

加熱法におけるメタンハイドレート胚胎砂の分解時の温度および変形挙動

Temperature and Deformation Behavior of Methane Hydrate Bearing Sand
Due to Dissociation by Heating Method

朝倉さや香	Sayaka ASAKURA	(山口大学大学院理工学研究科)
吉本憲正	Norimasa YOSHIMOTO	(山口大学大学院理工学研究科)
兵動正幸	Masayuki HYODO	(山口大学大学院理工学研究科)
中田幸男	Yukio NAKATA	(山口大学大学院理工学研究科)

メタンハイドレート (Methane Hydrate : 以下 MH と略す) を生産する手法の一つとして加熱法が提唱されている。加熱法を適用して生産を行った場合に、地盤内で生じる現象を調査しておく必要がある。そこで本研究では、恒温高圧平面ひずみ型実験装置を用いて、加熱法を適用した際の MH 胚胎砂の温度および変形挙動を調査した。その結果、供試体内部は熱の移動によって加熱部から温度が上昇し、加熱時に供試体の上下に差圧を与え浸透を誘発させることで、より広範囲まで短時間で温度が上昇する。MH の分解温度まで温度上昇しない MH の安定領域では、分解域から供給されたメタンガスにより、MH が再生成することが示唆された。温度上昇に伴い MH が分解し、MH の分解に対応して供試体の変形が徐々に生じる。

キーワード: メタンハイドレート, 加熱法, 分解, 温度, 変形, 平面ひずみ (IGC : D-6,D-8,D-10)

1. はじめに

2010 年度の国産原油の生産量は、原油処理量の 1.5 日分に相当する量に過ぎず、国内で消費される石油製品需要を賄うため、我が国は原油及び石油製品のほぼ全量を海外から輸入している¹⁾。日本では、MH 資源開発に関する研究が 1995 年から始まり、1996 年に南海トラフなどの日本海域において海上地震調査が行われた。その結果、推定資源量 7.35 兆 m³ の MH 賦存の可能性があることが確認された²⁾。これは 2003 年に日本が使用した天然ガスの約 100 年分となる。このように日本の近海には MH が大量に存在しているため、MH は我が国の新たな天然ガス供給源として注目を浴びている。

ガスハイドレートは、水分子の籠と内包されるガス分子よりなるクラスレート結晶のことであり、その籠構造の中にメタン分子が含まれているものを MH と呼ぶ³⁾。南海トラフ海域で MH はタービダイト砂層中の孔隙に充填する形で存在している⁴⁾。

MH を分解・生産するためには、MH 貯留層の圧力・温度を高圧・低温の MH 安定境界から MH 分解領域に移動させる必要がある。基本的な生産手法は、坑井内にポンプを設置して、坑底圧力を減少させることによってその低い圧力を貯留層に伝え、MH の分解を促す減圧法と貯留層に熱を加えて MH の分解を促しメタンガスを発生させる加熱法が挙げられる⁵⁾。

2002 年にカナダ北部のマッケンジー川河口地帯付近の永久凍土地帯にある Malik サイトで加熱法の一つである地表にて熱した温水を坑内で循環させて、産出試験対象

付近を加熱することにより分解されたメタンガスを循環温水と共に地表に産出させる温水循環法で 5 日間の生産期間中に 468m³ のメタンガスを生産し、この試験は世界で初めて地下の MH からメタンガスを生産することに成功した。しかし、生産レートは限られ、坑壁が不安定になる可能性が示唆された⁶⁾。その後、同じ Malik サイトで 2007~2008 年に減圧法を用いた第 2 回陸上産出試験が行われ、生産レート 2000~4000m³/day のメタンガスを安定的に生産すること成功した。しかし MH 貯留層が未固結堆積物であることからメタンガスや水とともに砂が出てくる出砂現象が起り、6 日間という短い期間で試験を終了せざるを得なくなった⁷⁾。

当研究機関では、MH の存在領域下で温度及び圧力を管理できる恒温高圧三軸試験装置を用いて、種々の条件下で MH 胚胎砂の力学特性や、減圧法、加熱法の適用時の変形挙動を調べる実験を行ってきた⁸⁾⁹⁾。加熱による分解実験では、セル水全体の温度を上昇させて MH を分解させ、その際の変形挙動を調べた。MH を含まない砂のみでの最大軸差応力は、同じ条件で作成された MH を含む砂よりも小さい。よって、MH を含まない砂の最大軸差応力以上かつ MH を含む砂の最大軸差応力未満の初期せん断応力を与えることで、MH が分解された時の地盤の不安定化が顕著に生じ、MH の分解により、供試体が破壊することが分かった。しかし、供試体表面全体から中心へ熱が伝わることで、供試体のサイズが直径 30mm、高さ 60mm の円柱体と小さいことから、供試体内の温度分布の詳細が測定できなかった。MH の分解に伴う地盤の変形は、温度、圧力が MH の分解領域になる分解フロントか

ら徐々に発生すると考えられ、本三軸試験装置では、分解フロントから徐々に発生する変形を評価することができない。

そこで本研究では、生産手法として分解手法の一つである加熱法に着目し、恒温高压平面ひずみ型実験装置⁸⁾を用いて、加熱法を適用した際のMH 胚胎砂の分解過程の温度挙動を調査する。また、生産によりMH を失った地盤が不安定になり、地盤沈下や海底地すべりを引き起こす可能性が指摘されていることから、加熱前にせん断を与えることにより、不安定条件によるMH 胚胎砂の分解過程の供試体の変形挙動を調査した。

2. 実験概要

2.1 実験装置の概要

恒温高压平面ひずみ型実験装置を写真-1 に示す。装置を恒温室内に設置し、実験中は室内全体の空調を管理することによりセル内の温度を調整することで、MH が存在している深海底地盤と同様の温度に管理している。

実験装置の概要を表-1、配管図を図-1 に示す。供試体のサイズは高さ 160mm×幅 60mm×奥行 80mm の直方体で、中間主応力面をアクリル板で拘束し、これ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ている。アクリル板の表面にはシリコンオイルを薄く塗ることで、アクリル板とメンブレンとの摩擦を軽減させている。

試験機の内部概略図を図-2 に示す。0~80℃まで温度調整が可能なペDESTALヒーターが供試体底部から20mm 下の位置に埋め込まれている。MH の分解はペDESTALヒーターを一定の温度で保持し続けることにより、ペDESTALとペDESTAL内の水を加熱し、供試体下部から加熱を行っている。このときの供試体内の温度変化を測定するために、下部のペDESTALから2本、トップキャップから2本の合計4本の熱電対A, B, C, Dをそれ

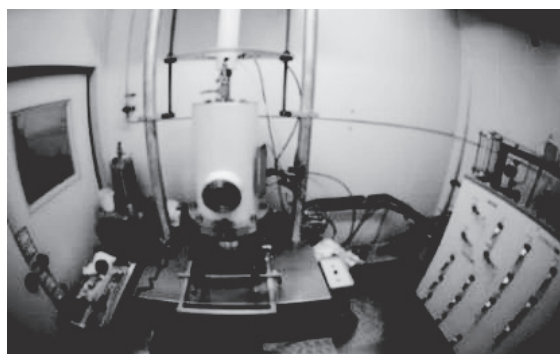
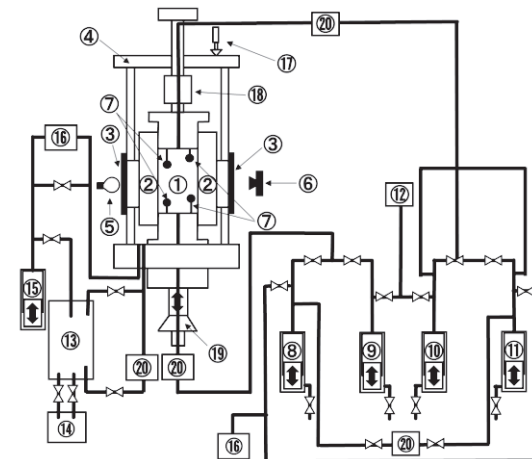


写真-1 実験装置の外観

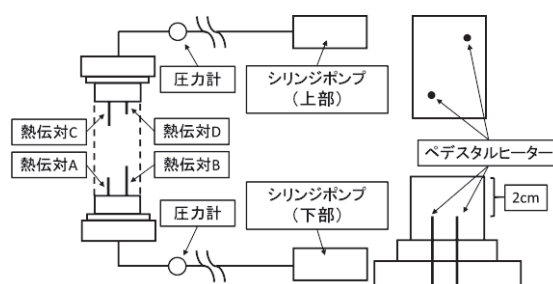
表-1 実験装置の概要

恒温高压平面ひずみ型実験装置の能力		
室温	拘束圧	背圧
0~30℃	Max.30MPa	Max.200MPa
軸荷重	変位計	ペDESTALヒーター
Max.200kN	Max.100mm	0~80℃

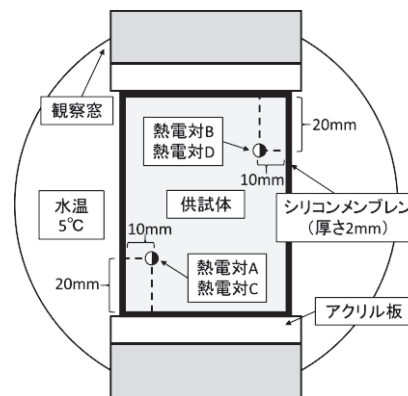


- ①供試体 ②拘束アクリル板 ③観察窓 ④圧力セル容器
- ⑤LED ライト ⑥デジタル一眼レフカメラ ⑦熱電対
- ⑧下部シリンジポンプ(水供給)
- ⑨下部シリンジポンプ(メタン供給)
- ⑩上部シリンジポンプ(メタン供給)
- ⑪上部シリンジポンプ(水供給) ⑫メタンガスタンク
- ⑬側液メインタンク ⑭側液温度管理タンク
- ⑮側圧負荷装置 ⑯予熱タンク ⑰変位計 ⑱ロードセル
- ⑲載荷装置 ⑳圧力計

図-1 実験装置の配管図



(a) 試験機の側面図及びペDESTALヒーター



(b) 圧力セル容器内の断面図

図-2 試験機の内部概略

ぞれ供試体下部から 30mm, 60mm, 120mm, 150mm の高さに、拘束されていない側面から 10mm の位置に設置している。供試体側面は厚さ 2mm のシリコンメンブレンで覆い、外部は水温 5°C の水を満たしている条件で実験を行っている。断面図に示すように、側面は、シリコンメンブレンを挟んでアクリル板と水が存在している状況にあるため、供試体内部で中心程、温度が高く、端へ近づくほど温度が低くなる。厳密な議論を行うためには、三次元場での検討が必要になると考えられるが、本実験では、装置の構造上、熱電対が図-2 のように 4 本しか設置出来ず中心部の温度計測が出来ていない。したがって断面内でどのように温度勾配が生じているのか確認できない。測定箇所のみでのデータでは、計算誤差が大きいと考えられるが少ない情報で検討を行うため、測定温度を断面での代表値として計算に用いた。

2.2 供試体作製方法

本研究では、MH 飽和率 S_{MH} (%) を次式で定義している。

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

ここに V_{MH} は MH の体積、 V_V は間隙の体積を表す。また、MH 飽和率を再現するために供試体の初期含水比 $w_{initial}$ を定めている。これは次式で定義される。

$$w_{initial} = \frac{(S_{MH}/100) \times V_V \times \rho_{MH}}{m_s} \times A \quad (2)$$

ここに ρ_{MH} (g/cm³) は MH の密度、 m_s (g) は試料の乾燥質量、 A は MH に含まれる水の質量百分率を表す。MH の密度は $\rho_{MH} = 0.912$ (g/cm³)、MH の分子式が CH₄ · 6H₂O で 1mol あたりの水の分子量は 18(g)、MH の分子量は 124(g) であるので、 $A = (6 \times 18) / 124 \times 100 = 87.1$ (%) となる。MH の理論分子式は CH₄ · 5.75H₂O であるが、人工 MH の水和数は 6 程度であり、その水和数は生成条件に依存することが知られている。これより、MH の分子式を CH₄ · 6H₂O として計算を行った⁹⁾。

試料は豊浦砂を用いた。表-2 に豊浦砂の物性値を示す。目標値の MH 飽和率 $S_{MH} = 50$ % になるように、上述の式 (2) により計算された所定の含水比に調節した試料を用い、湿潤突き固め法により供試体を作製した。供試体は高さ 160mm × 幅 60mm × 奥行き 80mm の直方体のモールドに、試料を 12 層に分けてタンパーで相対密度 $D_r = 90$ % となるように突き固める。この時、各層の境界面が不連続にならないようにするため、1 層突き固めるごとに表面を乱してから次の層を突き固めた。

2.3 実験手順

表-3 に実験条件、図-3 に MH の安定境界線と供試体の実験時の状態を示す。不飽和供試体を作成後、圧力セル容器内を水で満たす。メタンガスボンベから上下のシリンジポンプにメタンガスを充填し、供試体上下からメタンガスを所定の圧力で圧入する。これと同時にガス圧と +0.2MPa の差圧をつけながらセル圧も上昇させる。その

表-2 豊浦砂の物性値

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	平均粒径 D_{50} (mm)	最大間隙比 e_{max}	最小間隙比 e_{min}
2.655	0.210	0.973	0.613

表-3 実験条件

	Case1	Case2
上部間隙水圧 U.W.P (MPa)	10	9.9
下部間隙水圧 L.W.P (MPa)		10.1
有効拘束圧 σ'_c (MPa)	3	
MH 飽和率 S_{MH} (%)	35.8	38.6
間隙率 n (%)	39.2	39.8
加熱温度 T (°C)	80	

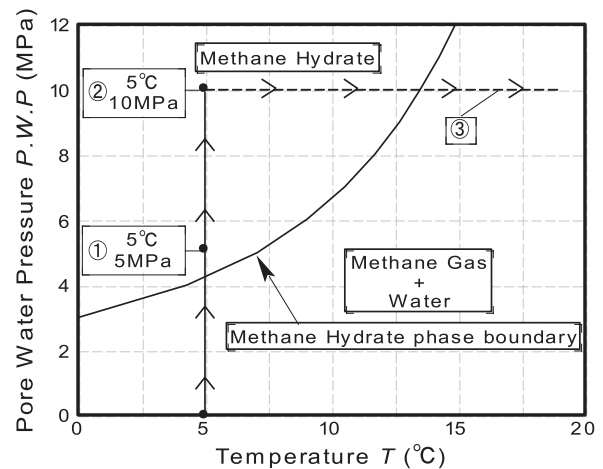


図-3 MH 安定境界線と実験中の温度と圧力

後、所定のガス圧を保持し、供試体内をメタンガスで飽和し、時間を掛けて間隙水を MH に置換するガス浸透法により、MH を生成し、ハイドレート化させた(①)。上下のシリンジポンプで計測されるガス流入量が定常状態になり、供試体へのメタンガスの供給がなくなることでハイドレート化の確認を行っている。MH 生成後、水を満たした 2 つのシリンジポンプより、圧力及び温度を保持したまま供試体内へ注水し、供試体内のメタンガスを水に置換する。その後、所定の条件に有効拘束圧・温度・間隙水圧を制御する(②)。圧密後、危険な条件を想定して、初期せん断を供試体に作用させる。初期せん断は、軸ひずみ速度 0.1%/min にて圧密排水条件で作用させる。このような条件とするのは、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 分解後に供試体がせん断破壊を生じることが明らかにされているためである¹⁰⁾。本研究でも、同様の危険な条件において実験を実施し、熱の伝達による供試体の変形挙動を詳細に観察することとした。初期せん断終了後、生成した MH を分解するため圧力を保持したまま、ペDESTALヒーター内のヒーターの温度を上げて、供試体に熱を与え MH 安定境界外の温度で MH を分解し、その後メタンガス量を測定する(③)。この時 Case

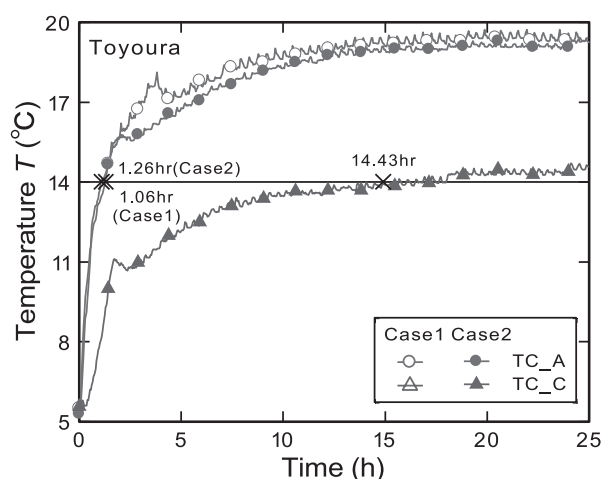
2は下部から上部へ水の浸透を誘発させ、ペDESTALヒーター周辺で温められた水が供試体上部へ流れるのを促す。これにより、MHの分解領域における変化を比較することを目的としている。いずれの実験も加熱開始から約20時間後に保持する。Case2は上部シリンジポンプの間隙水圧を上部シリンジポンプの動きが止まり、その後温度が定常状態に至っていることから分解実験を打ち切った。そして、圧力を下げ残りのMHを分解しメタンガス量を測定した。この分解中と分解後のメタンガス総量によりMH飽和度 S_{MH} を算出している。

3. 試験結果と考察

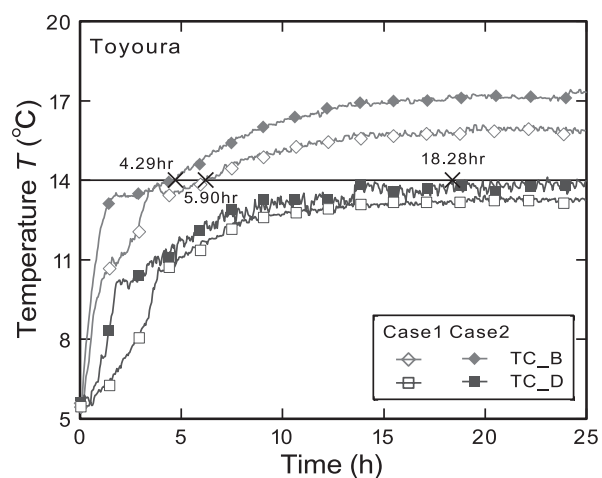
3.1 温度挙動

Case1とCase2の加熱時の供試体内の温度の経時変化を図-4に、熱電対A(30mm)、熱電対C(120mm)を(a)、熱電対B(60mm)、熱電対D(150mm)を(b)として示す。このときCase1の熱電対Cは接触不良により計測が出来なかった為、図に示していない。図中には、圧力10MPaにおけるMHの分解温度14°Cを黒実線で示している。AはCase1の方が少し早く分解温度に達しており加熱中の温度が高い。しかし、25時間後はCase2とほぼ同じ温度となり、熱源に近い供試体下部は最高温度が同程度となる。Cは約14.5時間に分解温度14°Cに達しており、25時間後は約14.5°Cとあまり大きな上昇は見られない。BはCase2の方がペDESTALから熱を与えてからの温度上昇が速く、Case1と比べて約1.6時間の差をつけて早く分解温度に達している。両者共に分解温度に達してからも温度は上昇しているが、差が徐々に広がり、25時間後には約1.3°CとCase2において高い結果となった。Dも同様にCase2の方が早く温度上昇し始めている。約5時間後からの加熱終了までの温度差は小さく、一定の差がある状態で上昇している様子が確認できる。他の熱電対との違いは、Case1は25時間が経過しても約13.4°Cまでしか上昇していないが、Case2は約18.3時間に分解温度に達している。このBとDに生じた温度差は、上下の差圧の有無が供試体中の熱移動に影響を与えたと推察する。この約1°Cの温度差は小さい値にみえるが、分解温度に達していることは重要で、Case2において分解範囲が広いことが想定される。

Case1とCase2の加熱開始から5時間後までの各時間における供試体高さ方向の温度分布を図-5に示す。下端からA(30mm)、B(60mm)、C(120mm)、D(150mm)をプロットしている。どちらも熱源に近い位置の熱電対から温度が上昇していることが確認できる。Case2はCase1と比較すると、Bは約0.5時間後、Dは2時間後に急激に上昇している。これよりCase1はCase2より供試体下部から緩やかに熱移動をしているといえる。しかし、大きな差は生じていないが、Aは1時間後からCase1の方が早く熱が伝わっている。これについて、Case2は供



(a) 熱電対 A 及び熱電対 C



(b) 熱電対 B 及び熱電対 D

図-4 温度の経時変化

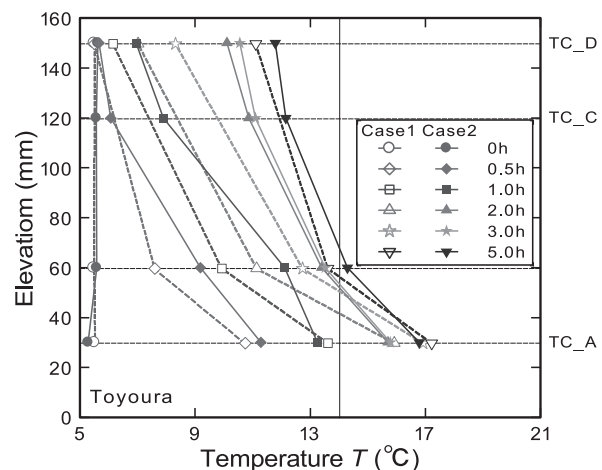


図-5 供試体の高さ方向の温度分布

試体の上部で差圧を付けることで供試体下部から流れる水が供試体内で熱を移動させたことで上部まで熱伝達したが、熱源に近いAの位置では、熱量が減少し、Case1と比較して低い温度を示したものと推察する。

3.2 分解中のメタンガスと水の流出入挙動

Case1の上下水圧とMHの分解により発生したメタンガス及び水の流出量(Q_{out})の経時変化を図-6に示す。図

より加熱開始から約 2 時間後までに流出量が大きいことから MH が急激に分解されている様子が確認される。シリンジポンプによる圧力制御は上部のみで行っているため、加熱開始時の上部の間隙水圧は 10MPa を保っているのに対し下部の間隙水圧が 10.05MPa と上下の圧力に差が生じている。その後、時間を掛けてゆっくりと 10MPa へ収束し、ポンプ内にメタンガスと水が流入されなくなったことにより MH の分解が終了したと推察される約 20.5 時間後に供試体内の圧力が 10MPa の一定値に安定していることが確認される。

Case 2 の上下水圧と上部からの流出量 (Q_{out}) から下部からの流入量 (Q_{in}) を差し引いた差分 (ΔQ) をメタンガス及び水の流出量とした経時変化を図-7 に示す。このとき下部からの流入量 (Q_{in}) 及び上部からの流出量 (Q_{out}) をともに正の値で表す。また、Case 2 では差圧をつけることにより、供試体の下部から上部への水の浸透を誘発している。下部から上部への流れの向きを正としており、供試体の間隙体積が一定で水の浸透が行われている条件では、下部から水を供試体内に注入しているため、下部からの流入及び上部からの流出量はともに正の値を示す。図より、供試体内の上下の差圧は、加熱開始時に上昇した圧力を制御した後、常に約 0.2MPa の差圧で制御されていることが確認される。シリンジポンプで圧力制御を行っているため、加熱中に供試体内の圧力が変化すると、圧力を保つように、体積変化を許容し、結果として体積変化を示す。図より、加熱開始から約 0.5 時間後の下部シリンジポンプは下部からの流入量 (Q_{in}) が負の値を示していることから、MH が分解したことで供試体内の圧力が急激に上昇し、圧力制御をするために、分解した水とガスを下部のシリンジポンプへと流している。その後、約 0.5 時間後から約 6 時間後まで値が増加していることから、シリンジポンプが水を供給し、供試体上部に向かって水が浸透をしていることが確認される。しかしながら、約 6 時間後をピークにその後は 25 時間後まで、値が減少しており、上部からの流出量の値も約 10 時間後から 25 時間後までほとんど変化していない。加えて、図-4 よりその後も温度上昇が分解領域へ推移している。これより、約 6 時間以降の供試体内で起きる分解による体積膨張 (圧力上昇) は下部シリンジポンプの圧力制御により、メタンガスと水は圧力が低い方向に流れ、結果として、下部シリンジポンプに蓄積されていたと考えられる。

3.3 MH 再生成の検討

流れの向きが変わった現象の要因に MH が再生成し、分解したメタンガスと水の流れを阻害したことが考えられる。そこで、熱電対 A, B, C, D の温度履歴情報を利用し、以下の仮定の下に気体の状態方程式の理論に基づき、各時間の MH 分解体積量 (以後、計算値と略す) を求め、実験結果と比較することを試みる。計算値を求めるために、以下の仮定を用いる。

- (1) 各熱電対間の温度は、線形で分布している。

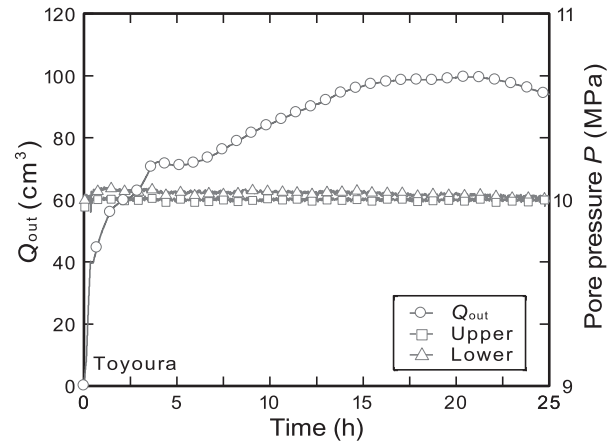


図-6 水圧及び流出量の経時変化(Case 1)

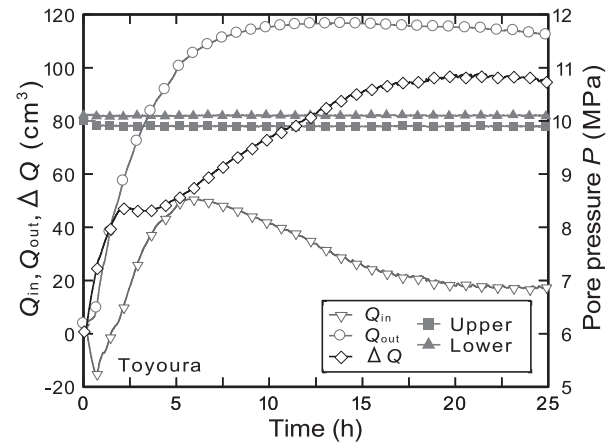


図-7 水圧及び流入・流出量の経時変化 (Case 2)

- (2) 供試体下部から MH 境界温度 14°C に達した位置までの MH 全てが分解されている。
- (3) MH は供試体中で一様に分布している。

また、実験では供試体内部は熱を与えているために時間が経過するにつれ温度は上昇している。これに関して次式に示す気体の状態方程式から分かるように、圧力が一定であるとき温度が高くなるほど、MH 分解時のメタンガスの体積は膨張する。この体積膨張がどの程度を示すのかを検討する。

$$PV = nRT \quad (3)$$

ここに、 P : 気圧(atm), V : 気体の体積(cm^3), n : 気体 1cm^3 あたりの物理量(mol), R : 気体定数($\text{atm}\cdot\text{l}/\text{K}\cdot\text{mol}$), T : 気体の温度(K)

実験中はシリンジポンプまでを閉じた系とすると n と R は変化しないことから、次式の右辺は一定である。

$$\frac{PV}{T} = nR \quad (4)$$

また、実験中の供試体内の間隙水圧は上部シリンジポンプと繋がっていることから P の値は同じなので、温度が 5°C から 19.79°C になった時の体積膨張比は、

$$\frac{PV_5}{T_5} = \frac{PV_{19.79}}{T_{19.79}}$$

$$\frac{V_{19.79}}{V_5} = \frac{292.94}{278.15} = 1.05317... \approx 1.05$$

よって、常に 25 時間供試体内が一様に 19.79°C で保ち続

けて MH 分解を行ったとしても供試体の流出量の熱による膨張の誤差は約 5%と小さい値なので、今回は温度による膨張の影響は考慮しないものとする。

仮定に基づいた温度分布の考え方の一例を図-8 に示す。赤のプロットは A (30mm) が 14°C に達し、青のプロットは C (120mm) が 14°C に達したときの温度分布を示している。実験装置は供試体内部全ての温度を計測することは不可能である。そこで、各熱電対の温度を線形で近似し、図のように温度分布の経時変化を求める。そして、供試体の高さ 1mm ごとに圧力 10MPa における MH の分解温度の 14°C に達した時間の計測を行う。MH が分解と生成を繰り返しながら少しずつ分解されるため、温度は 14°C 前後を行き来している。そのため、今回プロットした時間の温度は分解温度を下回らなくなった 14°C としている。下部から 14°C 以上で安定した位置まで全て MH が分解されており、また、各層に生成される MH が均一に生成されるように含水比を調整し供試体を突き固めていることから、MH が供試体中で一様に分布していると仮定すると、分解された MH 体積量が求められる。例として Case 2 の A が 14°C に達したときの MH 体積量の計算過程を示す。MH 飽和率 $S_{mh}=38.6(\%)$ 、供試体作成後の体積 $V_v=306.36\text{cm}^3$ より、供試体下部から高さ 30mm に含まれる MH 体積量は以下のように算出される。

$$V_{30} = h \times \frac{V_{mh}}{H} = h \times \frac{S_{mh} \times V_v}{100} \\ = 3.0 \times \frac{0.386 \times 306.36}{15.91} = 22.2982... \approx 22.30(\text{cm}^3)$$

ここに、 h : 14°C に達した供試体の高さ (cm)

H : 供試体作製時の供試体の高さ (cm)

MH1cm³ あたりのメタンガス体積 V_{Gas} (cm³) は式(3)より、

$$V_{Gas} = \frac{nRT}{P} = \frac{0.007355 \times 0.082 \times 1000 \times 278.15}{10 \times 0.869} \\ = 1.6998... \approx 1.70(\text{cm}^3)$$

標準状態 (1 気圧, 0°C) の条件における MH1cm³ あたりの水の体積は約 0.80cm³ と定義されており、水の体積は圧力・温度によって膨張・収縮を起こさないので圧力 10MPa、温度 5°C の条件における体積量は 0.80cm³ とする。これより、MH1cm³ あたりのメタンガスと水の体積は、1.70+0.80=2.50cm³ であり、供試体下部から高さ 30mm に含まれるメタンガスと水の体積は、2.50×22.30=55.75(cm³) と求まる。同様に他の供試体高さのときのメタンガスと水の体積量を算出し、これをメタンガス及び水の体積量 (すなわち流出量 ΔQ) と時間との関係で図-9 にプロットした。

Case 1 と Case 2 の実測値及び計算値の経時変化の比較を図-9 に示す。図より、Case 1 は加熱開始から約 7 時間後まで、Case 2 は約 2 時間後まで実測値は計算値に沿って分解しており、以降は計算値が実測値を上回り、25 時間後は共に大きな差が生じている。これより、下部から分解されて発生したメタンガスが分解温度に達していない

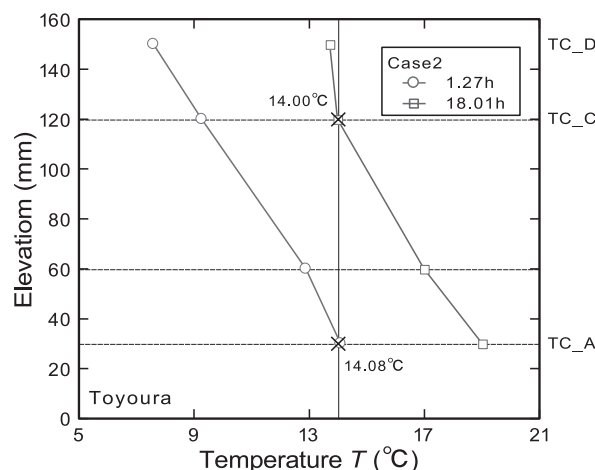


図-8 仮定に基づいた温度分布の考え方の一例

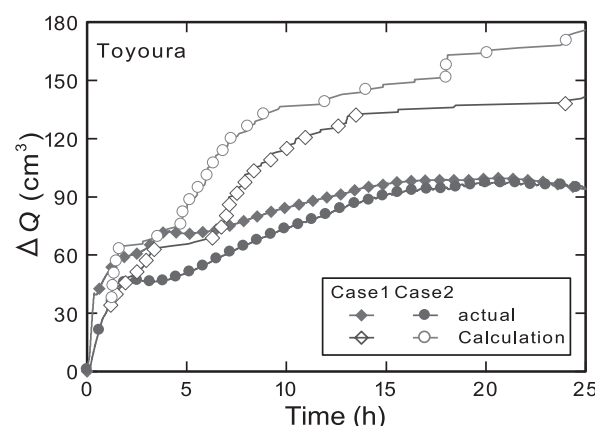


図-9 実測値と計算値

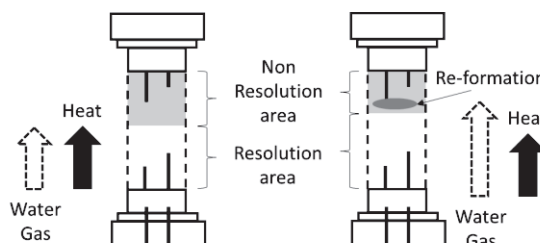


図-10 メタンガス挙動の概念図

供試体上部で MH が再生成を起こしたと考えられる。また、実測値と比較をすると、温度上昇が早いにも関わらず、Case 2 の方が多く分解し始めている。これは、図-10 のメタンガス挙動の概念図に示すように、Case 1 では下部から分解されたメタンガスがゆっくりと移動するが、Case 2 では供試体下部から注入している水によりメタンガスが早く移動したことで、Case 1 と比較して MH が早い段階でより多く再生成し、このことから再生成した MH が供試体上部の間隙を閉塞したのではないかと考えられる。閉塞し MH と砂の壁が形成されたのは、図-7 より上部シリンジポンプが停止した約 10 時間後と想定され、以降も図-4 より温度上昇し続けていることから、閉塞した直下部分に存在している MH は分解され続けていることが確認される。これより、閉塞した直下部分は体積膨張 (圧力上昇) したために、MH が分解した供試体下端との間に圧力差が生じ、分解したメタンガスと水が図-7 の Case 2 のように逆向きの流れを生じさせたと考えられる。

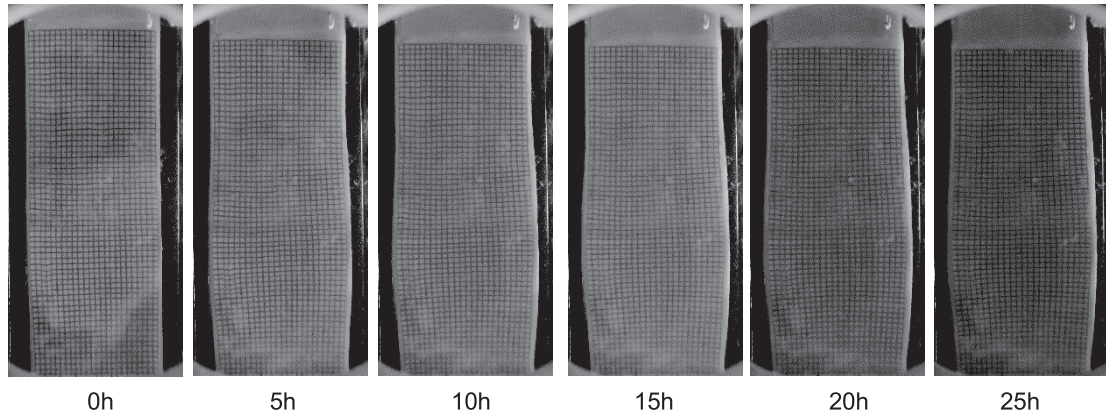


写真-2 加熱時の供試体の変形挙動(Case1)

3.4 変形挙動

Case 1 の加熱開始から 5 時間ごとの供試体の変形挙動を写真-2 に示す。MH が分解するにつれ水平方向に下部を中心に膨張し、鉛直方向に圧縮されていることが確認できる。これより、加熱時の供試体の変形挙動の特性を検討する。

図-11 に供試体の変位の定義を示す。供試体には縦横 2.5mm の間隔で格子を描いているメンブレンを貼り付けており、実験中に観察窓から撮影することで、供試体の局所変形を観察する。撮影した画像から左右両端を 1 点ずつプロットして得た座標から各時間の供試体の幅とそのプロットした高さを計測する。これにより、計測した地点ごとの水平変位と鉛直変位を求めた。水平方向の場合、プロットした両端の点の x 座標から、それぞれの高さの幅を計測している。加熱開始 0 時間後を初期値 b_0 とし、変形後の値 ($b_1, b_2 \dots$) から初期値を引いた値を変位量 Δx とする。 Δx はプラスの値を膨張、マイナスの値を収縮とする。鉛直方向の場合、図に示すように求めたい高さの点と下端 0mm 位置の点の y 座標の差から、その位置の点の高さを計測している。加熱開始 0 時間後を初期値 h_0 とし、初期値から変形後の値 ($h_1, h_2 \dots$) を引いた値を変位量 Δy とする。 Δy はプラスの値を圧縮、マイナスの値を伸張とする。また、上部の変位量を求めるにつれて、下部の変位量が加算される形となるので、供試体が加熱中に圧縮される場合、上部に向かって次第に Δy が大きくなる分布に形成される。

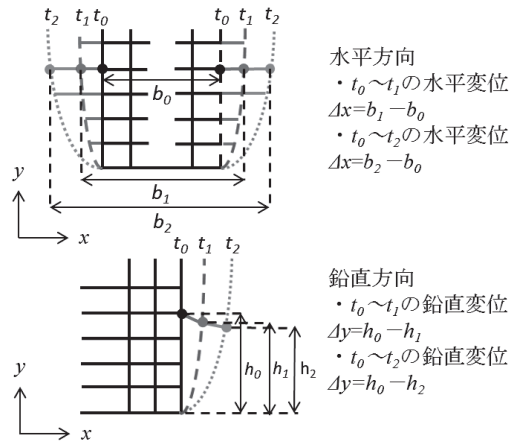


図-11 供試体の変位の定義

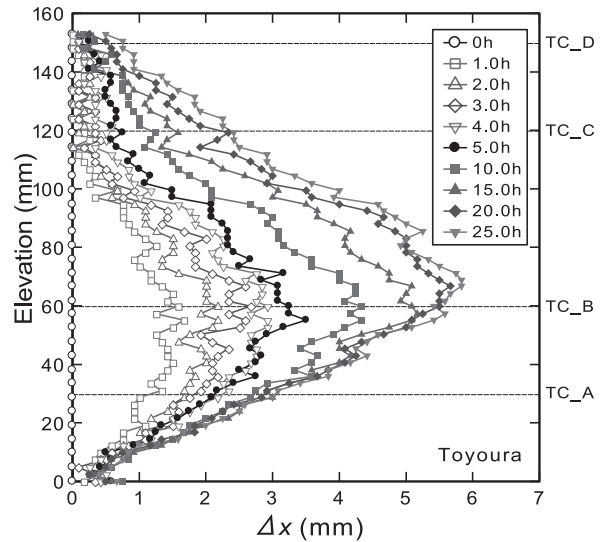


図-12 供試体の水平変位量(Case 1)

加熱開始から各時間の水平方向の変位量 Δx を図-12 に示す。供試体の上端及び下端部分は、トップキャップ及びペダスタルで拘束されているため、変形が起きにくい値は小さいものとなっている。熱電対 A (30mm) の位置は、4 時間後まで膨張しているが、その後の変位量は、それまでに比べ少ない。B も同様に、5 時間後までに大きく膨張しているが、その後徐々に変位量の増分が小さくなる。B の変形がみられなくなる 20~25 時間の供試体全体の変形は、下端から約 70mm を境に上部は変形を生じ、下部は変形がほとんど生じていないことが確認できる。

各熱電対の位置における供試体の水平変位量 Δx とその時間の温度の関係を図-13 に示す。図中には、圧力

10MPa における MH の分解温度 14°C を黒実線で示している。A と B は分解温度に達する前に徐々に変形が生じている。これは MH が供試体下部から分解されており、下端から近い位置であるため、下部の変形の影響を受けたものと考えられる。これと同様に A が 17°C 超えてからも膨張しているのは上部からの影響であると考えられる。B は分解温度付近で急激に膨張しており、D も分解温度に達していないが 13°C 超えたあたりから膨張していることが確認できる。いずれの位置においても、温度増加に対し

て、変形は二次曲線的に生じており、MHの分解と変形に関連があることが伺える。

図-12, 13より、供試体はMHが分解されることにより下部から上部に向かって水平方向への変形が進展し、MHが分解されることで変形しやすい状態へ移行するものと考えられる。

加熱時の供試体の軸変位量の経時変化を図-14に示す。加熱時はMHが分解されることにより、MHの拘束効果が消失し供試体は圧縮される。しかし、図のように25時間経過しても約10mm程度しか圧縮しないため、メンブレンに描いた2.5mmごとの変位を求める変位量は0.1mm未満と誤差が大きくてやすい。そのため、鉛直変位量を求める際は複数マス間隔でプロットし、変位量の計測を行った。

格子4マス(約10mm)ごとの加熱開始から各時間の鉛直方向の変位量 Δy を図-15示す。図-11より、鉛直方向の変位量は供試体下端の点からそれぞれの点の位置までの距離を計測しており、図-14より、加熱時の供試体は圧縮されていることから、鉛直方向の変位量は上部に向かって大きい分布となっている。図より1時間後に下端0~10mmの範囲は大きく変形している。これは、図-5より下端30mm位置まで温度が約13度上昇していることから、より熱源に近い下端の0~10mmの範囲は分解温度14℃に達し、MHが分解しているためであると考えられる。また、Case1と対応している図-6より約20時間後から Q_{out} が一定であることからMH分解は収まっているのに対し、供試体上部は約25時間後まで変形し続けていることが確認できる。

各熱電対の下部約30mmの位置から熱電対の位置まで(格子12マス)の変位量を計測し、これにおける供試体の鉛直変位量 Δy とその時間の温度の関係を図-16に示す。図中には、圧力10MPaにおけるMHの分解温度14℃を黒実線で示している。位置120~150mmはDが約9℃まで圧縮と伸張を繰り返しているが、どの位置も温度上昇に伴い圧縮し、温度の上昇に伴い変形量も大きくなっていく様子が見える。位置0~30mmは14℃を越えてから一旦変形が落ち着くが、温度17℃を超えた後大きく変形している。これは、図-15と同様で、供試体上下が拘束されており、かつ上部からの変形の影響を受けたためであると考えられる。

図-17にCase1の初期せん断から加熱終了時までの軸差応力と平均主応力の関係図を示す。このとき、せん断試験の結果から求めたMHを含まない砂の破壊線を点線、MHを含む砂の破壊線を実線で示している¹²⁾。最大軸差応力は破壊線を越えておらず、写真-2からも供試体に破壊のような変形が起こっていないことから、せん断破壊は生じていないと考えられる。MHを含まない砂の破壊線を越えているが、すべり破壊に至らなかったのは供試体内で分解されずに残留したMHの固結砂によるものと考えられる。

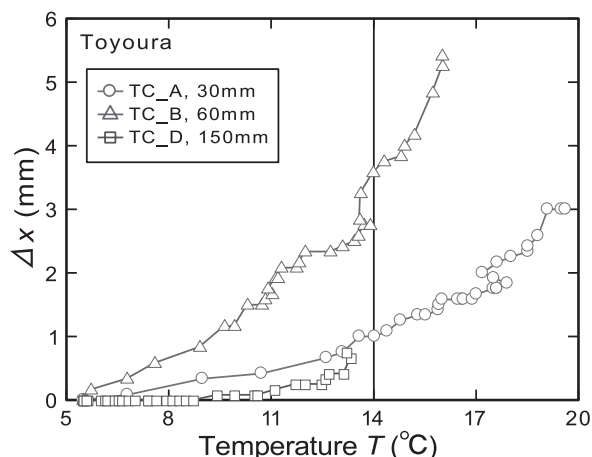


図-13 供試体の水平変位量とその時間の温度の関係 (Case 1)

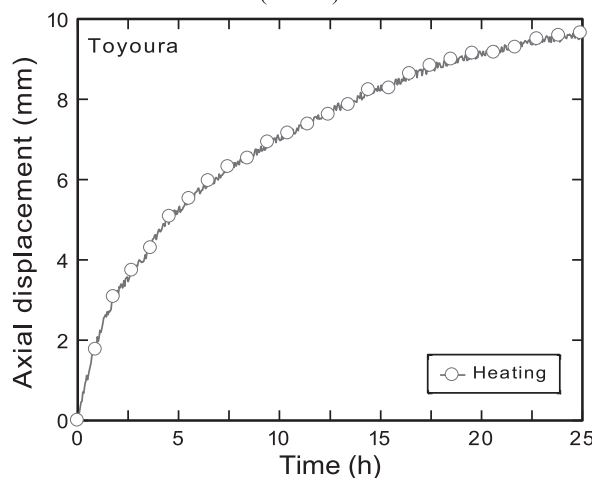


図-14 加熱時の軸変位量(Case 1)

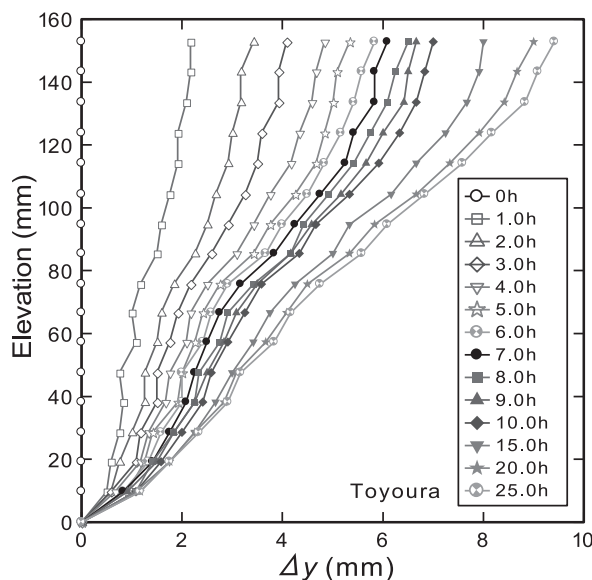


図-15 供試体の鉛直変位量(Case 1)

4. おわりに

次世代資源として考えられているMHの生産手法の一つである加熱法に着目し、恒温高圧平面ひずみ型試験装置を用いて加熱法を想定した際のMH胚胎砂中の温度及び供試体の変形挙動の検討を行った。これらにより得ら

れた知見について以下にまとめる。

- (1) 供試体内部は加熱部から熱が伝わり、温度上昇している。また、加熱時に供試体の上下に差圧を与えることで、より広範囲まで短時間で温度が上昇することが確認できる。
- (2) MH は温度上昇に伴い分解される。しかし分解されて発生したメタンガスの一部は供試体上部に移動することで、安定領域で再生成し、これにより間隙が閉塞されていることが示唆された。
- (3) 水平方向において、加熱時は MH の分解に伴い、供試体の変形が下部から徐々に膨張しており、MH が分解されていない位置はほとんど変形しないことが確認された。
- (4) 鉛直方向において、加熱時は温度上昇に伴い、圧縮しており、MH が分解した後も供試体上部からの影響により変形を起こすことが確認された。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 25820216 の助成及び公益財団法人 中国電力技術研究財団の助成を受けて実施された。最後に記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 前川忠：原油の輸入と備蓄，日本エネルギー学会誌，Voa.91, No.8, pp.698-703, 2012.
- 2) 佐藤幹夫，前川竜男，奥田義久：天然ガスハイドレートのメタン量と資源量の推定，地質学雑誌，Vol.102, No.11, pp.959-971, 1996.
- 3) 山本佳孝：海底に眠る炭素資源の利用ーメタンハイドレートー，日本海水学会誌，Vol.67, No.2, pp.92-100, 2013.
- 4) 栗原正典，佐藤明彦，大内久尚，大淵有希子，増田昌敬，成田英夫，海老沼孝郎，佐伯龍男，藤井哲哉：東部南海トラフメタンハイドレート資源の生産性評価，石油技術協会誌，Vol.74, No.4, pp.311-324, 2009.
- 5) 藤井哲哉，並川貴俊，奥井智治，川崎正行，落合浩志，中水勝，辻喜弘：コアと検層記録からみた東部南海トラフにおけるメタンハイドレートの産状と飽和率，日本地質学会学術講演要旨，Vol.112, pp.267-268, 2005.
- 6) 安田優人：マリック産出試験調査井プログラム（国際共同研究マリック 2002）の概要，日本エネルギー学会誌，Vol.84, No.4, pp.88-92, 2005.
- 7) 山本晃司，佐伯龍男：メタンハイドレート資源量評価と陸上産出試験，石油技術協会誌，Vol.74, No.4, pp.270-279, 2009.
- 8) 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.

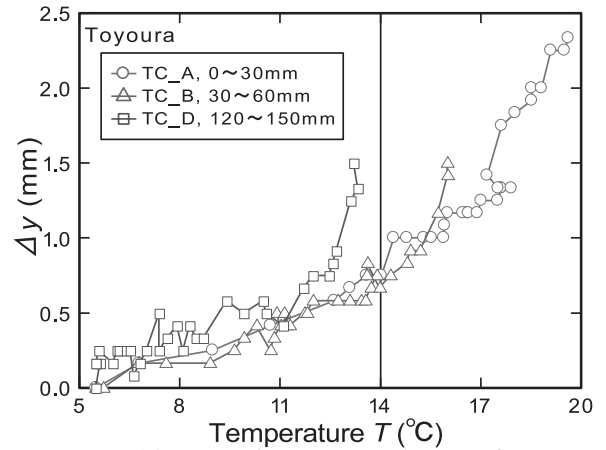


図-16 供試体の鉛直変位量とその時間の温度の関係

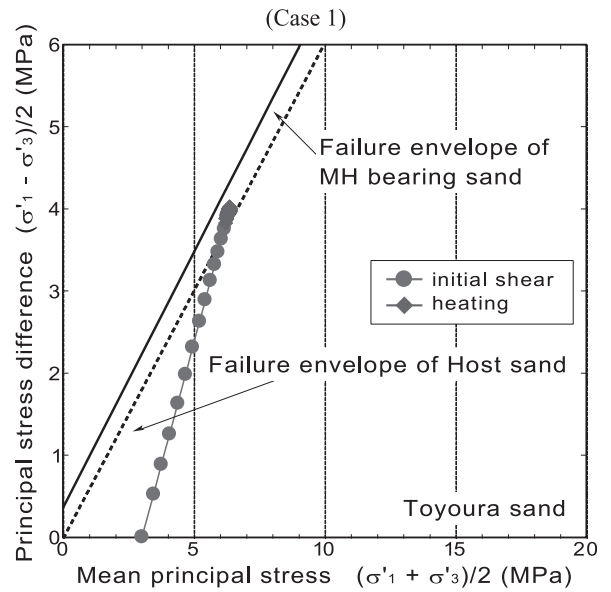


図-17 初期せん断から加熱終了時までの軸差応力と平均主応力の関係(Case 1)

- 9) 内田努，成田英夫，平野貴史，前晋爾：メタンハイドレート 人工メタンハイドレートのラマン分光測定，地質学雑誌，Vol.102, No.11, pp.983-988, 1996.
- 10) Hyodo,M., Yoneda,J., Yoshimoto,N., and Nakata,Y.: Mechanical and Dissociation Properties of Methane Hydrate-Bearing Sand in Deep Seabed, *Soils and Foundations*, Vol.53, No.2, pp.299-314, 2013.
- 11) Yoneda,J., Hyodo,M., Yoshimoto,N., Nakata,Y., and Kato,A.: Development of high-pressure low-temperature plane strain testing apparatus for methane hydrate-bearing sand, *Soils and Foundations*, Vol.53, No.5, pp.774-783, 2013.
- 12) Hyodo,M., Yoshimoto,N., Kato,A., and Yoneda,J.: Shear Strength and Deformation of Methane Hydrate Bearing Sand with Fines, *Proceedings of the 18 th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp.1011-1014, Paris

(2015年6月22日 受付)

