

## 模擬メタンハイドレート堆積物の力学特性の実験的評価

蒋 宇 静\*・棚 橋 由 彦\*  
大 野 俊 平\*・青 木 一 男\*\*  
緒 方 雄 二\*\*・梶 井 明\*\*

Compression Strength and Deformation Behaviour of  
Methane Hydrate Specimen

by

Yujing Jiang, Yoshihiko Tanabashi, Shunpei Ohno, Kazuo Aoki, Yuji Ogata and Akira Masui

Methane hydrates, which form at low temperature and high pressure, are found in ocean sediments and being evaluated as a potential fuel for the future. The worldwide total of methane hydrate is estimated to be equivalent to 250 trillion cubic meters of methane gas. In order to establish an efficient production technology for extraction of methane from hydrates, deformation and movement behaviour of ocean sediments have to be basically clarified. The aim of this study is to develop the low temperature auto-controlled triaxial compression apparatus and to estimate the mechanical properties by using the ice rock matrix specimen. The preliminary results on relationships between deformation properties, shear strength and sand content in the specimen are presented and discussed.

**Key words:** methane hydrate, compressive strength, deformation, temperature, triaxial compression test

## 1. はじめに

人類が生存していく上でエネルギーは、必要不可欠である。現在人類は一次エネルギーとして主に石油・天然ガスを中心とした化石燃料に依存している。しかし、これら主要なエネルギーの可採年数（現在の確認可採埋蔵量を年生産量で割った年数）は数十年程度であり、近い将来において、在来化石エネルギーに変わる次のエネルギー源への変遷は避けては通れない課題である。そこでクローズアップされるのがメタンハイドレート（Methane Hydrate, 以下はMHと略す）である。

近年、日本の周辺の海域においても、メタンハイドレートの存在が調査によって明らかになり、その総量は、年間天然ガス消費量の約100倍の相当量が推定されている<sup>1),2)</sup>。つまり、MHの開発生産が実現すれば、エネルギー資源の乏しい日本国に対し長期的なエネルギー

供給が可能になると考えられている。

メタンハイドレートは、圧力と温度の平衡条件でメタンガスが水分子に取り囲まれたカゴ状構造を形成し、凍土地域や海底の堆積層中に氷状で分布しており、次世代のエネルギー資源として国際的に注目されている。MHを分解しメタンガスを生産する方法としては、坑井内の循環水を利用してMH層の温度を上昇させる方法（熱刺激法）や圧力を低下させる方法（減圧法）等が考えられている<sup>3)</sup>。この場合、MHの分解による堆積層の強度低下と間隙中の流体移動にともなう生産坑井周辺の地盤変形によって、生産活動が阻害される可能性が高く、MHの安全かつ継続的な生産性を確保するには、MH堆積層の力学特性や変形特性を解明する必要がある<sup>3),4)</sup>。

本研究は、圧密計算モジュールの開発にあたって必要なMH堆積層の力学パラメータの基礎データを得る目的で、圧縮強度・変形特性に及ぼす温度と圧力およ

平成16年 4 月16日受理

\* 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

\*\*産業技術総合研究所 (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

び砂配合率の関係を調べた。このため、低温高圧の自動制御が可能な力学特性試験装置を製作し、MH模擬試料を用いた低温下における三軸圧縮試験を実施した。また、限られた供試体を用いて必要な力学特性を求める多段階载荷三軸圧縮試験の可能性についても検討した。

## 2. 試験装置と模擬供試体の作製方法

力学特性試験装置を図-1、図-2に示す<sup>5)</sup>。三軸圧縮試験が可能な温度範囲は $-30^{\circ}\text{C}$ から $+20^{\circ}\text{C}$ であり、半径方向の変位はセル内に設けられた2個のギャップセンサーにより計測される(図-3)。圧力と温度は蓄熱槽と圧力容器の間のナイブライン循環により自動制御される。

本試験に用いた模擬試料については、実際にMHが多く存在するとされている堆積層は砂質土層であることから、豊浦標準砂と $250\mu\text{m}$ ふるいを通した微粉氷を混合した土質材料を、 $-15^{\circ}\text{C}$ の雰囲気において内径50mmの金属製シリンダーとピストンにより圧力約50MPaで両面より圧縮固結させたものを用いた。模擬試料の寸法は直径50mm、高さ100mmである(図-4)。

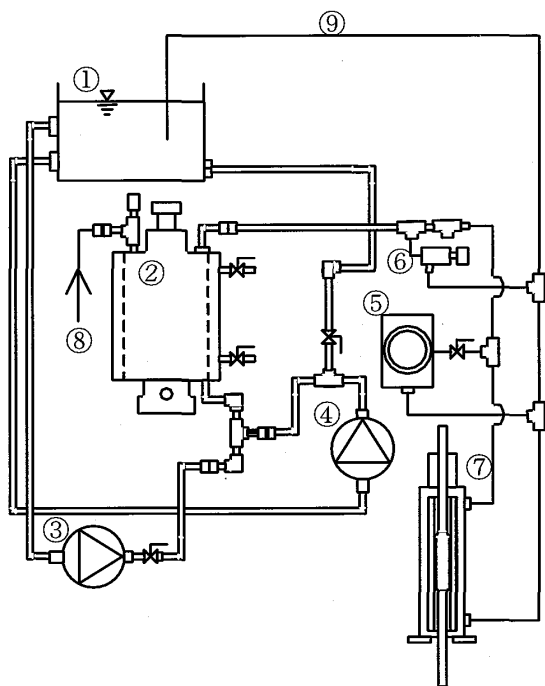


図-1 試験装置図

- ①蓄熱槽 ②耐圧容器 ③低圧ポンプ ④高圧ポンプ  
⑤フロコン ⑥安全弁 ⑦アクチュエーター  
⑧エア圧ライン ⑨返送ライン

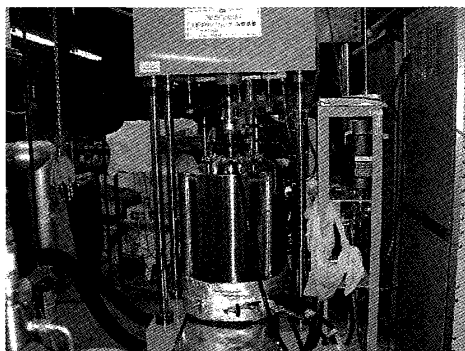


図-2 試験装置図外観

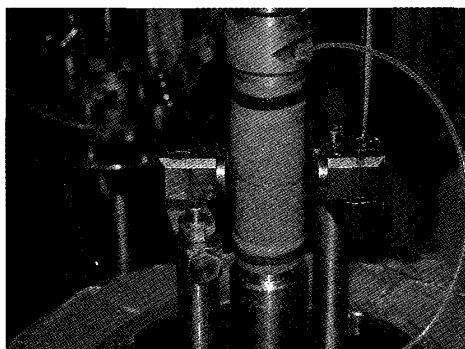
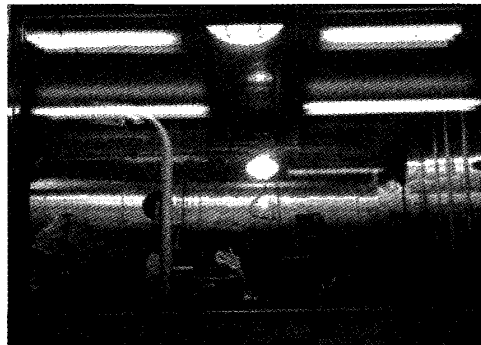
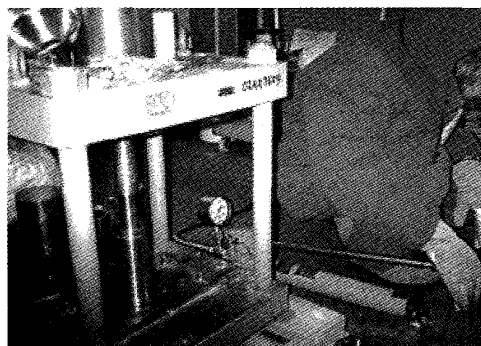


図-3 半径方向変位計測ギャップセンサー



(a)  $-15^{\circ}\text{C}$ の雰囲気下の冷凍室



(b) ピストンにより約50MPaで圧縮固結

図-4 模擬供試体作製概要

### 3. 模擬供試体の基礎特性

作製した模擬供試体の特性値を以下に示す。

#### 3.1 間隙量

図-5は砂配合率と間隙量の関係を示したグラフである。MH試料においては、氷と空気を間隙量とすることから、砂配合率の増加に伴い、氷体積が減少し、間隙量は小さくなる。

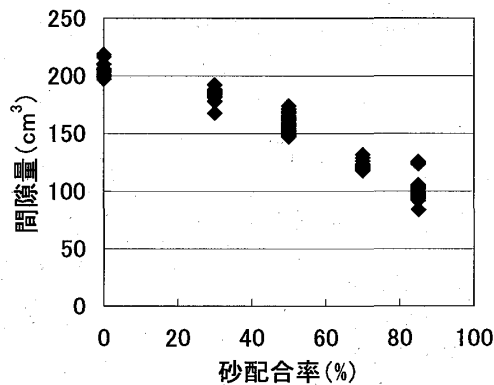


図-5 砂配合率と間隙量の関係

#### 3.2 間隙比

図-6に砂配合率と間隙比の関係を示す。砂配合率の増加に伴い間隙量が減少することから、間隙比も減少する。砂配合率30%と、砂配合率50%の間隙比に大きな隔たりがあるのは、氷の比重(0.9168)と砂粒子の比重(2.63)差の影響により砂配合率50%以降は、砂体積の占める割合が比較的に大きくなるためである。砂配合率0%における間隙比は、全体積が間隙となることから、グラフ上に明記していない。

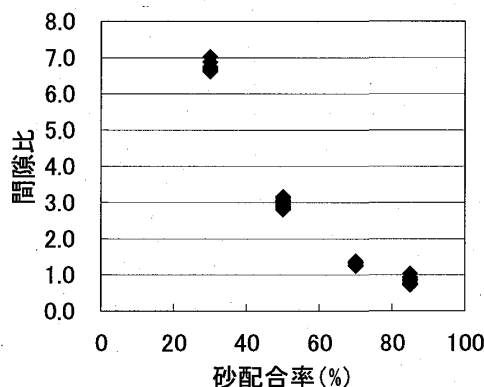


図-6 砂配合率と間隙比の関係

#### 3.3 間隙率

図-7に砂配合率と間隙率の関係を示す。間隙率も間隙比と同様の理由により砂配合率の増加に伴い、減少する。砂配合率0%においては砂体積が0であり、

全体積(氷体積+空気体積)が間隙量になるため、間隙率は100%である。

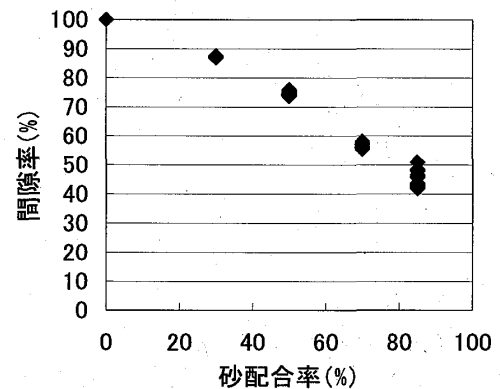


図-7 砂配合率と間隙率の関係

#### 3.4 飽和度

図-8に砂配合率と飽和度の関係を示す。砂配合率0%, 30%, 50%, 70%の試料の飽和度は、ほぼ100%に近い値を示し、空気を殆ど含まない試料であることが分かる。それに対し、砂配合率85%の飽和度は、60%付近であった。これは全体積に占める砂体積の割合が高いため、間隙中に空気を含みやすいためであると考えられる。つまり、砂配合率70%と85%の間には模擬供試体の飽和、不飽和を分ける境界線があると考えられる。

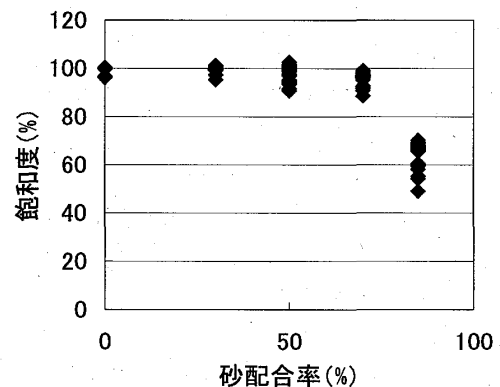


図-8 砂配合率と飽和度の関係

### 4. 試験と考察

#### 4.1 試験条件

豊浦標準砂と模擬供試体の質量比(以下、砂配合率と略す)が0%, 30%, 50%, 70%, 85%の試料を用いて、試験温度を-1, -5, -10℃と設定した条件下において、側圧を2, 6, 10MPaと変化させながら、軸載荷速度を1%/minとして、三軸圧縮試験を行った(表-1)。

表-1 三軸圧縮試験の試験条件と試料数

砂配合率 (%)	試験温度 (℃)	側 圧 (MPa)	試料数 (個)
0	-1, -5, -10	2, 6, 10	10
30	-1, -5, -10	2, 6, 10	9
50	-1, -5, -10	2, 6, 10	12
70	-1, -5, -10	2, 6, 10	12
85	-1, -5, -10	2, 6, 10	9

## 4.2 試験結果と考察

## (1) 軸差応力と軸ひずみの関係

図-9に、試験温度-5℃、側圧6MPa時における軸差応力と軸ひずみの関係を砂配合率別に示す。砂配合率の増加に伴い、軸差応力が増加する傾向が見られた。また、砂配合率の低い0%, 30%ではひずみ軟化傾向が示されたが、85%の場合はひずみ硬化傾向が示された。以上のことより全体に占める砂の割合は軸差応力と軸ひずみの関係に影響することが認められた。

図-9にも対応するが、各試験温度における、最大軸差応力と砂配合率の関係を図-10に示す。砂配合率の増加に伴い最大軸差応力が上昇することが認められた。しかし、砂配合率70%以下においては、側圧の増加に伴う最大軸差応力の増加はほとんど見られなかった。砂配合率70%以下においては、側圧依存性が極めて低いと考えられる。

図-11に、側圧6MPa時における試験温度に対する最大軸差応力を各砂配合率別に示す。試験温度が低いほど最大軸差応力が高い値を示した。しかし、試験温度の低下に伴う最大軸差応力の増加幅は、0%と85%を比べても、大きな差が見られない。つまり、最大軸差応力の増加を支配している要因として試験温度より、氷の粒子である考えられる。

図-12は各試験温度における最大軸差応力に対応した軸ひずみと砂配合率の関係を示している。砂配合率0%から70%までは、若干の例外やバラツキがみられるが、軸ひずみ量が2%から4%と側圧の違いによる変化は認められない。一方、砂配合率85%では、最大軸差応力はひずみ硬化を示したため、最大軸差応力に対応した軸ひずみ量は大きくなった(軸ひずみ量の上限は15%)。又、試験温度-1℃においてはひずみ硬化傾向を示すケースが多く試験温度依存性も確認された。

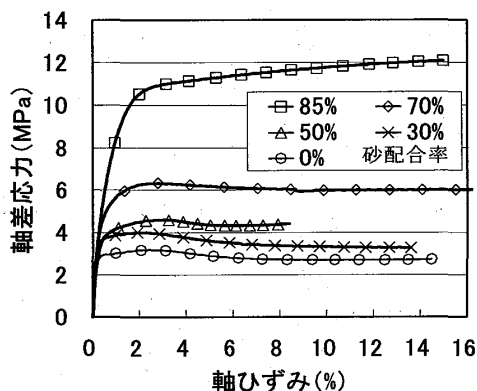
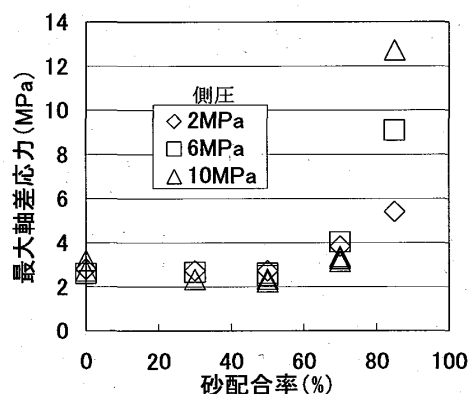
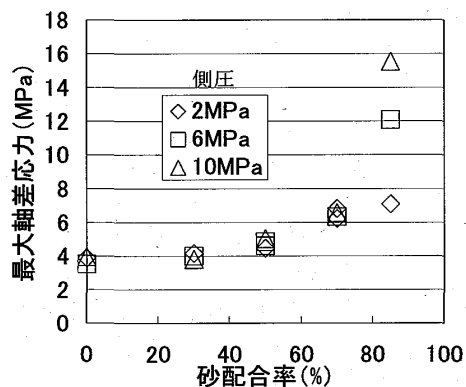


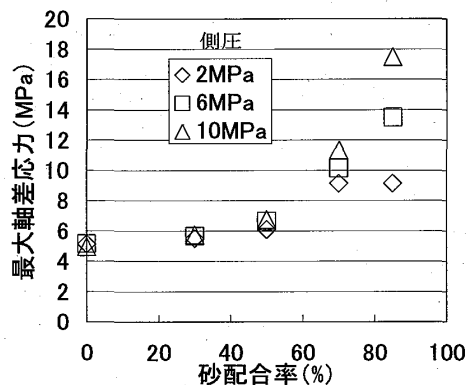
図-9 軸差応力と軸ひずみの関係



(a) 試験温度-1℃



(b) 試験温度-5℃



(c) 試験温度-10℃

図-10 最大軸差応力と軸ひずみの関係

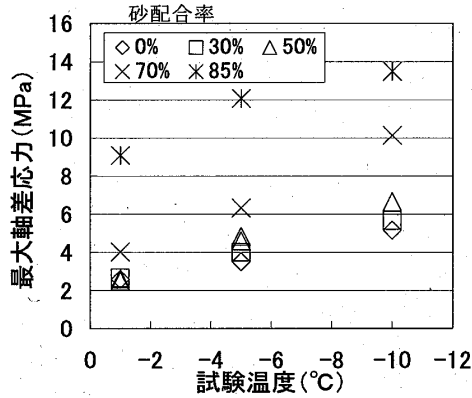
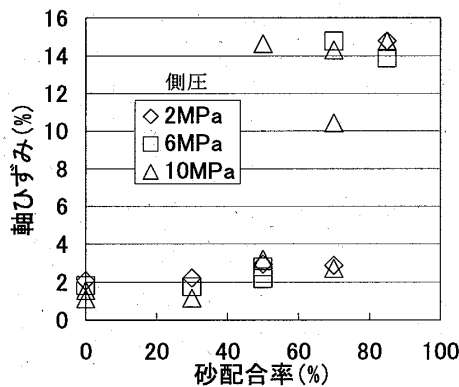
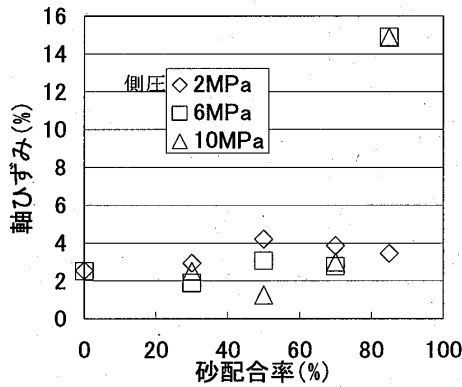


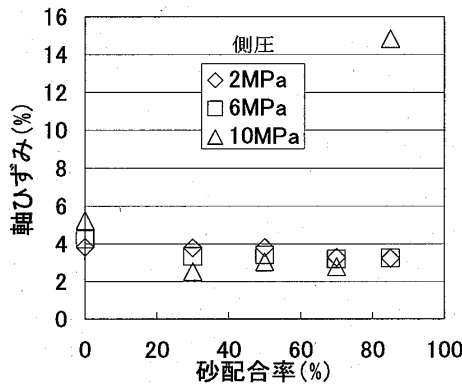
図-11 最大軸差応力と試験温度の関係



(a) 試験温度 -1°C



(b) 試験温度 -5°C

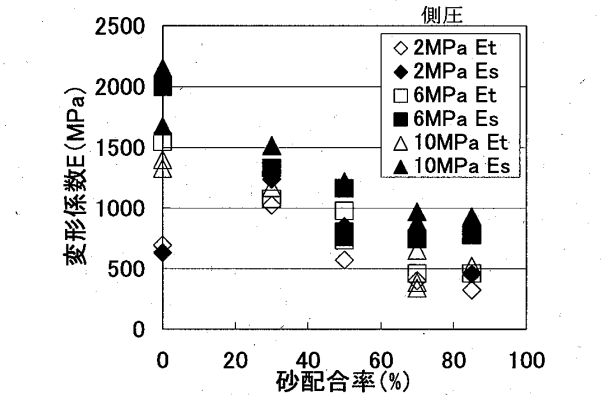


(c) 試験温度 -10°C

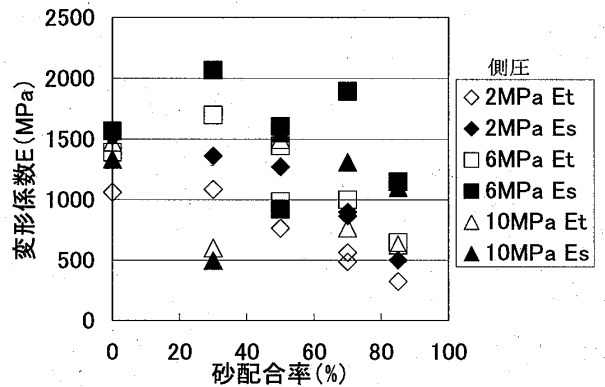
図-12 最大軸差応力時の軸ひずみと砂配合率の関係

## (2) 変形係数と砂配合率の関係

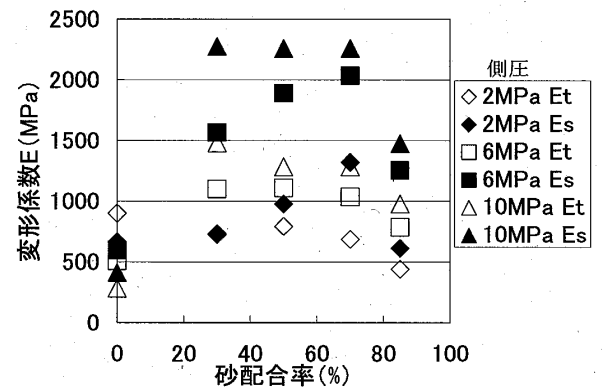
図-13に各試験温度における最大軸差応力の50%時に対応する変形係数 (Et: 接線係数, Es: 割線係数) と砂配合率の関係を側圧別に示す。砂配合率に対する変形係数の値には若干のばらつきが見られたが、全体の傾向として、砂配合率が増加する及び側圧が減少するほど変形係数が減少する傾向が認められた。



(a) 試験温度 -1°C



(b) 試験温度 -5°C



(c) 試験温度 -10°C

図-13 変形係数と砂配合率の関係

## (3) ポアソン比と砂配合率の関係

図-14に各試験温度における砂配合率と最大軸差応力時のポアソン比の関係を示す。殆どのケースにおいてポアソン比の値は、0.2から0.6程度の値となり、砂配合率による大きな依存性は認められなかった。例外的に、ポアソン比が1.0付近の値を示すケースも見られたが、模擬供試体の破壊状況も大きく影響していると考えられる。

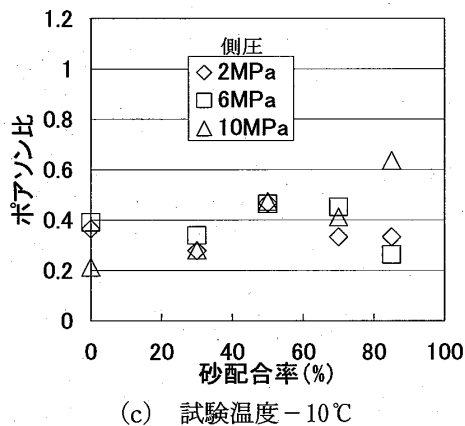
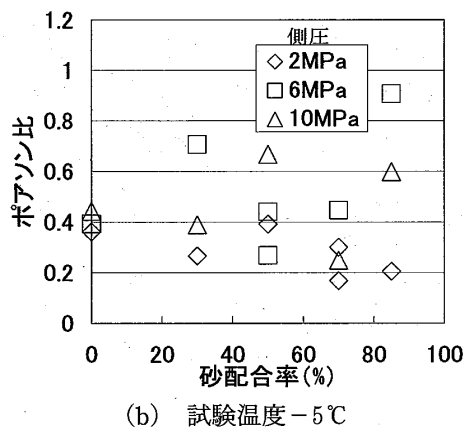
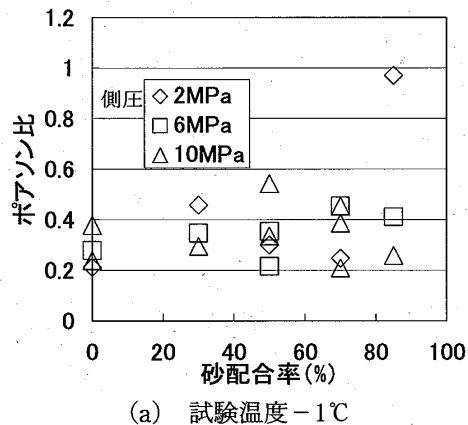


図-14 ポアソン比と砂配合率の関係

## (4) 粘着力・内部摩擦角と砂配合率

図-15(a)に粘着力と砂配合率との関係を試験温度別に示す。砂配合率70%以下における粘着力は、砂配合率の増加に伴い、大きくなる傾向が示された。しかし、その増加値は僅かであり、砂配合率依存性は低いといえる。それに対し、砂配合率85%においては、他の砂配合率と比較し、粘着力が小さくなる結果となった。以上のことより、砂配合率85%の模擬供試体は他の模擬供試体とは、異なる強度特性を持っていると考えられる。又、粘着力は温度の低下に伴い増加する傾向が見られ、高い温度依存性が示された。

図-15(b)に内部摩擦角と砂配合率との関係を試験温度別に示す。砂配合率70%以下における内部摩擦角は殆どのケースにおいて1°前後を示し、全体の傾向としても、内部摩擦角がかなり小さいことが明らかとなった。それに対し、砂配合率85%の模擬供試体の内部摩擦角は20°前後であった。つまり、砂配合率85%の模擬供試体のせん断強度には、内部摩擦角の占める割合が大きいと考えられる。しかし、内部摩擦角には、大きな温度依存性は見られなかった。

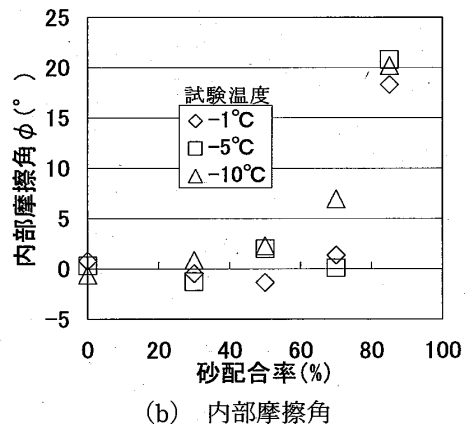
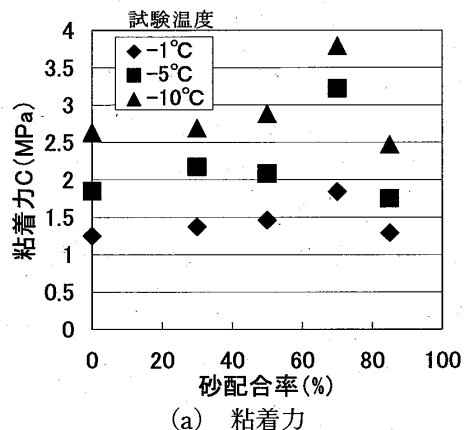


図-15 せん断強度と砂配合率の関係

## 5. 多段階三軸圧縮試験の概要

### 5.1 試験概要

実際のMH堆積物試料の取得は非常に限られており、少ない供試体から解析に必要なパラメータを求めるためには、多段階載荷試験方法についても検討する必要がある。

岩石の強度定数を求める方法として、Kovari & Tisa(1975)が多段階載荷三軸圧縮試験法を提案した<sup>6)</sup>。この試験の特徴は、1本の供試体に対して複数の拘束圧を段階的に作用させることにより、強度定数を求めることが可能なことである。従って、供試体本数が少数である場合に非常に有効な手法と考えられる。しかし、軸圧縮（せん断）を複数回行うため供試体に損傷が蓄積され、せん断強度を過小評価する可能性があり、さらに、載荷経路と載荷回数によって試験結果も大きく変わることが指摘されている<sup>7)</sup>。中園ら<sup>7)</sup>は2種類の軟岩を対象とし、多段階載荷三軸圧縮試験の適用性を検討した結果、負のダイレタンスーと延性破壊を特徴とする軟岩（例えば、シルト岩）に対しては、側圧の設定順序を低い側圧から増加させる経路の適用性が高いことを明らかにした。

### 5.2 側圧載荷段階

側圧の載荷段階については、通常の方法で行った試験との関連性を確認、考察するため、2 MPa、6 MPa、10 MPaと側圧を三段階に変化させて三軸圧縮試験を行った。

側圧を段階変化させるタイミングについては、明確なピークが現れ軸差応力が減少に転じた点及び過去のデータからの経験則により、軸差応力の増加量が5 kPa以下を示しそれが10秒間継続した点を段階変化点とした。なお、後者の点が示す軸差応力は、通常の三軸圧縮試験における最大軸差応力の90%~95%を示している。

### 5.3 試験目的と試験ケース

多段階三軸圧縮試験の実施により、粘着力、内部摩擦角を求めることを試験目的とする。又、得られたパラメータを通常の三軸圧縮試験のパラメータと比較し、試験方法の妥当性を検討する。

表-2に多段階三軸圧縮試験の試験条件を示す。模擬供試体は通常の三軸試験で用いた模擬試料と同じ方法で作成したものをを用いた。砂配合率については、砂配合率85%の模擬供試体が実際のMHが存在する堆積層の特性に最も近いことから、砂配合率85%の模擬供

試体について試験を行った。

又、試験温度-10℃においては、メタン依存性の確認を目的とし、同様の方法により作製した砂配合率85%の模擬供試体に対し、実際にメタンを充填させた試料の多段階三軸圧縮試験を実施した。

表-2 多段階三軸圧縮試験の試験条件と試料数

砂配合率 (%)	メタン	試験温度 (℃)	側圧載荷段階 (MPa)	試料数 (個)
85	無	-1	2→6→10	1
85	無	-5	2→6→10	1
85	無	-10	2→6→10	2
85	有	-10	2→6→10	1

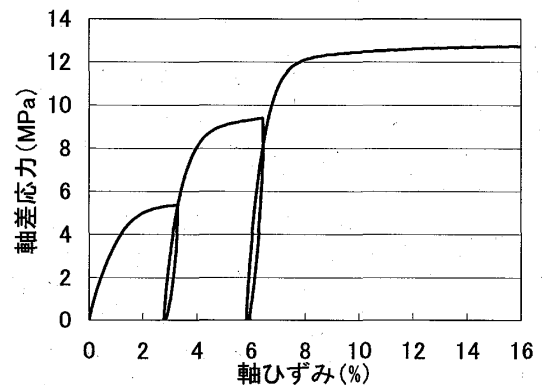
## 6. 多段階三軸圧縮試験による評価

### 6.1 軸差応力の比較

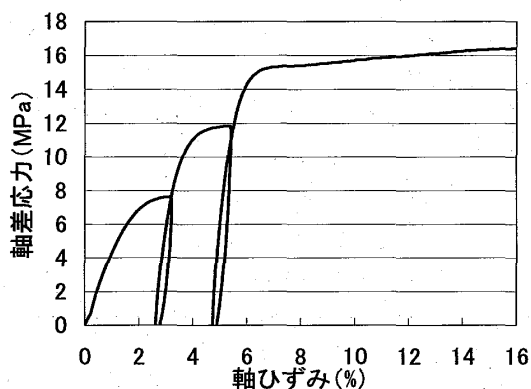
図-16は各試験温度における、多段階三軸圧縮試験の結果を示したグラフである。通常の側圧一定で行った三軸圧縮試験の結果と同様に側圧増加による軸差応力の増加が認められた。又、砂配合率85%に見られた高い側圧依存性も同様に示された。

各試験温度別のグラフの比較により、試験温度の低下による軸差応力の増加が見られ、温度依存性についても通常試験と同様の傾向が示された。その他にも、砂配合率85%の模擬供試体にみられた、ひずみ硬化傾向も示され、通常の三軸圧縮試験の結果によって示された試験傾向に酷似した試験結果となった。

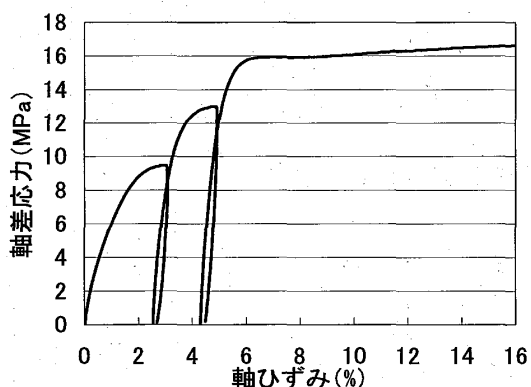
図-17にモールの応力円作成に用いた軸差応力（最大軸差応力及び、側圧変化点の軸差応力）と側圧の関係を示す。通常の試験によって得られた最大軸差応力と側圧変化点の軸差応力は、かなり近い数値を示し、側圧変化点の決定方法は妥当であったといえる。



(a) 試験温度-1℃



(b) 試験温度 -5°C



(c) 試験温度 -10°C

図-16 各試験温度における多段階三軸圧縮試験

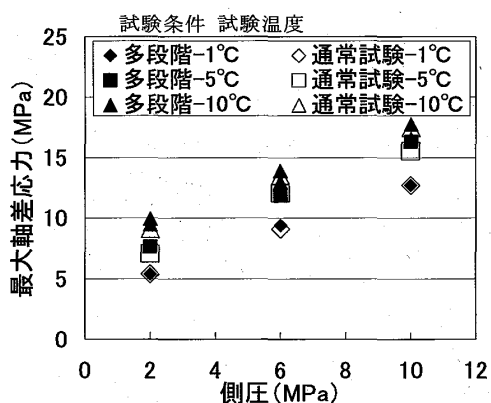


図-17 最大軸差応力の試験条件による比較

## 6.2 メタンを含む模擬供試体との比較

図-18は砂配合率85%の模擬供試体の試験温度-10°Cにおける多段階荷重三軸圧縮試験の結果をメタンの有無別に示したグラフである。2つの試験結果の対比より、メタンを含む模擬供試体の軸差応力の値が7 MPa程度大きくなる結果が得られ、軸差応力の増加に対しメタンの有無が大きく影響していることが認められた。

軸差応力とメタンの有無の関係については、模擬供試体に含まれるメタンの含有率等も影響すると考えら

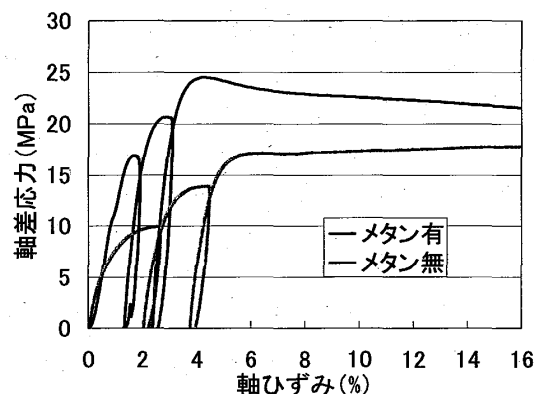


図-18 メタン含有による軸差応力の比較

れ、さらなる追加試験の必要性があると思われる。

## 6.3 粘着力・内部摩擦角の比較

図-19は粘着力について、多段階荷重三軸圧縮試験及び通常に行った三軸圧縮試験の結果を対比したグラフである。僅かながら多段階荷重三軸圧縮試験によって得られた粘着力の値が高くなったが、値の差は僅かであり、模擬供試体の作製誤差によるものであると考えられる。実際にメタンを含む模擬供試体においては、各側圧段階における軸差応力の値が、メタンを含まないものに比べ大きい値を示したため、結果として粘着力も高い値となった。

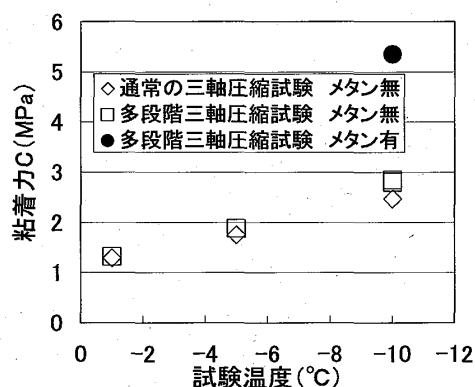


図-19 粘着力と試験温度の関係

図-20は、内部摩擦角について多段階荷重三軸圧縮試験及び通常に行った三軸圧縮試験の結果を対比したグラフである。両者の内部摩擦角はかなり近い値を示しており、本研究の多段階荷重三軸圧縮試験の妥当性が示された。なお、内部摩擦角については、メタンを含む模擬供試体においても同程度の値が得られた。データ数が少ないため予測の域を超えることは出来ないが、内部摩擦角のメタンによる影響は小さいと考えられる。



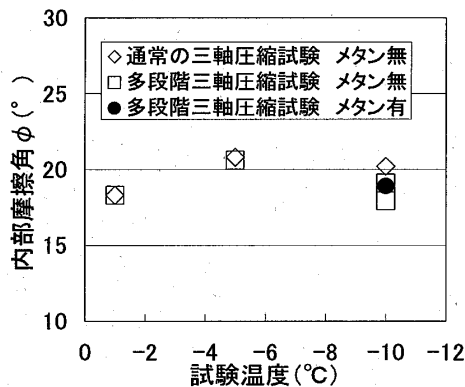


図-20 内部摩擦角と試験温度の関係

## 7. おわりに

本研究では、低温自動制御三軸圧縮試験装置を試作し、それを用いて、模擬供試体の三軸圧縮試験を実施し、砂配合率、試験温度と模擬供試体の変形係数、強度定数との関係を考察することにより、圧密モジュール開発に必要なパラメータを一部得ることが出来た。また低温多段階載荷三軸圧縮試験の可能性についても検討した。今後は、実際にメタンを含む試料についての試験を増やしメタン含有の変形特性と強度特性に対する影響についてさらに検討していく。

謝辞：本研究は、経済産業省資源エネルギー庁から委託された「平成15年度メタンハイドレート生産手法開発研究」の一環として実施したものである。

## 参 考 文 献

- 1) 佐藤幹夫：ガスハイドレート(Ⅳ)－メタンハイドレートの分布とメタン量及び資源量，日本エネルギー学会誌，Vol.80，No.895，pp.1064-1074，2001
- 2) 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，No.8，pp.536-545，2002
- 3) 青木一男，緒方雄二，榊井明，森二郎，方火浪：メタンハイドレート生産に伴う地盤変動について，資源・素材2003（宇部）秋季講演会論文集，B4-1，pp.235-236，2003
- 4) 安部透，西尾伸也，若林成樹，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－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概要集，D-06，pp.379-389，2003
- 5) 青木一男，緒方雄二，榊井明，蔣宇静，大野俊平，棚橋由彦：模擬メタンハイドレート供試体の圧縮強度及び変形特性の評価，第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.409-413，2004
- 6) Kovari, K. & Tisa, A. : Multiple Failure State and Strain Controlled Triaxial Tests, Rock Mechanics 7, pp.17-33, 1975
- 7) 中園康平，谷和夫，岡田哲実：2種類の軟岩を用いたMLDモデルによる多段階載荷三軸圧縮試験の検討，第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.65-72，2003