

北見工業大学大学院	学生会員	○出羽 寛信
北見工業大学工学部	正会員	山下 聡
明治大学		松本 良
北見工業大学工学部	坂上 寛敏	山崎新太郎
北見工業大学工学部	南 尚嗣	八久保晶弘
函館工業高等専門学校	正会員	片岡沙都紀
北見工業大学工学部	庄子 仁	高橋 信夫

1. はじめに

ガスハイドレート（以下 GH）は、将来のエネルギー資源として注目され、温度・圧力条件により安定に存在する領域（HSZ: Hydrate Stability Zone）の下部に分布する深層型と呼ばれる GH は、資源化をターゲットとして各国でプロジェクトが進行している。我が国においても、南海トラフでの資源化プロジェクト MH21 が間もなく生産試験の段階に入っている。一方、HSZ 上部から海底付近に存在する表層型と呼ばれる GH は、日本周辺海域において、上越沖で存在が確認され多数の試料が採取されている¹⁾。北海道の北に広がるオホーツク海においても、パラムシール島沖やサハリン島沖で、ロシアや韓国、日本（北見工大）によって GH が採取されている²⁾³⁾⁴⁾。表層型 GH の資源化については、その採取方法が確立されていないが、著者らも参加した 2008 年に行ったロシアのバイカル湖調査では、世界で初めて表層型 GH からのガス回収実験に成功しており⁵⁾、将来の資源化の可能性もある。

一方、GH の主成分であるメタンは二酸化炭素の 20 倍もの温室効果のあるガスでもあり、GH の分布・集積形態・生成・解離動態は、地球規模の環境変動に重要な役割を果たす要素でもある。また、エネルギー資源として採取した際の地盤変動や、地球環境変動に伴う海水温度の上昇などによって GH が分解し、海底地すべりを引き起こすなど、地盤災害のトリガーとも成り得る。このように GH は、資源、環境、災害という 3 つの側面で人類社会と密接な関わりを持っている。

北海道周辺海域では、我が国が世界に先駆けて GH の資源化プロジェクトを立ち上げた 1995 年当時、網走沖の北見大和堆には BSR（Bottom Simulating Reflector：海底擬似反射面）らしき反射面が存在すると指摘されたが⁶⁾⁷⁾、その実態は明らかにされていなかった。また、それとは別に産業技術総合研究所が 2001 年に網走沖において、音波探査による調査（GH01）を実施している⁸⁾。図-1 は産総研による 2001 年の調査測線と音波断面図を示したものである。図に示すラインに沿って調査が行われ、ウェブで公開されている音波（海底）断面図⁹⁾を調べたところ、調査測線上の○で示した海底において、図中に示すような海底面下が白く抜けた箇所（ガスチムニー）を報告されている以上に多数確認することができた。これらの海域では堆積物間隙中にフリーガスが存在することが考えられ、表層に至るメタン湧出の可能性もある。白く抜けた上方の海底面が隆起しているように見える場所（マウンド）も多数あり、これまでの表層型 GH 研究と対比すると、海底直下に表層型 GH の集積があることを示唆している。このように、オホーツク海網走沖では GH が分布する顕著な兆候が見えるにもかかわらず、これまでの調査は不十分で実態は明らかにされていなかった。

そこで、2011 年 9 月にオホーツク海網走沖において、東京大学と北見工大による小型船を用いた GH の調査が行われた¹⁰⁾。また、その翌年の 2012 年 7 月には東京海洋大学の練習船「海鷹丸」を用いて、著者らもメンバーになっている「表層ガスハイドレート研究コンソーシアム」（代表：松本良明治大教授）によって調が行われ、初めて GH の採取に成功した¹¹⁾。さらに、同年の 11 月には北海道大学水産学部の附属練習船「おしよる丸」を用いて調査を行った。以下ではこれらの調査で得られた成果と、採取した海底堆積土の力学特

性や物理特性について報告する。

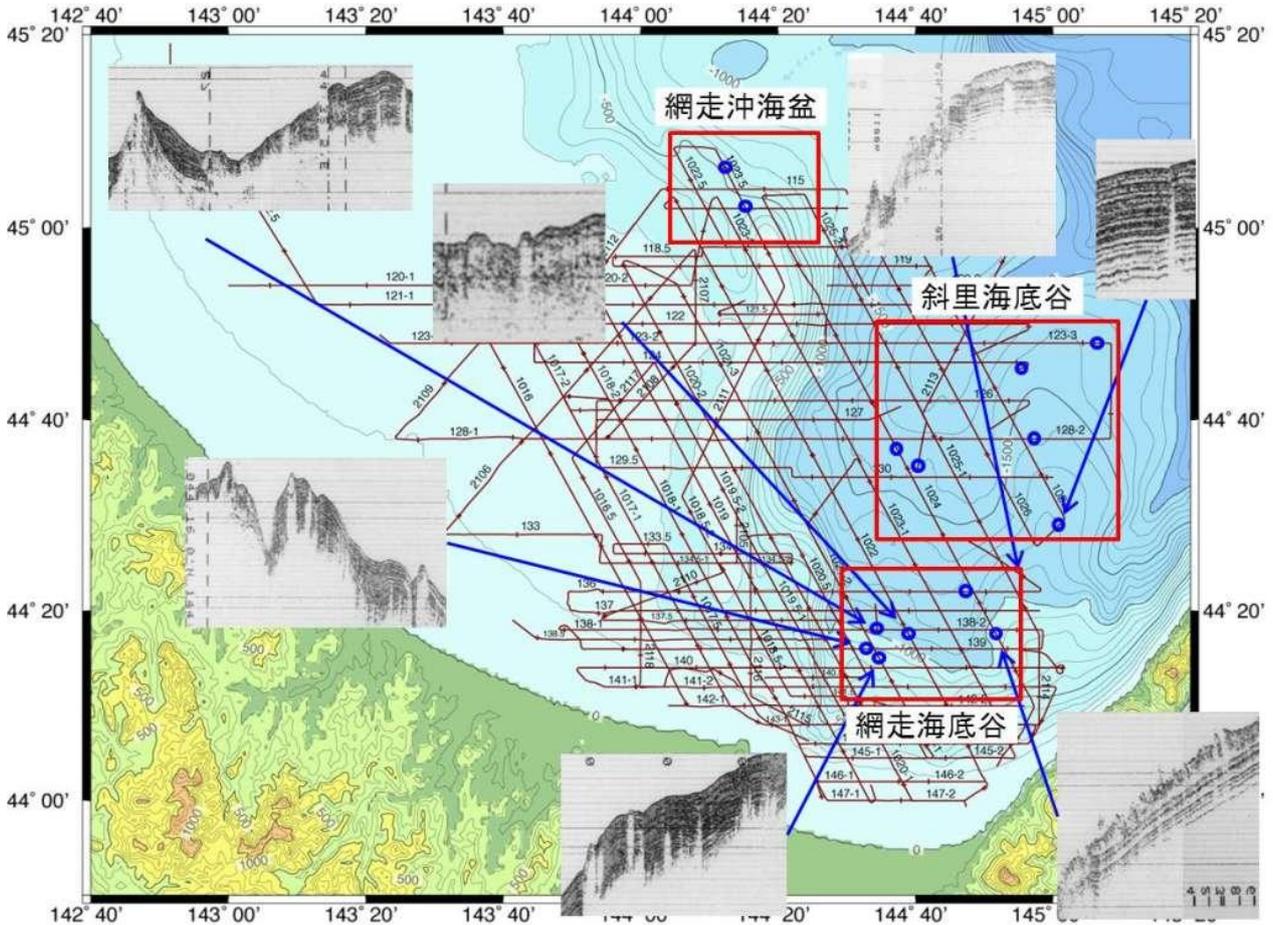


図-1 産総研による 2001 年調査測線と音波断面図（文献：9）に加筆

2. 現地調査と試料採取

2.1 大喜丸による調査 (TK11)¹⁰⁾

オホーツク海網走沖に GH が分布する兆候が見られたことから、本格的な調査の足がかりとするべく、2011 年 9 月にオホーツク海網走沖において調査 (TK11) を行った。図-1 で示したような産総研の画像データと使用する船舶の許可航行区域および調査日数を考慮し、図-2 に示す網走海底谷海域周辺で調査を行った。調査にはスターマリン（株）所有の「大喜丸：19 トン」を使用した。産総研の音波断面図でガスチムニーや海底の盛り上がり等が見られた地点において、グラビティーコアラ（GC、長さ約 2m）を使用して海底堆積物の試料採取を行った。コアラは 2 重管式になっており、内管はアクリル製のパイプ（長さ 1.5m、内径 50mm）である。採取した試料の緯度経度、水深、コア長を表-1 に示す。

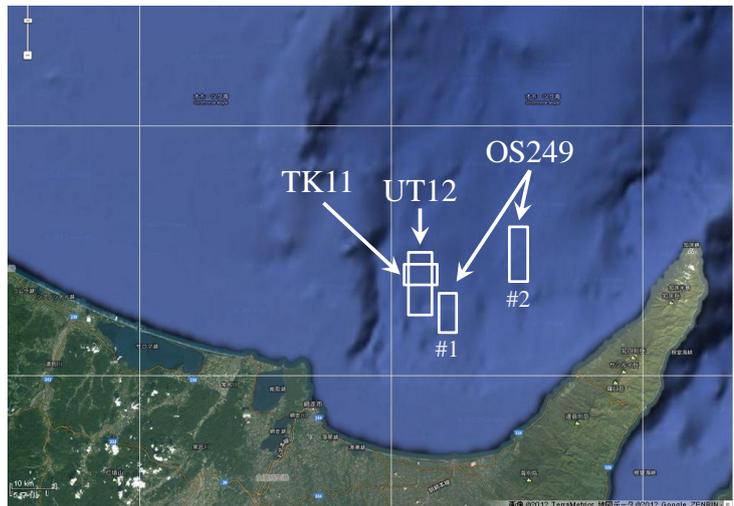


図-2 オホーツク海網走沖の調査海域

表-1 TK11 調査で採取した試料コアの一覧

コア名	採取緯度	採取経度	水深 (m)	コア長 (cm)
GC1101	44°16.1141'	144°33.348'	855	100
GC1102	44°16.3589'	144°33.1239'	879	86
GC1103	44°15.8728'	144°33.3207'	845	77
GC1104	44°16.7859'	144°33.0536'	911	0
GC1105	44°16.0194'	144°36.978'	931	67

2.2 海鷹丸による調査 (UT12)¹¹⁾

大喜丸による調査の翌年の2012年7月に図-2に示す海域で調査を行った。調査には東京海洋大学所有の練習研究船「海鷹丸：1886トン」を使用した。調査では、図-3に示すような測線に沿って、計量魚群探知機による観測を行い、海底からのガスの湧出（ガスフレア）とマウンドの特定を行った。測線の間隔は約100mである。図-4は計量魚探により得られたガスフレアとマウンドの画像の例を示したものである。調査地点では図-5に示すような多くのガスフレアを確認できた。このような地点において、ピストンコーラー（PC、長さ約6mと4m）を使用して海底堆積物の試料採取を行った。コーラーはTK11調査と同様2重管式になっており、内管は塩化ビニル製のパイプ（内径75mm）である。また、マウンド以外の地点からも試料採取を行っている。この調査で採取したコアは14本で、そのうちコア下部にGHが入ったコア2本を採取することに成功した。写真-1は採取されたGHを示したものである。表-2に採取した試料の緯度経度とコア長を示す。

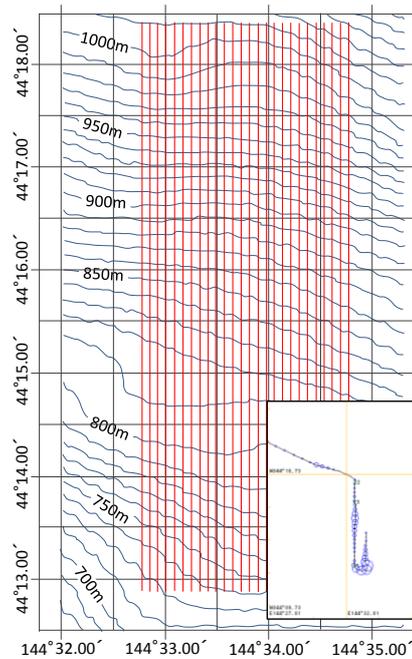


図-3 魚探観測のための測線と調査船の航跡

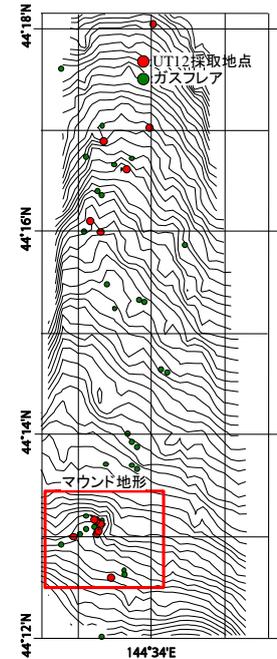


図-5 コア採取地点とガスフレア地点¹¹⁾

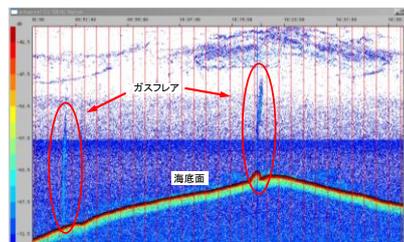


図-4 魚探で観測されたガスフレアとマウンド¹¹⁾



写真-1 コア下部に白く見えるのがGH

2.3 おしよろ丸による調査 (OS249)

海鷹丸による調査の約4ヶ月後の2012年11月に図-2に示す海域で調査を行った。調査には北海道大学水産学部所有の附属練習船「おしよろ丸：1396トン」を使用した。UT12調査と同様、測線に沿って計量魚探による観測を行い、ガスフレアとマウンドの特定を行った。この調査の測線の間隔は約220mである。当初、予定していた#2の海域で計量魚探による観測を行ったが、明瞭なガスフレアやマウンドを確認することは出来なかった。しかし、#1周辺の海域を通過中にガスフレアを発見したため、その海域で詳細に計量魚探による観測を行った結果、明瞭なガスフレアとマウンドをいくつか確認することが出来た。図-6に#1の海域で確認された計量魚探によるガスフレアとマウンドの一例を示す。また、図-7はこのマウンドを3Dで表したものである。これまでの調査で確認されたマウンドの中では最大の大きさで、最大比高150m程度であった。北東方向に海脚があり、その海脚周辺から多数のガスフレアを確認することができた。このような地点において、グラビティーコーラー（GC、長さ約4mと2m）を使用して海底堆積物の試料採取を行った。これまでの調査と同様にコーラーは2重管式になっ

表-2 UT12 調査で採取した試料コアの一覧

コア名	採取緯度	採取経度	コア長 (cm)
PC1201*	44°13.12'	144°33.27'	152
PC1202	44°15.989'	144°33.289'	518
PC1203	44°17.012'	144°33.963'	493
PC1204	44°16.602'	144°33.65'	537
PC1205	44°16.093'	144°33.154'	500
PC1206	44°12.581'	144°33.439'	514
PC1207	44°13.01'	144°33.244'	512
PC1208	44°12.988'	144°33.92'	304
PC1209	44°13.112'	144°33.292'	486
PC1210	44°18.029'	144°34.012'	298
PC1211	44°13.062'	144°33.673'	296
PC1212*	44°13.146'	144°33.237'	444
PC1213	44°13.156'	144°33.213'	133
PC1214	44°24.981'	144°22.97'	495

* : GH含有コア

表-3 OS249 調査で採取した試料コアの一覧

コア名	採取緯度	採取経度	水深 (m)	コア長 (cm)
GC1201	44°11.548'	144°38.053'	570	0
GC1202	44°11.572'	144°38.147'	571	57
GC1203	44°11.557'	144°38.095'	582	89
GC1204	44°11.624'	144°37.857'	284	0
GC1205	44°11.608'	144°37.857'	583	60
GC1206	44°11.608'	144°37.687'	625	26

ており、内管は塩化ビニル製のパイプ（内径 75mm）である。表-3 に採取した試料の緯度経度と水深、コア長を示す。2 本のコアでは採取長は 0cm であるが、コアキャッチャーに塊状の炭酸塩鉱物が採取された。炭酸塩鉱物は比較的固い鉱物であり、海底表層に存在していたため、堆積物を採取することができなかったと思われる。この調査では GH を採取することはできなかったが、GH 集積域に存在する炭酸塩鉱物が採取されたこと、また、図-6,7 に示すような非常に大きなマウンドやガスフレアを確認できたことから#1 の海域にも GH が存在する可能性が示された。

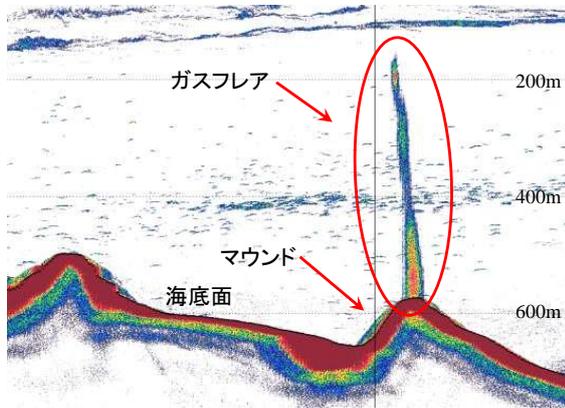


図-6 魚探で観測されたガスフレアとマウンド

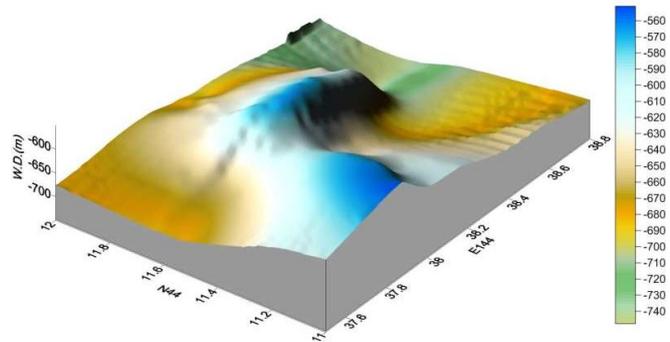


図-7 図-6 のマウンドの 3D 表示

3. 船上試験と物理試験

船上に引き上げたコアは、UT12 および OS249 では内管を 1m ごとに切断した後、縦に半割に、TK11 では 5cm ごとに切断し堆積土の観察を行った。コア観察後、TK11 および OS249 では 10cm 間隔で、UT12 ではコア 1m ごとに 4 箇所、含水比測定のための試料採取、小型コーン貫入試験を行った。また、物理試験のための試料採取も行っている。なお、GH が採取されたコアでは、GH が存在していない部分において堆積土の試料採取と試験を行っている。

3.1 含水比測定用の採取

含水比試験用の試料は、先端をカットしたシリンジ（5ml）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。

3.2 コーン貫入試験

コーン貫入試験は、写真-2 に示すようなデジタルフォースゲージを改良試作したデジタルコーン貫入試験器を用いた。コーンの先端角は 30°、コーン直径は 9mm、貫入深は 16.8mm である。コーン貫入抵抗 q_c (kN/m²) は次式より求めた。

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

ここで、 p は貫入抵抗 (kN) A はコーン断面積 (m²) である。

3.3 輸送試料での室内試験

UT12 調査で採取した試料について、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、強熱減量試験を行った。また、採取した試料を練り返してコーン貫入試験を行い、鋭敏比 S_t も求めた。さらに、写真-3 に示すステンレス製の容器（高さ 32mm、内径 23mm）を用いて、乾燥密度 ρ_d と間隙比 e を求めた。



写真-2 コーン貫入試験



写真-3 密度測定に用いた容器

4. 試験結果

4.1 船上試験結果

図-8, 図-9, 図-10 は各々の調査で採取した試料から求めた含水比 w と船上試験から求めたコーン貫入抵抗 q_c を海底面からの深度に対してプロットしたものである。図-10 の UT12 試料は、図-5 に示すようにマウンド周辺で採取された試料(a)と、マウンド以外で採取した試料(b)で区別して示しており、試料を繰り返してコーン貫入試験を行って求めた鋭敏比も加えてある。なお、GH をコア下部に採取した試料を○,◎で示している。

含水比は図-10 に示す UT12 調査でマウンド周辺から採取した試料(a)では若干ばらつきが見られるものの、その他の試料では深度方向にばらつきが少なく、全体的に含水比は深度方向に多少低くなっている。

一方、コーン貫入抵抗は、それぞれの調査ごとにばらつきが見られるが、全体的に深度方向に対する含水比の減少傾向に呼応して、コーン貫入抵抗は増加する傾向が見受けられる。また、鋭敏比は含水比やコーン貫入抵抗のような深度方向に対するはっきりとした相関性はあまり認められないが、図-10 の(a), (b)どちらもわずかに深度方向に減少傾向を示しているようにも見受けられる。これは、試料の間隙水に溶存しているガス (CH_4) 濃度が深度方向に高くなり、コア引き上げ時のガスの気泡化により試料が乱れ、乱れの影響が深度方向に大きくなったためであると推察される。

ここで、ほぼ同じ海域で採取した TK11 (図-8) と UT12(b) (図-10(b)) に着目すると、どちらも表層付近で含水比が約 200%と高くなっている。それに対し、OS249 (図-9) では、表層付近で含水比が約 100%と低く、UT12 のマウンド周辺で採取した試料 (図-10(a)) でもばらつきが見られるが、含水比が 100%と低い試料も見受けられる。また、GH が採取された試料 (○,◎) は他の試料に比べ全体的に含水比が低い傾向を示している。このように、同じ海域であるオホーツク海網走沖で採取した試料でも、マウンドが確認された海域周辺で採取した試料 (UT12(a), OS249) の方が、マウンド以外で採取した試料 (TK11, UT12(b)) に比べ、含水比が低い傾向を示すことが分かった。これは、海底下部からのフリーガスの湧出や GH の集積・生成、地形的な要因などが何らかの影響を与えていると考えられる。

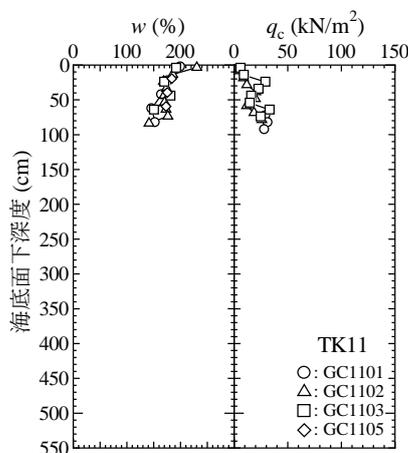


図-8 TK11 調査での船上試験結果

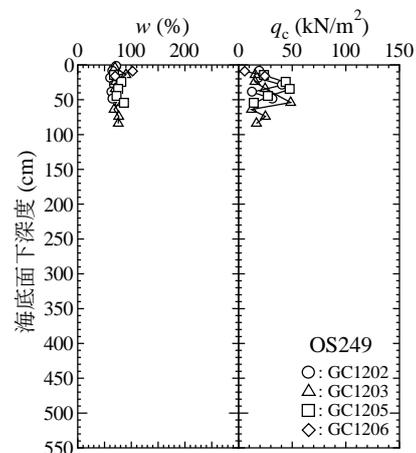


図-9 OS249 調査での船上試験結果

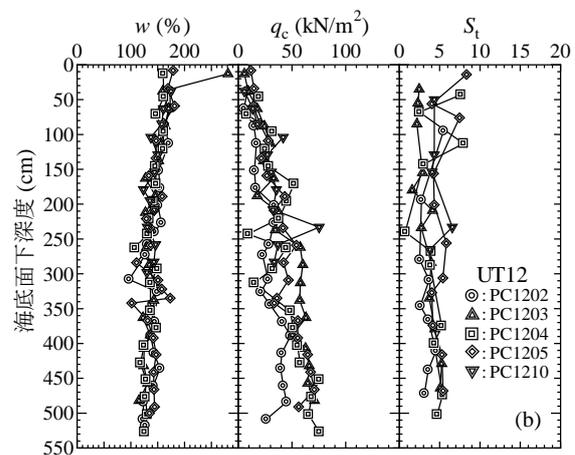
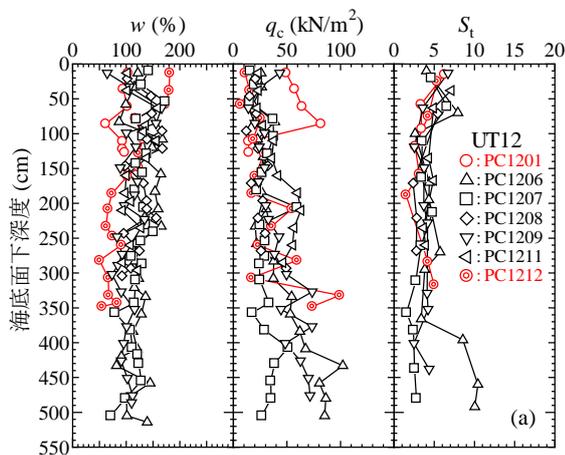


図-10 UT12 調査での船上試験結果と鋭敏比

4.2 物理・化学試験結果

図-11, 図-12, 図-13 は UT12 による調査で採取した試料の各種物理・化学試験結果（含水比、液性・塑性限界、液性指数、土粒子の密度、乾燥密度、間隙比、飽和度、粘土・砂分含有量、強熱減量）を深度方向にプロットしたものである。なお、船上試験結果と同様、マウンド周辺で採取された試料(a)、マウンド以外で採取した試料(b)で区別して示している。

マウンド以外で採取した試料（図-11(b), 図-12(b), 図-13(b)）では各コアともばらつきが少なく、液性限界 w_L 、塑性限界 w_P 、液性指数 I_L は深度方向に対する変化があまり認められないが、マウンド周辺で採取した試料（図-11(a), 図-12(a), 図-13(a)）は w_L 、 w_P 、 I_L に多少のばらつきが見られる。GH が採取されたコア（PC1201: ○, PC1212: ◎）では深度方向に液性限界 w_L が低くなっており、それに応じて塑性限界 w_P も低くなっている。ここで砂分含有量に着目すると、GH が採取されたコアは、他のコアに比べ深度方向に砂分が多く、粘土分が少なくなっているのがわかる。つまり、粘土分の減少と砂分の増加による保水性の減少や粘着力の減少によって、液性限界が低くなったと考えられる。そのため図-11(a)の PC1207 のコアも深度方向に液性限界のばらつきが見られるのも、粘土分、砂分が同様に深度方向にばらついているためと考えられる。また、図-12(a), (b)ともに 深度方向に乾燥密度 ρ_d の増加に伴い間隙比 e は減少しているが、図-12(a)の GH コアでは乾燥密度が深度 200cm 程度から他の試料に比べ、大きくなっている。これも同深度での砂分の増加による影響であると考えられる。

このように、GH が採取されたマウンド地形の海底堆積土では、同一海域の堆積土とは多少異なる物性値を示しており、粘土分や砂分など試料を構成する堆積土に違いが見られる。これは、船上試験結果と同様にフリーガスの湧出や GH の集積・生成、地形的な要因が大きく関与していると考えられる。

一方、液性指数 I_L に着目してみると、図-11(a), (b)ともに 1 以上の試料が多く見られ、間隙比も 3.0 付近の試料が多くなっていることから、調査周辺海域の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。

土粒子密度 ρ_s は図-12(a), (b)どちらも 2.50 から 2.60 近くの試料が多く、やや低い値を示している。また、強熱減量 L_i を見てみると、図-13(a)は深度方向にばらつきが見られるものの、10%を超える試料も見られ、図-13(b)では深度方向に大きな変化は見られず、10%付近と比較的高い値を示している。そこで、マウンド以外で採取した堆積土について電子顕微鏡を用いて観察を行った。観察結果の一例を写真-4 (a), (b)に示す。堆積土内部には多くが粘土と思われる鉱物で占められていたが、写真に示すような少量の珪藻が観察された。珪藻が堆積土中に多く占めると、珪藻遺骸自身が持つ微細孔の間隙により土粒子密度が小さくなり、強熱減量が高くなるなどの影響を与える。そのため、土粒子密度が低くなり、強熱減量が高くなったと考えられる。

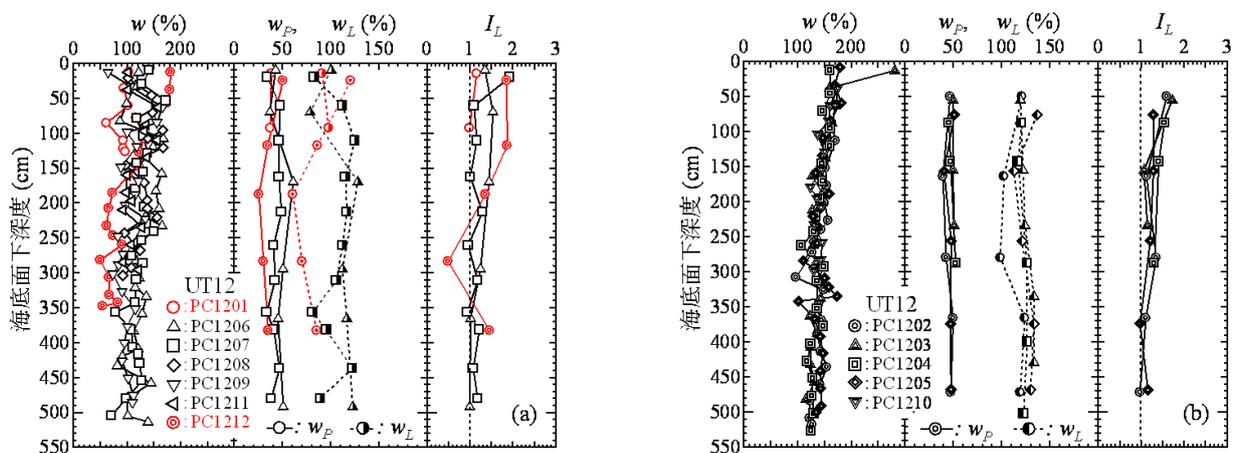


図-11 UT12 調査で採取した試料の物理試験結果： w , w_p , w_L , I_L

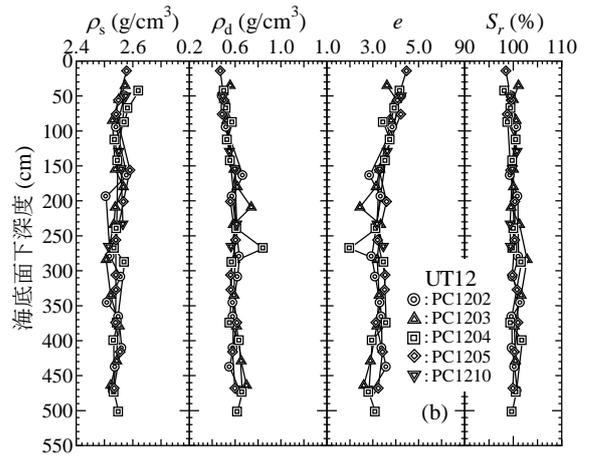
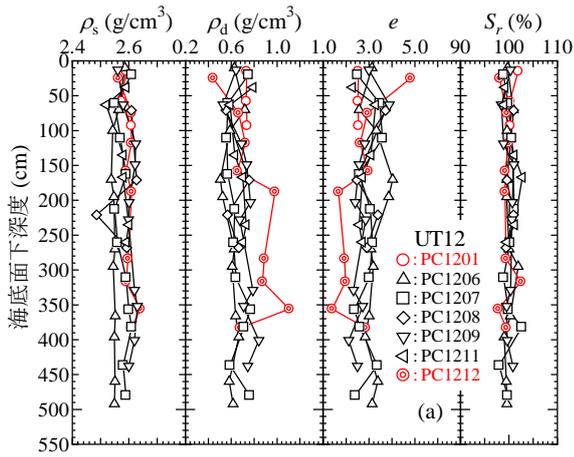


図-12 UT12 調査で採取した試料の物理試験結果： ρ_s , ρ_d , e , S_r

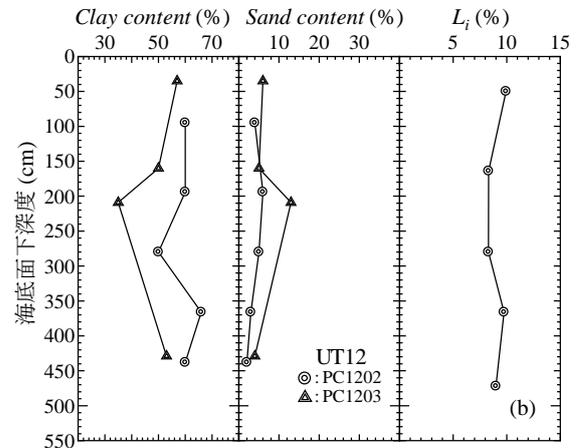
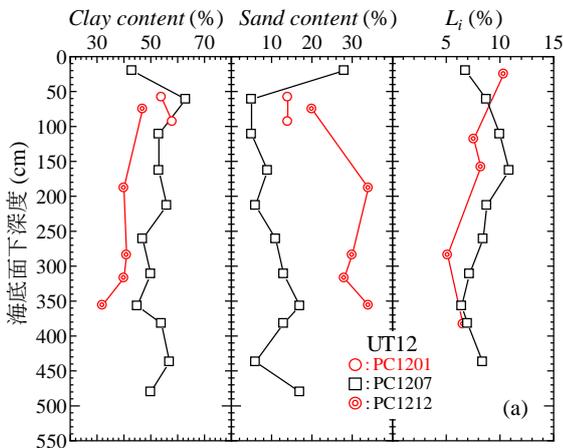


図-13 UT12 調査で採取した試料の物理・化学試験結果：粘土分含有量, 砂分含有量, L_i

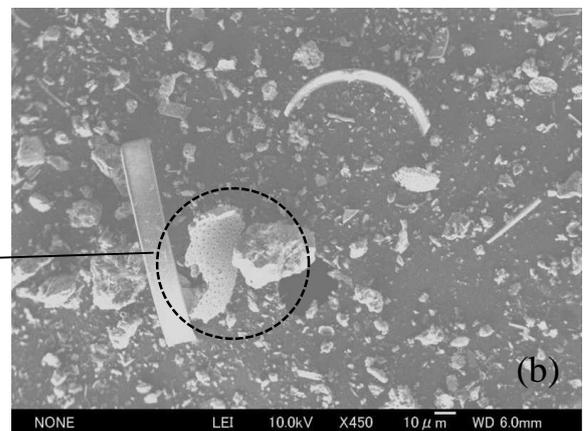
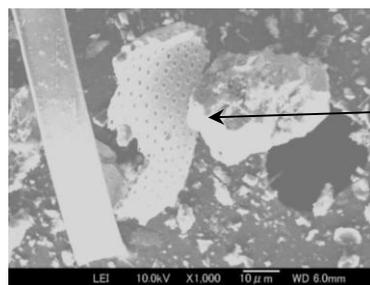
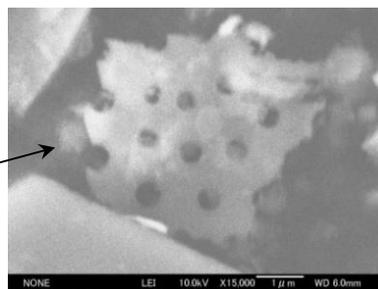
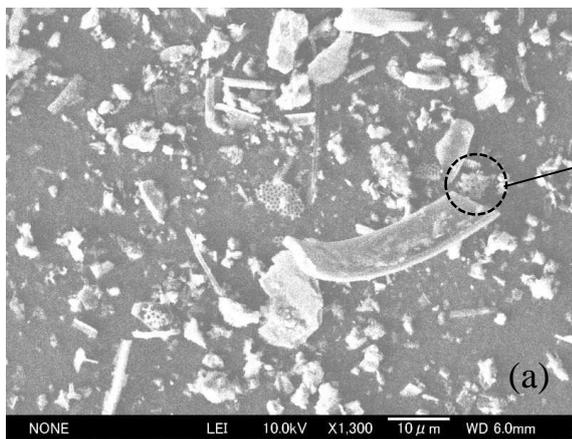


写真-4 電子顕微鏡による観察結果

5. 結論

- (1) オホーツク海網走沖で調査を行った結果、海底からガスが湧出するガスフレアを多数確認し、調査海域に広く分布していた。また、そのような海域の中で海底面が隆起したマウンド地形を確認し、その周辺でGHの採取に成功した。さらに、GHが採取された地点とは別の地点で最大比高が約150mとなる巨大なマウンドを発見した。
- (2) オホーツク海網走沖の海底地盤の堆積物は間隙比が高く、また、液性指数も1以上の試料が多いため、比較的地盤が緩く、骨格構造が不安定な状態で存在していると考えられる。
- (3) オホーツク海網走沖で採取した試料は、GHが採取されたマウンド周辺の堆積土と、マウンド以外の堆積土とはやや異なる物性値を示し、マウンド周辺で採取した堆積土では含水比が低い傾向を示した。また、マウンド周辺の堆積土では砂分含有量が多いなど、試料を構成する堆積土に多少の違いが認められた。これは、海底下部からのフリーガスの湧出による海底深部の堆積物の供給や、GHの集積・生成に至る堆積物の物理・化学的変化、海底地盤の変動による地形的な要因などの影響によるものではないかと考えられる。

謝辞: 本研究を進めていくにあたり、本学学生4年の小川恵介君に協力いただいた。記して敬意を表します。

【参考文献】

- 1) Matsumoto, R.: Methane plumes over a marine gas hydrate system in the eastern margin of Japan Sea: A possible mechanism for the transportation of subsurface methane to shallow waters, Proc. 5th International Conference on Gas Hydrate, Trondheim, Norway, pp.749-754, 2005.
- 2) Zonshayn, L.P., Murdmaa, I.O., Baranov, B.V., Kuznetsov, A.P., Kuzin, V.S., KuZ'min, M.I., Avdeyko, G.P., Stunzhas, P.A., Lukashin, V.N., Barash, M.S., Valyasko, G.M. and Demina, L.L.: An underwater gas source in the Sea of Okhotsk west of Paramushir Island, Oceanology, Vol.27, No.5, pp.598-602, 1987.
- 3) Ginsburg, G.D., Soloviev, V.A., Cranston, R.E., Lorenson, T.D. and Kvenvolden, K.A.: Gas hydrates form the continental slope, offshore Sakhalin Island, Okhotsk Sea, Geo-Marine Letters, Vol.13, No.1, pp.41-48, 1993.
- 4) Shoji, H., Soloviev, V., Matveeva, T., Mazurenko, L., Minami, H., Hachikubo, A., Sakagami, H., Hyakutake, K., Kaulio, V., Gladysch, V., Logvina, E., Obzhairov, A., Baranov, B., Khlystov, O., Biebow, N., Poort, J., Jin, Y.K. and Kim, Y.: Hydrate-bearing structures in the Sea of Okhotsk, EOS Trans AGU 86. pp.13-24, 2005.
- 5) 杉山博一, 西尾伸也, 安部透, 山下聡, 八久保晶弘, 田中洋之, 吉田裕, Oleg Khlystov: バイカル湖のガスハイドレート層からのガス回収実験, 第44回地盤工学会発表会講演集, pp.1973-1974, 2009.
- 6) 佐藤幹夫・前川竜男・奥田義久: 天然ガスハイドレートのメタン量と資源量の推定. 地質学雑誌, Vol.102, p.959-971, 1996
- 7) 酒井明男: 南海トラフ, 網走沖のBSRの特徴について. 月刊地球, Vol.18, p.652-659, 1996
- 8) 野田 篤・池原 研・片山 肇: 北見大和推表層堆積図. 海洋地図, No. 68(CD), 産業技術総合研究所 地質調査総合センター, 2009
- 9) 産業技術総合研究所: 高分解能音波探査断面データベース, http://riodb02.ibase.aist.go.jp/db085/SBP_DB/pages/cover.html
- 10) 山下聡, 松本良, 南尚嗣, 八久保晶弘, 弘松峰男, 戸丸仁, 奥田義久, 庄子仁, 高橋信夫: オホーツク海網走沖でのガスハイドレートを対象とした海洋調査, 日本地球惑星科学連合2012年大会, 千葉, 2012
- 11) 表層ガスハイドレート研究コンソーシアム: プレスリリース「日本海とオホーツク海の広い海洋にガスハイドレート」2012年10月29日, <http://www.meiji.ac.jp/osri/topics/2012/6t5h7p00000dxjls.html>