

溶存ガスの気化が粘性土の乱れおよび変形強度特性に及ぼす影響

北見工業大学大学院	学生会員	○出羽 寛信
北見工業大学大学院	学生会員	森脇 友裕
北見工業大学工学部	正会員	山下 聡
北見工業大学工学部	正会員	川口 貴之

1. はじめに

ガスハイドレートは低温高圧の条件下で水分子が作るかご構造の中に主としてメタンを閉じ込めた固体状の物質であり、メタンハイドレートとも呼ばれる。ガスハイドレートの存在領域は極域の永久凍土分布域や水深 250m 以深の海底・湖底堆積物中である。ガスハイドレート 1m³ を分解させると (0°C、1atm) 160 から 170m³ ものメタンガスを取り出すことができる。このメタンガスは天然ガスの主成分であることから、天然ガスと同様の次世代のエネルギー資源として、商業化に向けた研究・開発が進められている。2007 年と 2008 年にカナダのマッケンジーデルタにおいて、ガスハイドレート陸上産出試験を行いメタンガス生産が実施された。また日本周辺海域においては東部南海トラフでガスハイドレートの存在領域を示す BSR(Bottom Simulating Reflector)が広く分布していることから海洋産出試験の実施が予定されている¹⁾。このためガスハイドレートは資源小国である日本の今後のエネルギー資源としての期待が高まっている。

一方で、メタンガスは二酸化炭素の 20 倍もの温室効果をもつガスである。また、海底面表層付近のガスハイドレートは小規模な温度・圧力の低下により分解される環境にもある。このため海水温上昇や資源開発などにより、メタンガスの漏洩、またハイドレートの分解による地盤支持力の低下によって地盤が不安定化し、海底地滑りを引き起こす可能性がある。したがって、海底面表層付近の地盤の安定性を評価するには堆積土の力学特性を明らかにする必要がある。そこで著者らはこれまで、ガスハイドレート集積域であるバイカル湖やオホーツク海サハリン沖において、湖底、海底堆積土の採取を行い、その土質特性を明らかにしてきた²⁾³⁾。図-1 はガスハイドレート賦存地盤である湖底・海底から堆積土を採取する状況を現した概略図である。高水圧条件にある湖底、海底にコアラーを貫入させ、堆積土が入ったコアラーを船上に引き上げる際に、水圧の低下により堆積土中の間隙水に溶存していたガスが気化し試料に乱れが生じた。そのため、採取した試料の強度が低くなる。したがって、ガスハイドレート集積域から採取した試料では採取時の応力解放によって試料に乱れが生じ、正確な湖底、海底堆積土の力学特性を評価できないことがわかった。そこで、応力解放に伴う採取試料の乱れの評価を行うために、

高圧条件である湖底、海底地盤での試料採取から室内試験に至るまでの応力条件を再現した実験を行い、間隙水溶存ガスの気化に伴う試料の強度変化を調べた。

2. 再現実験

2.1 試験装置・試料

高圧条件である湖底、海底地盤の堆積土採取から室内試験に至るまでの応力条件を再現した実験を行うために、ベンダーエレメント付き予圧密装置を用いた。試験装置の概

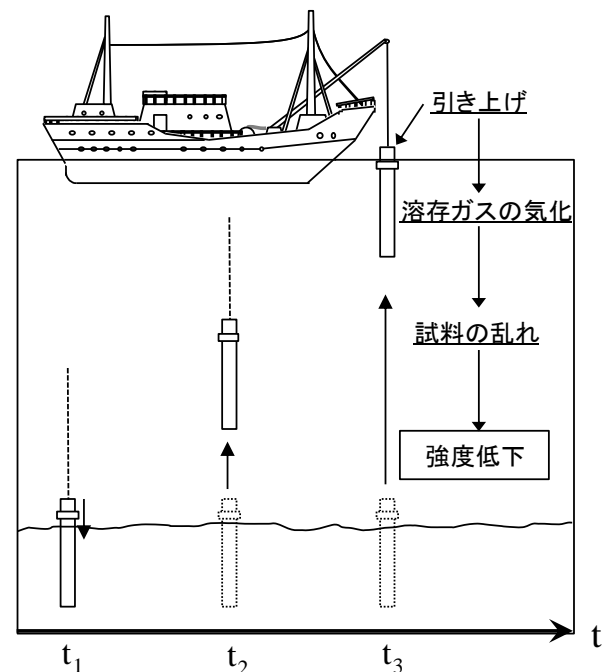


図-1 ガスハイドレート賦存地盤での堆積土採取の概略図

略図を図-2に示す。圧密容器の寸法は、内径 70mm、高さ 330mm である。応力解放時のガスの気化による試料の乱れを確認するため、アクリル製の圧密容器を用いた。圧密圧力（鉛直応力）はペロフラムシリンダーにより载荷され、鉛直荷重はロードセルにより測定される。鉛直変位は载荷ロードに取り付けたダイヤルゲージにより測定される。予圧密容器上部と下部には圧力計が取り付けられており、予圧密容器内部の圧力を測定できるようになっている。

また、装置には背圧およびガス溶存水循環のため、耐圧容器 3 個を用意した。上方にそれぞれ脱気水およびガス溶存水供給用を設置し、下方には試料に背圧を加えるための耐圧容器を設置した。上方と下方の耐圧容器の水頭差は約 2m でガス溶存水を試料に循環できる構造となっている。

試料は 2005 年と 2006 年にバイカル湖の Kukuy 領域で採取した試料²⁾を混合したものである（土粒子の密度 $\rho_s=2.720\text{g/cm}^3$ 、液性限界 $w_L=70.08\%$ 、塑性指数 $I_p=41.9$ ）。この試料の粒径加積曲線を図-3に示す。試料を圧密時の初期含水比を液性限界の 1.6 倍となるよう蒸留水を加えスラリー状にし、攪拌容器内で真空に近い状態で約 24 時間程度攪拌し、準備した。また、間隙水に溶存させるガスは二酸化炭素（ CO_2 ）を使用した。これは、ガスハイドレート集積域の堆積土に含まれるガス成分は主にメタンガス（ CH_4 ）であるが、 CH_4 と同程度の溶存度とする場合、低背圧での試験が可能のため、二酸化炭素を用いた。なお、水深 1000m、水温 4°C の CH_4 の溶解度は、室温 20°C 、圧力 500kPa での CO_2 の溶解度と同程度である。

2.2 ガス溶存実験

ここで、再現実験を行う前にどの程度の時間で脱気水に CO_2 が溶存し、また圧力開放によりどの程度ガスが気化するかを確認するために予備実験を行った。図-4は予備実験で用いた実験装置の概略図である。使用した耐圧容器の容積は約 2100cm^3 で、耐圧容器内に注水した脱気水は約 1000cm^3 である。 CO_2 ガスボンベにはレギュレータが付いており、加圧量を調節できるようになっている。また、気化ガスを測定するため、乾式ガスメータを使用した。ガスメータには温度計が付いており、周囲の温度測定が可能である。

加圧期間による溶存量の違いを調べるために、脱気水の入った耐圧容器内にガスボンベにより 500kPa の圧力で、室温 22°C から 23°C の間で、1 日か

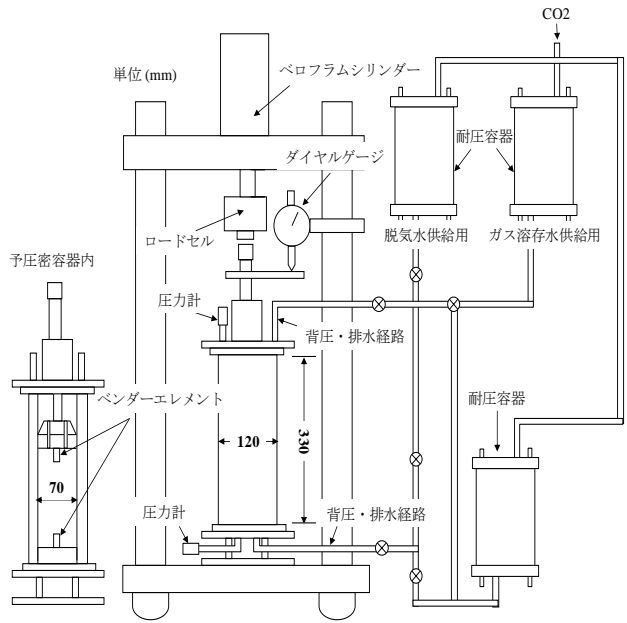


図-2 予圧密装置の概略図

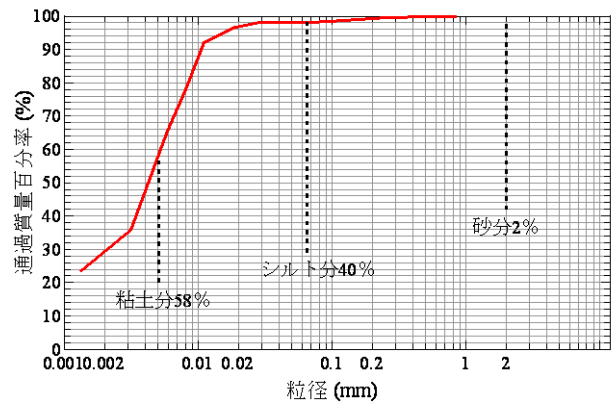


図-3 バイカル混合試料の粒径加積曲線

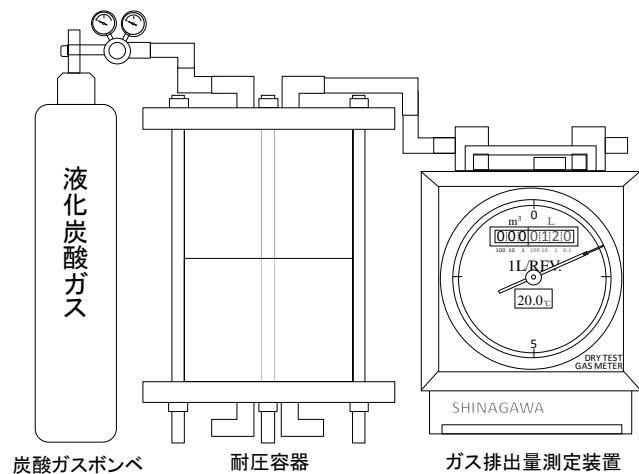


図-4 予備実験に用いた装置の概略図

ら8日間それぞれ脱気水にCO₂を溶存させた。そして脱気水に溶存したCO₂を大気圧まで気化させることにより、加圧期間の違いによる溶存水の気化ガス量を測定した。この際、ガスメータの計測針が静止するまで測定を行った。この実験結果を図-5に示す。各加圧期間に対する気化ガス量の近似線の傾きがほぼ水平になっており、各加圧期間による気化ガス量の大きな違いは見られない。また各加圧期間の温度はほぼ一定になっているので、温度による気化ガス量への影響はないと言える。以上より、約24時間脱気水にCO₂ガスを加圧することにより気化ガス量が一定になることがわかった。

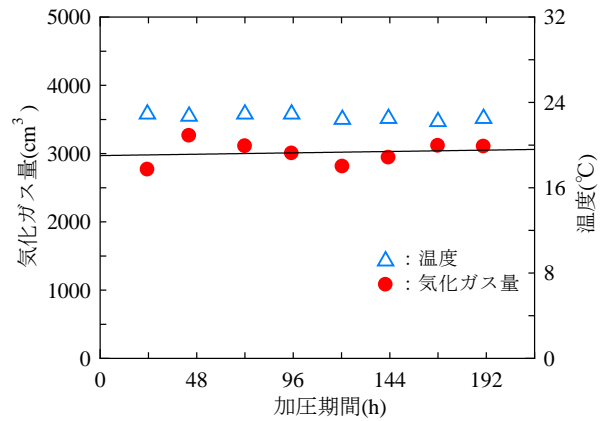


図-5 気化ガス量と加圧期間の関係

次に、加圧力の違いによる気化ガス量の測定を行った。加圧期間を約2日間とし、加圧力を100から500kPaの5段階で、上記と同様な手順で実験を行った。この実験結果を図-6に示す。図に示すCO₂理想排出量は、理科年表より気体の水に対する溶解度から完全に飽和したと仮定した場合に、一定量の水に対して各圧力において大気圧まで圧力を減圧させたときの気化ガス量である（理想排出量=各圧力での飽和溶存量-1気圧での飽和溶存量）。100kPaの加圧力では理想排出量の2割程度の気化ガス量であったが、200, 300kPaでは6割程度の気化ガス量となり、400, 500kPaでは約7割の気化ガス量であった。各圧力における温度はほぼ一定となっているので、温度による気化ガス量への影響はないと言える。これらの実験から、脱気水にCO₂ガス圧を加えても完全に飽和しないが、加圧力が高いほど飽和度は高くなることがわかった。

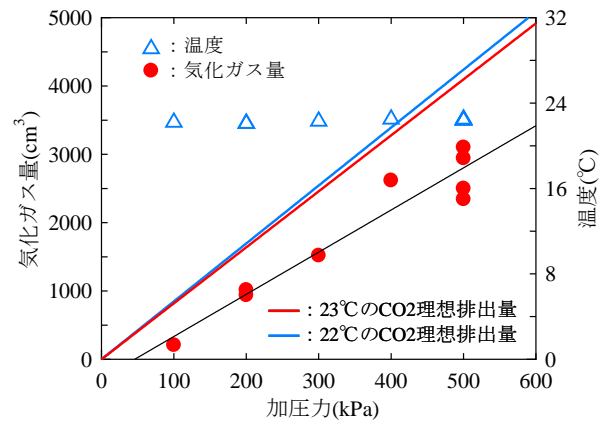


図-6 気化ガス量と加圧力の関係

表-1 試験条件

試験条件	最終圧密圧力 (kPa)	背圧 (kPa)	背圧除荷時の圧密圧力 (kPa)
1	100	500	20
2	100	500,300,100	100
3	100	500,300,100	20

2.3 試験方法

2.1で攪拌した試料を予圧密容器内に流し込み、表-1に示す各試験条件で再現実験を行った。図-7は各試験条件の流れを示したものである。すべての試験において各圧密段階（20,50,100kPa）で24時間圧密を行った。すべての試験において圧密圧力20kPa終了後、背圧を加えている。試験条件1では空気圧を介して背圧を500kPa加えているが、試験条件2と3ではCO₂ポンベ圧を介して背圧を加えている。また、ガス溶存度の違いによる試料への乱れの影響も調べるため、背圧を100, 300, 500kPaの3条件で試験を行っている。

最終段階の圧密圧力（100kPa）終了後、試験条件1は脱気水を試料に通水させ、試験条件2と3ではそれぞれ背圧と等しい圧力でCO₂を溶存させたガス溶存水を通水させている。また、すべての試験条件

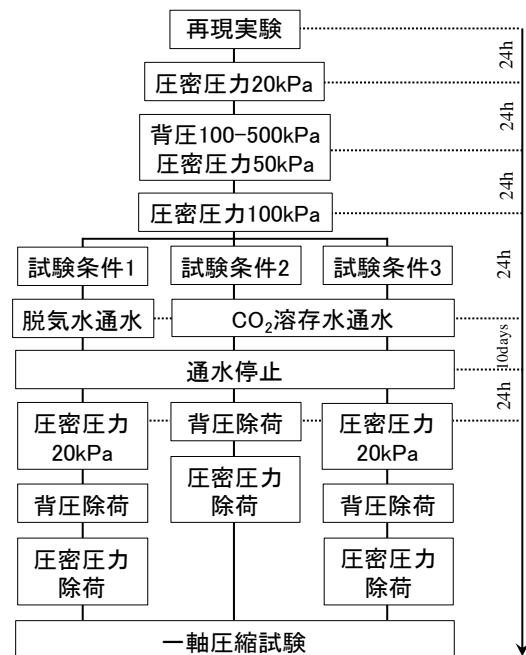


図-7 各試験条件の流れ

において約 10 日間試料に通水を行っている。この 10 日間の通水量は圧密後の供試体と同程度の体積である。

試験条件 2 と 3 の違いは、試験条件 2 では最終段階の圧密圧力の状態で背圧を除荷し後に鉛直応力を除いているが、試験条件 3 では、圧密圧力を 20kPa まで低下させた後に背圧を除荷している。したがって、試験条件 3 の方が試験条件 2 よりも応力解放(背圧除荷) 時の鉛直応力が低いので、試料の乱れが生じやすいと言える。

圧密試験終了後、試験装置を解体し取り出した試料を用いて一軸圧縮試験(直径 50mm, 高さ 100mm, 載荷速度 1mm/min)を行った。

3. 試験結果および考察

図-8は減圧直前でのせん断波速度と含水比の関係を示したものである。多少含水比のばらつきが見られるが、各試験条件、背圧によらずせん断波速度の大きな違いは見られない。したがって、どの条件でも背圧除荷前の状態は等しいものと考えられる。

次に、図-9は各条件で圧密した試料で行った一軸圧縮試験での応力ひずみ曲線を示したものである。図-10は一軸圧縮強さと圧密時の背圧の関係、図 11は一軸圧縮強さと含水比の関係を示したものである。ガス溶存水を通水させた試験条件 2 および 3 の強度は、含水比にばらつきがあるものの、ガス溶存水を通水させていない試験条件 1 の強度に比べ低い傾向にあり、試験条件 2 および 3 の強度は背圧が大きくなるほど低下している。また、試験条件 2 と 3 で行った背圧 100kPa の試験では、2.3 で行った実験により CO₂ の溶存度が低かったため、試験条件 1 と同程度か、わずかに低い強度となった。

また、写真-1は試験条件 1, 3(背圧 500kPa)での試験装置解体後の供試体を示したものである。ガス溶存水を通水していない試験条件 1 に比べ、ガス溶存水を通水した試験条件 3 では、応力解放による間隙水溶存ガスの気化により試料に亀裂が生じ、試料が乱れている様子が見られる。背圧 100kPa での試験条件 2 と 3 では CO₂ の溶存度が低かったため、外見上では、試料の乱れを確認できなかった。

図-12は変形係数と背圧の関係を示したものである。背圧 100kPa での試験条件 2 と 3 の変形係数の値は CO₂ の溶存度が低いことからばらつきが見られるが、300, 500kPa では溶存度の増加に伴い、応力解放による間隙水溶存ガスの気化の影響を受け変形係数の値も低くなっているのがわかる。このように、ガ

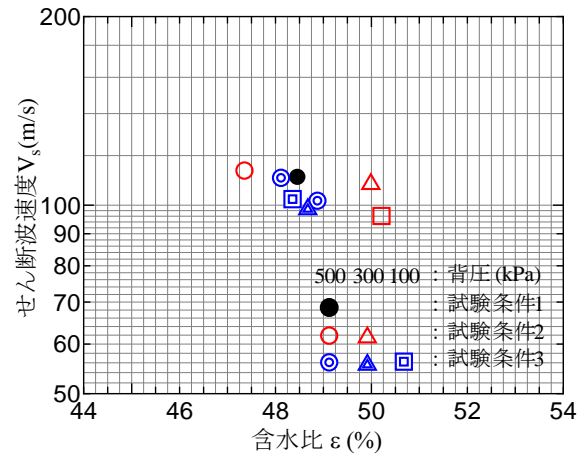


図-8 減圧前のせん断波速度と含水比の関係

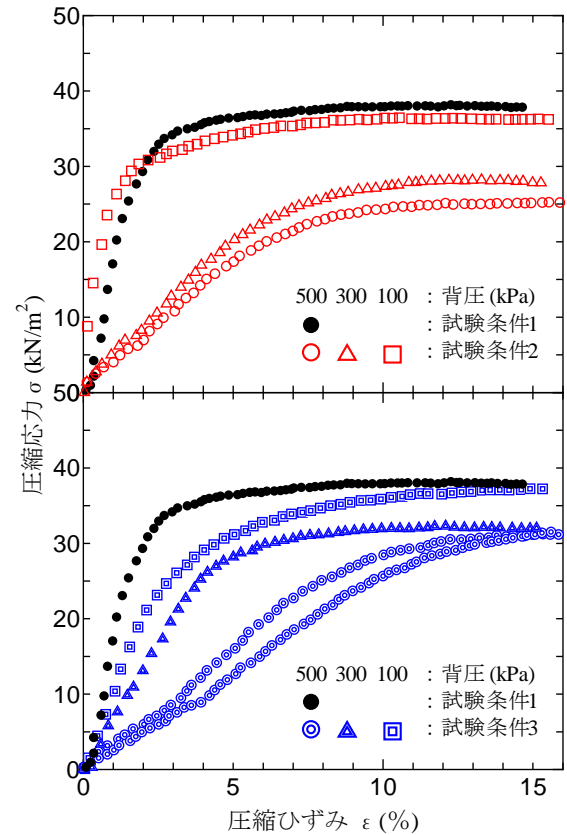


図-9 一軸圧縮試験結果

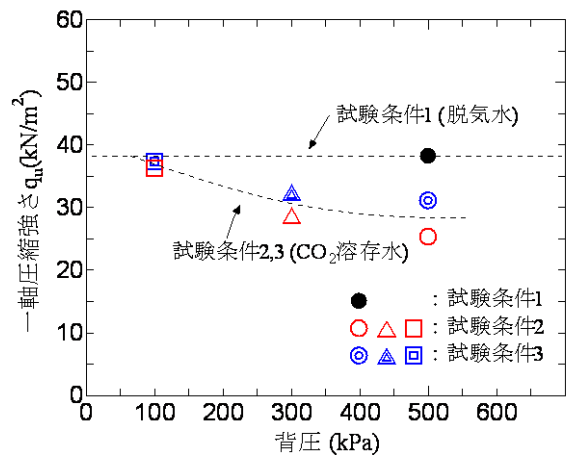


図-10 一軸圧縮強さと背圧の関係

ス溶存水を試料に通水させた試験条件2および3では背圧除荷時の間隙水溶存ガスの気化により、試料が乱れ強度が低下し、間隙水中のCO₂の溶存度が高いほど試料の乱れが大きくなり強度が低下することを確認できた。しかし、最終圧密圧力で背圧を除荷した試験条件2と、背圧除荷時の鉛直応力が低い試験条件3との明確な違いはこれらの結果からは認められなかった。

図-13は各試験条件の背圧500kPaにおける減圧時の鉛直荷重と背圧、軸変位の時刻歴を示したものである。どの試験条件においても、背圧および鉛直荷重の減圧時には変位が認められない。しかし、試験条件3では背圧および鉛直荷重を除荷した後に、間隙水溶存ガスの気化により試料に亀裂が生じ、変位量が増加しているのがわかる。試験条件2は途中で計測を止めてしまっているが、試験条件3と同様に背圧、鉛直応力除荷後に試料に亀裂が生じ、試料の乱れを確認できた。このように、試験条件によらず試料の乱れは、背圧と鉛直荷重を除荷した後に生じているため、試験条件2と3による強度の違いは認められなかったものと考えられる。このことから、減圧時の軸変位が生じにくかったのは、図-3で示したように、用いた試料の粘土分が多かったため粘着成分の発揮により、試料の乱れに時間を要したためであると考えられる。

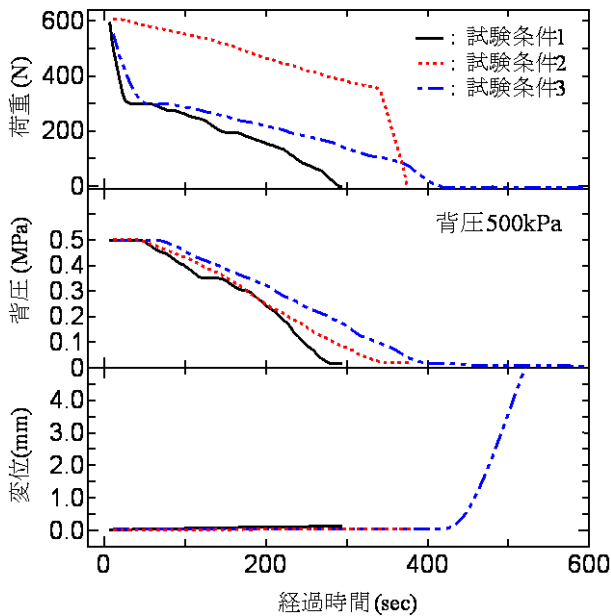


図-13 減圧時の鉛直応力、背圧、軸変位の時刻歴

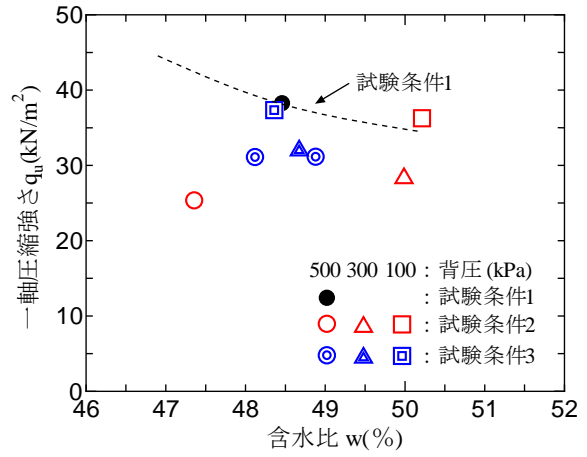


図-11 一軸圧縮強さと含水比の関係

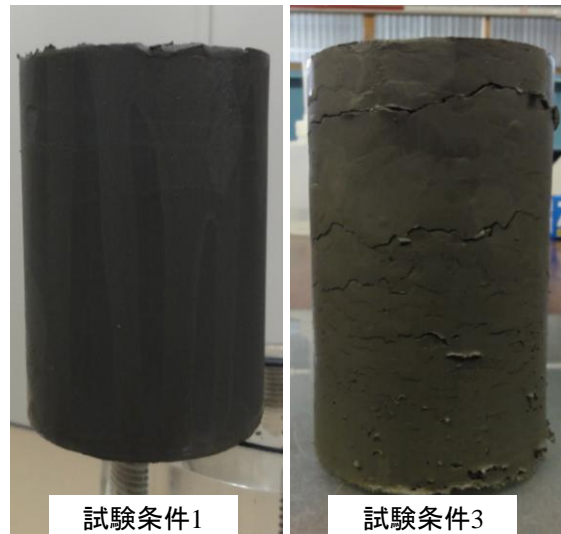


写真-1 試験装置解体後の供試体

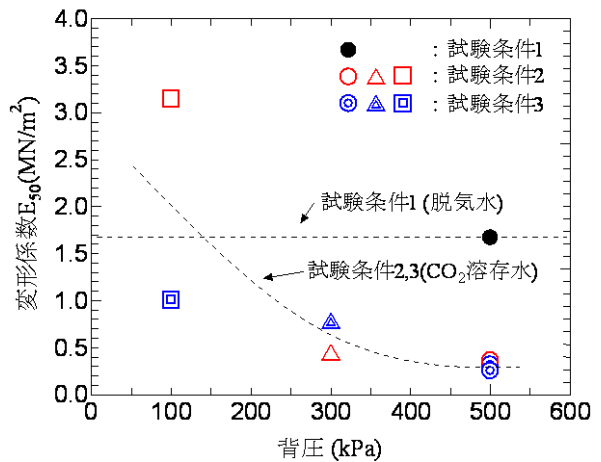


図-12 変形係数と背圧の関係

4. 結論

- (1) ガス溶存実験において、CO₂ガスボンベ圧により脱気水へ溶存させるのに約 24 時間程度で溶存量が定常状態になる。しかし、加圧力の違いによって減圧時の気化量は変化し、大気圧まで減圧させ気化させると、100kPa の加圧力による気化ガス量は、その理想飽和排出量の 2 割程度になり、200kPa から 500kPa の加圧力では理想排出量の 6 割から 7 割程度の排出量になる。
- (2) 高圧条件である湖底、海底地盤での試料採取から室内試験に至るまでの応力条件を再現した実験を行った結果、ガス溶存水を通水させた試料は応力解放時の間隙水溶存ガスの気化により、強度の低下が認められ、ガスの溶存度が高くなるほど試料の乱れは大きくなり、強度は低くなる。
- (3) 試料の乱れは減圧直後に生じないため、背圧除荷時の鉛直応力の違いによる試料の乱れの影響は見られなかった。

謝辞：本研究を進めていくにあたり、本学卒業生 大沢将秀君と 4 年生 金山和貴君に協力をいただいた。記して敬意を表します。なお、本研究は日本学術振興会科学研究費（基盤研究（B）：21360219）の助成を受けたものである。

【参考文献】

- 1)メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムホームページ：<http://www.mh21japan.gr.jp/>
- 2) Kataoka, S., Yamashita, S., Kawaguchi, T. and Suzuki, T.: The soil properties of lake-bottom sediments in the Lake Baikal gas hydrate province, *Soils and Foundations*, Vol.49, No.5 , pp.757-775, 2009.
- 3) 森脇友裕,山下聡,小川美穂,八久保晶弘,南尚嗣,庄子仁：オホーツク海サハリン沖海底堆積土の土質特性, 第 45 回地盤工学研究発表会,pp725-726,2010