

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月27日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2012

課題番号：20246080

研究課題名（和文） 深海底におけるメタンハイドレート堆積層の生産時安定性及び生産効率の評価

研究課題名（英文） Stability of methane hydrate bearing sands and efficient production method in methane hydrate exploitation from deep seabed

研究代表者

兵動 正幸 (HYODO MASAYUKI)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：40130091

研究成果の概要（和文）：深海底よりメタンハイドレート（以下：MH）生産時の地盤の安定性を評価するために供試体の観察が可能な低温高圧平面ひずみ三軸試験装置を開発し、MH 胚胎砂のせん断試験およびMH 分解実験を行った。その結果 MH 飽和率の増加による顕著な初期剛性および強度の増加が認められた。また観察窓から MH 胚胎砂のせん断帯の発生が観察された。さらに、MH 胚胎土の構成モデルを FEM 解析に取り入れ、MH 分解実験と同様の条件で解析を行い、解析結果の精度を検証した。

研究成果の概要（英文）：High pressure and low temperature plane strain testing apparatus was developed for visualizing deformation of methane hydrate bearing sand due to methane hydrate production. Using this testing apparatus, plane strain compression tests and methane hydrate dissociation test by depressurization method were performed. By using image analysis, shear band of methane hydrate bearing sand was observed. The constitutive model for MH bearing soils which was developed in the previous study was applied to FEM and was analyzed the same problem as the experiment. The analytical results had good corresponding with the experimental results.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	23,300,000	6,990,000	30,290,000
2009年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2010年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2011年度	3400000	1020000	4420000
2012年度	3,300,000	990,000	4,290,000
総計	37,400,000	11,220,000	48,620,000

研究分野：理工学

科研費の分科・細目：土木工学、地盤工学

キーワード：メタンハイドレート胚胎土，高圧，平面ひずみ三軸，局所変形，FEM 解析

1. 研究開始当初の背景

わが国では、メタンハイドレートを資源として有効利用するため、経済産業省が策定した「我が国におけるメタンハイドレート開発

計画」に基づき、「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム（MH21 研究コンソーシアム）」が組織され、賦存域や賦存量を特定する探査技術、安全かつ経済的に産出す

る生産技術，メタンハイドレート開発が海底環境へ与える影響を事前に予測・評価する技術の研究開発が進められている。MH21 研究コンソーシアムにおいても，基礎試錐で得られた不攪乱試料や模擬試料から得られた知見より，要素としての基礎的特性については，概ね明らかにされてきた。フェーズⅡでは，室内での実験的検討よりも，主に原位置でのメタンガスの生産性や地盤の安定性に着目した研究が行われていた。本申請では，生産井に影響を及ぼす要因の検討や生産時の地盤の安定性に影響する要因について明らかにすることを念頭に，メタンハイドレート堆積土の模型実験を行うこととした。

2. 研究の目的

南海トラフなどに存在しているメタンハイドレートは，写真-2.1 に示すように間隙充填型と呼ばれ，土粒子が堆積してできる間隙を埋めるように存在し，個々の土粒子をメタンハイドレートで固定するセメンテーション的な役割も担っている。メタンガスの生産方法としては，図-2.1 に示すような方法で減圧法が検討されている。本研究では，メタンハイドレートが分解されることに焦点を当て，分解されることによって地盤がどのように変形するのか，分解されたメタンガスがどのように地盤中を移動するのかを明らかにし，深海底地盤の安定性やメタンガスの生産性の評価に役立つ。このようにメタンハイドレートの生産時には地盤の変形やメタンガスの移動が，非常に重要となるため，本研究において，メタンハイドレート堆積地盤



写真-2.1 南海トラフで採取された試料

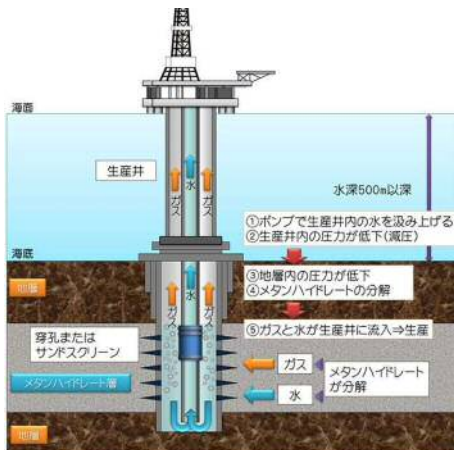


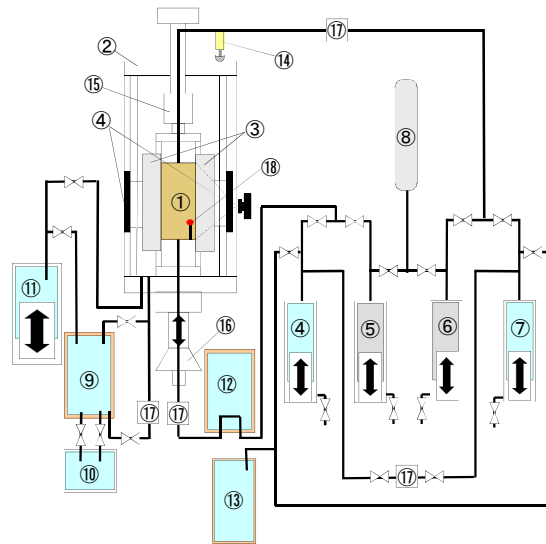
図-2.1 減圧法によるMH生産の概念

が可視化できる模型実験装置を開発することとした。開発した模型実験装置を用いて，地盤の局所的な変形やメタンガスの浸透特性について調べ，さらには，模型実験で観察された挙動を表現しうる FEM 解析コードの開発も行い，実際の生産に伴う地盤の安定性やメタンガスの生産性の評価を行うことなどを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験装置概要

図-3.1 に実験装置の配管システムをしめす。供試体①のサイズは，高さ 160mm×幅 60mm×奥行き 80mm である。圧力セル②は耐圧が 20MPa であり，セル前面と背面にそれぞれアクリル製の観察窓が取り付けられているため，供試体の撮影が可能である。供試体の観察は，デジタル一眼レフカメラを用いて，撮影したデジタル画像に対して行う。拘束板③は，厚さ 60mm のアクリル製で観察窓と一体となり中間主応力方向を拘束し，平面ひずみ状態を再現している。また，後方の窓から LED によって圧力セル内部を照らす。シリンジポンプ④，⑤，⑥，⑦は，水またはメタンガスの圧力制御及び体積変化の計測に用い，最大許容背圧は 20MPa である。側圧負荷装置⑩は，側液の圧力制御に用いられる。ロードセル⑩を用いて荷重計測を行う。このロードセルは，熱・圧力に依存しない円筒形のを圧力セル内部へ設置しており，圧力セルと軸との摩擦を考慮する必要が無い。



①供試体②圧力セル③拘束板④シリンジポンプ(下・水)⑤シリンジポンプ(下・メタン)⑥シリンジポンプ(上・メタン)⑦シリンジポンプ(上・水)⑧メタンガスポンプ⑨側液メンテナンスタンク⑩側液温度管理タンク⑪側圧負荷装置⑫背圧回路加熱チャンバー⑬予熱タンク⑭変位計⑮ロードセル⑯載荷装置⑰圧力計⑱熱電対

図-3.1 実験装置の配管システム

載荷装置(⑩)により、軸方向に下部からセルを載荷板で下させ荷重を加える。圧力計(⑪)により上・下の間隙水圧と側圧の測定を行う。供試体内におけるMH分解挙動を把握するために、供試体内に熱電対(⑫)を設置している。

(2)実験条件

図-3.2 に豊浦砂およびMH堆積層模擬試料 T_c の粒度分布を示す。図中の黄色に塗られている範囲は、MHを多量に含む地層(MH濃集層)の粒度分布である。 T_c は、MH濃集層の中でも細粒分含有率の高い地層を模擬した粒度分布である。これら試料を目標のMH飽和率 $S_{MH}(\%)$ になるように所定の含水比に調整し、湿潤突固め法により供試体を作製した。その

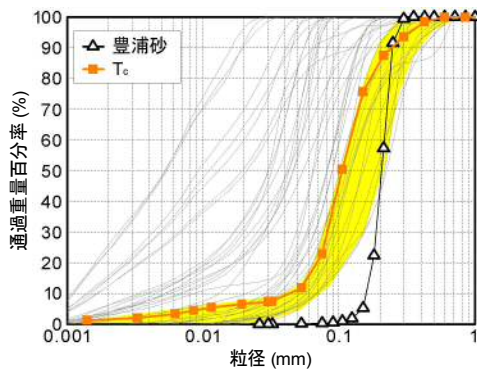


図-3.2 模擬試料の粒度分布

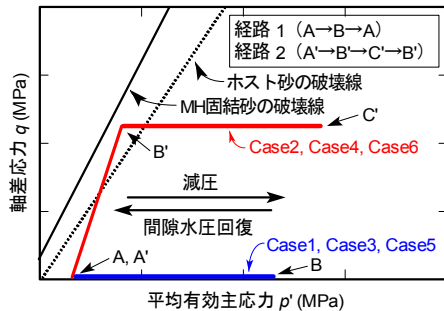


図-3.3 減圧、再加圧の有効応力経路

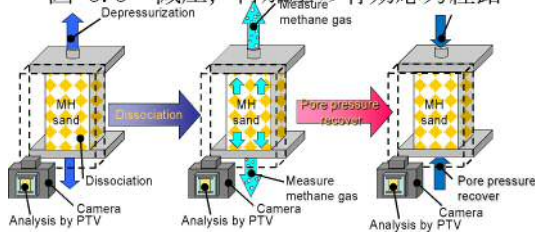


図-3.4 分解実験模式図

表-3.1 分解実験条件

試料名	豊浦砂				T_c	
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
実験名	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
有効拘束圧 σ'_c (MPa)	3					
初期せん断応力 q (MPa)	0	11.5	0	11.3	0	10.1
減圧度 (MPa)	7					
減圧方向	両側			片側		
温度 T (°C)	5					
間隙率 n (%)	39.1	39.6	39.5	39.5	39.4	39.5
MH飽和率 S_{MH} (%)	55.5	59.5	57.5	54.9	48.1	40.0

後、メタンガスを圧入し、間隙圧 5MPa、温度 5°Cの状態ではメタンガスと間隙水を反応させ、MHを生成させた。MH生成後、供試体内を水飽和させ、間隙水圧を 10MPaまで上昇させた。さらに、有効拘束圧 3MPaで圧密を行った。図-3.3に、分解実験の有効応力経路を示す。経路1は、圧密後に分解実験を行ったときの経路であり、Case1, 3, 5はこの経路1を辿る。経路2は、圧密後にせん断応力を与え、そのせん断応力を保持して分解実験を行ったときの経路であり、Case2, 4, 6はこの経路2を辿る。経路2について、供試体に与えたせん断応力は、MH固結砂のピーク強度よりも低く、ホスト砂よりも高い値である。Case 1~4は豊浦砂を、Case5, 6は T_c を対象としたものである。図-3.4に分解実験模式図を示す。図に示すように、供試体の上部と下部から、もしくは上部のみから間隙水圧を減少させることにより、供試体内のMHを分解させた。間隙圧の減圧速度は、0.5MPa/minで行った。また、間隙水圧の減圧によりMH分解が終了した後、間隙水圧を元の圧力まで増圧させた。間隙水圧の増圧速度は、減圧速度と同様に0.5MPa/minで行った。表-3.1に各実験条件を記載する。

4. 研究成果

(1)MH分解実験結果

①減圧およびMH分解過程

図-4.1, 図-4.2, 図-4.3, 図-4.4に、減圧およびMH分解過程における間隙圧 $P.P.$ 、温度 T 、メタンガス発生量 V_{gas} 及び軸ひずみ ϵ_a と時間変化を示す。圧力は、供試体上部からつながっている圧力計、温度は、供試体下部から30mmの箇所測定した値である。図-4.1に示すように、すべての実験について間隙圧を10MPaから3MPaまで減圧し、MHを水とメタンガスに分解させる。図-4.2より、減圧途中、間隙水圧がMH安定境界線上の温度5°Cに相当する圧力4.2MPaを下回ると、供試体温度の急激な減少が確認される。同時に図-4.3より、メタンガスの発生が認められることから、これはMH分解による吸熱反応によって起こったものと考えられる。また供試体温度が外部温度まで上昇した時点では、メタンガスの発生も収束している。図-4.4より、Case1, Case3, Case5では、減圧による有効応力の増加によって、軸ひずみ ϵ_a は1%程度増加している。間隙圧 $P.P.$ を3MPaまで減少させ終わると、軸ひずみの進行は収束する。一方、MH分解前に初期せん断応力を与えたCase2, Case4, Case6では、減圧による有効応力の影響を受け、Case1, Case3, Case5と同様に軸ひずみ ϵ_a は進行するが、MH分解中も、軸ひずみ ϵ_a は進行する。これは、MH分解によって供試体のMH固結力が減少したため、MH分解前に与えた

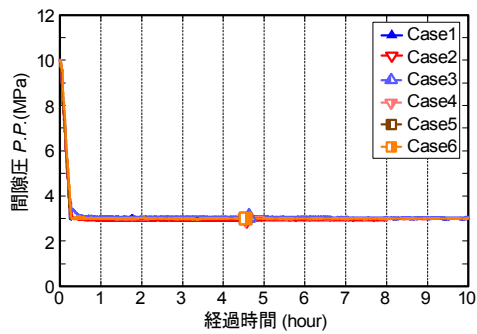


図-4.1 間隙圧の経時変化

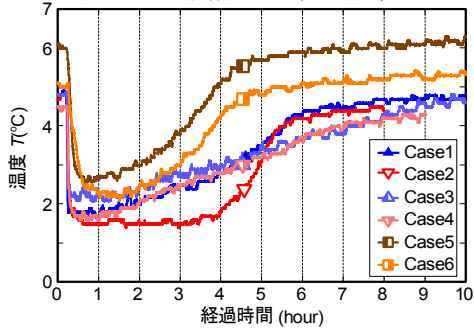


図-4.2 供試体温度の経時変化

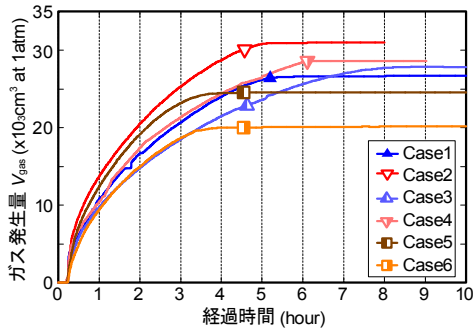


図-4.3 ガス発生量の経時変化

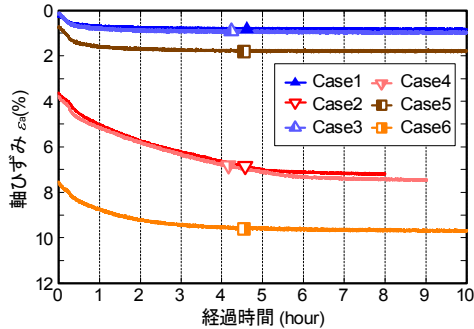


図-4.4 軸ひずみの経時変化

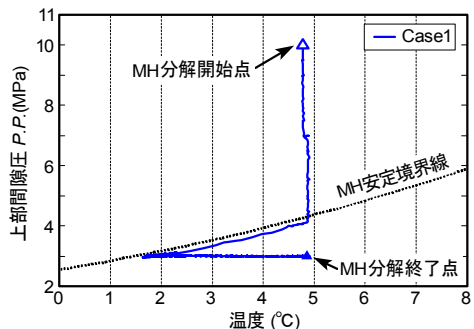


図-4.5 減圧およびMH分解過程における温度と間隙圧の変化

せん断応力が、供試体の軸ひずみを進行させ

たものと考えられる。さらにMH分解が進行し、収束に向かうと、軸ひずみの進行も収束に向かうことが確認された。図-4.5に、Case1について減圧およびMH分解過程における温度圧力関係を示す。減圧開始点から間隙圧を徐々に減少させていくと、MH安定境界線に達したところから、その線に沿って温度が減少していくことが確認される。また、間隙圧が3MPaに達すると、温度低下は1.5°C付近で一旦停止する。この減少はMHの自己保存効果によるものである。この停止時間中にMHの分解およびMH再生成が交互に行われるが、その後徐々にMH分解が進行すると考えられる。

②間隙水圧回復過程

各実験について、間隙水圧の減圧によりMH分解終了後に、間隙水圧を3MPaから10MPaまで増圧し元に戻した。この過程に取得した供試体画像からPIV解析を行った。図-4.6にCase5, Case6における各間隙水圧ごとの体積ひずみコンタ図を示す。Case5について、コンターで見た限り、間隙水圧が10MPaまで到達しても、大きな変形はなく、全体的に体積膨張を起こしている。Case6について、間隙水圧が増圧するにつれて、供試体は徐々に体積膨張を起こしながら、横方向に変形していくことがわかる。間隙水圧が10MPaまで増圧された時には、せん断試験と同様にせん断帯を形成して破壊に至る。Case6について、せん断帯付近で体積膨張を起こしており、減圧源から離れるにつれて、体積膨張量は増加

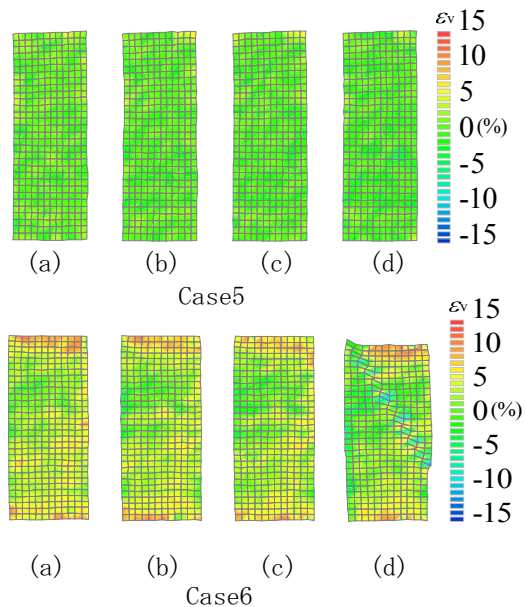


図-4.6 体積ひずみコンター

(a)間隙水圧回復前 ($P.P. = 3\text{MPa}$), (b)間隙水圧回復途中 ($P.P. = 6.5\text{MPa}$), (c)間隙水圧回復途中 ($P.P. = 8.0\text{MPa}$), (d)間隙水圧回復完了時 ($P.P. = 10\text{MPa}$)

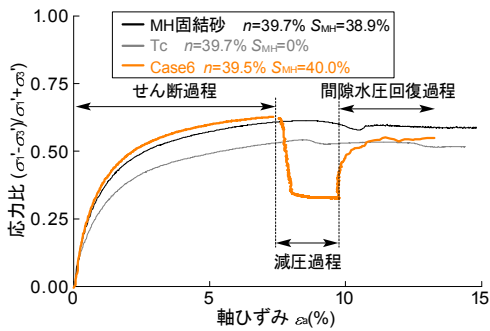


図-4.7 分解実験中の応力比と軸ひずみの関係 (Case6)

していくことがわかる。図-4.7 に Case6 についての分解実験中の応力比の変化と軸ひずみとの関係を示す。MH 砂のせん断強度は、MH の固結力によりホスト砂よりも高い。ピーク強度に達する前のせん断応力を保ち、間隙水圧の減圧を行うため、有効応力比は減少する。また有効応力の増加および MH 分解により軸ひずみは進行する。さらに、MH 分解終了後に間隙水圧を増圧させると、有効応力比の増加とともに軸ひずみも徐々に進行し、ホスト砂の強度に至った時点で破壊に至ることがわかる。つまり、図-4.7 に示すように、MH が分解され固結力を失うことにより、供試体の強度は、ホスト砂の強度まで低下する。

(2) COTHMA による FEM 解析結果

MH を含む土の力学的な研究は、著者らなどによって進められており、南海トラフより採取した不攪乱試料と、それを模擬した MH 堆積土の観察や圧縮試験から、MH は土粒子間を固結、または充填する形で存在し、MH が土の間隙を占める割合を示す MH 飽和率に応じて土の圧縮せん断強度を増加させることが明らかとなっている。本研究では、この結果に基づいて構築した MH モデルを構成式として使用している。さらに、このモデルが組み込まれた気液固相 3 相状態における多孔質媒体の応力・浸透・熱伝導を完全に連成した坑井周辺力学挙動・広域地層変形シミュレータ COTHMA を用いて、FEM 解析を行った。このシミュレータは、固相の応力つり合い式、水質量保存式、メタンガス質量保存式、ハイドレート質量保存式、氷質量保存式、エネルギー保存式を基本支配方程式とする。本研究で用いた解析メッシュを図-4.8 に示す。図のように 3 次元であり、要素数 3696、節点数 4485 である。図-4.9 に解析メッシュの y 方向断面図を示す。上下左右端および供試体前後は定温かつ y 方向変位固定である。また、供試体上部を減圧源 (黄緑色) とした。表-4.1 に解析に用いたパラメータを示す。値は既往の研究から得られたものおよび一般的な値を用いた。図-4.10 に解析結果から得られた温度の経時変化と実験結果との比較を示す。温度変化は、図-4.9 に示すような位置で計測している。図-4.10 より、解析結果と実験結果の温度変化は大方一致している。図-4.11 に

累計ガス生産量の経時変化を示す。ガスの発生初期から MH 分解が終了にかけて、ガス発生量が徐々に減少していく挙動は、実験結果とほぼ一致している。図-4.12 に軸ひずみの経時変化を示す。減圧過程を経て軸ひずみが進行する挙動は、ほぼ一致している。以上の結果から MH 堆積層の変形を考慮した浸透モデルは妥当であると判断される。

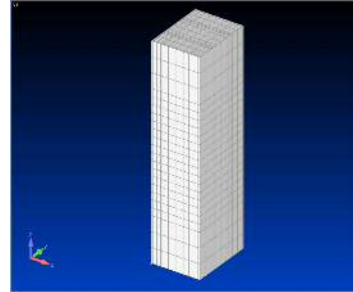


図-4.8 解析メッシュ

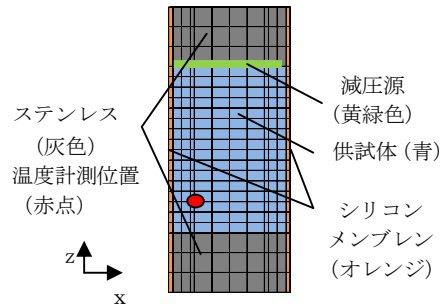


図-4.9 解析メッシュ y 方向断面図

表-4.1 解析に用いたパラメータ

FEM関連	
パラメーター	値
MH堆積層の浸透率[mD]	5000
初期孔隙率	0.4
MH飽和率	0.5
絶対浸透率低減指数	産総研式
α (Van Genuchtenモデル、毛管圧力)	5.0×10^{-4}
n (Van Genuchtenモデル、毛管圧力)	5
水相相対浸透率	$k_{r,w} = a \times (S_e)^n, a=1, n=5$
気相相対浸透率	$k_{r,g} = b \times (1-S_e)^m, b=1, m=8$
不動水飽和率	0.1
残留ガス飽和率	0.1
土粒子の密度 [kg/m ³]	2650
土粒子の比熱容量 [J/(kg·K)]	1050
土粒子の熱伝導率 [J/(m·s·K)]	2
水の密度 [kg/m ³]	1000
水の比熱容量 [J/(kg·K)]	4190
水の熱伝導率 [J/(m·s·K)]	0.586
ガスの比熱容量 [J/(kg·K)]	2100
ガスの熱伝導率 [J/(m·s·K)]	0.03
MHの密度 [kg/m ³]	913
MHの比熱容量 [J/(kg·K)]	2010
MHの熱伝導率 [J/(m·s·K)]	0.45
ステンレス密度 [kg/m ³]	7920
ステンレス比熱容量 [J/(kg·K)]	500
ステンレス熱伝導率 [J/(m·s·K)]	16
シリコンメンブレン密度 [kg/m ³]	970
シリコンメンブレン比熱容量 [J/(kg·K)]	1600
シリコンメンブレン熱伝導率 [J/(m·s·K)]	0.2
構成式関連	
土およびMH堆積土の圧縮指数 λ	0.146
土およびMH堆積土の膨潤指数 κ	0.016
土およびMH堆積土の限界応力比 M	1.2
基準平均有効主応力 p_0 [MPa]	1
基準間隙比 e_0	0.973
下負荷面パラメータ u	10
MH硬化パラメータ α	10
MH硬化パラメータ β	10
内部応力損傷パラメータ γ	20
MH固結力パラメータ ζ (MH=0.1)	0.1

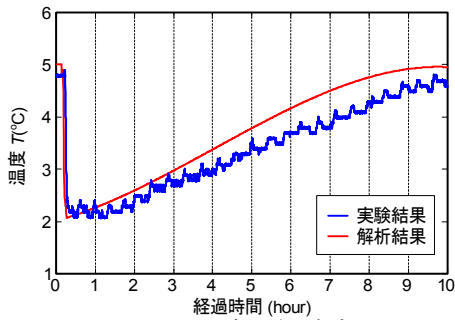


図-4.10 温度の経時変化

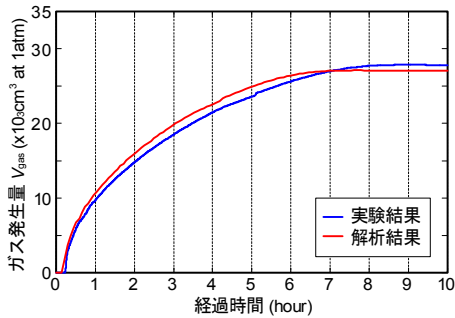


図-4.11 累積ガス生産量

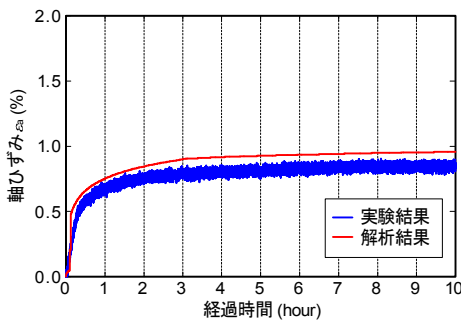


図-4.12 軸ひずみの経時変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

①Yoneda, J., Hyodo, M., Yoshimoto, N., Nakata, Y. and a Kato, A. : Localised deformation of methane hydrate-bearing sand in plain strain shear tests, *Soils and Foundations*, 査読有り, 2013, 掲載決定.

②Hyodo, M., Yoneda, J., Yoshimoto, N. and Nakata, Y. : Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed, 査読有り, *Soils and Foundations*, Vol. 53, No. 2, pp. 299-314, 2013.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.203.02.010>

③今村豊、米田純、兵動正幸、中田幸男、吉本憲正、高圧下におけるメタンハイドレート固結砂の平面ひずみせん断挙動と局所化の評価」, 地盤工学会中国支部論文報告集「地盤と建設」, 査読有り, Vol. 28, No. 1, pp. 95-104. 2011.

[学会発表] (計 12 件)

①梶山慎太郎、兵動正幸、中田幸男、吉本憲正、加藤晃、高圧平面ひずみ三軸試験によるメタンハイドレートを含む細粒分混じり砂のガス生産時の挙動と評価, 第 4 回メタンハイドレート総合シンポジウム, 査読なし, pp. 150-155, 産業技術総合研究所臨海副都心センター (東京都), 2012. 12. 13.

②加藤晃、兵動正幸、中田幸男、吉本憲正、平面ひずみ試験によるメタンハイドレートを含む砂の局所せん断変形挙動, 第 3 回メタンハイドレート総合シンポジウム, 査読なし, pp. 26-31, 産業技術総合研究所臨海副都心センター (東京都), 2011, 11. 30.

③Yoneda, J., Hyodo, M., Yoshimoto, N., Nakata, Y. and Orense, R. : Deformation of seabed due to exploitation of methane hydrate reservoir, Proc. 2nd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, 査読有り, pp. 245-250, Perth, (Australia), 2010. 11. 8.

④Yoneda, J., Hyodo, M., Yoshimoto, N., Nakata, Y. : Deformation of the seabed due to exploitation of methane hydrate reservoir, Proc. International Symposium on Geomechanics and Geotechnics, 査読有り, Vol. 2, pp. 763-767, Shanghai, (China), 2010. 10. 10.

⑤Yoneda, J., Hyodo, M., Yoshimoto, N., Nakata, Y. : Mechanical properties of methane hydrate-bearing sand and its deformation during dissociation of methane hydrate, Proc. the 4th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, 査読有り, pp. 57-62, Newcastle, (Australia), 2009. 11. 23.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

兵動 正幸 (HYODO MASAYUKI)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 40130091

(2) 研究分担者

中田幸男 (NAKATA YUKIO)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 90274183

吉本憲正 (YOSHIMOTO NOROMASA)

山口大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 00325242

鈴木素之 (SUZUKI MOTOYUKI)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 00304494

田中一宏 (TANAKA KAZUHIRO)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 30188289

(3) 連携分担者

()

研究者番号