

加熱法を用いたメタンハイドレート含有砂の分解時の圧力・温度・変形挙動

山口大学大学院 学生会員 ○藤田 一輝
山口大学大学院 正会員 吉本 憲正
山口大学大学院 正会員 中田 幸男
山口大学大学院 正会員 梶山 慎太郎
山口大学大学院 正会員 兵動 正幸

1. はじめに

近年、日本周辺海域に存在するメタンハイドレート(以下 MH と称す)が新たな天然ガス資源として期待されている。砂層型 MH の生産技術の課題として、増進回収が挙げられる。その際、加熱法と減圧法を併用する生産手法が考えられるが、既往の研究では、加熱法の研究データが少ない。MH を生産する際に加熱法を生産手法として適用する場合、地盤内で生じる現象を調査しておく必要がある。よって本研究では、MH 含有の模擬試料の加熱分解実験を実施することで、分解中の供試体内の温度・圧力挙動について調べ、MH の分解に伴う海底地盤変形を考慮するため、初期せん断応力を与えた検討も行い、分解中の供試体の変形挙動を調べることを目的とした。

2. 実験装置の概要

本研究で用いた試験機¹⁾の内部概略図を図-1 に示す。装置を恒温室内に設置し、初期温度は、室内全体の空調で管理し、セル内の温度を調整している。供試体は高さ 160mm×幅 60mm×奥行 80mm の直方体で、中間主応力面はアクリル板で拘束することにより平面ひずみ条件を確保している。圧力セル容器には厚さ 140mm、直径 75mm のアクリル製の観察窓が前後に取り付けられている。背面の観察窓付近に LED ライトを設置し、圧力セル内を照らし、デジタル一眼レフカメラを前面の観察窓に設置し、リモート制御によるタイマー撮影を行っている。取得したデジタル画像から実験中の供試体前面の観察を可能とし、これにより MH 分解実験中の変形挙動の観察を行っている。温度計測は、供試体下端から、A:30mm、B:60mm、C:120mm、D:150mm の位置で熱電対 4 本により行った。圧力測定は、供試体下部及

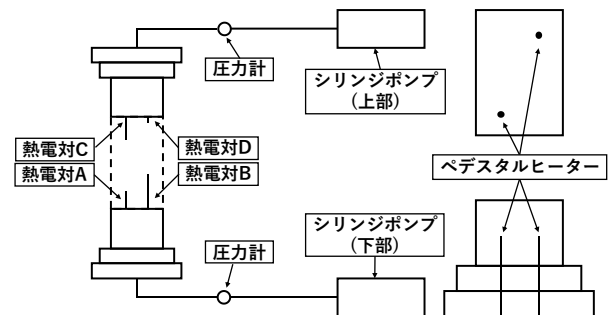


図-1 内部概略図

表-1 実験条件

	試料名	間隙率 (%)	MH 飽和率 (%)	初期せん断応力 (MPa)
Case1	Toyoura	39.2	31.9	0
Case2	T _b	40.2	36.7	0
Case3	T _c	39.7	37.7	0
Case4	Toyoura	39.9	0	0
Case5	T _b	40.5	0	0
Case6	T _c	40.2	0	0
Case7	T _c	39.8	37.7	4.140
Case8	T _c	39.5	32.3	8.554

び供試体上部で行った。加熱分解実験中は、上部シリンジポンプを用いて圧力を保持した。供試体下端より 20mm 下の位置からベDESTALヒーター 2 本により加熱することで MH の加熱分解実験を行った。

3. 用いた試料

本研究では豊浦砂、MH 濃集層を模擬した 2 つの試料(以下 T_b, T_c)を使用した²⁾。細粒分含有率は豊浦砂:Fc=0%、T_b:Fc=8.9%、T_c:Fc=22.9%であり、模擬試料においては、鉱物組成も考慮し、カオリン、雲母、8 号珪砂、

キーワード エネルギー資源、加熱法、細粒分含有率

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院創成科学研究科

T E L 0836-85-9300

7号珪砂, R5.5珪砂を配合している。

本研究では, MH 飽和率 S_{MH} (%) を次式で定義している。

$$S_{MH}(\%) = \frac{V_{MH}}{V_V} \times 100 \quad (1)$$

ここで, V_{MH} は MH の体積, V_V は間隙の体積である。

実験条件を表-1 に示す。

MH 飽和率 $S_{MH}=50(\%)$, 間隙率 $n=40(\%)$ を目標に含水比を調整し, 試料を 12 層に分けて突き固め, MH 安定境界内の温度および圧力を保つことで MH を生成させる。Case4,5,6 は MH を生成せずに加熱実験を行っている。これは試料の違いによる熱特性を把握するためである。MH 生成後, 室温を 10°C に設定する。供試体内を水で飽和し, 間隙圧 10MPa , 有効拘束圧 3MPa の等方圧密を行う。初期せん断時の応力経路を図-2 に示す。圧密後に Case7,8 は初期せん断を軸ひずみ速度 $0.1\%/min$ にて排水条件で作用させる。既往の研究より, 三軸試験条件で, ホスト砂のみの破壊線と MH を含む砂の破壊線の間までせん断することで MH 分解中に供試体にせん断破壊が生じることが明らかにされているためである³⁾。その後, 全ての Case でペDESTALヒーターを 80°C に保ちながら供試体下部からの加熱を行うことで加熱分解実験を行った。

4. 加熱法による MH 分解実験結果

MH を含まない試料(Case4,5,6)の各熱電対位置における加熱時の温度の経時変化の比較を図-3 に示す。MH を含まない場合, すべての熱電対位置における温度挙動は一様に上昇することが確認でき, 試料間に大きな温度挙動の違いは見られない。Case1,2,3 の各熱電対位置における加熱時の温度の経時変化を図-4 に示す。圧力 10MPa における MH 分解温度 13.53°C を黒実線で図中に示す。図-4 より各試料において, MH を含むことで温度が一定時間停滞または低下することが確認できる。また, MH 安定境界線付近において, 各試料の熱電対 C, D では顕著に温度停滞または低下を示すことが確認できる。この現象は MH が分解する際に生じる吸熱反応が原因と考えられる。

加熱分解実験前に生成された MH 全てが分解したメタンガス量を総メタンガス量とし, それに対する, ある時点の分解したメタンガス量の割合をメタンガスの産出率と定義する。Case1 の加熱時の上下間隙圧と産出率の

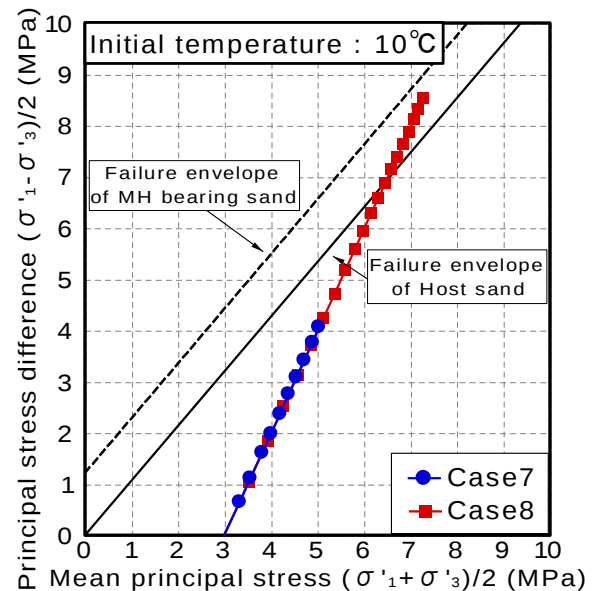


図-2 実験前の初期せん断時の応力経路

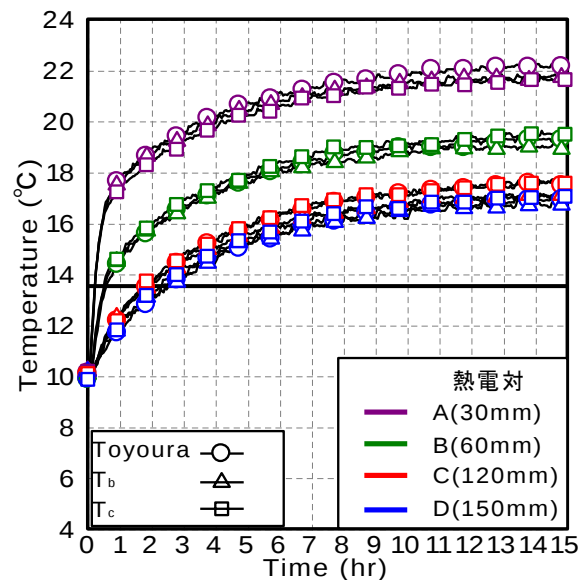


図-3 Case4,5,6 の温度の経時変化

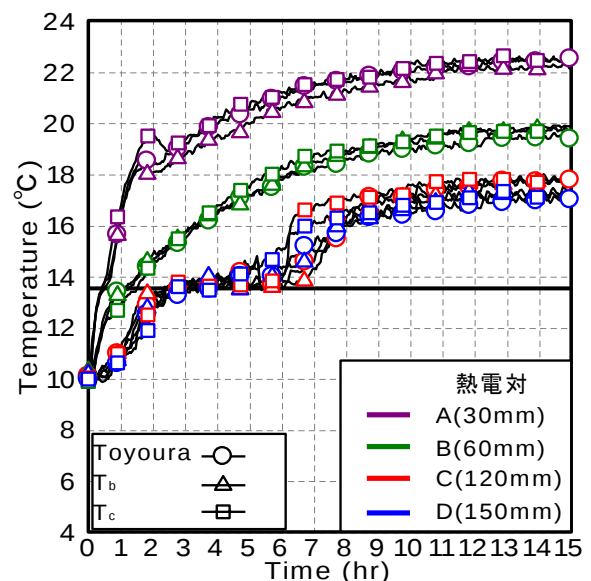


図-4 Case1,2,3 の温度の経時変化

経時変化を本研究の1例として図-5に示す。図-5より、産出率が著しく増加する瞬間と供試体下部の圧力が下がる瞬間が同時刻に観測された。MHの再生成等により間隙の連続性が失われ、差圧がついた後、再生成したMHが加熱によりMH分解温度である13.53℃以上に達することで分解し、間隙の連続性が取り戻され、供試体下部に留まっていたメタンガスが流動することにより、メタンガスの産出率が増加したものと考えられる。

Case1,2,3の産出率の経時変化から細粒分含有率の影響を把握するため、細粒分含有率に対するMHが全て分解されメタンガス産出が終了した時間と供試体下部の最大間隙圧の関係を図-6に示す。図-6より、細粒分含有率が少ないほどメタンガス産出が終了するまでに時間が掛かり、最大間隙圧が大きくなることが確認できる。

Case3,7,8の結果から初期せん断応力の違いにおいての加熱によるMH分解時の変形挙動について結果を示し、考察する。Case7,8の初期せん断から加熱終了時までの応力-ひずみ関係を図-7に示す。比較のためCase7,8と同条件であるMH飽和率0%,41.3%のせん断試験結果を併せて図-7に示す。図より、Case7はホスト砂の破壊線よりも低い最大軸差応力を与えていることが分かる。Case8はホスト砂とMHを含む砂の間の最大軸差応力を与える条件とした。これより、初期せん断応力が大きいほど軸ひずみが大きく増加していることが確認できる。Case8は軸ひずみが約13%に至るとき、せん断破壊を起こし軸差応力が急激に低下していることが確認できる。

Case7,8の加熱時の供試体の変形挙動を写真-1に示す。Case7はMHの分解が終了したと思われる約7時間後までの写真を示す。Case8はせん断破壊に至る約1.4時間後までの写真を載せている。この写真を用いて画像解析を行った。Case7,Case8の最大せん断ひずみのコンター図を図-8に示す。図よりCase7はMH分解終了時まで供試体に変化はほとんど見られず、Case8では、せん断破壊に至るとせん断帯がはっきりと形成されており、このせん断帯は主に供試体下部で生じていることが確認できる。熱電対B（供試体下端より60mm）では10MPaにおけるMH安定境界である13.53℃を約1.1hに超えており、1.4時間後まで温度停滞を示していることから熱電対Bが設置されている供試体下端より60mmの位置までMHが分解されていると推察される。

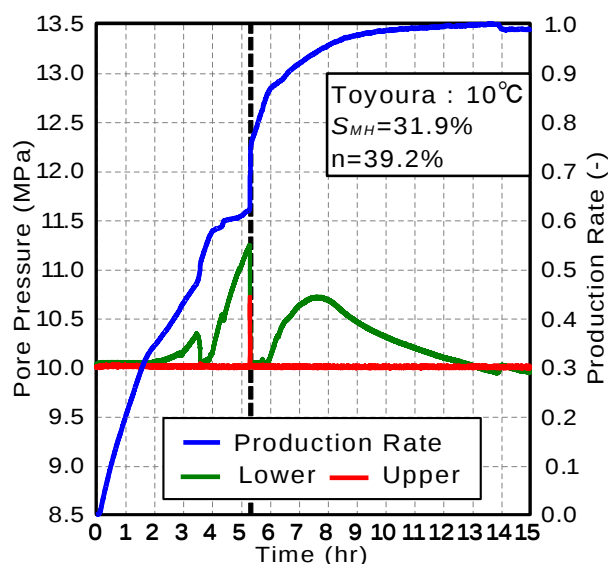


図-5 上下間隙圧と産出率の経時変化

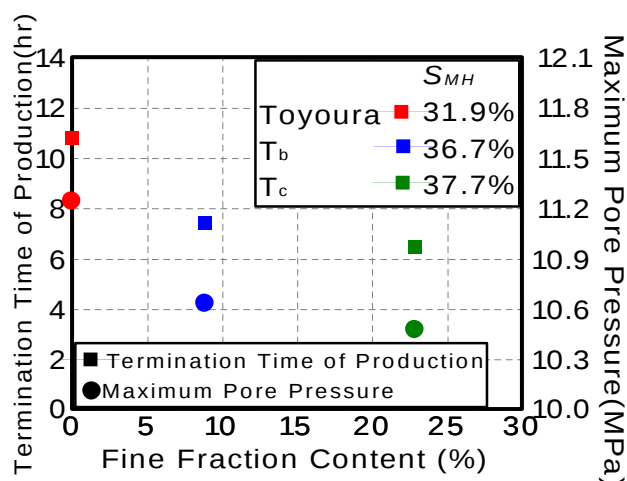


図-6 MH 分解時に関する細粒分の影響

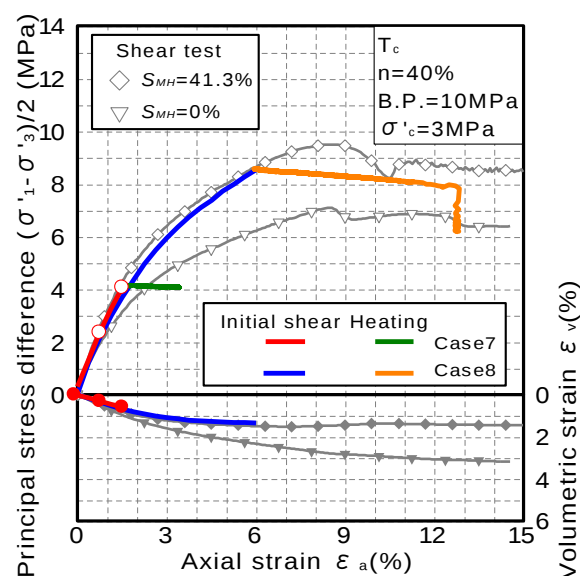


図-7 応力ひずみ関係

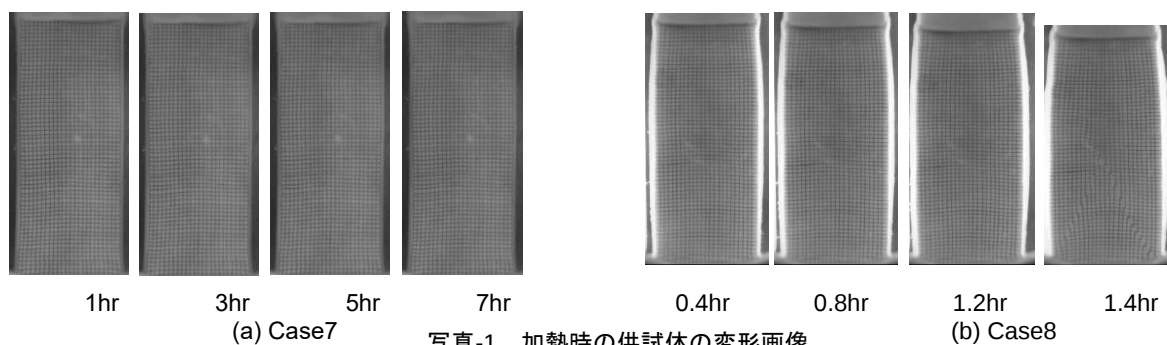


写真-1 加熱時の供試体の変形画像

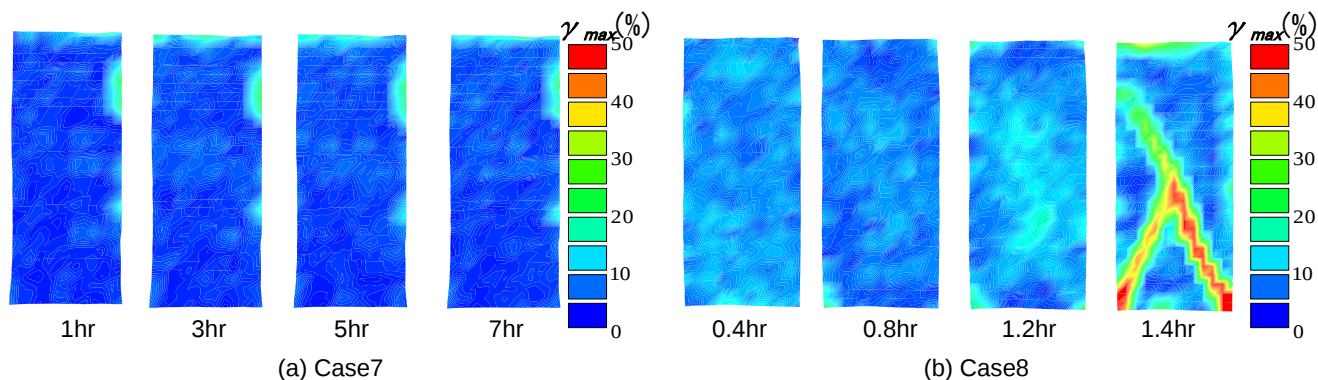


図-8 加熱時の供試体内の最大せん断ひずみ γ_{max} のコンター図

そして、加熱により MH が分解された供試体下部のみホスト砂の強度となったために、与えていた初期せん断応力に耐えられず崩壊したと考えられる。

5. まとめ

本研究では、MH 含有の模擬試料の加熱分解実験を実施することで、分解中の供試体内の温度・圧力挙動について調べ、初期せん断応力を与えた検討も行い、分解中の供試体の変形挙動を調べることを目的とした。結果として、MH を含まない場合、各試料の温度挙動に大きな差異がないことが確認された。MH を含む場合、温度挙動が変化し一定時間温度が停滞または低下する現象が確認された。供試体下部において圧力上昇がみられ、そしてその圧力の大きさは供試体を形成する細粒分含有率に依存することが確認された。この上昇した圧力が元に戻る時の時間とメタンガス産出率が急激に増加する時間が対応しており、MH の再生成や分解が示唆される。今回の実験では、メタンガス産出終了時間は細粒分含有率に依存することが確認された。変形挙動については、初期せん断応力が大きくホスト砂も破壊線を超える場合では、加熱することにより供試体下部から MH が分解されるため、供試体下部からせん断破壊に至ることが確認された。

参考文献

- 1) Jun, Y., Masayuki, H., Norimasa, Y., Yukio, N., Akira, K. : Development of high-pressure low-temperature plane strain testing apparatus for methane hydrate-bearing sand, Soils and Foundations, Vol53, No.5, pp.774-783, 2013.
- 2) 鈴木清史, 海老沼孝郎, 成田英夫, メタンハイドレートを胚胎する砂質堆積物の特徴とメタンハイドレート胚胎メカニズムへの影響, 地学雑誌 118(5), pp.899-912, 2009.
- 3) 米田純, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正 : 深海底におけるメタンハイドレート堆積土の三軸せん断特性, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.4, pp.742-756, 2010.