

メタンハイドレート模擬試料の落下破碎試験と一面せん断試験

DROP-CRUSHING TEST AND BOX SHEAR TEST OF SIMULATED METHANE HYDRATE

栗田宣子*・谷和夫**

Nobuko KURITA, Kazuo TANI

Although methane hydrate is known as a promising energy resource, no economical method has been proposed so far for exploitation from deep ocean seabed. The authors proposed a new recovery method typically comprised of excavation, separation and retrieval processes. In this method, crushability of methane hydrate layer is one of the most important issues especially for excavation and separation processes. This study investigates the crushability of simulated methane hydrate layer by both drop-crushing tests and direct shear tests.

Key Words: methane hydrate, ESR method, crushability, drop-crushing test, direct shear test

1. はじめに

メタンハイドレート（以後、MH と称する）は籠状の水分子の中にメタンガス分子が内包されている氷状固体物質である。また、低温高压の条件下で安定するので、深海底や永久凍土の下部などに存在する。この安定領域から外れると MH は分解して約 150 倍もの容量のメタンガスが放出され¹⁾、次世代エネルギーとして期待されている。日本近海を含め世界中で確認されている総 MH 量は、現存する化石燃料の数倍以上に相当すると言われているが、その生産方法は確立されていない。

従来から検討されている MH の生産方法は坑井を基点とし、MH を分解した後回収する方法であるが、エネルギー効率や回収効率が低いなど課題が多い。そこで、海洋土木や固体資源探掘の技術を最大限に活用し、高い MH 回収効率が期待できる掘削・分別・回収 (Excavation, Separation, Retrieval: 以後、ESR と称する) 方式を提案した²⁾。この ESR 方式の概念の一部を図-1 に示す。ポンプ浚渫機など掘削重機により MH 層を掘削し、MH と掘削ずりの分別を容易にするために破碎機で粉砕する。そして、MH の密度(0.912g/cm^3)が海水より小さいことを利用して、比重選別により MH と掘削ずりを分別する。

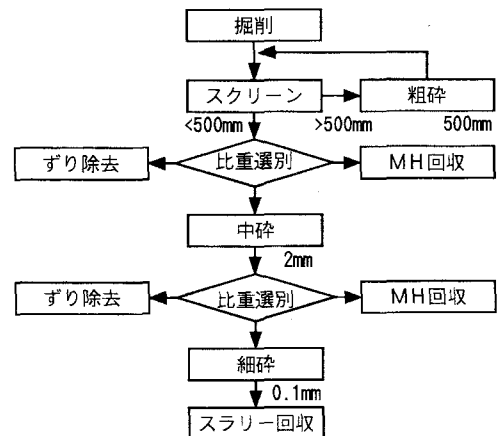
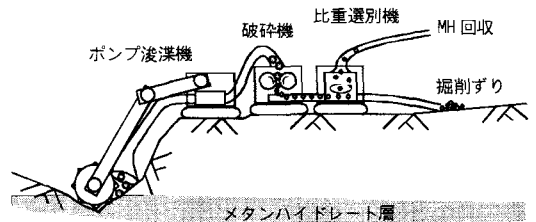


図-1 ESR 方式の概念

(上: 施工機械の構成例、下: 作業のフロー)

* 学生会員 学士(工学) 横浜国立大学大学院 工学府 社会空間システム学専攻

** Ph.D. 横浜国立大学大学院 工学研究院

破碎と比重選別の効率を考慮して、この作業を段階的に繰り返し、最終的にスラリー状にまで細粒化した物は海上へ回収した後に気液分離する。

2. メタンハイドレート層の採掘における課題

上記の ESR 方式による MH の掘削や分別の技術開発にあたり、まず MH 層の特徴を文献調査により調べた。MH 層の存在が確認されている 20 ヶ所以上のサイト³⁾のうち、コアが回収され MH 層の性状が詳細に開示されている 6 地点について整理・分析した⁴⁾⁵⁾。

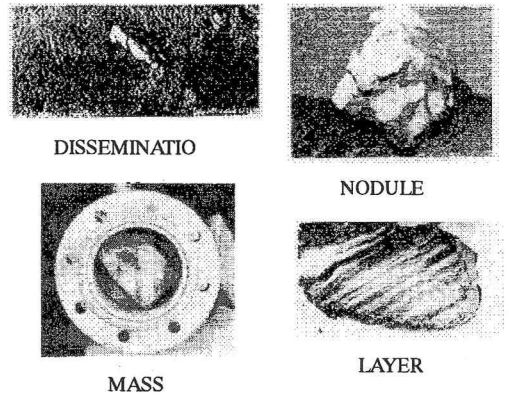


写真-1 MH 層の産状³⁾

(1) メタンハイドレート層の特徴

文献調査の結果を表-1 に示す。MH 層 (MH を含む堆積層) が存在する深度は、海底下数百 m から海底に露呈しているものまであり、主に第三紀以降の地質年代が若い碎屑性の堆積物である。堆積層の粒度は粘土質の細粒分から砂礫など粗粒分まで幅広いが、砂程度のものが多いようである。その孔隙率は 30~40% と比較的高く (ゆるく)、続成作用 (密実化) がそれほど進展していない状態にある。また MH の充填率が 80% 以上と高く、濃集している部分が MH 層として認識されていることが分かる。産状については、写真-1³⁾ に示すように分散状・ノジュール・塊状・層状で存在する場合や、間隙充填型などが報告されており、碎屑物と MH が混在した状態にあるようである。

(2) 課題と検討方法

提案する ESR 方式による採掘では、MH 層を掘削することや、破碎して MH とずりを分別することが容易であることが前提となる。つまり、碎屑物である地盤材料と MH が混在する MH 層の破碎性や分離性を検討する必要がある。

そこで、MH 層の掘削性については、衝撃による破碎性を落下破碎実験により検討する。さらに、MH と地盤材料の分離性については、境界面のせん断強さを一面せん断試験で調べることにした。

この際、上記に記した MH 層の特徴を考慮して、粒度の異なる碎屑物 (土や砂利) と MH が混在した試料を用意した。また、MH の模擬試料として力学的性質が類似している水を使用した。

表-1 MH 層の性状

地点名	南海トラフ (太平洋)	マリック (カナダ)	ブレーク海嶺 (アメリカ)	中央アメリカ海溝 (太平洋)	メキシコ湾 (太平洋)	カスカディア (カナダ)
水深 (m)	950	0 (永久凍土下)	約 200	—	—	—
MH 存在深度 (m)	1135~1213	790~953	200~450	—	海底面	海底面
地質年代	第三紀	漸進世~更新世	—	—	—	—
堆積層の種類	砂岩	細~粗粒砂、砂礫	粘土質~細粒	—	—	—
堆積層の孔隙率	36%	30%以上	—	—	—	—
MH の充填率	80%	80%以上	—	95%	—	—
MH 層の厚さ (m)	16	9~113	—	3~4	—	—
MH の粒度	—	1mm 以下/2cm	微細な結晶/塊状	—	—	—
MH の産状	間隙充填	間隙充填/脈状	層状	塊状	分散状/ノジュール	敷石状

3. 一面せん断試験

砕屑物とMHとの分離性(境界面におけるせん断破壊の容易性)を検討するために、一面せん断試験を行った。

(1) 試験の方法

通常的一面せん断試験機を使用し、定圧一面せん断試験(JGS 0561-2000)を行った。供試体の設定状況を図-2に示す。水の融解を防ぐために、ステンレス製のせん断リング(内径60mm)の内側に熱伝導率の低いアクリル製のリングを試料と共にセットした。また、このアクリル製リング間の摩擦を除去するため、せん断面に沿う隙間にゴム膜を2枚重ねた。

4種類の供試体を表-2に示す。MH中ないしMH間隙充填型の細砂中で発揮されるせん断強さについては、氷単体と凍結豊浦砂単体(間隙比 $e=0.64$ の豊浦砂を蒸留水で飽和させた後に凍結)で調べた。一方、粗粒材料とMHの境界面で発揮されるせん断強さについては、氷/岩石の供試体(岩石上に蒸留水を張って凍結)で調べた。岩石の種類は、火山岩と深成岩の代表的なものとして安山岩と花崗岩の2種類を選んだ。また、岩石表面の粗度の影響を検討するために、JRC (Joint Roughness Coefficient)⁶⁾の異なる2種類(JRC1:滑、JRC4:粗)を用いた。

掘削や破碎における急速な破壊現象を考慮して、高いせん断速度30mm/min.に設定した。また、垂直応力は0.1、0.5、1.0 MPaの3種類とした。試料は-20℃で作製したが、実験は室温で行ったので、水の融解はある程度避けられなかった。

(2) 試験の結果

各供試体に対するせん断強さと垂直応力の関係を図-3～6に示す。氷単体(図-3)と凍結豊浦砂単体(図-4)については、三軸圧縮試験で得られたデータ⁷⁾⁸⁾⁹⁾と併せて表示した。

氷単体も凍結豊浦砂単体もデータのばらつきが大きく、氷内部の欠陥に起因して供試体の一様性がそれほど高くない。しかし、両試料とも軟岩と硬質土の境界程度のせん断強さであることが分かる。また、一面せん断試験によるせん断強さが三軸圧縮試験による値よりも低い。これは、三軸圧縮試験が1～12MPaと広範囲かつ高い垂直応力で実験が行なわれているのに対し、一面せん断試験のデータは0.1～1MPaと低応力下のみであり、せん断強さと垂直応力の関係に見られる非線形性が影響しているためと考えられる。

一方、氷/岩石は、氷単体や凍結豊浦砂単体と比較して内部摩

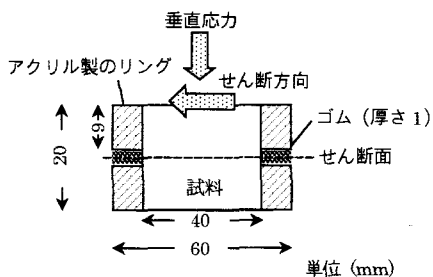


図-2 せん断箱内の供試体の設定状況

表-2 供試体の種類

種類	構造
氷単体	せん断面
凍結豊浦砂単体	せん断面
氷/花崗岩	せん断面
氷/安山岩	せん断面

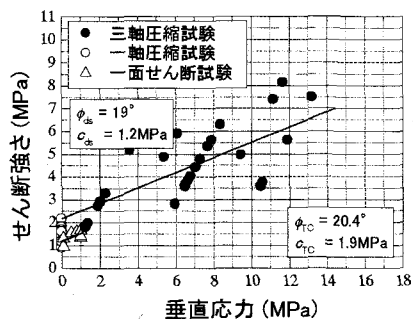


図-3 一面せん断試験(氷単体)

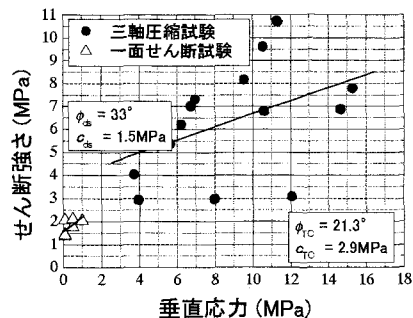


図-4 一面せん断試験(凍結豊浦砂単体)

擦角 ϕ や粘着力 c が小さく、せん断強さが1/3～1/8程度と非常に低いことが分かった。また、岩種による差はほとんど無いが、境界面の粗度についてはJRC4(粗)の方がJRC1(滑)よりもせん断強さが大きい。これは、図-7に示すように、JRC1(滑)の供試体は氷が岩石上を滑るように薄いせん断層が形成されるのに対し、JRC4(粗)の供試体は花崗岩や安山岩のせん断強さが数百MPa以上と、氷と比較して非常に高いことから、岩石表面の凹凸により氷の一部を破碎して厚いせん断層を形成するためと考えられる。

以上の結果より、MH中ないしMH間隙充填型の細砂中で発揮されるせん断強さは高々弱い軟岩程度であり、非常に掘削や破碎が容易であると考えられる。また、粗粒材料とMHの境界面で発揮されるせん断強さはさらに低く、地盤材料とMHの分離も極めて容易であると推測される。

4. 落下破碎実験

MHあるいは間隙充填型のMH層の破碎性を検討するため、碎屑物を凍結した試験体を用いて落下破碎実験を行った。

(1) 実験の方法

円柱のモールド内で -20°C に凍結させた試験体(直径100mm、高さ200mm)をビニール袋に入れ、4mの高さから剛なコンクリート床に自由落下させる。破碎した試料(写真-2)について、ふるい分けによる粒度分析を行う。この破碎とふるい分けの作業を3回繰り返す。なお、実験は室温で行ったので、氷の融解はある程度避けられなかった。

4種類の試験体を表-3に示す。塊状・ノジュールのMHの破碎性については、氷単体で調べた。一方、MH間隙充填型の堆積層については、粒度の影響を考慮して異なる粒度の粗粒土を蒸留水で飽和させて凍結させた試験体で調べた。

(2) 実験結果の整理方法

破碎を議論するには、破碎の進行状況と破碎の容易性(破碎性)を定量的に表現する指標が必要となる。そこで、破碎の進行状況を表現する指標として、破碎度C1と破碎度C2を定義した。また、破碎の容易性(破碎性)を表現する指標として、ASTM基準(D440-86)の破碎値 F_R (friability)¹⁰⁾を用いた。

破碎度C1は、落下前後における平均粒径 D_{50} の減少量を初期の平均粒径 $D_{50,0}$ で正規化した値である。

$$C1 = (D_{50,i-1} - D_{50,i}) / D_{50,0} \quad (\text{落下回数 } i = 0, 1, 2, 3)$$

落下破碎により、試料の平均粒径が小さくなる(細粒化される)状況や破碎の収束を把握することができる。一方、

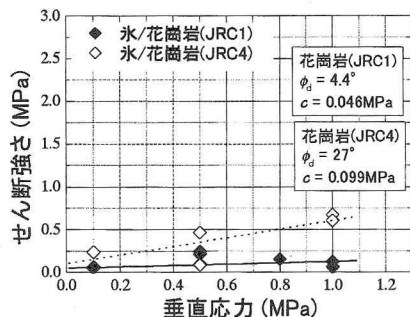


図-5 一面せん断試験(氷/花崗岩)

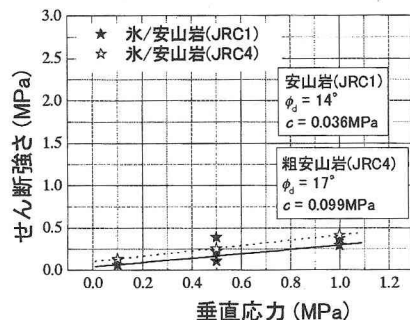


図-6 一面せん断試験(氷/安山岩)

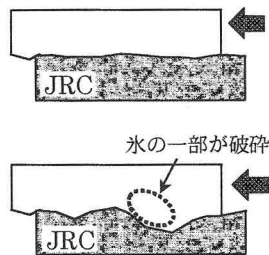


図-7 粗度の違いの影響

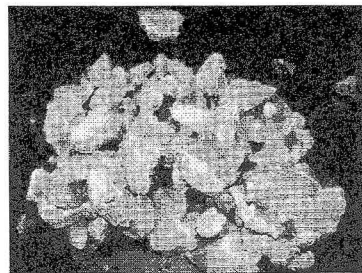


写真-2 落下破碎試験の例(凍結砂利)

破碎度 C_2 は、着目する粒径の通過質量百分率 (%) である。

$$C_2 = P_d \quad (\text{本研究では、粒径 } d = 53\text{mm})$$

落下破碎により、着目する粒径以下の重量比が増大する状況を把握することができる。試験体の初期直径 100mm と砂利の平均粒径 $D_{50}=12.1\text{mm}$ を考慮して、初期直径の約半分 $d = 53\text{mm}$ に注目したので、図-1 に示す破碎と分別のフローで中碎に相当する破碎性を検討している。

破碎値 F_R は、初期粒度で正規化した相対的な粒度の重心値（1次モーメント値）の逆数で、落下後の碎屑体の各ふるい残留量とふるい目の大きさから算出する¹⁰⁾。本研究では、1回目の落下破碎に対する求め、単位エネルギー当たりの値として表示した。

(3) 実験の結果

各試料について落下回数毎の粒径加積曲線を図-8 に示す。落下回数の増大と共に細粒側（左方）に推移する粒径加積曲線より、上述した破碎度 C_1 および C_2 と破碎性 F_R を算出し、それぞれ図-9 と表-3 に示す。

破碎度 C_1 を見ると、1回目の落下に対する破碎度は大きい、2回目以降は細粒化が収束している。また、粒度が粗いほど破碎度が高く、氷の単体は凍結豊浦砂に近い。一方、破碎度 C_2 を見ると、やはり粒度が粗いほど破碎度が高いが、氷の単体は凍結砂利に近い。また、1回目で $P_{53}>50\%$ となった氷単体と凍結砂利では2回目以降は細粒化が収束しているが、粒度が細かい凍結豊浦砂や凍結相馬珪砂では1回目で $P_{53}<20\%$ で2回目以降も細粒化が継続的に進展している。

単位エネルギー (1J) 当たりの破碎値 F_R を比較すると、図-10 に示すように、粒度が粗いほど破碎の容易性（破碎性）が高く、破碎度と同じ傾向を示す。また、氷単体の破碎性は凍結砂利よりも高い。

以上の結果より、MH 間隙充填型の堆積層の破碎性は、構成碎屑物の粒度が粗いほど高い傾向があることが分かつ

表-3 落下破碎試験の試料と破碎値

試料	土粒子の平均粒径 D_{50} (mm)	単位エネルギー当たりの破碎値 F_R (1/J)
氷単体	—	0.77
凍結豊浦砂	0.116	0.03
凍結相馬珪砂	1.34	0.14
凍結砂利 (石灰岩の碎石)	12.1	0.41

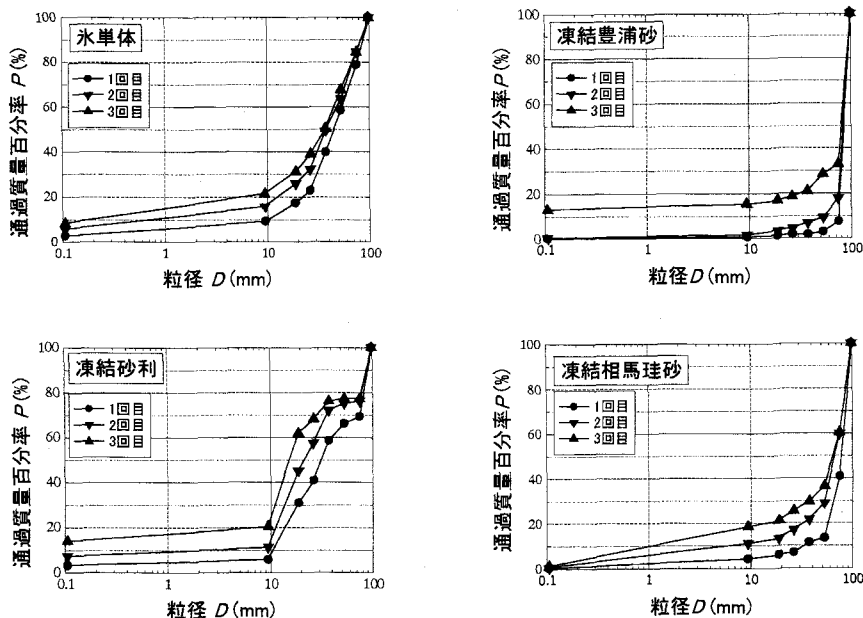


図-8 落下破碎実験の結果（粒径加積曲線）

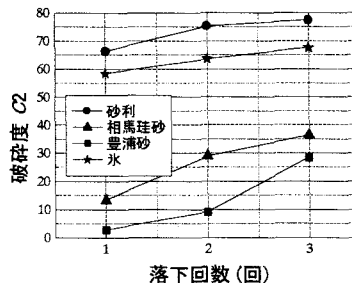
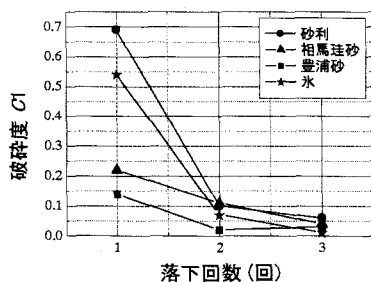


図-9 破砕度 C1 (左) と破砕度 C2 (右)

た。また、その破碎の容易性（破碎性）の定量的な評価としては、概ね氷程度であり、通常の重機で極めて容易に掘削・破碎できる程度であると推測される。ただし、破碎現象を定量的に表現する指標の工学的な意義については、今後、議論する余地がある。

5. まとめ

ESR 方式の実用化に向けて破碎と分別のプロセスのフローを示し、重要とされる MH 層の分離性や破碎性に関して実験的に検討した。その結果、MH 層の破碎性は軟岩と同程度ないしそれ以下であり、MH とずり（地盤材料）の分離も極めて容易であることが分かった。また、MH 間隙充填型の試料では、MH 層を構成する地盤材料の粒度が粗いほど破碎性が大きいことが分かった。

今後の課題として、実験中の融解を防いでデータの精度を上げること、氷と MH の相違や MH 層の産状の影響などに関する検討、より実際の掘削や破碎の現象に近い状況での検討などが挙げられる。さらに、ESR 方式の選別部分に着目し、最適な比重選別方法を確立する必要もある。

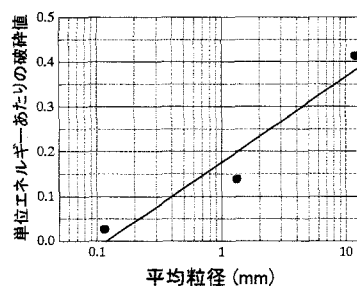


図-10 破砕値と平均粒径の関係

参考文献

- 1) 芦田 譲：国内における在来・非在来型資源の探査と開発、資源と素材、Vol.118、pp.542-543、2002。
- 2) 谷和夫：掘削・分別・回収方式による海底のメタンハイドレートを採掘する方法に関する提案と解決すべき技術課題、第48回地盤工学シンポジウム、pp.383-388、2003。
- 3) E.Dendy Sloan, Jr.: Clathrate hydrate of natural gases, Marcel Dekker, Inc., pp.460-463, 1997。
- 4) 高橋秀明、米沢哲夫、武富義和：基礎試錘「南海トラフ」におけるメタンハイドレートの探鉱、石油技術協会誌、Vol.66、2001。
- 5) 内田 隆・大原敏廣：カナダ・マッケンジーデルタにおけるメタンハイドレート実証井の概要、ペトロテック、Vol.23、No.8、2000。
- 6) 日本材料学会：ロックメカニクス、技報堂出版、pp.79、2002。
- 7) 久保和子：深海底地盤におけるメタンハイドレートの力学特性に関する研究、山口大学修士論文、2001。
- 8) 福永 誠、兵動正幸、中田幸男、久保和子、中村和夫、山田研治：メタンハイドレートの力学特性に与える温度と拘束圧の影響、第34回地盤工学会研究発表会、pp.633-634、1999。
- 9) 安部 透、西尾伸也、若林茂樹、傳田 篤、赤川 敏：メタンハイドレート資源開発に伴う海底地盤の変形予測－その3：メタンハイドレートを模擬した氷試料のせん断特性－、第38回地盤工学研究発表会、pp.379-380、2003。
- 10) ASTM Standard D440-86: Drop Shatter Test for Coal, 1994。