

道東沖オホーツク海海底地盤における 重力式コーン貫入試験

渋谷 義顕¹・山下 聡²・八久保 晶弘³・小西 正朗⁴・
坂上 寛敏³・南 尚嗣³・仁科 健二⁵・内田 康人⁵

¹ 北見工業大学大学院 工学研究科 社会環境工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

² 正会員 北見工業大学 工学部 地球環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

E-mail:yamast@mail.kitami-it.ac.jp

³ 北見工業大学 工学部 地球環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

⁴ 北見工業大学 工学部 地域未来デザイン工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

⁵ 北海道立総合研究機構 地質研究所 沿岸地質グループ (〒047-0008 北海道小樽市築港 3-1)

表層型メタンハイドレート (MH) が存在している深海底地盤の強度を調べるために、コアラで採取した試料を用いて強度を求めた場合、間隙水にメタンが溶存しており、採取コアを引き上げることによって溶存ガスが気泡化し、試料が乱され正確な強度を求めることが困難である。そこで、表層型 MH の存在が確認されている北海道道東沖のオホーツク海において、重力式コーン貫入試験 (CPT) を行い、海底地盤強度の直接測定を試みた。また、コア試料に対する船上試験結果と比較し、試料の乱れについても検討した。その結果、間隙水溶存ガス濃度が高い試料や砂分が多い試料では船上試験結果の信頼性が低くなること、簡易な重力式 CPT 試験により原位置強度の測定が可能であることが明らかにされた。

Key Words : cone penetration test, methane hydrate, sample disturbance, sea bottom sediment

1. はじめに

メタンハイドレート (MH) は、将来のエネルギー資源の一つとして注目されている。MH 胚胎域下部に分布する深層型 (砂層型) とよばれる MH は、東部南海トラフで海洋産出試験を行うなど、資源化に向けた研究開発が進んでいる。一方、海底表層付近に存在する表層型 MH は、日本周辺海域にも多く存在することが確認され、資源回収技術の調査・研究開発も開始されている。また、表層型 MH は、資源としての採取時の地盤変動や地球環境変動に伴う海水温上昇による MH の分解による海底地すべりなどの地盤災害のトリガーにも成り得る。したがって、資源化および災害防止の両面からも MH が存在している海底地盤の力学特性を把握し、安定性を評価する必要がある。

一般に、原位置の強度特性を推定するためには、不攪乱試料を用いた室内試験や原位置 (サウンディング) 試験などが行われる。しかし、MH が存在している水深 400 m 程度以上の高水圧条件にある海底地盤において原位置試験を行うことは技術的にまた費用的にも困難さがある。一方、海底地盤から採取した試料を用いて室内試験結果から力学特性を評価しようとする場合、MH が存在して

いる深海底地盤では、堆積物中の間隙水にメタンが溶存しており、保圧しない通常の採取法では、採取コアを船上に引き上げる際に溶存ガスが気泡化し、採取試料が乱され正確な強度を求めることが困難となる¹⁾。

そこで本研究では、道東沖オホーツク海の海底表層地盤で簡易な重力式コーン貫入試験 (CPT) を行い、海底地盤強度の直接測定を試みた。また、コア試料に対する船上試験結果と比較し、試料の乱れについても検討した。なお、同様な MH を対象とした重力式 CPT 試験はロシア・バイカル湖において行われた例²⁾があるが、地盤強度よりも MH の存在深度・分布を評価するために行われている。

2. 調査地点

調査地点は、図-1 に示すオホーツク海網走沖の 3 地点と枝幸沖の 1 地点である。網走沖の No.1 地点 (水深約 600 m) では、北海道大学水産学部附属練習船「おしよる丸」による調査 (2012 年 OS249³⁾、2015 年 C020⁴⁾、2016 年 C032 調査⁵⁾、JAMSTEC 調査船「なつしま」による調査 (2013 年 NT13-20 調査⁶⁾) を行っている。No.2 地点 (水深約 750 m) では、NT13-20 調査および「おしよる

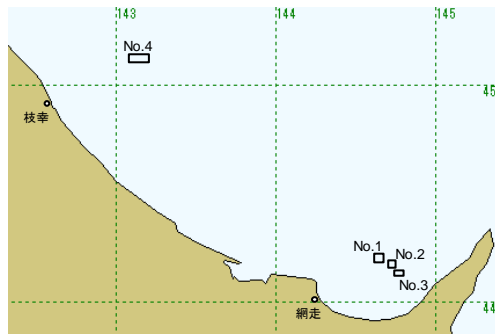


図-1 調査地点

丸」調査 (2013 年 OS263 調査⁷⁾, 2015 年 C020 調査⁴⁾) を行っている. No.3 地点 (水深約 400 m) では, 釧路水産試験場調査船「北辰丸」による調査 (2016 年 HKS16, 2017 年 HKS17 調査) を行っている. 枝幸沖の No.4 地点 (水深約 125 m) では, 稚内水産試験場調査船「北洋丸」による調査 (2016 年 HKY16, 2017 年 HKY17 調査) を行っている. なお, 枝幸沖は水深が浅く MH が存在できないが, 海底湧出ガスが確認されている地点⁴⁾である.

各調査では長さ 2~6 m, 内径 75 または 100 mm の重力式コアラー (GC) や天秤式のピストンコアラー (PC) によって海底表層堆積物の採取を行っている. これらの調査のうち, 重力式 CPT 試験は C020, C032, HKS16, HKY17 調査で行っている. なお, 網走沖の No.1 地点と No.2 地点では, NT13-20 および C020 調査において MH をコアラーにより採取している.

3. コアリングと船上試験

船上に引き上げたコアは, 内管を 1 m ごとに切断した後, 縦に半割し 10~40 cm 間隔で, 含水比測定のための試料採取, 小型コーン貫入試験, 小型ベーンせん断試験を行った. なお, MH が採取されたコアでは, MH が存在していない部分において試験を行っている.

コーン貫入試験には, デジタルフォースゲージの先端部分にコーンと突き当てつばを取り付けた試験器⁸⁾を用いた. コーンの先端角は 30°, コーン直径は 9 mm, 貫入深は 16.8 mm である. コーン貫入抵抗 q_c (kN/m²) は次式より求めた.

$$q_c = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

ここで, Q は貫入抵抗 (kN), A はコーン断面積 (m²) である.

ベーンせん断試験は, 直径 10 mm, 高さ 20 mm 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. 半割にしたコアの切断面にブレード先端を 30 mm 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 (kN/m²) を求めた.

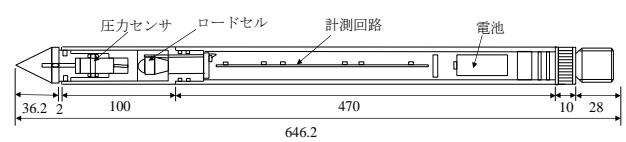


図-2 CPT 計測ユニット (単位 mm)

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

ここで, M は最大トルク (kN・m), D はベーン直径 (m), H はベーン高さ (m) である.

また, 含水比試験用の試料採取と同様に, 深度方向に一定間隔でガス濃度測定用の試料を採取した. 採取した試料は, バイアル瓶に入れ, 飽和食塩水を加えたのち, 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解ガスを遊離させた. その後, 真空状態のバイアル瓶にヘッドスペースガスを補修し, ガスクロマトグラフによりガス濃度を測定した.

4. 重力式コーン貫入試験 (CPT)

重力式コーン貫入試験機は, 重錘部 (直径 0.16m, 長さ 0.7m), 延長ロッド (2~4m), CPT 計測ユニットからなり, 海底面から最大 5 m 程度の深度までの貫入が可能である. 重錘は鉛錘 (80 kg) である. CPT 計測ユニットの概要を図-2 に示す. コーン先端角は 60°, 直径は 36 mm で, ユニットには, 先端抵抗測定用のロードセル, 間隙水圧センサ, 計測回路 (2016 年調査から傾斜計チップを内蔵), 電池が内蔵されている. 先端抵抗 (最大 20 kN, 分解能 1 N), 間隙水圧 (深度 2,000 m, 分解能 0.012 m), 傾斜角 ($\pm 90^\circ$, 分解能 1°) が計測でき, データのサンプリング周波数は 10 Hz である. また, 重錘部に深度計 (深度 2,000 m, 分解能 0.045 m, サンプリング周波数 1 Hz) を取り付け, 水圧変化から貫入深を推定した.

CPT は, 船上のウインチによってワイヤーで吊り下げられ, 一定の速度 (0.3~1.0 m/sec) で垂下させた. コーン先端が着底した後は, 自重によって海底地盤に貫入する. なお, 貫入は 1 地点 5 回程度繰り返している. 図-3 に各調査地点の一部を拡大した海底地形図に CPT 試験地点および過去の調査を含むコアリング地点を示す. なお, MH 含有コアを赤マークで示している. MH が採取されたのは図に示す網走沖 No.1 地点と No.2 地点のみである. 採取された MH は層状や脈状で存在し, 深度 1m 程度以深から採取されている^{4,6)}.

5. 試験結果

図-4 は, 2015 年にオホーツク海網走沖で行った C020

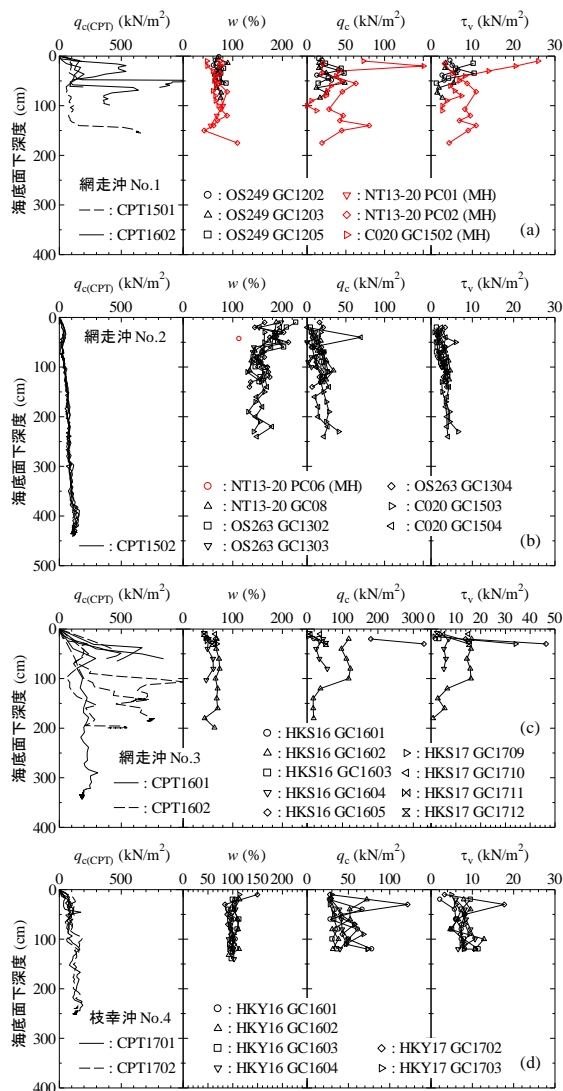


図-6 CPT と船上試験結果の比較 ; (a)網走沖 No.1, (b)網走沖 No.2, (c)網走沖 No.3, (d)枝幸沖 No.4

た。また、傾斜計を取り付けた 2016 年以降の試験では、鉛直方向からの傾斜角 20° 以下のデータのみを試験結果として使用した。この結果と図-3 中のコア名を記載した CPT 近傍で採取したコア試料に対する船上試験結果との比較を行った。

図-6 は、各調査地点での CPT 試験によるコーン貫入抵抗 $q_{c(CPT)}$ 、CPT 近傍で採取したコア試料の含水比 w 、小型コーン貫入試験によるコーン貫入抵抗 q_c 、小型ベーンせん断試験によるベーンせん断強さ τ_v を示したものである。また、図-7 は、採取試料の粒度試験結果から粘土分、シルト分、砂分の含有率を深度方向に示したものである。なお、粒度試験はレーザ回折式粒子径分布測定装置（島津製作所 SALD2300）により行った。図中で赤マークは MH 含有コアを示している。また、図-7 以降の図においてコア試料の試験結果の凡例は図-6 と同様である。

図-6(a), (b)に示すように、網走沖の No.1 地点と No.2 地点の結果を比較すると、採取コアの含水比は、No.1 地点よりも No.2 地点の方が高い。それに対し、船上試験で

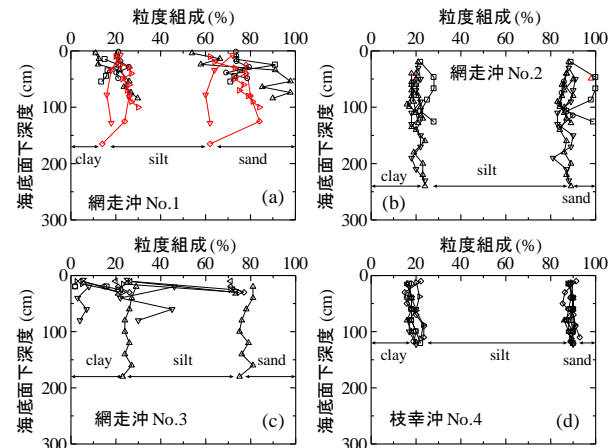


図-7 粒度試験結果 ; (a)網走沖 No.1 地点, (b)網走沖 No.2 地点, (c)網走沖 No.3 地点, (d)枝幸沖 No.4 地点

のコーン貫入抵抗やベーンせん断強さは含水比の差ほど大きく異なっていない。MH がコア下部に含有していた No.1 地点の GC1502 試料では、上部で強度が高くなっているが深度とともに強度が低下している。一方、原位置での CPT 試験結果では、No.2 地点の抵抗値ははるかに低い。これらのことから、No.1 地点で採取したコア試料の多くは、溶存ガスの気泡化および MH の分解によって試料が乱され、強度が過小に評価されていると考えられる。また、No.1 地点では含水比の違い以上に CPT によるコーン貫入抵抗 $q_{c(CPT)}$ が高くなっている。図-7(a)に示すように、No.1 地点から採取したコア試料はシルトを主体としており、CPT が貫入抵抗の高い砂質土層などに貫入したとは考えにくい。また近傍の複数地点で MH が採取されていることから、 $q_{c(CPT)}$ 値が高くなっているのはハイドレート含有層に貫入したと考えられる。

図-6(c)に示す網走沖の No.3 地点では、コア試料の含水比は、No.1 地点の採取コアと同程度であるが、船上試験によるコーン貫入抵抗やベーンせん断強さにはばらつきがある。なお、GC1601, 1603, 1710~1712 試料は、硬質な地盤であったため採取長が 30 cm 程度以下であった。一方、原位置での CPT 試験結果は、深度 1.5 m 程度までにおいて高い値を示している。図-7(c)に示すように、この地点は他地点と比較すると砂分が多く、CPT が砂地盤に貫入したために高い値となったと考えられる。

図-6(d)に示す枝幸沖の No.4 地点では、図-7(d)に示す粒度組成では網走沖の No.2 地点と同様であるが、採取コアの含水比は 100 %程度で網走沖の No.2 地点のコアよりもやや低い。そのため船上試験結果もやや高くなっている。また、原位置 CPT 試験によるコーン貫入抵抗も同様に No.2 地点よりもやや高くなっている。

6. 試料の乱れ評価

上述のように、原位置 CPT 試験結果と船上試験結果の

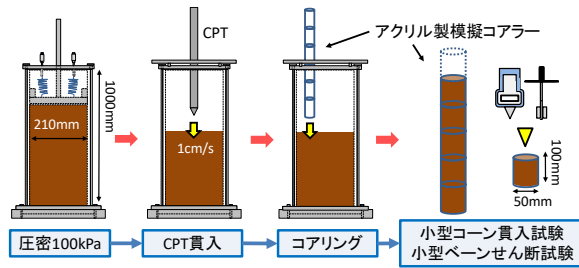


図-8 模擬地盤での実験方法

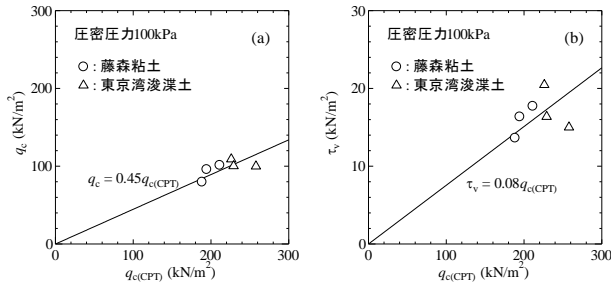


図-9 乱れのない試料での CPT 試験と船上試験の関係；(a)コーン貫入抵抗との関係、(b)ベーンせん断強さとの関係

関係は、調査地点によって異なっていた。この要因は、堆積物中の間隙水に溶存していたメタンが、採取コアを船上に引き上げることによって気泡化し、採取試料が乱されたことや、原位置 CPT 試験においてハイドレート層や砂質土層など硬質な地盤に貫入したため、船上試験結果よりも高い値となったことが考えられる。

そこで、長尺の予圧密装置により模擬地盤を作製し、CPT を貫入させたのち、ガスの気泡化による乱れの影響のない模擬地盤から採取した試料で小型コーン貫入試験とベーンせん断試験を行い、試料の乱れを評価した。

試験には藤森粘土 ($\rho_s=2.71 \text{ g/cm}^3$, $w_L=48.5\%$, $w_P=23.1\%$, 粘土分 11%, シルト分 69%, 砂分 20%) と東京湾浚渫土 ($\rho_s=2.56 \text{ g/cm}^3$, $w_L=98.8\%$, $w_P=37.5\%$, 粘土分 39%, シルト分 57%, 砂分 4%) の 2 種類の試料を用いた。試料に対して初期含水比が液性限界の 2 倍になるように蒸留水を加えスラリー状に攪拌し、この試料を図-8 に示す予圧密装置 (高さ 1000 mm, 内径 210 mm) に入れ、100 kPa で約 1 週間圧密を行った。圧密後、荷重装置により CPT を一定速度 (1 cm/s) で貫入させてコーン貫入抵抗を測定した。また、高さ 100 mm, 直径 50 mm のアクリル製のパイプを繋げて作製した模擬コアラーを荷重装置により一定速度で貫入させて試料採取を行った。採取した試料に対しては深さ 100 mm ごとにコアをカットし、切断面に対して深度ごとに小型コーン貫入試験と小型ベーンせん断試験を行った。なお、圧密終了時の試料高さは 50 cm 程度であったが、上部では CPT コーン部分全体が貫入するまで一定値とならないため、下部では圧密装置底盤の抵抗のため値が高くなる傾向があったので、比較には 10~40 cm 程度の範囲での試験結果 (10 cm ごとに 3

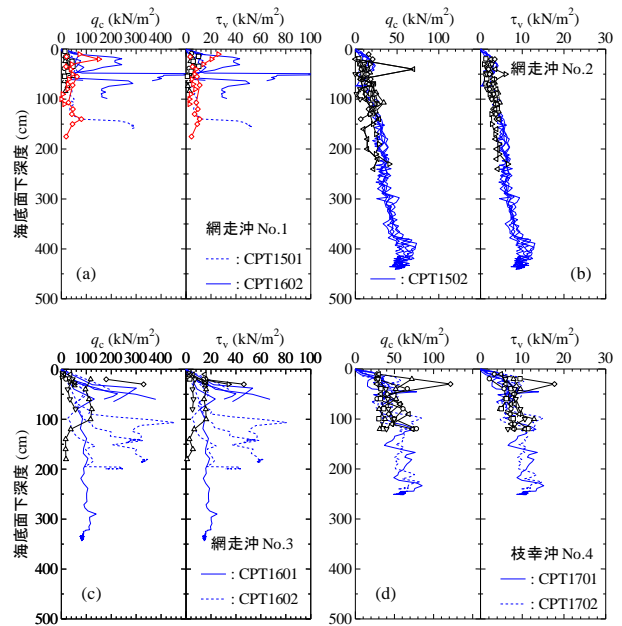


図-10 CPT 試験による推定値と船上試験結果の比較；(a)網走沖 No.1, (b)網走沖 No.2, (c)網走沖 No.3, (d)枝幸沖 No.4

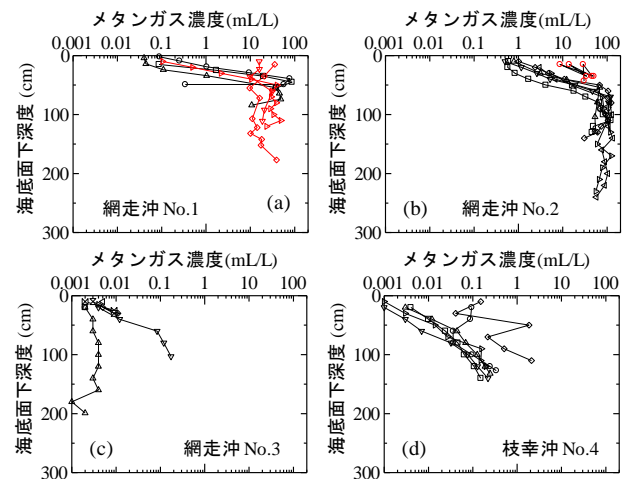


図-11 コア試料の間隙水溶存メタン濃度；(a)網走沖 No.1, (b)網走沖 No.2, (c)網走沖 No.3, (d)枝幸沖 No.4

点) を比較した。

図-9 は、模擬地盤に対する CPT 試験によるコーン貫入抵抗とコア試料に対するコーン貫入抵抗およびベーンせん断強さとの関係を示したものである。すなわち、乱れのない試料での CPT と船上試験結果の関係である。なお、図中の関係式は、用いた 2 種の試料から砂分が 20% 程度以下の試料に対しては適用可能であると考えられる。

図-10 は、得られた関係式を用いた CPT 試験結果による推定値 (青線) と船上試験での実測値とを比較したものである。また、図-11 は採取試料の堆積物 1L あたりのメタンガスの濃度と深度との関係を示したものである。なお、ガス濃度はコアを船上に引き上げ後、大気圧状態で試料を採取して測定した結果であり、海底面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。

図-10(b),(d)に示した網走沖 No.2 や枝幸沖 No.4 では CPT による推定値と船上試験結果がほぼ一致している。図-10(b)の No.2 では、試料の含水比が高く強度が非常に低いため、図-11(b)に示すようにガス濃度が高くても乱れによる強度低下の影響が現れにくかったものと思われる。また、図-10(d)の No.4 では、No.2 よりも含水比は低い、水深が 120m 程度と浅く図-11(d)に示すように溶存ガス濃度も高くはないため、気泡化の程度が低く乱れの影響が少なかったものと考えられる。一方、図-10(a),(c)の網走沖 No.1, No.3 では、CPT による推定値が高くなっている。No.1 では、図-11(a)に示すように採取試料のガス濃度が高いことから、乱れの影響によって船上試験結果が低くなったと考えられる。No.3 においても、CPT による推定値が高くなっている場合が多いが、ガス濃度が低いことから乱れの影響よりも、図-7(c)に示したように砂分が他の地点よりも多いことから、船上試験での非排水条件が満足されず船上試験結果が低くなったと考えられる。

7. 結 論

簡易な重力式 CPT 試験により原位置強度の測定が可能であることがわかった。また、間隙水溶存ガス濃度が高い試料や砂分が多い試料では、船上試験結果の信頼性が低くなるが、ガス濃度の測定や粒度試験から船上試験結果の信頼性評価も可能である。

謝辞：各調査において調査船、練習船乗組員の皆様にご協力をいただいた。記して謝意を表します。なお、本研究は日本学術振興会科学研究費（基盤研究(B)17H03300）

の助成を受けている。

参考文献

- 1) 山下聡, 出羽寛信, 八久保晶弘, 南尚嗣, 片岡沙都紀, 川口貴之, 坂上寛敏, 高橋信夫, 庄子仁: 表層型ガスハイドレート賦存海底・湖底地盤から採取した堆積土の土質特性, 地盤工学ジャーナル, 7(4), 503-516, 2012.
- 2) 西尾伸也, Oleg Khlystov, 杉山博一, Andrey Khabuyev, Oleg Belousov: バイカル湖の湖底表層に存在するメタンハイドレート, 物理探査, 67(1), 55-64, 2014.
- 3) 小川恵介, 出羽寛信, 山下聡, 松本良, 坂上寛敏, 山崎新太郎, 南尚嗣, 八久保晶弘, 片岡沙都紀, 庄子仁, 高橋信夫: オホーツク海網走沖での表層ガスハイドレート調査と海底堆積土の土質特性, 第 48 回地盤工学研究発表会講演集, 493-494, 2013.
- 4) 三輪昌輝, 山下聡, 八久保晶弘, 坂上寛敏, 山崎新太郎, 小西正朗, 南尚嗣, 片岡沙都紀, 板谷和彦, 仁科健二: 北海道沖オホーツク海でのガスハイドレート調査, 第 8 回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, 131-135, 2016.
- 5) 山下聡, 八久保晶弘, 坂上寛敏, 山崎新太郎, 館山一孝, 小西正朗, 南尚嗣: 深海底における重力式コーン貫入試験の適用性, 第 52 回地盤工学研究発表会講演集, 343-344, 2017.
- 6) Yamashita, S., Yamasaki, S., Ohshima, H., Kataoka, S.: Surveys of gas hydrates in the Okhotsk Sea offshore of Abashiri and soil properties of sea bottom sediments, JGS Special Publication, 2(13), 526-530, 2015.
- 7) 小川恵介, 山下聡, 庄子仁, 坂上寛敏, 山崎新太郎, 片岡沙都紀, 三浦竜司, 南尚嗣, 八久保晶弘, 高橋信夫: オホーツク海網走沖での海底地形およびガスハイドレート調査, 第 49 回地盤工学研究発表会講演集, 369-370, 2014.
- 8) 山下聡, 川口貴之, 大島弘己: 小型簡易コーン貫入試験器の考案とその適用性, 地盤工学ジャーナル, 11(2), 193-200, 2016.

(2018.2.8 受付)

GRAVITY TYPE CONE PENETRATION TEST ON SEABED OFF EASTERN HOKKAIDO, THE SEA OF OKHOTSK

Yoshiaki SHIBUYA, Satoshi YAMASHITA, Akihiro HACHIKUBO,
Masaaki KONISHI, Hirotoishi SAKAGAMI, Naotsugu MINAMI,
Kenji NISHINA and Yasuhito UCHIDA

When using the core sample retrieved from deep seabed, to evaluate the strength of deep seabed ground where shallow type methane hydrates existed, the core samples are subjected to a large stress relief during sampling. As a result, gas dissolved in the pore water will come out of solution and cause disturbance to the soil structure. Consequently, it is difficult to obtain the accuracy in-situ strength.

Therefore, in this study, gravity type cone penetration test (CPT) was conducted off the coast of Eastern Hokkaido in the Sea of Okhotsk, where shallow methane hydrates existed, and tried a direct measurement of the sea ground strength. In addition, the influence of sample disturbance of core sample was evaluated in comparison with the onboard test results. As a result, it is found that the onboard test result is underestimated in the sample with high concentration of dissolved gas and with much sand content. On the other hand, the in-situ strength can be evaluated by the simple gravity type CPT.