

令和元年6月18日現在

機関番号：15501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06899

研究課題名(和文) 個別要素法によるメタンハイドレート生産中の砂の変形挙動の要因の評価

研究課題名(英文) Evaluation of factors of deformation behavior of sand during methane hydrate production by discrete element method

研究代表者

梶山 慎太郎 (Kajiyama, Shintaro)

山口大学・大学院創成科学研究科・助教

研究者番号：50803532

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：メタンハイドレート(MH)を含有する砂の分解時の変形挙動を実験的、解析的に評価した。

解析面では、高いMH飽和率を持つ供試体を計算コストを下げて再現することができた。このモデルを用いて解析を行ったところ、等方圧密状態では、有効応力の増加を伴うMH粒子消去による体積ひずみの方がMH粒子を消去したのみの場合と比べて大きくなることが明らかとなった。等方圧密試験の結果から、有効応力一定下では、一定の時間経過と共に間隙比の増加量が大きくなるという時間依存性が認められた。MH含有砂の方が間隙比の増加量が大きくなり始める時間が砂のみと比べて長く、間隙比の増加量はMH含有砂の方が大きくなる傾向が認められた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタンハイドレート(以下、MH)の生産中の地盤は、土、水、MH、ガスが複雑に混在しており、安全にMHを生産するには地盤の挙動を把握することが重要である。このために、様々な生産シミュレーションが行われているが、先述の通り生産中の地盤の挙動は学術的に多分野に亘っているため、シミュレーションの開発元によって異なる特色があるものが存在している。本研究では、変形挙動に着目し、その要因をいくつかに分け、要因ごとの変形の程度を把握し、変形要因の優先順位を与えることで、生産シミュレーションを行う際に工学的意味のある範囲で要因ごとに分析する重要性、重み付けが出来る可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The deformation behavior during dissociation of methane hydrate bearing sand (MH bearing sand) was evaluated experimentally and analytically.

Analytically, it was possible to reproduce samples with high MH saturation with low computational complexity. The analysis was performed using this model. It was clear that in the isotropic consolidation state, the volumetric strain due to the MH particle elimination accompanied by the increase of the effective stress is larger than that in the case where only the MH particle is eliminated.

From the results of the isotropic compression test, it became clear that under a constant effective stress, there was time dependency of the increment of the void ratio to become large with the passage of a certain time. A longer time was required to increase the increment of the void ratio than that of the host sand and the increment of the void ratio tended to be larger in the MH bearing sand than that of host sand.

研究分野：地盤工学

キーワード：メタンハイドレート 個別要素法

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年新エネルギーとして注目されるメタンハイドレート(以下、MH)は、深海底地盤といったような低温高压条件下で安定して存在することができる物質である。図-1にMHの安定条件を示す。日本において、研究開発が進められている南海トラフのMHは、砂泥互層の砂層の砂粒子の間(間隙)に存在する。このMHの生産方法として、MH層内の圧力をMHが分解する圧力まで下げてMHをメタンガスにする減圧法が有効な手段¹⁾とされている。MHの生産は、MHが砂の間隙中に存在するため減圧源から離れるほど圧力の伝播速度は遅くなり、MHを含む地層に応力が働き続け、クリープ変形が生じ得ることや、MH層内を減圧することによる間隙水圧の低下で砂に働く有効応力が増加し、その結果、粒子破碎が生じることが考えられる。さらに、固体として存在したMHが気化することで地層が変形し、地盤沈下や生産井の健全性の低下が懸念されている。このような背景から、地盤の変形特性を把握することは、MHの長期的生産に向けての重要な課題である。現在、MHの長期生産を行うために、地層変形シミュレータが開発されているが、MHの分解、再生成等に起因する熱-水-固体の練成解析が必要であり改良²⁾が続けられている。MH含有砂は、MHを含むことで粒子同士の固結や間隙の減少によりホスト砂の力学特性と大きく異なることから、DEM解析によるMH含有砂の微視的構造が巨視的な力学挙動へ与える影響に関する研究は行われている³⁾ものの、MHの分解中の内部構造の変化による変形に着目した研究は行われていない。

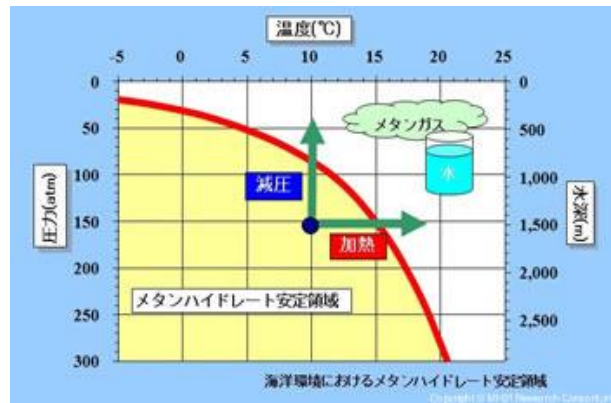


図 -1 MH の安定条件¹⁾

2. 研究の目的

MH含有砂の分解時の地盤の状態は、土、水、MH、メタンガスから成り、非常に複雑な状態である。また、分解時にはMHの分解や有効応力の増加によって地盤の体積が変化する。そこで本研究では、MH分解実験を行い、DEMおよび圧密試験を用いて分解時に考えられる変形挙動をそれぞれの挙動を別に評価した。

3. 研究の方法

本研究では、実験的な検討には低温高压という条件下で安定して存在できるMHを砂の間隙中に生成させるために、温度および圧力を管理することができ、深海底のMH胚胎層の温度と圧力を再現可能な実験装置を用いた。MH分解実験のには、恒温高压平面ひずみ実験装置⁴⁾を用いた。実験装置は冷蔵室内に設置され、低温条件を満たすものとなっている。供試体は、高さ160mm×幅60mm×奥行き80mmの直方体である。また、実験装置の前面および背面に観察窓を有しており、観察窓と供試体の間に拘束板を設けて供試体の160mm×幅60mmの面を拘束している。MH含有砂は、所定のMH飽和率となるようにあらかじめ含水比を調整した試料の間隙にメタンガスを圧入し間隙水をMHに置換し、MH供試体を作製した。供試体を作製は相対密度 $D_r = 90\%$ となるように作製した。供試体作製後、まず冷蔵室内の室温を5°Cの状態供試体内にメタンガスを圧入し、5MPaに達した後に圧力を保ちながら時間をかけてMHを生成させた。MH生成後通水を行い、間隙内のガスを水と置換し水飽和状態とした。その後間隙水圧を10MPaまで上昇させ、有効拘束圧 $\sigma'_c = 3\text{MPa}$ の条件下で圧密を行った。その後、せん断試験によって得られた軸差応力から、MHを含まない砂(以下、ホスト砂と示す)の軸差応力以上かつMH含有砂以下の軸差応力を与えた後、せん断応力を保持しつつ供試体上部側からのみ間隙水圧を10MPaから3MPaまで減圧を行った。減圧によって完全にMHが分解した

表-1 圧密試験条件一覧

Case No.	Name of Host material	Degree of Saturation by MH [*] S _{MH} (%)	Effective Confining Pressure σ'_c (MPa)	Cell Pressure σ_c (MPa)	Temperature T(°C)	Void ratio e	Porosity n(%)	Consolidation condition
1		0	1.0	11.0	20	0.822	45.1	3t method
2		(Host sand)	3.0	13.0	20	0.828	45.3	3t method
3			5.0	15.0	20	0.817	45.0	3t method
4	AS1	63.3	7.0	12.0		0.812	44.8	Monotonic loading
5		40.5	14.0	19.0		0.796	44.3	Incremental loading
6		47.4	1.0	11.0	5	0.828	45.3	3t method
7		48.8	3.0	13.0		0.821	45.1	3t method
8		-	5.0	15.0		0.850	45.9	3t method
9	AS2	0	3.0	3.0	20	0.771	43.5	3t method
10		(Host sand)	49.4	3.0	13.0	5	0.835	45.5

* Target Degree of Saturation by MH is 50%

後にMH生産井廃坑を想定し水圧を元の圧力まで回復させた。

DEM解析では、まずこの実験装置を用いて行ったガラスビーズ(以下、GB)せん断試験の結果をシミュレーションできる供試体の作製を行った。DEM解析では、用いる粒子の粒径比が大きい場合、時間的な計算コストが非常に高くなる。本研究を進めるにあたり、より計算コストを小さくし、かつせん断試験の結果をシミュレートできるように作製した研究成果の詳細は、事項に詳述する。この供試体を用いて、MH分解シミュレーションを行った。分解シミュレーションは、実験と同様の手順で行ったが、解析では温度を考慮していないため、MHの分解に関しては、実験の温度条件でMHが分解する圧力(図-1に示すMHの安定条件と不安定条件の境界となる圧力)まで有効応力を増加した時点で、MH分解のシミュレーションを行った。MH分解シミュレーションは、ホスト砂のピーク強度以上、MH含有砂の強度未満までせん断強度を与えた実験を模擬したケース、せん断応力を加えないケース、南海トラフの水平地盤の静止土圧係数を参考⁵⁾にして水平土圧係数 $K_h=0.60$ となる様に応力を与えたケースで解析を行った。

また、DEMによるMH分解時のクリープ挙動は計算時間の面から見たコストが高いことが明らかとなったため、恒温高压三軸圧縮試験機⁶⁾を用いて実験を行った結果から判断することとした。表-1に試験条件を示す。拘束圧は、30MPaまで負荷することが可能であり、 $\pm 0.1\text{MPa}$ の範囲で制御可能である。試料には、現在、研究開発が進められている南海トラフのMH濃集層の細粒分の少ない部分と多い部分を模擬した試料を2種類作製した(以下、細粒分含有率が少ない方をAS1、多い方をAS2と記す)。本研究で使用したMH模擬試料の粒度分布を図-3に示す。供試体作製は、目標のMH飽和率 $S_{MH}(\%)$ のMHを生成するために予め含水比を調整し、直径30mm、高さ60mmとした。試料には凍結供試体を用いた。実験手順は、まず凍結供試体を三軸セル室内に設置した後、間隙圧を4MPaまで徐々に増加させながらメタンガスを圧入し、供試体間隙内および試験機管路内をメタンガスで充満する。次に、一度温度をMHの安定境界外まで上げ、MHを分解することで、メタンガスを供試体間隙内全体に行き渡らせる。その後、三軸セル室内の温度を1°Cまで下げ、MHが安定して存在できる温度圧力条件に供試体環境を保つ。MH生成後、圧力を保ったまま管路内に残ったメタンガスを水に置換し、供試体の通水を行う。その後、試験条件の間隙圧を負荷し、試験条件まで温度を調整する。ここで、間隙圧一定のまま所定の有効応力まで圧密を行う。圧密の終了は、有効応力を上昇させるごとに1時間その有効応力を保持する段階荷重試験、所定の応力に達するまで単調に荷重し、その後段階荷重試験において、所定の有効応力と同じ有効応力となるまでに要した時間と同じ時間応力を保持した単調試験、単調に荷重後、3t法による圧密終了時間を適用して圧密を終了する3種類の実験を行った。また、いずれの実験においても目標のMH飽和率は50%である。

4. 研究成果

DEMは、不連続体に基づく解析手法である。DEMによる力、変位の計算は、各粒子間の接触モデルを考える。接触モデルの最も簡単なモデルは線形弾性ばねであり、本研究においても線形弾性ばねを採用した。本研究では粒子のばね定数を、伯野⁷⁾が提案した物体中を伝わる弾性波速度に基づいてばね定数を決める方法を用いて決定した。本研究では、要素として球要素を用いて解析を行った。そこで、砂粒子の物性値にガラスビーズの値を設定することとした。ここで、剛性 E は拘束圧によって変化する。そこで粒子のばねを決定するのに際して、粒子にかかるある応力に対して大きすぎるばね定数を設定してしまうと計算ステップを非常に小さく設定しないと粒子が飛散してしまう。一方で、応力に対して低すぎるばねを設定すると、剛性

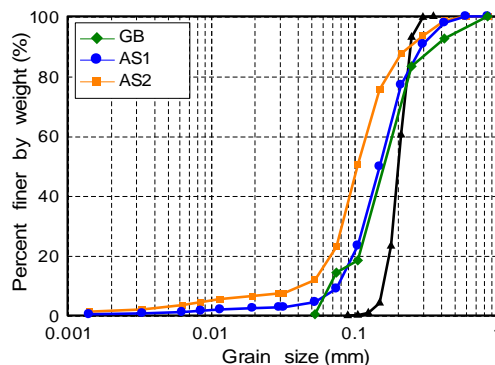


図-2 用いた試料の粒度分布

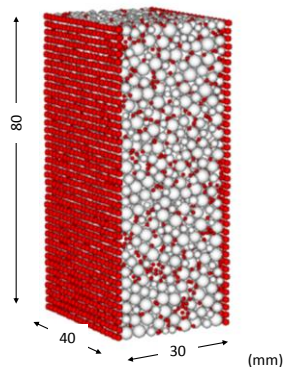


図-3 解析モデル概観

表-2 解析パラメータ一覧

	ホスト粒子	固結粒子
剛性(N/m)	$E_0 = 5.41 \times 10^7 \sigma^{0.432}$	$E_{BP} = 5.41 \times 10^7 \sigma^{0.432} + 8.5 \times 10^9$
法線方向ばね定数(N/m)	$k_n = 2/15 \pi r E_0$	$k_{bn} = 2/15 \pi r E_{BP}$
接線方向ばね定数(N/m)	$k_s = 2/15 \pi r E_0$	$k_{bs} = 2/15 \pi r E_{BP}$
コンタクトポイント	-	-
法線方向強度(N)	-	-
接線方向強度(N)	-	-
パラレルポイント	-	-
法線方向ばね定数(N/m ³)	-	$\bar{k}_n = S_n \cdot k_{bn}/A$
接線方向ばね定数(N/m ³)	-	$\bar{k}_s = S_s \cdot k_{bs}/A$
法線強度(Pa)	-	$pb_{nb} = 2.5 \times 10^6$
法線強度(Pa)	-	$pb_{sb} = 2.5 \times 10^6$
粒子間摩擦角(°)	28	28
粒径(cm)	0.1~0.2	0.08~0.09

が低下し、力学特性が実際問題と乖離するようなことが懸念される。線形弾性ばねのばね定数は、固結粒子の材料特性に直接関連付けることは容易ではないとされている⁸⁾。この線形ばねの実問題との不整合を改善するためのアプローチとして、Hertz-Mindlin ばねなどの非線形ばねの導入などが挙げられる。そこで本研究では、簡易的かつより材料特性を実問題に近づけるために、最初に低い拘束圧を与えてそれに対応する剛性 E を設定しばね定数を決定した。その後、所定の拘束圧を上昇させその拘束圧に対応する剛性 E を設定し直すことで、所定の拘束圧間を線形ばねで補完する擬似非線形ばねを用いることとした。この線形ばね係数の変化を、ガラスビーズに対して行ったせん断弾性係数と拘束圧の関係⁹⁾から定めた。この結果を用いて、式(4-14)に示すせん断弾性係数と剛性の関係から剛性 E_0 を求めた。ホスト粒子に関するパラメータとして、粒子間摩擦角については、Vinod ら(2015)が行った DEM 解析から、粒子間摩擦角 28 度と設定した。また、粒子の最小、最大粒径はそれぞれ 1 から 2mm に設定し、間隙率を $n=40\%$ となるように設定した。これら粒子を用いて $30 \times 40 \times 80\text{mm}$ の直方体の供試体を作製した。実験と同じ平面ひずみ条件でシミュレーションを行うため、 $30 \times 80\text{mm}$ の面の壁の変位を固定し、 $40 \times 80\text{mm}$ の面に粒径が 1mm の粒子を各面 800 個、総数 1600 個を規則的に配置して接点をコンタクトボンドで固結することでメンブレンを再現した。本研究に用いた供試体を図-3 に示す。このメンブレン粒子は接点のみで接触しているため、メンブレンのような自由な変形が可能となっている。また、MH の剛性を測定することは非常に困難であったため、MH と密度の近い氷の剛性を用いた¹⁰⁾。表-2 に解析に用いた供試体のパラメータを示す。また、本研究では、MH 粒子と砂粒子の粒径比が大きいため、MH 粒子を砂粒子に接触させるためには非常に計算コストが高くなることが明らかとなった。DEM では粒子数が増えると、つまり本研究では MH の飽和率が高くなるほど顕著に影響が現れる。そこで、MH 粒子に初速を与えることで粒子をすばやく移動させ、かつ砂粒子と接触した時点で速度を 0 にし、結合力を付加することで、圧密初期状態に MH 粒子に初速の影響が無くかつ MH 飽和率の高いシミュレーション供試体の計算コストを削減して作製することが出来た。図-4 に MH 粒子の結合力の分布を示す。図中の緑色の線が結合力を示している。図より、接触している MH 粒子が結合力を持っていることが分かる。

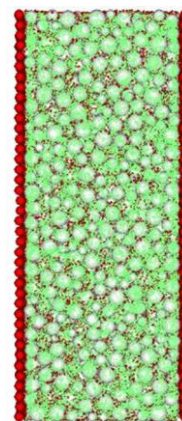


図-4 MH粒子の結合力分布

せん断試験のシミュレーション結果を図-5 に示す。図には、球形ガラスビーズを用いたせん断試験の結果も併せて示している。図より、ホスト砂では実験に比べてやや剛性は高く出ているものの、強度に関しては実験値と極めて近い挙動を示している。体積ひずみに関しては、わずかな収縮挙動を示したのちに膨張挙動へと推移しており、実験を概ねシミュレーションできている。MH 含有砂のシミュレーションでは、MH 飽和率が増加するほどに強度が増加しており、MH 含有砂のせん断試験結果と同様の傾向を示した。また、体積ひずみに関しては、固結粒状態の方が膨張挙動がホスト試料より顕著となっており、MH 胚胎砂の体積ひずみの傾向を再現できている。図-6 に Yoneda ら¹¹⁾によってまとめられた、有効拘束圧 0.5 ~ 3MPa の範囲で行われた MH 胚胎砂の力学試験から得られた MH による強度差と MH 飽和率の関係に加筆し、本解析の強度差をプロットした。図より、概ね強度差がよく一致していることが分かる。

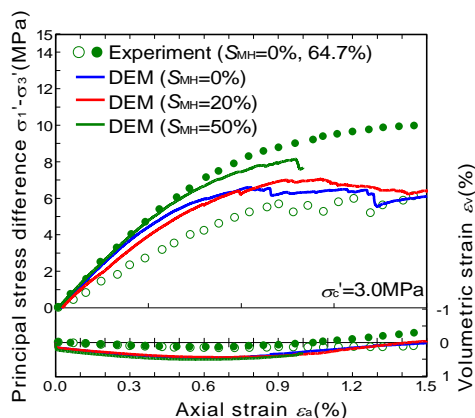


図-5 応力-ひずみ関係

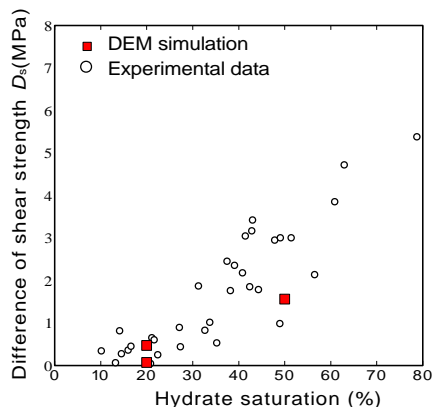


図-6 応力-ひずみ関係

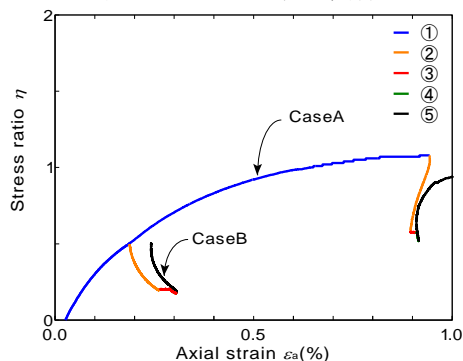


図-7 MH分解シミュレーション中の応力比-ひずみ関係

MH 分解シミュレーション中の応力比と軸ひずみを図-7 に示す。図中には、例として MH 飽

和率 20%の結果を示している。CaseA では、せん断シミュレーション結果から、軸差応力 $q=7\text{MPa}$ を与えた。この時の水平土圧係数 K_h は $K_h=0.43$ である。図中の①から⑤は、①せん断過程、②有効主応力が MH の分解圧力に相当する有効拘束圧に達するまでの過程、③固結粒子消去過程、④有効主応力が 10MPa に達するまでの過程、⑤有効主応力が減少過程をそれぞれ示している。図より、有効主応力の増加、つまり応力比の低下に伴って軸ひずみの値が減少しているが、その後固結粒子を消去すると、軸ひずみが進行していることが分かる。固結粒子を完全に消去した後に再び有効主応力を上昇させるとさらに軸ひずみが進行した。有効主応力を減少させる、つまり応力比が上昇すると、初期せん断応力と等しい軸差応力を保とうとした結果、軸ひずみが進行して供試体が破壊し、MH 分解実験と同様の結果が得られた。一方 CaseB では、応力比の低下と固結粒子の消失によって軸ひずみが進行した。その後応力比の増加とともに軸ひずみが減少したが、有効応力が 3MPa まで回復すると、それ以降は安定し軸ひずみが進行せず、 $K_h=0.60$ の条件では固結力を失っても破壊しないことが明らかとなった。MH 飽和率が 50%のシミュレーションにおいても、同様に高いせん断強度を与えた供試体は破壊し、水平土圧係数 $K_h=0.60$ では破壊が生じなかった。このシミュレーション結果から、MH の分解を、粒子の消去のみを行ったケースと有効応力の増加とともに粒子を消去したケースの分解中の体積ひずみと供試体高さの関係を求めた。例として、図-8 には供試体の圧密後からの体積ひずみと解析タイムステップの関係を示す。図から、有効応力の増加を伴う方が粒子の消去のみ行う方より体積ひずみが大きくなることが明らかとなった。また、鉛直方向の軸ひずみに着目すると、体積ひずみよりもより両シミュレーション結果の差が大きくなることが明らかとなった。分解開始時に水平方向の応力より鉛直方向に応力が高い状態で分解を行うと、等方圧密状態で分解を行うよりも、有効応力の増加の有無による体積ひずみの増加量の差が大きくなることが明らかとなった。

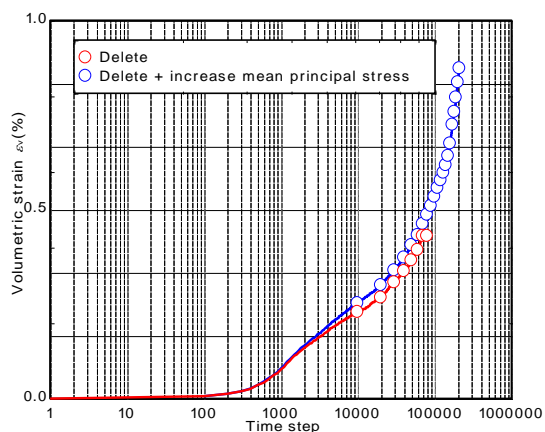


図-8 MH分解過程の違いによる供試体圧密後の体積ひずみ-タイムステップ関係

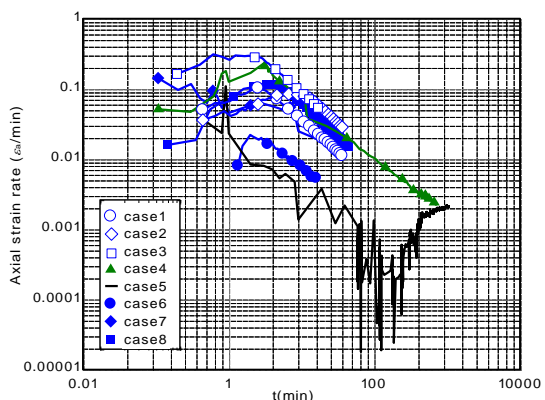


図-9 軸ひずみ速度と時間の関係

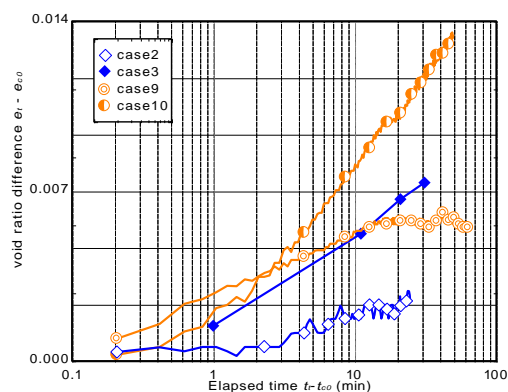


図-10 細粒分の違いによる応力保持開始時からの間隙比の変化量と時間の関係

時間依存性に関して、MH 含有砂の等方圧密試験の結果から、図-9 に示すように、いずれの有効応力においても、MH の有無にかかわらず、有効応力一定下での軸ひずみは経時変化に対して指数関数的に減少することが明らかとなった。図中の有効応力一定下において、一定の時間経過と伴に間隙比の増加量が大きくなるという時間依存性が認められた。MH 含有砂の方が間隙比の増加量が大きくなり始める時間がホスト砂と比べて長く、間隙比の増加量は MH 含有砂の方が大きくなる傾向が認められた。また、図-10 に示すように、有効応力が一定に至ってからの MH 含有砂とホスト砂の間隙比の変化量の差を比較すると、細粒分が多い方が差が大きいことが明らかとなった。

【参考文献】 1) メタンハイドレート資源開発コンソーシアム：<http://www.mh21japan.gr.jp/mh/05-2/> 2) 天満則夫他，第8回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集，pp.6-12，2015. 3) Jiang M. et al., Computers and Geotechnics, pp.122-138, 2014. 4) 梶山慎太郎他，第51回地盤工学研究発表会論文集，pp.423-424，2016. 5) 米田純他，土木学会論文集 C, 66 (4), pp.742-756. 2010. 6) Hyodo, M. et al., Soils and Foundations, 53(2), pp.299-314, 2013. 7) 伯野，森北出版株式会社，1997. 8) Catherine O., 鈴木(訳)，森北出版株式会社，2014. 9) Yang J. and Gu X. Q., Geotechnique, 63 (2), pp.165-179, 2013. 10) 田畑，低温科学 物理篇，17, pp.147-166, 1958. 11) Yoneda J. et al., Marine and Petroleum Geology, 66 (2), pp.471-486, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 1 件）

1. Shintaro Kajiyama, Masayuki Hyodo, Yukio Nakata, Norimasa Yoshimoto, Koji Nakashima and Shotaro Hiraoka : Time dependency of compression behaviour for methane hydrate bearing sand, The 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等 無し

6. 研究組織

(1) 研究分担者 無し

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者 無し

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。