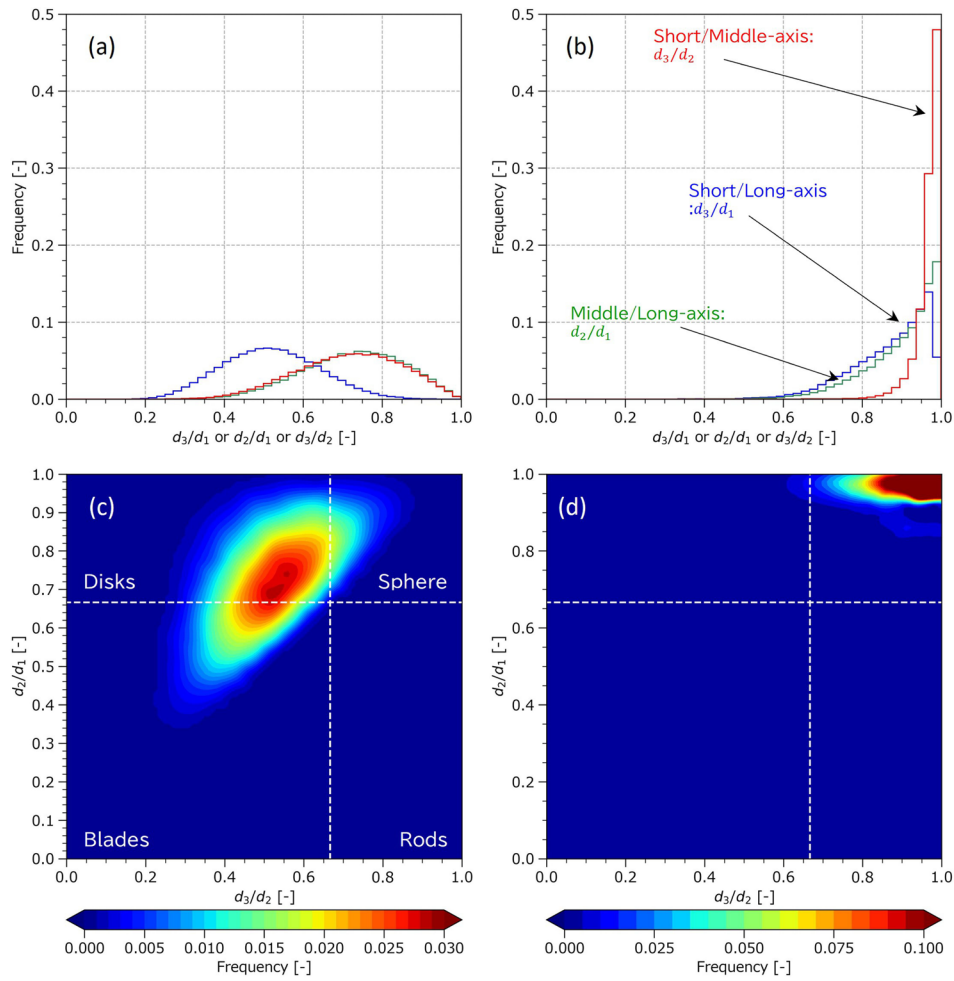


図 7-61 粒子形状指標の比較 (IW5, GB)

図 7-61(a)は IW5 の形状指標のヒストグラム、図 7-61(b)は GB の形状指標のヒストグラム、図 7-61(c)は IW5 の Zingg ダイアグラム、図 7-61(d)は GB の Zingg ダイアグラムを表す。なお、GB については、第 4 章で実施した 3 次元粒子ファブリック解析の結果を参照している。本章で Case3 として用いたガラスビーズとは粒度は異なるが、同じガラスビーズであることから相対的な形状指標に大きな違いはないと考えられる。

表 7-2 によると、GB のアスペクト率、細長率、扁平率の中央値は 0.89~0.98、Krumbein 球形度の中央値は 0.94 であり、ほとんどの粒子が球形状を示す。一方、IW5 のアスペクト率、細長率、扁平率の中央値は 0.52~0.74、Krumbein 球形度の中央値は 0.72 であった。IW5 と GB

の粒度に大差はないが、GBとIW5の粒子形状は大きく異なり、IW5の方がいびつな形状を示すことが分かる。また、IW5のZinggダイアグラムによれば、IW5の粒子の多くは円盤状(Disks)に分類される。

砂(IW5)を用いた実験(Case1, 2, 4)とガラスビーズ(GB)を用いた実験(Case3)のせん断応力の経時変化を比較すると、ガラスビーズの方が砂よりも早くせん断応力がピークに到達し、せん断応力のピーク値はガラスビーズの方が砂よりも小さかった。砂を用いた実験では、せん断応力がピークを越えた当りで、せん断面付近の間隙率が急激に増加し、せん断開始前と比較すると、間隙率の中央値は3.1%増加した。さらに、せん断帯における間隙率のバラつきが大きくなるような変化が確認された。一方、ガラスビーズを用いた実験では、砂を用いた場合に比べると、せん断面付近の間隙率の増加傾向は緩やかであり、間隙率の中央値は1.5%の増加に留まり、間隙率のバラつきに関してもほとんど変わっていない。

以上のことから、使用する粒子の形状がせん断挙動に及ぼす影響は大きく、せん断面付近に形成される空隙に与える影響も大きいと言える。特に、粒子の形状が砂のようにいびつであるほど、せん断の進行に伴って形成される空隙が局所的になると考えられる。

(4) 異なる粒径が混合した供試体における変化

単一粒径($D_{50}=0.66\text{mm}$)の供試体(Case1, 2)と、 D_{50} が 1.47mm の粒子を10%、 D_{50} が 0.66mm の粒子を90%混合した供試体(Case4)とを比較すると、せん断応力の経時変化には大きな違いは見られなかった。これは、本実験で混合した大径粒子の混合量が少なかったことや、試料充填時によく攪拌したことで、大径粒子同士の噛み合わせがほとんど無かったことが関係していると考えられる。間隙率においても、単一粒径の供試体と、異なる粒径が混合した供試体では、ほぼ同じような変化が確認された。但し、大径粒子の方が間隙率のバラつきがやや大きく、大径粒子の球近似半径の2倍程度の範囲に間隙率の局所的な変化が及んでいる可能性がある。一方、粒子の方向変化においては、両者に僅かな違いが確認された。大まかな傾向は単一粒径の供試体と同じであったが、異なる粒径が混合した供試体では、増減を繰り返しながら変化が生じていた。大径粒子のみに着目して粒子の方向を整理すると、鉛直断面においては単一粒径の供試体と概ね同じような変化が生じていた。しかし、水平断面においては、単一粒径の供試体と比較して、せん断の方向と成す角度がやや大きくなるような結果となった。

地すべりのすべり面や断層ガウジのような自然環境に存在するせん断帯は、主に細粒な粘土から成るため、マイクロフォーカスX線CTを使ってせん断帯の評価を行う場合、粘土粒子をCT画像上で識別することはまず不可能である。しかし、母岩が破碎し細粒な粘土に混入した数mm程度の岩片粒子は、マイクロフォーカスX線CTで十分に可視化することができる。本章で行った実験と材料特性が異なるため、今後も継続して検討する必要があるが、大径粒子が周辺の小径粒子と似たような変化が生じたという結果は、岩片粒子をキーマーカーとし、せん断の評価を行う可能性を見出すものであると考えられる。

	$\theta_r = 0^\circ$	$\theta_r = 20^\circ$	$\theta_r = 40^\circ$	$\theta_r = 90^\circ$	$\theta_r = 180^\circ$	参照図
せん断応力		ピーク($\theta_r = 15.2^\circ$) ピーク($\theta_r = 16.8^\circ$) ピーク($\theta_r = 8.8^\circ$) ピーク($\theta_r = 17.2^\circ$)				図 7-5
変位		せん断応力がピークに到達するまで は単調増加する(ひずみ硬化)。 せん断応力がピークに到達後、 減少する(ひずみ軟化)。		θ_r が60°以降、せん断応力にほぼ変化 が生じなくなる(残留状態)。	※ Case1, 2, 4は、せん断応 力の経時変化がほぼ等しい。	図 7-14~7-17 図 7-18
間隙率	Case1, 2, 4 試料全体で 間隙率が減少する。	せん断面付近の間 隙率が局所的に増 加する。	Case3 試料全体で 間隙率が減少する。	Case4 大径粒子の球近似半径の2倍程度範囲内では、特に間隙率のバラつきが大きくなる。 せん断面付近の間隙率が大きくなる。	Case1~4 下部容器だけでなく、上部 容器においても回転方向に変 位が生じる。 変位量の鉛直分布が漸移的 に変化する。 せん断面付近にせん断ベクト ル分布に局所的な擾乱が發生 する。 せん断面付近における変位ベクトル分布の擾乱が起こる 頻度が低下する。 変位量の鉛直分布に相対的な変化が無くなる。	図 7-20~7-23 図 7-24 図 7-26~7-29
粒子方向 (水平面)	Case1, 2 せん断の方向に對 して直交する長軸 成分がわずかに増 加する。	せん断の方向と同じ方向を向く長軸成分が増加する。				図 7-33~7-41
粒子方向 (鉛直面)	Case1, 2 水平方向を向く長軸成分 が徐々に増加する。	Case4 増減を繰り返しながら、全体的にはせん断の方向と同じ方向を向く長軸成分が増加する。 (大径粒子の粒子方向も、周辺の小径粒子と同じような変化が生じる)				図 7-42~7-50

※1: 使用材料: Case1, 2 (IW5), Case3 (GB), Case4 (IW3;10%, IW5: 90%)
 ※2: 供試体作成方法: Case1, 3 (自由落下法), Case2, 4 (自由落下法の後攪拌)

図 7-62 評価結果まとめ

7.7 第7章のまとめ

本章では、第6章において開発した、マイクロフォーカス X 線 CT による CT 撮影に対応した X 線 CT 用リングせん断実験装置を用い、大変形を与えた場合のせん断帯内部を可視化し、画像解析を行って粒子構造の変化を評価した。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) せん断変形が始まると、せん断面付近における間隙率が局所的に高くなり、せん断応力がピークを越える辺りで、急激に間隙率が増加し、間隙率のバラつきが大きくなる。残留状態に移行するに従って、高い間隙率を示す範囲がせん断の方向に連続するようになるが、間隙率の平均値は高止まりし、間隙率のバラつきにも変化がほとんど無くなる。
- 2) せん断変形が始まると、隣接する粒子への乗り上げや落ち込みによって粒子の方向に変化が生じる。水平面においては、まずせん断の方向に直交するような長軸成分がわずかに増加するが、せん断応力がピークを迎える前に傾向が変わり、せん断の方向を向く長軸成分が増加に転じる。鉛直面においては、せん断応力がピークを越える頃より、水平方向を向く長軸成分が増加する。残留状態に移行するに従って、せん断面付近において局所的な粒子の擾乱が起こる頻度は少なくなり、粒子の配向性が高まっていく。水平面においては、せん断の方向を向く長軸成分が 7.5%程度増加し、鉛直面においては水平方向を向く長軸成分が 9.8%程度増加した。せん断に伴う粒子の方向変化は、水平面においては粒子長軸が、鉛直面においては粒子長軸と短軸が影響を受けやすいことが明らかになった。
- 3) 粒度はほとんど同じであるが、形状が異なる砂（球形度の中央値 0.72）とガラスビーズ（球形度の中央値 0.94）で実験を行った。その結果、ガラスビーズの方が、せん断応力のピーク値が小さく、せん断応力が早くにピークに到達した。また、せん断開始前と比較すると、ガラスビーズにおける間隙率の中央値は 1.5%程度増加するに留まり、間隙率のバラつきもほとんど変わらなかった。一方、砂における間隙率の中央値は、せん断開始前と比較すると 3.1%程度増加し、間隙率のバラつきも大きくなった。また、ガラスビーズと比較すると、砂の方が間隙率の変化が急であった。以上の結果より、粒子の形状がせん断帯の微視構造に及ぼす影響が大きいと考えられる。
- 4) 異なる粒径が混合した供試体で実験を行った結果、せん断応力の経時変化や間隙率の変化は、単一粒径の供試体と概ね同じであった。但し、大径粒子周辺の間隙率に局所性が確認され、大径粒子の球近似半径の 2 倍程度まで影響が及んでいる可能性が確認された。また、大径粒子のみを抽出して粒子長軸の方向を整理した結果、単一粒径の供試体と似たような変化が確認された。但し、水平断面においては、単一粒径の供試体と比較すると、せん断の方向と粒子長軸の成す角度がわずかに大きくなる可能性がある。この結果は、地すべりのすべり面や断層ガウジ（断層運動によって岩石が破碎されて粘土のように細くなった領域）の評価において、母岩が破碎し細粒な粘土に混入した、マイクロフォーカス X 線 CT で識別可能な数 mm 程度の岩片粒子をキーマーカーとし、せん断の評価を行う可能性を見出すものであると考えられる。

参考文献

- 1) 野原慎太郎, 椋木俊文(2022): X線 CT用リングせん断実験装置の開発とせん断帯可視化の試み, 第57回地盤工学研究発表会.
- 2) Nohara, S., Mukunoki, T. (2022): Development of ring shear experiment in micro-focus X-ray CT scanner, 10th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG2022), pp.308-311.
- 3) Trenton T. Cladouhos (1999): Shape preferred orientations of survivor grains in fault gouge, Journal of Structural Geology, Vol.21, No.4, pp.419-436.
- 4) Nohara, S., Tanaka, S. Aiyama, K. (2019): Three-dimensional shape and orientation analysis of rock fragments in fault gouge by using micro focus X-ray Ct scanner, 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future, YSRM 2019, pp.766-770.
- 5) Schneider, C., Rasband, W., Eliceiri, K. (2012): NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, Nature Methods, No.9, pp.671-675.
- 6) 村尾英彦, 釜井俊孝, 野坂徹: リングせん断試験のせん断面と地すべり面における微視的構造の比較(2015), 日本地すべり学会誌, Vol. 52, No.3, pp.123-131.
- 7) Iwashita, K., Oda, M. (2000): Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method, Powder Technology, Vol.109, pp.192-205.
- 8) Oda, M.; Kazama, H. (1998): Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils, Geotechnique, Vol.48, No.4, pp.465-481.
- 9) Oda, M. (1972): Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material, Soils and Foundations, Vol.12, No.1, pp.17-36.

第8章 結論

本章では、各章の結論をまとめた後、今後の展望を述べ、本論文の結論とする。

8.1 本研究で得られた成果

ひずみの局所化を伴う地盤のせん断破壊現象は、局所性や不均質性の影響が大きく、微視的な観点からせん断帯の内部構造を評価しなければならない。特に、実際の砂供試体に対して、せん断帯が形成される過程も含めて微視的な粒子構造を定量的に評価することが重要である。そこで、本研究では、まず粒子の3次元形状や方向を評価可能な3次元粒子ファブリック解析手法の開発を行った。次に、供試体内部を非破壊で可視化することができるマイクロフォーカスX線CTを活用し、砂質土を対象とした室内実験を行ってせん断帯が形成される過程を可視化し、CT画像を対象とした画像解析を行うことでせん断帯の粒子構造の変化を定量的に評価した。以下に、本研究における成果について述べる。

(1) 3次元粒子ファブリック解析手法の開発

マイクロフォーカスX線CTが実用化された事によって、せん断帯の微視構造を可視化することが可能になった。また、実験とCT撮影を連動させた研究が行われるようになるとともに、DIC解析に代表される画像解析手法が普及した事によって、ひずみを定量化することが可能になった。一方、せん断帯が形成される過程では、粒子間の滑りや粒子自身の回転が高頻度で発生し、ひずみの発生に大きく関係する可能性が知られていたが^{1),2)}、粒子方向の変化と関連づけて評価されることはほとんど無く、CT画像から精度良く粒子の方向を評価可能な画像解析手法の確立が必要であった。

そこで、本研究では、粒子の形状や方向を3次元で評価可能な3次元粒子ファブリック解析手法を構築した。本研究で開発した手法は、砂粒子を楕円体として近似することで粒子の形状や方向を評価する。既往の画像解析技術は、粒子の特異な形状の影響を受けやすく^{3),4)}、自然の砂のようにいびつな形状を示す粒子への適用性については課題があったが、本研究で開発した手法は、粒子の断面積を指標とし楕円体近似するため、粒子表面の凹凸の影響を受けにくく、いびつな形状の粒子であっても平均的な楕円体として近似することが可能である。また、ボクセル画像をメッシュモデルのような別のモデルに変換する必要はなく、粒子の形状によってパラメーターを変える必要はないことから、利便性の良い評価手法であると言える。さらに、構築した手法に基づき、非線形最小二乗法を使って楕円体一般式の未知数を評価可能な解析プログラムを開発したことによって、多数の粒子のファブリック性状を体系的に評価することが可能になった。

本研究で開発した手法の妥当性は、3Dプリンターで作成した楕円体粒子、ガラスビーズ、自然の砂を使って検証し、粒子の設計仕様や画像解析式粒度分布計の計測結果と比較した。統計量に大きな違いが表れていないことを確認し、本手法によって精度良く粒子の3次元形状を

評価できることを確認した。CT 画像から粒子の形状や方向を 3 次元的に評価するようなニーズは本研究で対象とする分野以外にも多く、他分野においても本研究で開発した技術が貢献できると考えられる。

(2) X 線 CT 用リングせん断実験装置の開発

地盤に荷重が載荷されると、ひずみの増加に伴ってせん断応力が増加してピークを迎え、ひずみ軟化を経て残留状態に至る。多くの実験装置は、室内で与えることができるせん断変位量に限界がある。しかし、残留強度を必要とする土木構造物の安全評価や、地すべりや断層のような自然環境におけるせん断の評価においては、大変形を想定して実験を行うことが必要不可欠であった。そこで、本研究では、円周方向に回転し長いせん断変位を与えることができるリングせん断実験に着目し、マイクロフォーカス X 線 CT を活用して内部を可視化できる X 線 CT 用リングせん断実験装置を開発した。本実験装置は、試料の乱れや位置ずれを最小限に抑えるべく、X 線 CT のターンテーブル上で全ての実験を行うことができ、X 線 CT のターンテーブル上に収まるようコンパクトな設計とした。また、一般的なリングせん断実験装置よりもせん断容器のサイズを小さくすることで、珪砂 5 号程度の砂であれば、マイクロフォーカス X 線 CT を使って砂粒子の形状を捉えることができるよう工夫した。さらに、従来装置ではせん断の進行に伴って上下リング間の隙間から試料が漏出することが課題となっていたが、せん断容器に対策を施すことによって、試料漏出を抑制することができた。以上の特徴を有する X 線 CT 用のリングせん断実験装置を用いて実験を行い、大変形を与えた場合におけるせん断帯内部の微視構造を、マイクロフォーカス X 線 CT を使って可視化することができた。

(3) せん断の進行に伴う粒子構造の変化

一面せん断試験と本研究で開発した X 線 CT 用リングせん断実験装置を用いた実験を行い、マイクロフォーカス X 線 CT を使ってせん断帯が形成される過程を可視化し、CT 画像の画像解析を行うことでせん断帯内部の微視構造を定量的に評価した。せん断が始まってせん断応力がピークを越えるまでは、せん断帯内部では間隙率が単調増加し、間隙率のバラつきが大きくなる。接触面率（代表体積要素における接触面に相当する画素の割合）はせん断が始まった直後に急激に減少し、粒子間の噛み合わせが外れた状態になるが、せん断が進行すると変化がほとんど無くなり、局所的な粒子間の噛み合わせの再構築や消失が均衡する。ひずみ軟化状態に移行した後は、間隙率の増加は高止まりし、変化がほとんど無くなる。DIC 解析の結果によると、せん断応力がピークを越えて暫くは体積膨張が支配的である。ひずみ軟化状態においては、体積ひずみのバラつきが大きくなるものの、せん断内部で体積収縮と体積膨張の釣り合いが取れ、体積変化がほとんど無くなり、せん断ひずみが単調的に増加する。本研究で開発した 3 次元粒子ファブリック解析手法を適用し、砂粒子の方向を評価した結果、せん断帯では粒子の方向に変化が生じ、粒子が回転した痕跡が確認された。一方、せん断帯以外では、粒子方向に大きな変化は生じなかった。過去には数値計算によってせん断帯形成に粒子回転が大きく影響す

る可能性が報告されていたが⁵⁾、本研究でも矛盾の無い実験結果が得られた。

本研究で開発した X 線 CT 用リングせん断実験装置を使って実験を行った結果、水平面において、せん断応力がピークを迎える前はせん断の方向に直交する長軸成分が増加し、その後はせん断の方向と同じ方向を向く長軸成分が増加に転じ、残留状態に移行するに従って配向性が高まるような特徴的な結果が得られた。回転方向にせん断を行うような実験もしくは数値解析を行った既往研究は少ないため、今後も検討は必要であるが、せん断面における粒子方向の変化がピーク強度の出現に影響している可能性がある。また、砂とガラスビーズの実験を比較したところ、砂を用いた実験の方が、せん断に伴う間隙率の変化が急であり、間隙率のバラつきが大きくなるような結果となり、粒子の形状がせん断帯の形成に大きく影響を及ぼすことが確認された。さらに、異なる粒径が混合した供試体で実験を行い、大きい粒子径の砂粒子の方向を整理した結果、大きい粒子径の砂粒子は、周辺の小さい粒子径の砂粒子と似たような変化が生じることを確認した。このことから、地すべりや断層の評価において、CT 画像で識別可能なサイズの粒子をキーマーカーとして評価し、せん断の挙動を評価できる可能性を見出すことができた。

8.2 今後の展望

本研究の結果を踏まえ、今後の展望を以下に述べる。

(1) 粒子の回転量を評価する画像解析手法の開発

本研究で開発した 3 次元粒子ファブリック解析手法によって、CT 画像中の粒子の方向を体系的に評価できるようになった。また、一面せん断試験及びリングせん断実験における CT 画像の評価を行うことで、せん断の進行に伴って粒子の方向に変化が生じることを確認した。しかし、本研究では、粒子個々の移動量や回転量を厳密に評価しているわけではない。つまり、一定の範囲において、ある方向への回転量と同じ量の回転が反対方向に生じた場合、粒子方向のヒストグラムは同じになってしまうため、粒子が回転した形跡を見逃してしまう可能性がある。現時点でも粒子個々の挙動を評価する試みは行われているが⁶⁾、画像セグメンテーション技術の向上と併せて、粒子追跡可能な画像解析手法の開発が必要であると言える。

(2) 地すべりや断層のようなせん断帯における評価手法の高度化

本研究では、X 線 CT 用のリングせん断実験装置を開発し、地すべりや断層のような長いせん断変位が与えられた状態を室内で再現し、せん断帯の構造変化をマイクロフォーカス X 線 CT で可視化した。また、異なる粒径が混合した砂供試体を使って実験し、大きい粒子径の砂粒子が、周辺の小さい粒子径の砂粒子と似たような変化が生じることを確認した。このことによって、CT 画像で識別可能なサイズの粒子をキーマーカーとし、せん断の評価を行う可能性を見出すことができた。一方、地すべりのすべり面や断層ガウジ（断層運動によって岩石が破碎されて粘土のように細くなった領域）では、粒子径が小さい粘土を母材としていることが多く、材料を変えた実験を行う必要がある。その他にも、キーマーカーとなる大きい粒径の形

状による影響や、せん断帯における分級の影響等についても検討し、微視的構造からせん断の方向や応力状態を評価する手法を高度化する必要がある。

(3) CT 画像を活用した応力-ひずみモデルの構築

本研究で開発した 3 次元粒子ファブリック解析手法によって、CT 画像中の砂粒子を楕円体として近似することが可能になった。このことによって、楕円体粒子を取り扱い可能な DEM 等の数値解析における計算粒子のモデル化が容易となり、CT 画像から評価したひずみ等の情報と、数値解析で評価された局所的な応力分布を関連づけて議論できる可能性がある。また、材料力学の分野においては、二つの物体が互いに接触している場合、局所的な変形によって接触面が生じ、そこに作用する接触応力に関する理論式が示されている⁷⁾。このようなモデルは、粒子形状や粒子間の摩擦による影響は考慮されていないので、砂のせん断問題に展開するには更なる検討が必要である。しかし、砂粒子をシンプルな楕円体として近似できたことによって、CT 画像から粒状材料の応力場を簡便に推定できる可能性が出てきたと言える。数値解析による検討も含め、微視的な構造変化を取り入れた応力-ひずみモデルの議論を更に進める必要がある。

参考文献

- 1) Matsuoka, H. (1974): A microscopic study on shear mechanism of granular materials, *Soils and Foundations*, Vol.14, No.1, pp.29-43.
- 2) Oda, M.; Kazama, H. (1998): Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils, *Geotechnique*, Vol.48, No.4, pp.465-481.
- 3) Ketcham, R.A. (2005): Three-dimensional grain fabric measurements using high-resolution X-ray computed tomography, *Journal of Structural Geology*, Vol.27, No.7, pp.1217-1228.
- 4) The University of Texas High-Resolution X-ray Computed Tomography Facility, QUANT3D, <https://www.crlab.geo.utexas.edu/software/quant3d/> (最終アクセス日：2022/9/26) .
- 5) 榎原辰雄, 加藤昭二, 吉村優治, 澁谷啓(2008): 砂のような粒状材料のせん断挙動およびせん断層に与える粒子形状の影響, *土木学会論文集 C*, Vol.64, No.3, pp.456-472.
- 6) Andò, E., Hall, S.A., Viggiani, G., Desrues, J., Bésuelle, P. (2012): Experimental micromechanics Grain-scale observation of sand deformation, *Geotechnique Letters*, Vol.2, No.7-9, pp.107-112.
- 7) 一般社団法人 日本機械学会 機械工学辞典, <https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/> (最終アクセス日：2022/11/22)

付録 A : 楕円体断面積の理論式の導出

3次元空間における楕円体の一般式は、次式で表される。

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Fyz + 2Gzx + 2Hxy + 2Lx + 2My + 2Nz + D = 0 \quad (\text{A-1})$$

但し、原点を中心とする楕円体である場合、式(A-1)における未知数が3つ減り、式(A-2)のようになる。

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Fyz + 2Gzx + 2Hxy + D = 0 \quad (\text{A-2})$$

式(A-2)に示した楕円体を切断する平面の方程式は、法線ベクトル n_{px} , n_{py} , n_{pz} により、式(A-3)~(A-5)で表される。

$$n_{px}x + n_{py}y + n_{pz}z = 0 \quad (\text{A-3})$$

$$\Leftrightarrow z = -(n_{px}x + n_{py}y)/n_{pz} \quad (\text{A-4})$$

$$\begin{aligned} n_{px} &= \sin \theta_i \cos \phi_i \\ n_{py} &= \sin \theta_i \sin \phi_i \\ n_{pz} &= \cos \theta_i \end{aligned} \quad (\text{A-5})$$

ここに、 θ_i と ϕ_i は、法線ベクトルを定義するための角度である ($0 \leq \theta_i, \phi_i \leq 180^\circ$)。また、下付き添え字の i は各粒子において計算する断面積のインデックス番号である。

式(A-4)を式(A-2)に代入し係数を整理すると、式(A-6)が得られる。

$$\begin{aligned} &\left(\frac{An_{pz}^2 + Cn_{px}^2 - 2Gn_{px}n_{pz}}{n_{pz}^2} \right) x^2 \\ &+ 2 \left(\frac{Cn_{px}n_{py} - Fn_{px}n_{pz} - Gn_{py}n_{pz} + Hn_{pz}^2}{n_z^2} \right) xy \\ &+ \left(\frac{Bn_{pz}^2 + Cn_{py}^2 - 2Fn_{py}n_{pz}}{n_{pz}^2} \right) y^2 + D = 0 \end{aligned} \quad (\text{A-6})$$

ここで、楕円体の断面は必ず楕円であることから、2次元断面において楕円の面積を計算することを考える。楕円の一般式は、係数 a, b, c, f, g, h を使い、式(A-7)のように表される。

$$ax^2 + 2hxy + by^2 + 2gx + 2fy + c = 0 \quad (\text{A-7})$$

$$\Leftrightarrow [x \ y] \begin{bmatrix} a & h \\ h & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + 2[g \ f] \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + c = 0 \quad (\text{A-8})$$

式(A-8)の左辺第1項の行列を対角化して得られる固有値を用い、楕円の面積は、式(A-9)で計算することができる。

$$S_e = \frac{-c\pi}{\sqrt{ab - h^2}} \quad (\text{A-9})$$

式(A-6), (A-7)を比較し, 式(A-9)で示した計算式を用いることにより, 3次元楕円体における断面積の理論式は, 次式のように導出される.

$$S_e = \frac{-D\pi}{\sqrt{e_1 + e_2 + e_3 + e_4 + e_5 + e_6}} = \frac{-D\pi}{\sqrt{e}} \quad (\text{A-10})$$

$$e_1 = (BC - F^2)n_{px}^2$$

$$e_2 = (AC - G^2)n_{py}^2$$

$$e_3 = (AB - H^2)n_{pz}^2$$

$$e_4 = 2(FG - CH)n_{px}n_{py}$$

$$e_5 = -2(BG - FH)n_{px}n_{pz}$$

$$e_6 = -2(AF - GH)n_{py}n_{pz}.$$

(A-11)

付録 B : 楕円体の一般式からの軸長さ, 回転軸, 回転角度を計算する方法

3次元空間において原点を中心とする楕円体は, 式(B-1)のように表される.

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Fyz + 2Gzx + 2Hxy + D = 0 \quad (\text{B-1})$$

ここで, 式(B-1)を行列表現すると, 式(B-1)は式(B-2)のように変形される.

$$[x \ y \ z] \begin{bmatrix} A & H & G \\ H & B & F \\ G & F & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + D = 0 \quad (\text{B-2})$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + D = 0 \quad (\text{B-3})$$

式(B-3)における行列 \mathbf{Q} を対角化する直交行列を \mathbf{P} , 座標変換後の座標系を $\mathbf{x} = [x' \ y' \ z']^T$ とすると, 式(B-3)は式(B-4)のように変形される.

$$\begin{aligned} & \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{Q} \mathbf{P} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{x} + D = 0 \\ \Leftrightarrow & [\mathbf{x}'^T \mathbf{P}] [\mathbf{P}^{-1} \mathbf{Q} \mathbf{P}] [\mathbf{P}^{-1} \mathbf{x}] + D = 0 \\ & [\mathbf{x}'^T \mathbf{P}] [\mathbf{P}^{-1} \mathbf{Q} \mathbf{P}] [\mathbf{P}^{-1} \mathbf{x}] + D = 0 \\ & [\mathbf{P}^T \mathbf{x}]^T [\mathbf{P}^{-1} \mathbf{Q} \mathbf{P}] [\mathbf{P}^{-1} \mathbf{x}] + D = 0 \\ & \mathbf{x}'^T \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \gamma \end{bmatrix} \mathbf{x}' + D = 0 \\ & -\frac{\alpha}{D} x'^2 - \frac{\beta}{D} y'^2 - \frac{\gamma}{D} z'^2 = 1 \end{aligned} \quad (\text{B-4})$$

ここに, α, β, γ は行列 \mathbf{Q} の固有値を表す.

ここで, 楕円体の軸半径を r_x, r_y, r_z とすると, 楕円体は次式によっても表される.

$$\frac{x'^2}{r_x^2} + \frac{y'^2}{r_y^2} + \frac{z'^2}{r_z^2} = 1 \quad (\text{B-5})$$

式(B-4)と式(B-5)を比較することにより, 図 4-4 において示した楕円体の軸長さ d_x, d_y, d_z は式(B-6)によって計算される.

$$\begin{aligned} d_x &= 2r_x = \sqrt{-D/\alpha} \\ d_y &= 2r_y = \sqrt{-D/\beta} \\ d_z &= 2r_z = \sqrt{-D/\gamma} \end{aligned} \quad (\text{B-6})$$

また、**図 4-4**において示した楕円体の回転軸及び回転角度は、直交行列の成分より、式(B-7)、(B-8)を使って計算される。

$$\theta_e = \cos^{-1} \left(\frac{P_{11} + P_{22} + P_{33} - 1}{2} \right) \quad (\text{B-7})$$

$$\begin{bmatrix} n_{ex} \\ n_{ey} \\ n_{ez} \end{bmatrix} = \frac{1}{2 \sin \theta_e} \begin{bmatrix} P_{32} - P_{23} \\ P_{13} - P_{31} \\ P_{21} - P_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{B-8})$$

付録 C : Gauss-Newton 法における計算方法

楕円体一般式における断面積は、式(C-1)～(C-4)で表される。

$$S_e = \frac{-D\pi}{\sqrt{e_1 + e_2 + e_3 + e_4 + e_5 + e_6}} = \frac{-D\pi}{\sqrt{e}} \quad (\text{C-1})$$

$$e_1 = (BC - F^2)n_{px}^2$$

$$e_2 = (AC - G^2)n_{py}^2$$

$$e_3 = (AB - H^2)n_{pz}^2$$

$$e_4 = 2(FG - CH)n_{px}n_{py}$$

$$e_5 = -2(BG - FH)n_{px}n_{pz}$$

$$e_6 = -2(AF - GH)n_{py}n_{pz}$$

$$n_{px}x + n_{py}y + n_{pz}z = 0 \quad (\text{C-3})$$

$$n_{px} = \sin \theta_i \cos \phi_i$$

$$n_{py} = \sin \theta_i \sin \phi_i \quad (\text{C-4})$$

$$n_{pz} = \cos \theta_i$$

ここで、 A, B, C, D, F, G, H は楕円体一般式における未知数、 S_e は楕円体の断面積、 n_{px} 、 n_{py} 、 n_{pz} は楕円体の評価対象断面における法線ベクトル、 θ_i 、 ϕ_i は、法線ベクトルを定義するための角度である ($0 \leq \theta_i, \phi_i \leq 180^\circ$)。

本研究では、CT 画像から抽出した粒子の断面積と楕円体の断面積との誤差を最小化するため、非線形最小二乗法の一つである Gauss-Newton 法を使って最適化計算を行い、楕円体一般式における未知数の組み合わせを評価する。ここで、CT 画像から抽出した粒子において計算した 132 組の断面積を $S_{p,i}$ ($i=1 \sim 132$)、楕円体一般式における 7 つの未知数を β_j ($j=1 \sim 7$) とする。この時、残差行列 r_i は式(C-5)で表される。

$$r_i(\beta_j) = S_{p,i} - S_{e,i}(\beta_j) \quad (\text{C-5})$$

ここで、式(C-1)を式(C-5)の右辺第 2 項に代入すると、次式が得られる。

$$r_i(\beta_j) = S_{p,i} + \frac{D\pi}{\sqrt{e_i}} \quad (\text{C-6})$$

Gauss-Newton 法におけるパラメーターの更新は、式(C-7)に従う。

$$\beta_j^{k+1} = \beta_j^k - (J_r^T J_r)^{-1} J_r^T r_i(\beta_j^k) \quad (\text{C-7})$$

ここで、上付き添え字の k は反復回数を、 T は行列の転置を表す。また、 J_r は式(C-6)のヤコビアン行列であり、次式で表される。

$$J_r = \frac{\partial r_i}{\partial \beta_j} = \frac{\partial r_i}{\partial e_i} \frac{\partial e_i}{\partial \beta_j} \quad (\text{C-8})$$

$$\Leftrightarrow J_r = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial e_1} \frac{\partial e}{\partial A} & \frac{\partial r_1}{\partial e_1} \frac{\partial e_1}{\partial B} & \cdots & \frac{\partial r_1}{\partial e_1} \frac{\partial e_1}{\partial H} \\ \frac{\partial r_2}{\partial e_2} \frac{\partial e}{\partial A} & \frac{\partial r_2}{\partial e_2} \frac{\partial e_2}{\partial B} & \cdots & \frac{\partial r_2}{\partial e_2} \frac{\partial e_2}{\partial H} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_{132}}{\partial e_{132}} \frac{\partial e_{132}}{\partial A} & \frac{\partial r_{132}}{\partial e_{132}} \frac{\partial e_{132}}{\partial B} & \cdots & \frac{\partial r_{132}}{\partial e_{132}} \frac{\partial e_{132}}{\partial H} \end{bmatrix}$$

式(C-8)の各項は、式(C-6)及び式(C-2)を微分することにより、式(C-9)～(C-16)のように計算することができる。

$$\frac{\partial r}{\partial e} = -\frac{D\pi}{2e\sqrt{e}} \quad (\text{C-9})$$

$$\frac{\partial e}{\partial A} = Cn_{py}^2 + Bn_{pz}^2 - 2Fn_{py}n_{pz} \quad (\text{C-10})$$

$$\frac{\partial e}{\partial B} = Cn_{px}^2 + An_{pz}^2 - 2Gn_{px}n_{pz} \quad (\text{C-11})$$

$$\frac{\partial e}{\partial C} = Bn_{px}^2 + An_{py}^2 - 2Hn_{px}n_{py} \quad (\text{C-12})$$

$$\frac{\partial e}{\partial D} = 0 \quad (\text{C-13})$$

$$\frac{\partial e}{\partial F} = -2Fn_{px}^2 + 2Gn_{px}n_{py} + 2Hn_{px}n_{pz} - 2An_{py}n_{pz} \quad (\text{C-14})$$

$$\frac{\partial e}{\partial G} = -2Gn_{py}^2 + 2Fn_{px}n_{py} - 2Bn_{px}n_{pz} + 2Hn_{py}n_{pz} \quad (\text{C-15})$$

$$\frac{\partial e}{\partial H} = -2Hn_{pz}^2 - 2Cn_{px}n_{py} + 2Fn_{px}n_{pz} + 2Gn_{py}n_{pz} \quad (\text{C-16})$$

謝辞

本論文は、著者が2017年から2022年までに(一財)電力中央研究所において実施した研究の成果や、熊本大学大学院自然科学教育部工学専攻の博士後期課程の在学期間において実施した研究成果をまとめたものです。

熊本大学大学院先端科学研究部社会基盤環境部門の椋木俊文教授には、指導教員として多大なご指導を賜りました。X線CTを活用した研究で学位取得したいとの願いを聞いて頂き、社会人博士課程の学生として受け入れて頂きました。博士後期課程への進学とほぼ同時に、国内外で新型コロナウイルス感染症による影響が拡大し、当初計画していた予定を大幅に変えざるを得ませんでした。打ち合わせ方法等を工夫して頂き、終始懇切なるご指導と励ましの言葉を頂きました。2016年度に(一財)電力中央研究所にマイクロフォーカスX線CTが導入されてから、ほぼ独学でX線CTの活用方法に模索し、今後の研究展開に大きな不安を感じていましたが、熊本大学での博士後期課程への進学をきっかけに画像解析に関する見識を深め、当該研究分野の新たな可能性を見出すことができました。ここに記して感謝いたします。

熊本大学理事・副学長の大谷順教授、熊本大学大学院先端科学研究部社会基盤環境部門の佐藤晃教授、辻本剛三教授には、ご多忙の中、論文の構成や内容に関して貴重なアドバイスを頂きました。名城大学の小高猛司教授、中部土質試験共同組合ジオ・ラボ中部の久保裕一氏には、リングせん断実験の解釈等について有益なご助言を頂きました。フランスGrenoble Alpes大学のViggiani教授には、3次元粒子ファブリック解析手法の有効性について議論させて頂きました。ここに記して感謝いたします。

(一財)電力中央研究所サステナブルシステム研究本部の上田圭一首席研究員、青柳恭平研究推進マネージャーには、マイクロフォーカスX線CTの導入において配慮して頂き、社会人博士課程への進学を許可して頂きました。(一財)電力中央研究所サステナブルシステム研究本部の末永弘研究推進マネージャーには、入所以来多くのことを指導して頂き、学位取得を支援して頂きました。(一財)電力中央研究所サステナブルシステム研究本部の中田弘太郎研究推進マネージャーには、在学中に組織体制が変わり、新たに研究を始める必要があったにも関わらず、博士後期課程での研究について配慮して頂きました。ここに記して感謝いたします。

本研究の一部は、公益財団法人深田地質研究所「2020年度深田研究助成」の支援を受けて行いました。ここに記して感謝いたします。

最後になりましたが、父・喜一、母・悦子には、ありとあらゆる場面で温かく見守り続けて頂きました。また、妻・裕梨、長男・聡一郎、次男・稜太には、普段の業務に加え、学位取得に向けた研究で慌ただしくしている中、温かく励ましの声をかけて頂きました。両親・家族のサポート無しには学位を取得することができなかつたと思います。改めて心から感謝します。本当にありがとうございました。

2023年3月
野原慎太郎

論文目録

学術論文	Nohara, S., Mukunoki, T. (2021): Quantitative evaluation of soil structure and strain in three dimensions under shear using X-ray computed tomography image analysis, <i>Journal of Imaging</i> , Vol.7, No.11, 230.
論文(査読付き) 国際会議	Nohara, S., Mukunoki, T. (2022): Development of ring shear experiment in micro-focus X-ray CT scanner, <i>10th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG2022)</i> , pp.308-311.
学会発表	野原慎太郎, 椋木俊文 (2020): X 線 CT を用いた砂粒子のファブリック解析, 第 55 回地盤工学研究発表会.
学会発表	野原慎太郎, 椋木俊文 (2022): X 線 CT 用リングせん断実験装置の開発とせん断帯可視化の試み, 第 57 回地盤工学研究発表会.
学会発表	野原慎太郎, 椋木俊文 (2022): CT 画像の画像解析による砂質土におけるせん断帯の透水経路の推定, 2022 年日本地下水学会秋季講演会.
助成金	2020 年度深田研究助成 研究課題「X 線 CT を用いたせん断帯の微視的構造評価による力学モデルの構築」

以上