

オホーツク海海底堆積土の力学的特性に及ぼす溶存ガス気化の影響

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 八久保晶弘
北見工業大学工学部 南 尚嗣
北見工業大学工学部 庄子 仁

1. はじめに

ガスハイドレートは、低温・高圧下で安定している物質である。近年、ガスハイドレートの調査・研究が世界各地で進められており、海底・湖底堆積物中や永久凍土中など広く存在する天然ガスハイドレートは次世代エネルギー資源として期待される。一方でガスハイドレートの主成分であるメタンは二酸化炭素の 20 倍もの温室効果をもつガスであり地球環境への悪影響も懸念されている。

図-1 は、水域での水深および水温、地温とガスハイドレートの存在領域との関係を模式的に示したものである¹⁾。ハイドレートが温度・圧力条件により安定に存在する領域（HSZ: Hydrate Stability Zone）において、下部に存在するハイドレートは深層型ガスハイドレート、上部に存在するハイドレートは表層型ガスハイドレートと呼ばれている。深層型ガスハイドレートは、次世代エネルギー資源として、南海トラフなどで調査・研究が進められている。

図-2 はこれまで確認されている日本近辺の主なガスハイドレート存在域とプレート境界・地溝帯を示したものである¹⁾。日本近辺のガスハイドレートは、アムールプレートに沿って存在しており、ガスハイドレート存在域と地震活動域と考えられるプレート境界とが密接に関連していることが分かる。特に表層型ガスハイドレートは、地殻変動に伴って地盤深部に発生した過剰間隙水圧により地下から湧出したガス・水によって表層型ガスハイドレートが生成されと考えられる。したがって、表層型ハイドレートが存在している地盤では地下からのガス・水の湧出により攪乱され、安定性が低いことが考えられ、ガスハイドレート採取時や地震時などにおいて海底地すべりや海底地盤の変動によりガスハイドレートの解離が進行し、地球温暖化を助長する危険性がある。このように地球環境変動とガスハイドレートは密接に関連しており、表層型ハイドレート賦存地盤の工学的特性を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、2009 年（LV47）²⁾と 2010 年（LV50）²⁾にオホーツク海サハリン沖、また 2010 年ロシア

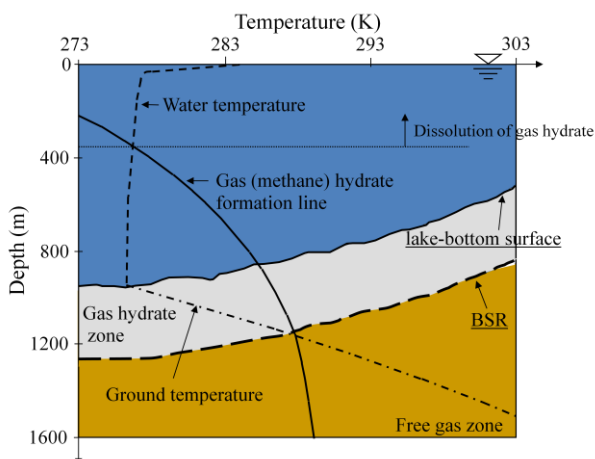


図-1 水域の温度水深分布とガスハイドレート安定領域の模式図¹⁾

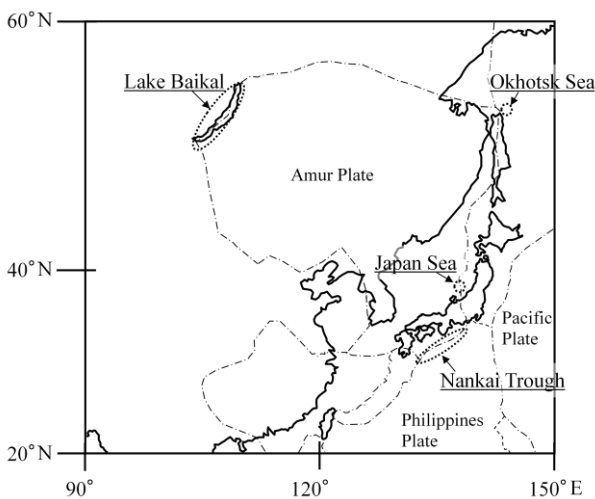


図-2 日本周辺でのガスハイドレートの分布域¹⁾

のバイカル湖において、表層型ハイドレート賦存地盤から海底堆積土を採取し、力学的性質および物理・化学的性質を明らかにした。またガスが溶存した地盤から試料を採取した場合、採取時の応力解放により溶存ガスが気化し、強度低下をもたらすことから採取試料のガス濃度と強度との関係についても調べた。そして、耐圧土槽を用いて室内再現実験を行い海底地盤の試料採取から船上試験に至るまでの再現実験や、溶存ガス気化による斜面崩壊実験も行った。

2. 現地調査と試料採取

2.1 オホーツク海調査概要

2009 年 (LV47)、2010 年 (LV50) に図-3 に示すオホーツク海サハリン島沖において調査を行った。サイドスキャンソナーによる事前調査で海底面形状を把握し、湧出ストラクチャー (マウンドやポップマークなど) の地点を特定した。その後、本調査ではエコーサウンダーにより湧出ストラクチャーの中でガスフレアが確認された地点において、重力式ハイドロコアラ (長さ 5m) を使用して試料採取を行った。重力式ハイドロコアラは 2 重管式になっており、内部には塩化ビニル製のパイプ (内径 110mm) が入っている。

2.2 バイカル湖調査概要

2010 年に図-4 に示すバイカル湖の中央湖盆において調査を行った。オホーツク海サハリン島沖と同様に事前調査を行った後、重力式コアラ (長さ 5m) を使用して試料採取を行なった。重力式コアラもハイドロコアラと同様 2 重管式になっており、内部には塩化ビニル製のパイプ (内径 110mm) が入っている。

2.3 船上での試料採取および試験

船上にコアを引き上げて内管を半割にし、堆積土を観察した後、半割コア 10cm ごとに含水比およびガス濃度測定のための試料採取、ベーンせん断試験 (写真-1)、コーン貫入試験

(写真-2) を行った。室内物理・化学試験用試料も半割コアから 1m (LV47)、50cm (LV50) 間隔で長さ 10cm 程度採取した。

2.3.1 含水比試験用の試料採取

含水比試験用の試料は、採取したコアの深度方向に 10cm 間隔でシリンジ (10ml) を用いて採取した。採取した試料はバイアル瓶 (20ml) に入れて輸送し、含水比を測定した。なおバイカル湖試料は日本に輸入できないため現地で測定した。

2.3.2 ガス濃度測定用の試料採取

含水比試験用の試料採取と同様に、深度方向に 10cm 間隔でシリンジ (5ml、2 本) を用いてガス濃度測定用の試料を採取した。採取した堆積土 (10ml) は、バイアル瓶 (25ml) に入れ、飽和食塩水 (10ml) を加えたのち、ヘッドスペースガス (空気) を窒素ガスに置換し、密閉した状態でバイアル瓶を振盪しヘッドスペースに溶存ガスを気化させた。その後、真空状態のバイアル瓶 (5ml) にヘッドスペースガスを補修し持ち帰った。持ち帰ったヘッドスペースガスは、ガスクロマトグラフによりガス濃度を測定した。

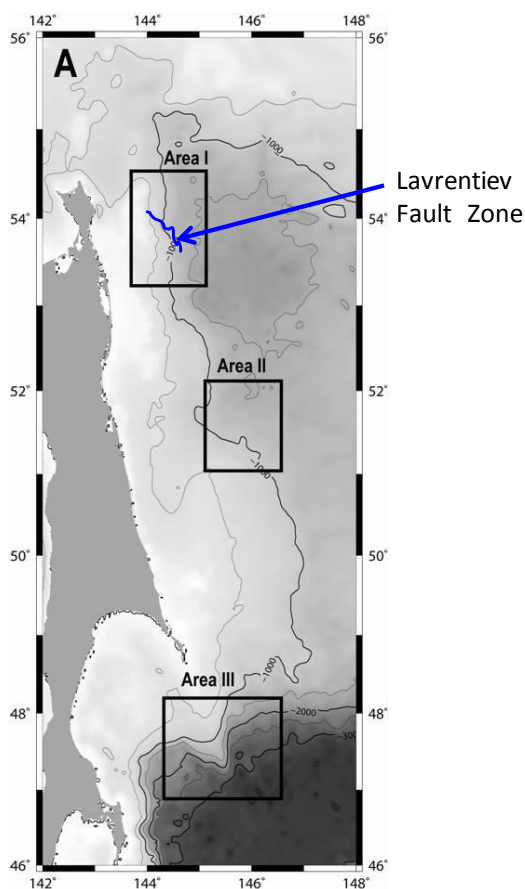


図-3 オホーツク海サハリン島沖調査領域

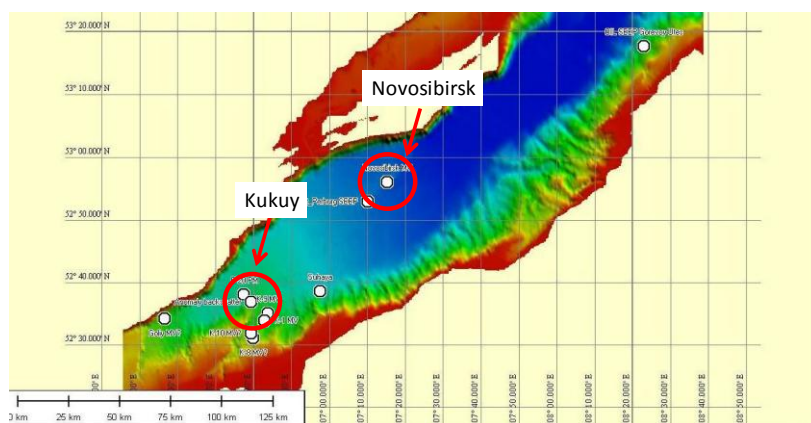


図-4 バイカル湖調査領域

2.3.3 ベーンせん断試験

ベーンせん断試験は、直径 10mm、高さ 20mm のベーンブレードを小型のトルクドライバーに取り付けて試験を行った。コアの切断面に 10cm 間隔で、写真-1 に示すようにブレードを貫入してトルクドライバーを回転させ、このとき得られた最大トルク値から次式よりベーンせん断強さ τ_v を求めた。

$$\tau_v = \frac{M}{\pi \left(\frac{D^2 H}{2} + \frac{D^3}{6} \right)}$$

ここで、M：測定最大トルク

D：ベーンの全幅

H：ベーンの高さ



写真-1 ベーンせん断試験

2.3.4 コーン貫入試験

コーン貫入試験はデジタルフォースゲージを改良したデジタルコーン貫入試験装置を用い試験を行った³⁾。コーンの先端角は 30°、直径は 9mm、貫入深は 16.79mm（写真-2）である。コーン貫入抵抗は次式より求めた。

$$q_c = \frac{P}{A}$$

ここで、P：貫入時の圧縮力

A：コーン断面積



写真-2 コーン貫入試験

2.4 輸送試料での室内試験

輸送後の試料を用いて、LV-47 では含水比試験、液性・塑性限界試験、土粒子の密度試験、粒度試験、強熱減量試験、LV-50 では含水比試験、液性・塑性限界試験、土粒子の密度試験を行った。試験は 50cm または 100cm 間隔で採取した試料に対して行った。なお、パイカル湖の試料は輸入が出来なかったため物理・化学試験は行っていない。

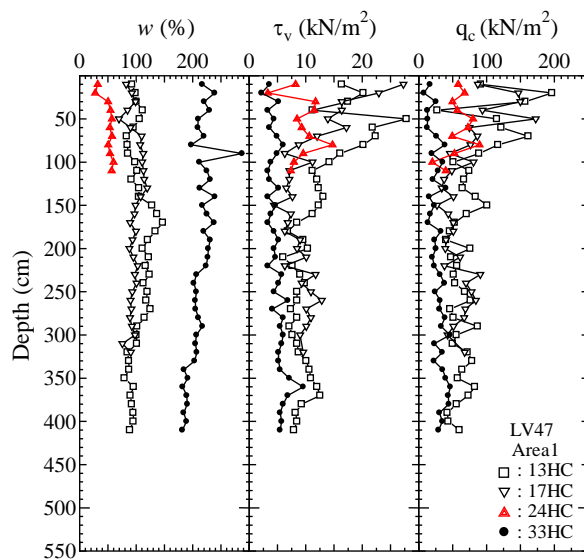


図-5 (a) 船上試験結果 LV47

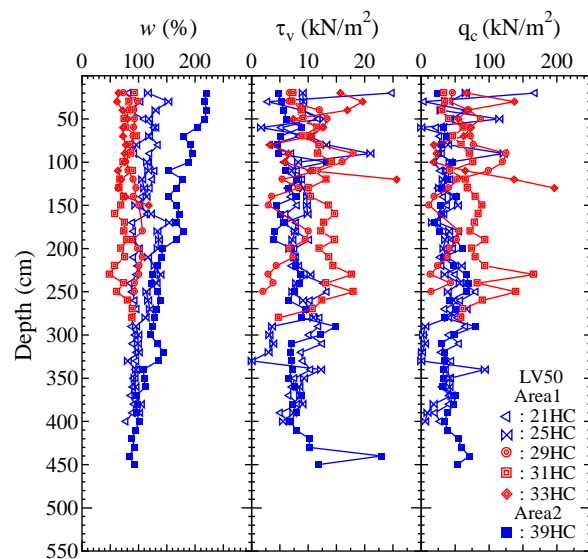


図-5 (b) 船上試験結果 LV50

3. オホーツク海試料の試験結果

3.1 船上試験結果

図-5 (a,b) は採取試料から求めた含水比と船上試験から求めたベーンせん断強度 τ_v 、コーン貫入抵抗 q_c の結果の一部を、深度方向にプロットしたものである。それぞれ調査年ごとに試験結果をまとめている。含水比 w は、採取コアによって大きく異なっているが、同一コアでの含水比は変化が少なく、深度方向にわずかに低下している程度である。LV47 (図-5(a)) の 33HC、LV50 (図-5(b)) の 39HC では、含水比が全体的に高いためベーンせん断強度もコーン貫入抵抗も全体的に低いが、含水比の低下に伴って、深度方向に強度がわずかに高くなっている。それに対し、LV47 (図-5(a)) の 13HC、17HC、LV50 (図-5(b)) の 21HC、25HC などの試料では、含水比の深度方向の変化が少ないのにも関わらず、表層部分で強度が高く、深度が深くなるにつれて強度は低くなっている。このように、採取コアによって含水比と強度の関係は一義的な関係とはなっていない。

3.2 物理・化学試験結果

図-6 は LV47 と LV50 の調査で採取した堆積土の各種物理試験結果（含水比、液性・塑性限界、塑性指数、液性指数、土粒子の密度、強熱減量、粘土分含有量）を深度方向にプロットしたものである。図より採取場

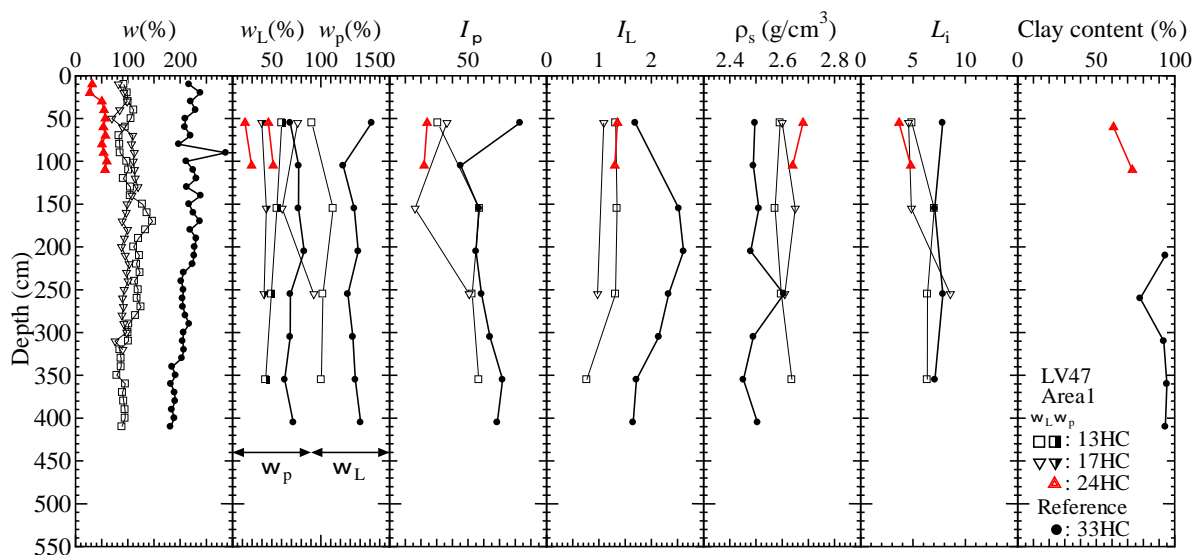


図-6 (a) 物理・化学試験結果 (LV47)

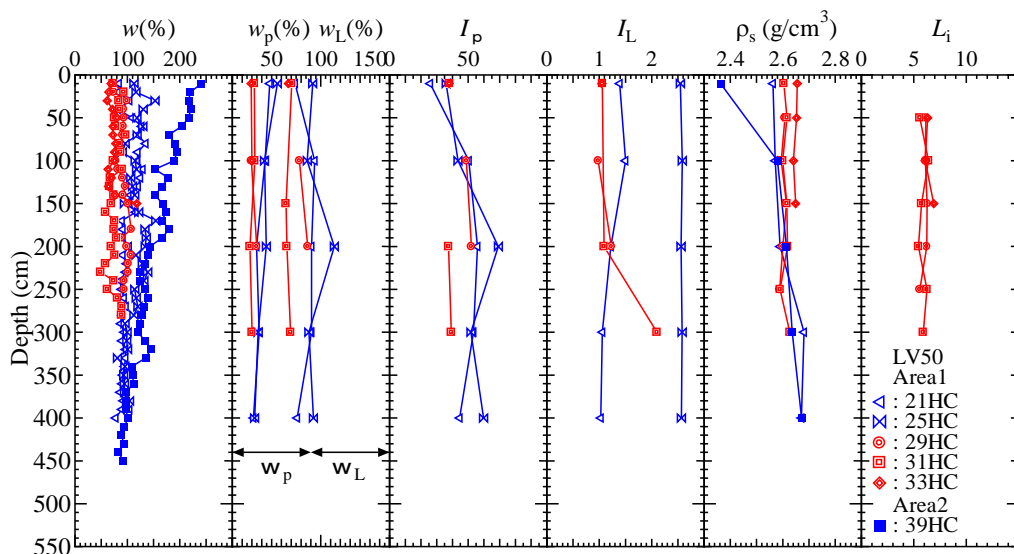


図-6 (b) 物理・化学試験結果 (LV50)

所により若干の違いはあるが同一コアの場合、物理的性質に深度方向の違いはあまり見られない。

また液性指数 I_L は、ほぼすべての試料で 1 以上となっており、海底堆積土は骨格構造が不安定な状態で存在していると考えられる。

ここで、船上試験で表層部分の強度が高くなった LV47 (図-5(a)) の 13HC、17HC、LV50 (図-5(b)) の 21HC、25HC 試料に着目してみると物理的性質は深度方向に変化していないことがわかる。

以上の結果より、調査領域の範囲内では深度方向の物理・化学的性質の違いはあまり見られず、強度との相関性は必ずしも認められなかった。

3.3 ガス濃度と強度特性の比較

LV47 (図-5(a)) の 13HC、17HC、LV50 (図-5(b)) の 21HC、25HC では表層付近で強度が高く、深度が深くなるにつれて強度が低下し、コアによっては含水比と強度に一義的な関係は認められなかった。これは深度方向で堆積土の間隙水に溶存しているメタンガス濃度が異なるため、コア引き上げ時の応力解放による試料の乱れの程度が異なると考えられる。そこで、各コアのガス濃度を測定し、ガス濃度の違いが試料の強度に与える影響を調べた。図-7 は 2009 年 (LV47) と 2010 年 (LV50) に採取した試料のガス濃度と深度の関係を示したものである。図より LV47 の 33HC、LV50 の 39HC では深さによらずメタン濃度は低くなっている。それに対しメタンハイドレートが存在していたコア (LV47 の 24HC, LV50 の 29HC, 31HC, 33HC) では表層付近からガス濃度が高くなっていることが分かる。その他の試料では表層付近でガス濃度が低いのに対し、ある深度から急激にガス濃度が高くなっている。このようにコアによって堆積物中のガス濃度は深度方向で異なっている。なお図中に示したガス濃度は試料引き上げ後の大気圧状態で測定した結果であり、海底下の地盤中におけるガス濃度を表すものではないが、ガス濃度の高低の相対的な評価は可能である。

ここで、ガス濃度 20mL/L 以上の試料をガス濃度の高い試料、1mL/L 以下の試料を低い試料とし区別する。この 20mL/L の値は、コア断面観察時にガスの気化に伴う表面の膨れ上がりや亀裂が認められた境界付近である。

次にガス濃度と強度の関係を比較するために含水比とベーンセン断強度の関係を図-8 に示す。図中に示した実線と破線は、ガス濃度が 1mL/L 以下および 20mL/L 以上の結果に対する近似線である。図よりガス濃度の高い試料は、ガス濃度の低い同一含水比の試料の強度よりも低くなっていることが分かる。ただし、強度に少しはばらつきがある。

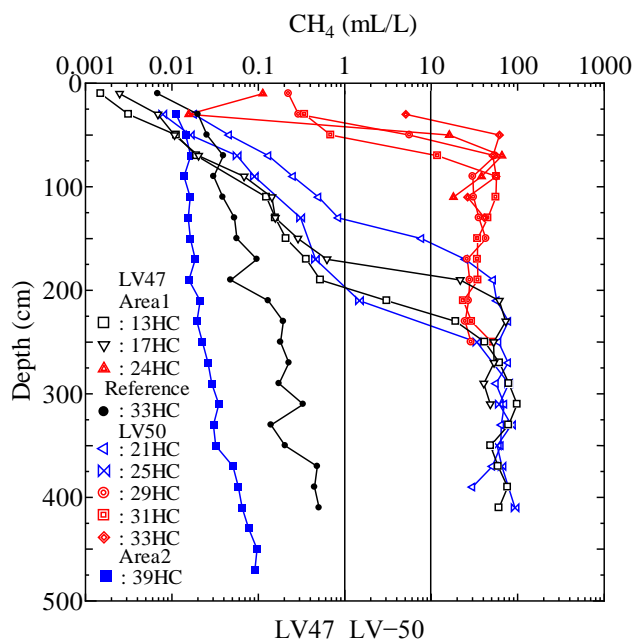


図-7 ガス濃度と深度の関係 (LV47、LV50)

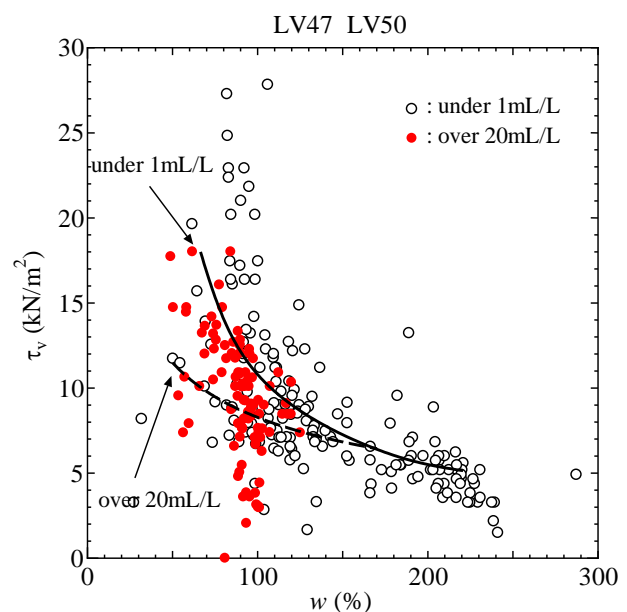


図-8 τ_v と w の関係 (LV47、LV50)

4. バイカル湖試料の試験結果

4.1 船上試験結果

図-9 (a,b) はバイカル湖中央湖盆の Novosibirsk と Kukuy 領域での採取試料から求めた含水比と船上試験から求めたベーンせん断強度 τ_v 、コーン貫入抵抗 q_c の結果を、深度方向にプロットしたものである。

図-9 (a) に示す Novosibirsk で採取した試料ではガスハイドレートが存在していたコア (●) ではその他のコア (○) よりも含水比が低く強度は高い傾向にある。一方図-9 (b) に示す Kukuy 領域で採取した試料はガスハイドレートが存在していたコア (●) の含水比はその他のコアと同程度かやや低いのに対し強度はほぼ同程度となっている。以上より採取エリアによりガスハイドレートの有無による強度の相関性は明確には認められない。

4.2 ガス濃度と強度特性の比較

図-10 (a,b) は Novosibirsk と Kukuy で採取した試料のガス濃度と深度の関係を示したものである。図より Novosibirsk 試料ではガスハイドレートの有無にかかわらずどのコアでも表層付近から高いガス濃度を示し

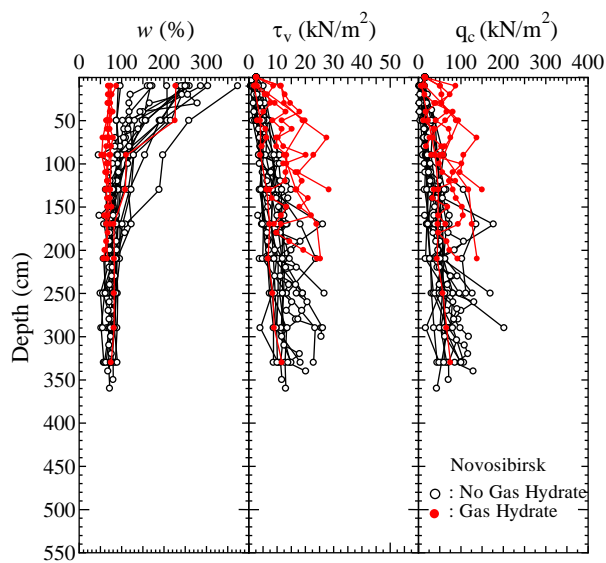


図-9 (a) 船上試験結果 Novosibirsk

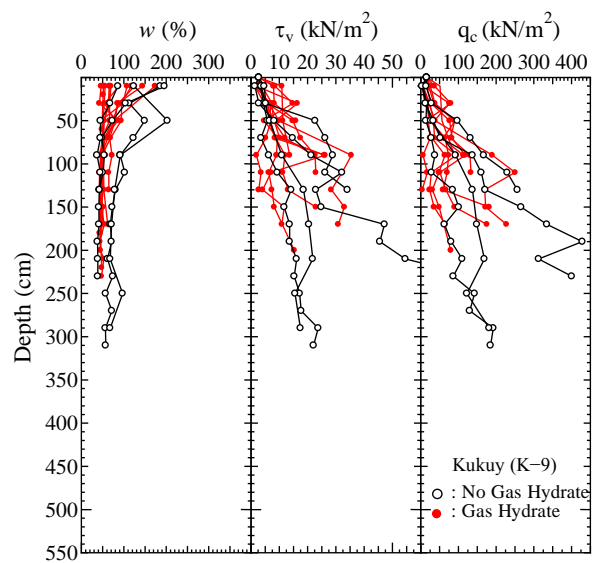


図-9 (b) 船上試験結果 Kukuy

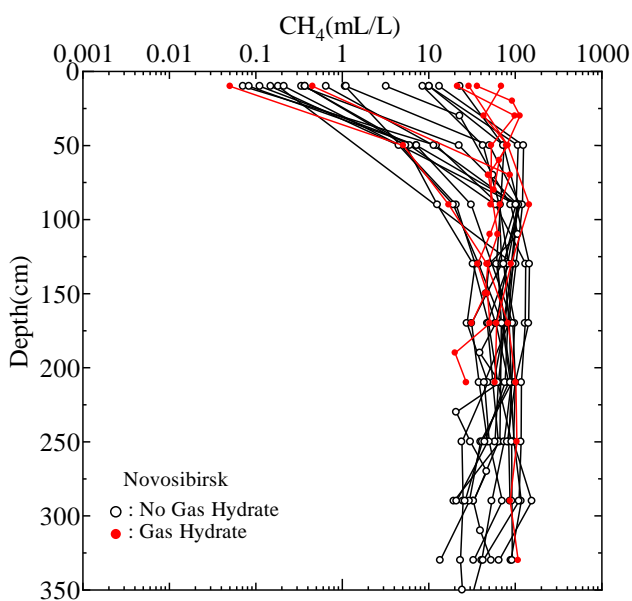


図-10 (a) ガス濃度測定結果 Novosibirsk

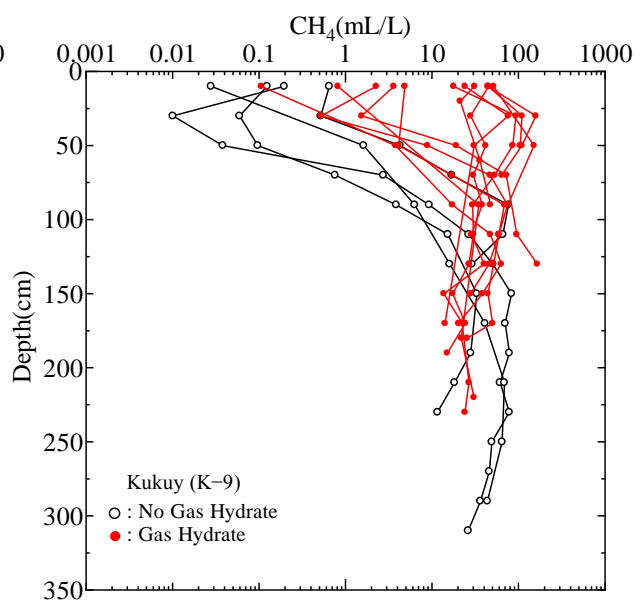


図-10 (b) ガス濃度測定結果 Kukuy

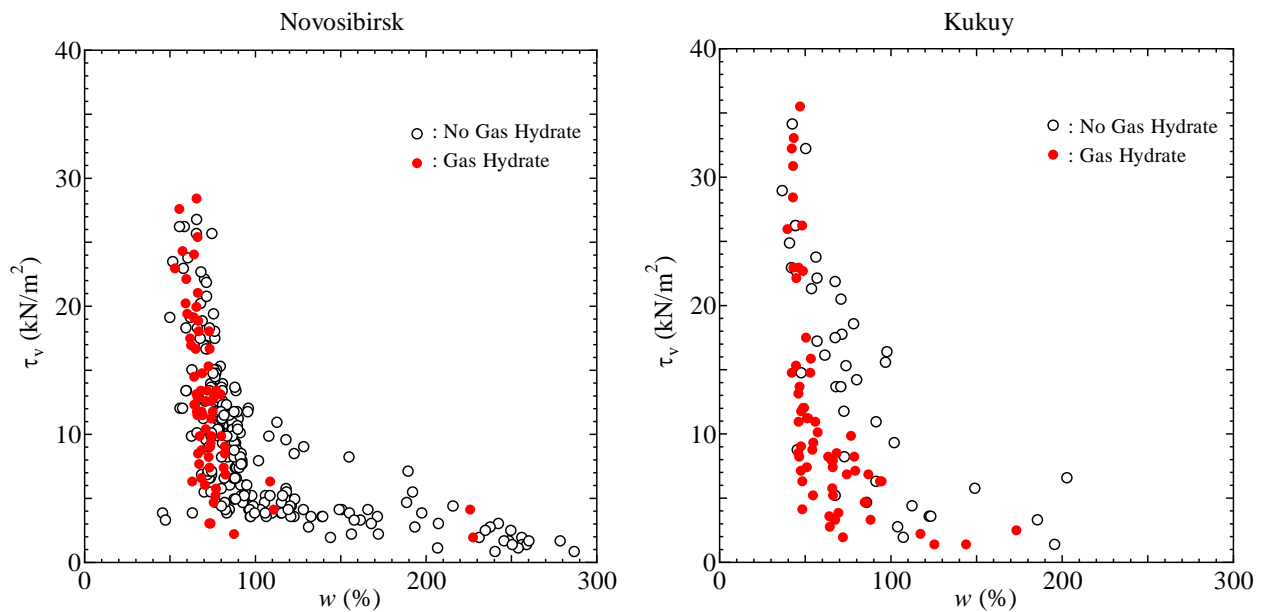


図-11 (a) τ_v と w の関係 Novosibirsk

図-11 (b) τ_v と w の関係 Kukuy

ている。一方 Kukuy 試料ではガスハイドレートが存在していたコアは表層からガス濃度が高くなっているのに対しガスハイドレートが存在しなかったコアは表層付近ではガス濃度が低くある深度から急に高くなっていることがわかる。

次にガス濃度と強度の関係を比較するために含水比とベーンセン断強度の関係を図-11 に示す。図より Novosibirsk 試料ではガスハイドレートの有無により強度の極端な変化は無い。これは図-10 (a) に示したようにガスハイドレートの有無によらずガス濃度が同程度だったためガスの気化による乱れが一樣に起きたと考えられる。一方図-11 (b) に示した Kukuy 試料ではガスハイドレートが採取されたコアの強度が低くなっている。これは図-10 (b) に示したようにガスハイドレートが採取されたコアのガス濃度が表層付近から高いため気化による乱れの影響が顕著に出たためと考えられる。このようにバイカル湖試料においても溶存ガスの気化による試料の乱れによって強度の低下が認められた。また、濃度の違いによっても強度低下に差が現れた。

5. 溶存ガス気化再現実験

5.1 実験概要

採取試料の船上試験結果および物理・化学試験からメタンハイドレート賦存地盤から引き上げたコアは間隙水溶存ガスの気化による試料の乱れにより強度が低下することが考えられた。このことを確認するために、耐圧土槽を用いて海底地盤での試料採取から船上試験に至るまでの応力条件を室内で再現し強度低下の評価を行なった。

5.2 試験装置

図-12 に試験装置の概略図を示す。土槽の寸法は縦 20cm、横 40cm、奥行 10cm である。上部にベロフラムシリンダーを取り付けることが可能で土槽内で圧密を行うことができるようになっている。また、ベロフラムシリンダーを取り外して上蓋をかぶせ土槽に圧力を加えることができる。上部のタンクより CO_2 溶存水を水頭差で試料に通水させることが可能である。

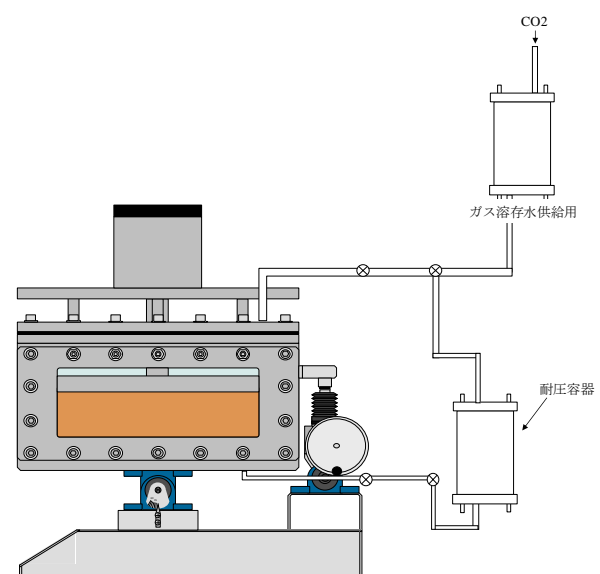


図-12 耐圧土槽の概略図

5.3 試験方法

試料は藤ノ森粘土 ($\rho_s=2.764\text{g/cm}^3$, $w_L=50.8\%$, $I_p=19.5$) を使用した。予圧密時の初期含水比 (w_0/w_L) を液性限界の約 2 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 時間程度攪拌した。その後、耐圧土槽に移し、圧密を行った。藤ノ森粘土を用いた理由は、シルト分が比較的多い試料なので透水性が高いと考え、溶存水の循環を容易とするためである。試験条件を図-13 に示す。まず圧密圧力 100kPa で圧密を一週間程度行いその後、背圧 500kPa・上載圧 1kPa で脱気水または、CO₂ 溶存水を 1 週間通水させ解体し、試料の表層部でベーンせん断試験・コーン貫入試験を行なった。また、ベーンせん断試験はベーンブレード中心深さが 2cm 以外に 4cm、5cm の深さでも試験を行なった。

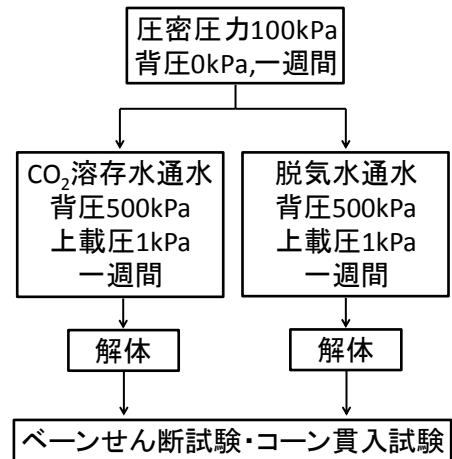


図-13 試験の流れ

5.4 試験結果

図-14 は CO₂ 溶存水を通水させた試料と脱気水を通水させた試料の試料表層部でのベーンせん断強さとコーン貫入抵抗を比較したものである。図より CO₂ 溶存水を通水させた試料では含水比に若干の違いは見られたものの強度の低下がみうけられ、溶存ガスの試料の乱れによって強度変化が起きたものであると考えられる。また、ベーンせん断試験は異なった深度で行なっているが深さ方向にも同様に強度の低下が見られ、土槽内で試料が一樣に乱れていると考えられる。以上より船上同様に溶存ガスが気化したことによる試料の乱れを室内でも再現することができた。しかし、今後種々の試験を行いより正確な評価が必要である。

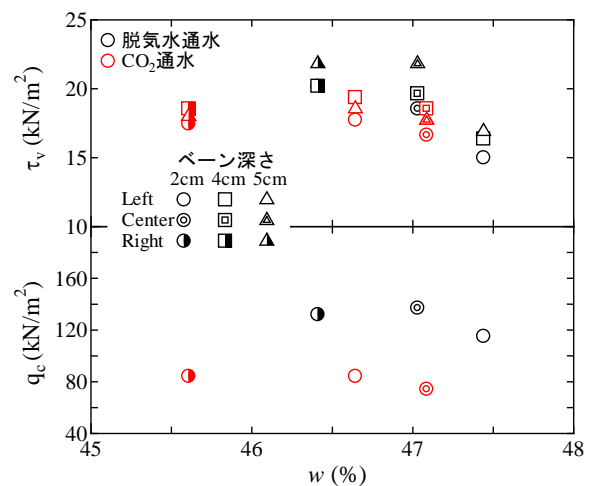


図-14 $q_c \cdot \tau_v$ と w の関係

6. 模型斜面崩壊実験

海底堆積土の間隙水にメタンガスが多く溶存している場合、コア引上げ時の応力解放により、溶存ガスの気化に伴う試料の乱れや間隙圧の上昇に伴う有効応力の低下が発生する。そのため、採取した試料の強度は溶存ガス濃度が高くなるとほど低くなる傾向にあることが分かった。一方、海底地盤においても海水温の上昇や資源としての採取時の圧力低下などによって、間隙水溶存ガスの気化やハイドレートの分解などにより海底地盤強度が低下し、海底斜面が不安定化することも考えられる。そこで、海底地盤の安定性を評価するための第一段階として海底斜面内で間隙水溶存ガスが気化した場合を想定した模型実験を行った。

試験は、溶存ガス気化再現実験に用いた耐圧土槽を用いて行った。図-15 (a) に示すように脱気水を満たした傾斜した土槽内に豊浦砂を堆積させ、脱気水面と試料表面が平行になるように均して成形する。成形後、耐圧土槽を傾斜させた状態で上蓋を閉じて上部に少し空間を残して脱気水を注水する。その後、土槽上部から種々の圧力の炭酸ガスで加圧を行った。24 時間程度加圧をした後、図-15 (b) に示すように土槽の傾斜角を変化させることによって、2 種の傾斜角 (20°と安息角程度) の斜面を作製した。この状態で、減圧速度の異なる条件で大気圧まで減圧を行い、溶存ガスを気化させ、それに伴う斜面変動を観察した。表-1 に試験条件と斜面変動の結果を示す。

加圧力 100 および 200kPa で炭酸ガスを溶存させ、斜面傾斜角が 20°で減圧速度が 10kPa/min の場合 (Test-1, 2)、斜面変動は起こらなかった。これは、減圧により溶存ガスが気化したが、減圧速度が遅かったため気化

速度および量が少なく、また傾斜角も緩やかであったため斜面を不安定化させるほどの気化が起こらなかったためと考えられた。そこで、Test-3 では加圧力 500kPa を加えることで、溶存濃度を高くし、減圧速度も増加させた。その結果、斜面先部分で変動がみられたものの斜面全体が崩れるような変動は起こらなかった。次に、傾斜角を安息角（35°程度）直前の角度で、減圧速度をさらに増加させて試験を行った（Test-4～6）。写真-3 に減圧前後の状況を示す。写真に示すように、斜面表層部および斜面先で崩壊が生じ、Test-3 よりも崩壊量は多かった。しかし、斜面全体にわたるような大きな崩壊は発生しなかった。これは、砂の場合、透水（気）性が高く、間隙圧を上昇させ有効応力を極度に低下させるような現象が発生しなかったことと、表層部分の崩壊のみによって斜面が安定な傾斜角の状態になってしまうためと考えられる。

今後は、メタンハイドレートを想定して堆積層内に存在する固体が液体や気体に変化した場合や、粘性土斜面などを想定した実験を行う予定である。

表-1 模型斜面崩壊実験条件と結果

試験名	斜面傾斜角	ガス加圧力 (kPa)	減圧速度 (kPa/min)	斜面変動状況
Test-1	20°	100	10	変化なし
Test-2	20°	200	10	変化なし
Test-3	20°	500	100	斜面先が一部崩壊
Test-4,5,6	33.6°～35.8°	500	500	斜面表層と斜面先で崩壊

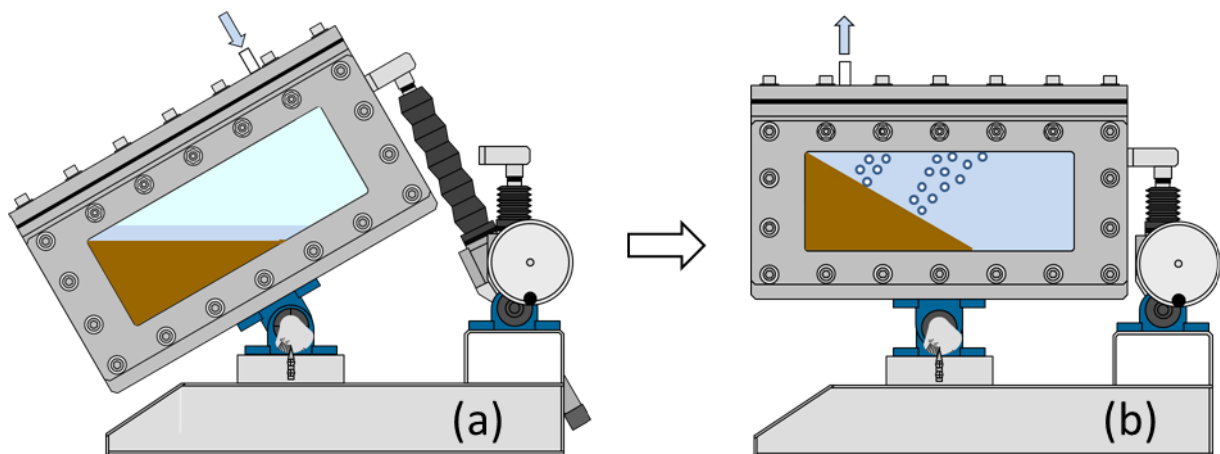


図-15 模型斜面崩壊実験方法：(a) 試料堆積時，(b) 減圧時

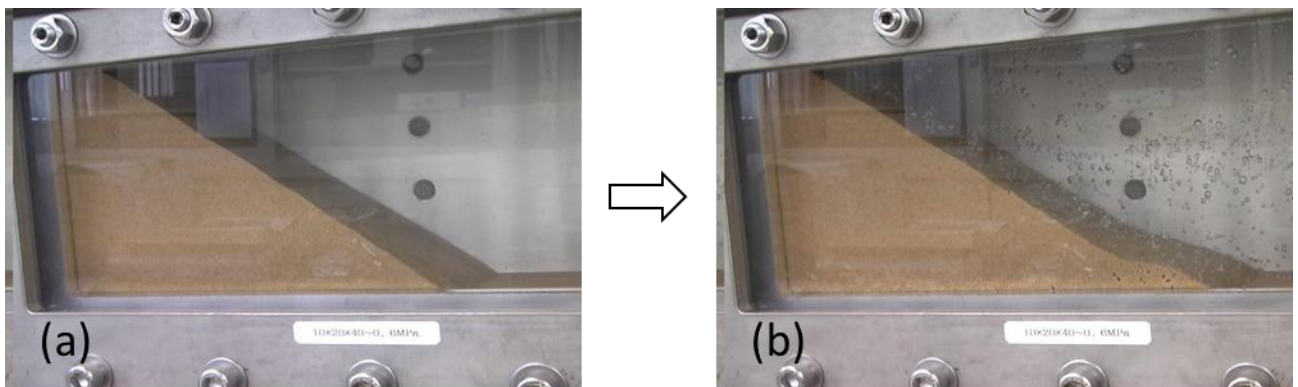


写真-3 Test-4 での減圧前後の様子：(a) 減圧前，(b) 減圧後

7. 結論

- (1) 船上試験結果において、ハイドレートが存在している領域の海底地盤から採取した堆積土の力学的性質は、採取コアによって含水比と強度の関係は様々であり、一義的な関係とはなっていないことが分かった。

- (2) 物理・化学試験より採取場所により若干の違いはあったが同一コアを深度方向に見てみるとあまり違いは見られなかった。物理・化学的性質の深度方向の違いが強度に及ぼす影響は認められなかった。
- (3) ガス濃度の高低と強度の関係を比較した結果、ガス濃度の高い試料では、ガス濃度の低い試料に比べ強度は低い値となった。
- (4) オホーツク海サハリン島沖およびバイカル湖で採取した試料は、コア引き上げ時の応力解放に伴い、ガス濃度の高い試料で間隙水溶存ガスが気化したことにより採取試料に乱れが生じ強度が低下したことが分かった。
- (5) 高圧条件である海底地盤での試料採取から船上試験に至るまでの応力条件を、耐圧土槽を用いて室内再現実験を行なった結果、船上試験結果と同様の結果となり背圧を除荷することにより溶存ガスが気化し強度が低下することが確認できた。
- (6) 模型斜面崩壊実験により、安息角程度においては溶存ガスの急激な気化によって斜面表層部に崩壊が発生したが、砂質土では透水（気）性が高いため、大きな斜面崩壊には至らなかった。

謝辞：オホーツク海およびバイカル湖調査において、北見工業大学大学院 出羽君および乗船研究者各位にご協力をいただいた。また、室内実験において本学卒業生 大澤将秀君と4年生 三浦竜司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) 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.
- 2) 森脇友裕, 山下聡, 八久保晶弘, 南尚嗣, 庄子仁：オホーツク海サハリン沖メタンガス含有堆積土の土質特性, 地盤工学会北海道支部技術報告集第51号, pp.159-168, 2011
- 3) 小川美穂, 山下聡, 片岡沙都紀, 八久保晶弘, 南尚嗣, 庄子仁：溶存ガスの気化に伴う海底堆積土の強度変化, 地盤工学会北海道支部技術報告集第50号, pp.177-186, 2010