

間隙水中の塩分濃度と土の物理・力学的性質との関係

The relationship between salinity level of the pore water and physical and mechanical properties of soils

函館工業高等専門学校 環境システム工学専攻 ○学生員 堺 佑宇太 (Yuta Sakai)
函館工業高等専門学校 環境都市工学科 正 員 片岡沙都紀 (Satsuki Kataoka)

1. はじめに

メタンハイドレート（以下、「MH」）は、近年次世代エネルギーとして注目されている資源である。MH は低温・高圧条件下で安定に存在するため、その多くが海底堆積土中に存在している。日本近海では南海トラフを中心に開発に向けた試掘・研究が進行中¹⁾であるが、その方法として熱分解や減圧などによって MH を海底下で直接分解し、ガスのみを回収する方法が検討されている²⁾。ここで、MH は形成時に不純物を排出して成長する性質を有するため、海底下で MH が分解するとその解離水によって周辺地盤の間隙水中に含まれるイオン濃度が局所的に低下することが予想される。

間隙水中のイオン濃度と土質特性との関係について、地盤工学の分野では、クイッククレイのように間隙水中のイオン濃度が土粒子骨格や地盤強度に影響を与えることが知られている³⁾。よって、MH が賦存する海底地盤において、MH 回収時に生成した解離水によるイオン濃度の局所的な低下が起因して周辺地盤の強度に影響を与えることが懸念される。

これまでの研究から、間隙水中の塩分濃度を低下させると土粒子同士の結合力が低下して粘土分含有量が見かけ上増加することが確認されている⁴⁾。ここで、含有する粘土鉱物の種類やその含有量によっては、間隙水中の塩分濃度の変化に伴う土の物理・力学的性質への影響に差を生じるのではないかと考え、本研究では含有鉱物の異なる試料に対して間隙水中の塩分濃度を变化させた状態で物理試験（粒度）および力学試験（予圧密・ベンダーエレメント試験）を実施し、間隙水中の塩分濃度の変化との関連性について検討した。

2. 使用した試料及び各種試験方法

本試験で使用した試料は市販粘土であるクニボンド（土粒子密度 $\rho_s = 2.70\text{g/cm}^3$ ）、笠岡粘土（ $\rho_s = 2.66\text{g/cm}^3$ ）、カオリン粘土（ $\rho_s = 2.69\text{g/cm}^3$ ）の3種類である。図-1に X 線回折より得られた鉱物組成を示す。なお、試料は「粘土鉱物判定のための試料調整方法（JIS0251-2009）」に則して採取した粒径 $2\mu\text{m}$ 以下の粘土試料に、含有鉱物の種類を特定するために塩化マグネシウム等で処理して X 線回折を実施した結果となっており^{5) 6)}、これにより石英や長石などのピーク強度が強いものなどが除かれて粘土鉱物がより鮮明に判別することが可能となっている。図より、クニボンドではスメクタイト、笠岡粘土ではスメクタイト、イライト、カオリナイト、カオリン粘土ではイライト、カオリナイトなどの各粘土鉱物が確認できた。ここで、クニボンドと笠岡

粘土に含有しているスメクタイトは他の粘土鉱物とは異なり層構造を成して形成しているため、鉱物の間隙中に水を保持しやすいことや、間隙水中のイオンの影響を受けやすい性質を有していることなどが知られている⁷⁾。

図-2に本試験のフローチャートを示す。まず、各々粉末状態の試料に塩分濃度を人工的に調整した水を混入してミキサーで十分攪拌し、間隙水中の塩分濃度が異なる試料を作成した後に各試料において粒度試験を行った。なお、混入した調整水の塩分濃度は、純水から海水までの範囲を想定して 0.0%と 3.0%の2種類とした。その後、クニボンドと笠岡粘土に関しては、予圧密試験を実施した。ここで、表-1に各試料での液性限界の値を示す。各々の液性限界には大きな差を生じていたため、予圧密

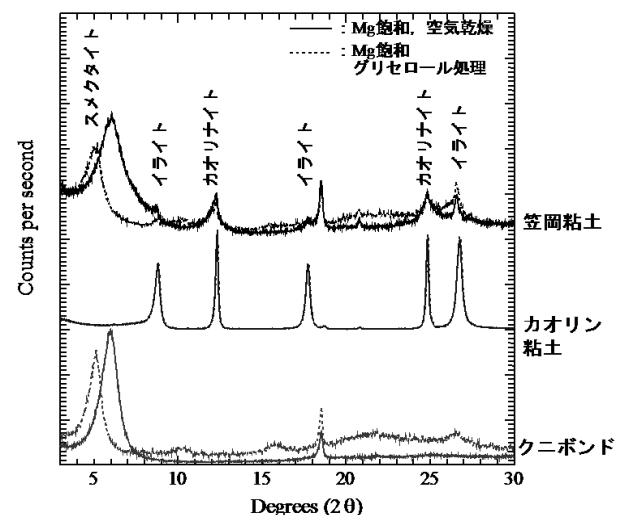


図-1 鉱物組成

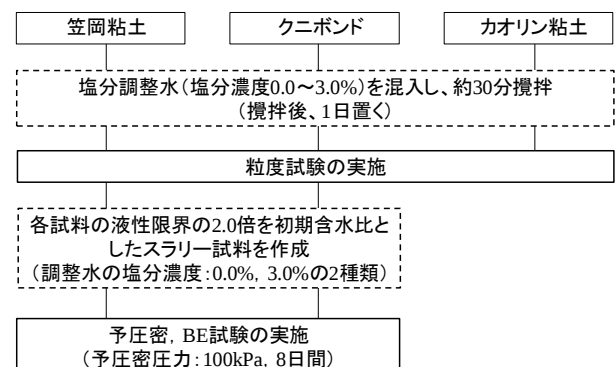


図-2 本試験のフローチャート

表-1 各試料における液性限界

	塩分濃度 0.0 %	塩分濃度 3.0 %
クニボンド	144.4	130.2
笠岡粘土	57.8	55.6
カオリン粘土	86.2	84.7

試験実施時のスラリー試料の初期含水比は、各試料の液性限界の 2.0 倍となるように調整している。

図-3 に予圧密試験装置の概略図を示す⁸⁾。試料内部の飽和度を高めるために、真空引きした予圧密装置内に試料を引き込み、鉛直応力を 100kPa 载荷させた状態で 8 日間予圧密を行った。ここで、予圧密容器にはピストンと底部、さらには容器側面の 2 か所にベンダーエレメント（以下、「BE」と示す）が取り付けられており、これによって水平方向に振動しながら鉛直方向に伝播するせん断波速度 $V_{s(vh)}$ と、振動・伝搬ともに水平の $V_{s(hh)}$ が測定可能である。予圧密試験中の任意の時間において BE 試験を実施し、得られた各せん断波速度と予圧密後に測定した供試体の湿潤密度 ρ からせん断弾性係数 G_{vh} ($=V_{s(vh)}^2 \times \rho$)、 G_{hh} ($=V_{s(hh)}^2 \times \rho$) を算出した。

3. 試験結果と考察

3. 1 間隙水中の塩分濃度と土粒子粒径との関係

図-4 は、塩分濃度 0.0%と 3.0%の試料に対して行った粒度試験より得られた粒径加積曲線である。図より、笠岡粘土では塩分濃度が増加すると粘土分含有量が減少していることが確認できた。これは、神戸浚渫土で実施された先の研究結果⁴⁾同様に、塩分濃度が増加すると間隙水中のイオン濃度が増加するので、内部に占める電荷量が多くなり、粘土粒子の結合力が増加して見かけ上粒径が大きくなったことが推察される。しかし、クニボンドの粒径加積曲線を見ると、間隙水中の塩分濃度の違いによる粘土分含有量の差は笠岡粘土ほど顕著には表れていなかった。ここで、写真-1 に今回使用した土試料の粉末を電子顕微鏡で観察したものを示す。写真から、クニボンド（写真-1a）ではスメクタイト同士が結合したと思われる集合体が多く存在しており、笠岡粘土（写真-1b）に比べて全体的に粒径が大きいことが伺える。これより、クニボンドは粉末状態から鉱物同士が結合して見かけ上粒径が大きくなっているため、塩分濃度の変化に伴う粒径加積曲線への影響が小さかったことが考えられる。ただし、スメクタイトの含有が認められないカオリン粘土（写真-1c）でも、塩分濃度の変化に伴う粒径加積曲線への影響はほとんどなく、塩分濃度と見かけ上の土粒子粒径の変化との関係性については、今後さらなる検討が必要であると思われる。

3. 2 予圧密過程における沈下量と G の推移

図-5 は、笠岡粘土とクニボンドにおける予圧密試験から得られた沈下曲線と、BE 試験から得られた鉛直・

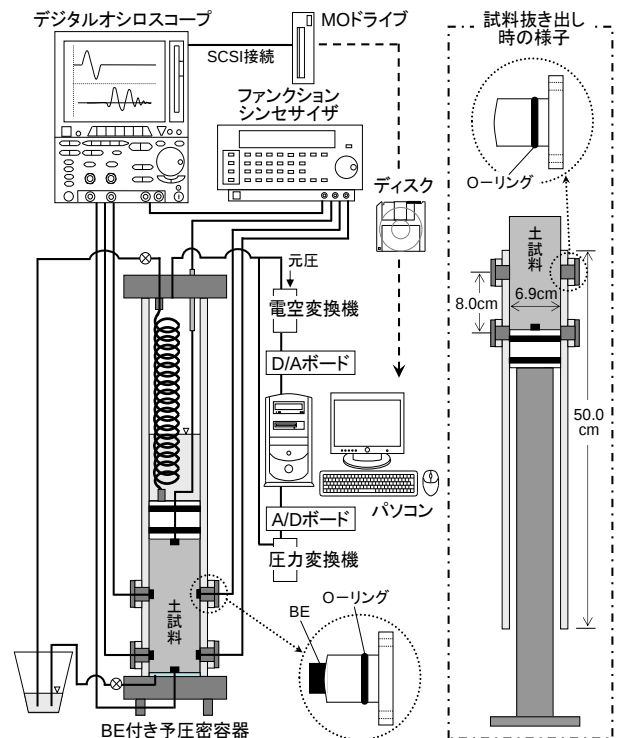
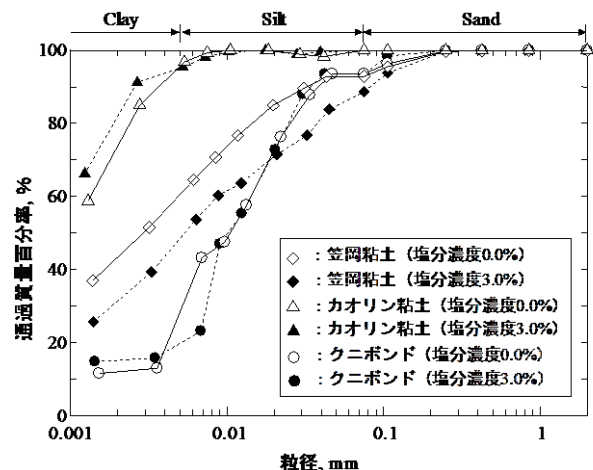
図-3 予圧密 BE 試験装置の概略図⁸⁾

図-4 粒径加積曲線

水平方向のせん断弾性係数の推移をまとめたものである。予圧密試験時の初期含水比を各試料の液性限界の 2.0 倍としているため、図中の沈下曲線の縦軸は予圧密過程における試料の含水比を液性限界で割った値 (w/w_L) とし、この値を本試験における沈下量の指標とした。まず、経過時間に伴う w/w_L の変化を見ると、塩分濃度が 0.0%の試料では、両試料の粘土分含有量に大きな差が生じていたにもかかわらず、予圧密初期の沈下に変化が見られていない。また、両試料とも圧密開始からおよそ 24 時間後には沈下がほぼ終了していることが確認できる。しかし、塩分濃度 3.0%では、両試料とも 0.0%と比較すると沈降速度が早く、特にクニボンドでその傾向が顕著に表れている。この原因として、図-4 で示した粒径加積

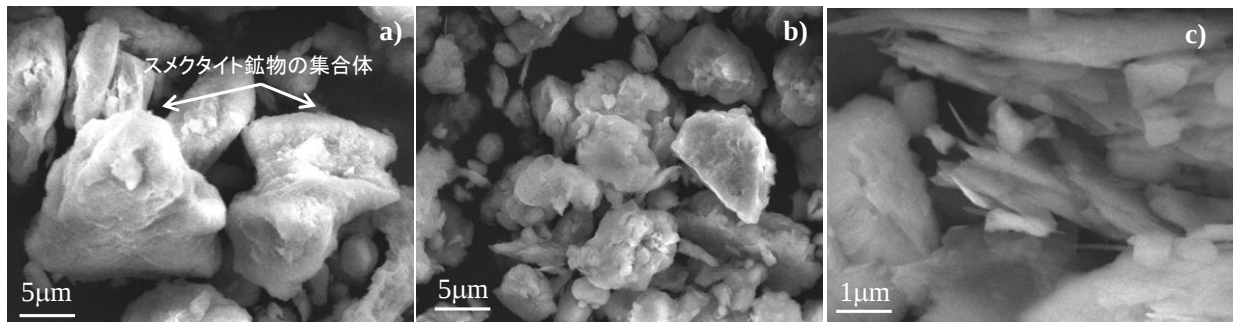
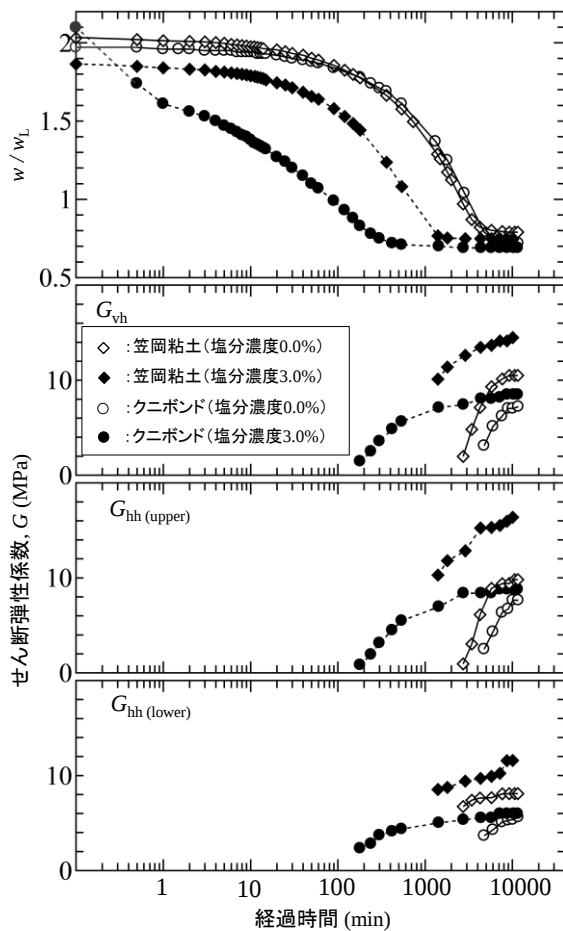


写真-1 各試料における電子顕微鏡観察結果 (a:クニボンド, b:笠岡粘土, c:カオリン粘土)

図-5 圧密時間と w/w_L 、せん断弾性係数との関係

曲線から塩分濃度の増加により見かけ上の粒径が大きくなったことが起因して沈降速度が早くなったことが推察される。さらに、双方の試料で沈下量の収束に違いが表れたのは、クニボンドの粘土含有量が笠岡粘土に比べて少ないことが原因だと思われる。

次に BE 試験による鉛直・水平方向のせん断弾性係数 G (G_{vh} 、 $G_{hh(upper)}$ 、 $G_{hh(lower)}$) を見ると、双方とも塩分濃度 3.0% のほうが 0.0% よりも G が大きくなっており、試料の沈降速度が G の値に影響していることが示唆される。ここで、図-6 に G_{vh} と $G_{hh(upper)}$ との関係から構造異方性 $G_{hh(upper)}/G_{vh}$ を示し、予圧密過程における堆積構

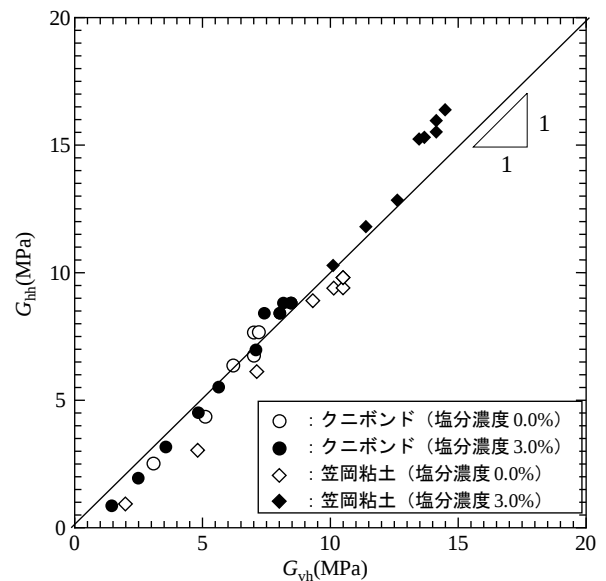
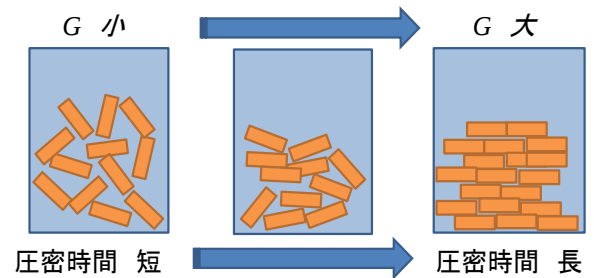
図-6 G_{vh} と $G_{hh-upper}$ との関係

図-7 予圧密経過に伴う粘土粒子の堆積状況の推移

造の変化を検討した⁹⁾。図より、 G の値が小さい予圧密過程初期の段階では、 $G_{hh(upper)}/G_{vh}$ は 1 よりも小さくなっているが、予圧密が進み G の値が大きくなると、 $G_{hh(upper)}/G_{vh}$ は 1 よりも大きくなっていく傾向が伺える。粘土において、鉛直応力が大きくなると強制的に試料内部の土粒子配列が綿毛構造から配向構造に移行することが知られている⁴⁾。よって、予圧密過程に伴う試料内部の構造の変化の模式図を図-7に示すと、①予圧密初期はランダム構造をなしていることから構造異方性がまだ確認できず $G_{hh(upper)}/G_{vh}$ が 1 以下となること、②予圧密が進むと徐々に土粒子配列が綿毛構造から移行して構造

異方性が高まり、 $G_{\text{nh upper}}/G_{\text{vh}}$ が 1 より大きくなったことが推察される。

4. まとめ

本研究では、間隙水中の塩分濃度を变化させた含有鉱物の異なる試料に対して物理・力学試験を実施し、土質特性にどのような影響を与えるかについて検討した。以下に得られた知見を示す。

- ・粒度試験において、間隙水中の塩分濃度が高い場合、電荷量が大きくなるため、土粒子間に凝集効果を生み出し、結合力が上昇し見かけ上の粒径が大きくなることがわかった。
- ・予圧密試験の結果から、塩分濃度が高い場合、電荷量が増加するので土粒子同士の結合力が上昇し、見かけ上の粒径が大きくなるので、沈下量が早く収束することがわかった。また、間隙水中に塩分を含む試料では、見かけ上粒径が大きくなることによって沈降速度が上昇し、配向性に影響を及ぼすことでせん断弾性係数が上昇することが示唆された。

参考文献

- 1) 林雅雄、中水勝、長田順子：メタンハイドレート—資源量評価研究の経緯と最新の成果—、石油・天然ガスレビュー、Vol.41、No.5、pp.57-68、2007.
- 2) Uchida、T.、Lu、H.、Tomaru、H.、and the MITI Nankai Trough Shipboard Scientists: Subsurface Occurrence of Natural Gas Hydrate in the Nankai Trough Area; Implication for Gas Hydrate Concentration、Resource Geology、Vol.54、No.1、pp.35-44、2004.
- 3) Bjerrum、L.: Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings、Géotechnique、Vol.17、No.2、pp.173-211、1967.
- 4) 片岡沙都紀、川口貴之、山下聡：塩分濃度の違いが土質特性に与える影響、地盤工学会北海道支部技術報告集、第 50 号、pp.187-192、2010.
- 5) 地盤工学会：粘土鉱物判定のための試料調整、地盤材料試験の方法と解説—二分冊の 1—、pp.355-360、2009.
- 6) 和田光史：粘土鉱物の同定および定量法、日本土壤肥科学雑誌、Vol.37、No.1、pp.9-17、1966.
- 7) 日本粘土学会編：粘土ハンドブック第三版、技報堂出版、p990、2009.
- 8) 川村龍平、川口貴之、伊藤朝陽、佐野侑房：ベンダーエレメント付き予圧密装置の開発、土木学会北海道支部論文報告会、第 62 号、III-1、2006.
- 9) 川口貴之、三田地利之、澁谷啓、佐野侑房：室内ベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数 G の評価、土木学会論文集、No.694、III -57、pp.195-207、2001.