

静水圧増加に伴うS波速度変化と内部構造変化 —砂・シルトコアの場合—

高橋 学^{1*}・高橋 直樹²・安 昶完³・竹村 貴人⁴

¹産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

²三井・住友建設技術開発センター

³埼玉大学大学院理工学研究科

⁴日本大学文理学部地球システム科学科

*E-mail: takahashi-gonsuke@aist.go.jp

地表サンプルから深度方向の物性データを評価するため、応力（静水圧）と内部構造変化（空隙サイズ分布）との関係を既存ボーリングコアを用いて明らかにすることを目的とした。菖蒲町コアを用いた室内計測結果では、10MPaの静水圧増加に伴いP波速度は600m/sの速度増加を、S波速度は300m/sの速度増加を示した。静水圧の増加に伴う内部構造変化を把握するため、 μ フォーカスX線CTとCT用压力容器を用いて深度400mに相当する圧力10MPaにおけるデータ取得を行った。空隙が中心と考えられる領域にターゲットを絞り、その領域の幾何学情報を抽出した。

Key Words : depth dependency, S wave velocity, inner structur, geometry in the low density region, three-dimensional geometrical information

1. はじめに

P, S波速度は地下構造物設計時や液状化対策および評価時には重要な物性定数となる。特に、原位置計測で得られたS波速度の値は有限要素法を用いた動的解析には必須のパラメータである。Yamamizu(1996)¹⁾は岩槻、下総、府中における深度3000mの深井戸を用いたP/S波速度計測をシステムティックに計測している。これは地震学や地震工学的な観点からの実施である。Brocher(2005)²⁾は北カリフォルニア地域を対象として数種の岩石に対してP波速度の深度依存性に関する経験式を提案している。これらの解釈を行う場合には粒状体としての取り扱いを念頭に置かなければならず、Gassman(1955)³⁾の理論の適用が一般的におこなわれている。この場合、P/S比が弾性論で考えられる範囲内にあることが必要であるが、原位置におけるS波速度値が小さすぎる場合が多い。本文で紹介する様に特に深度が浅い状況では、P/S波速度比が5以上と高い値を示す場合が多い。そこで、porous mediaの取り扱いのプロセスを捨て、内部構造変化とコアサンプルにおけるP, S波速度の精密計測から静水圧の増加に伴う空隙を多く含む領域の幾何学情報を抽出し、その情報から速度変化を説明する可能性を探った。得られているボーリングコ

アは数量的に限られていることから、原位置情報の再現を室内試験で再現する手段としては妥当と考えられる。

静水圧条件下における空隙構造の幾何学情報抽出には、 μ フォーカスX線CTと専用の压力容器、3次元CT volume dataの解析にはVGStudio.Max, EXFact.Analysisを用いた。本論文では、原位置・室内弾性波速度の深度依存性を紹介し、その後コアサンプル内低密度領域の幾何学情報の静水圧依存性について述べる。これらのデータを用いた原位置P, S波速度の変化に関する議論は今後の課題としたい。

2. 菖蒲コアサンプル

関東平野中央部の地質構造と地下水流動系を明らかにする目的から、関東平野の中央部に位置する埼玉県菖蒲町において、すでに存在しているボーリング孔を利用して追加掘削と検層を行い、深度150m～350m オーダーまでの地下地質構造と地下水質を明らかにした。

ボーリング孔を利用して、P 波速度及びS 波速度検層をサスペンション法にて実施した。測定区間は150m～350m まで1m 以下のピッチで行っている。その他物理検

層として、キャリパー検層、電気検層、温度検層も併せて実施している

図-1は水銀圧入式ポロシメータで得られたコアサンプルの空隙率と空隙サイズ分布である。空隙率は25%～36%まで分布している。間隙比で表わすと0.35～0.6以上の値を示すことになる。なお、ここで得られる空隙は、岩石を対象として得られたデータとは異なり、空隙を多く含む領域と考える方が妥当である。CTデータにおいても確認できることではあるが、特に水銀ポロシメータで得られる100ミクロン以上の単一の空隙の存在は実際には確認困難であり、むしろ密度の低い空隙の多い領域と考えるのが妥当と思われる。

した、3MPaの低圧域における体積収縮量の大きさが特徴的である。

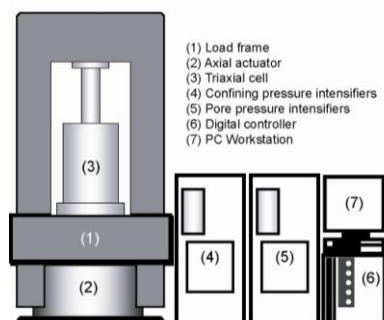


図-2 実験に用いた三軸試験装置概念図

3. P/S波速度の静水圧依存性

MTS社製の三軸試験装置 MTS815を用いた。本試験装置は、図-2に示すように载荷フレーム、軸アクチュエータ、圧力容器、封圧発生装置、間隙圧発生装置、制御装置および制御コンピュータで構成される。制御系はデジタルサーボシステムで構成されているため、精度の高い制御が可能である。図-3は供試体のアセンブルの状態を示している。軸変位計、周方向変位計、間隙水圧ライン、S波センサーおよび同軸ケーブル、そして内部ロードセルが配してある。表-1は実験中に得られた軸ひずみ、周ひずみ、体積変化、設定封圧および間隙水圧の各値を示している。さらに図-4は静水圧と体積ひずみの関係を示

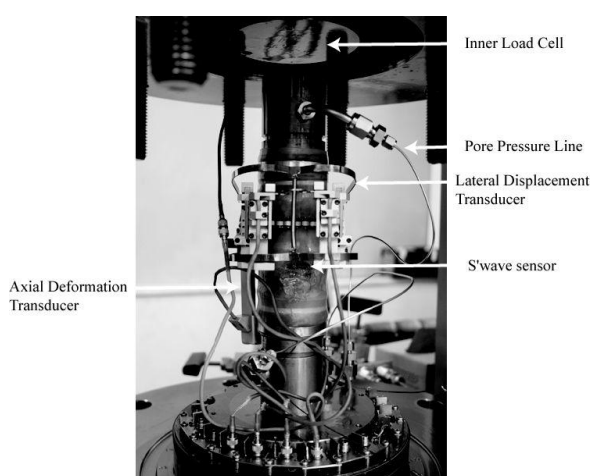


図-3 実験中の供試体アセンブルの様子

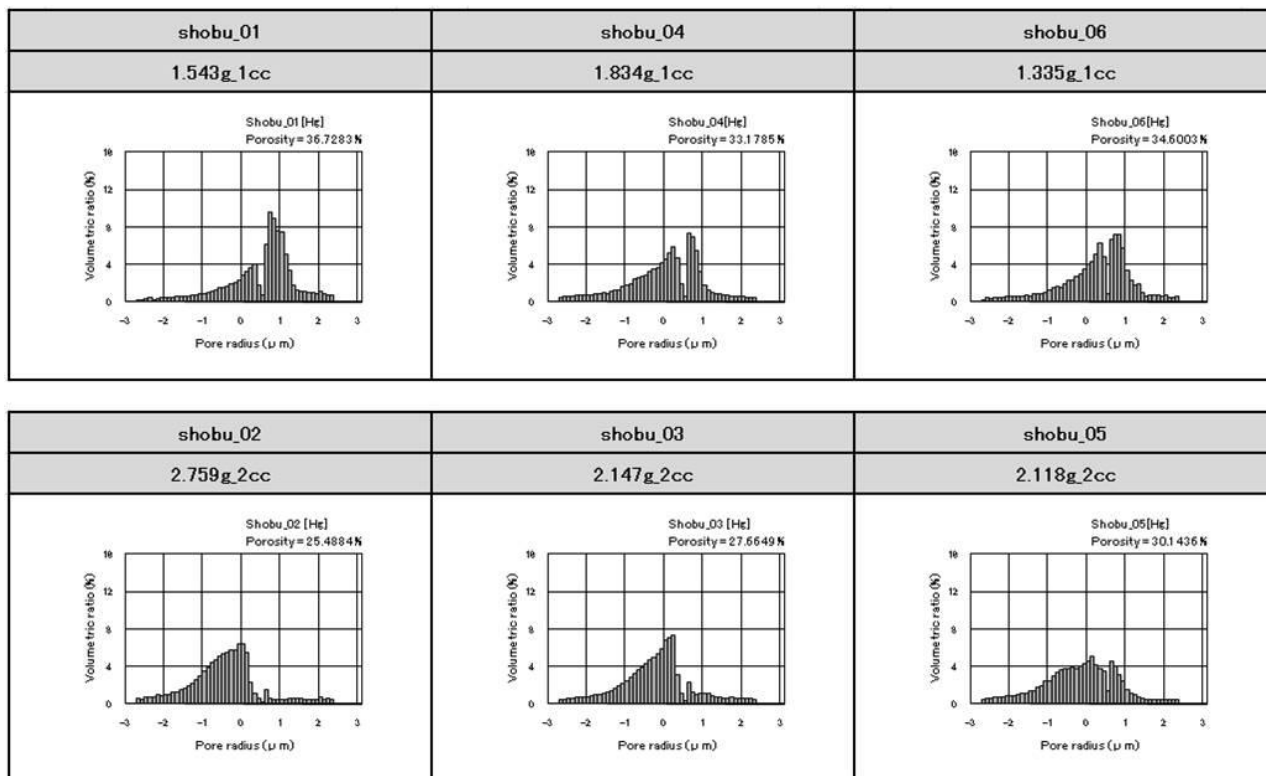


図-1 水銀ポロシメータで得られる菖蒲コアの空隙率と空隙サイズ分布

表-1 試験結果一覧

平均軸ひずみ	周ひずみ	体積ひずみ(収縮量+)	供試体体積変化量 (cm ³)	設定封圧 (MPa)	設定背圧 (MPa)
-0.00014613	0.00068683	0.00122754	0.244	0.0	0.0
-0.00144038	0.00814594	0.01485150	2.957	3.5	1.0
-0.00083813	0.00892321	0.01700830	3.386	6.0	1.0
-0.00063575	0.00922393	0.01781212	3.546	8.5	1.0
-0.00037725	0.00955163	0.01872601	3.728	11.0	1.0
-0.00015538	0.00991416	0.01967294	3.916	13.5	1.0
0.00010738	0.01027643	0.02066023	4.113	16.0	1.0
0.00075988	0.01061359	0.02198705	4.377	18.5	1.0
0.00116050	0.01078631	0.02273313	4.526	21.0	1.0
0.00097313	0.01114230	0.02325773	4.630	23.5	1.0
0.00121425	0.01142590	0.02406604	4.791	26.0	1.0

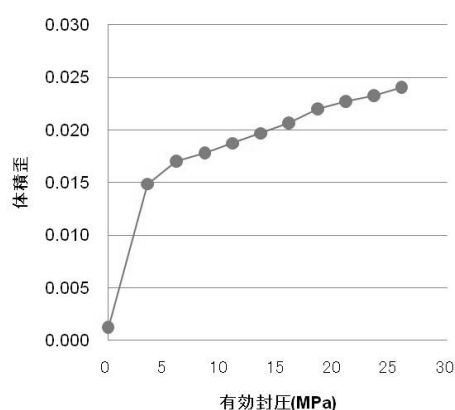


図-4 体積ひずみと有効封圧の関係

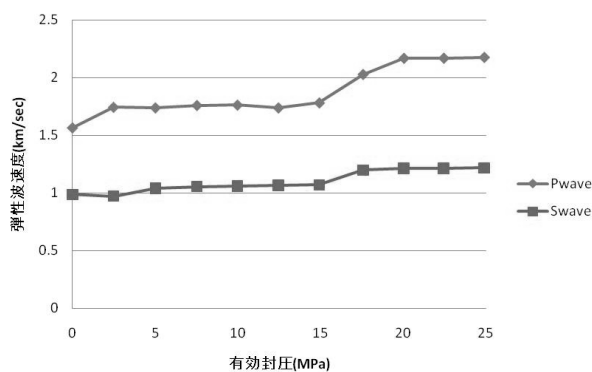


図-5 静水圧依存性

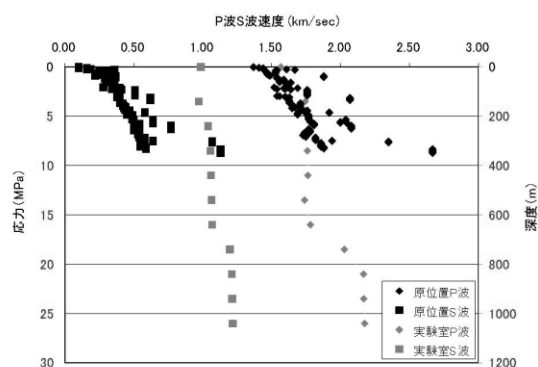


図-6 室内弾性波速度深度依存性

用いたセンサーはセラミック製のS波振動子、共振周波数が100KHzのものを用いた。寸法は10mm立方である。図-5はP波・S波速度の静水圧依存性の結果を示している。P波、S波とも静水圧15MPaまでは僅かな速度増加を示しているが、静水圧20MPaにかけ大きく増加している。25MPaの静水圧増加に伴いP波速度は最終的に0.6km/secの速度増加を、S波速度は0.3 km/secの速度増加を示した。また、これら速度増加の値は、原位置におけるコアリング時の現場計測結果と比較すると小さな値を示している。そこで、室内実験データと原位置ロギングデータを詳細に比較するために図-6に示すように整理した。室内実験データは平均密度を2.5と仮定して静水圧から深度へ換算した。深度300m程度まではP波速度の室内・原位置データの整合性を認める事ができる。水のP波速度が1.5Km/secなので、これよりも大きな値を示しており、物理的にも正しい値を示している。一方、S波速度においては室内データとロギングデータとは大きくかけ離れており、また深度依存性も大きく異なっている。

原位置測定結果と室内試験結果を同時に比較することは正確には正しいことではない。すなわち、用いている弾性波測定装置の違い、測定手法の違い、センサーの違い、他実際の地盤とコアリングし整形したコアサンプルとの構造上の違いなど、その差異は多岐にわたり、かつ両者を補正し検討できるだけの基礎データは存在しない。Gassman(1951)³⁾におけるPorous Media中のP/S波速度は次式で与えられる。

$$V_p^2 = \frac{1}{\rho} \left(K + \frac{4}{3} G \right) = \frac{3(1-\nu)}{(1+\nu)} \frac{K}{\rho} \quad (1)$$

$$V_s^2 = \frac{G}{\rho} = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \frac{K}{\rho}$$

ここで、 ρ はバルク密度、 K は体積弾性率、 G はせん断弾性率、 ν はポアソン比を示す。上式で明らかのように、S波速度は“ G ”の大小により大きく影響を受ける。仮に、原位置におけるS波震源の過大な入力(せん断応力)により、高い飽和度、高い間隙比(間隙率)条件下で大きなせん断変位を生じさせたと考えたと結果として“ G ”を低く評価したことになり、S波速度は小さい値を取らざるを得ない(竹村他⁴⁾)。したがって、Gassman(1951)³⁾のPorous Mediaを対象とした理論の当てはめを原位置データに対して実施することを断念し、コアサンプルレベルでの議論を以下に行う。静水圧の増加に伴うコアサンプルの内部空隙構造の変化と幾何学情報の抽出に焦点を絞る。

4. 内部空隙構造の静水圧依存性

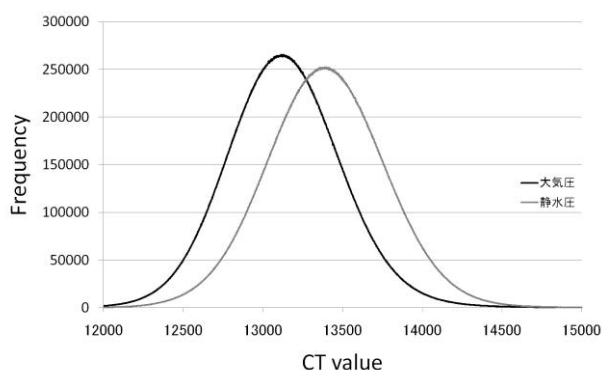


図-7 大気および静水圧 10MPa の輝度値ヒストグラム

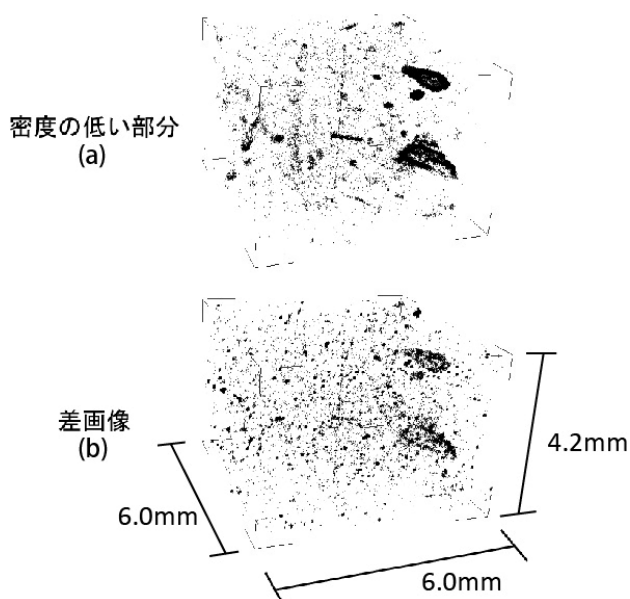


図-8 6×6×4.2 mm で領域内における密度情報(a) 原画像における低密度領域 (輝度値 11790 以下) (b) 差画像における高密度領域 (輝度値 1150 以上)

マイクロフォーカス X 線 CT を用いて、直径 10mm の菖蒲コアの 3 次元ボリュームデータを作成し、更に最大静水圧 10MPa を負荷した状態で再度 3 次元ボリュームデータを取得した。このときの輝度値のヒストグラムは図-7 のようになる。10MPa の静水圧の負荷により、輝度値分布は右側、即ちバルクとしての密度が大きくなったことを示している。当然の事ながら静水圧の負荷に伴い、空隙部の閉鎖や実質部の集中により平均値としての密度が大きくなることは容易に想像できる。そこで、インタクト状態における低密度領域 (図-7 において 11790 以下) と差画像即ちインタクト状態と静水圧 10MPa 負荷状態の差画像を取得し、密度差が 1500 以上の領域を示したものをそれぞれ図-8 (a), (b) に示す。図-8 (a) において密度が低いということは輝度値の範囲からも空隙を多く含

んでいる領域と考えることができ、静水圧を負荷することによって、より多くの空隙部分が閉鎖し、結果として差分をとることによって大きな密度差を示していることになる。したがって、図-8 に示した (a) (b) 両者に表示された領域はほぼ一致していることが認められる。6mm×4.2mm という小さな領域であるが、静水圧負荷により密度が大きく増加した領域が確認できたことになる。これは静水圧による空隙領域の閉鎖を考えると説明でき、体積歪は約 2% の収縮を示す結果とも整合するものである。

5. Medial Axis Analysisについて

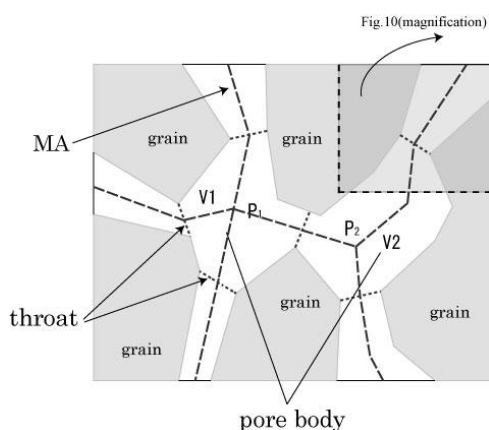


図-9 空隙中心軸の2次元概念図

X 線 CT 装置から得たスライス画像を入力し、その構造に応じて三次元構造を記述し、サンプルごとの特徴を様々に分析することができる。従来、こうしたサンプルを画像として撮像することはできたが、その評価・解釈は困難であった。本ソフトウェア (ExFactAnalysis, 日本ビジュアルサイエンス) を用いることで、多くの欠陥や空隙を持つ試料の X 線 CT 画像データに関してその三次元構造や形態を解析・評価することができる。処理の概要は以下に述べるとおりである。図-9 は多孔質媒体を粒子 (grain) と空隙 (pore) で近似し、その状態を模式的に示した図である。空隙部分のみに注目すると、粒子間距離が最小となる箇所 (図中赤の点線で表示) とそこよりも長い箇所が存在する。この場合、粒子間の距離が最短となるので、これを throat (以下、「スロート」と称する) と定義し、スロートとスロートとにはさまれたスロートよりも距離がある部分を nodal pore (以下、「ポア」と称する) と定義する。ポアは当然の事ながら複数粒子に囲まれた領域を示し、スロートを介して他のポアと接続することになる。同図においてポア P1 は 4 個の粒子に囲まれているので、この場合 coordination number (以下、配位数と称する) は 4 となり、同様にポア P2 は配位数 3 となる。

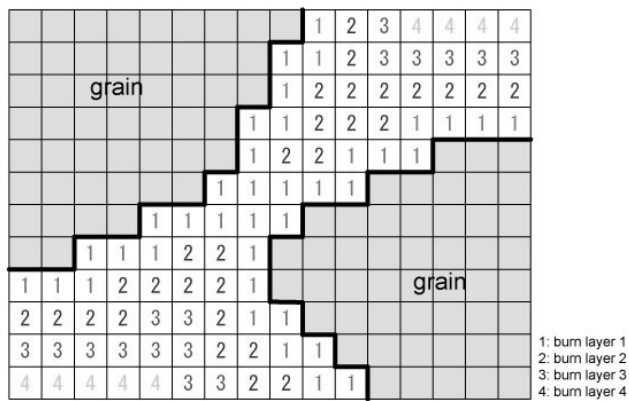


図-10 バーンアルゴリズムの概念

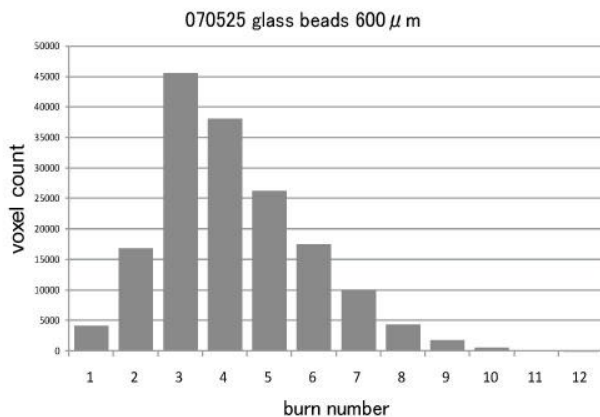


図-11 ガラスビーズのバーンナンバー分布

Medial axis とはその名のとおりに、球であればその中心を通り、円柱であれば断面の中心を通る回転中心軸に相当する。一般的には不定形な3次元形状において medial axis を決定するには“burn algorism” (Lindquist et al.(1996)⁹⁾)が採用されている。図-10 は図-9 の右上の一角を拡大表示し、“burn” アルゴリズムの概念を示したものである。同図にてグレイ領域は粒子をそれ以外は空隙領域を示している。この2次元平面上にてボクセル単位で表示し、粒子に接している boxel から“burn layer 1”として定義し、離れるごとに“burn layer 2”, “burn layer 3”と定義する。この操作を各粒子境界から実施し、“burn number”の高い、しかも同じナンバーのボクセルを“medial voxel”と定義することにより、“medial axis”が得られることになる。最終的に“medial axis”を決定するための種々のアルゴリズムに関しては Lindquist et al.(1996)⁹⁾に詳しく述べられている。ちなみに図-11 は検証用のデータとして取得したガラスボール($\phi 600\mu$)における“burn number”の頻度分布を示している。“burn number 3”～“burn number 5”のボクセルが卓越していることを示している。

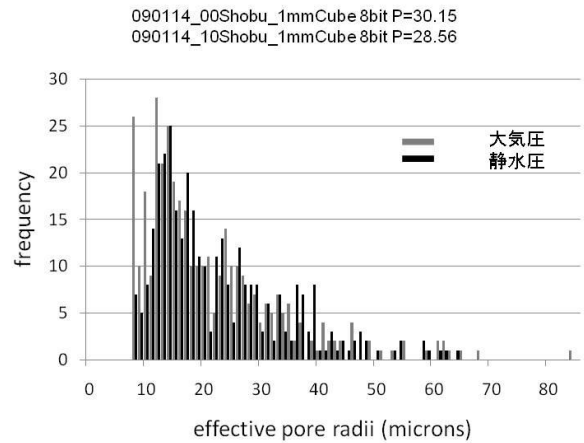


図-12 空隙領域の寸法分布における静水圧変化

図-12 は既述した Medial Axis 解析による CT 画像を用いた空隙幾何解析によって得られた結果を示している。空隙を多く含んでいると考えられる低密度領域をポアと定義して、このポアの静水圧増加に伴う半径の変化をヒストグラムに表示したものである。静水圧の負荷に伴い大きなポア領域の数が減少していること、小さなポア領域において数が増えていることなどが示されており、記述の差画像の結果とも整合する。このように静水圧の負荷により、コアのバルクとしての密度増加（空隙部の減少に相当）が引き起こされ、結果として S 波速度の増加がもたらされたものと解釈することができ、空隙部の寸法変化を具体的な数値として評価することができた。

6. まとめ

コアサンプルを用いて S 波速度データの深度依存性を評価するため、静水圧の増加に伴う P/S 波速度と内部構造変化（空隙サイズ分布）との関係を調べた。用いた菖蒲町コアは深度 350m に及ぶオールコアサンプルであり、深度 130m 付近では砂およびシルトから構成されている。10MPa の静水圧増加に伴い P 波速度は最終的に 600m/s の速度増加を、S 波速度は 300m/s の速度増加を示した。原位置におけるコアリング時の現場計測結果と比較すると小さな値を示している。当該サンプルを用いてマイクロフォーカス X 線 CT にて静水圧増加に伴う空隙構造変化を把握する実験を行い、静水圧の増加に伴うバルク密度の増加をリアルタイムで確認することができた。また、空隙を中心とする低密度領域の幾何学的情報の抽出も検出できたので、これら 3 次元幾何学情報データの静水圧による変化と併せ議論することができた。今後は増加したバルクの密度変化や空隙サイズの情報から P/S 波速度増加を定量的に示すことが必要である。

参考文献

- 1) Yamamizu, F: Down-Hole Measurement of Seismic Wave Velocities in Deep Soil Deposits beneath the Tokyo Metropolitan Area, *Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention* 56: 1-32, 1996.
- 2) Brocher, T. M.: Compressional and Shear Wave Velocity Versus Depth in the San Francisco Bay Area, California: Rules for USGS Bay Area Velocity Model 05.00, *USGS Open-File Report 05-1317*, 1-58, 2005.
- 3) Gassman, F: Elastic Waves Through A Packing of Spheres, *Geophysics*, 16, 673-685, 1951.
- 4) 竹村貴人, 小田匡寛, 赤間友哉, 木村克己, 中西利典: 沖縄層の動土質力学的特性から見た堆積環境の重要性, 地球惑星関連合同会, Q140-007, 2008.
- 5) Lindquist, W. B., Lee, S.-M., Coker, D. A., Jones, K., W. & Spanne, P.: Medial axis analysis of void structure in three-dimensional tomographic images of porous media., *Journal of Geophysical Research* 101 (B4), 8297-8310, 1996.

S WAVE VELOCITY AND INNER STRUCTURE CHANGE WITH INCREASING HYDROSTATIC PRESSURE - SILT WITH SAND CORE SPECIMEN -

Manabu TAKAHASHI, Naoki TAKAHASHI,
Changwan AHN and Takato TAKEMURA

To evaluate a depth dependency on S wave velocity using core samples, we investigated the relationship between P/S velocity change with increasing hydrostatic pressure and inner structural change of the samples taken from the Shobu borehole. P and S wave velocity changes were measured under increasing hydrostatic pressure up to 25 MPa, and increased by 600 and 300 m/sec, respectively. We took three-dimensional X-Ray CT volume data and analyzed distributions of geometry in the low density region under intact and pressurized conditions. The observations of P and S wave velocities can be interpreted as inner structural changes of frequency and average radii on the spatially distributed low density region.