

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

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ると考えられる。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

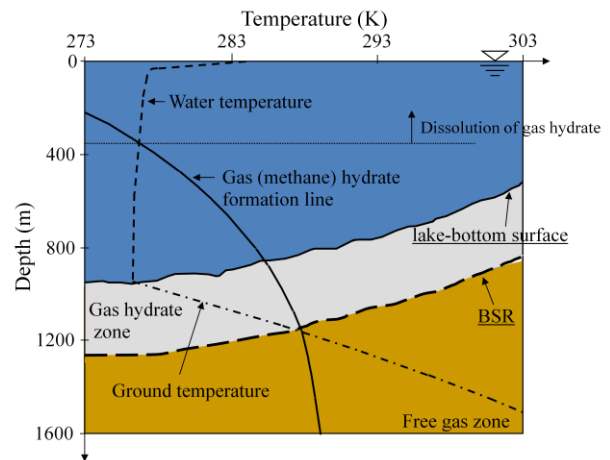


図-1 水域の温度水深分布とガスハイドレート安定領域の模式図¹⁾

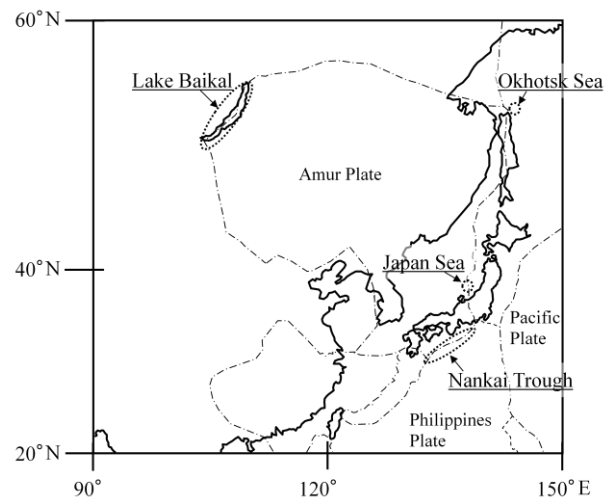


図-2 日本周辺でのガスハイドレートの分布域¹⁾

The soil properties of sediments contained dissolved metham gas obtained from offshore Sakhalin the Sea of Okhotsk
MORIWAKI Tomohiro, YAMAITA Satoshi, HATIKUBO Akihiro, MINAMI Naotugu,
SHOJI Hitoshi (Kitami Institute of Technology),

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)にオホーツク海サハリン沖において、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。

2. 現地調査と試料採取

2.1 調査概要

2009年(LV47)、2010年(LV50)にオホーツク海サハリン島沖において行った。調査および海底堆積土の採取場所を図-3(a)に、また図中のArea Iの拡大図を図-3(b)に示す。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(図-4)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、写真-1)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。

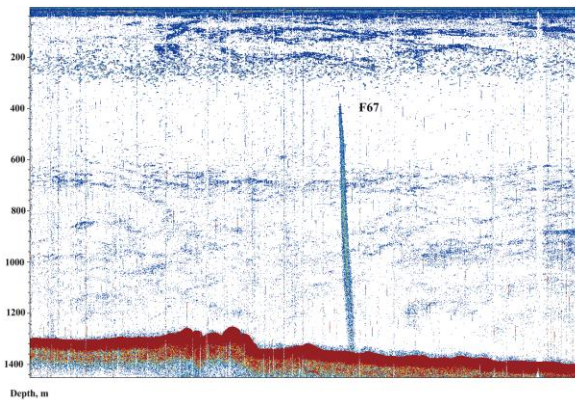


図-4 ガスフレア画像の例³⁾



写真-1 重力式ハイドロコアラ

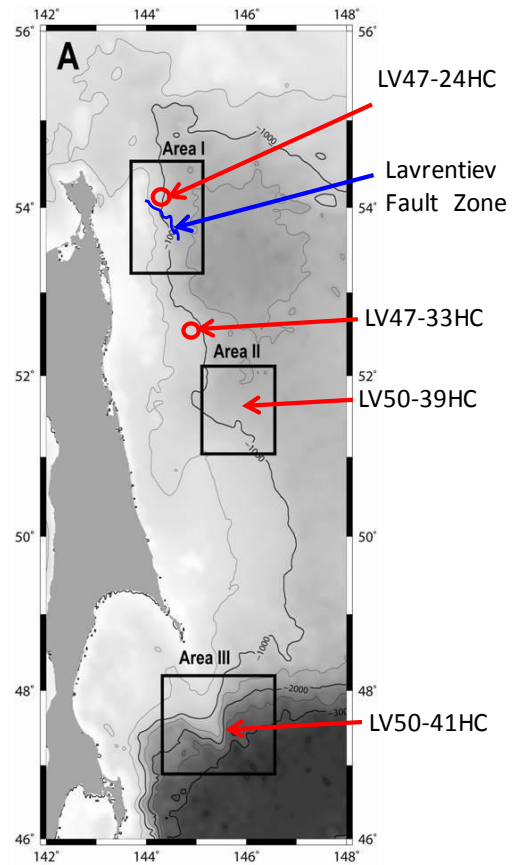


図-3 (a) オホーツク海サハリン島沖調査領域

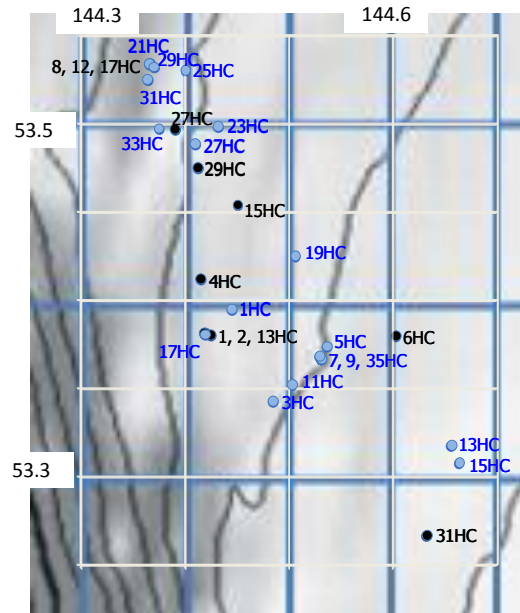


図-3 (b) オホーツク海サハリン島沖
Area I 拡大図
(●LV47, ●LV50)

表-1 採取コア一覧

LV47

Area	Core Name	Latitude, N	Longitude, E	Water depth (m)	Sediment recovery, cm	Gas Hydrate
I	LV47-1HC	53°22.87'	144°25.168'	619	73	
I	LV47-2HC	53°22.784'	144°25.512'	633	330	
I	LV47-4HC	53°24.7'	144°24.9'	621	370	
I	LV47-6HC	53°22.755'	144°36.129'	944	418	
I	LV47-8HC	53°32.0'	144°22.0'	633	292	
I	LV47-12HC	53°32.018'	144°22.044'	600	200	
I	LV47-13HC	53°22.853'	144°25.113'	616	420	
I	LV47-15HC	53°32.019'	144°21.961'	647	317	
I	LV47-17HC	53°32.019'	144°21.961'	647	323	
I	LV47-18HC	53°57.971'	144°34.033'	1286	410	
I	LV47-21HC	53°57.999'	144°33.999'	1280	376	
I	LV47-22HC	54°03.730'	143°58.775'	385	70	
I	LV47-24HC	54°03.756'	143°58.858'	397	122	○
I	LV47-25HC	53°52.407'	144°30.283'	1328	411	
I	LV47-27HC	53°29.798'	144°23.430'	645	410	
I	LV47-29HC	53°28.486'	144°24.756'	667	368	
I	LV47-31HC	53°15.971'	144°37.915'	939	405	
I	LV47-33HC	52°30.1'	144°59.9'	860	425	

LV50

Area	Core Name	Latitude, N	Longitude, E	Water depth (m)	Sediment recovery, cm	Gas Hydrate
I	LV50-1HC	53°23.711'	144°26.752'	665	439	
I	LV50-3HC	53°20.570'	144°29.069'	690	359	
I	LV50-5GC	53°22.436'	144°32.197'	785	514	
I	LV50-7GC	53°22.011'	144°31.878'	782	129	
I	LV50-9HC	53°21.996'	144°31.869'	782	340	
I	LV50-11HC	53°21.145'	144°30.189'	720	470	
I	LV50-13HC	53°19.068'	144°39.393'	1020	360	
I	LV50-15HC	53°18.479'	144°39.834'	1015	361	
I	LV50-17HC	53°22.839'	144°25.152'	615	362	
I	LV50-19HC	53°25.508'	144°30.366'	763	453	
I	LV50-21HC	53°32.047'	144°21.950'	641	417	
I	LV50-23HC	54°29.934'	143°25.897'	700	420	
I	LV50-25HC	54°31.828'	143°24.014'	677	420	
I	LV50-27HC	53°29.329'	144°24.581'	659	330	
I	LV50-29HC	53°32.938'	144°22.206'	630	256	○
I	LV50-31HC	53°31.513'	144°21.835'	614	320	○
I	LV50-33HC	53°29.845'	144°22.485'	611	183	○
I	LV50-35HC	52°22.108'	144°31.755'	765	425	
I	LV50-37HC	53°20.150'	144°12.131'	297	250	
II	LV50-39HC	53°35.383'	144°24.670'	1320	459	
III	LV50-41HC	52°43.646'	144°33.754'	245	160	

表-1 に 2009 年 (LV47) と 2010 年 (LV50) の調査で採取したコアの領域、コア名、位置、水深、コア長、ハイドレート採取の有無を示す。これらの試料を用いて、船上試験および輸送試料での物理・化学試験を行った。

2.2 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、バーンセン断試験 (写真-2)、コーン貫入試験 (写真-3) を行った。また、LV47 では一軸圧縮試験用試料 (長さ 10cm) を半割コアから 1m 間隔で採取し、パラフィンでラップして輸送した。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。



写真-2 ベーンせん断試験



写真-3 コーン貫入試験

2.2.1 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(写真-4)。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。

2.2.2 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。



写真-4 含水比試験用の試料採取

2.2.3 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-2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

2.2.4 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⁴⁾。コーンの先端角は30°、直径は9mm、貫入深は16.79mm(写真-3)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(一定値)

2.3 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、XRD 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。

3. 試験結果

3.1 船上試験結果

図-5 (a-f) 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 の結果を、深度方向にプロットしたものである。それぞれ同一エリアから採取した試料ごとに試験結果をまとめている。含水比 w は、採取エリ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。図-5 (f) に示す Reference 試料では、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、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 の 13HC (図-5(c))、17HC (図-5(a))、LV50 の 21HC (図-5(a))、25HC (図-5(a)) などの試料では、含水比の深度方向の変化が少ないにもかかわらず、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。

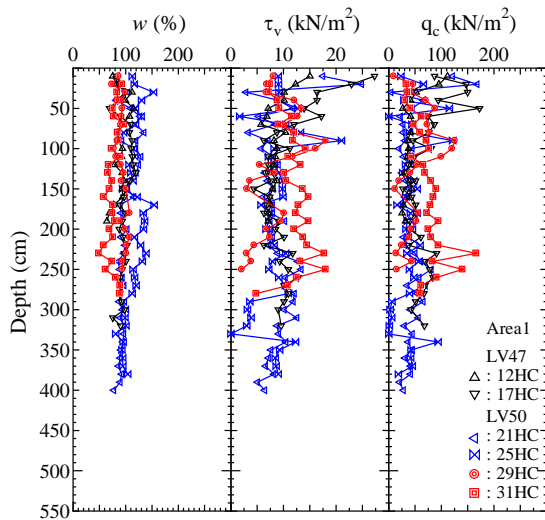


図-5 (a) 船上試験結果 1

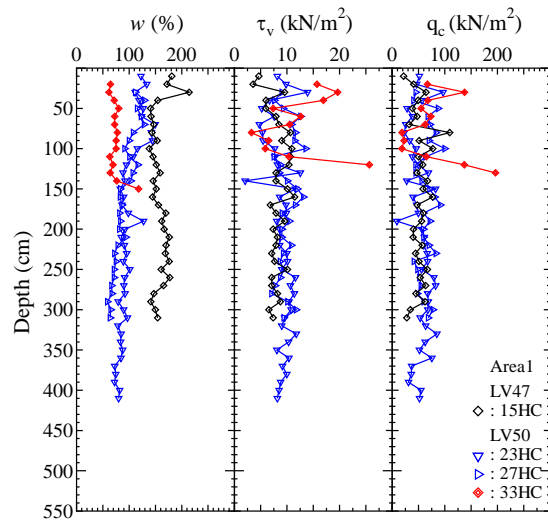


図-5 (b) 船上試験結果 2

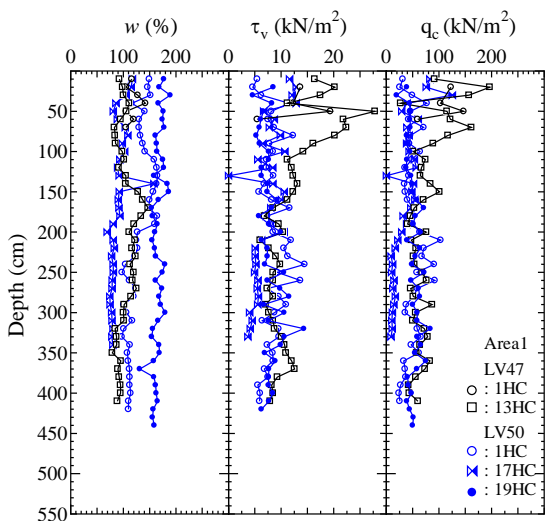


図-5 (c) 船上試験結果 3

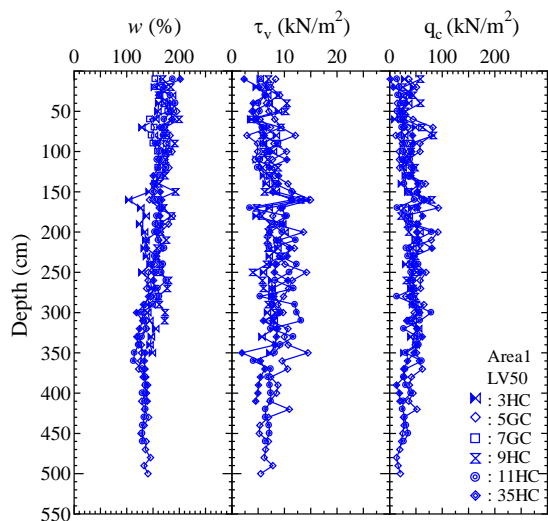


図-5 (d) 船上試験結果 4

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 の 13HC (図-5(c))、17HC (図-5(a))、LV50 の 21HC (図-5(a))、25HC (図-5(a)) 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。

次に、堆積土を構成している鉱物の組成に違いがあるのかを調べるために、LV-47 の 15HC、31HC、18HC、33HC (Reference) 試料を用いて X 線回折試験を行った。X 線回折に用いた試料は全て、室温にて乾燥させた後、0.075mm ふりを通した試料である。この測定で得られたチャートを、図-7 に示す。これらの図から堆積土の構成鉱物には採取領域、場所、深度などに関係なくどれも石英 (Q) を多く含み、斜長石 (P)、カオリン (K)、クロライト (C) などの鉱物も確認できた。また、各々のピークが出現している入射角の値を比較すると、およそ同じ値を示していることから、鉱物組成に関する違いはないと考えられる。

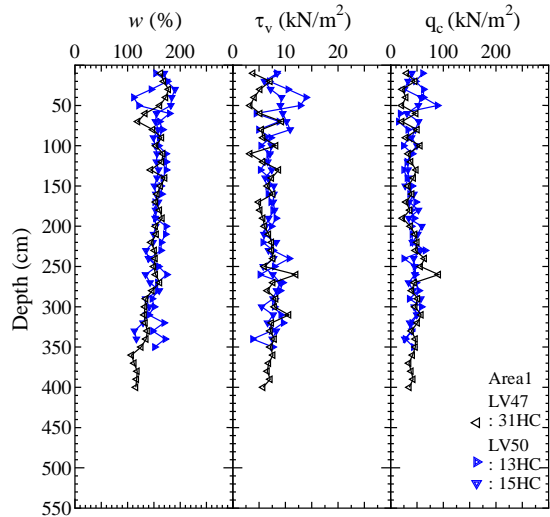


図-5 (e) 船上試験結果 5

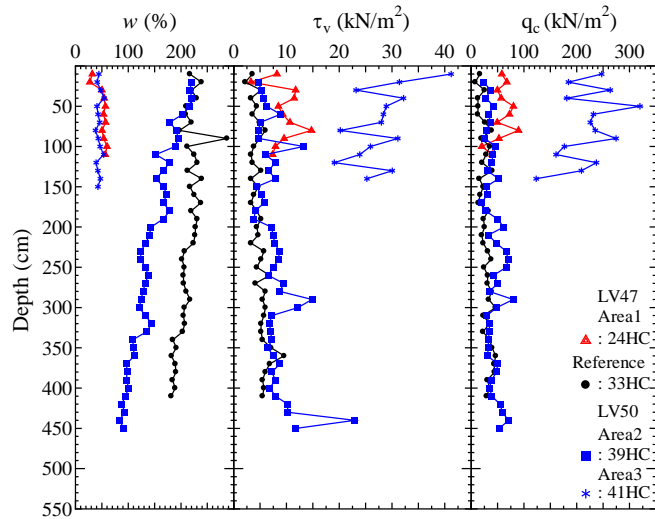


図-5 (f) 船上試験結果 6

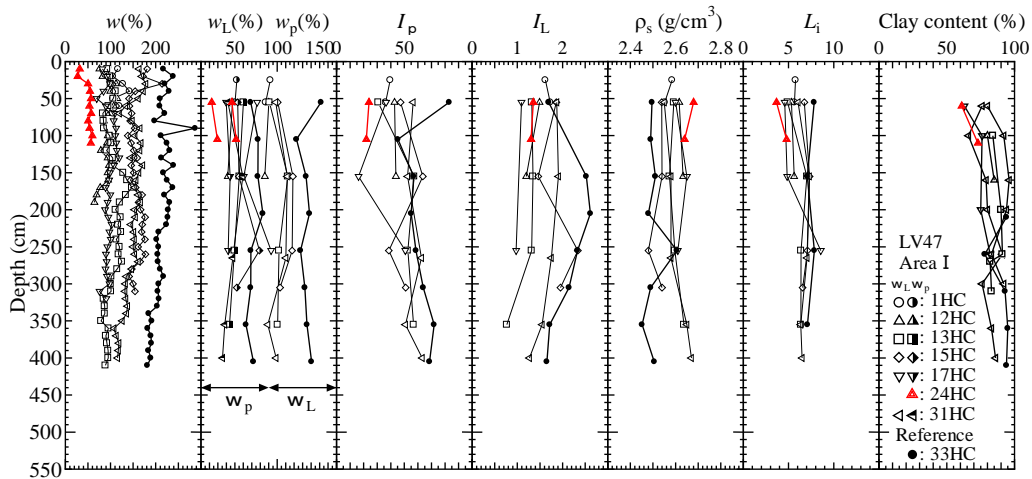


図-6 (a) 物理・化学試験結果 (LV47) 1

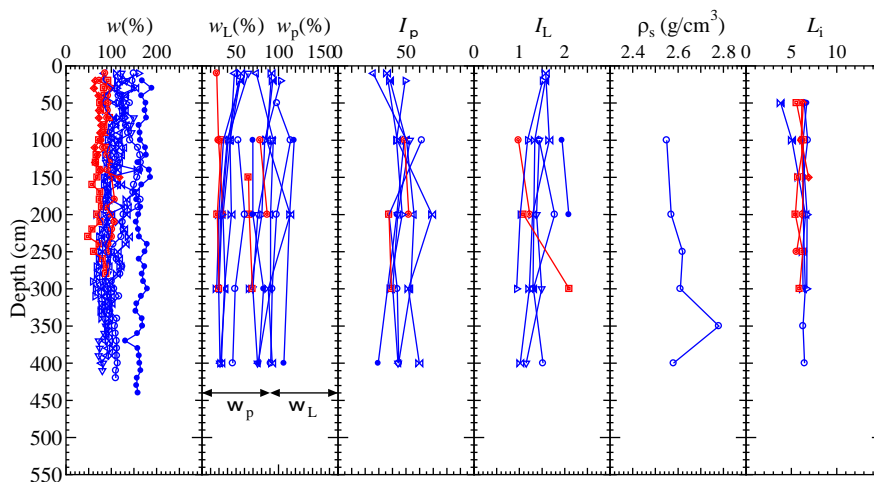


図-6 (b) 物理・化学試験結果 (LV50) 2 (図-5 (a~c) 凡例は図-5 と同一)

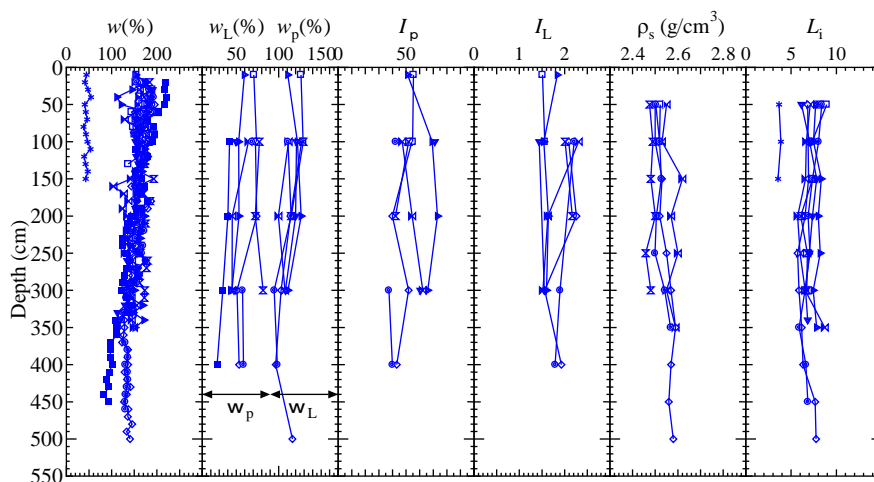
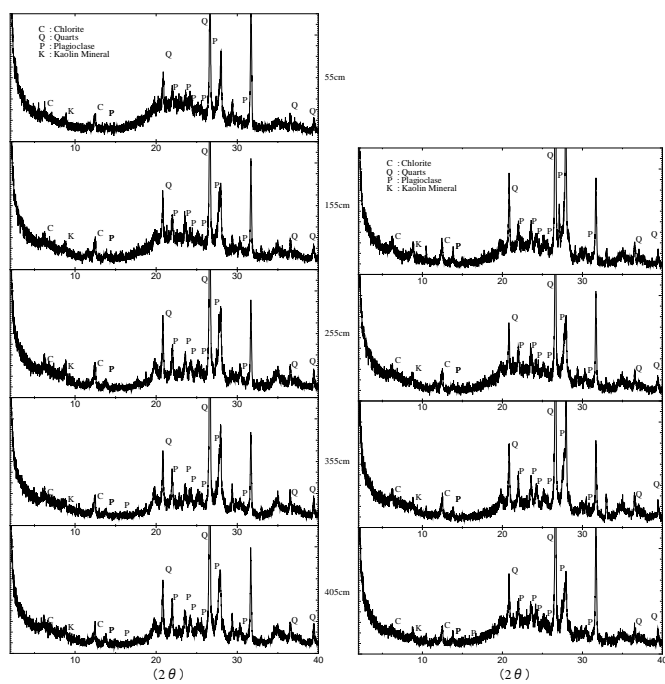


図-6 (c) 物理・化学試験結果 (LV50) 3 (図-5 (d~f) 凡例は図-5 と同一)



LV47-18HC

異なるコアで同一深度(155cm)での比較

図-7 X線回折結果

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。ただし、調査領域の表層堆積土には、細かい粒状のカーボネートを含有している物もあるので引き続き詳しく観察していく必要がある。

3.3 ガス濃度と強度特性の比較

LV47 の 13HC (図-5(c))、17HC (図-5(a))、LV50 の 21HC (図-5(a))、25HC (図-5(a)) 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-8 はガス濃度と深度の関係を 2009 年 (LV47) と 2010 年 (LV50) に分けて示したものである。図より LV47 の Reference、18HC、LV50 の 19HC、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および LV50 の 1HC、41HC 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

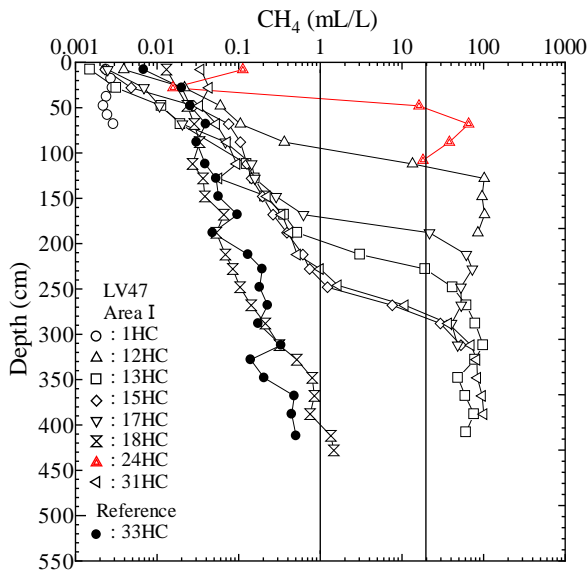


図-8 (a) ガス濃度と深度の関係 (LV47)

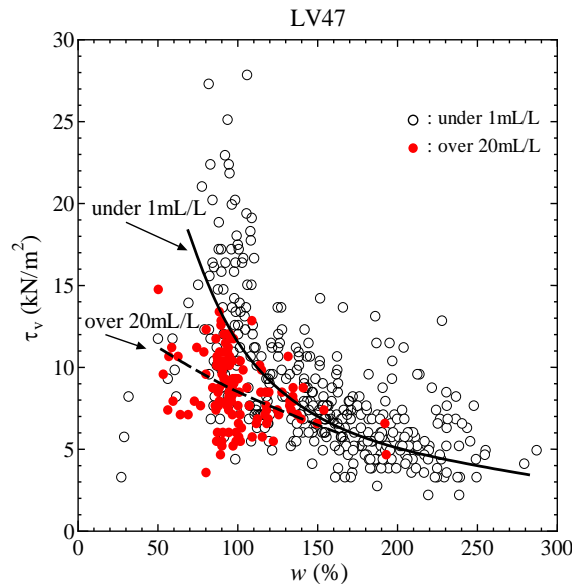


図-9 (a) τ_v と w の関係 (LV47)

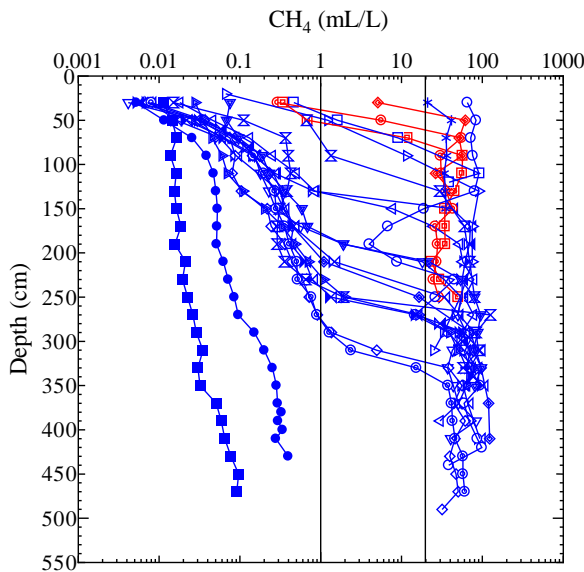


図-8 (b) ガス濃度と深度の関係 (LV50)
(凡例は図-5 と同一)

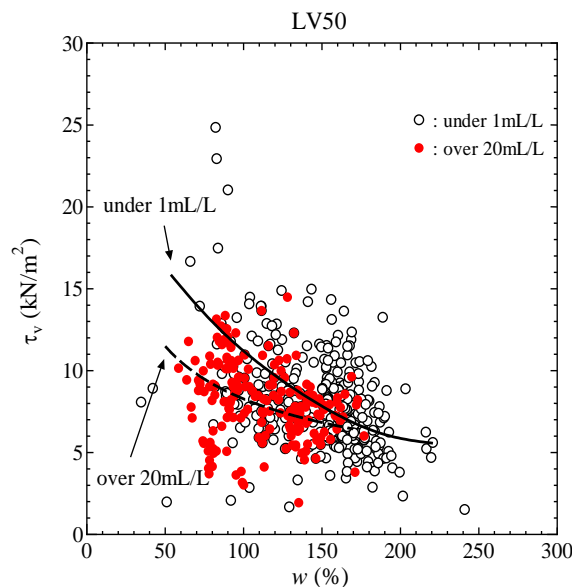


図-9 (b) τ_v と w の関係 (LV50)

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-9 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、強度に少しはばつきがある。また、含水比が高くなると試料の強度自体が低くなるため、ガス濃度による明確な影響は認められない。図に示した含水比とベーンセン断強度による比較では、試料の採取地点が異なっ

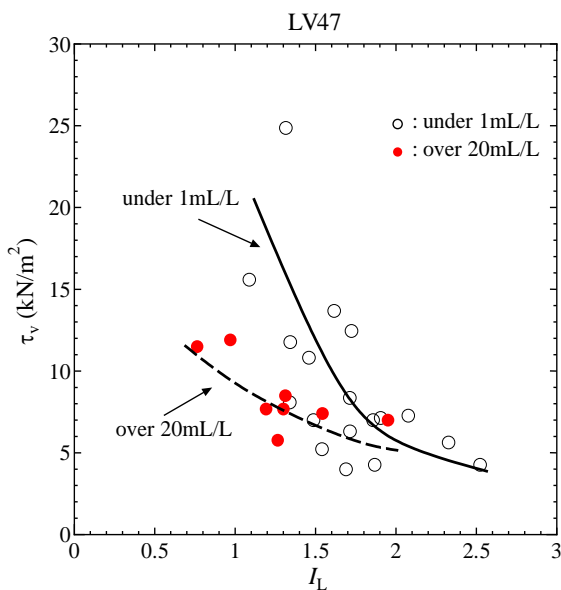


図-10 (a) τ_v と I_L の関係 (LV47)

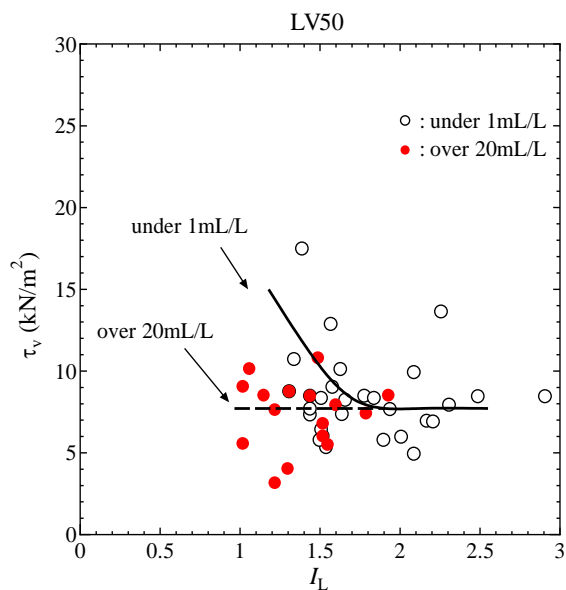


図-10 (b) τ_v と I_L の関係 (LV50)

いるため、同一含水比でも相対的な強さを調べることができない。

そこで土の相対的な強さを比べるため液性指数とベーンセン断強度を比較し図-10 に関係を示す。ガス濃度が高い試料は、ガス濃度の低い試料に比べ、同一液性指数でも低い強度となっている。また、LV50 では繰り返し後の試料を用いて含水比とベーンセン断強度による比較 (図-11) を行ったが、ガス濃度の高低により強度の違いは見られなかった。

これらの結果から、オホーツク海サハリン島沖で採取した試料は、コア引き上げ時の応力解放に伴い、ガス濃度が高い試料の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、強度が低下したと考えられる。このことは、ハイドレートの採取時や自然現象による海水温の上昇などにより、ハイドレートの解離や溶存ガ

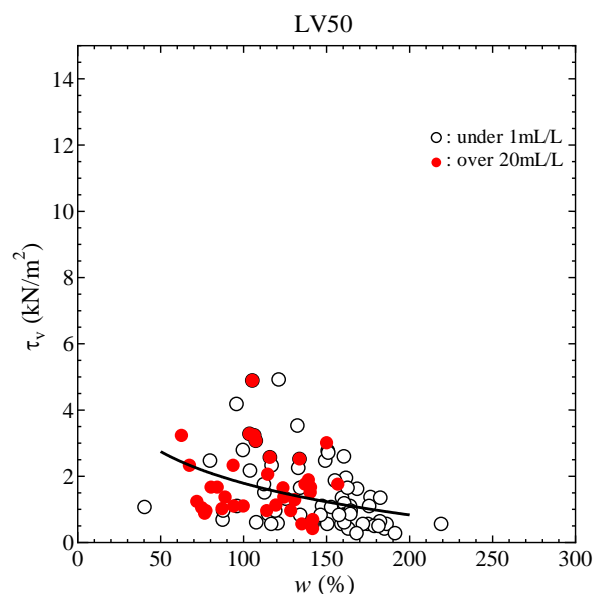


図-11 繰り返し後の τ_v と w の関係

スの気化が生じた場合には、地盤を不安定化させる要因ともなることも示唆している。

4. 結論

- (1) 船上試験結果において、オホーツク海サハリン島沖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。

謝辞：本研究を進めていくにあたり、ロシア科学アカデミー極東支部太平洋科学研究所 Anatoly Obzhirov 博士および乗船研究者各位にご協力をいただいた。また、室内試験では北見工業大学大学院 土肥翔一君、北見工業大学 4 年 大澤将秀、出羽寛信、三堀裕太君にご協力をいただいた。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,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
- 3) Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2009, R/V Akademik M.A.Lavrentyev Cruise47,eds., Shoji, H., Y,K, Jin., Obzhirov, A., Baranov, B.,: p.11266 -
- 4) 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