



# 海底地盤の力学性状把握に関する基礎的研究

杉山, 友理

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2017-03-25

(Date of Publication)

2018-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6917号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006917>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



## 論文内容の要旨

氏 名 杉山 友理

専 攻 市民工学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

### 海底地盤の力学性状把握に関する基礎的研究

指導教員 飯塚 敦

(注) 2,000字～4,000字でまとめること。

Marine Geotechnology とは、海底地盤をターゲットとした地盤工学であり、1914年に発見されたベネズエラ、マラカイが湖における油田開発をきっかけに発足したとされている。このとき、プラットフォームは70mを超える杭で支えられており、油田開発に伴う地盤沈下が課題とされていた。1961年には、資源開発ではなく、地球の歴史や物理についての興味から、地球のマントルまで掘削しようという Project Mohole が始動した。Project Mohole で培われた技術は、現在では国際深海科学掘削計画 (IODP) に引き継がれ、地球の歴史探究やプレートテクトニクスの理論確立など、地球物理や海洋地質学など学術分野に大きな進歩をもたらした。Marine Geotechnology の発足から約100年が経った現在、例えば、新たな海洋エネルギー資源開発の可能性に期待し、メタンハイドレートを含む地盤に関する研究やその採取方法の提案等が注目されている。一方で、電力供給や通信に欠かすことのできない海底ケーブルが、海底地すべり等により切断されることから、既存のインフラ保全も重要である。

さらに、掘削技術の進歩に伴い、プレート境界まで掘削が可能になり、近年多発する巨大地震発生メカニズムの解明に大きな進歩をもたらしている。東北地方太平洋沖地震では、プレート境界浅部が大きく滑ることで大規模地殻変動が生じ、巨大津波が発生した。滑った領域の断層試料はスメクタイトに富んだ遠洋性粘土であり、プレート沈み込み帯では、カリウムイオンの供給と温度上昇に伴ってイライトへ相転移 (変質) することが知られている。断層試料を用いた実験の結果、プレート沈み込み速度 (毎秒2.7ナノメートル) で試料を滑らせると応力が増加し、その後減少する現象が観測され、断層試料とは異なる試料 (イライト) を用いた実験では同様の傾向を示さず、断層試料に特有の現象であることが示唆されている<sup>1)</sup>。このような研究は、主に地震学や地球物理学の分野で検討されている。せん断による応力増加や応力減少は、粘土特有の力学特性からも説明可能である。このことから、プレート境界断層浅部における海底地殻の不安定性挙動の解明には、地盤力学の知見も寄与できるといえる。

ここで地盤工学とは、人々の生活を自然災害等から守るために必要な、地盤に関する知識を体系化した学問であり、それに必要な力学が地盤力学である。地盤力学は、地盤を構成する土の分類から始まる。様々な土の複雑な力学的性質を示すには、まずその土が示す基本的な力学的挙動を調べ、次に特徴的な力学的性質を捉え、それらを再現できる力学モデルを構築することになる。

近年、海底におけるインフラの構築・保全などの目的で、Marine Geotechnology がさらなる発展の必要に迫られている。また、プレート境界浅部の滑りは巨大津波の原因と成り得るため、ゆっくり滑りが生じるメカニズムの解明が急がれる。これらの問題にアプローチするためには、水深が深い、高圧環境下に存在する海底地盤にも適用可能な地盤力学が必要であり、さらには地震学や地球物理学で得られた知見を取り入れることによる、地盤力

学の拡充が必要である。

海底地盤を対象とした問題にアプローチするとき、少なくとも溶存気体の状態変化や粘土鉱物の変質を表現できる力学モデルが必要であると考えた。本論文では、これらの現象を適切に記述できる相変化モデルを構築することで、土の力学モデルを海底地盤にも適用可能なモデルに拡充することを研究目的とする。

また、海底地盤を対象とした建設工事において、基礎となる海底地盤の安定性評価は必要不可欠である。安定性評価のためには、原位置地盤の強度を知る必要がある。原位置地盤の強度を把握するために、原位置試験を行うか、試料をサンプリングして室内試験を行うことになる。しかし、サンプリング時や力学試験実施時の機械的な乱れと応力解放による乱れの影響により、サンプリング試料の力学性状が変化することが分かっている<sup>23,3)</sup>。そこで本論文では、海底からの土供試体のサンプリングによる、土供試体の剛性や強度の変化を定量的に評価することを研究テーマの一つに選んだ。

海底からサンプリングされた土試料は不飽和化することが既往の研究により分かっている<sup>24)</sup>。それを再度、飽和化する場合、その飽和化をはかる指標に B 値が用いられる<sup>4)</sup>。この B 値の力学的意味にも興味を持ち、解析と実験の両面から、この B 値の力学的意味、すなわち応力変化依存性の解明を試みることを二つ目の研究テーマとした。

さらに、東日本大震災を契機として、地震時に、プレート境界断層浅部において、大規模地殻変動が生じる原因の解明が急がれている<sup>9)</sup>。そこで、理学の地震学や地球物理学の分野となるが、プレート境界断層浅部における土質性状の力学変化の理論化を試みることを三つ目の研究テーマとした。

2 章では、溶存気体の状態変化と鉱物の変質を考慮できる土/水/気体連成数理モデルの構築を行った。ヘンリー則を導入し、液相中の溶存気体質量と気相中の気体質量の和が成立するとして質量保存式を導出することで、液相と気相の相変化モデルとして表現することができた。また、変質に伴い土粒子密度が変化する式を導入することで、鉱物の変質を固相と液相の相変化モデルとして表現することができた。これらの数理モデルを初期値境界値問題として定式化し、有限要素解析手法へ組み込んだ。

3 章では、土試料のサンプリング過程をシミュレートし、サンプリング時に土試料の間隙水中に含まれる溶存気体が気化することで土試料が乱れ、室内試験から得られる強度を用いると原位置強度を誤って評価してしまうことが分かった。強度に及ぼす影響はサンプリング時の乱れの影響が大きいほど顕著に生じ、この乱れの程度には溶存気体の気化量が密接に関係することが分かった。溶存気体の気化量は、ヘンリー定数よりも土試料の水分保水特性に依るところが大きく、乱れを定量的に評価するためにはこの水分特性を知る必要があるといえる。また 4 章において、B 値に及ぼす影響因子について実験及び解析を行ったところ、繰り返し B 値を計測する場合、得られる B 値の傾向と試料の水分保水特性が密接

に関係していることが分かった。これらのことから、3 章と 4 章において、土試料の水分保水特性の把握がキーポイントであるといえる。このとき 4 章で得られた結論より、実験において B 値測定時の載荷重を除荷重よりも大きくして計測した B 値と、実験を模擬した解析から得られる B 値の傾向及び大きさを合わせるには、土試料の水分保水特性を左右する初期飽和度やサクション、さらには水分特性曲線の勾配を変えることが有効であることが分かった。

このことから、4 章で新たに提案した B 値測定手法により土試料の水分保水特性を正確に把握することができれば、このとき設定した初期飽和度と水分特性曲線からサンプリング時に生じたサクション変化を推定できることになる。このサクション変化から土試料の有効応力変化を推定することで、サンプリング時の乱れを定量的に評価できる可能性がある。そのため、新たに提案した B 値測定手法から推定する水分特性曲線と、B 値測定で用いたものと同じ土試料を用いた保水性試験から得られる水分特性曲線とを比較することで、この B 値測定手法の妥当性を探り、サクション変化からサンプリング時の乱れを評価する手法の提案が今後の課題である。

5 章では、スメクタイトのイライト化という土質性状の変化を理論化することで、今までばらばらに議論されていたデコルマ帯における異常間隙水圧の発生とプレート境界浅部の固着メカニズムを同時に満たす力学挙動を得ることができただけでなく、力学挙動からゆっくり地震発生メカニズムの説明も可能であることが分かった。ただし、本研究で提案したモデルは、地質学や地球物理学において、変質の際にキーポイントとされる熱力学や Kinetic 理論は考慮しておらず、スメクタイト-イライト相転移だけでなく、その他鉱物の変質が及ぼす影響等、考慮できていないことも多くある。そのため、本研究で用いたモデルでは十分にデコルマ帯で生じる現象を表現できているとはいえない。今後は変質できる条件としてキーポイントとされる熱や化学を連成させる必要性について検討すると共に、ゆっくり地震時の軟化をモデルで表現することで、ゆっくり地震の周期と変質速度の関係や、地震を巨大化させるような海底地殻の不安定性挙動についても検討していきたい。

3 章から 5 章で扱ったテーマは、一見するとばらばらの内容のように思える。しかし、追及する現象が全く違うにも関わらず、各テーマで用いたモデルの根幹にあるものは、いずれも同じ土/水/気体連成の力学体系である。本論文ではごく一部の異なる研究テーマを扱ったに過ぎないが、土/水/気体連成の力学体系は、地盤工学だけではなく、他分野でも用いられることが分かった。このことから、土/水/気体連成の力学体系を、地盤工学だけではなく、資源・エネルギー工学、化学、地震学、地球物理学や地質学のように、様々な分野で用いることができる汎用性の高い力学体系にしたいと考えている。

参考文献)

- 1) Matt J. Ikari, Y. Ito., K. Ujiie., Achim J. Kopf, Spectrum of slip behavior in

(氏名： 杉山 友理 NO. 4 )

- Tbhoku fault zone samples at plate tectonic slip rates, *Nature Geoscience*, Vol.8, pp.870-874, 2015.
- 2) Ladd, C.C. and Lambe, T.W., The Strength of "Undisturbed" Clay Determined from Undrained Testes, ASTM, STP-361(Laboratory Shear Testing of Soils), pp342-371, 1963.
- 3) Okumura, T., Studies on the Disturbance of Clay Samples(2nd Report)-Stress Changes of an Unsaturated Clay during Sampling-, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.8, No.3, pp.77~98, 1969 (in Japanese).
- 4) Skempton, A.W., The Pore-pressure coefficients A and B, *Geotechnique*, Vol.4, No.4, pp.143-147, 1954.
- 5) Christopher H. Scholz, Earthquakes and friction laws, *Nature*, 391, 37-42, 1998. doi:10.1038/34097

氏名	杉山 友理		
論文 題目	海底地盤の力学性状把握に関する基礎的研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	飯塚 敦
	副 査	教授	芥川 真一
	副 査	教授	大石 哲
	副 査	分野長	阪口 秀
要 旨			
<p>本論文は、地盤力学の海洋海底地盤への適用を視座に、いくつかの具体的課題の解明を通して、地盤力学のフレームワークの拡大を意図した内容である。海底地盤を対象とした地盤工学は、<i>Marine Geotechnology</i> と称され、油田開発をきっかけに発足したとされている。しかし、その対象水深が 30m 程度であって、今後の <i>Marine Geotechnology</i> の発展には、大陸棚(水深 100~200m)や大陸斜面(水深 200~300m)のような大水深海底も視野に入れる必要がある。海底地盤は陸上地盤とは異なり、高圧環境下に存在するため、大水深となると、溶存ガスの影響が無視できないと考えられる。また高温高圧下では、粘土鉱物の変質することが分かっている。地盤力学によるアプローチでこれらの現象の表現を試みており、もって <i>Marine Geotechnology</i> の発展に貢献しようとしている。本論文は 6 章からの構成される。</p> <p>第 1 章は序論であり、地盤力学分野における本論文の位置付けを論じている。</p> <p>第 2 章では、溶存ガスの状態変化及び粘土鉱物の変質を考慮できる土/水/空気連成数値モデルの構築を行っている。溶存ガスの状態変化は液相と気相の相変化、鉱物の変質は固相と液相の相変化として取り扱い、液相と気相の相変化に、ヘンリーの法則と状態方程式を用いている。固相と液相の相変化には、各種鉱物の土粒子密度が変化することから、変質率を定義し、その変質率を考慮した保存則を導いている。それらの数値モデルの支配方程式を整理し、有限要素解析手法へ組み込むことによって、初期値境界値問題として定式化している。</p> <p>第 3 章では、海底からの土供試体のサンプリングによる土供試体の剛性や強度の変化を定量的に評価することを目的に、様々な水深・海底深度を想定した海底地盤のサンプリング過程を数値シミュレーションすることで、溶存ガスの状態変化が採取試料の力学挙動及び室内試験で得られる非排水せん断強度に及ぼす影響について明らかにしている。また、間隙水中に含まれる溶存ガス種類の違いが強度に及ぼす影響についても検討している。</p> <p>第 4 章では、解析と実験の両面から、間隙水圧係数 B 値の力学的意味、すなわち応力変化依存性の解明を試みている。B 値に影響を及ぼす因子について、B 値測定時の有効応力及び背圧の違いだけでなく、B 値測定方法の違いについても検討している。さらに、B 値測定方法の違いがせん断試験結果に及ぼす影響についても検討し、適切な B 値測定の方法を提案している。</p> <p>第 5 章では、プレート境界断層浅部デコルマ帯における、地盤の不安定性挙動について検討している。本論文では、不安定性挙動を示す原因の一つとして考えられている粘土鉱物の変質(スメクタイトのイライト化)に注目し、デコルマ帯における土質性状の力学変化の理論化を試みている。さらに、構築したモデルを用いて、プレート沈み込みを想定した簡単なせん断シミュレーションを行っている。その結果、スメクタイトがイライトに変質しながらせん断力を受けたとき、非常に大きい過剰間隙水圧が発生し、せん断に伴い過圧密化することを示している。このとき、徐々にせん断強度を発揮するため、プレート沈み込みに対して抵抗力を持ち、固着することに繋がると考えられ、さらに、ある程度変質が進行したときに地震が発生し、デコルマ帯に水が供給されると仮定すると、その領域では、軟化が発生し、固着できなくなることが示されている。</p> <p>第 6 章は結論であって、得られた成果を総括している。</p> <p>このように本論文は、海洋海底地盤への地盤力学の適用に関して成果を挙げており、海底地盤の力学的な性状の把握について重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の杉山友理は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>			