メタンハイドレートを含む模擬堆積物の 三軸圧縮特性におよぼすひずみ速度の影響*

宮崎 晋行¹ 榊井 明² 坂本 靖英³ 羽田 博憲⁴
緒方 雄二⁵ 青木 一男⁶ 山口 勉⁷ 大久保 誠介⁸

Strain Rate Dependency of Sediment Containing Synthetic Methane Hydrate in Triaxial Compression Test

by Kuniyuki MIYAZAKI^{a*}, Akira MASUI^a, Yasuhide SAKAMOTO^a, Hironori HANEDA^a,
Yuji OGATA^a, Kazuo AOKI^a, Tsutomu YAMAGUCHI^a and Seisuke OKUBO^b

- a. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 16-1, Onogawa, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8569, Japan (*Corresponding author E-mail: miyazaki-kuniyuki@aist.go.jp)
b. Department of Geosystem Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

Methane hydrate is anticipated to be a promising energy resource of natural gas, since a large amount of reservoir exists in marine sediments or in permafrost regions worldwide. In order to evaluate a productivity of methane gas from methane hydrate reservoirs, it is necessary to develop a gas production numeric simulator. And, for precise assessment of long-term gas productivity, it is important to consider time-dependent properties of sediments containing methane hydrate.

In this study, loading rate dependency, one of important time-dependent properties, of artificial sediment containing methane hydrate was experimentally examined. Results of triaxial compression tests of water-saturated Toyoura sand (saturated-sand specimen) and Toyoura sand containing synthetic methane hydrate (hydrate-sand specimen), at conditions of confining pressure 9MPa, pore water pressure 8MPa and temperature 278K, were presented. Loading was conducted at a constant strain rate or alternating strain rate. In constant strain rate test, specimen was loaded at strain rate of 0.1%/min, 0.05%/min and 0.01%/min. In alternating strain rate test, one specimen was loaded at a strain rate alternated between the lower rate C_1 and the higher rate C_2 at strain intervals $\Delta\epsilon$. The conditions of C_1 , C_2 and $\Delta\epsilon$ were briefly examined in this study.

Experimental results indicate that saturated-sand specimen shows very weak strain rate dependency suggesting that, in most cases, time-dependency is negligible small. Strain rate dependency of the peak strength for hydrate-sand specimen was considerably stronger than that of saturated-sand specimen. Referring to earlier works, the time-dependency of hydrate-sand specimen seemed to be weaker than that of ice or methane hydrate and comparable with that of frozen sand.

KEY WORDS: Methane Hydrate, Triaxial Compression Test, Stress-Strain Curve, Strength, Strain Rate, Time Dependency

1. はじめに

*2007年6月20日受付 2007年9月8日受理

1. 普通会員 工博 (独)産業技術総合研究所 メタンハイドレート研究ラボ 特別研究員
2. Ph.D. (独)産業技術総合研究所 メタンハイドレート研究ラボ 招聘研究員
3. 普通会員 工博 (独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 研究員(メタンハイドレート研究ラボ併任)
4. 普通会員 工博 (独)産業技術総合研究所 メタンハイドレート研究ラボ 主任研究員
5. 普通会員 工博 (独)産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門 爆発利用環境安全研究グループ長
6. 普通会員 工博 (独)産業技術総合研究所 メタンハイドレート研究ラボ 招聘研究員
7. 普通会員 工博 (独)産業技術総合研究所 メタンハイドレート研究ラボ 主幹研究員
8. 普通会員 工博 東京大学教授 工学系研究科 地球システム工学専攻 [著者連絡先] FAX: 029-861-8708

E-mail: miyazaki-kuniyuki@aist.go.jp

キーワード: メタンハイドレート, 三軸圧縮試験, 応力-ひずみ曲線, 強度, ひずみ速度, 時間依存性

メタンハイドレート (Methane Hydrate, 以下, MH) は, 低温・高圧条件下で安定な包接化合物であり, 水分子が形成するケージ内にメタン分子を取り込んだ固体結晶である。近年, 極地方では永久凍土層において, また大水深海域では海洋堆積層において, 多量の天然 MH の存在が確認されており¹⁻³⁾, 次世代のエネルギー資源として注目されている。エネルギー資源の乏しい我が国の周辺海域においても, 日本の天然ガス年間消費量の約 100 倍に相当する天然 MH が賦存していると試算されており^{4,5)}, 国産のエネルギー資源として期待が高まりつつある。

安定して継続的に MH の生産を行うためには, メタンガスの産出挙動を予測する数値シミュレータの開発が必要である。MH の生産方法として, 現在, 提案されているのは, MH の胚胎している堆積層 (以下, MH 層) まで坑井を掘削し, 熱刺激法, 減圧法,

Fig.1 Illustration of experimental apparatus.

インヒビター圧入法などにより、原位置において MH をメタンガスと水に分解し、メタンガスを回収する方法である。その場合、MH 層の孔隙内に固体として存在する MH の分解によって、熱の移動や骨格構造の変化、間隙流体の移動など、複雑な物理現象が生じると考えられる。このような現象は堆積層の力学特性や有効応力の変化を伴うため、圧密などの地盤変形が生じ、生産性に影響をおよぼす可能性がある。この点を考慮することは、MH の生産性予測に特有の課題といえ、従来、石油・天然ガスや地熱の分野で使用されている貯留層シミュレータでは、生産に伴う貯留層の力学的な変形挙動については考慮しないのが普通である。従って、既往の貯留層シミュレータを MH の生産性予測に応用するためには、MH 層の力学挙動を評価するサブプログラムを開発し、数値シミュレータに組み込む必要がある。

MH 層の力学挙動を評価する上で第一に重要なのは、基本的な力学パラメータを求めることである。これまで MH ないしその代替材料として水を含む砂試料の三軸圧縮試験がおこなわれ、強度や弾性係数が求められてきた⁶⁻¹⁰⁾。しかし、これらはほとんどが同じひずみ速度 (0.1%/min) でおこなわれたものであり、三軸圧縮特性におよぼすひずみ速度の影響について検討した例は少ない。例えば、西尾ら¹¹⁾は、MH を含む堆積物を模擬した氷と砂の混合試料を用いて三軸圧縮試験を行い、強度がひずみ速度の影響を受けることを示したが、MH を含む砂試料に関しては未だ明らかでない。材料がひずみ速度依存性を持つことは、粘弾性的性質 (時間依存性) を有することを意味し、その程度を把握することは地盤の長期的な安定性を評価する上で重要な事項のひとつである。従って、MH の生産が長期におよび、例えば 10 年以上の MH 層の力学挙動を評価する必要性が生じた場合、その時間依存性挙動に対して十分配慮すべきである。

本研究では、MH を含む砂試料の三軸圧縮試験をおこない、力学特性を取得するとともに、特に、ひずみ速度が強度におよぼす影響を調べることを目的とした。本研究の特徴は以下の 3 点である。

(1) MH 層のコアは容易には採取できないため、三軸圧縮試験には氷あるいは人工的に生成した MH を含む砂試料を供することが多い^{6-8,10,11)}。本研究では、三軸ベッセル内において供試体の温度・圧力を制御し、不飽和状態の砂試料中にメタンガスを浸透させることにより、孔隙内に MH を生成させた供試体を使用した⁸⁾。

(2) MH を含む砂試料の三軸圧縮特性におよぼすひずみ速度の影

響は、MH 層の長期的な力学挙動と密接な関係があるが、これに関する知見は現在のところほとんどない。本研究では、定ひずみ速度 0.1%/min, 0.05%/min および 0.01%/min の条件下において、MH を含む砂試料と MH を含まない飽和砂試料の三軸圧縮試験をおこない、そのひずみ速度依存性に関して検討した。

(3) 定ひずみ速度試験により強度のひずみ速度依存性を調べるためには多くの時間と労力を要する。本研究では、MH を含む砂試料と MH を含まない飽和砂試料に対して、载荷中にひずみ速度を切替える試験方法¹²⁻¹⁹⁾を適用した。これにより、簡単な試験条件の検討をおこなった上で、強度のひずみ速度依存性を評価し、氷や MH、凍結砂などの既往の研究と比較した。

2. 試験方法

2・1 砂試料の作製

天然 MH は堆積層中の孔隙内に存在する。本研究では、豊浦標準砂 (主成分 SiO_2 , 平均粒径 $200 \times 10^{-6} \text{ m}$ 程度) を用いて円柱形の試料 (以下、砂試料) を作製し、その孔隙内に MH を人工的に生成させたものを三軸圧縮試験に供した。砂試料の作製手順は以下の通りである。まず、内径 50mm, 高さ 100mm の型枠に振動を与えながら、豊浦標準砂を水中落下させ、締め固めた。型枠を飽和砂で充填した後、ハンドポンプによる排水を行い、飽和度が所定の値となるように含水量を調整した。このときの飽和度により、供試体中に MH を生成させたときの MH 飽和率 (孔隙内に占める MH の体積比率) がおおそ決定される。砂試料を载荷装置に設置する際のハンドリングを容易にするため、不飽和状態の砂試料をキャッピングし、258K (-15°C) の冷凍庫にて 1 ~ 2 日保存して凍結させた。砂試料の孔隙率は 37.2 ~ 38.2% であった。

2・2 試験装置と MH の生成

本研究で使用した三軸圧縮载荷装置の概略図を Fig. 1 に示す。この装置の最大軸荷重は 200kN, 最大側圧 (三軸ベッセル内を循環する側液の圧力) は 20MPa, 最大背圧 (図中の Pressure gauge で測定される間隙水圧) は 20MPa である。供試体の温度は、三軸ベッセル内を循環する側液の温度を制御することにより、ほぼ一定 ($\pm 0.5\text{K}$) に保つことができる。制御可能な側液温度の範囲は 243 ~ 293K ($-30 \sim +20^\circ\text{C}$) である。本研究では、側液として濃度 50% のエチレングリコールを使用した。なお、この装置を用いて一連の作業、すなわち、砂試料中における MH の生成、供試体内に残存するガスの水置換、ひずみ速度制御による三軸圧縮試験、载荷終了後の MH の分解および排出メタンガス量の測定をおこなった。

MH の生成と供試体の水置換は以下の手順にておこなった。まず、ペDESTAL, キャップおよび凍結した砂試料をゴムスリーブで被覆し、Fig. 1 に示すように三軸ベッセル中央部分に設置した。次に、ベッセル内に側液を循環させ、側圧 1MPa, 供試体温度 278K (5°C) に保ったまま、砂試料下端よりメタンガスを浸透させ、孔隙内の空気を置換した。続いて、間隙ガス圧と側圧を 0.5 ~ 1.0MPa/min の速さで同時に昇圧し、それぞれ 8MPa と 9MPa とした。その後、24 時間経過するまで間隙ガス圧、側圧および供試体温度を一定に保ち、砂試料中に MH を生成させた。MH の生成後、供試体下端より水を圧入し、孔隙内に残存するメタンガスを水で置換した。このようにして、MH を含む砂の供試体 (以下、MH 含有砂供試体, hydrate-sand specimen) を作製した。本研究では、比較のため、MH を生成させずに砂試料を水で飽和した供試体 (以下、飽和砂供試体, saturated-sand specimen) についても三軸圧縮試験をおこなった。飽和砂供試体を作製する場合には、側圧

Fig.2 Stress-strain curve in constant strain rate test.

Fig.3 Strain rate dependency of strength measured in constant strain rate test.

1MPa, 供試体温度 278K (5℃) において供試体の水飽和をおこなった後に、背圧 (間隙水圧) と側圧をそれぞれ 8MPa と 9MPa に昇圧した。

2・3 载荷条件

三軸圧縮試験では、天然 MH を含む堆積層の応力状態などを考慮し、背圧 8MPa, 側圧 9MPa, 供試体温度 278K (5℃) で一定に保ち、両端排水条件下にて、軸変位制御により载荷した。軸荷重はロードセル、軸変位は LVDT で測定した。MH 含有砂供試体の三軸圧縮試験後には、間隙圧を減じて孔隙内の MH を分解させ、メタンガスを回収した。メタンガスの総回収量および MH の密度 0.913g/cm^3 を用いて、供試体内に存在していた MH の体積を算出し、これをもとに供試体の MH 飽和率を求めた。

3. 定ひずみ速度試験の結果

本章では、定ひずみ速度制御でおこなった三軸圧縮試験の結果を述べる。試験より得られた応力-ひずみ曲線を Fig. 2 に示した。Fig. 2 (a) ~ (c) は、それぞれひずみ速度 0.1%/min, 0.05%/min, 0.01%/min の結果であり、飽和砂供試体と MH 含有砂供試体の結果を 3 本ずつ示した。なお、MH 含有砂供試体では、供試体ごとに異なる MH 飽和率を有し、35 ~ 45% の間で分布している。Fig. 2 (a) に示した飽和砂供試体の応力-ひずみ曲線を見ると、はじめ応力はひずみとともに増加するが、曲線の傾きは次第に減少していく。ひずみ 6 ~ 7% において最大軸差応力 (強度) 3.4 ~ 3.8MPa に達するが、ピーク付近の応力変化は小さく、曲線は横

軸とほぼ平行になる。ピーク以降、応力は徐々に減少し、ひずみ 15% において 3MPa 程度の残留強度を示している。一方、MH 含有砂供試体の結果では、飽和砂供試体と比べて、ピーク以前における曲線の傾きおよび直線性が大きく、応力がピーク値を取るときのひずみは 5% 以下である。ピークを越えた後、応力のひずみに対する減少傾向は、飽和砂供試体よりも大きい。また、強度は飽和砂供試体の 1.6 倍程度である。孔隙内に存在する MH (固相) が供試体の骨格構造の一部を成すことにより、力学特性の変化、すなわち、強度、弾性係数、ひずみ軟化傾向の程度の増大などに寄与したと考えられる。

Fig. 2 (b) は、ひずみ速度 0.05%/min における飽和砂供試体と MH 含有砂供試体の応力-ひずみ曲線である。飽和砂供試体の応力-ひずみ曲線は、ひずみ速度 0.1%/min での試験結果と類似している。ピークにおける応力 (強度) やひずみの値など、力学特性に与えるひずみ速度の影響は小さいことがわかる。一方、MH 含有砂供試体の応力-ひずみ曲線については、試験数が少ないため判断が難しいが、平均的に見ると、ひずみ速度 0.1%/min での結果と比べて、強度や弾性係数が低いように見える。

Fig. 2 (c) に示したひずみ速度 0.01%/min における応力-ひずみ曲線を Fig. 2 (a) や (b) と比較すると、飽和砂供試体については、やはり大きな変化は認められない。MH 含有砂供試体については、定性的な傾向はひずみ速度による違いはないものの、ひずみ速度 0.05%/min での結果 (Fig. 2 (b)) よりも強度が低下しており、またピーク時のひずみが増加している。

Fig. 3 は、強度とひずみ速度との関係を示したものである。図から、飽和砂供試体では、同一のひずみ速度における強度のばらつきのため、ひずみ速度依存性は見られない。MH 含有砂供試体については、図中に示したように供試体ごとにその MH 飽和率が異なるし、同程度の MH 飽和率でも強度はばらつく。しかし、全体の傾向としてはひずみ速度の増加に伴い強度の増加が見られ、少なくとも飽和砂供試体と比較すれば、ひずみ速度依存性が顕著である。このことは、砂試料中の孔隙内に MH が存在すると、時間依存性 (粘弾性的性質) が大きくなることを示唆している。

4. ひずみ速度切替え試験方法と試験結果

4・1 試験方法

MH 飽和率が強度に影響を与えることは既に報告されているが⁷⁾、MH 含有砂供試体の作製手順の制限上、等しい MH 飽和率を持った供試体を数多く作製することは容易ではない。そのため、MH 飽和率の影響も含めた形で、MH 含有砂の強度-ひずみ速度

Fig.4 Schematic stress-strain curve for alternating strain rate test.

関係を定量的に評価するには、例えば以下のような手順に従う必要がある。すなわち、まず、ある1種類のひずみ速度における強度とMH飽和率との関係を定式化する。次に、この作業を別の数種類のひずみ速度についてもおこなう。このようにして各ひずみ速度に対応した強度とMH飽和率との関係式が得られれば、計算上、任意のMH飽和率に対する各ひずみ速度での強度を求めることができる。これにより、任意のMH飽和率で、強度のひずみ速度依存性を調べることが可能となる。しかし、この手順に従うとすれば、MH飽和率とひずみ速度を変化させた定ひずみ速度試験を数多くおこない、膨大な量のデータを蓄積することが必要となる。そこで、本章では、精度の面では信頼性を欠く場合があるものの、1本の供試体のみから強度のひずみ速度依存性を調べることが可能なひずみ速度切替え試験方法とその結果について述べる。

ひずみ速度切替え試験は、载荷中、ひずみが一定量 $\Delta\epsilon$ 増すごとに、2種類のひずみ速度(C_1 と C_2 , $C_1 < C_2$)を交互に切替えることによりおこなった^{18,19)}。Fig. 4の太線は、この条件で载荷したときに得られる応力-ひずみ曲線を模式的に表したものであ

Fig.5 Stress-strain curve in alternating strain rate test for saturated-sand (Run No.1).

る。ひずみ速度を C_1 から C_2 に切替えた点(図中の○)において、応力は急増する。逆に、ひずみ速度を C_2 から C_1 に切替えた点(図中の●)において、応力は急減する。ここで、 $2 \cdot \Delta\epsilon$ ごとに得られる切替え点○および●を滑らかに繋ぐ曲線(図中の細線)を考え、それぞれをひずみ速度 C_1 および C_2 における応力-ひずみ曲線(以下、Curve 1およびCurve 2)とみなすことにより、1本の供試体から2種類のひずみ速度(C_1 および C_2)に対応する強度 σ_{C1} および σ_{C2} を得ることができる。この方法では、1本の供試体から強度のひずみ速度依存性を求めるため、特に供試体間でのばらつきが大きい試験には有効である。従って、本研究のように、供試体ごとにMH飽和率その他の影響により強度がばらつく場合には、ひずみ速度の異なる定ひずみ速度試験を数多く行うよりも、簡便かつ短期間で強度のひずみ速度依存性を評価しうる手段といえる。なお、本研究ではCurve 1とCurve 2を求める手段としてスプライン補間を用いることにする¹⁹⁾。

ひずみ速度切替え試験により、強度のひずみ速度依存性を適切に評価するためには、その試験条件の設定に際し、十分な検討が必要である。例えば、材料の時間依存性の程度を考慮して、ひずみ速度の切替え間隔 $\Delta\epsilon$ やひずみ速度 C_1 および C_2 、またそれらの相互関係を決定する必要がある¹⁹⁾。この試験条件に関する検討の意味も含め、本研究ではTable 1に示した条件でひずみ速度切替え試験をおこなった。以下では、試験結果、特に強度のひずみ速度依存性について述べる。

4・2 応力-ひずみ曲線

Fig. 5には、Table 1中のRun No.1 ($C_1 = 0.01\%/min$, $C_2 = 0.1\%/min$)

Table 1 Experimental conditions for alternating strain rate test.

Run No.	1	2	3	4	5	6	7
Specimen	Saturated-sand	Hydrate-sand	Hydrate-sand	Hydrate-sand	Hydrate-sand	Hydrate-sand	Hydrate-sand
C_1 [%/min]	0.01	0.01	0.02	0.05	0.05	0.05	0.05
C_2 [%/min]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
C_2 / C_1	10	10	5	2	2	2	2
$\Delta\epsilon$ [%]	0.5	0.25	0.25	0.25	0.5	1	2
S_h [%]*	0	35	41	48	48	34	46
σ_{C1} [MPa]	3.43	4.71	5.29	6.03	6.20	6.12	5.76
σ_{C2} [MPa]	3.50	6.10	6.41	6.58	6.78	6.64	6.17
$(\sigma_{C2} - \sigma_{C1}) / \sigma_{C1}$ [%]	2.2	30	21	9.0	9.3	8.5	7.2
m	0.009	0.112	0.119	0.125	0.127	0.118	0.101
Fig. No.	Fig.5	Fig.6 (a)	—	Fig.6 (b)	Fig.6 (c)	—	Fig.6 (d)

* S_h : Methane hydrate saturation

Fig. 6 Stress-strain curve in alternating strain rate test for hydrate-sand.

Fig. 7 Strain rate dependency of strength measured in alternating strain rate test.

min, $\Delta\epsilon = 0.5\%$ とした飽和砂供試体) の応力-ひずみ曲線を太い実線で示した。Fig. 4 を用いて説明したように、ひずみ速度の増加/減少に伴って、応力の増加/減少が見られる。図中には、ひずみ速度 C_1 および C_2 に対応する応力-ひずみ曲線 Curve 1 および Curve 2 も細い実線で示した。応力-ひずみ曲線はひずみ速度の影響を受けていることがわかる。応力の増減幅は最大で 0.1MPa であった。前章では Fig. 3 の結果に基づき、飽和砂供試体の強度はひずみ速度の影響をほとんど受けなかったとしか述べることができなかったが、これは供試体間のばらつきのため、その増加傾

向を評価し難かったことによる。これに対して Fig. 5 を用いれば、ひずみ速度に対するわずかな強度の増加傾向を評価しうる。ひずみ速度 C_1 および C_2 に対応する強度 σ_{C1} および σ_{C2} を前節の方法により求め、Table 1 に示した。強度の増加率 $(\sigma_{C2} - \sigma_{C1}) / \sigma_{C1}$ は 2.2% であった。

Fig. 6 は MH 含有砂供試体の結果である。Fig. 5 と同じく、太い実線はひずみ速度切替え試験の結果を、その他 2 本の細い実線は Curve 1 および Curve 2 をそれぞれ示す。Fig. 6 (a) は、 $C_1 = 0.01\%/min$, $C_2 = 0.1\%/min$, $\Delta\epsilon = 0.25\%$ として得られた結果であり、供試体の MH 飽和率は 35% であった (Run No.2)。ひずみ速度切替え試験の結果を見ると、Fig. 4 で説明したように、ひずみ速度の増加/減少による、応力の増加/減少が見られ、その増減幅は Fig. 5 に示した飽和砂供試体と比べて大きいのがわかる。Curve 1 と Curve 2 は、ひずみ 4 ~ 5% にてピークを迎えており、また、ピーク値はそれぞれのひずみ速度での定ひずみ速度試験から得られた強度と同程度であった。強度の増加率 $(\sigma_{C2} - \sigma_{C1}) / \sigma_{C1} = 30\%$ は、飽和砂供試体の 2.2% と比べて大きい。ただし、ピーク付近を見ると、ひずみ速度を C_2 から C_1 へ切替える点において、応力は上昇中であり、安定していないように見えるので、この条件に関しては、前節の方法で求めた Curve 2 を定ひずみ速度 C_2 における応力-ひずみ曲線とみなすことに疑問の余地がある。これは、(1) C_1 と C_2 の差が大きすぎる、(2) $\Delta\epsilon$ が小さすぎる、が主な要因と考えられる。強度のひずみ速度依存性を評価するという意味においては、ここで述べたことは影響しない可能性もあるが、より適切な試験条件の検討という意味も含めて、以下の方針

Table 2 Earlier study on strain rate dependency of strength.

Authors	Material	Loading condition	Temperature [deg C]	Strain rate [s ⁻¹]	<i>m</i>
Hawkes and Mellor (1972)	Polycrystalline ice	Uniaxial compression	-7	10 ⁻⁵ to 10 ⁻²	0.16
		Uniaxial tension	-7	10 ⁻⁵ to 10 ⁰	—
Jones (1982)	Polycrystalline ice	Triaxial compression	-11	10 ⁻⁷ to 10 ⁻¹	0.25
		Uniaxial compression	-11	10 ⁻⁷ to 10 ⁻¹	0.20
Cole (1987)	Polycrystalline ice	Uniaxial compression	-5	10 ⁻⁷ to 10 ⁻¹	0.23
Jones (1997)	Freshwater ice	Uniaxial compression	-11	10 ⁻¹ to 10 ¹	0.15
	“Baltic” sea ice	Uniaxial compression	-11	10 ⁻¹ to 10 ¹	0.19
Hyodo et al. (2005)	Compressed granular methane hydrate	Triaxial compression	-30	1.67×10 ⁻⁶ to 1.67×10 ⁻⁵	—
Parameswaran (1980)	Frozen saturated Ottawa sand	Uniaxial compression	-6	10 ⁻⁷ to 10 ⁻²	0.073
			-10	10 ⁻⁷ to 10 ⁻²	0.071
			-15	10 ⁻⁷ to 10 ⁻²	0.079
Sayles and Epanchin (1966)	Frozen saturated Ottawa sand	Uniaxial compression	-3	1.67×10 ⁻⁴ to 2×10 ⁻²	0.105
			-6.5	1.67×10 ⁻⁴ to 2×10 ⁻²	0.092
			-10	1.67×10 ⁻⁴ to 2×10 ⁻²	0.094
Sayles (1974)	Frozen saturated Ottawa sand	Triaxial compression	-3.85	1.67×10 ⁻⁵ to 1.67×10 ⁻²	0.1
Parameswaran and Jones (1981)	Frozen saturated Ottawa sand	Triaxial compression	-12	10 ⁻⁵ to 10 ⁻²	0.08
Parameswaran et al. (1989)	Frozen sand containing THF hydrate	Uniaxial compression	-6	10 ⁻⁶ to 10 ⁻³	0.010

で試験条件を変更し、吟味することにした。まず、ひずみ速度の変化率 C_2 / C_1 を小さく設定して試験をおこなった (Run No.3, 4)。次いで、ひずみ速度の切替え間隔 $\Delta\epsilon$ を大きく設定して試験をおこなった (Run No.5-7)。以下、その結果の一例を示す。

ひずみ速度の変化率 C_2 / C_1 を小さく設定した例として、Run No.4 の結果を Fig. 6 (b) に示す。この試験では $C_2 / C_1 = 2$ であり、 $C_2 / C_1 = 10$ とした Run No.2 (Fig. 6 (a)) よりも、ひずみ速度切替え点直前における応力の変動は小さくなり、この点から判断すれば改善されているように見える。Run No.2 と比べ C_2 / C_1 が小さくなっている分、強度の増加率は 9% と小さかった。

次に、 C_2 / C_1 は Run No.4 と同じく 2 としたまま、 $\Delta\epsilon$ を大きくした例を示す。Run No.5 の結果を示した Fig. 6 (c) を見ると、 $\Delta\epsilon$ を 0.25% とした場合 (Run No.4) よりも、ひずみ速度切替え点直前における応力の変動がさらに小さくなっている。ひずみ速度切替え点を補間して得られた 2 曲線のピークから、強度の増加率を求めると、Run No.4 とほぼ等しい 9% を得た。

Fig. 6 (d) は、 $C_2 / C_1 = 2$ としたまま、 $\Delta\epsilon = 2\%$ (Run No.7) とした結果である。 $\Delta\epsilon$ を大きくすると、補間に用いるデータ点数が少なくなるため、Curve 1 や Curve 2 の信頼性を欠くことになる。実際、Fig. 6 (d) に示した例でひずみ速度切替え点をもとにスプライン補間をおこなうと、これまで示してきた応力-ひずみ曲線とは全く異なる形状の曲線が得られる。そこで、破線で囲んだ部分を拡大したところ、図中のカット図に示すように、応力-ひずみ曲線がほぼ横軸と平行になっている部分が、両方のひずみ速度において見られたので、このときの応力を各ひずみ速度での強度とみなし、Table 1 に示した。強度の増加率は 7% であり、同一の $C_2 / C_1 = 2$ でおこなった Run No.4 ~ 6 よりも小さかった。

4・3 強度のひずみ速度依存性

Fig. 7 は、ひずみ速度切替え試験の結果より得られた強度とひずみ速度との関係を両対数グラフ上に示したものである。1 本の供試体から得られた 2 種類のひずみ速度での強度を破線ないし実線で結んである。

既に述べたように、飽和砂供試体の強度はひずみ速度の影響をほとんど受けず、ひずみ速度が 10 倍になった場合の強度の増加率は 2.2% である。強度のひずみ速度依存性を評価するのに、強度がひずみ速度の m 乗に比例するという仮定を設けて近似することが多い。この仮定を設けると、飽和砂供試体では、 $m = 0.009$ となった。

MH 含有砂供試体では、Table 1 に示したように、供試体ごとに MH 飽和率や試験条件が異なっているものの、いずれも両対数グラフ上で飽和砂供試体よりも大きな傾きを示した。細かく見ると、 C_2 / C_1 が同じもの同士で比べた場合 ($C_2 / C_1 = 2$)、 $\Delta\epsilon$ を大きくするほど強度のひずみ速度依存性 (グラフの傾き m) は低下する傾向があるが、図示した Run No.2 ~ 7 の結果では、いずれも $m = 0.10 \sim 0.13$ の範囲に含まれていた。

ひずみ速度切替え試験を実施するに当たって、適切な試験条件の選定は重要な事項の 1 つである。本研究では、まず Table 1 に示す条件で検討をおこなった。この範囲では、強度はひずみ速度の 0.10 ~ 0.13 乗に比例する結果となり、強度のひずみ速度依存性を評価するには、試験条件による違いはほとんどなかった。ただし、 $\Delta\epsilon$ が小さすぎると速いひずみ速度 C_2 での応力の変動が大きくなり、逆に $\Delta\epsilon$ が大きすぎると Curve 1 や Curve 2 を得る手段としてスプライン補間など簡単な操作は採用しにくいことがわかった。このことから、 $\Delta\epsilon$ には適切な範囲があるようであり、今後、より正確に強度のひずみ速度依存性を評価するためには、試験条件についてさらなる検討が必要である。

5. ひずみ速度依存性に関する考察

時間依存性 (粘弾性的性質) を持つ材料は、応力を長期間にわたって受け続けると変形が徐々に大きくなる。従って、MH の生産が長期におよぶ場合を想定すると、MH 層の時間依存性を考慮した力学挙動の評価をおこなうことが望ましい。そのためには、MH を含む堆積物の時間依存性についてできる限り把握しておく必要がある。材料の時間依存性の程度は、ひずみ速度依存性を調

べることでわかるが、MH 含有砂のひずみ速度依存性はこれまでほとんど知られていなかった。以下、本研究により得られた飽和砂供試体および MH 含有砂供試体の強度のひずみ速度依存性について考察する。

飽和砂供試体の強度はひずみ速度の影響をほとんど受けず、本研究では、ひずみ速度を 10 倍にした場合の強度の増加率は 2.2% であった。これは、岩石^{13,18-20)}やモルタル²¹⁾と比べて弱い時間依存性といえ、また石炭²²⁾と比べると同等かそれ以上の時間依存性を有することを意味する。一方、MH 含有砂供試体の強度はひずみ速度依存性が大きく、強度はひずみ速度の 0.10 ~ 0.13 乗に比例した。これは、ひずみ速度が 10 倍になると、強度が 30% 前後増加することに相当し、岩石やモルタルよりも、かなり大きな時間依存性挙動を示した。砂試料中の孔隙内に、MH を生成させた場合と生成させなかった場合とで、供試体の時間依存性挙動にこのような大きな違いが生じることを示したのは、本研究の成果の 1 つである。MH 含有砂の破壊機構は必ずしも明らかではないが、孔隙内の MH が少なからず関与している可能性が高いと考える。また、MH 含有砂の時間依存性が大きいことは、MH 生産中において、MH 層の経時的な変形に対して十分な配慮を要することを意味し、今後、MH を含む堆積物の力学モデルの構築を進める上で重要な知見である。

Table 2 は、これまでに研究例の少ない MH のほか、その力学特性が MH に類似しているとされる氷、さらには MH と砂ないし氷と砂の混合物について、その強度のひずみ速度依存性に関する既往の研究をまとめたものである。以下ではこれらの研究について、可能な範囲で本研究との比較をおこなう。

氷の強度のひずみ速度依存性に関しては数多くの研究がある。Hawkes and Mellor²³⁾は、氷の力学試験方法について詳細な検討をおこなった上で、ダンベル型の供試体を用いた一軸引張および一軸圧縮試験方法を開発し、強度のひずみ速度依存性について調べた。一軸引張試験は、5 桁以上におよぶひずみ速度でおこなっており、ひずみ速度 10^{-4} /s から 10^{-2} /s の範囲で一軸引張強度が最大となるなどの結果を得ている。また、一軸圧縮強度のひずみ速度依存性は一軸引張強度よりも顕著であり、ひずみ速度 3 桁 (10^{-5} /s から 10^{-2} /s) の増加に対して約 3 倍になったとしている。この値を用いると、ひずみ速度が 10 倍になった場合の強度は約 40 ~ 50% 増加することになり、強度がひずみ速度の m 乗に比例するとしたときの m は、 $m = 0.16$ となる。

その後の研究²⁴⁻²⁶⁾によって、次のようなことが明らかになってきた。すなわち、氷の圧縮応力下における破壊挙動は、ひずみ速度 10^{-4} /s から 10^{-3} /s 付近を境にして、それ以下のひずみ速度では延性破壊を示し、逆にそれ以上のひずみ速度ではぜい性破壊を示す。また、一軸圧縮強度はひずみ速度の増加に対して、延性破壊を示す範囲では増加し、ぜい性破壊を示す範囲では減少する傾向がある。延性破壊を示す範囲について、Jones²⁴⁾と Cole²⁵⁾は、それぞれ前述の m の逆数 $1/m$ に当たるパラメータを求めている。Table 2 に示した m の値はこれらをもとに算出したものである。この値を用いると、ひずみ速度が 10 倍になると、強度は 1.5 ~ 2 倍程度に増加することになる。比較的速いひずみ速度での研究例は少ないが、Jones²⁷⁾は、ひずみ速度 10^{-1} /s から 10^1 /s での淡水氷と海水氷の一軸圧縮試験の結果、強度がひずみ速度に対して増加する傾向を示したとしている。なお、どのようにき裂が発生・進展したかは観察できなかったとしている。前述の m の値として、淡水氷では $m = 0.15$ 、海水氷では $m = 0.19$ を与えている。これらは、ひずみ速度が 10 倍になった場合の強度増加率に換算すると、それぞれ 41% と 55% となる。以上のように、氷の一軸圧縮強度

のひずみ速度依存性は、岩石やモルタルと比べてかなり大きいといえる。

一方、MH の強度のひずみ速度依存性については研究例が少ない。Hyodo et al.²⁸⁾は、粒状 MH を締め固めて作製した MH の強度におよぼすひずみ速度の影響を調べた。拘束圧 8 MPa、温度 -30°C 、ひずみ速度 1.0%/min と 0.1%/min でおこなった応力-ひずみ曲線を得、強度のひずみ速度依存性は氷²³⁾よりも幾分か大きかったとしている。

以上の研究結果から、本研究で対象にした MH 含有砂のひずみ速度依存性は、氷や MH と比べて小さいことがわかる。次に、凍結砂（氷と砂との混合物）の強度のひずみ速度依存性を調べた既往の研究を挙げておく。

Parameswaran²⁹⁾は、温度 (-2°C , -6°C , -10°C , -15°C) とひずみ速度 (10^{-7} /s から 10^{-2} /s) を変えて凍結砂の一軸圧縮試験をおこなった。ひずみ速度が大きい場合には、ピーク以前の塑性変形が小さくなり、ぜい性破壊が生じることを指摘した。また、強度のひずみ速度依存性は温度によって異なる傾向を示しており、次のように述べている。まず、 -2°C では、ひずみ速度 10^{-5} /s 以下において、強度はひずみ速度に対し増加傾向を示し、それ以上においては強度のひずみ速度依存性は見られない。一方、より低い温度 (-6°C , -10°C , -15°C) では、ひずみ速度 10^{-7} /s から 10^{-2} /s の範囲で強度はひずみ速度とともに増加し、前述の m を求めると $m = 0.07 \sim 0.08$ であった。なお、温度によるひずみ速度依存性の傾向の違いについては、Dillon and Andersland³⁰⁾と Barnes et al.³¹⁾のクリープに関する研究から、 -2°C においては砂粒子表面にわずかに存在する疑似液体層³²⁾が、ひずみ速度依存性に対して支配的な影響を持つ可能性があるとし、また、砂粒子同士の接点での圧力増加による融点の低下が、疑似液体層の増加という意味で寄与していると説明している。

その他、Sayles and Epanchin³³⁾、Sayles³⁴⁾も温度やひずみ速度を変えた条件で凍結砂の圧縮試験をおこなっており、一軸圧縮強度については $m = 0.09 \sim 0.11$ 、三軸圧縮強度（温度 -3.75°C ）については $m = 0.1$ を与えている。三軸圧縮強度については、Parameswaran and Jones³⁵⁾も簡単な検討をおこなっている。拘束圧 5 MPa での結果から $1/m$ に当たるパラメータを 12.5 と算出しており、このことから $m = 0.08$ と計算できる。

ハイドレートを含んだ砂に関して、その強度のひずみ速度依存性を調べた研究は極めて少ない。Parameswaran et al.³⁶⁾は、テトラヒドロフラン (THF)・ハイドレートを含む凍結砂を対象に、定ひずみ速度下での一軸圧縮試験を 10 本おこない、強度のひずみ速度依存性を調べた。その結果、 $m = 0.010$ を得ており、前述のハイドレートを含まない凍結砂に対して求めた $m = 0.07 \sim 0.08$ よりもかなり小さいとしている。

以上、凍結砂の圧縮強度のひずみ速度依存性は、条件によって違いはあるものの、多くの場合、 m の値で 0.1 前後を示すようである。このことから、凍結砂の時間依存性の程度は、前述の氷や MH よりも小さく、また、本研究の MH 含有砂と同程度といえる。しかし、THF・ハイドレートを含んだ凍結砂³⁶⁾に関しては、本研究よりも小さなひずみ速度依存性を示している。今後、MH 含有砂のひずみ速度依存性に関して十分なデータを蓄積し、検討を進める必要があると考える。

6. まとめと今後の課題

本研究により得られた成果を整理すると以下のようになる。

(1) 飽和砂供試体およびガス浸透法により作製した MH 含有砂供試体を対象にして、ひずみ速度制御による三軸圧縮特性を取得した。

(2) 飽和砂供試体の力学特性におよぼすひずみ速度の影響はほとんど認められなかったが、MH 含有砂供試体の場合には、強度のひずみ速度依存性が大きいことを示した。

(3) MH 含有砂供試体に対しひずみ速度切替え試験方法を適用し、強度のひずみ速度依存性を検討した。限られた本数の供試体から、できる限り多くの情報を取得することは重要であり、この試験方法は有用であると考えている。MH 含有砂の強度のひずみ速度依存性は、氷や MH よりも小さく、凍結砂と同程度であり、岩石やモルタルよりも大きいことが判明した。

今後、時間依存性も含め、MH 含有砂供試体の力学特性について、MH 飽和率や有効拘束圧の影響を調べるのが重要な課題であると考え。また、本研究で使用した砂は豊浦標準砂のみであるが、粒径など砂の特性が力学特性におよぼす影響についても調べる予定である。

本研究では、できるだけ少数の供試体から強度のひずみ速度依存性を求める実験手法を確立することが望ましいと考え、ひずみ速度切替え試験を実施し、強度のひずみ速度依存性を求めた。しかしながら、試験条件の設定に関しては最低限の検討しかおこなわなかった。例えば、Hashiba et al.¹⁹⁾ は、数種類の岩石についてひずみ速度切り替え試験における試験条件の比較・検討をおこない、強度のひずみ速度依存性を評価するのに適切な条件の範囲が存在することを示し、その範囲は対象とする岩石の時間依存性の程度によって異なるとしている。MH 含有砂供試体の時間依存性の程度は岩石に比べて大きいので、試験条件に関して今後も慎重に検討を進めていく必要がある。

岩石の時間依存性挙動を考慮した力学モデルの 1 つに、コンプライアンス可変型構成方程式³⁷⁻⁴¹⁾がある。この力学モデルはクリープなどさまざまな長期力学挙動の再現が可能であり、MH 層への適用性について十分検討に値するものと考えている。コンプライアンス可変型構成方程式を適用する場合には、実験によって強度のひずみ速度依存性を把握することが重要な事項の 1 つであり、ここに本研究の成果が生かされると考えている。

謝辞 本研究は、経済産業省委託研究「平成 18 年度メタンハイドレート開発促進事業（メタンハイドレート資源開発 生産手法開発に関する研究）」によるものである。ここに付記して謝意を表す。

東京大学大学院 工学系研究科 地球システム工学専攻 福井勝則准教授ならびに羽柴公博 助教には、研究を進める上で多くの議論を通じ、数々の貴重な助言をいただいた。ここに感謝の意を表す。また、独立行政法人産業技術総合研究所メタンハイドレ-

ト研究ラボ テクニカルスタッフ 大野孝雄氏、株式会社日本アクシス 永瀬茂紀氏には、室内試験の実施において多大なるご協力をいただいた。ここに感謝の意を表す。

References

- 1) K. A. Kvernolden: Chem. Geol., **71**(1988), 41-51.
- 2) K. A. Kvernolden, G. D. Ginsburg and V. A. Soloviev: **13**(1993), Geo-Mar Lett, 32-40.
- 3) Y. Okuda: Petrotech, **16**(1993), 300-306.
- 4) M. Sato and Y. Aoki: J. Jpn. Inst. Energy, **80**(2001), 973-995.
- 5) M. Sato: J. Jpn. Inst. Energy, **80**(2001), 1064-1074.
- 6) K. Aoki, Y. Ogata and Y. Jiang: Journal of MMIJ, **120**(2004), 645-652.
- 7) A. Masui, H. Haneda, Y. Ogata and K. Aoki: Proc. 15th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., (ISOPE, Seoul, 2005), pp.364-369.
- 8) A. Masui, H. Haneda, Y. Ogata and K. Aoki: Proc. MMIJ Annual Meeting (2005), Vol. I, pp.49-50.
- 9) A. Masui, H. Haneda, Y. Ogata and K. Aoki: Proc. MMIJ Annual Meeting (2006), Vol. I, pp.110-111.
- 10) T. Abe, S. Nishio, E. Ogisako, A. Denda and S. Akagawa: Proc. 40 th Jpn. National Conf. on Geotech Eng., (JGS, Hakodate, 2005), pp. 421-422.
- 11) S. Nishio, N. Wakabayashi, T. Abe, E. Ogisako, H. Hirakawa and S. Akagawa: Proc. 39th Jpn. National Conf. on Geotech. Eng., (JGS, Niigata, 2004), pp.369-370.
- 12) J. Graham, J. H. A. Grooks and A. L. Bell: Geotechnique, **33**(1983), 327-340.
- 13) S. Okubo, Y. Nishimatsu and C. He: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. **27** (1990), 559-562.
- 14) F. S. Magistis, J. Koseki, M. Amaya, S. Hayama, T. Sato and F. Tatsuoka: Geotech. Testing J., **22**(1999), 44-60.
- 15) K. Hayano, M. Matsumoto, F. Tatsuoka and J. Koseki: Soils and Foundations, **41**(2001), 21-38.
- 16) H. D. Benedetto, F. Tatsuoka and M. Ishihara: Soils and Foundations, **42**(2002), 1-22.
- 17) F. Tatsuoka, M. Ishihara, H. D. Benedetto and R. Kuwano: Soils and Foundations, **42**(2002), 103-129.
- 18) S. Okubo, K. Fukui and Y. Kimura: Tonneru-to-Chika, **33**(2002), 45-50.
- 19) K. Hashiba, S. Okubo and K. Fukui: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **43**(2006), 894-904.
- 20) S. Chu: Ph.D thesis (The University of Tokyo, 1995), Appendix 3-5.
- 21) Q. Yang, K. Fukui, S. Okubo and N. Takami: Journal of MMIJ, **113**(1997), 655-661.
- 22) S. Okubo, K. Fukui and Q. Qi: Journal of MMIJ, **118**(2002), 23-28.
- 23) I. Hawkes and M. Mellor: J. Glac., **11**(1972), 103-131.
- 24) S. J. Jones: J. Glac., **28**(1982), 171-177.
- 25) D. M. Cole: J. Glac., **33**(1987), 274-280.
- 26) E. M. Schulson: Eng. Fract. Mech., **68**(2001), 1839-1887.
- 27) S. J. Jones: J. Phys. Chem. B, **101**(1997), 6099-6101.
- 28) M. Hyodo, Y. Nakata, N. Yoshimoto and T. Ebinuma: Soils and Foundations, **45**(2005), 75-85.
- 29) V. R. Parameswaran: Can. Geotech. J., **17**(1980), 74-88.
- 30) H. B. Dillon and O. B. Andersland: Physics of Snow and Ice (1967), Vol. I, pp.313-328.
- 31) P. Barnes, D. Tabor and J. C. Walker: Proc. Royal Soc. London A324 (1971), pp.127-155.
- 32) N. A. Tsytovich: *The mechanics of frozen ground*, (McGraw-Hill Book Company, New York, 1975).
- 33) F. H. Sayles and N. V. Epanchin: *Rate of strain compression tests on frozen Ottawa sand and ice*, (U.S. Army CREEL, Tech. Note, Hanover, 1966).
- 34) F. H. Sayles: *Triaxial constant strain rate tests and triaxial creep tests on frozen Ottawa sand*, (U.S. Army CRREL, Tech. Rep. No.253, Hanover, 1974).
- 35) V. R. Parameswaran and S. J. Jones: J. Glac., **27**(1981), 147-155.
- 36) V. R. Parameswaran, M. Paradis and Y. P. Handa: Can. Geotech. J., **26**(1989), 479-483.
- 37) S. Okubo, Y. Nishimatsu and Y. Ogata: Journal of MMIJ, **102**(1987), 293-296.
- 38) S. Okubo: Journal of MMIJ, **108**(1992), 601-606.
- 39) S. Okubo and K. Fukui: Journal of MMIJ, **118**(2002), 36-42.
- 40) S. Okubo, K. Fukui and K. Hashiba: Journal of MMIJ, **118**(2002), 737-744.
- 41) S. Okubo, K. Fukui and K. Hashiba: Journal of MMIJ, **119**(2003), 541-546.