

博士論文

南海トラフのメタンハイドレート生産を想定した  
土の変形および強度特性に関する研究

(Deformation and shear strength characteristics of methane hydrate bearing sediments in  
Nankai Trough during gas production)

平成 29 年 3 月

梶山 慎太郎

山口大学大学院理工学研究科

<目次>

第1章	序論	1-1
1.1	概説	1-1
1.2	メタンハイドレートについて	1-3
1.2.1	メタンハイドレート開発の歴史	1-3
1.2.2	メタンハイドレートとは	1-7
1.2.3	メタンハイドレートの分布	1-12
1.2.4	メタンハイドレートの生産手法	1-19
1.3	砂泥互層堆積地盤中のメタンハイドレート含有砂に関する既往の研究	1-20
1.3.1	豊浦砂を用いたメタンハイドレート含有砂の三軸圧縮特性	1-20
1.3.2	コア試料に対する三軸圧縮特性	1-24
1.4	本論文の目的と構成	1-28
	参考文献	1-32
第2章	南海トラフ模擬土の変形および強度特性	2-1
2.1	概説	2-1
2.2	実験装置および試料の概要	2-3
2.2.1	実験装置の概要	2-3
2.2.2	用いた試料について	2-8
2.2.2.1	試料の物理的特性	2-8
2.2.2.2	粒子形状の評価	2-10
2.2.3	供試体作製方法と実験手順	2-13
2.2.4	PTV解析による画像解析法	2-15
2.2.5	供試体中のメタンハイドレートの分布	2-18
2.3	南海トラフ模擬土の変形および強度特性	2-21
2.3.1	南海トラフ模擬土の強度特性	2-21
2.3.2	南海トラフ模擬土の変形特性	2-25
2.4	メタンハイドレート含有土の変形および強度特性	2-28
2.4.1	細粒分含有率の違いによる強度特性の変化	2-28
2.4.2	細粒分含有率の違いによる変形特性の評価	2-34
2.4.3	メタンハイドレート飽和率の違いによるせん断特性の変化	2-41
2.4.4	弾性係数による供試体中のメタンハイドレートの存在形態の評価	2-42

<目次>

2.5 本章の要約	2-44
参考文献	2-45
第3章    メタンハイドレート分解に伴う土の変形および強度特性	3-1
3.1 概説	3-1
3.2 メタンハイドレート分解実験の実験手順	3-3
3.3 分解時の温度および圧力の変化	3-5
3.4 分解に伴う土の変形および強度特性	3-9
3.4.1 分解時の変形特性	3-9
3.4.2 分解後の土の変形および強度特性	3-11
3.5 本章の要約	3-14
参考文献	3-15
第4章    メタンハイドレート生産を想定した粒状体の力学シミュレーション	4-1
4.1 概説	4-1
4.2 個別要素法による粒状体モデルの概要	4-2
4.2.1 個別要素法の基本的な計算サイクル	4-2
4.2.2 粒子ばねの設定	4-2
4.2.3 粒子サイズと供試体の設定	4-6
4.3 メタンハイドレートが土に与える影響のモデル化	4-9
4.3.1 既往の個別要素法によるメタンハイドレート含有砂の解析	4-9
4.3.2 固結粒子のばね定数のパラメータの決定	4-11
4.3.3 固結粒子サイズとメタンハイドレート飽和率の設定	4-12
4.3.4 固結粒子の固結力の設定	4-12
4.4 粒状体モデルの変形および強度特性	4-16
4.4.1 解析手順	4-16
4.4.2 粒状体モデルの変形および強度特性	4-16
4.5 生産を想定した粒状体の変形挙動	4-22
4.5.1 解析手順	4-22
4.5.2 生産を想定した粒状体の変形挙動	4-22
4.6 本章の要約	4-28

<目次>

参考文献	4-29
第 5 章 結論	5-1

### 第1章 序論

#### 1.1 概説

現在、人類の生活はエネルギーの消費の上に成り立っており、そのほとんどを石油、天然ガスなどの化石燃料に依存している。

2011年3月11日、三陸沖を震源とするマグニチュード9.0の「東北地方太平洋沖地震」が発生し、この地震を端緒として原子力発電所で原子力事故が発生し甚大な被害をもたらした。この事故は、一時的な日本のエネルギー供給の混乱のみでなく、日本のエネルギー政策を根本的に見直すきっかけとなった(経済産業省, 2014)。世論は原子力発電中止が半数以上を占めており、原子力発電のエネルギー供給に占める割合は減少し、化石燃料がエネルギー供給に占める割合は増加すると考えられる。

こういったことから、代替エネルギーへの移行が求められており、クリーンなエネルギーである天然ガス資源としてメタンハイドレートが注目されている。現状、エネルギー資源のほとんどを輸入に頼る日本の近海にも大量に存在し、メタンハイドレート濃集層でのメタンは5739億 $\text{m}^3$ で、日本の液化天然ガス(以下、LNGと略す)輸入量の約5.5年分に相当する大ガス田クラスの量の原始資源量となっている(メタンハイドレート資源開発コンソーシアム, 2016)。その開発利用が実行されれば、21世紀のエネルギーとして大いに期待できる。

また、メタンハイドレートはエネルギーそのものとしてだけでなく、LNG取引における価格交渉力の向上としての価値も大きい。

日本におけるLNGの価格は、原油価格連動方式を採用している。藤山(2012)は、原油価格連動方式を採用した背景として、「①元来、天然ガスは石油代替燃料として位置付けられていたこと、②近傍に大規模な天然ガス産出地がなく、パイプライン天然ガスとの競合がなかったこと、③安定調達を志向したこと」などを指摘している。原油価格連動方式は、原油価格に依存してLNG価格を決定するため、原油の突発的な価格変動に対してもある程度の余裕を持って対応できることなどがメリットとして挙げられるが、しかし、資源エネルギー庁(2016)によると、その石油は国内での生産はほとんど無く、2012年現在で99.6%を輸入に頼っている。さらに、中東からの輸入は2012年現在83.2%となっている。日本では、オイルショックを受けて原油の輸入先の多角化を進めてきたが、原子力発電の停止により原油の需要が増えたことで再び中東への依存が高くなっており、価格変動のリスクが高い。一方で、石油代替燃料と位置付けられ

## 第1章 序論

ていた天然ガスの需要も近年高まっている。この LNG 価格の情勢の現状から、現在の日本の価格決定方式にはメリット、デメリットはあるものの藤山は、LNG の価格方式の多様化を提案しているが、価格方式を見直す際のキーワードとして価格交渉力の向上のために上流権益と調達先の多様化を挙げている。上流の権益を確保できれば価格の決定に対して発言権が強くなり LNG の価格を抑えることができる。メタンハイドレートを国産エネルギーとして産出することができれば、上流権益を確保できる可能性が高い。また、調達先のひとつとして MH の生産を確立できれば、他国の情勢に関わらず安定した供給先が確保できる。結果、日本の全般的なエネルギー価格の低下や安定的な供給が見込める。このような影響からもメタンハイドレートへの期待は大きい。経済産業省によると平成 28 年 2 月現在までにメタンハイドレート開発促進事業に要した費用の 30 倍の売上を試算しており、先述の通り国産のエネルギーに乏しい日本においては、メタンハイドレートの存在は非常に有意義であることが分かるとともに、メタンハイドレートの商業化に向けて着実に研究開発が進められている。

しかし、南海トラフのメタンハイドレート濃集層はタービダイト堆積土とメタンハイドレートが混合した形で地盤中に存在しているため、メタンガスの生産活動に伴う具体的な環境への影響として海底の地盤沈下、海底地滑り、遺漏ガスの発生、そして生態系の変化など多くの課題が考えられる。

そこで本研究では、メタンハイドレート生産井掘削時から生産井廃坑に至る地盤の応力変化を想定し、メタンハイドレートを含有した砂(以下、メタンハイドレート含有砂と記す)を用いてせん断試験およびメタンハイドレートの生産中の応力変化を想定して間隙中に存在するメタンハイドレートを分解するメタンハイドレート分解実験から、その変形特性および強度特性を評価することを目的としている。

本章の概説では、第 2 節にメタンハイドレート開発の概要を述べ、第 3 節に現在日本において研究開発が進められている砂泥互層堆積地盤中のメタンハイドレート含有砂に関する既往の研究について概観している。最後に、第 4 節において本論文の目的とその構成を示している。

### 1.2 メタンハイドレートについて

#### 1.2.1 メタンハイドレート開発の歴史と有用性

メタンハイドレートの報告は、19世紀後半にされているが、ガスハイドレート自体は、19世紀前半に報告がなされ、研究が進められてきた(メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム)。その後、石油化学や化学工学の分野でアメリカ等を中心にパイプラインの閉塞事故原因の解明を目的とした実験的な研究が、特に1940年代から盛んに行われ、メタンハイドレートの生成条件等が明らかにされた。さらに、深海底の調査が進むにつれ深海堆積物中にハイドレートの存在が指摘されてからは、エネルギー資源としての利用を目的とした研究が急激に進められた(松本, 2009)。

日本においては1999年に静岡県御前崎沖の南海トラフにおいて初めての試錐が行われ、これは石油開発用の掘削リグを用いての海域のメタンハイドレート層を掘削した世界で初めての事例である(林, 2007)。海外においても、アメリカ、カナダ、ドイツ、インドなどが新たにメタンハイドレートの中長期計画を策定し、2002年にカナダ北西領域マッケンジー川河口域において、日本、アメリカ、カナダ、ドイツ、インドの5カ国共同のプロジェクトが行われ、詳細な調査研究に加えて、世界で始めてハイドレート層を対象にした天然ガス生産テストが行われ、無事成功を収めた。同年、日本においても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』を遂行するために、『メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム』通称『メタンハイドレート21研究コンソーシアム(以下、MH21)』を立ち上げ、メタンハイドレート開発長期計画がスタートした(メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム)。

メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムは、エネルギーの長期安定供給を確保するために6つの段階的目標を提示し、分野を5つに区分して3段階のフェーズ、アプローチを提案している。メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムから発表されたフェーズ1総括成果報告書によると、3段階のフェーズのうち、2008年にフェーズ1が終了し、研究対象である頭部南海トラフ海域におけるメタンハイドレートは、タービダイト砂泥互層の砂層に賦存するタイプが主体であることや、生産手法としてはメタンハイドレート胚胎層内の圧力を下げる減圧法が効果的であることなど、各分野においてメタンハイドレートが今後の研究継続により経済性が期待できる可能性が示唆された。これらの成果から、経済産業省技術評価指標に基づき、外部有識者によるプロジェクト評価がなされ、フェーズを次の段階へ進ませるのが妥当との提言を受け、2009年よりフェーズ2へと移行している。フェーズ2では、フェーズ1で明らかとなった技術課題を踏まえて、海洋産出試験の実施等により、メタンハイドレートが資源

## 第1章 序論

となる可能性をより高い信頼性で評価するとともに、最終段階のフェーズ3に向けて商業的開発技術の課題の抽出を行っている。

図 1-2-1 に、2012 年 2 月から 2013 年 8 月にかけて行われた第 1 回メタンハイドレート海洋産出試験周辺の地図を示す。図中のオレンジのハッチは、メタンハイドレートが賦存しているとされている領域である。図に示す赤色の地点において、海洋産出試験が実施され、2013 年 3 月 12 日から 18 日までの約 6 日間にわたり、メタンハイドレート分解によるガス生産実験を行い、実海域におけるメタンハイドレートの生産挙動データの取得がなされた。

表 1-2-1 に、MH21 のホームページをもとに作製した MH メタンハイドレートの歴史について示す。

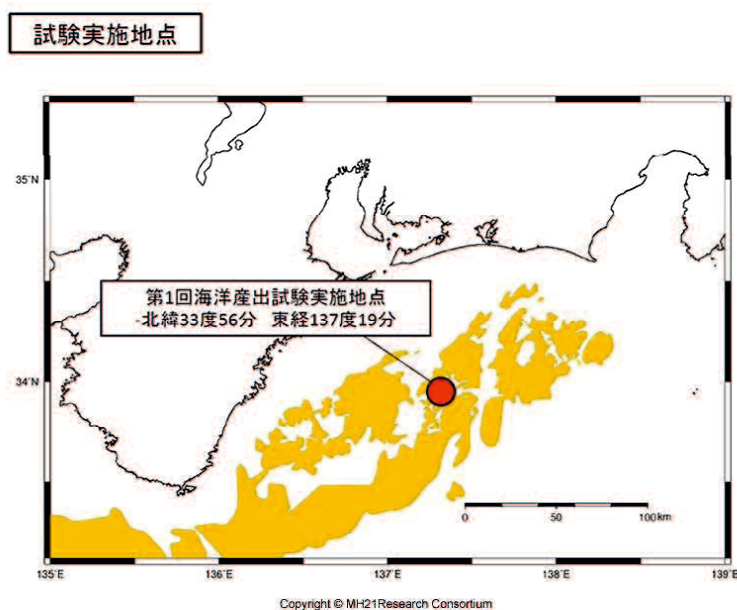


図 1-2-1 第 1 回海洋産出試験実施地点(MH21 ホームページより)



## 第1章 序論

表 1-2-1 メタンハイドレート開発の歴史

(メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムのホームページを参考に作成)

1810年	ハイドレートの発見.
1934年	ハイドレート形成が原因でシベリアガスパイプライン閉鎖事故が起きる.
1965年	シベリア永久凍土環境下の地層中でハイドレートが形成されることを実証.
1970年代	<p>大西洋の <b>Blake-Bahama Outer Ridge</b> の地震探査断面図に、海底面に並行で地層と斜交する反射波を発見し、“<b>Reflector-Y</b>”と仮称 .</p> <p>DSDP (深海掘削計画) <b>Leg-11</b> により <b>Reflector-Y</b> を掘削し、コア採取.</p> <p>Stoll らによって、合成ハイドレートの速度測定の結果、DSDP で把握された、高速度異常が堆積層中の天然ガスハイドレートによると推定.</p> <p>Hollister 他, <b>Reflector-Y</b> の上位の、メタンガス大量含有堆積層の区間速度を検討、Stoll 他, の実験結果を踏まえ、<b>Reflector-Y</b> はハイドレートとその下位にあるガス層との境界に相当すると結論.</p> <p>Scholl 他, <b>Bering</b> 海の震探断面図に海底面に並行で地層と斜交する反射波を発見、これを初めて <b>Bottom Simulating Reflector</b> (海底擬似反射面, 略称 <b>BSR</b>) と命名.</p> <p>DSDP <b>Leg-19</b> でこれを掘削したがメタンガスが検知されず、その深度は珪藻に富む堆積物と泥岩との境界に相当したことから、<b>BSR</b> は珪藻の分解に係る続成作用境界と解釈、“ハイドレート派”に再考を促す.</p> <p>Tucholke 他, 北大西洋の震探で認識された海底面に並行する反射波はガスとハイドレートの境界を示すとし、これを <b>bottom simulating reflecting horizon</b> と記述.</p> <p>Hein 他, <b>Bering</b> 海のコアを研究、海底面に並行する反射波は、オパール-A が続成作用によりオパール-CT に転移した境界を示すと結論.</p> <p>Shipley 他, 中米沖の海底面に並行する“異常な”反射波がガスハイドレートの基底であることを説明し、この反射波を“<b>bottom-simulating reflection</b> (Hollister,1972)”と引用 (ただし、この論文の引用は誤り)</p> <p>中米海溝の DSDP <b>Leg-66</b> で、初めてメタンハイドレートのコアを回収.</p>
1980年代	<p>南海トラフ周辺海域で <b>BSR</b> を発見. これ以降、日本の周辺海域にて <b>BSR</b> が発見される.</p> <p>深海底からのハイドレートコアを確認 (ODP <b>Leg-127</b>, 奥尻海嶺)</p>
1990年代	<p>四国沖南海トラフでメタンハイドレートコア確認(ODP <b>Leg-131 Site808</b>).</p> <p>非在来型天然ガスの一つとして、メタンハイドレートの研究開始.</p> <p>奥田により日本周辺海域のメタンハイドレート資源量が試算される.</p>

## 第1章 序論

米国大西洋の Blake Ridge で ODP Leg.164 による掘削実施.

石油公団(TRC)を中心に民間 10 社で特別研究「メタンハイドレート開発技術研究」開始.

佐藤他から「日本周辺のメタンハイドレート資源量が年間天然ガス消費量より 2 桁程度大きい説」が公表される.

メタンハイドレート探査を目的とした基礎物理探査「南海トラフ」・「オホーツク」を実施.

NEDO で「ガスハイドレート資源化技術先導研究開発」を実施.

日本・カナダ・米国の共同で Mackenzie Delta において メタンハイドレート層掘削(メタンハイドレート回収, 掘削等技術の確認).

基礎試錐「南海トラフ」掘削. コア取得・検層データからメタンハイドレートを東海沖でも確認.

深海底下における BSR とハイドレートの関係解明.

- 2002 年 石油公団, (独)産業技術総合研究所, (財)エンジニアリング振興会の 3 者によってメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(通称: MH21)が発足  
東海沖から熊野灘にて基礎試錐の実施. 東海沖, 第二渥美海丘, 熊野灘にてメタンハイドレートを確認.
- 2007 年 経済産業省から東部南海トラフでのメタンハイドレート原始資源量が公表される.  
第 2 回メタンハイドレート陸上産出試験第 1 冬実施. 世界初の減圧法によるメタンハイドレート層からのメタンガスの生産に成功.
- 2008 年 第 2 回メタンハイドレート陸上産出試験第 2 冬実施. 世界初の減圧法によるメタンガスの連続生産に成功.
- 2009 年 「我が国におけるメタンハイドレート開発計画フェーズ 1 終了.
- 2009 年 「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」フェーズ 2 開始.
- 2012 年 第 1 回メタンハイドレート海洋産出試験事前掘削作業.
- 2013 年 南海トラフにおけるメタンハイドレート分解によるガス生産実験実施.
- 2016 年 「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」フェーズ 3 開始.  
第 2 回メタンハイドレート海洋産出試験事前掘削作業

1.2.2 メタンハイドレートとは

メタンハイドレートとは、水分子が形成するかご状構造内の空隙にメタン分子を取り込んでできるガスハイドレートの一種である。一般的にメタンハイドレートは、図 1-2-2 に示すように 5 角 12 面体 2 個と、変形 14 面体 6 個から構成されている(松本, 1995)。

この空孔はかご状の形状をしており、このような立体網状構造をクラスレートと総称し、このかごが水分子から成るものをクラスレート・ハイドレートと呼ぶ。

天然ガス中にはメタンだけではなく他の炭化水素や二酸化炭素などが含まれており、総称してガスハイドレートと呼ばれており、かご内部にガス分子が取り込まれている化合物をガスハイドレートと言ひ、ガス分子がメタンであるものを特にメタンハイドレートと呼ぶ。ガスハイドレートの結晶構造を代表するものに、I 型構造と II 型構造がある。単位格子が 2 個の 12 面体と 6 個の 14 面体からなる構造を I 型、16 個の 12 面体と 8 個の 16 面体からなる構造を II 型と呼ぶ(市川ら, 2007)。

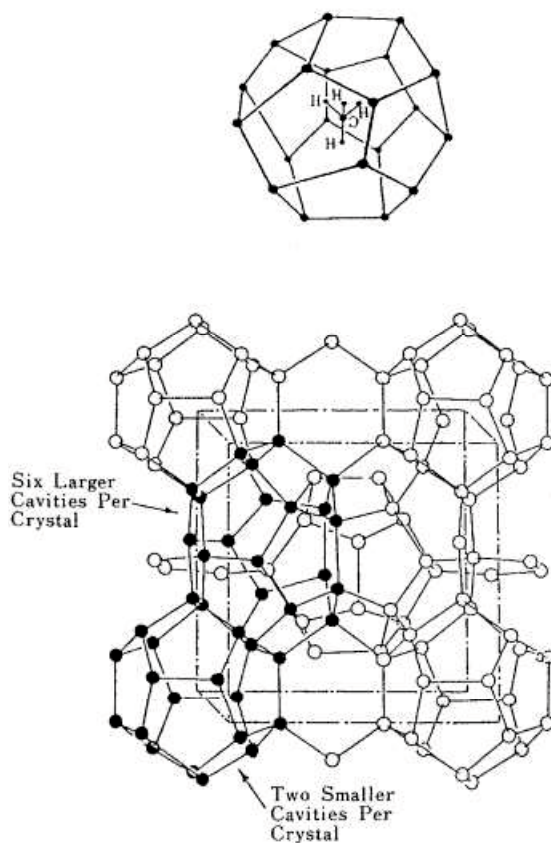


図 1-2-2 メタンハイドレートの結晶構造と 5 角 12 面体ケージ(I 型構造)

(松本, 1995)

## 第1章 序論

ゲスト分子が空孔のサイズより小さすぎると空孔は安定しにくく、ゲスト分子の大きさによりそのハイドレートの結晶構造が決まってくる。たとえば、メタンより大きい分子であるプロパンの混合ガスをハイドレート化すると、混合ガスにおけるプロパンの量が少量でもあっても、II型のプロパンハイドレートとなる(Thakore and Holder, 1987)。これは、プロパンの分子が大きいため、16面体の空隙にのみ入ることができるからである(奥井ら, 1998)。また奥井らによると、通常メタン分子はその大きさからより小さい空隙を作る12面体や14面体の空隙に入りI型構造のハイドレートが生成されるにもかかわらず、プロパンが少量でも存在すると、16面体の空隙にメタン分子が入りII型のハイドレートを生成するためとされている。

また、メタンハイドレートはI型構造では、空隙に完全に充填されると、理想状態でガス分子と水分子の比は8:46となる。このことから、理想化学式は $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$ となり、このときのメタンハイドレート中のメタンガス量は、標準状態に換算して、ハイドレート自体の体積の約160倍となる(松本, 2004)。

## 第1章 序論

ガスハイドレートの主な特性は次のとおりである。

- ① 高いガス包蔵性：ガスを高密度に含む
- ② 大きな生成・解離熱：相変化に伴う吸熱・発熱（潜熱）が大きい
- ③ 高い反応選択性：ガスによって相平衡が大きく変化する
- ④ 高い生成・解離差圧：生成解離圧の温度依存性が大きい

これらの諸特性は、ガス包蔵性はガス輸送・貯蔵技術、大きな生成・解離熱は潜熱蓄冷熱媒体などへの応用が考えられ、資源とは別の観点からメタンハイドレートを始めとするガスハイドレートの工学的利用技術の開発が期待されている。(成田, 2010)

一般にハイドレートは低温・高圧の環境条件下で安定する性質を持っている。図 1-2-3 にメタンハイドレートの相平衡の模式図を示す。図中、実赤色の線がメタンハイドレートの相平衡曲線を示す。平衡曲線の左下、黄色いハッチの領域はハイドレートが安定して存在する温度・圧力条件であり、右上の領域は分離ガスと水あるいは氷が共存する領域である。坑井掘削、あるいは開発等の様々な要因で原位置環境の温度上昇あるいは圧力減少が生ずると、メタンハイドレートはガスと水または氷へと分解する。また、一旦分解したガスと水から、再びメタンハイドレートに相変化することもあり得る。貯留層中のハイドレートを分解するには、熱供給、減圧、あるいはその併用が基本となる。また、化学的な手法として、メタンハイドレートの安定条件はガス分子の種類、ガス組成、溶液の組成等により大きく異なることが分かっており、薬液を注入することで相平衡曲線を変化させることが挙げられる。

海中では水深が深くなるほど水温は低下し、地中の温度は深度の上昇とともに増加する。したがって、海面から海底面下の地中までの温度の勾配を描くと、海底面までは水深の増加とともに低下するが、海底面下からは、深度の上昇にともなって温度が上昇する曲線が描ける。これにメタンハイドレートの相平衡曲線を描くと、メタンハイドレートの相平衡曲線と交わる点の温度、圧力点が存在し、それより浅い深度部分でメタンハイドレートが存在できる。図 1-2-4 に深海底領域および陸上領域のメタンハイドレート安定領域の図を示す(松本, 2009)。図から明らかのように、地温勾配を一定とすれば、水温が増大すればメタンハイドレートが生成し得る範囲が増加する。その場所にガスの上方移動と地下水の存在があれば、メタンハイドレートが形成される。ただし、ガスの上方移動速度が大きければ、メタンハイドレートが形成される前にガスは海底から逸散する。

一方、陸上の場合、大気圧状態ではマイナス 80℃以下で無ければメタンハイドレートは存在できない。ここで、メタンハイドレートの安定条件のひとつである圧力に着目すると、深度の増加とともに土被り圧は上昇するため、地表面よりも地中の方がメタンハイドレートの安定領域に近づく。一方で、先述のとおり地中の温度は深度とともに上昇するため、一般的にはメタンハイドレートは存在することができない。しかし、永久凍土層では地表面下数 100m まで

## 第1章 序論

地層が凍った場所が存在するため、陸上においてもメタンハイドレートが存在し得る。

以上のように、メタンハイドレートが生成され得る場所は、水深が深く低温・高圧の条件を満たし、さらに陸源の有機物が供給され、堆積層が厚く発達することなどの条件が必要となる。したがって、メタンハイドレートの分布は、北極や南極圏の永久凍土地帯や、大陸近くの水深の深い大陸斜面に限られている。

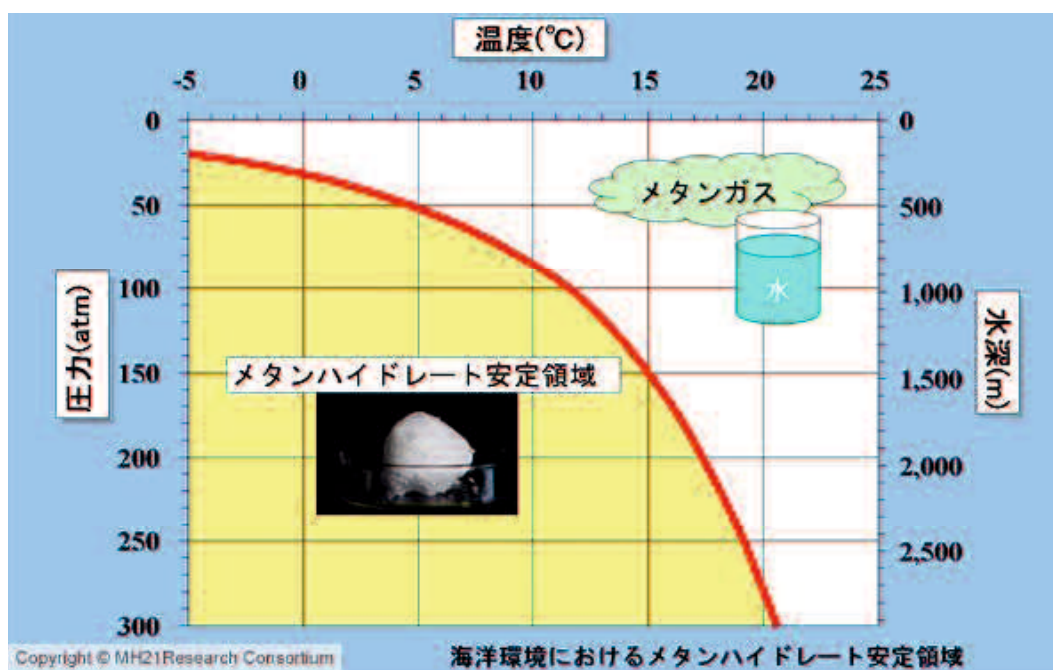


図 1-2-3 メタンハイドレートの相平衡の模式図

(メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムホームページより)

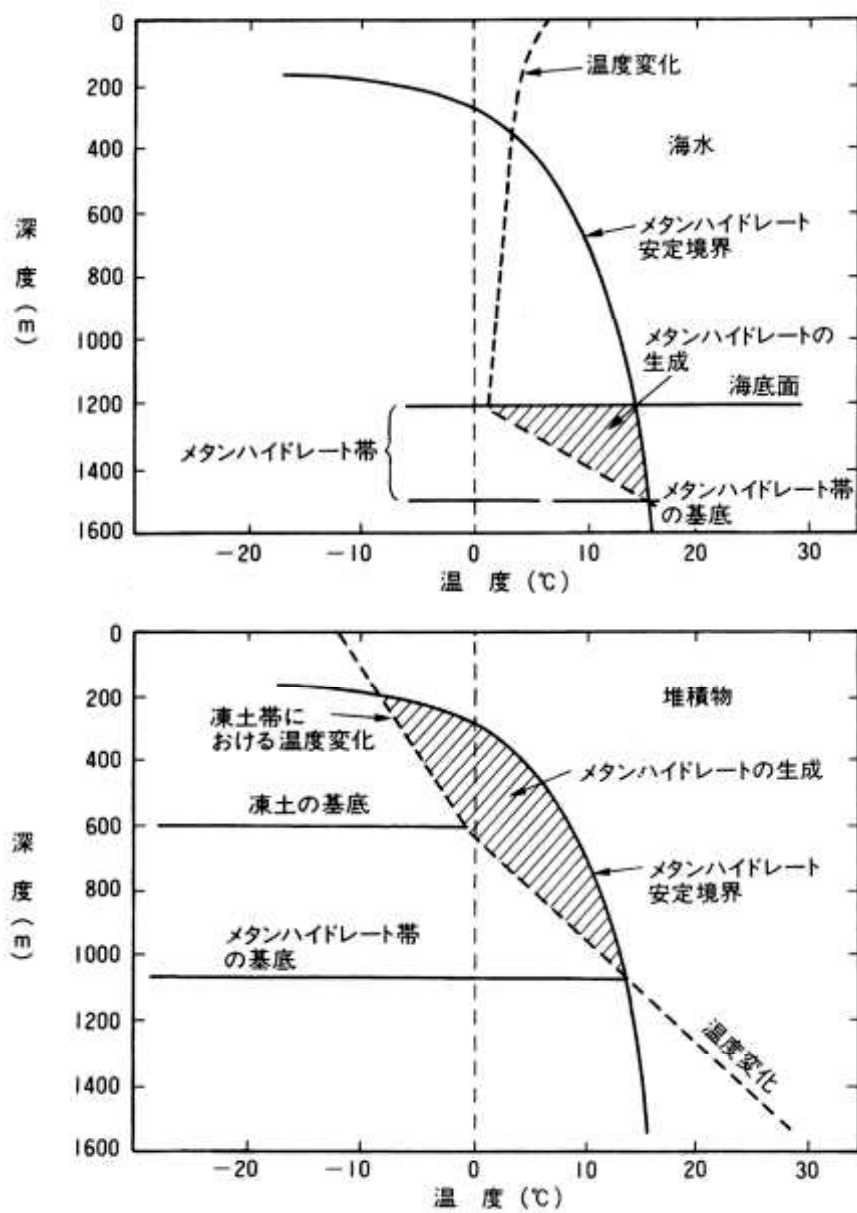


図 1-2-4 メタンハイドレートの深海底領域(上)と陸上領域(下)安定境界 (松本, 2009)

1.2.3 メタンハイドレートの分布

商業化するにあたり、メタンハイドレートの開発には従来の石油開発技術のみでは対応しきれない部分が存在する。メタンハイドレートは、その存在形態から、砂層型と表層型に分けられるが(森田, 2014), 本研究では砂層型を対象に述べる。図 1-2-5 に、メタンハイドレート開発と、従来の石油技術の特徴を比較した図を示す(成田, 2013)。地盤工学的な観点からみると、従来の技術とメタンハイドレートと比較して、メタンハイドレート層までの掘削、メタンハイドレートを分解することでメタンガスとして回収し、回収後に生産井を廃坑する(以下、メタンハイドレート生産)までに、地盤の強度、変形特性が変化することである。これは、メタンハイドレートが従来の天然ガス資源と異なり、メタンハイドレート層と呼ばれる砂層の間隙中に存在することによる。

メタンハイドレート層の分布は、反射法地震探査記録や、深海掘削の結果により推定されている。このうち、地震探査記録では、メタンハイドレート層の分布下限に以下に述べる海底擬似反射面 (bottom simulating reflector ; BSR) と呼ばれる異常反射面がしばしば記録され、この BSR によりメタンハイドレートの存在を推定することができる。

メタンハイドレートを含む堆積物は弾性波速度が増加する一方で、堆積物の間隙中にフリー

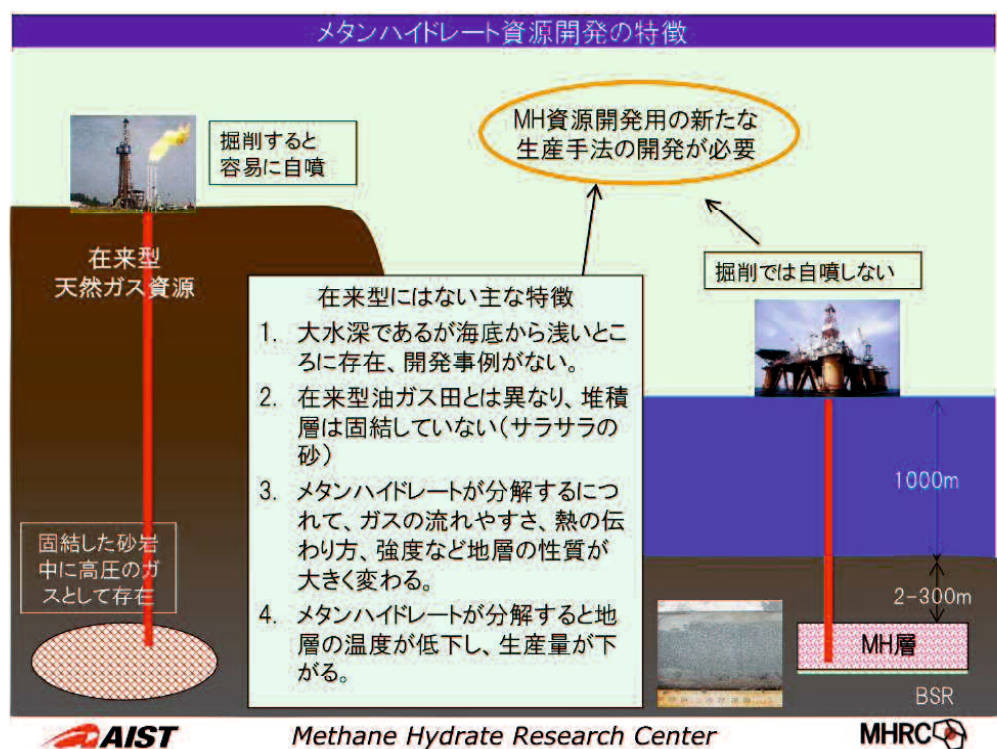


図 1-2-5 メタンハイドレート資源開発の特徴 (成田, 2013)



## 第1章 序論

ガスが存在すると弾性波速度が急激に低下する(倉本, 1997). 倉本によると, メタンハイドレート層によって下方から移動してくるフリーガスがトラップされることでその境界で弾性波の速度のコントラストを生じ, 音響インピーダンスが急変することから, 位相が反転した反射波となる. この BSR の分布から, BSR をメタンハイドレート層の下限としてメタンハイドレートの分布域をある程度推定することができる. 図 1-2-6 に BSR の例を示す.

現在までに BSR や掘削で確認または推定されている世界における代表的なメタンハイドレートの分布を図 1-2-7 に示す. これまでに実施された掘削や物理探査結果によると, 陸域のメタンハイドレートの分布については, シベリア, カナダ及びアラスカの永久凍土地域, 及び西南極に限られるが, 海域のメタンハイドレートの分布については各国の近海に多く存在が予想され, 日本周辺海域にも多くのメタンハイドレートが存在することが分かる.

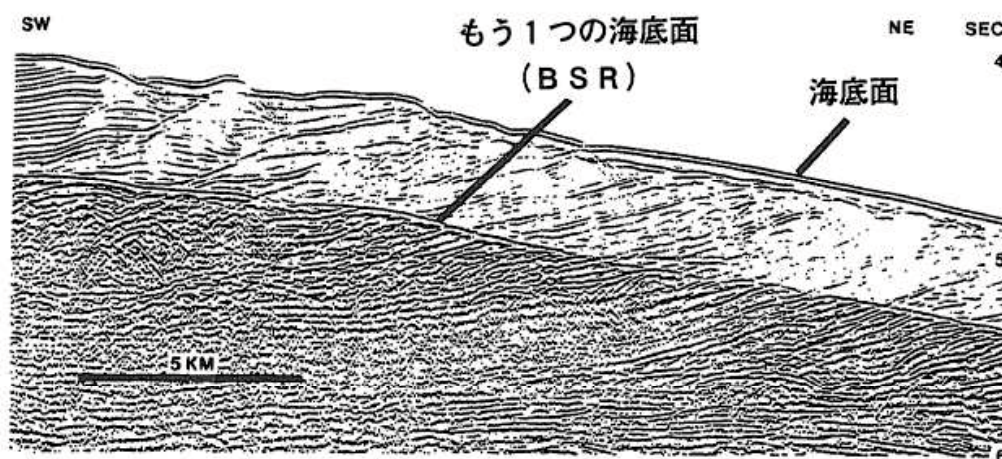


図 1-2-6 BSR 記録例 (倉本, 1997)



図 1-2-7 世界におけるメタンハイドレート分布  
(メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムホームページより)

## 第1章 序論

日本周辺海域におけるメタンハイドレートの分布を図 1-2-8 に示す。物理探査結果によると、西南日本太平洋側沖合の南海トラフ陸側斜面、及び北海道周辺海域の十勝～日高沖海域、オホーツク海域と津軽～渡島半島沖などに分布している。

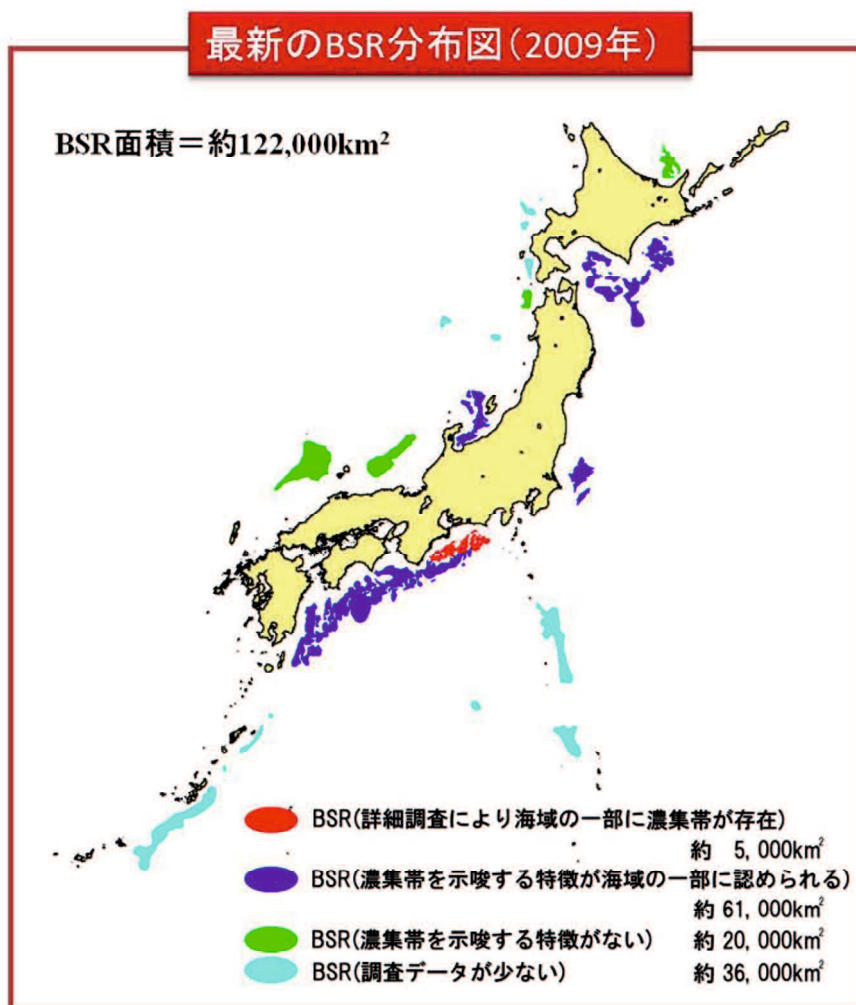


図 1-2-8 日本におけるメタンハイドレート分布  
(メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムホームページより)

## 第1章 序論

日本においては、現在南海トラフ域において、研究開発が進められている。

鈴木ら(2009)は、開発対象である南海トラフのメタンハイドレート層に対して、採取深度の圧力を保ったまま回収できる装置を用いてコアサンプリングを行い、メタンハイドレートを含む層の堆積構造の特徴とメタンハイドレートの胚胎メカニズムへの影響を評価している。鈴木らは、X線CT装置を用いた堆積構造の観察から、南海トラフの砂層がタービダイトをなしていると判断した。さらに、南海トラフの堆積構造は葉理の顕著でないタービダイトの塊状級化部( $T_a$ )、平行葉理部( $T_b$ )、斜行葉理部( $T_c$ )および泥質部( $T_{d-e}$ )で構成されていることを明らかにした。また、鈴木らは粒度分析も行っている。図1-2-9に鈴木らが行った粒度試験の結果を示す。図から、南海トラフのメタンハイドレート層は広範な粒度分布を有していることが分かる。

メタンハイドレート資源開発コンソーシアムが発表した、「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」フェーズ1総括成果報告書によると、南海トラフにおける3つのメタンハイドレート濃集層の層厚は約40から50mとされており、メタンハイドレートが間隙に占める割合、メタンハイドレート飽和率は40から50%となっている。

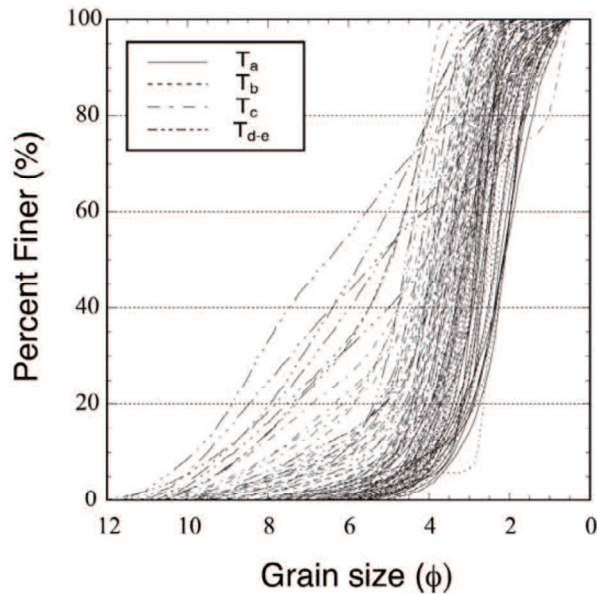


図 1-2-9 南海トラフにおけるメタンハイドレート層の粒度分布 (鈴木ら, 2009)

図 1-2-10 に示すように、メタンハイドレートは地盤内では様々な状態で存在している。近年の基礎試錐や産出試験などから、メタンハイドレートの存在状態は主に土粒子が骨格を形成し、その間隙に生成していることが分かってきた。地盤中におけるメタンハイドレートの存在状態はまだ十分解明されていないのが現状であるが、その中でも図 1-2-11 に示すような、Contact cement 型、Grain coating 型、Pore filling 型、Load bearing 型、Patchy 型の 5 つの存在状態が考えられる。概念図を図 1-2-10 に示す。このうち、Contact cement 型は極少量のハイドレートが粒子の接触点に部分的に固結した場合、また Grain coating 型は少量のハイドレートがすべての接触点で固結した場合に生じるとされている(Jeffery and Angus, 2005)。また、間隙中に生成されたハイドレート(Pore filling 型)や粒子または粒子間に付着、生成したハイドレート(Load bearing 型)が増大し、粒子間の橋渡しをするようになると Patchy 型になるとされている(Dai et al., 2012)。

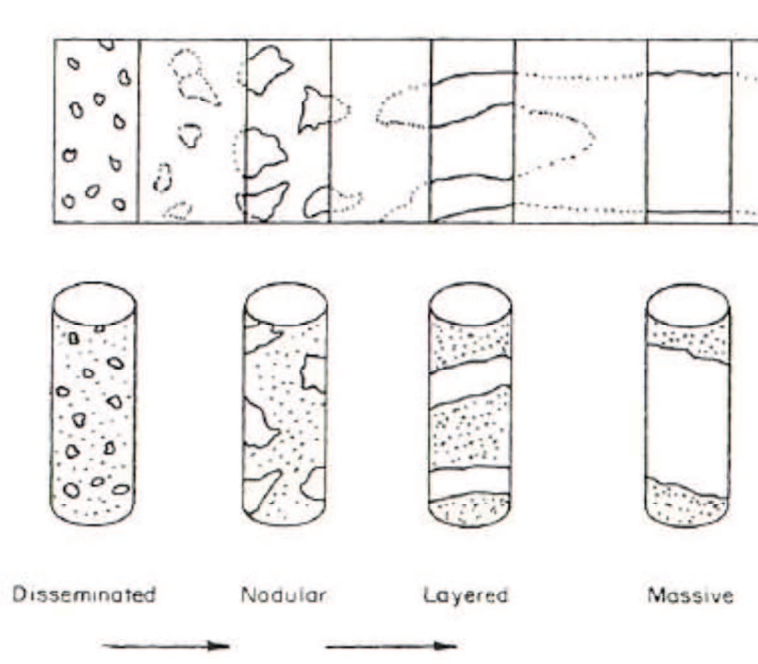


図 1-2-10 メタンハイドレートの産状 (Malone, 1985)

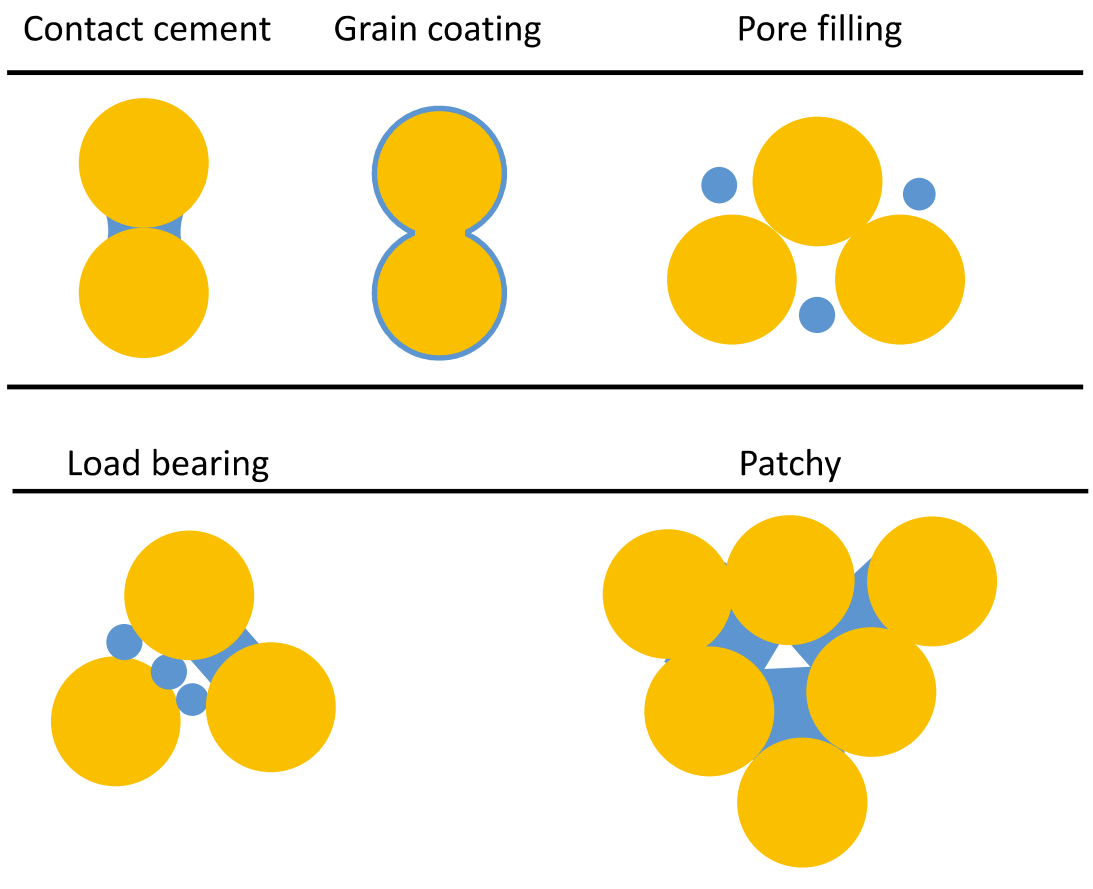


図 1-2-11 メタンハイドレートの存在状態  
(Jeffery and Angus, 2005 ; Dai et al., 2012 を参考に作成)

### 1.2.4 メタンハイドレートの生産手法

メタンハイドレート層からガスを生産するためには、地下の原位置でメタンハイドレートを分解してガス化させる必要がある。メタンハイドレートをガス化するためには、メタンハイドレートの安定領域外まで温度を上げるか、圧力を下げる必要がある。ガス生産方法の概念モデルとして、減圧法、加熱法、インヒビター注入法およびそれらを組み合わせた方法が提唱されている(メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム)。加熱法は、地表からボイラーなどで加温した流体(熱水や水蒸気)、及び地下ヒーターによる加熱によりメタンハイドレート層の温度を上昇させ、ハイドレートを分解させる方法である。カナダマッケンジーデルタでの生産試験では、温水を用いた温水循環法によって、メタンガスを生産している。インヒビター注入法は、メタンハイドレートの平衡圧力曲線を低温・高圧側にシフトさせる物質を使用し、メタンハイドレートを分解する方法である。ただし、実際に大規模なメタンハイドレート生産を行う際に使い続けることは経済的ではなく、生産開始時の井戸周辺の分解の促進などへの利用が想定される。

そして、メタンハイドレート資源開発コンソーシアムがメタンハイドレート生産シミュレータ(MH21-HYDERES)を用いて解析を行った結果、主体となる生産手法として最適とされた手法が減圧法である。

減圧法は、減圧によりメタンハイドレートを分解してガスを採取する方法である。減圧法の仕組みは、ポンプで生産井内の水をくみ上げて生産井内の圧力を下げることでメタンハイドレート層を減圧し、メタンハイドレートをメタンガスと水に分解することでメタンガスを回収する仕組みとなっている。2016年に行われた海洋産出試験においても用いられ、約12万m<sup>3</sup>のガスが確認されている(メタンハイドレート資源開発コンソーシアム)。しかし一方で、メタンハイドレートが砂の間隙中に存在するために、メタンガスや水と一緒に砂も回収され、ポンプを停止されるなどのデメリットも確認されている。将来的には、経済的に採算の取れる新しいガス生産プロセスの検討が必要である。

1.3 砂泥互層堆積地盤中のメタンハイドレート含有砂に関する既往の研究

1.3.1 豊浦砂を用いたメタンハイドレート含有砂の三軸圧縮特性

これまで様々な機関でメタンハイドレートに関する研究が行なわれている。その中の一部として、細粒分を含まない豊浦砂を用いた三軸圧縮試験について述べる。

Hyodo ら(2013)によって行われた豊浦砂を用いたメタンハイドレート含有砂のせん断試験結果を示す。図 1-3-1 にせん断試験によって得られたメタンハイドレート飽和率  $S_{MH}$  ごとの応力と軸ひずみ関係を示す。以下、メタンハイドレートを含有しない砂、メタンハイドレート飽和率  $S_{MH}=0\%$ の砂をホスト砂、また、メタンハイドレートを生成する試料がガラスビーズである場合、あるいはメタンハイドレートを含まない砂とガラスビーズを統括して議論する場合はホスト試料と記す。図から、メタンハイドレート飽和率  $S_{MH}$  が増加するに伴って初期剛性および

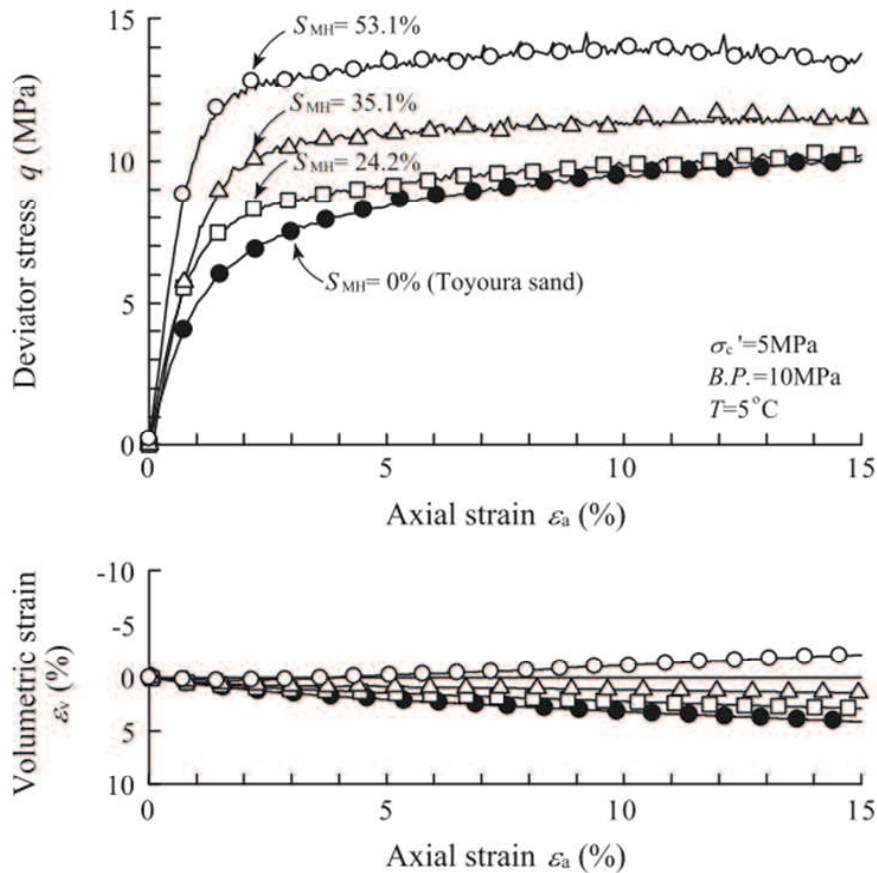


図 1-3-1 豊浦砂のメタンハイドレート飽和率ごとの応力-ひずみ関係 (Hyodo et al., 2013)



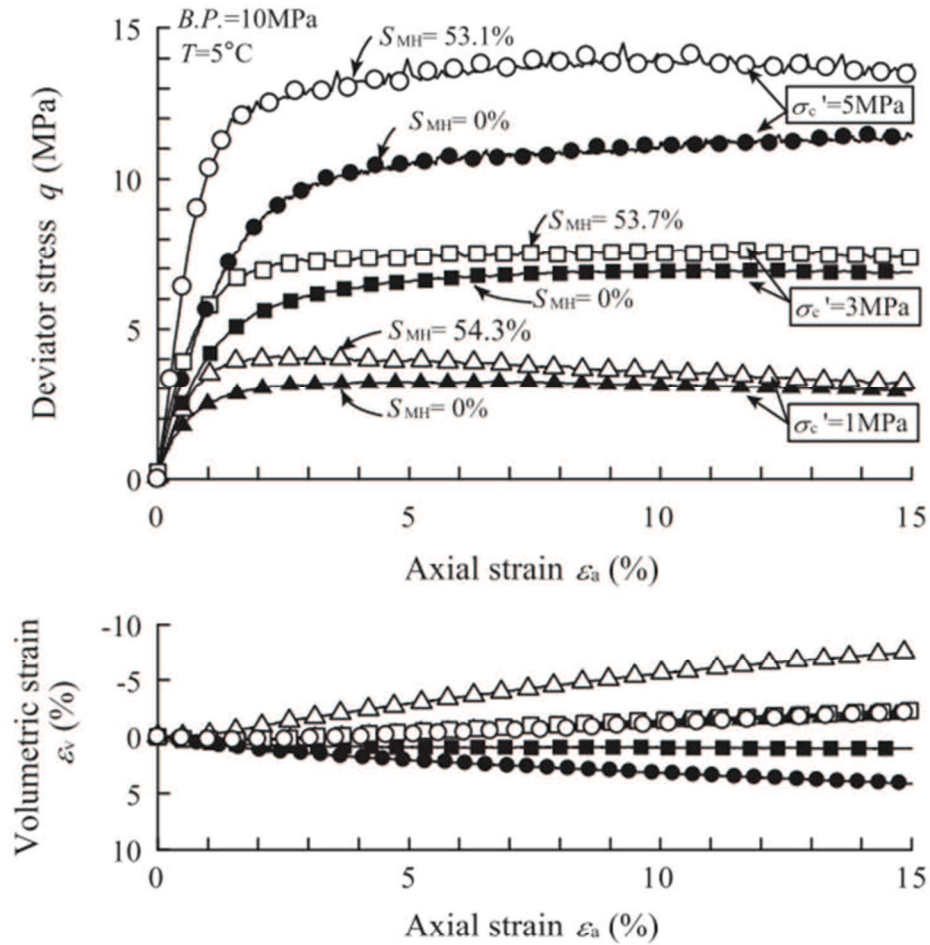


図 1-3-2 豊浦砂のメタンハイドレート飽和率ごとの応力-ひずみ関係 (Hyodo et al., 2013)

ピーク強度が増加していることが明らかである。また、体積ひずみに関しては、収縮から膨張挙動に推移していることが分かる。また、図 1-3-2 に、同じく兵動らによって得られた拘束圧の異なるメタンハイドレート含有砂の応力と軸ひずみの関係を示す。図から、有効拘束圧の増加に伴いメタンハイドレート含有砂の剛性およびピーク強度の増加が認められる。また、メタンハイドレートを生成させる母材となる、ホスト砂と比較すると、対象地盤である南海トラフの土被り圧と同等の有効拘束圧  $\sigma_c' = 1$  から  $3 \text{ MPa}$  においてもホスト砂よりもメタンハイドレート含有砂の方が高い剛性とピーク強度の発現が認められ、対象地盤環境においても、メタンハイドレートによる強度増加が発揮されているものと考えられる。

また、梶井ら(2004)、宮崎ら(2010)はメタンハイドレートを含む天然コア試料の希少性に着目し、ひとつの試料に対して多段階的に载荷を行い、強度特性を検討している。方法を簡略的に示すと、梶井らはメタンハイドレートと密度の近い氷と豊浦砂を混合、宮崎らは豊浦砂に対してメタンハイドレートを生成して供試体を準備している。所定の拘束圧の下、軸载荷を開始する。その後軸差応力がピークに達したと見られる時点で、軸载荷はそのまま継続しつつ、拘束

## 第1章 序論

圧を増加させるものである。図 1-3-3 に梶井ら(2004)によって行われた多段階载荷の主応力差と軸ひずみの関係を、図 1-3-4 に多段階载荷と単調载荷の最大応力を比較した図を示す。図 1-3-4 から、多段階载荷と単調载荷の強度を比較すると、両者に大きな差は認められず、実験の有用性を示している。また、宮崎らも拘束圧一定試験と他段階载荷試験の軸差応力の最大値の差が大きくないことを確認している。これらの結果から、ひとつのコア試料から複数のメタンハイドレート含有砂の強度特性を評価するには有用であると考えられる。

しかし一方で、図 1-3-3 から明らかのように、载荷の第 1 段階、第 2 段階および第 3 段階における軸ひずみに着目すると、各载荷段階で軸ひずみの値が異なり、段階数が増加するほど必然的に軸ひずみの値が大きくなっており、剛性や変形特性の評価は困難である。これらのひずみの増加、供試体の微視的な損傷に関しては、梶井ら、宮崎らも言及している。また、これらの特性に対して、細粒分を含んだ場合の検証は行われていない。細粒分が強度に与える影響に関しては、宮崎らも重要な課題として挙げている。

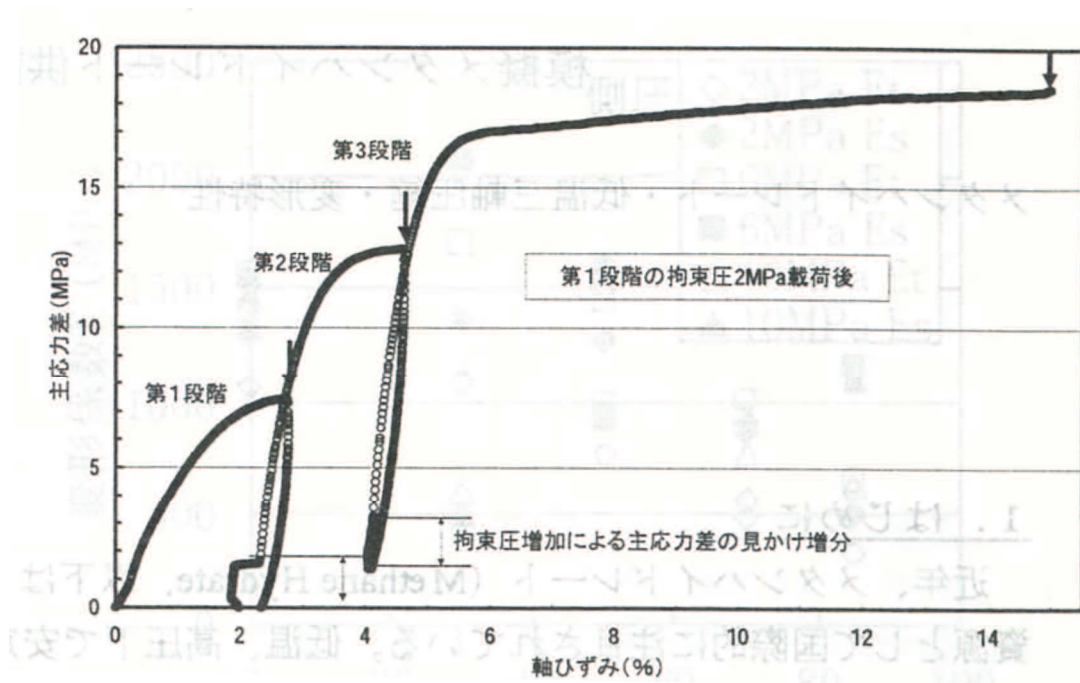


図 1-3-3 多段階載荷の主応力差-軸ひずみ関係(梶井ら, 2004)

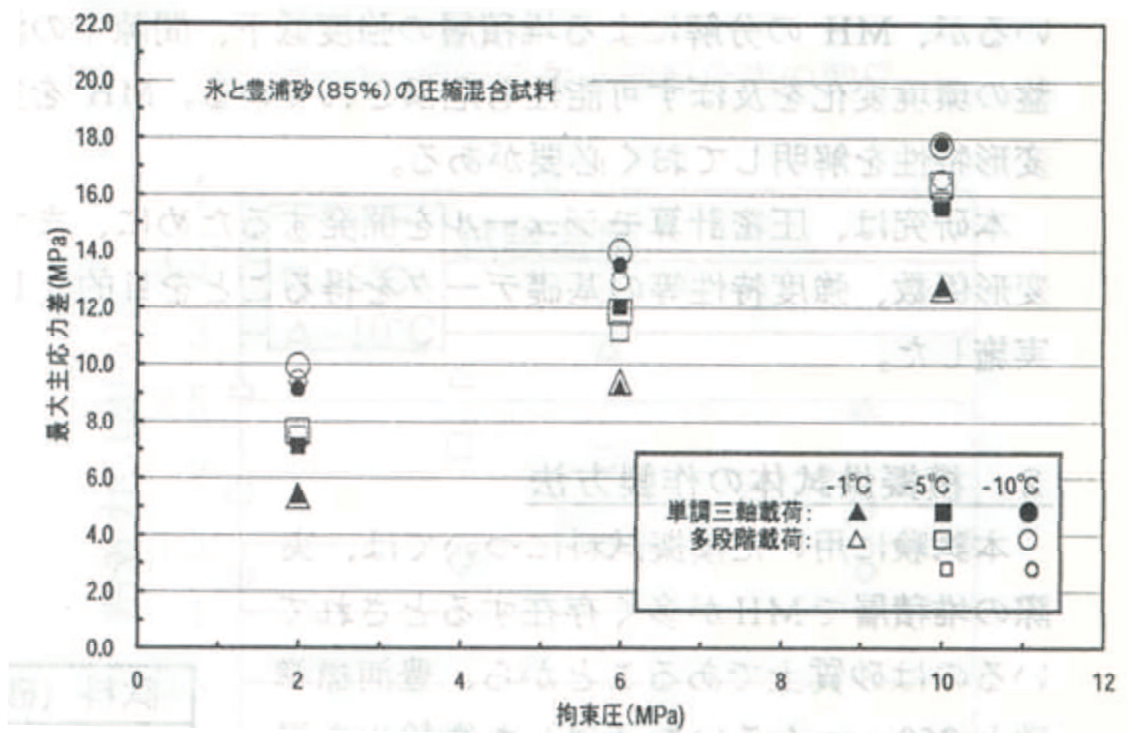


図 1-3-4 多段階載荷と単調載荷の最大主応力差と拘束圧の関係(梶井ら, 2004)

1.3.2 コア試料に対する三軸圧縮特性

南海トラフの地盤の特性を評価するため、MH21 のプロジェクトの一環として、南海トラフのメタンハイドレート濃集層からコアサンプルが採取され、その力学特性が検討されてきた。低温高压で安定して存在できるメタンハイドレートは大気圧状態ではガスに分解してしまうために、通常のコアサンプリングではメタンハイドレート含有砂のコアサンプルを採取することができない。そこで、メタンハイドレートの天然コアサンプルには、海洋科学掘削プロジェクトの中で発展してきた、コアサンプルをボーリングによって現場の圧力を保持したまま、海面まで引き上げる保圧コアリング技術が適用され、研究開発が進められている。南海トラフにおけるメタンハイドレート開発 2004 年に行われた東海沖～熊野灘での基礎試錐の際には、石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)によって開発された保圧コアリング技術である Pressure

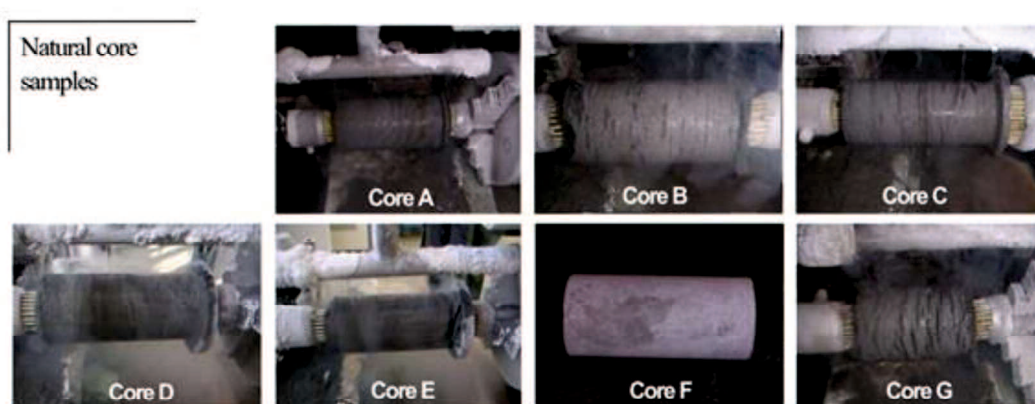
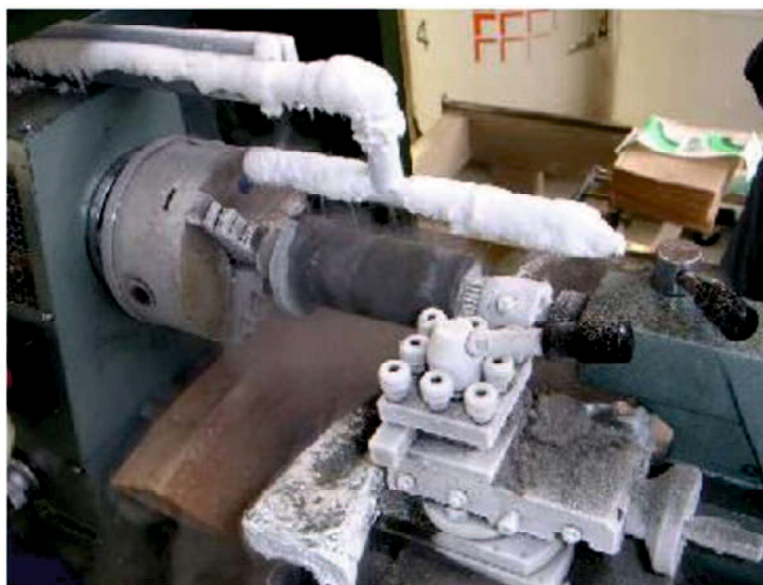


図 1-3-5 メタンハイドレート含有天然コア試料の整形の様子(米田ら，2010 より引用)

Temperature Coring System (PTCS) が用いられた。しかし、PTCS では、天然コアは深海底地盤から採取され採取船上まで引き上げられた後、迅速に脱圧し液体窒素を用いてコアサンプルを凍結保存しメタンハイドレートの分解を防いでいたが、コアサンプルの質の低下が懸念されていた。米田らは、南海トラフから採取した天然コア試料に対して低温で容器内の圧力を脱圧した後に、旋盤上部から液体窒素をかけながら整形を行って三軸圧縮試験を行っている。図 1-3-5 にこの時の整形の様子と、整形後のコアサンプルを示す。図から、南海トラフの天然コアは様々な概観をしていることが分かる。

また、この様に液体窒素によって凍結された試料においても、大気圧状態でメタンハイドレートを完全に分解を防ぐことは困難であり、また、一度脱圧しているために、完全に元地盤の構造を有していることの保障ができない。そこで、より元地盤の状態に近い状態でのメタンハイドレート含有天然コアを用いて特性を評価するために、Aumann & Associates, Inc が Hybrid Pressure Coring System (Hybrid PCS) を開発した。Hydrate PCS はフランジコネクタとボールバルブを備えており、圧力を保持したまま実験装置等に接続できるようになっている。また、コアリングから試験までメタンハイドレートが安定して存在できる条件を保持できる Pressure Core Analysis Transfer System (PCATs) が開発された (Schultheiss et al., 2011)。

このようにして採取したメタンハイドレート含有天然コア試料に対して堆積土の間隙率 (神ら, 2014) や P 波 S 波の速度計測 (Yun ら, 2006), 力学試験 (Yoneda et al., 2015a, 2015b) が行われてきた。Yoneda らは、採取されたメタンハイドレート含有天然コア試料およびに対して三軸圧縮試験を行うとともに、供試体の全周にカメラを設置し試験中の供試体の変形を取得している。図 1-3-6 に Yoneda らが用いたコア試料の写真を示す。図 1-3-7 にこの試料に対して三軸試

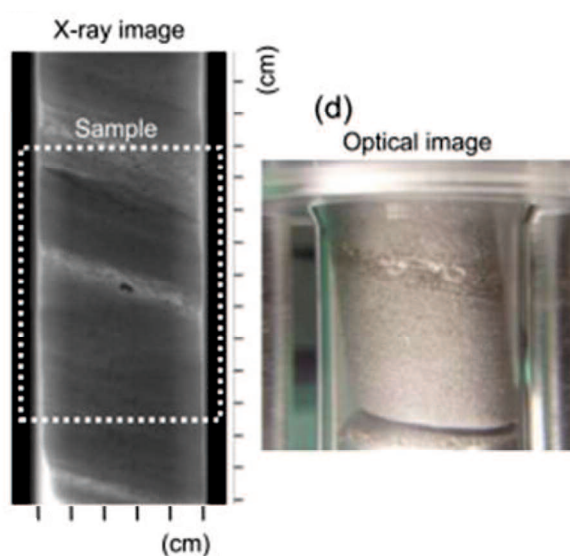


図 1-3-6 メタンハイドレート含有天然コア試料の X 線写真(左)および光学写真(右)

(Yoneda et al., 2015a より一部引用)

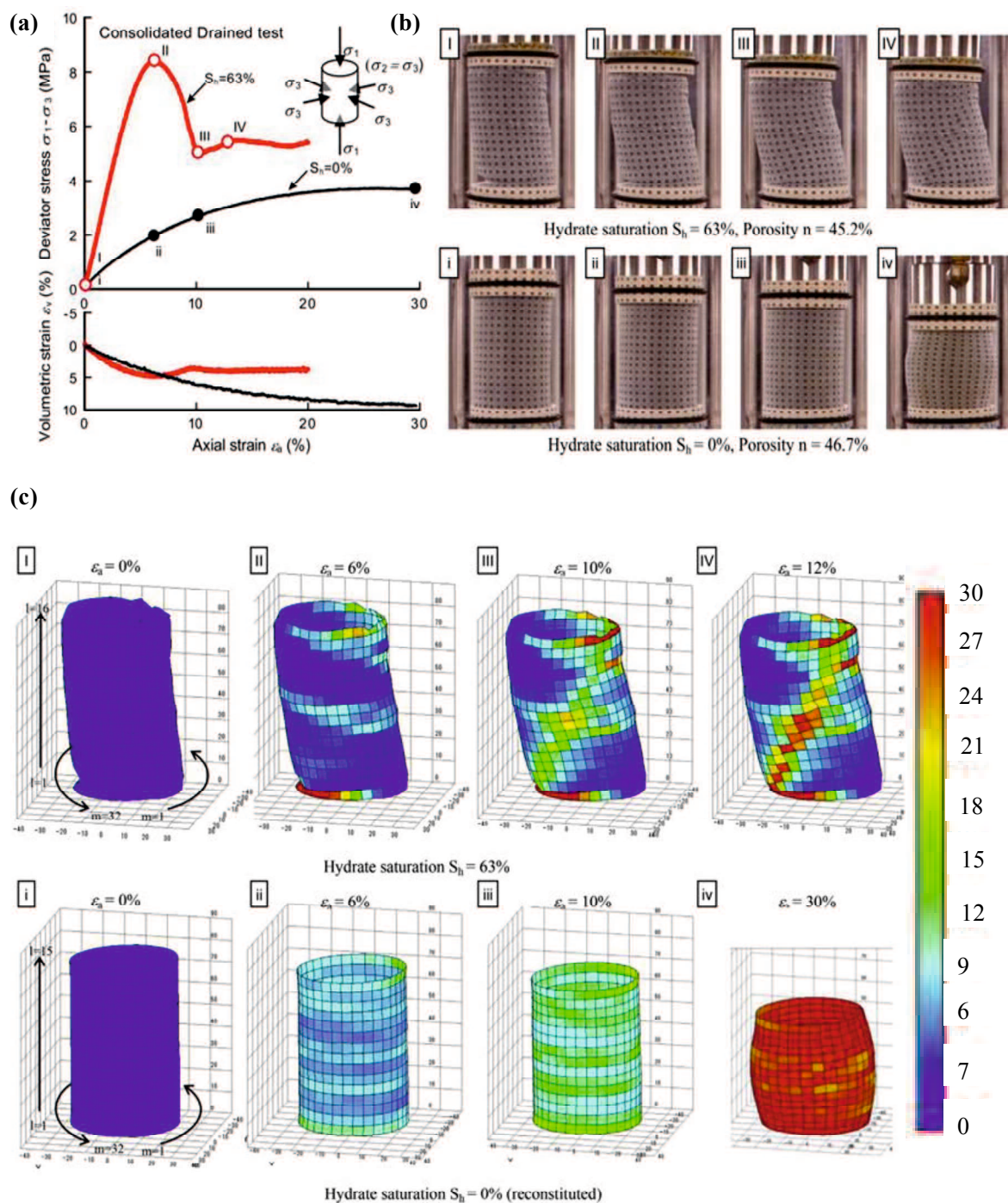


図 1-3-7 メタンハイドレート含有天然コア試料およびメタンハイドレートを含まない試料の(a)応力-ひずみ関係と(b)試験中の供試体の変形の様子および(c)局所軸ひずみの画像解析結果(Yoneda et al., 2015a より引用, カラースケールを一部加筆)

## 第1章 序論

験を行って得られた応力ひずみ関係と撮影画像およびこれらの画像に対して画像解析を行った結果を示す。また、図には再構成したホスト砂の実験結果も併せて示している。図 1-3-7(a)より、メタンハイドレート含有天然コア試料の方が、ホスト砂よりも初期剛性およびピーク強度が高いことが分かる。一方体積ひずみに着目すると、ホスト砂では終始収縮傾向を示しているのに対し、メタンハイドレート含有天然コア試料では収縮挙動から膨張挙動へと推移しており、豊浦砂と同様の傾向が得られている。変形挙動に着目すると、ホスト砂は全体的に変形が進行し、バルジ型に変形しているのに対して、メタンハイドレート含有天然コア試料の方は、せん断帯を形成し、局所的な変形を起こしていることが分かる。この実験結果は、現場の応力状態を保持したまま行われた非常に貴重なデータであり、今後のサンプリング調査に大きく貢献する研究成果である。一方で、不攪乱試料であることから、図 1-3-6 からも分かるように堆積方向に密度が不均質なコア試料は、要素試験として供試体の均質性を保障することが非常に困難である。図 1-3-6 に示す X 線写真から分かるように、供試体に用いている部分には密度の違いが認められ、画像解析からも、メタンハイドレート天然コア試料はせん断帯が生じる前にひずみが生じていることが認められる。

地盤の強度、変形特性は粒度分布や粒子の表面形状、密度や均質性など多くの要因によって支配される。メタンハイドレート含有砂の場合ではさらに、メタンハイドレートによる影響も考慮する必要がある。メタンハイドレートがそれを含有する砂に対して与える強度、変形特性への影響を評価するためには、それ以外の要因違いを無くした上で評価することが重要である。

### 1.4 本論文の目的と構成

#### 1.4.1 本論文の目的

メタンハイドレートは、エネルギー資源を輸入に頼る我が国では在来型の資源として、その開発および生産は非常に重要な事項である。しかし一方で、メタンハイドレートの生産には自噴の有無や温室効果ガスであるメタンガスの漏洩など、既存の石油開発技術だけでは解決できない課題が多い。そのメタンハイドレート生産に際して、地盤工学的な課題に着目すると、掘削に伴う応力変化や、メタンハイドレート生産によって、メタンハイドレート含有層の間隙内のメタンハイドレートがメタンガスに分解することでその固結力が失われ、地盤沈下や海底地すべりなどに起因して生産井の健全性の喪失や生産効率の低下などの問題が危惧されている。このような課題を解決するためにメタンハイドレート含有砂に関して様々な室内試験によって力学特性に関する研究が進められてきた。しかし、現在メタンハイドレートの生産が予定されている南海トラフはタービダイトと呼ばれる砂と粘土が交互に重なり合う砂泥互層であるため、メタンハイドレート生産時の応力変化はその粒土分布によって強度、変形特性が異なると予想される。こうした課題に対して、不攪乱試料を対象に現場の応力状態での圧縮三軸試験が行われている。しかしながら、自然堆積地盤から採取されているためその密度やメタンハイドレート飽和率を管理することは困難で、十分検討されているとはいえない。

メタンハイドレート生産には生産井の掘削からメタンハイドレート生産終了まで応力状態が様々に変化することが考えられる。そして、これらの強度や変形特性はその地盤のメタンハイドレート飽和率、密度、粒子形状および細粒分含有率等の様々な要因が複雑に作用していると考えられる。そこで本研究では、一定の密度およびメタンハイドレート飽和率を有し、かつ細粒分含有率を管理し、複数の試料を用意し、変形特性の評価が容易である平面ひずみ状態でのせん断試験およびメタンハイドレート分解実験を行うことで、細粒分がメタンハイドレート含有砂の変形、強度特性に与える影響を評価している。また、得られた実験結果を踏まえて、メタンハイドレートを固結粒子で再現した個別要素法を用いて、固結粒子が粒状体の内部構造の変形および強度特性に与える影響を評価している。



### 1.4.2 構成

本論文は、序論を含め以下に示す5つの章で構成されている。

第1章 序論

第2章 南海トラフ模擬土の変形および強度特性

第3章 メタンハイドレート分解に伴う土の変形および強度特性

第4章 メタンハイドレート生産を想定した粒状体の力学シミュレーション

第5章 結論

本論文の内容を各章ごとに示すと以下のようなになる。

第1章では、メタンハイドレート開発の歴史や基本的特徴を示した。次いで、砂泥互層中に存在するメタンハイドレート含有砂に対する地盤工学的課題と既往の研究などについてまとめた。さらに、本論文の目的および構成を示した。

第2章では、南海トラフのメタンハイドレート含有砂の強度、変形特性を評価するために、南海トラフ模擬試料と比較材料として豊浦砂、さらに第4章の個別要素法の検証材料としてガラスビーズを試料として平面ひずみ条件でせん断試験を行っている。まず、メタンハイドレートを含有させる各ホスト試料の力学特性について述べている。次に、メタンハイドレート含有砂の力学特性および変形特性について細粒分の違いによる影響を明らかにしている。

第3章では、メタンハイドレート生産井中および生産終了後の応力変化、変形特性を把握するため、恒温高圧平面ひずみ実験装置を用いた減圧法を想定したメタンハイドレート分解実験を行っている。まず、細粒分の有無による減圧中の温度、圧力の変化を示している。さらに、実験中の変形特性を細粒分の有無によって評価を行っている。

第4章では、個別要素法を用いて、平面ひずみ条件にて固結粒状体のせん断および固結除去のシミュレーションを行っている。せん断シミュレーションにおいてメタンハイドレート含有砂の変形、強度特性を再現するとともに、固結除去シミュレーションによってメタンハイドレート生産中の土の内部構造の変化が、全体的な強度、変形特性に与える影響を示している。

第5章では、以上の結果を要約して結論とする。

図1-4-1に本論文の構成を示す。

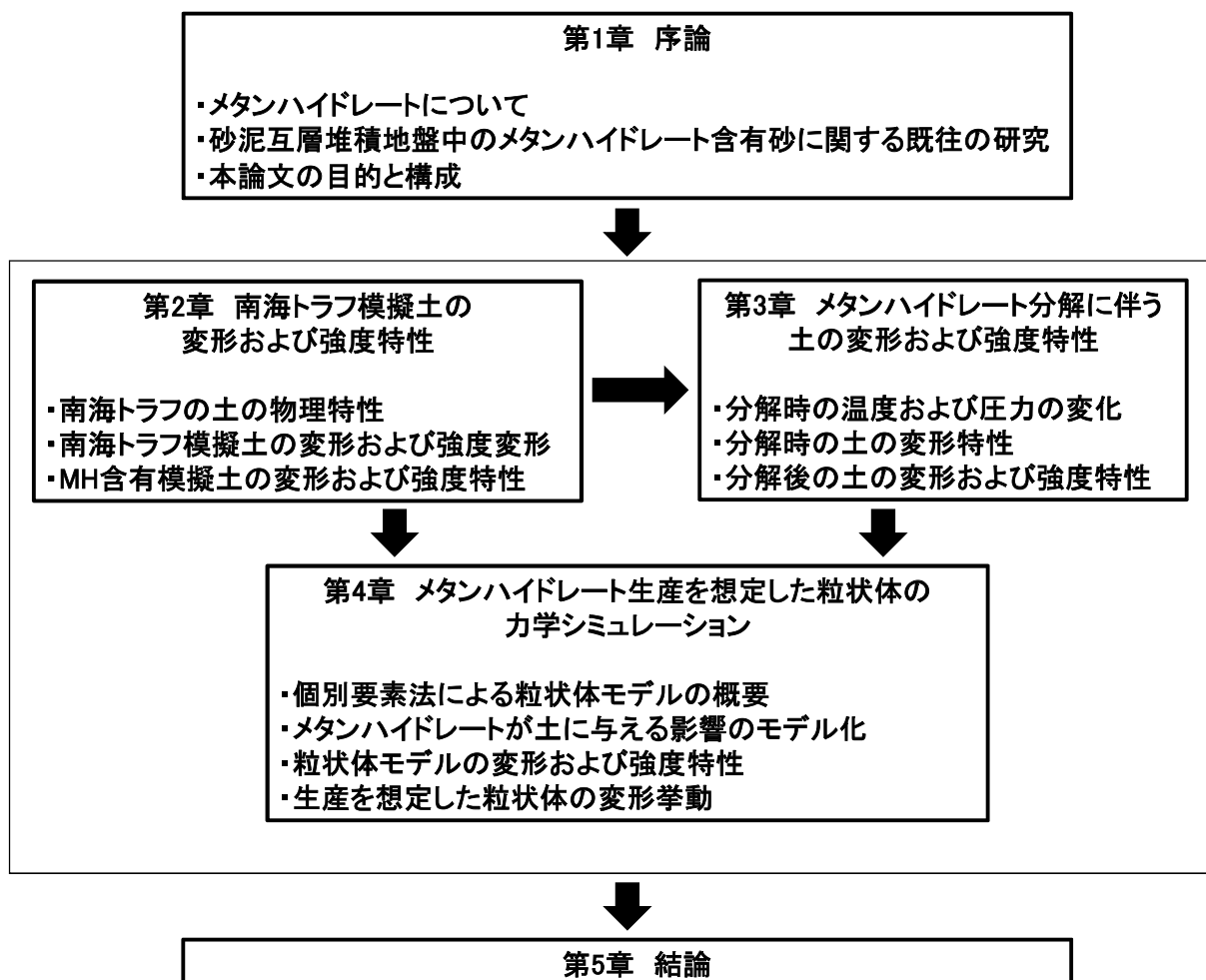


図 1-4-1 本論文の構成

【参考文献】

- Dai S., Santamarina J. C., Waite W. F. and Kneafsey T. J. : Hydrate morphology : Physical properties of sands with patchy hydrate saturation, *Journal of Geophysical Research*, Vol.117, B11205, 2012.
- Jeffery A. P. and Angus I. B. : A laboratory investigation into the seismic velocities of methane gas hydrate-bearing sand, *Journal of Geophysical Research*, Vol.110, B04102, 2005.
- JOGMEC 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構,  
[http://www.jogmec.go.jp/news/release/news\\_02\\_000006.html](http://www.jogmec.go.jp/news/release/news_02_000006.html) (2016年10月31日)
- Hyodo M., Yoneda J., Yoshimoto N., Nakata Y. : Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed, *Soils and Foundations*, Vol.53 (2), pp.299-314, 2013.
- Malone R. D. : Gas hydrates Topical Report. DOE/METC/SP-218, U.S. Department of Energy, April, 1985.
- Schultheiss P., Holland M., Roberts J., Huggett, Q., Druce M. : PCATS: PRESSURE CORE ANALYSIS AND TRANSFER SYSTEM, *Proc. 7th Int. Conf. on Gas Hydrate*, pp.17-21, 2011.
- Thakore J. L. and Holder G. D. : Solid-Vapor Azeotropes in Hydrates in Hydrate-Forming Systems, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 26, p.462-469 1987.
- Yoneda J., Masui A., Konno Y., Jin Y., Egawa K., Kida M., Ito T., Nagao J., Tenma N. : Mechanical behavior of hydrate-bearing pressure-core sediments visualized under triaxial compression, *Marine and Petroleum Geology*, Vol.66, pp.451-459, 2015a.
- Yoneda J., Masui A., Konno Y., Jin Y., Egawa K., Kida M., Ito T., Nagao J., Tenma N. : Mechanical properties of hydrate-bearing turbidite reservoir in the first gas production test site of the Eastern Nankai Trough, *Marine and Petroleum Geology*, 66, pp.471-486, 2015b.
- Yun T. S., Narsilio G. A., Santamarina J. C., Ruppel C. : Instrumented pressure testing chamber for characterizing sediment cores recovered at in situ hydrostatic pressure, Vol.229, pp.285-293, 2006.
- 市川勝他 : 有機貯蔵材料とナノ技術: 水素社会に向けて, 市川勝監修, シーエムシー出版, pp.287-289, 2007.
- 奥井智治, 前田有里子, 平岡龍三 : 二種のゲストを含むハイドレートの組成と安定性, *地質調査所月報*, Vol.49 (10), pp517-526, 1998.
- 倉本真一 : もう1つの海底面-BSR-, *地質ニュース*, Vol.510, pp.12-17, 1997.
- 経済産業省 : エネルギー基本計画の概要平成26年4月,  
[http://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/energy\\_policy/energy2014/seisaku/pdf/ene\\_basic\\_plan.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/energy_policy/energy2014/seisaku/pdf/ene_basic_plan.pdf) (2016年10月31日)

## 第1章 序論

経済産業省：メタンハイドレート開発促進事業（フェーズ2終了時）技術評価結果報告書（中間評価）(案)，産業構造審議委員会産業技術環境文科会研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ配布資料

経済産業省資源エネルギー庁：第3節 一次エネルギーの動向，

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014html/2-1-3.html> (2016年8月4日)

神裕介，今野義浩，長尾二郎：水圧下でのガスハイドレート堆積物試料のサブサンプリング：孔隙スケールでの *in situ* イメージング，第6回メタンハイドレート総合シンポジウム CSMH-8，pp.17-19，2014.

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，Vol.118 (5)，pp.899-912，2009.

成田英夫：メタンハイドレートとは何か，メタンハイドレート資源開発国際シンポジウム講演資料，2010.

成田英夫：第1回洋上産出試験の結果を踏まえたこれからのMH開発計画と商業生産に至る課題(技術状況，技術的，経済的ボトルネック)，一橋大学ガスエネルギー研究会(HGES)講演資料，2013.

林雅雄：メタンハイドレート-資源量評価研究の経緯と最新の成果-，石油天然ガスレビュー，Vol.41 (5)，pp.57-68，2007.

藤山光雄：LNG火力の燃料調達コスト抑制に向けた課題，Business & Review，pp.11-30，2012.

梶井明，緒方雄二，及川寧己，青木一男，蔣宇静：模擬メタンハイドレート堆積物質試料による多段階三軸載荷試験の試み，第39回地盤工学研究発表会，pp.365-366，2004.

松本良：海底メタンハイドレートの資源ポテンシャルに関する検討課題，石油技術協会誌，Vol.60 (2)，pp.147-156，1995.

松本良：堆積学におけるガスハイドレート科学の展望-地球環境科学のパラダイム-，堆積学研究，Vol.58，pp.45-56，2004.

松本良：総説 メタンハイドレート-海底下に氷状巨大炭素リザーバ発見のインパクト-，地学雑誌，Vol.118 (1)，pp.7-42，2009.

宮崎晋行，山口勉，坂本靖英，天満則夫，緒方雄二，青木一男，2010.：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拘束圧の影響，Journal of MMIJ 126 pp.-408-417.

メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム，<http://www.mh21japan.gr.jp/> (2016年10月31日)

メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム：「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」フェーズ1総括成果報告書，平成20年8月版，2008.

森田澄人：表層型メタンハイドレート調査の取り組み，メタンハイドレートフォーラム 2014

## 第1章 序論

講演資料，2014.

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，66 (4) ， pp.742-756，2010.

### 第2章 南海トラフ模擬土の変形および強度特性

#### 2.1 概説

メタンハイドレート生産のための坑井掘削時には応力の変化による地滑りの発生などが懸念される。また、前章で述べたとおり、メタンハイドレート濃集層は砂泥互層を成しており、濃集層内でも粒度分布は広範である。さらに、「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」のフェーズ1総括成果報告書(メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム, 2008)によると、南海トラフのメタンハイドレート濃集層のメタンハイドレート飽和率  $S_{MH}$  は砂層コアで 40～50%, 最高値は80%とばらつきがある(メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム, 2016)。メタンハイドレート開発には地盤の強度のみだけでなく、地盤の変形特性の把握も坑井の健全性を保つ上で重要である。これまで、細粒分を含まない豊浦砂を用いた三軸圧縮試験が行われ、メタンハイドレート含有砂の力学特性が評価されてきた(Hyodo et al., 2013a, 宮崎ら 2011)。さらに、近年では対象地域である東部南海トラフのコアサンプルを採取し、その力学特性が明らかにされ、メタンハイドレートの商業生産に向けて研究が進められている(Yoneda et al., 2015)。しかし一方で、採取されるコアサンプルは自然に堆積した地盤であることから、密度やメタンハイドレート飽和率は管理されていない。

本章では、ホスト砂の粒子形状、メタンハイドレート飽和率、細粒分含有率の違いおよび間隙構造に着目し、粒度分布および粒子形状の異なる4種類の試料を対象にメタンハイドレート含有砂を作製し、恒温高圧平面ひずみ実験装置を用いてせん断試験を行い強度および変形特性の評価を行った。強度特性と同時に変形特性を評価するために、供試体の変形の評価が容易な平面ひずみ状態で複数の試料に対してせん断試験を行うこととした。試料には、標準砂として豊浦砂と鈴木ら(2009)によって分類された南海トラフのメタンハイドレート濃集層の粒度分布および鉱物組成を参照し作製した模擬試料にメタンハイドレートを生成してメタンハイドレート含有砂を作製した。

また、一般に砂のせん断特性が構成する砂の粒子表面形状に影響を受けることは多く報告がされている(片桐ら 2007, Matsushima et al., 2011, Tsumokos and Georgiannou 2010)。これらのことから、メタンハイドレート含有砂においても、力学特性に影響を及ぼすと考えられる。そこで、砂の粒子形状が大きく異なる、形状が球形に近く表面が滑らかなガラスビーズを用いてメタンハイドレート試料を作製した。

## 第2章 南海トラフ模擬土の変形および強度特性

以下に本章の構成を述べる。まず第2節において、実験装置の概要、試料の物理的特性および実験手順を述べる。第3節では、メタンハイドレートを含まない南海トラフ模擬土の変形および強度特性の評価を行う。第4節では、第3節に用いた試料をホスト砂として、メタンハイドレートを生成したメタンハイドレート含有砂の変形および強度特性の評価およびメタンハイドレートの存在形態の評価を行っている。

2.2 実験装置および試料の概要

2.2.1 実験装置の概要

1) 恒温高圧平面ひずみせん断実験装置 (Yoneda et al., 2013)

図 2-2-1 および図 2-2-2 に本研究に使用した恒温高圧平面ひずみせん断実験装置を示す。

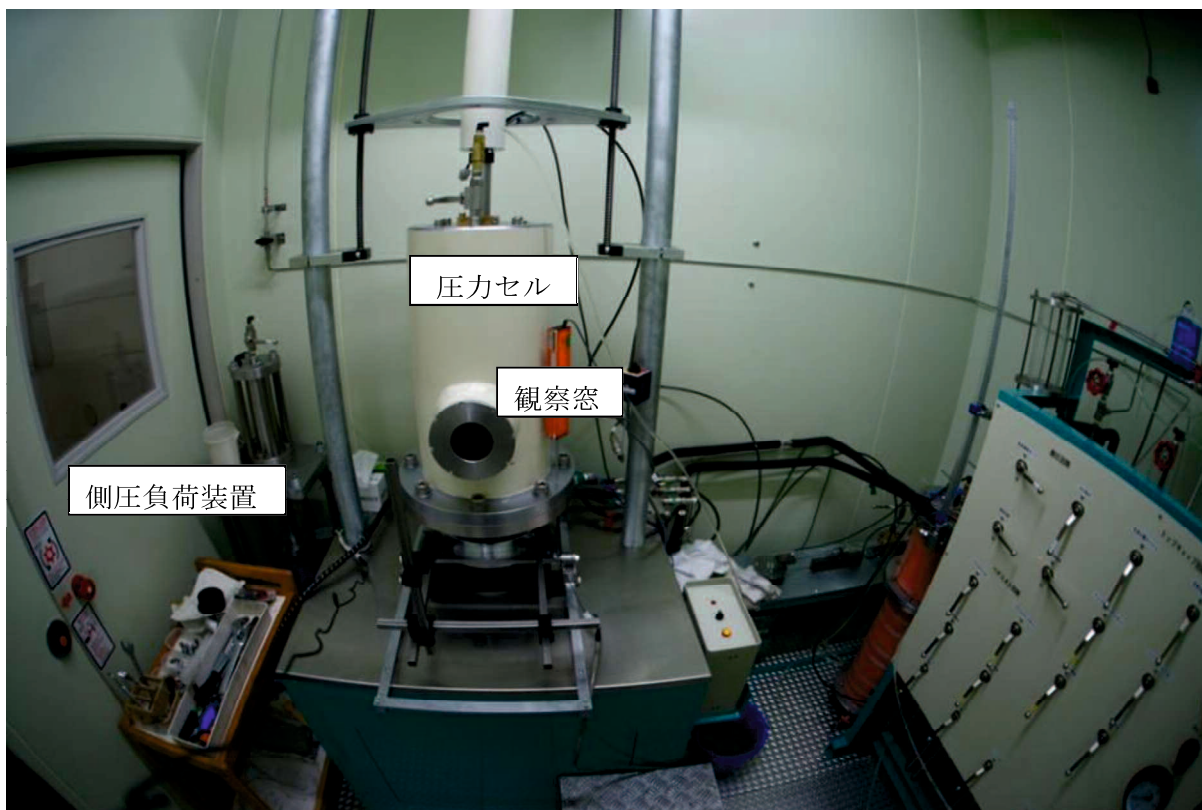


図 2-2-1 恒温室内の実験装置外観





図 2-2-2 恒温室外観

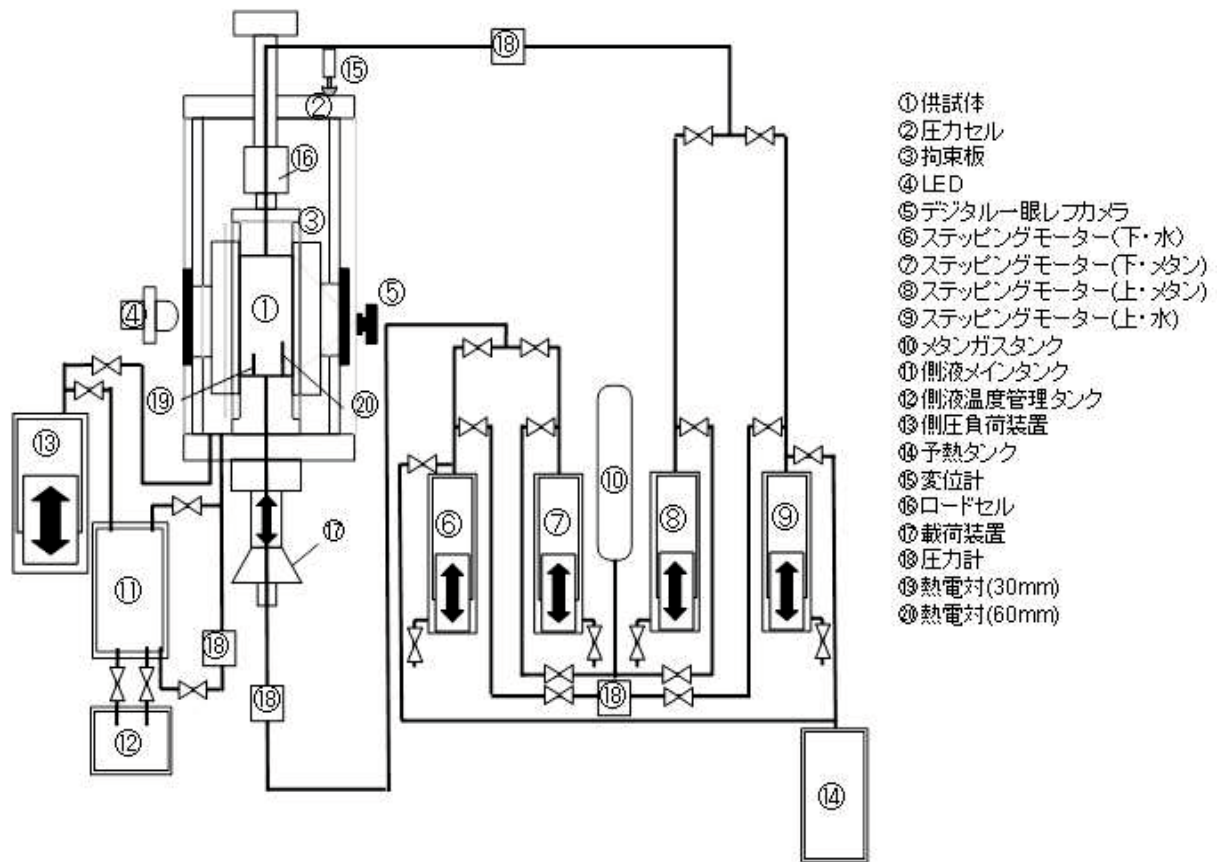


図 2-2-3 実験装置配管図

表 2-2-1 実験装置性能

最大許容拘束圧	20MPa
最大許容背圧	20MPa
最大許容軸荷重	200kN
最大許容変位計	100mm
最大最小温度制御範囲	0～30C°

実験装置の管路図を図 2-2-3 に示す。供試体(①)のは、高さ 160mm×幅 60mm×奥行き 80mm の直方体である。圧力セル(②)は耐圧 20MPa であり、セル前面と背面にそれぞれ厚さ 140mm、直径 75mm のアクリル製観察窓が取り付けられており、供試体前面からのデジタル一眼レフカメラ(⑤)を用いてリモート制御による撮影を行う。拘束板(③)は、アクリル製で観察窓と一体となり供試体を拘束している。また、観察窓背面に LED(④)を設置し圧力セル内を照らし、反射光によって供試体を撮影する。シリンジポンプ(⑥、⑦、⑧、⑨)は、供試体下部及び上部にそれぞれ 2 台ずつ設置されており、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られる。モーターの制御は最小 25 パルスから最大 100000 パルスの制御が可能で、供試体体積±0.001%を計測することができる。メタンガスタンク(⑩)は、ガス浸透法によるメタンハイドレート含有砂を作製する際のメタンガスの供給源である。側液メインタンク(⑪)は、セル内部加圧用の側液が入っており、側液の温度管理を行っている。側液温度管理タンク(⑫)は、側液の管理を行う。側液負荷装置(⑬)は、側液の圧力制御に用いられる。予熱タンク(⑭)は、供試体間隙水の流れる管路の温度管理を行う。変位計(⑮)は、軸方向の変位を計測する。ロードセル(⑯)を用いて荷重計測を行う。最大許容荷重は 200kN であり、許容荷重の 1000 分の 1 の制度で計測可能である。またこれは、熱・圧力に依存しない円筒形のも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ない工夫がされている。載荷装置(⑰)により、軸方向に載荷板を上下させて荷重を加える。圧力計(⑱)により上下の間隙水圧と側圧の測定を行う。なお、供試体内の温度は下端 30mm(⑲)および 60mm(⑳)の位置に設置した熱電対によって計測する。

実験装置の性能は表 2-2-1 に示すとおりであり、低温高压で安定して存在するメタンハイドレートが存在可能な条件を再現できるようになっている。

2) マイクロ스코ープ

用いた粒子の形状を評価するために、マイクロ스코ープを用いて単粒子の形状を取得した。  
図 2-2-4 に使用したマイクロ스코ープの外観を示す。

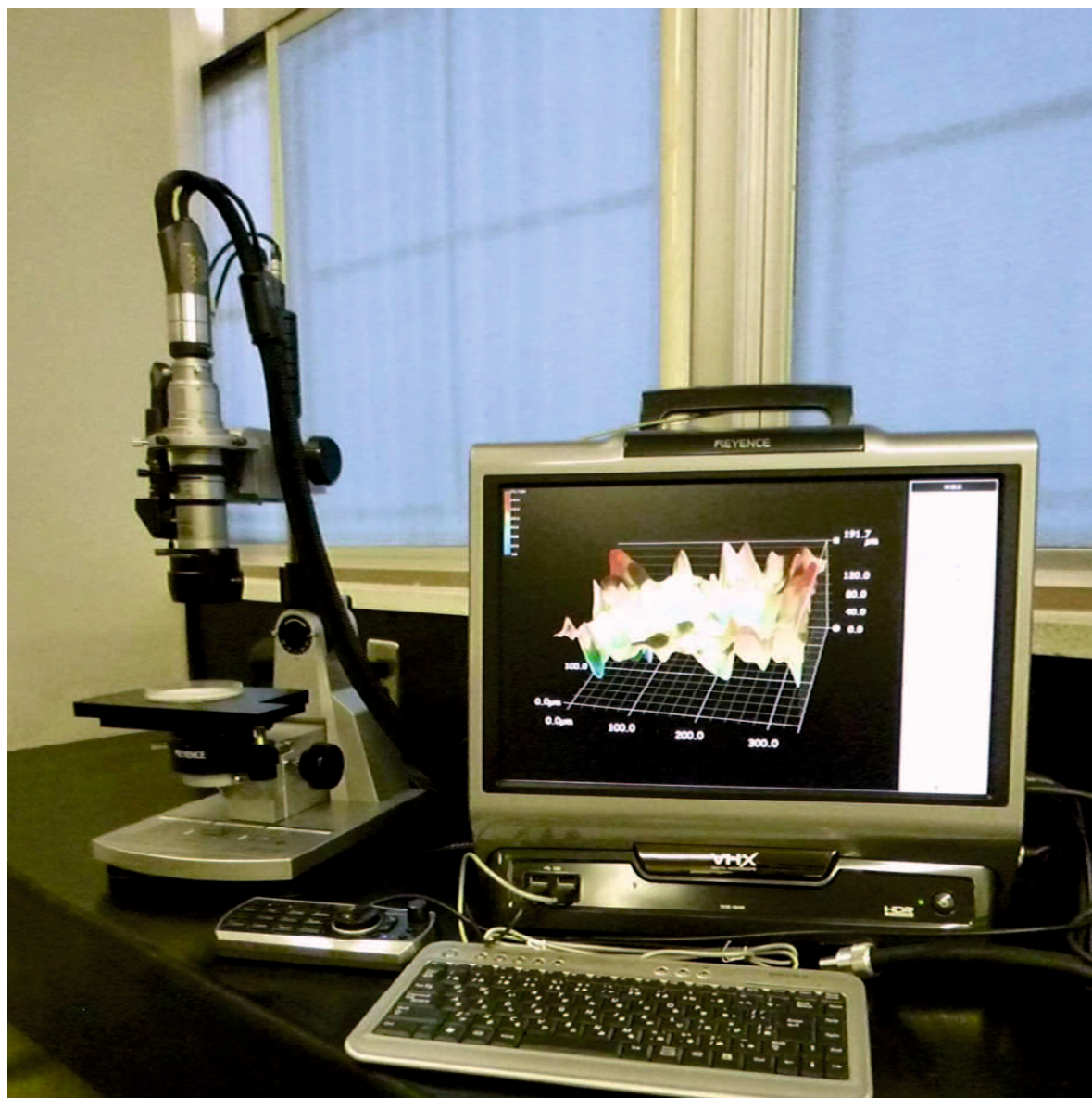


図 2-2-4 マイクロ스코ープ外観

2.2.2 用いた試料について

2.2.2.1 試料の物理的特性

本研究では、標準砂として豊浦砂，表面のなめらかなガラスビーズ，南海トラフの粒度分布を模擬した試料し，細粒分含有率の異なる2種類の模擬試料を使用した．模擬試料は鈴木ら(2009)によって行われた分析から提案された  $T_a \sim T_e$  の内， $T_b$  と  $T_c$  を模擬した試料を用いた．以降，細粒分含有率の低い模擬試料を  $T_b$ ，細粒分含有率の高い方を  $T_c$  と示している．各試料の粒度分布を図 2-2-5 に示す．図中のハッチは，南海トラフにおけるメタンハイドレート濃集層の粒度分布の幅(鈴木ら，2009)を示している．図に示すとおり，メタンハイドレート濃集層の粒度分布において， $T_b$  は細粒分が少なく， $T_c$  は細粒分を多く含んでいる．また，ガラスビーズは  $T_b$  に近い粒度分布を有している．マイクロスコープによって撮影した各試料の顕微鏡写真を図 2-2-6 に示す．また，表 2-2-2 に，模擬試料を作製するために使用した試料および配合割合を示す．

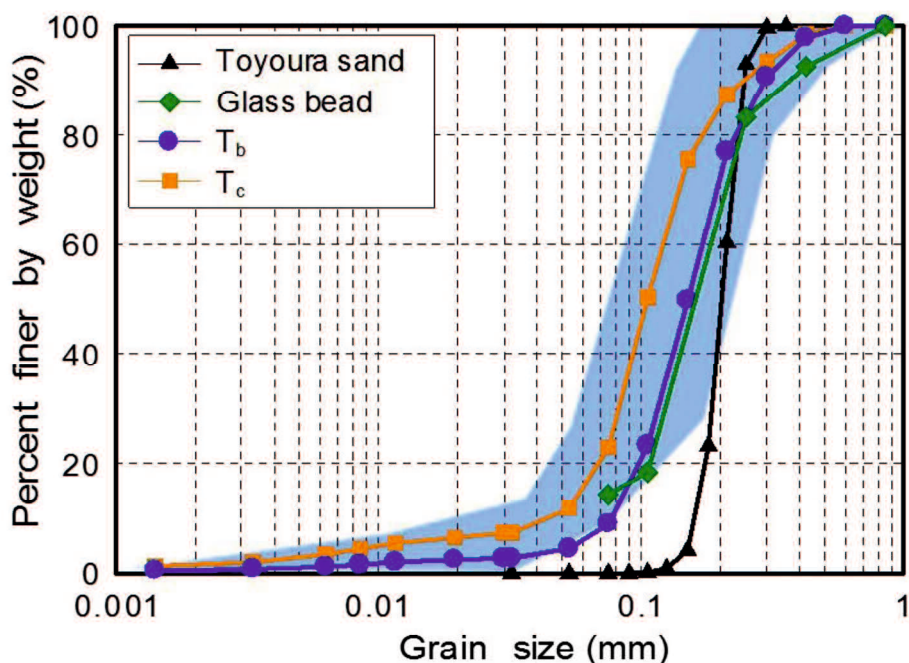
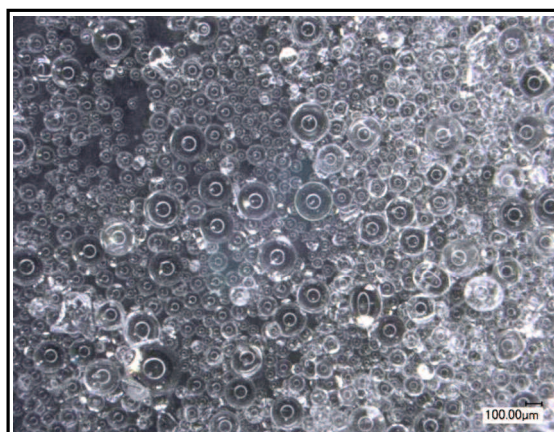


図 2-2-5 各試料の粒度分布



a) Toyoura sand



b) Glass beads



c) T<sub>b</sub>



d) T<sub>c</sub>

図 2-2-6 各試料の顕微鏡写真

表 2-2-2 各試料の配合割合 (重量%)

	No.7 silica	No.8 silica	R5.5 silica	Kaolin	MK-300 mica
T <sub>b</sub>	70	17	10	1	2
T <sub>c</sub>	30	55	7	3	5

## 2.2.2.2 粒子形状の評価

本研究では、粒子形状の表現方法には真円度(Roundness coefficient :  $R_c$ )および縦横比(Aspect ratio :  $A_r$ )を用いた。真円度および縦横比は次式で表される。

$$R_c = \frac{L^2}{4\pi r} \quad (2-1)$$

$$A_r = \frac{a}{b} \quad (2-2)$$

ここで、 $L$  は投影粒子の周囲長であり、 $A$  は投影粒子の断面積である。そして、 $b$  は投影粒子の相当楕円(投影粒子と同面積かつ一次、および二次モーメントの等しい楕円)の長軸長さ、 $a$  は短軸長さである。真円度の値は1に近いほどその形状は円形に近く、逆に値が大きくなるほど形状が角張っていることを示している。今回、豊浦砂およびガラスビーズの真円度および縦横比の値は梶原ら(2011)の結果を用いた。

$T_b$  および  $T_c$  の真円度および縦横比の値は構成する試料より求めた。まず構成する試料の粗粒分 30 粒に対してマイクروسコープを用いて画像を取得し、これらの画像から真円度および縦横比を求め、その平均値を各試料の真円度および縦横比とした。各試料の単粒子の顕微鏡写真を7号珪砂のものを図 2-2-7 に、8号珪砂のものを図 2-2-8 に、R5.5のものを図 2-2-9 にそれぞれ示す。また、これらから得られたそれぞれの試料の真円度および縦横比を表 2-2-3 に示す。なお、今回細粒分の真円度および縦横比は粗粒分の長軸長さおよび短軸長さと比較し非常に小さいことから、値を1とした。表より、ガラスビーズが他の試料に比べて非常に円形に近いことが明らかである。

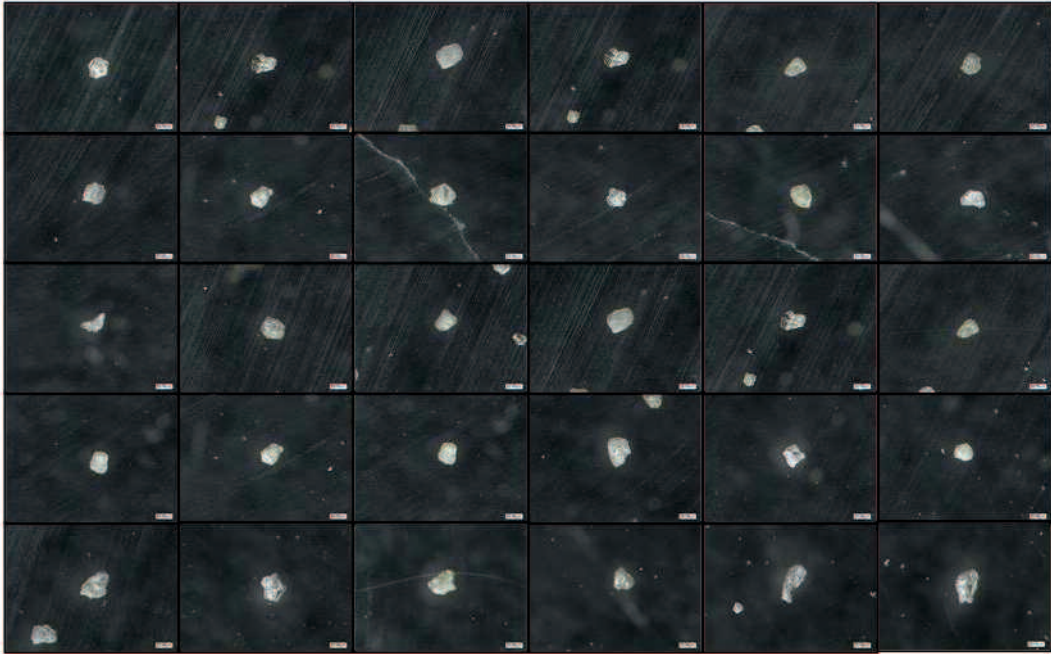


図 2-2-7 7号珪砂の短粒子顕微鏡写真

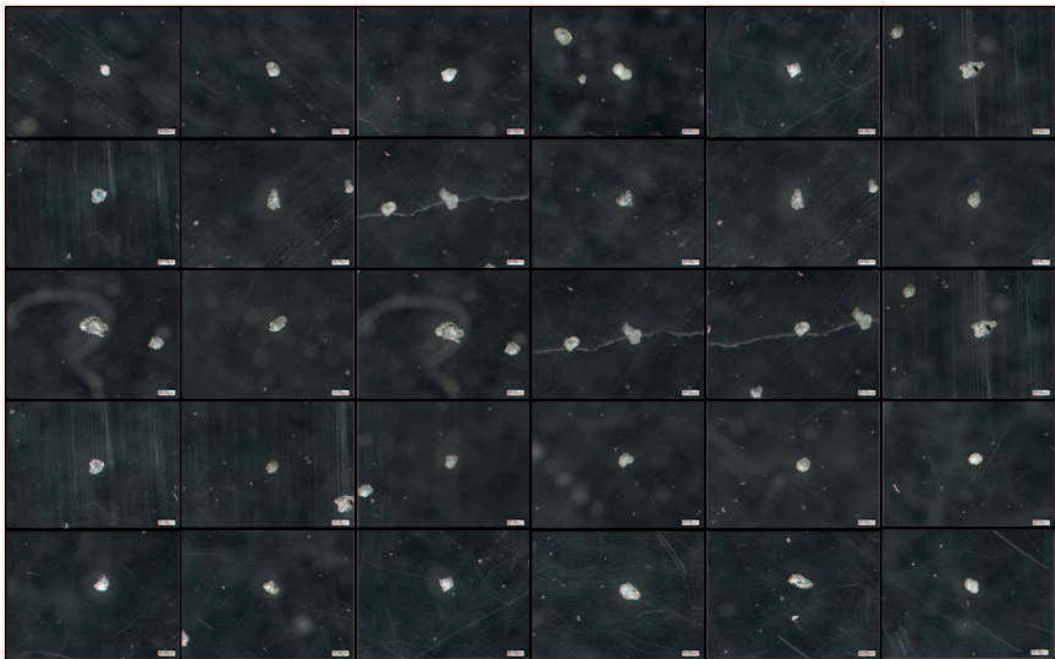


図 2-2-8 8号珪砂の短粒子顕微鏡写真



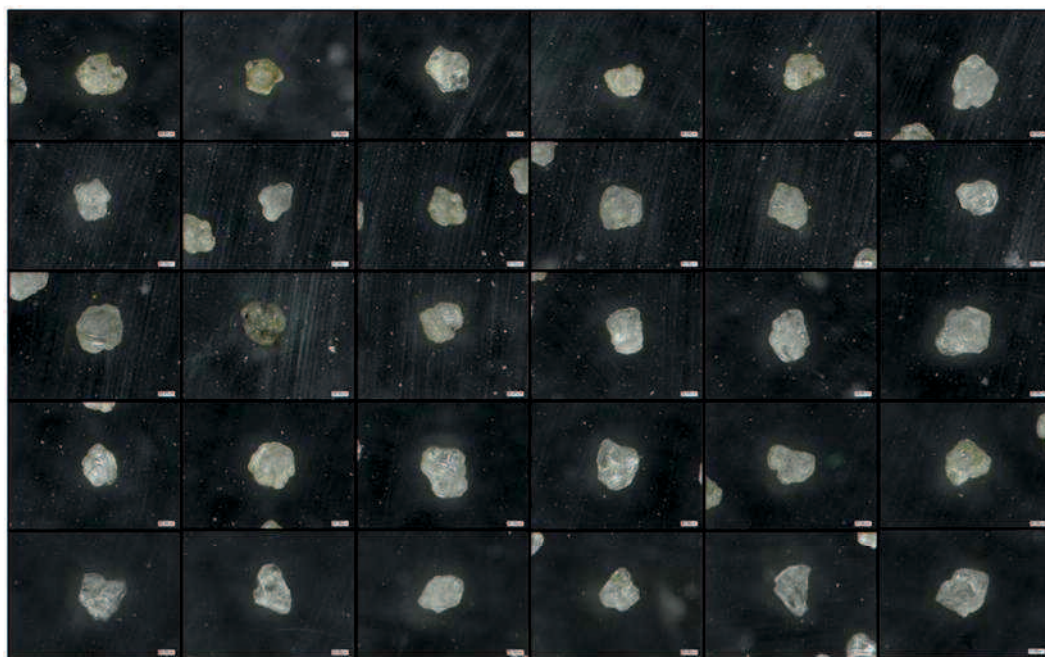


図 2-2-9 5.5号珪砂の短粒子顕微鏡写真

表 2-2-3 各試料の真円度および縦横比

	Roundness coefficient	Aspect ratio
Toyoura sand	1.34	1.39
Glass beads	1.01	1.04
T <sub>b</sub>	1.33	1.31
T <sub>c</sub>	1.29	1.28

## 2.2.3 供試体の作製方法と実験手順

本研究では、目標とするメタンハイドレート飽和率  $S_{MH}$  から水の量を式(1)によって算出し、供試体の初期含水比を定め、目標の湿潤密度の供試体を作製した。

$$w_{initial} = \frac{(S_{MH}/100) \cdot V_V \cdot \rho_H}{m_s} \cdot A \quad (2-3)$$

ここに  $w_{initial}(\%)$  は供試体の初期含水比、 $\rho_H$  はハイドレートの密度(メタンハイドレート:  $0.912(\text{g}/\text{cm}^3)$ )、 $m_s(\text{g})$  は砂の質量であり、 $A$  はハイドレートに含まれる水の質量百分率である。メタンハイドレートの場合、分子式  $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  より  $A = 108/124 \times 100 = 87.1(\%)$  となる。メタンハイドレートの理論分子式は  $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$  であるが、人工メタンハイドレートの水和数は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、本論文ではメタンハイドレートの分子式を  $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  として計算を行った。

メタンハイドレートは一定の圧力・温度条件を満たすとメタンガスと水が反応することにより生成されるため、ガス、水いずれかの量によって生成するメタンハイドレートの量を調整することが可能である。本研究では水の量によりメタンハイドレート飽和率  $S_{MH}$  を調整している。任意のメタンハイドレート飽和率  $S_{MH}$  に作成するため、目標とするメタンハイドレート飽和率から算出した水の質量と、相対密度90%となるよう算出した各試料を混ぜ合わせ、幅60mm、奥行き80mm、高さ160mmの供試体を湿潤突き固め方で作製した。なお、メタンハイドレート飽和率  $S_{MH}$  とは供試体の間隙  $V_V$  をメタンハイドレートの体積  $V_{MH}$  の占める割合のことをいい、式(2-2)で表される。

$$S_{MH} = \frac{V_{MH}}{V_V} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2-4)$$

- (a) 恒温室内を  $5^\circ\text{C}$  に設定する。
- (b) ペDESTALにアクリル製のモールドを取り付ける。
- (c) 所定の含水比になるように調整した試料を12層に分けて突き固めて供試体を作製する。
- (d) セルに水を満たし、有効拘束圧を  $0.2\text{MPa}$  に保ちながら供試体内にメタンガスを背圧(メタンガス圧)  $5\text{MPa}$  となるまで圧入する。
- (e) 背圧(メタンガス圧)を  $5\text{MPa}$  に保つように制御する。流入量を随時監視し、ガス流入の顕著な増加が認められなければハイドレート化が完了したと判断し生成完了とした。なお、(d)および(e)の過程は、メタンハイドレートを生成させないホスト砂の試験の場合は省略する。
- (f) 約1.3倍の量の水を通水し、水で飽和させる。

- (g)所定の有効拘束圧条件にて圧密を行う。
- (h)せん断を行う。この時、実験装置前面の観察窓よりデジタル一眼レフカメラを用いてリモートによる供試体の撮影を行い、1分毎の供試体の画像を取得する。なお、この時のせん断速度は0.1%/minとした。
- (i)せん断終了後、シリンジポンプを用いて背圧を3MPaまで減圧しメタンハイドレートを分解する。ポンプの移動量よりメタンガス量を算出する。
- (j)取得した画像に対して、幾何補正を行った後、PTV画像解析を行う。

### 2.2.4 PTV 解析による画像解析法 (村上, 2008)

本研究では、供試体の変形を定量的に表わすために粒子追跡法による画像解析を行った。

粒子追跡法 (Particle Tracking Velocimetry 以下 PTV と呼ぶ) とは、ある時間間隔で画像中の各トレーサ粒子の移動を自動的に追跡し、流れ場を計測する方法である。最初に可視化画像の輝度関数から個々の粒子像を抽出するため、一般に原画像である濃淡画像から二値画像を求める。二値化とは、ある濃度値をしきい値として背景領域と対象領域に分割することにより、濃淡が白と黒の2値で表現された画像にすることである。そして、それぞれの粒子像の位置情報や、輝度、大きさといった付随情報を二値画像を用いて取得し、粒子像の移動を解析する。ただし、粒子追跡の立場をとる多くの手法は位置情報のみを用いて解析している。複数時刻にわたり粒子像の移動方向が大きく変わらないことや、周囲の粒子像との相対位置関係が大きく変わらないことなどを利用して、複数時刻にわたる同一粒子像を追跡する。個々の粒子像を精度よく追跡するため、粒子数密度が中程度以下の粒子画像が2~4時刻分用意される。また、画像相関法では測定点まわりの空間平均的な速度を求めるが、粒子追跡法は個々の粒子の追跡を行うため、速度勾配の大きな領域などを高空間解像度で正確に測定できるという特徴がある。

PTV の利点は、画像相互相関法に比べて高い空間解像度の計測ができる点である。画像相関法では、数個から数十個のトレーサ粒子が含まれる検査領域を設け、検査領域内の粒子像分布状態を判断基準として、次時刻の粒子像群の移動先を求める。

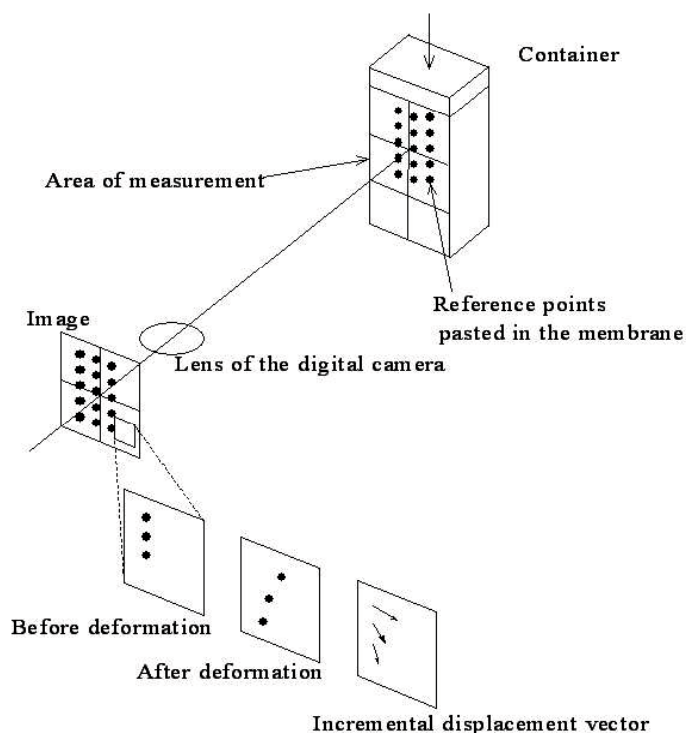


図 2-2- 10 PTV 計測の原理 (米田, 2011)

PTV 計測の原理を図 2-2-10 に模式的に示す。まず初期状態（変位を与えていない状態）でデジタルカメラを用いて画像を撮影する。その後、供試体にある変位を与えデジタルカメラを固定したまま、再度画像を撮影する。このように、変位を与えながら画像を撮影し、ある変位の際の画像とそれからさらに変位した画像の 2 枚の画像を用いて、画像上での変位 (pixel) を求め、それを実値 (mm) に直し計測を行う。しかし、今回の実験に際して、圧力条件が非常に高圧であるため、拘束板のアクリルの厚さを厚くせざるを得ない。そこで、撮影環境の問題で PTV により変位を読み取れないものに関しては、メンブレンに書いた 5×5mm のメッシュの交点を写真から読み取った。

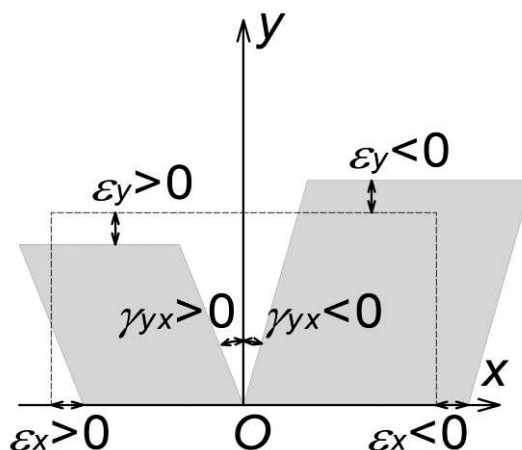


図 2-2-11 ひずみの定義と正負

次にひずみの算定法について述べる。

地盤の局所的な変位が求まると，山口大学で開発したひずみ算出プログラムにより下記のひずみを算出できる．ここで，x 軸を水平方向に，y 軸を鉛直方向にとり，各々のひずみは以下の式で与えた．

- ・ 水平方向のひずみ  $\varepsilon_x$

$$\varepsilon_x = -\frac{\partial u}{\partial x} \quad (2-5)$$

ここで， $u$ : 水平方向の変位

- ・ 鉛直方向のひずみ  $\varepsilon_y$

$$\varepsilon_y = -\frac{\partial v}{\partial y} \quad (2-6)$$

ここで， $v$ : 鉛直方向の変位

- ・ せん断ひずみ  $\gamma_{yx}$

$$\gamma_{yx} = -\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (2-7)$$

- ・ 体積ひずみ  $\varepsilon_v$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y \quad (2-8)$$

- ・ 最大せん断ひずみ  $\gamma_{\max}$

$$\gamma_{\max} = \sqrt{(\varepsilon_y - \varepsilon_x)^2 + \gamma_{yx}^2} \quad (2-9)$$

各々のひずみの正負は図 2-2-11 のようになる．体積ひずみ  $\varepsilon_v$  は，収縮を正，膨張を負としている．さらに，最大せん断ひずみ  $\gamma_{\max}$  は，式からもわかるように，正のみの値である．

2.2.5 供試体中のメタンハイドレートの分布

図 2-2-12 に、山口大学において作製したメタンハイドレート含有豊浦砂に対して、FE-SEM を用いて米田(2009)が撮影した写真を以下に示す。図に示す供試体は、本研究に用いた供試体と同様の手順で湿潤突固め法によって作製されたものである。図 2-2-13 はメタンハイドレート飽和率 50%の試料を示している。また、図中の MH はメタンハイドレートを意味しており黒色のものがメタンハイドレートである。撮影した写真は密度が高いものほど白く写り、低いものほど黒く写る。図より、白く写った土粒子の周りにメタンハイドレートが固着していることが分かる。また、FE-SEM による定性分析結果より、炭素 C に強度が現れることが確認されており、メタンハイドレートが生成されていることが確認されている。メタンハイドレートの固着状況を詳しくみるため拡大して撮影されたものを、図 2-2-14 に示す。図より土粒子表面にメタンハイドレートが固着している産状が見られる。また土粒子間の距離が近い部分は土粒子間にメタンハイドレートが入りこみ粒子同士を固結していることが分かる。米田は、次にこの状態

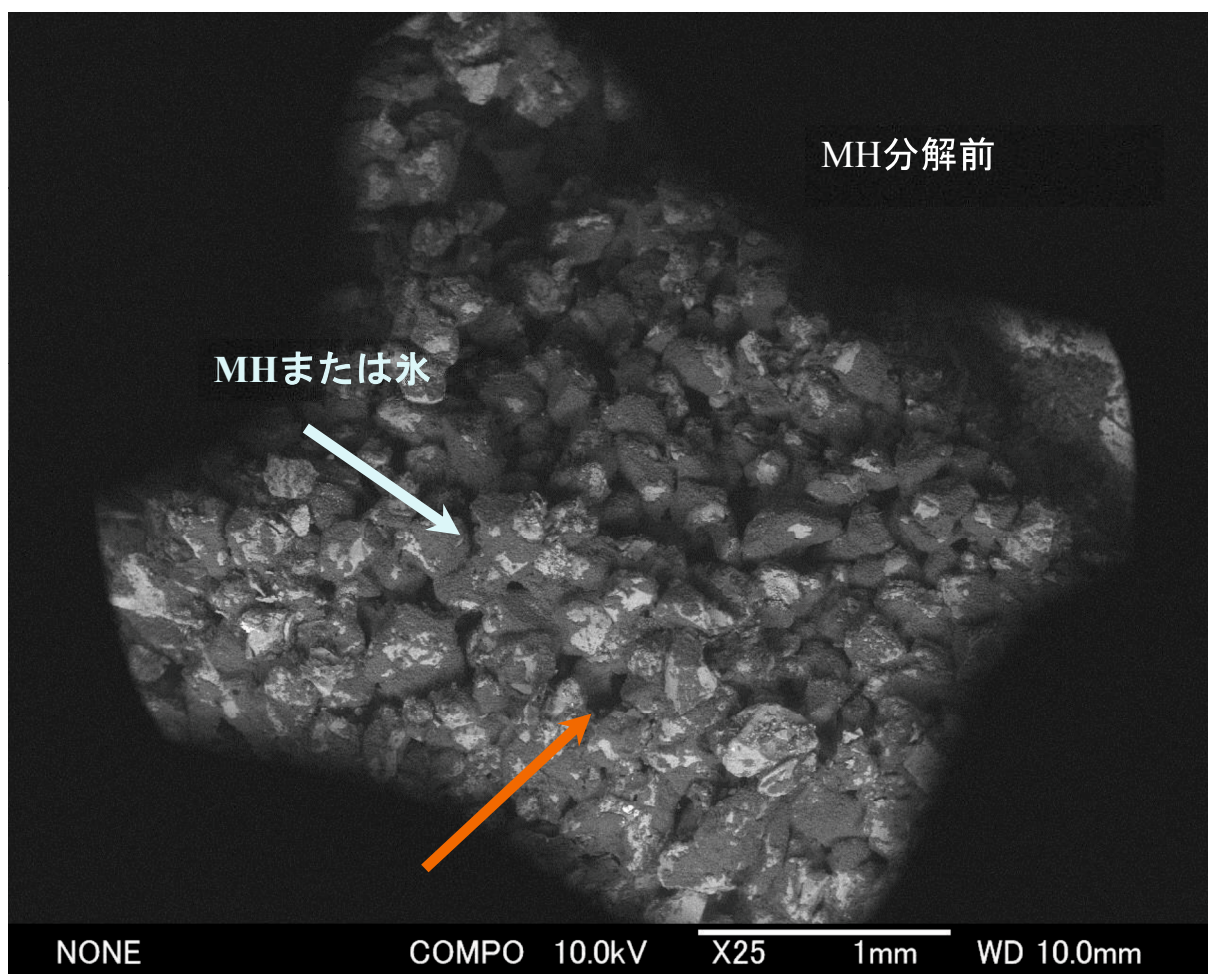


図 2-2-12 供試体中のメタンハイドレートの様子の写真倍率 25 倍 (米田, 2009 より引用)

から徐々に温度を上げ、メタンハイドレートを分解している。

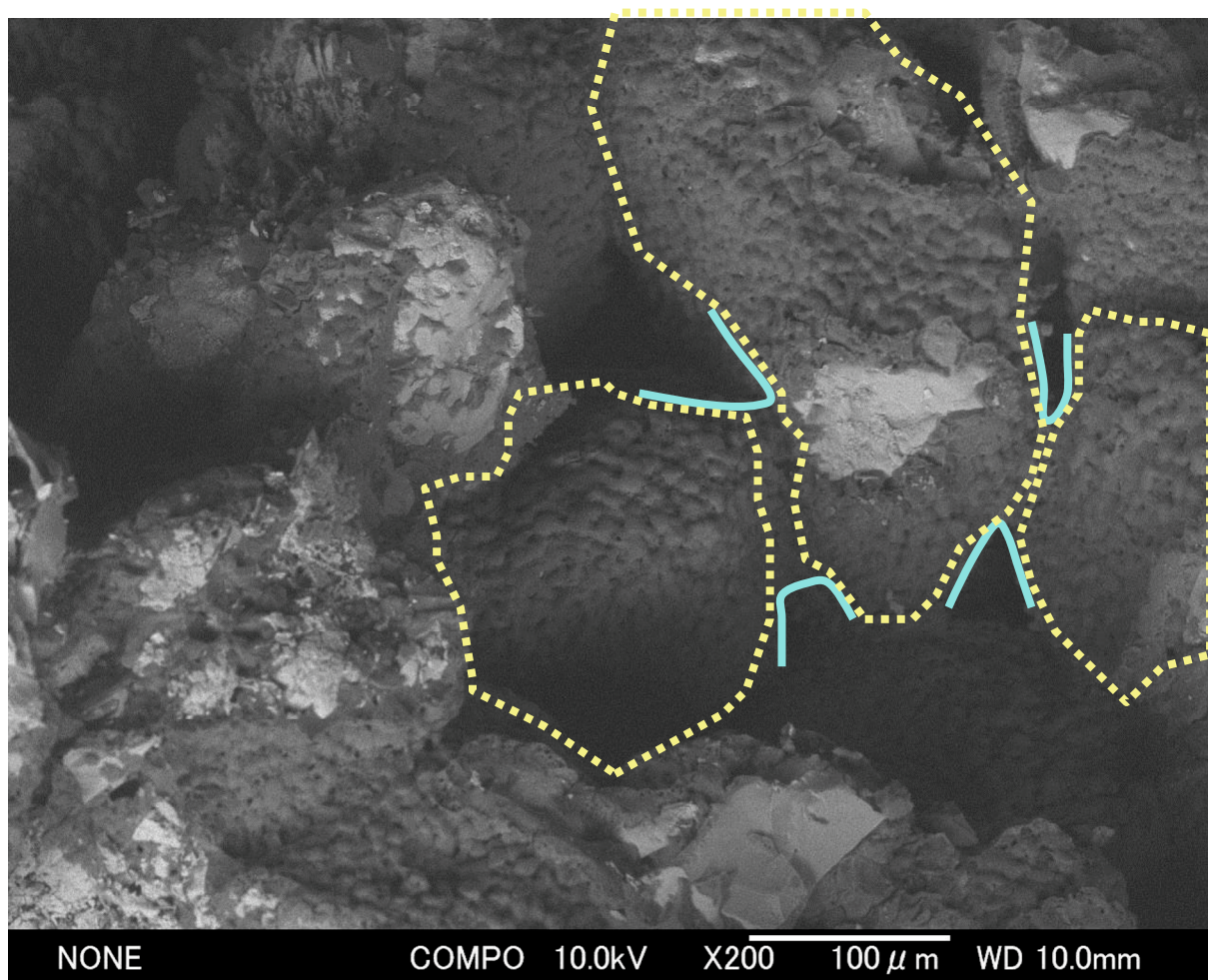


図 2-2-13 供試体中のメタンハイドレートの様子の写真倍率 200 倍  
(米田, 2009 より引用)



図 2-2-14 に、メタンハイドレートが完全に分解した時点の供試体の写真を示す。図から分かるとおり、土粒子間には隙間となった。これより、メタンハイドレートが土粒子間に存在、固結しており、固体として隙間を埋めていたことが視覚的に捉えられている。本研究に用いた供試体においても、メタンハイドレートが同様の分布を示すものと推察される。



図 2-2-14 分解後の供試体中のメタンハイドレートの様子の写真倍率 200 倍  
(米田, 2009 より引用)

### 2.3 南海トラフ模擬土の変形および強度特性

#### 2.3.1 南海トラフ模擬土の強度特性

表 2-3-1 に実験条件の一覧を示す。4 種類の試料に対して、メタンハイドレートを生成させずに 2.2.3 の手順にて平面ひずみ条件でせん断試験を行った。試料ごとの応力と軸ひずみの関係を図 2-3-1 に豊浦砂、図 2-3-2 にガラスビーズを、図 2-3-3 に  $T_b$  を、図 2-3-4 に  $T_c$  をそれぞれ示す。図より、どの試料においても有効拘束圧が増加するにつれ、初期剛性およびピーク強度が増加していることが確認される。体積ひずみに着目すると、どの試料も有効拘束圧が増加するにつれ、収縮傾向が顕著になっていることが明らかである。これは、有効拘束圧が増加するにつれ、粒子破砕が顕著に起こっているためと考えられる。また、ガラスビーズに関しては、ピーク強度発現後、スティックスリップ現象を起こしており、有効拘束圧が大きくなるにつれ顕著に起こっていることが確認される。図 2-3-5 に有効拘束圧  $\sigma'_c = 3\text{MPa}$  における各試料のせん断試験結果の比較を示す。シリカ系を主体とした豊浦砂、 $T_b$  および  $T_c$  を比較すると細粒分含有率が増加するほどに初期剛性およびピーク強度の減少が確認される。体積ひずみに関しては、細粒分が増加するほどに収縮傾向が顕著になっていることが分かる。ガラスビーズでは細粒分含有率にかかわらず初期剛性はもっとも高くピーク強度は最も低い結果となった。次に各試料の強度定数を調べるために、各せん断試験の応力ひずみ関係からモールの応力円およびクーロンの破壊線を描いた。豊浦砂の結果を図 2-3-6 (a) に、ガラスビーズの結果を (b) に、 $T_b$  の結果を (c) に、 $T_c$  の結果を (d) にそれぞれ示す。図から、ガラスビーズでは、粘着力が  $0.1\text{MPa}$ 、内部摩擦角が  $28^\circ$  の値をとった。ガラスビーズは他の試料と比較して内部摩擦角が非常に小さい値をとっていることが分かる。シリカを主体とした豊浦砂、 $T_b$ 、 $T_c$  の 3 種類を比較すると、細粒分が増加するに従って粘着力は小さく、内部摩擦角は大きくなる結果となった。また、今回の実験では高圧域のみで実験を行ったため、粒子破砕により粘着力は見かけの粘着力を示していると推察される。図 2-3-7 に各試料のピーク強度と真円度および縦横比の関係を示す。図から、真円度および縦横比が大きくなるほど強度が増加していることが明らかである。

表 2-3-1 試験条件

Name of Host material	Degree of Saturation by $MH^*$ $S_{MH}$ (%)	Back Pressure B.P.(MPa)	Effective Confining Pressure $\sigma'_c$ (MPa)	Cell Pressure $\sigma_c$ (MPa)	Temperature $T$ (°C)	Specific Density $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Void ratio $e$	Porosity $n$ (%)
Toyoura sand	0 (Host sand)	10	1.0	11.0	5	2.64	0.647	39.3
			3.0	13.0			0.653	39.5
			5.0	15.0			0.634	38.8
Glass beads	0 (Host sand)	10	1.0	11.0	5	2.50	0.461	31.6
			3.0	13.0			0.462	31.6
			5.0	15.0			0.460	31.5
$T_b$	0 (Host sand)	10	1.0	11.0	5	2.66	0.631	38.7
			3.0	13.0			0.632	38.7
			5.0	15.0			0.650	39.4
$T_c$	0 (Host sand)	10	1.0	11.0	5	2.67	0.659	39.7
			3.0	13.0			0.656	39.6
			5.0	15.0			0.657	39.7

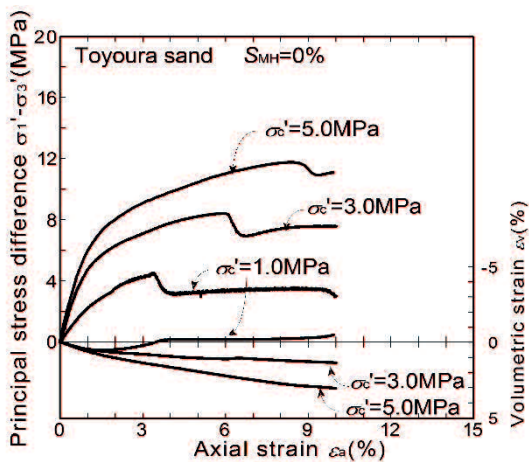


図 2-3-1 豊浦砂の応力-ひずみ関係

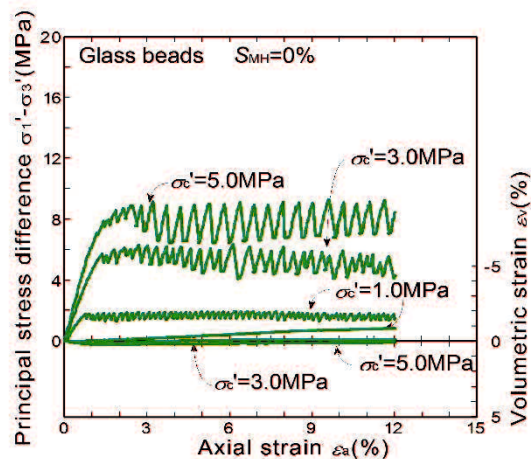


図 2-3-2 ガラスビーズの応力-ひずみ関係

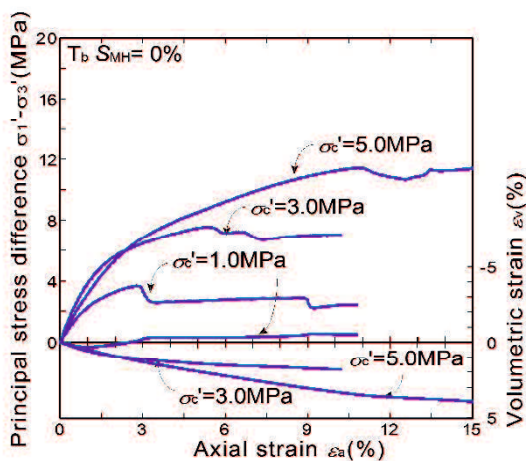


図 2-3-3 T<sub>b</sub> の応力-ひずみ関係

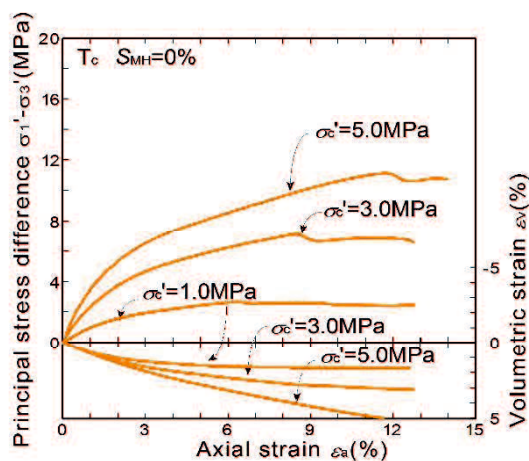


図 2-3-4 T<sub>c</sub> の応力-ひずみ関係

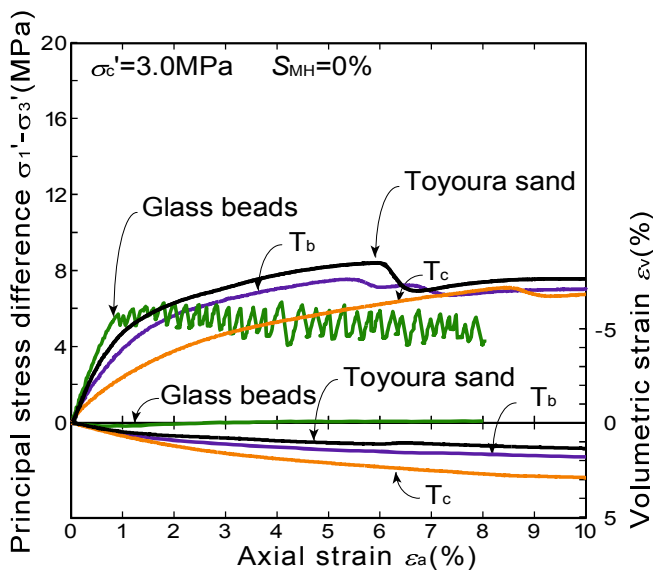


図 2-3-5 有効拘束圧 3MPa におけるホスト砂の応力-ひずみ関係の比較

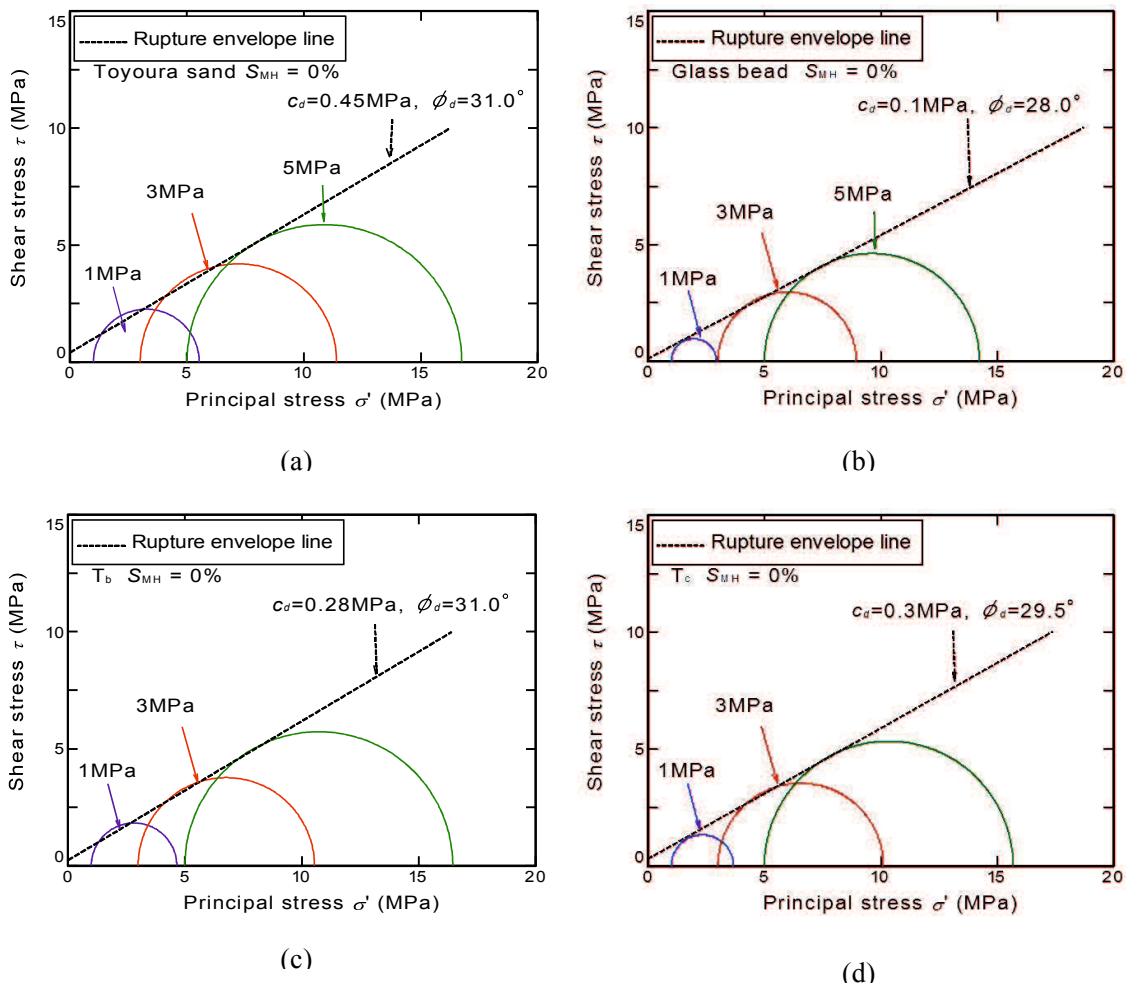


図 2-3-6 各ホスト砂のモールの応力円およびクーロンの破壊線

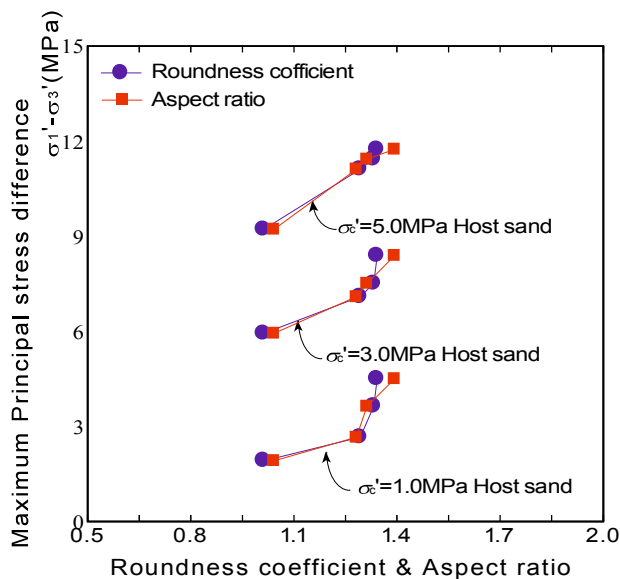


図 2-3-7 各ホスト砂の強度と真円度および縦横比の関係

### 2.3.2 南海トラフ模擬土の変形特性

各試料のせん断中の供試体画像から PTV 解析を行い、最大せん断ひずみの値を求めた。有効拘束圧 3MPa における軸ひずみ 2%ごとの各試料の写真を図 2-3-8 に示す。これらの写真を用いて PTV 解析を行い求めた最大せん断ひずみのコンターを図 2-3-9 に示す。なおこれらに示す最大せん断ひずみは、せん断を開始する前の画像を基準として、軸ひずみ $\epsilon_a=2\%$ ごとに示しており、ひずみの発達を評価するために、最大せん断ひずみ $\gamma_{max}$ が 50%以上の部分は同色で示している。図から、各試料においても、せん断帯をともなって破壊している様子が確認される。また、ガラスビーズはもっとも小さい軸ひずみの値でせん断帯が生じており、シリカ系3種の豊浦砂、 $T_b$ 、 $T_c$ では細粒分含有率が増加するにしたがいせん断帯を生じる軸ひずみの値が大きくなっている。最大せん断ひずみに着目すると、豊浦砂では、せん断帯およびその付近にせん断ひずみが生じている様子が確認される。また、ガラスビーズでは、せん断ひずみが帯状に分布しており、最も局所変形が顕著であることが明らかである。 $T_b$ と $T_c$ を比較すると、 $T_b$ ではせん断帯付近にひずみが集中しており、 $T_c$ では広範囲にせん断ひずみが分布していることがわかる。これから、細粒分含有率が低いほど局所変形を起こしやすいと考えられる。

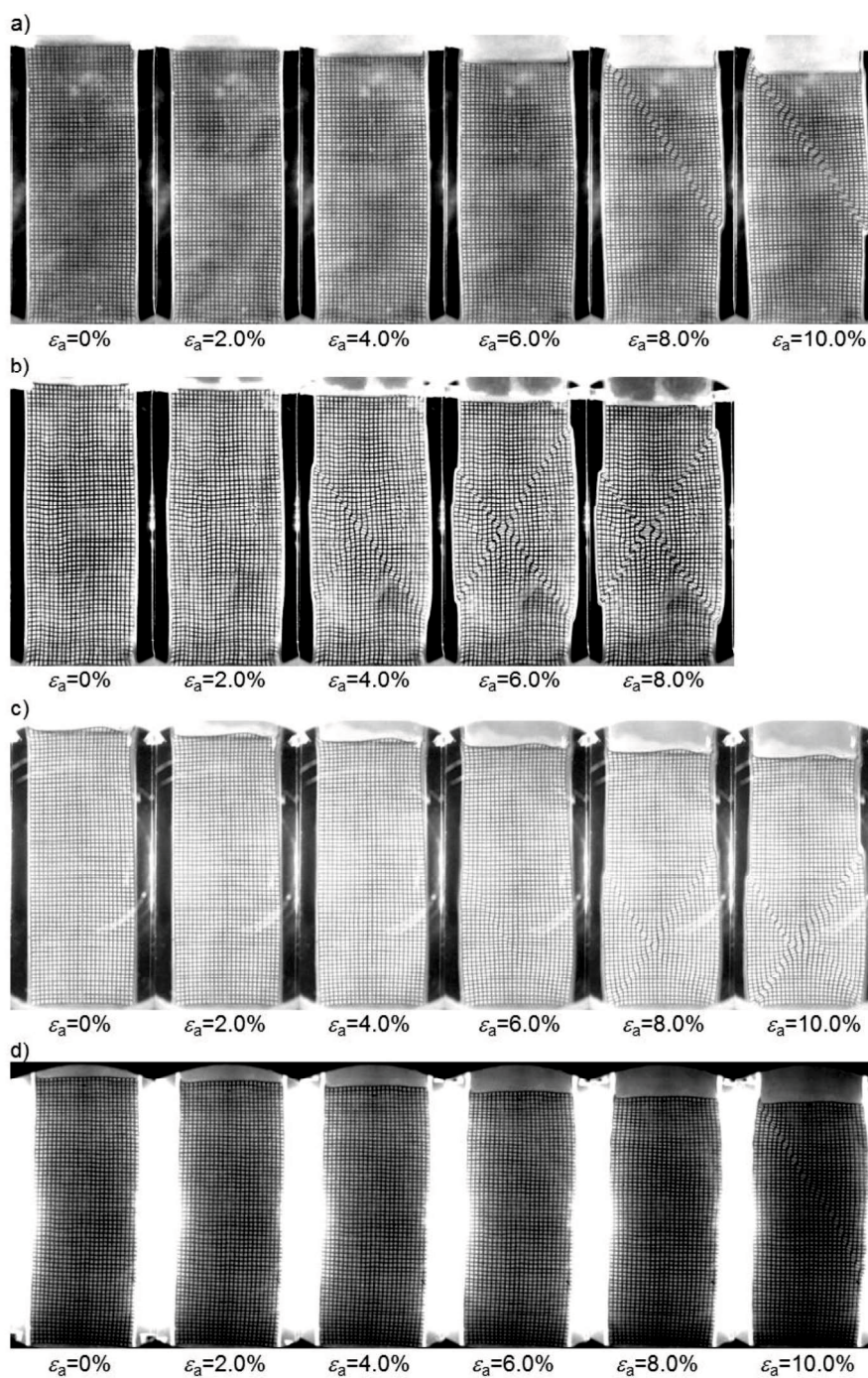


図 2-3-8 a) 豊浦砂, b) ガラスビーズ, c)  $T_b$ , d)  $T_c$  の実験中の供試体写真(ホスト砂)

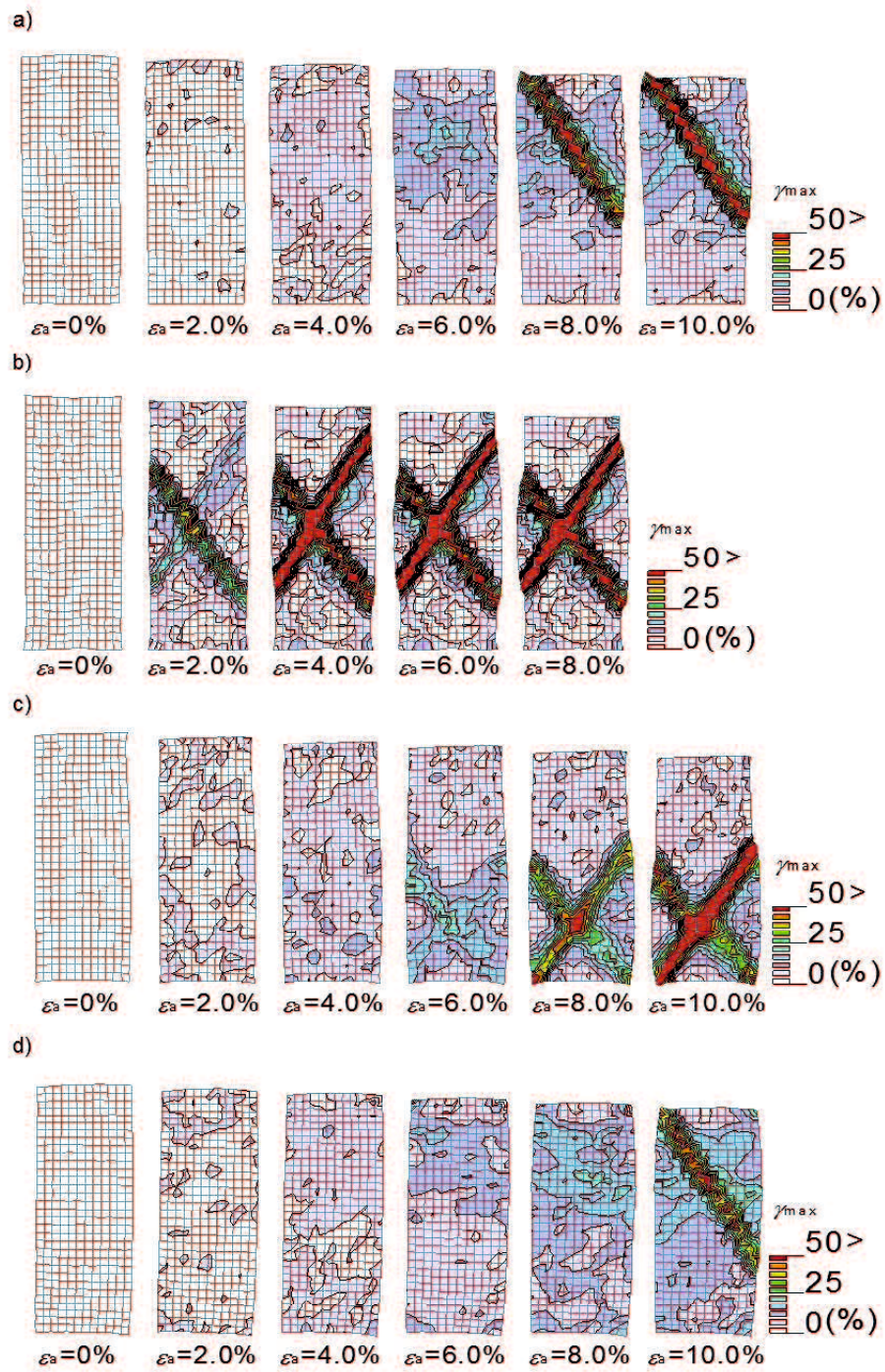


図 2-3-9 a) 豊浦砂, b) ガラスビーズ, c) T<sub>b</sub>, d) T<sub>c</sub> の最大せん断ひずみコンター (ホスト砂)



## 2.4 メタンハイドレート含有土の変形および強度特性

## 2.4.1 細粒分含有率の違いによる強度特性の変化

メタンハイドレート含有砂の細粒分の違いが与える影響を評価するために、細粒分含有率の異なる 2.3 節に示した試料にメタンハイドレートを含有させてせん断試験を行った。表 2-4-1 に用いた実験条件と実験結果の一覧を示す。有効拘束側圧  $\sigma'_c = 3\text{MPa}$  におけるメタンハイドレート飽和率  $S_{MH} \doteq 60\%$  のメタンハイドレート含有砂とホスト砂の結果を比較したものを豊浦砂の結果を図 2-4-1 に、ガラスビーズの結果を図 2-4-2 に、 $T_b$  の結果を図 2-4-3 に  $T_c$  の結果を図 2-4-4 にそれぞれ示す。なお、豊浦砂と  $T_c$  は  $S_{MH} \doteq 40\%$  のせん断試験結果も併せて示している。全ての試料において、メタンハイドレートを生成させることで初期剛性およびピーク強度の増加が認められる。また体積ひずみに着目すると、全試料において、ホスト砂では終始収縮傾向を示していた結果に対して、メタンハイドレート含有砂は収縮挙動を示したのちに膨張挙動へと推移し、それぞれのホスト砂と比較して膨張挙動が顕著になることが分かる。これは、既往の研究においても同様の傾向を示している(Hyodo et al., 2013a ; Miyazaki et al., 2011)。

メタンハイドレート含有砂におけるひずみ軟化挙動に着目すると、図より、各試料のピーク強度発現から残留強度に至るまでの軸ひずみ差  $\Delta\varepsilon_a$  は豊浦砂は  $\Delta\varepsilon_a = 1.91\%$ 、ガラスビーズは  $\Delta\varepsilon_a = 0.83\%$ 、 $T_b$  は  $\Delta\varepsilon_a = 2.15\%$ 、 $T_c$  は  $\Delta\varepsilon_a = 3.77\%$  である。全試料を比較すると、ガラスビーズのひずみ軟化挙動が最も顕著であり、粒度分布の近いガラスビーズと  $T_b$  を比較しても、ガラスビーズの方がピーク強度から残留強度に至るまでの軸ひずみの値が小さいことがわかる。残留強度に着目すると、豊浦砂、 $T_b$  および  $T_c$  ではメタンハイドレート含有砂とホスト砂の残留強度に差があるのに対し、ガラスビーズではメタンハイドレート含有砂の残留強度はホスト砂の残留強度とほぼ同じ値になることが確認される。Yun ら(2007)は、テトラヒドロフランハイドレート含有砂を用いたせん断試験より、ハイドレート飽和率が 50%以上の砂ではグローバルな強度はハイドレートの接着強度に依存すると述べている。また、Yun らはこれらのハイドレート含有砂の破壊はハイドレート粒子の界面に沿って起こるとしている。このことから、ガラスビーズ以外の試料については、ピーク強度発現後も砂粒子がハイドレートによって固結され団粒化したまま残留状態へ移行したためにメタンハイドレート含有砂とホスト砂の残留強度に差が生じたものと推察される。一方、ガラスビーズでは粒子の表面が滑らかかつ粒子形状が同じであるためにメタンハイドレート界面に急速に破壊が生じたために強度が急速に低下したと推察される。またガラスビーズにおいて、メタンハイドレートを生成させることでスティックスリップ現象が低減されることが確認される。これはメタンハイドレートの固結によるものと考えられる。

表 2-4-1 試験条件

Name of Host material	Degree of Saturation by		Back Pressure B.P.(MPa)	Effective		Cell Pressure $\sigma_c$ (MPa)	Temperature T(°C)	Specific Density $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Void ratio e
	MH*	$S_{MH}$ (%)		Confining Pressure $\sigma'_c$ (MPa)	Pressure $\sigma_c$ (MPa)				
Toyoura sand		41.4		3.0	3.0	13.0			0.652
		67.9	10	3.0	3.0	13.0	5	2.64	0.643
		61.2		5.0	5.0	15.0			0.649
Glass beads		64.7	10	3.0	3.0	13.0	5	2.50	0.461
		60.0		5.0	5.0	15.0			0.464
T <sub>b</sub>		60.0	10	3.0	3.0	13.0	5	2.66	0.628
T <sub>c</sub>		41.3	10	3.0	3.0	13.0	5	2.67	0.660
		60.2		3.0	3.0	13.0			0.635

\* Target Degree of Saturation by MH is 50%

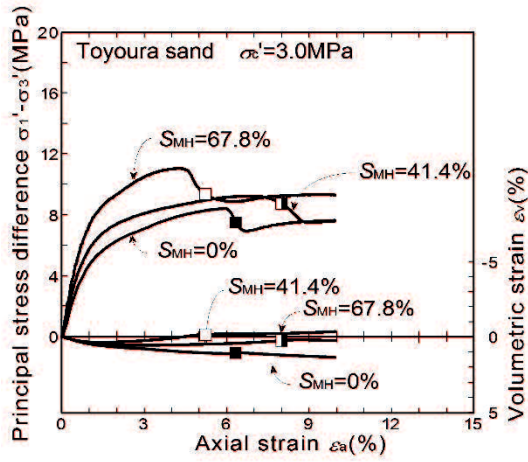


図 2-4-1 豊浦砂の応力-ひずみ関係

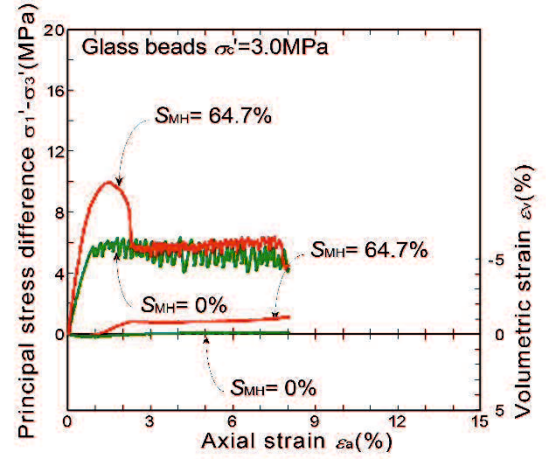


図 2-4-2 ガラスビーズの応力-ひずみ関係

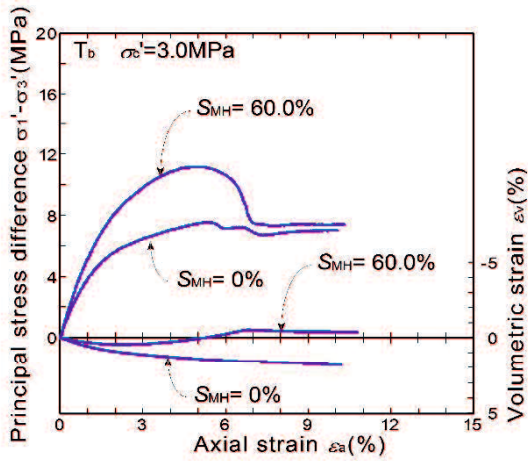


図 2-4-3 T<sub>b</sub>の応力-ひずみ関係

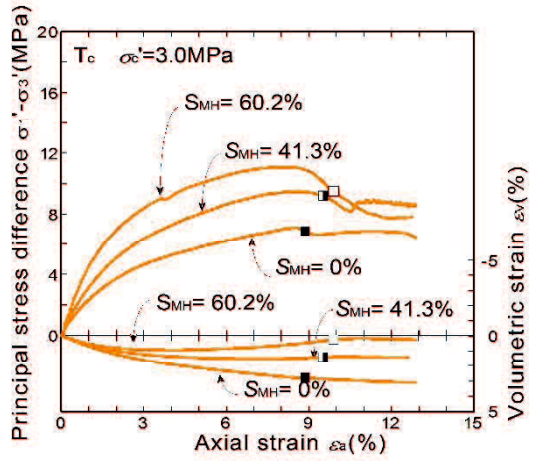


図 2-4-4 T<sub>c</sub>の応力-ひずみ関係

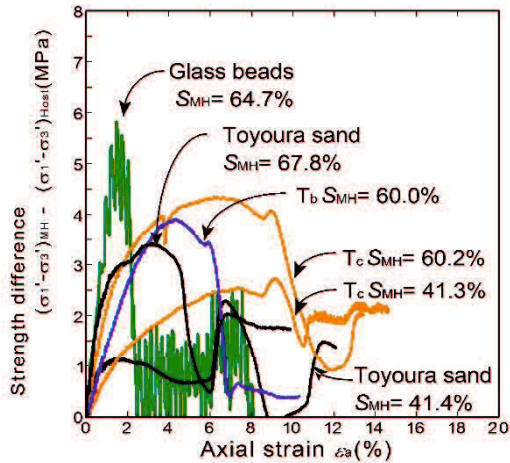


図 2-4-5 各試料の強度差と軸ひずみの関係

次に、メタンハイドレートによる強度増加量を求めた。本研究では、メタンハイドレートによる強度増加は、軸ひずみごとのメタンハイドレート含有砂とホスト砂の軸差応力差の差と定義し、その最大値を求めた。図 2-4-5 に各試料のメタンハイドレートによる強度増加量と軸ひずみの関係をそれぞれ示す。図より、ガラスビーズでは非常に小さい軸ひずみの値で強度さがピークを迎えている。一方、ガラスビーズ以外の砂では、細粒分含有率が増加するほどに強度差がピークを迎える軸ひずみの値が増加している。また図 2-3-15 にメタンハイドレートによる最大強度増加量と細粒分含有率の関係を示す。図 2-4-6 より、ガラスビーズ以外の砂では、細粒分含有率が増加するほどにメタンハイドレートによる強度増加量が高いことが明らかである。この図から、南海トラフ模擬試料である  $T_b$  および  $T_c$  にも強度増加量に違いがあることが明らかとなった。また、セメント改良土を用いて細粒分含有率を変化させた実験においても、同様の傾向が認められる (米田, 2011)。図 2-4-7 に、初期剛性  $E_{50}$  と細粒分含有率の関係を示す。図から、ホスト砂の場合、ガラスビーズ以外の砂は細粒分含有率が高いほどに剛性の低下が認められる。メタンハイドレート含有砂の場合では、 $T_b$  の初期剛性はやや低いものの、ほとんど母材の剛性に依存して低下していることが認められる。

図 2-4-8 に、ホスト砂とメタンハイドレート含有砂のピーク強度と細粒分含有率の関係を示す。図から、メタンハイドレート含有砂のピーク強度はほとんど細粒分含有率によって変化していないことが分かる。このことから、メタンハイドレートによる強度増加は、図に示すように細粒分を含まないものは粗粒分が固結され団粒化し、細粒分を含むものは細粒分がメタンハイドレートによって囲まれるように固結されることにより団粒化したためにより強度を発揮したものと推察される。

次に、同様の試験手順で豊浦砂およびガラスビーズにメタンハイドレートを生成させ、豊浦

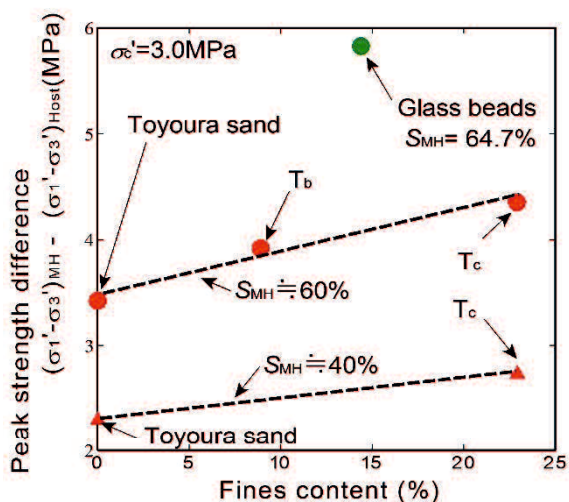


図 2-4-6 メタンハイドレートによる強度増加量と細粒分含有率の関係

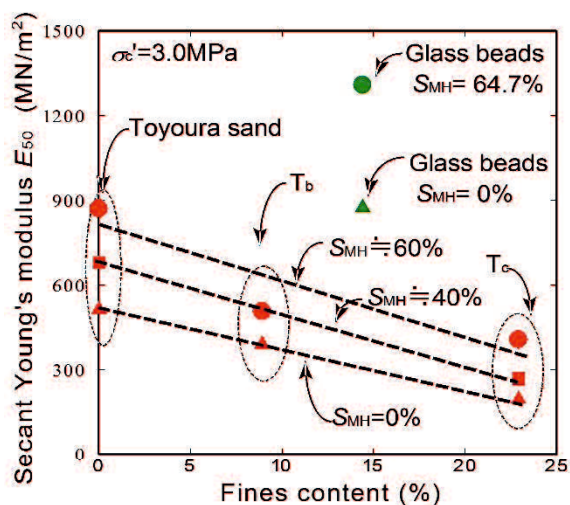


図 2-4-7 初期剛性  $E_{50}$  と細粒分含有率の関係

砂では有効拘束側圧 $\sigma'_c = 1, 5\text{MPa}$ , ガラスビーズでは有効拘束側圧 $\sigma'_c = 5\text{MPa}$  でせん断試験を行った. この結果をそれぞれ図 2-4-9, 図 2-4-10 に示す. これらの図から, メタンハイドレート含有砂においても拘束圧依存性が認められる. これらにより, モールの応力円を描いた. 図 2-4-11 に豊浦砂の結果を, 図 2-4-12 にガラスビーズの結果をそれぞれ示す. また, 各ホスト砂の結果も併せて示す. その結果, 豊浦砂のホスト砂では, 粘着力 $c_d = 0.45\text{MPa}$ , 内部摩擦角 $\phi_d = 31.0^\circ$ , メタンハイドレート含有砂では粘着力 $c_d = 0.6$ , 内部摩擦角 $\phi_d = 36.5^\circ$ , ガラスビーズのホスト砂では粘着力 $c_d = 0.1\text{MPa}$ , 内部摩擦角 $\phi_d = 28.0^\circ$ , メタンハイドレート含有砂では粘着力 $c_d = 1.2\text{MPa}$ , 内部摩擦角 $\phi_d = 28.0^\circ$  となった. これらから, 豊浦砂では, 粘着力および内部摩擦角が増加していることが明らかである. 一方, ガラスビーズでは内部摩擦角は変化せず, 粘着力が大きく増加している. これらのことから, ガラスビーズの場合, メタンハイドレートを生成させると豊浦砂と同様に強度は大きくなるが, 豊浦砂と比較して粘着力が強度増加に大きく影響を与えると推察される.

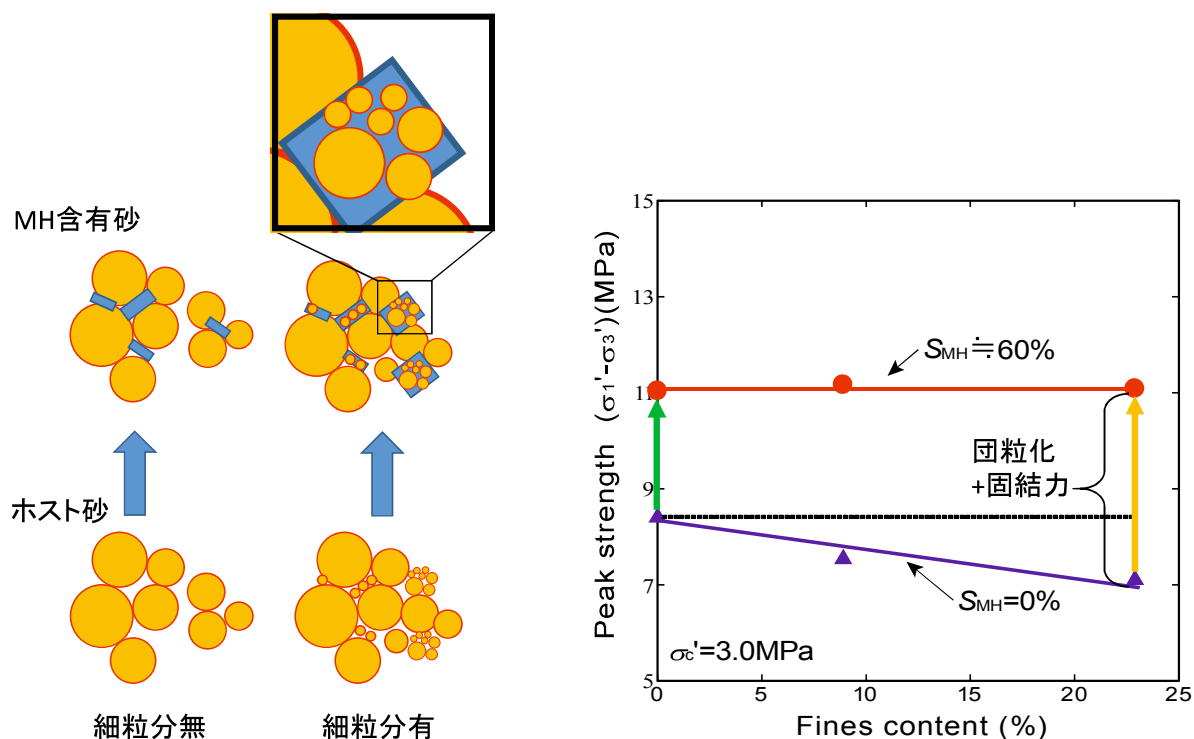


図 2-4-8 ホスト砂およびメタンハイドレート含有砂のピーク強度と細粒分含有率の関係

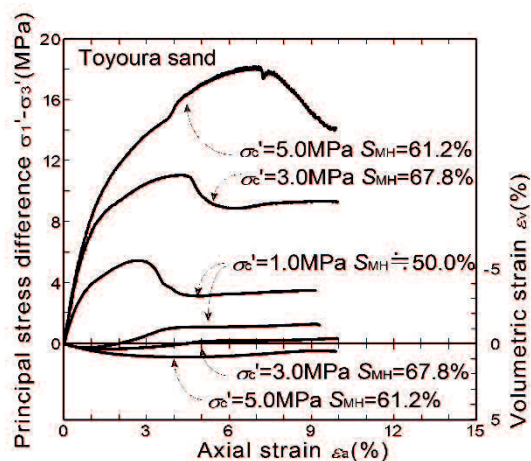


図 2-4-9 メタンハイドレート飽和率の異なる豊浦砂の応力 - ひずみ関係

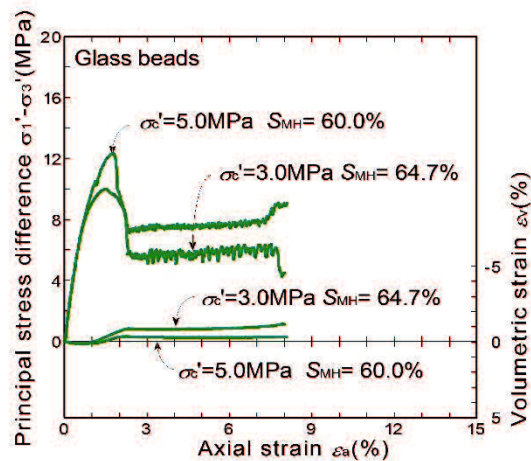


図 2-4-10 メタンハイドレート飽和率の異なるガラスビーズの応力 - ひずみ関係

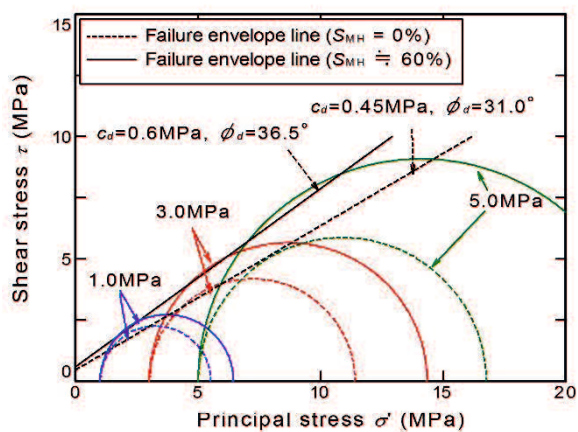


図 2-4-11 豊浦砂のモールの応力円

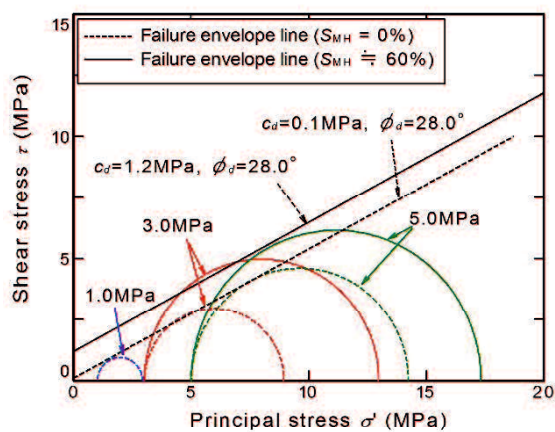


図 2-4-12 ガラスビーズのモールの応力円

## 2.4.2 細粒分含有率の違いによる変形特性の評価

次に、これらメタンハイドレート飽和率60%程度のメタンハイドレート含有試料を用いた実験中に撮影した供試体画像からPTV解析を行った。各供試体の写真を図2-4-13に示す。また、これらにより得られたPTV解析の結果を豊浦砂の結果を図2-4-14に示す。なお、これらに示す最大せん断ひずみは、せん断を開始する前の画像を基準として、軸ひずみ $\varepsilon_a=2\%$ ごとに示している。いずれの試料においても、ピーク強度発現後にせん断帯が発達していることが分かる。一般に、せん断帯の発達ピーク強度発現前に発生することが指摘されているが(Desrués et al., 2004.)、砂岩(Lade et al., 2014)やメタンハイドレート含有砂(Yoneda et al., 2016)に対するせん断帯の観察において本研究と同様の傾向が認められ、固結力を持つ砂は、せん断帯の発生時期がピーク強度発現前からピーク強度発現後に推移する可能性が考えられる。

次に、ピーク強度を発現した時点を基準に、その後の最大せん断ひずみの増分を評価した。解析結果を図2-4-15示す。なお、各コンター図はピーク強度を発現した軸ひずみの値からの軸ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_a=0.2\%$ ごとに示している。図より、ガラスビーズではピーク強度発現後、急速にせん断帯が供試体右端から左端にかけて発生し破壊が起こっていることが確認される。一方、他の試料では、左端あるいは右端の一方、または両端に最大せん断ひずみが生じ、せん断が進行するにつれ最大せん断ひずみが進行し、左端あるいは右端に到達するか、両端から発生した最大せん断ひずみが交差する形でせん断帯が発現し、供試体が破壊に至っていることが確認される。さらに、豊浦砂および $T_b$ は同程度の速度で破壊が進行しており、 $T_c$ は全試料中最も破壊の進行が遅いことが明らかである。これは、 $T_c$ が細粒分を多く含んでいるためと推察される。

図2-4-14に最大せん断ひずみコンターから、せん断帯内に着目すると、ガラスビーズ以外の砂では、両試料においてせん断帯の上下端において最大せん断ひずみの値が異なり、軸ひずみが進行しても相対的に最大せん断ひずみの値が大きくなっており、破壊が進行していることが分かる。一方、ガラスビーズの場合他の試料と比較すると、 $\varepsilon_a=4\%$ から $\varepsilon_a=8\%$ までせん断帯の幅は同程度である。また、せん断帯全域にわたって同程度のせん断ひずみが生じ、 $\varepsilon_a=8\%$ に至るまでせん断体内のひずみ量はせん断帯内で均一的に増加しており、局所変形が直線的に集中して発生していることが分かる。また、ガラスビーズ以外の試料の場合、せん断帯以外の部分では最大せん断ひずみが広範囲に分布しているのに対して、ガラスビーズではせん断帯以外の部分では帯状に最大せん断ひずみが分布しており、ガラスビーズの方が他の試料より局所変形をおこしやすいと推察される。これは、豊浦砂および $T_b$ の形状が複雑であるのに対し、ガラスビーズでは粒子形状がほぼ同じであることにより、個々の粒子がせん断応力に対して与える影響の差が少ないために個々の粒子とメタンハイドレートの破壊がほぼ同時に起こっ

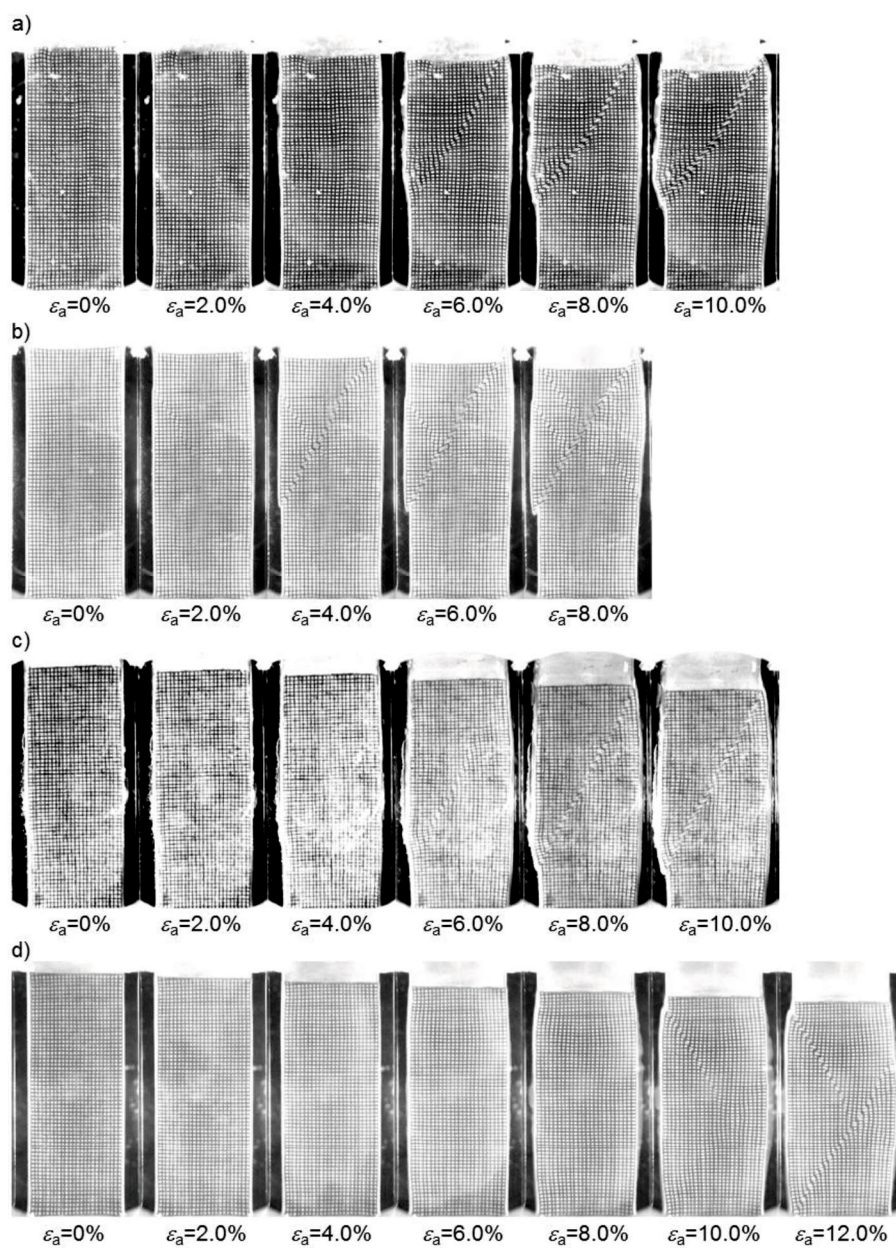


図 2-4-13 a) 豊浦砂, b) ガラスビーズ, c) T<sub>b</sub>, d) T<sub>c</sub> の実験中の供試体写真(メタンハイドレート含有砂)



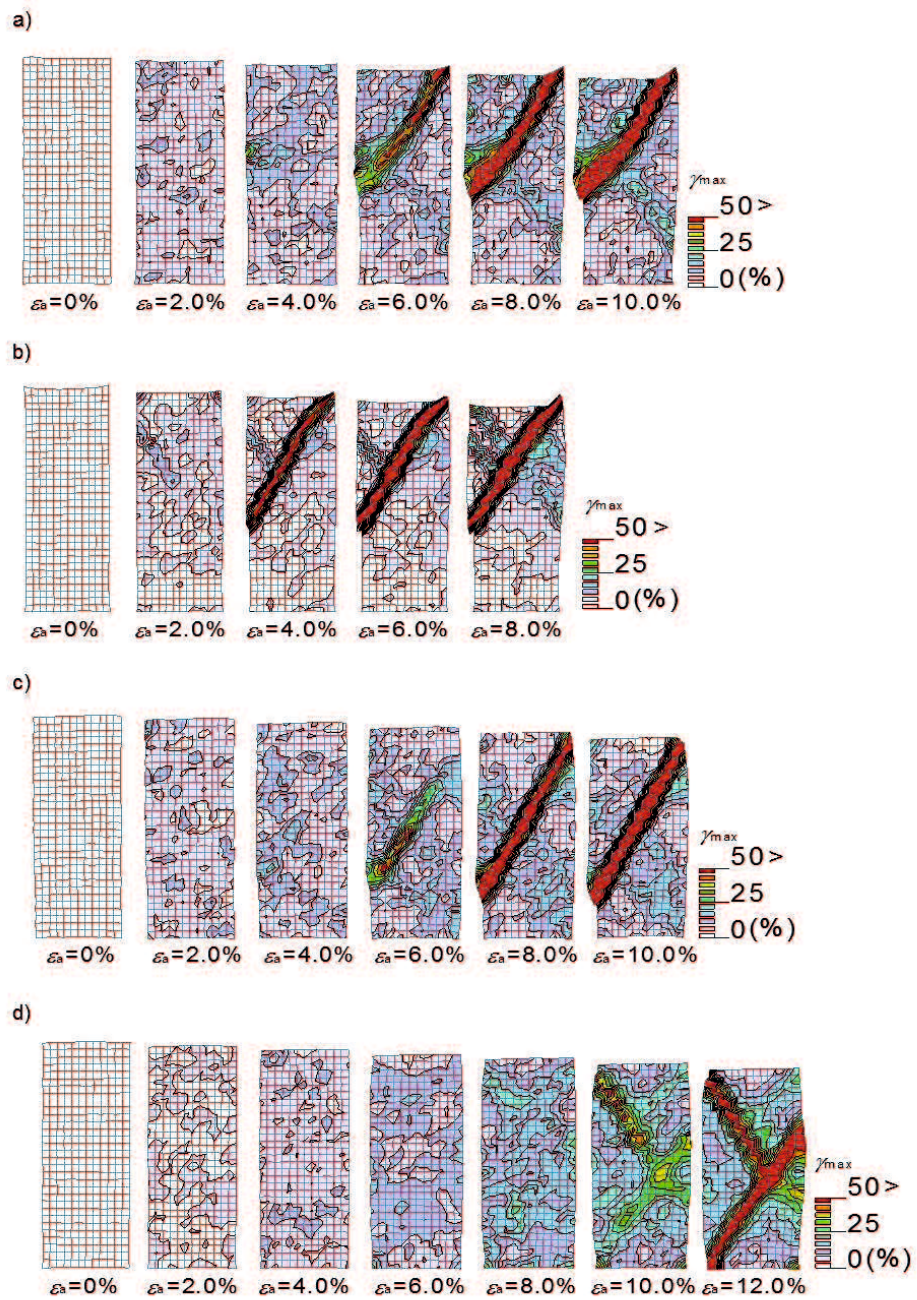


図 2-4-14 a) 豊浦砂, b) ガラスビーズ, c)  $T_b$ , d)  $T_c$  の最大せん断ひずみコンター (ホスト砂)

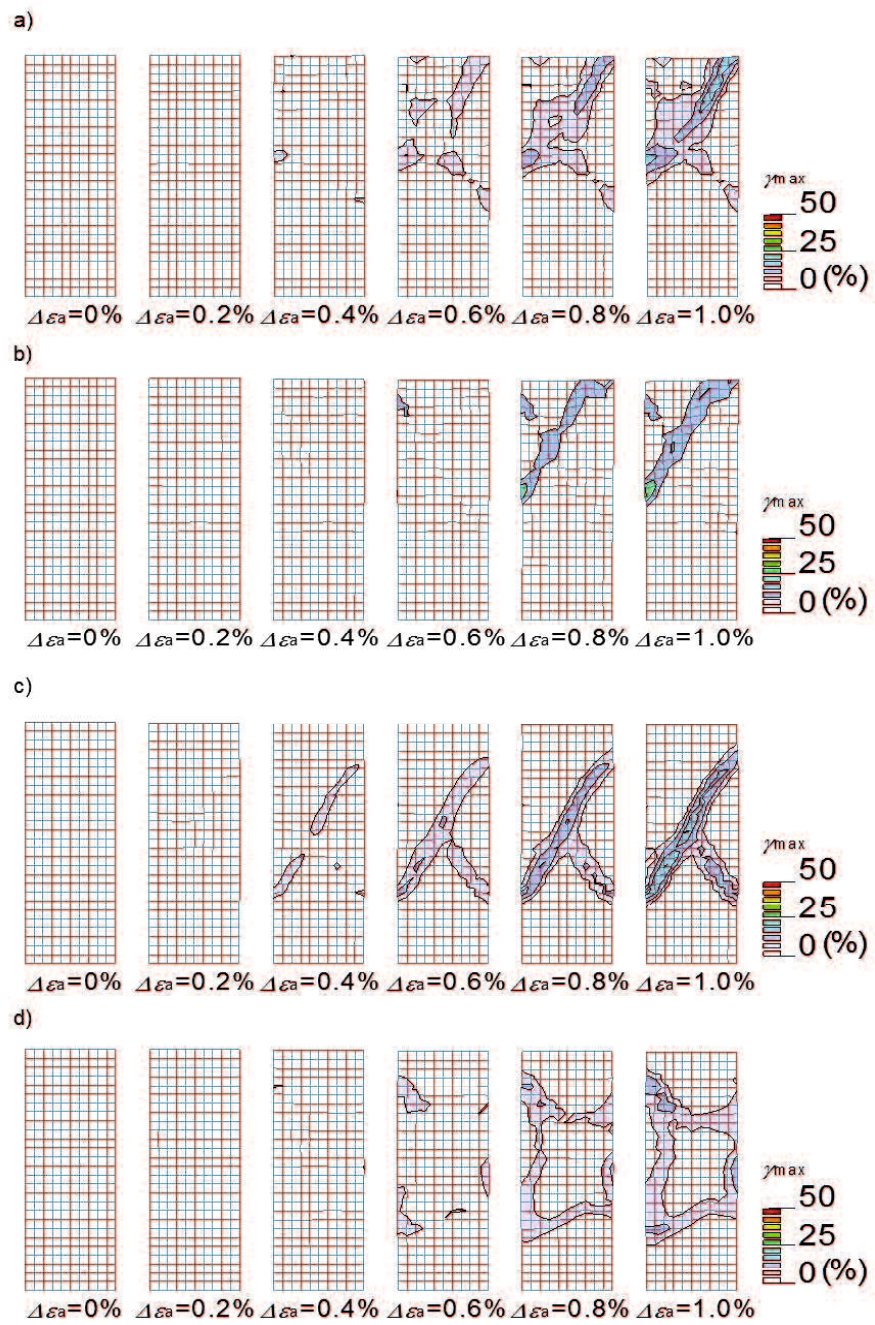


図 2-4-15 ピーク強度発揮時を基準とした a) 豊浦砂, b) ガラスビーズ, c) T<sub>b</sub>, d) T<sub>c</sub> の実験中の最大せん断ひずみコンター (メタンハイドレート含有砂)

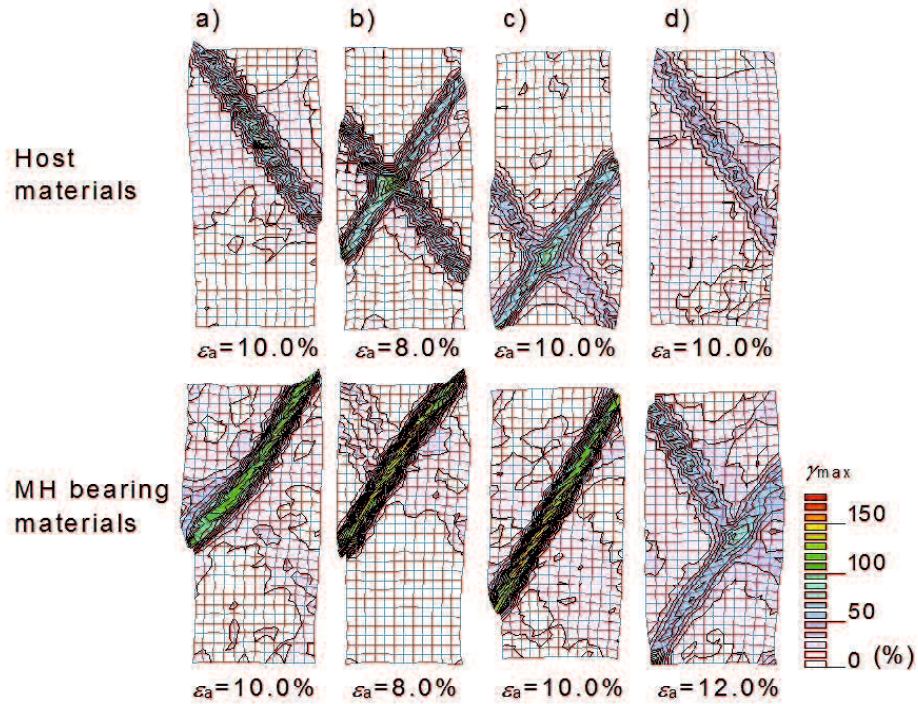


図 2-4-16 残留状態における a) 豊浦砂, b) ガラスビーズ, c) T<sub>b</sub>, d) T<sub>c</sub> の実験中の最大せん断ひずみコンターの比較

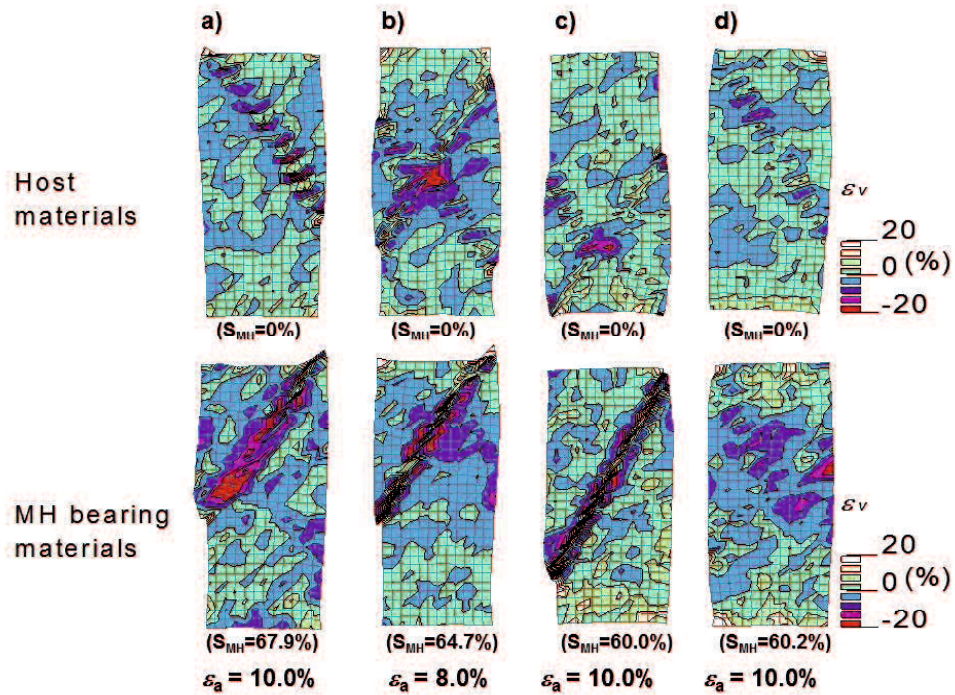


図 2-4-17 残留状態における a) 豊浦砂, b) ガラスビーズ, c) T<sub>b</sub>, d) T<sub>c</sub> の実験中の体積ひずみコンターの比較

たためと考えられる。

また、各試料において、2.3.2項に示すホスト砂とメタンハイドレート含有砂の残留状態における変形特性を評価するために、残留状態における各試料の最大せん断ひずみコンターおよび体積ひずみコンターを図 2-4-16 および図 2-4-17 にそれぞれ示す。比較すると、全ての試料においてメタンハイドレート含有砂の方が最大せん断ひずみがせん断帯付近に集中しており、示す最大せん断ひずみの値が大きくなっていることが明らかである。また、体積ひずみに注目すると、メタンハイドレートの有無に関わらずせん断帯では膨張挙動と収縮挙動が交互に発生していることが明らかである。メタンハイドレートの有無で比較すると、メタンハイドレート含有砂の方が、膨張挙動が顕著となっている。

これらのコンターより供試体内の各要素の最大せん断ひずみのばらつきを評価した。本研究では、ばらつきを評価するために、Cheng ら(2003)を参考にして、Weibull 係数  $m$  によって評価した。なお、Weibull 分布  $P_s$  を次の式で求めた。

$$P_s = \exp\left[-\left(\frac{\gamma}{\gamma_c}\right)^m\right] \quad (2-10)$$

ここで、 $\gamma$  は各要素の最大せん断ひずみ、 $\gamma_c$  は最大せん断ひずみの平均値である。(1)式の Weibull 係数  $m$  を決定するために、(1)式を変形すると、

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{P_s}\right)\right] = m \ln\left(\frac{\gamma}{\gamma_c}\right) \quad (2-11)$$

となる。(2)式の関係から、最小二乗回帰を行って Weibull 係数  $m$  を求めた。図 2-4-18 に一例として軸ひずみ  $\varepsilon_a = 2\%$  の豊浦砂のワイブル係数を示す。図 2-4-19 に図 2-4-18 から得られた Weibull 係数  $m$  で描いたワイブル分布を示す。同様にして求めた各試料の軸ひずみごとの Weibull 係数  $m$  の変化を図 2-4-20 にそれぞれ示す。Weibull 係数  $m$  は値が小さいほどにばらつきが多いことを示している。図より、いずれの試料においても軸ひずみが進行するにつれ、ばらつきが多くなっていることが分かる。各試料を比較すると、ガラスビーズが最も低い Weibull 係数を示しており、ばらつきが多いことが分かる。豊浦砂と  $T_b$  の場合、軸ひずみが進行するにつれて同程度の Weibull 係数を示すことがわかる。一方で、 $T_c$  では他の試料と比較して Weibull 係数  $m$  が高く、ばらつきが少ないことが明らかである。一方で、コンターよりいずれの試料も最大せん断ひずみは、せん断帯を中心に大きい値を示しているが、 $T_c$  では広範囲で大きい最大せん断ひずみを示しているが、豊浦砂および  $T_b$  ではせん断帯外では小さい最大せん断ひずみを示している。このことより、細粒分含有率の低い試料では、局所的な変形を起こしやすいことが推察される。

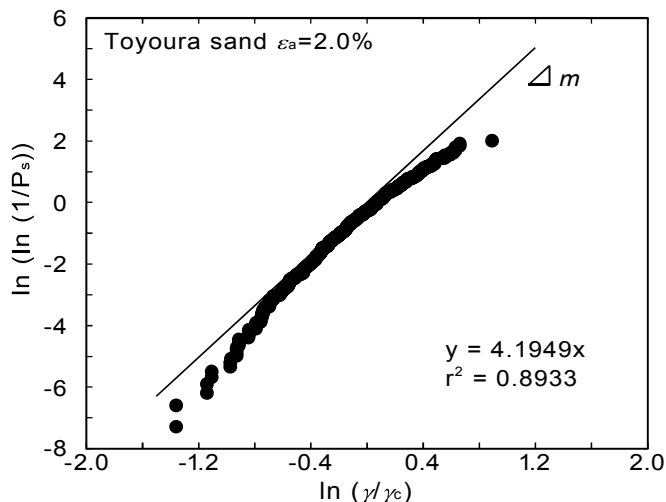


図 2-4-18 軸ひずみ  $\epsilon_a=2.0\%$  の豊浦砂の Weibull 係数

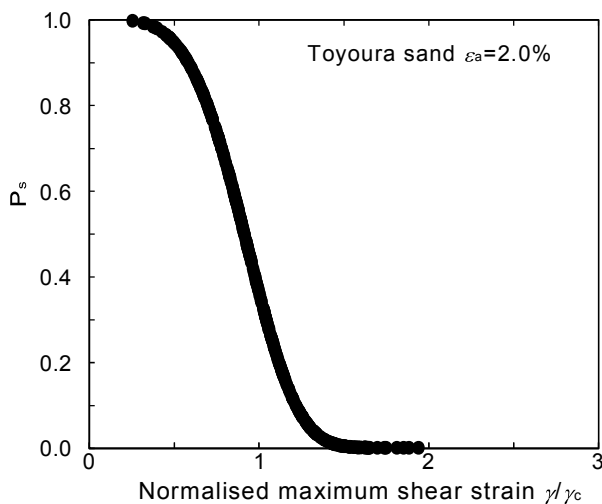


図 2-4-19 軸ひずみ  $\epsilon_a=2.0\%$  の豊浦砂の Weibull 分布

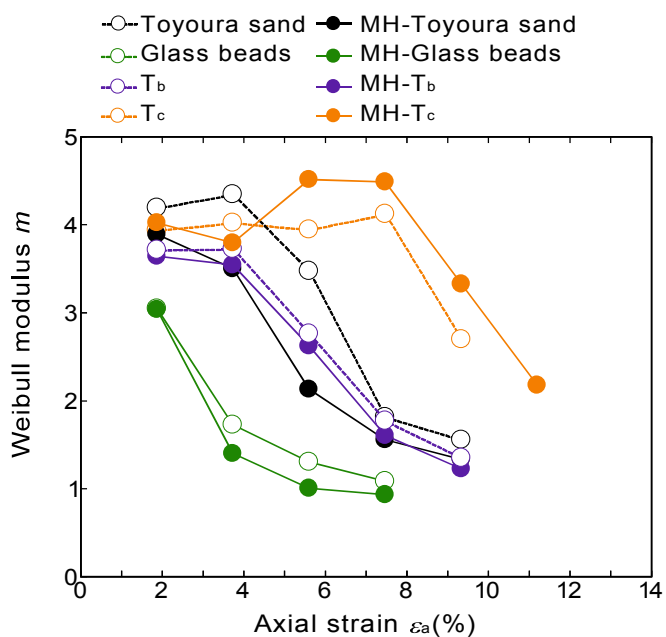


図 2-4-20 軸ひずみごとの Weibull 係数の変化

2.4.3 メタンハイドレート飽和率の違いによるせん断特性の変化

次に、メタンハイドレート飽和率の異なる豊浦砂と  $T_c$  に対して、ピーク強度を示した後強度が急減する付近でのせん断帯の傾斜角および幅を求めた。今回、せん断帯の定義は Yoneda ら (2013) の手法を参考にし、メンブレンに描いたメッシュが描く変形曲線の最急曲率の点をせん断帯の端とした。角度は、得られた点から近似線描き、上下近似線の平均の角度をせん断帯の角度とした。幅に関しては、上下近似線の距離の幅をせん断帯の幅とした。豊浦砂の結果を図 2-4-21 に、の結果を図 2-4-22 にそれぞれ示す。図 2-4-21 および図 2-4-22 に示す画像は、図 2-4-1 および図 2-4-4 中のプロットが示す時点での画像である。図より、両試料ともにメタンハイドレート飽和率が増加するほどにせん断帯の角度は増加し、せん断帯の幅は減少する傾向が認められる。せん断帯の角度の増加は、メタンハイドレート飽和率が増加するほどに強度が増加する巨視的な強度特性と一致している。一方で、せん断帯の幅の減少はメタンハイドレートによって粒子が固結されたためと考えられる。両試料を比較すると、豊浦砂の方が  $T_c$  よりせん断帯の幅が狭いことが分かる。これは、せん断帯の幅が粒径に依存する(酒井ら, 1995)ことから、豊浦砂の方が平均粒径が大きいと推察される。

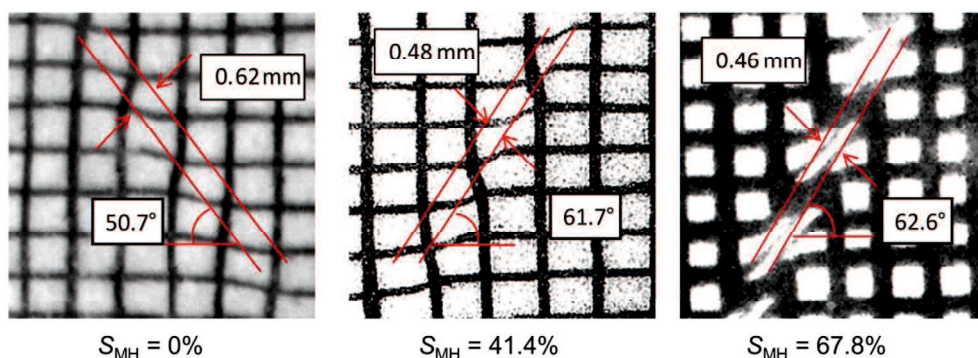


図 2-4-21 豊浦砂のせん断帯の角および幅

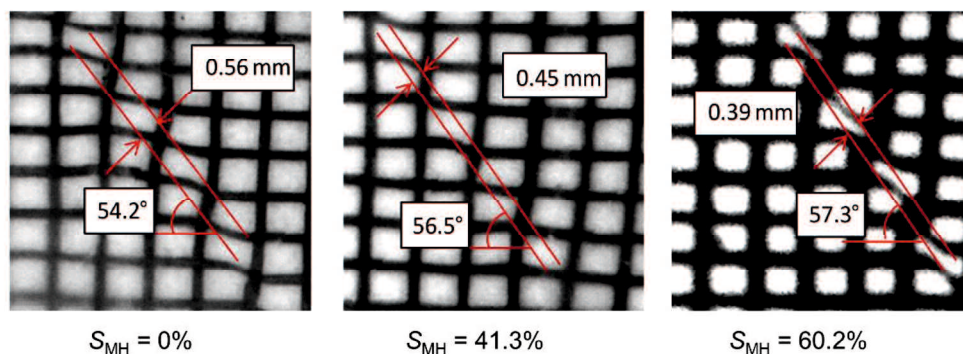


図 2-4-22  $T_c$  のせん断帯の角および幅

2.4.4 弾性係数による供試体中のメタンハイドレートの存在形態の評価

図 2-4-23 に各試料の軸ひずみ $\epsilon_a=0.5\%$ 時の弾性係数とメタンハイドレート飽和率の関係を示す。いずれの試料もメタンハイドレート飽和率が高い方が弾性係数が増加していることが分かる。また、 $T_b$ およびガラスビーズではメタンハイドレート飽和率が2種類しかないものの、豊浦砂および $T_c$ では、メタンハイドレート飽和率が0%から40%程度の弾性係数の増加量よりも40%程度から60%程度の弾性係数の増加量が多いことが分かる。この傾向は、 $T_b$ およびガラスビーズにおいても同様の傾向を示すと推察される。

図 4-2-24 に、メタンハイドレートの存在形態別の弾性波速度とハイドレート飽和率の関係を示す。図から、Contact cement 型および Grain coating 型はハイドレート飽和率が低い条件から急激に弾性波速度が上昇していることが分かる。一方で、Load bearing 型および Patchy 型はハイドレート飽和率が低い条件では弾性波速度が穏やかに上昇し、ハイドレート飽和率が30%を超えた付近から急激に弾性波速度が上昇している様子が分かる。弾性波速度と弾性係数の違いはあるものの、Dai らの結果を参考に本研究で得られた弾性係数から MH の存在形態を推察すると、Load bearing 型、Patchy 型あるいはその混合形態にあると推察される。

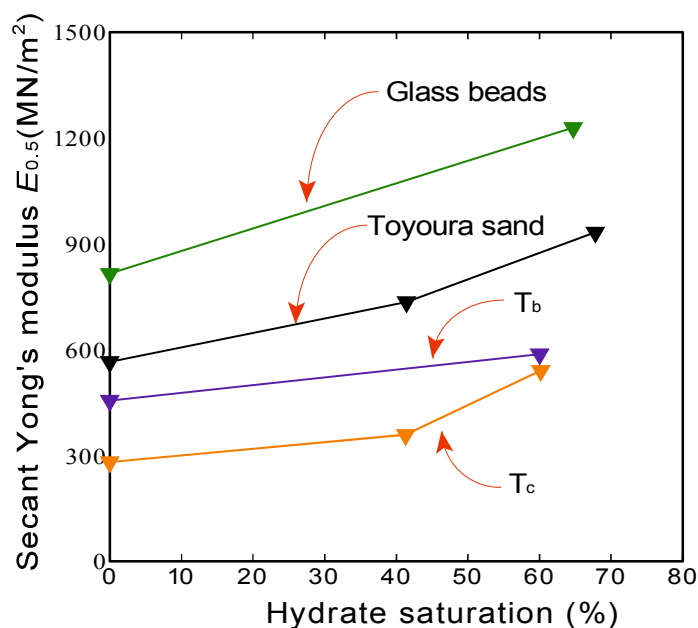


図 2-4-23 弾性係数  $E_{0.5}$  とメタンハイドレート飽和率の関係

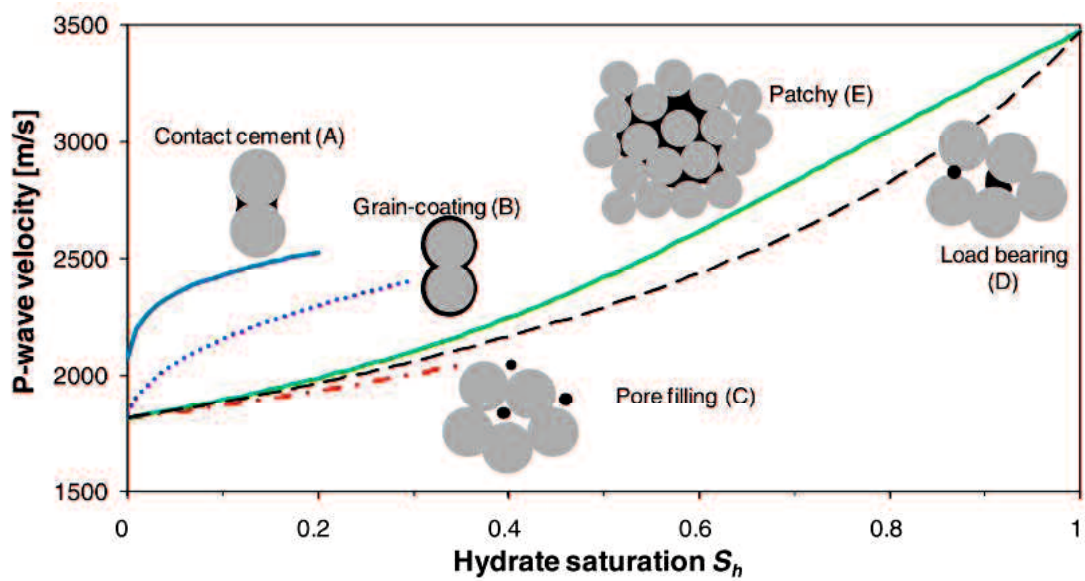


図 2-4-24 弾性波速度とハイドレート飽和率の関係 (Dai et al., 2012 から一部引用)



### 2.5 本章の要約

本章では、南海トラフ模擬試料をはじめとして、細粒分含有率および粒子形状の異なる豊浦砂、ガラスビーズ、 $T_b$ および $T_c$ に対して恒温高圧平面ひずみ実験装置を用いてせん断試験を行った。これによって得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 全ての試料において、ホスト砂にメタンハイドレートを生成させると、ホスト砂と比較して初期剛性およびピーク強度が増加する。また、体積ひずみに関しては、メタンハイドレート含有砂は収縮挙動から膨張挙動へ推移し、ホスト砂と比較して膨張挙動が強い。
- (2) メタンハイドレート含有砂において、ガラスビーズ以外の試料ではピーク強度発現後、緩やかにひずみ軟化挙動を示し、ガラスビーズではピーク強度発現後急激にひずみ軟化挙動を示す。
- (3) メタンハイドレート含有砂では、ガラスビーズ以外の試料では残留強度がホスト砂の残留強度と異なり、ガラスビーズでは残留強度がホスト砂の残留強度と等しくなる。
- (4) ガラスビーズの場合、ピーク強度の発現後にスティックスリップ現象が生じ、メタンハイドレート含有砂ではスティックスリップ現象が低減する。
- (5) 南海トラフ模擬試料においても、メタンハイドレートを含む砂は細粒分含有率が高いほどにMHによる強度増加は大きい。初期剛性 $E_{50}$ は、細粒分含有率が増加するほど低下する。
- (6) メタンハイドレート生成させると、豊浦砂では内部摩擦角および粘着力がともに増加し、ガラスビーズでは粘着力が大きく上昇した。
- (7) メタンハイドレートを含む砂はメタンハイドレートを含まない砂より最大せん断ひずみの値が大きくなる。
- (8) 南海トラフ模擬試料においても、細粒分含有率が高い方が広範囲に変形しやすくなると考えられる。
- (9) メタンハイドレート飽和率が増加するほどせん断帯の幅は狭くなり、角度は大きくなる。
- (10) 初期剛性とメタンハイドレート飽和率の関係から、メタンハイドレートの存在形態はLoad bearing型あるいはPatchy型、またはそれらの混合形態をしていると推察される。

【参考文献】

- Cheng, Y., P., Nakata, Y., and Bolton, M., D. : Discrete element simulation of crushable soil, *Geotechnique*, Vol.53 (7), pp.633-641, 2003.
- Dai S., Santamarina J. C., Waite W. F. and Kneafsey T. J. : Hydrate morphology : Physical properties of sands with patchy hydrate saturation, *Journal of Geophysical Research*, Vol.117, B11205, 2012.
- Desrues, J., Viggiani, G. : Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry, *Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.28, pp.279-321, 2004
- Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N., Yoneda, J. : Mechanical behavior of methane hydrate-supported sand. In: *Proc. of the Int. Symposium on Geotechnical Engineering, Ground Improvement and Geosynthetics for Human security and Environmental Preservation*, pp.195-208, 2007.
- Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N., Yoneda, J. : Shear strength of methane hydrate bearing sand and its deformation during dissociation of methane hydrate. In: *Proc. of the 4th Int. Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, pp.549-556, 2008.
- Hyodo, M., Yoneda, J., Yoshimoto, N., Nakata, Y. : Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed, *Soils and Foundations*, Vol.53 (2), pp.299-314, 2013a.
- Hyodo, M., Kajiyama, S., Yoshimoto, N., Nakata, Y. : Triaxial Behaviour of Methane Hydrate Bearing Sand, *Proc. 10th Int. Conf. on Offshore and Polar Engineers*, pp.126-131, 2013b.
- Lade, P., V., Trads, N. : The role of cementation in the behaviour of cemented soils, *Geotechnical Research*, Paper 14.00011, 2014.
- Matsushima, T., & Chang, C. S. : Quantitative evaluation of the effect of irregularly shaped particles in sheared granular assemblies, *Granular Matter*, Vol.13 (3), pp.269-276, 2011.
- Miyazaki, K., Masui, A., Sakamoto, Y., Aoki, K., Tenma, N., and Yamaguchi, T. : Triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment, *Journal of Geophysical Research*, Vol.116, B06102, 2011.
- Ord, A., Vardoulakis, I., Kajewsk, R. : Shear band formation in Gosford sandstone, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol.28 (5) pp.397-409, 1991.
- Suzuki, M., Fujimoto, T., Taguchi, T. : Peak and residual strength characteristics of cement-treated soil cured under different consolidations, *Soils and Foundations*, Vol.54 (4), pp.687-698, 2014.
- Tsomokos A, Georgiannou VN. : Effect of grain shape and angularity on the undrained response of fine sands. *Can Geotech J.* Vol.47, pp.539-551, 2010.

- Waite, W. F., Santamarina, J. C., Cortes, D. D., Dugan, B. Espinoza, D. N., Germaine, J., Jang, J., Jung, J. W., Kneafsey, T. J., Shin, H., Soga, K., Winters, W. J., and Yun, T.-S. : Physical properties of hydrate-bearing sediments, *Reviews of Geophysics*, Vol.47, RG4003, 2009.
- Yoneda, J., Hyodo, M., Yoshimoto, N., Nakata, N., Kato, : A. Development of high-pressure low-temperature plane strain testing apparatus for methane hydrate-bearing sand, *Soils and Foundations*, Vol.53 (5), pp.774-783, 2013.
- Yoneda, J., Masui, A., Konno, Y., Jin Y., Egawa, K., Kida, M., Ito, T., Nagao, J., Tenma, N. : Mechanical properties of hydrate-bearing turbidite reservoir in the first gas production test site of the Eastern Nankai Trough, *Marine and Petroleum Geology*, Vol.66, pp.471-486, 2015.
- Yoneda, J., Jin, Y., Katagiri, J., Tenma, N. : Strengthening mechanism of cemented hydrate-bearing sand at microscales, *Geophysical Research Letters*, 43 (14), pp.7442-7450, 2016.
- Yun, T.S., Santamarina, J.C., Ruppel, C. : Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate, *Journal of geophysical research*, 112, B04106, 2007.
- 今村豊, 米田純, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正 : 高压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, *地盤と建設*, Vol.28 (1), pp.95-103, 2011.
- 梶原拓也, 庄麗, 中田幸男, 兵動正幸, 吉本憲正 : 平面ひずみ圧縮を受けた砂の粒子形状と変形・破壊挙動, 第46回地盤工学研究発表会, pp.377-378, 2011.
- 片桐雅明, 安福規之, 藤山哲雄, 石川達也 : 粒子特性の評価と工学的意義 2.粒子特性の評価と実問題(その1), *土と基礎*, Vol.55 (4), pp.62-68, 2007.
- 酒井俊典, 宮内定基, 堀田隆 : アンカー問題における粒子径効果について, *農業土木学会論文集*, Vol.175, pp.73-80, 1995.
- 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.
- 村上裕幸 : 浸透を受ける盛土斜面の崩壊機構, 山口大学大学院修士論文, 2008.
- メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム, <http://www.mh21japan.gr.jp/>
- メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム : 「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」フェーズ1総括成果報告書, 平成20年8月版, 2008.
- 山本晃司 : メタンハイドレートの生産手法とフィールド産出試験, *地学雑誌*, Vol.118 (5), pp.913-934, 2009.
- 米田久美子 : セメント固化処理土の強度特性の検討, 全治連「技術フォーラム2011」京都, 論文番号88, 2011.
- 米田純 : メタンハイドレートにより固結した堆積土の時間依存形弾塑性構成式, 山口大学大学院修士論文, 2009.

## 第2章 南海トラフ模擬土の変形および強度特性

米田純：メタンハイドレートを含む深海底堆積土の力学特性及び変形挙動の評価に関する研究，  
山口大学大学院博士論文，2011.

### 第3章 メタンハイドレート分解に伴う土の変形および強度特性

#### 3.1 概説

2013年に南海トラフの深海底地盤において第1回海洋産出試験が行われ商業化に向けて研究開発が進められている(メタンハイドレート資源開発コンソーシアム). 南海トラフでのメタンハイドレートの生産は, メタンハイドレート濃集層内の圧力を下げてメタンハイドレートを分解する減圧法が主な手法として考えられている. しかし, 従来の石油開発とは異なり, 土の間隙中に固体として存在するメタンハイドレートの生産は, 海底面や周囲の帯水層などからの水の引き込みや, 大量の砂が生産される, 所謂出砂現象, 圧密, 細粒分の移動によってメタンハイドレート貯留層の生産障害などが懸念されている(山本, 2016). 実際に, 第1回の海洋産出試験では, 約6日間安定的なメタンガス, 水の生産が可能だったものの, その後水の生産レートが急増し水とともに大量の出砂が確認され生産が終了した(山本ら, 2013). メタンハイドレートの生産に伴う地層の応力, 変形を予測, 評価するために, 浸透流やメタンハイドレートの分解などを連成した地層変形シミュレータが開発されており, 精度向上のために構成式の改良などが図られている(天満ら, 2016).

このように, メタンハイドレート含有層からメタンハイドレートを生産するにあたり, メタンハイドレートを含有する土のメタンハイドレート分解時の挙動の解明は重要である. 第2章に述べたせん断試験結果より, メタンハイドレートの存在形態は, 粒子同士を固結する作用としてのみで無く, 間隙を埋めるようなLoad bearing型あるいはPatchy型といった形態で存在することが示唆され, このメタンハイドレートの消失は変形および力学挙動に大きく影響を与えると考えられる. 加藤(2016)は, 豊浦砂および $T_c$ を用いてメタンハイドレート分解時の挙動を評価している. しかし, せん断試験結果から, 南海トラフの模擬試料同士を比較してもその力学特性が異なることが明らかとなり, メタンハイドレート分解に伴う土の変形および強度特性も異なることが推察される.

そこで本章では, 第2章で得られた知見を踏まえ, 恒温高圧平面ひずみ実験装置を用いて, 細粒分含有率が異なる豊浦砂,  $T_b$ および $T_c$ の間隙中にメタンハイドレートを生成させ, 最も危険な状態であるせん断応力を与えた状態で間隙水圧を減少させることでメタンハイドレート分解実験を行い, その変形および強度特性を評価した.

### 第3章 メタンハイドレート分解に伴う土の変形および強度特性

以下に本章の構成を述べる。まず第2節において、メタンハイドレート分解実験の実験手順について述べる。第3節では、メタンハイドレート分解時の温度圧力および変形挙動について示し、最後に第4節において、細粒分含有率の違いによる分解実験中の変形および強度特性の評価を行っている。

3.2 メタンハイドレート分解実験の実験手順

分解実験メタンハイドレート含有砂は、所定のメタンハイドレート飽和率となるようにあらかじめ含水比を調整した第2章に示した豊浦砂、 $T_b$ 、 $T_c$ の3種類の砂を用いた。

メタンハイドレート分解実験の実験手順は、せん断応力を加える過程までは第2章に示した手順と同様である。簡略的に手順を示すと、まず、それぞれの試料の間にメタンガスを圧入し間隙水をメタンハイドレートに置換しメタンハイドレート供試体を作製した。試料は湿潤突き固め法により、12層に分けてタンパーで密な供試体を作製するために相対密度  $D_r = 90\%$  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  $5^\circ\text{C}$  の状態で供試体内にメタンガスを圧入し、 $5\text{MPa}$  に達した後に圧力を保ちながら時間をかけてメタンハイドレートを生成させた。メタンハイドレート生成後通水を行い、間隙内のガスを水と置換し水飽和状態とした。その後シリンジポンプを用いて間隙水圧を  $10\text{MPa}$  まで上昇させ、有効拘束圧  $\sigma'_c = 3\text{MPa}$  の条件で圧密を行った。その後、第2章によって得られたせん断試験結果から、ホスト砂の軸差応力以上かつメタンハイドレート含有砂以下の軸差応力を与えた。

その後、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メタンハイドレートが安定して存在できる  $10\text{MPa}$  から安定境界外である  $3\text{MPa}$  まで減圧を行った。減圧によって完全にメタンハイドレートが分解した後にメタンハイドレート生産井廃坑を想定し水圧を元の圧力まで回復させた。なお、せん断試験中のせん断速度は  $0.1\%/\text{min}$ 、分解実験時の減圧速度および水圧回復速度は  $0.5\text{MPa}/\text{min}$  とした。

表 3-2-1 に本章に用いた実験の実験条件を示す。

表 3-2-1 実験条件

Name of Host material	Degree of Saturation by MH*		Back Pressure B.P.(MPa)	Effective Confining Pressure $\sigma'_c$ (MPa)		Cell Pressure $\sigma_c$ (MPa)	Temperature T(°C)	Specific Density $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Void ratio e
	MH*	$S_{MH}$ (%)		Pressure $\sigma'_c$ (MPa)	Pressure $\sigma_c$ (MPa)				
Toyoura sand	41.4	41.4	10	3.0	13.0	13.0	5	2.64	0.654
T <sub>b</sub>	60.0	60.0	10	3.0	13.0	13.0	5	2.66	0.663
T <sub>c</sub>	41.3	41.3	10	3.0	13.0	13.0	5	2.67	0.654

\* Target Degree of Saturation by MH is 50%



3.3 分解時の温度および圧力の変化

メタンハイドレート分解実験には、メタンハイドレート飽和率は豊浦砂では  $S_{MH} = 60.3\%$ 、 $T_b$  では  $S_{MH} = 57.3\%$ 、 $T_c$  では  $S_{MH} = 41.3\%$  の試料を用いた。

図 3-3-1 から図 3-3-3 にメタンハイドレート分解中の豊浦砂、 $T_b$ 、 $T_c$  の間隙水圧、温度、ガス発生量の経時変化をそれぞれ示す。図から圧力を減少させると、いずれの試料に関してもガスの発生とともに温度が減少し、ガスの発生が終了すると徐々に温度が回復している様子が分かる。これは、メタンハイドレートの吸熱反応によるものと推察される。また、 $T_b$  に関しては、せん断過程から減圧過程に切り替える時点で、実験装置上部に設置した圧力計とシリンジポンプの間の管路内にメタンハイドレートが生成されてしまったため、管路内のメタンハイドレートを融解するために、正常にシリンジポンプが稼動するまでに時間を要している。

メタンハイドレート分解実験中の有効応力経路を豊浦砂の場合を図 3-3-4 に、 $T_b$  の場合を図 3-3-5 に、 $T_c$  の場合を図 3-3-6 にそれぞれ示す。各図中の記号はそれぞれ、せん断を開始した時点(a)、分解を開始した時点(b)、間隙水圧が 3MPa になった時点(c)、MH が完全に分解し、水圧回復を始めた時点(d)、供試体が完全に破壊した時点(e)を示している。以降、図中に示す(a)から(d)の記号は、同様の意味を示している。概略図に示すように、いずれの試料においても MH を分解した供試体は、間隙水圧を回復させるとホスト砂の破壊線に至ると、ホスト砂の破壊線を

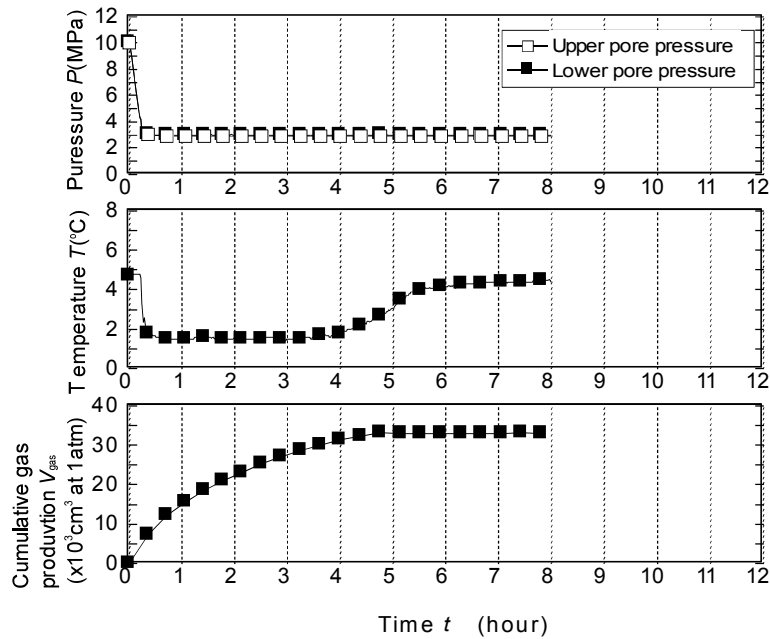


図 3-3-1 分解中の豊浦砂の間隙水圧、温度、ガス発生量の経時変化

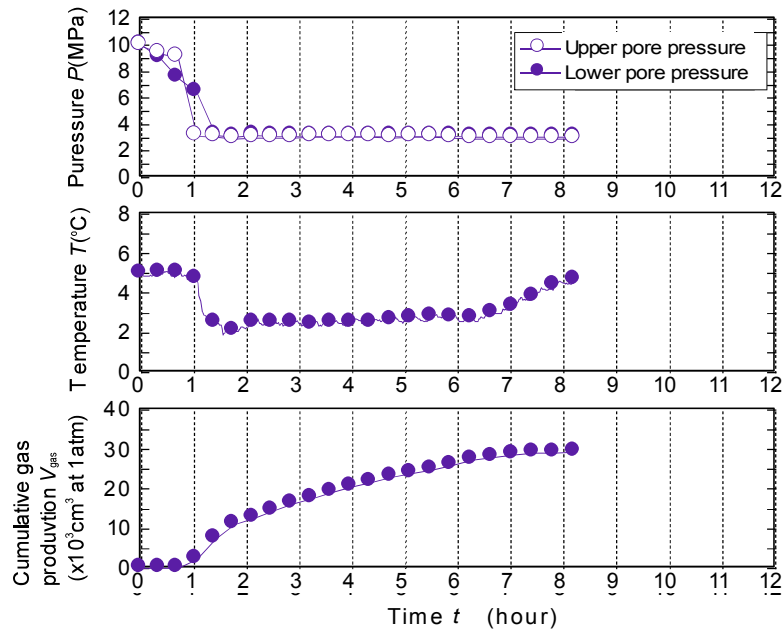


図 3-3-2 分解中の T<sub>b</sub> の間隙水圧，温度，ガス発生量の経時変化

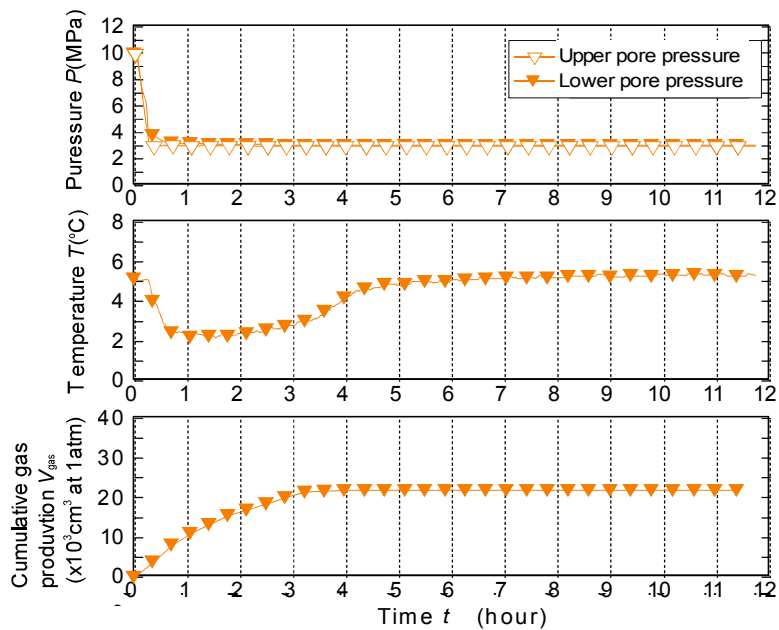


図 3-3-3 分解中の T<sub>c</sub> の間隙水圧，温度，ガス発生量の経時変化

沿うようにして破壊した。

減圧中の温度と圧力の関係を図 3-3-7 に示す。図から、いずれの試料においても、減圧すると間隙水圧が MH の安定領域より低い圧力に達すると、安定境界を沿うようにして温度が減少していることが明らかである。図 3-3-8 に、減圧中の各試料の下部の間隙水圧から上部間隙水圧を差し引いた間隙水圧の差と上部間隙水圧の関係を示す。なお、T<sub>b</sub> に関しては、せん断過程から減圧過程に切り替える時点で、実験装置上部に設置した圧力計とシリンジポンプの間の管路内にメタンハイドレートが生成されてしまったため、管路内のメタンハイドレートを融解するために時間がかかったために、正常にシリンジポンプが稼動し始めてからの圧力差を示して

いる。また、図中の破線は、温度 5°Cにおいてメタンハイドレートが安定して存在できる圧力の最小値を示している。図から、細粒分を含まない豊浦砂では上下間では大きな圧力差が認められない。一方で、細粒分を含む  $T_b$  および  $T_c$  では大きな圧力差が認められる。細粒分の有無によるこの差異は、細粒分を含む試料の方が、透水性が低いと推察される。また、 $T_b$  および  $T_c$  では減圧が進行するにつれて圧力差が大きくなっており、上部間隙水圧がメタンハイドレートが分解する 4MPa 付近から目標の間隙水圧である 3MPa となるまでに徐々に圧力差が減少している。これは、メタンハイドレートが分解したことにより透水性が向上したためであると考えられる。

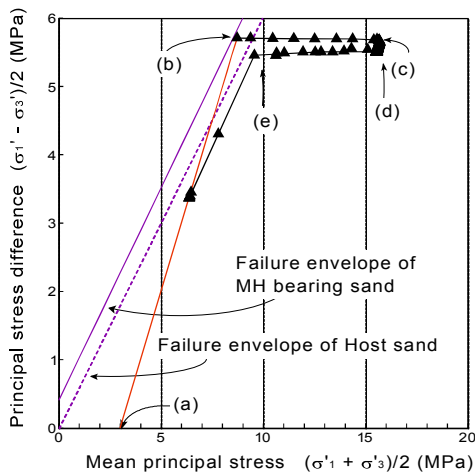


図 3-3-4 実験中の豊浦砂の有効応力経路

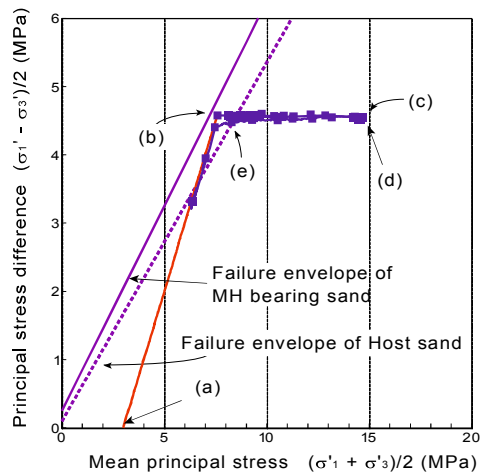


図 3-3-5 実験中の  $T_b$  の有効応力経路

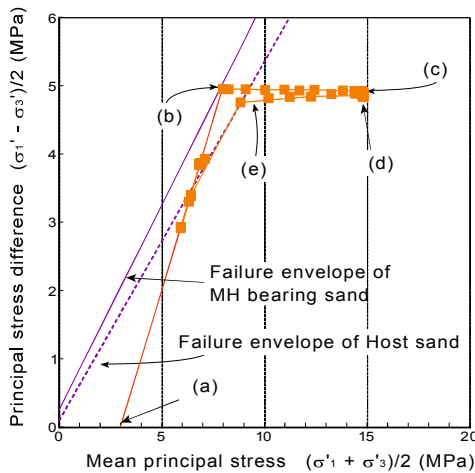


図 3-3-6 実験中の  $T_c$  の有効応力経路

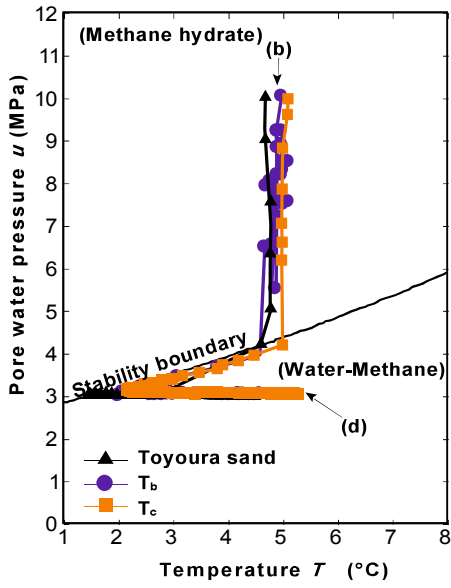


図 3-3-7 減圧中の温度 - 圧力履歴

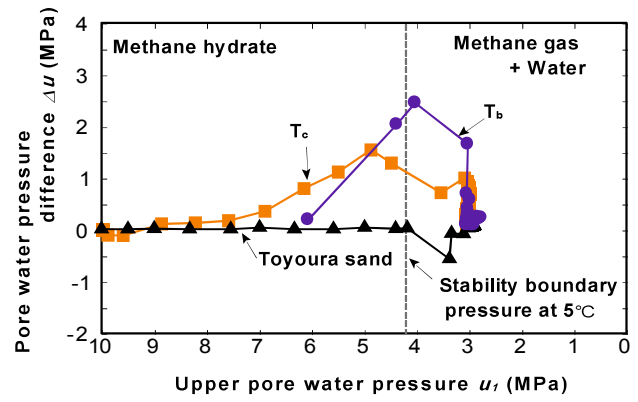


図 3-3-8 減圧中の上下間隙圧力差

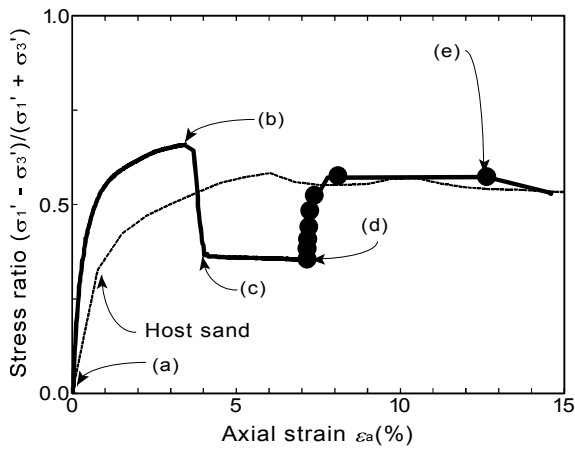


図 3-3-9 分解実験中の豊浦砂の

応力比-軸ひずみ関係

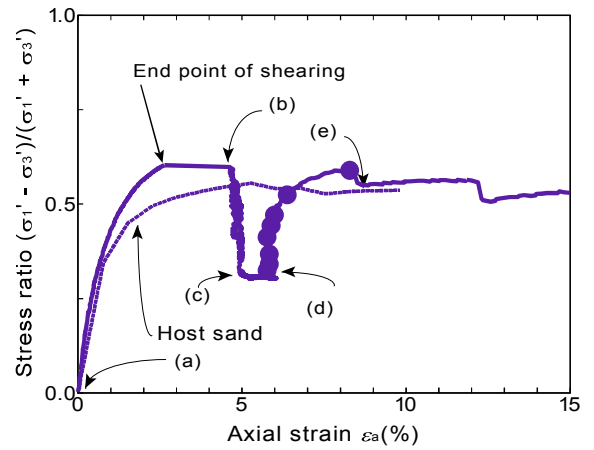


図 3-3-10 分解実験中の T<sub>b</sub> の

応力比-軸ひずみ関係

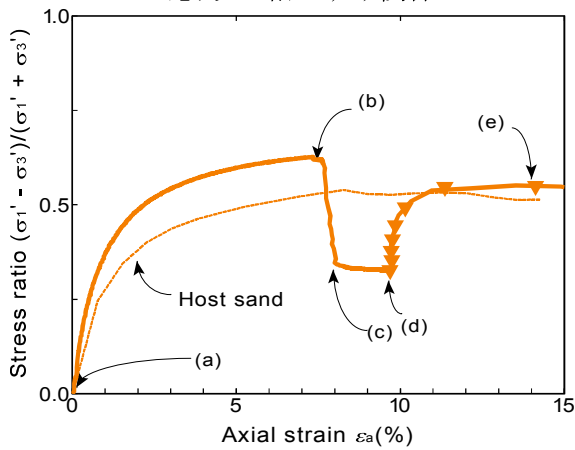


図 3-3-11 分解実験中の T<sub>c</sub> の応力比-軸ひずみ関係

3.4 分解に伴う土の変形および強度特性

3.4.1 分解時の変形特性

せん断開始から水圧回復までの応力比と軸ひずみの関係を、豊浦砂の結果を図 3-3-9 に、 $T_b$ の結果を図 3-3-10 に、 $T_c$ の結果を図 3-3-11 にそれぞれ示す。なお、 $T_b$ に関しては、せん断過程から減圧過程に切り替える時点で、圧力計とシリンジポンプの間の管路内にメタンハイドレートが生成されてしまったため、管路内のメタンハイドレートを融解するために時間がかかったことで、軸ひずみが進行している。なお、各ホスト砂のせん断試験の応力比も併せて示している。また、各図中のプロットはそれぞれ応力比の低い順に間隙水圧が 3MPa から 10MPa の点を示している。

図より、いずれの試料においても、間隙水圧が 3MPa になった時点である(c) からメタンハイドレートが完全に分解し水圧を回復する(d)までに応力比一定のまま軸ひずみが進行している。これは、メタンハイドレートの分解とクリープによる変形であると考えられる。次に、間隙水

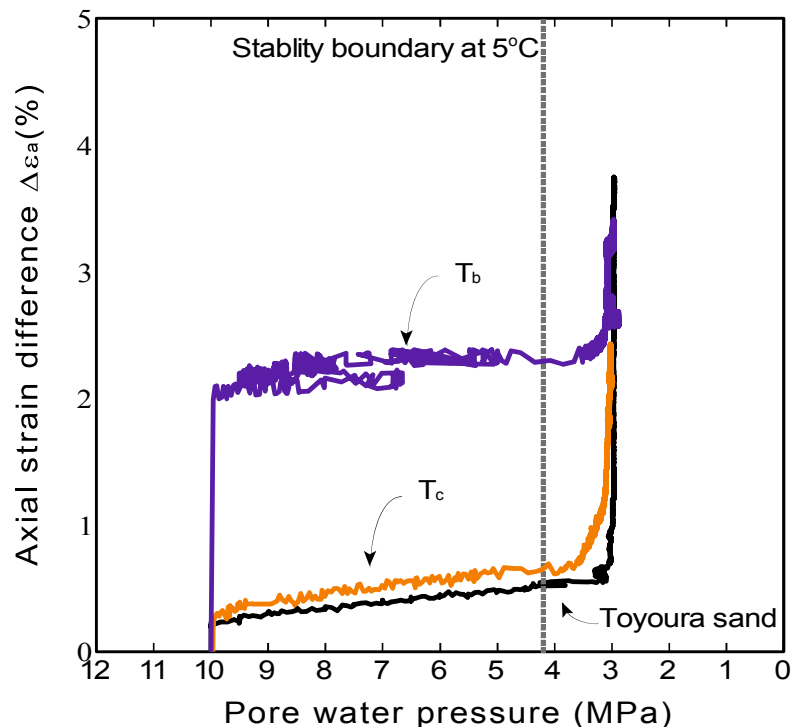


図 3-3-12 分解実験中の軸ひずみ増分と間隙水圧の関係

### 第3章 メタンハイドレート分解に伴う土の変形および強度特性

圧回復過程に着目すると、いずれの試料もホスト砂より高い応力比に達すると、破壊に至っていることが確認される。南海トラフの模擬試料である  $T_b$  と  $T_c$  を比較すると、細粒分含有率が高い  $T_c$  の方が破壊に至るまでの軸ひずみの値が高いことが分かる。

図 3-3-12 に、初期せん断終了時の軸ひずみを基準とした軸ひずみの増分と間隙水圧の関係を示す。図から、豊浦砂では間隙水圧が 3MPa 付近から、 $T_b$  および  $T_c$  では 4MPa 付近から傾きが変化していることが分かる。これは、有効応力の増加とともにメタンハイドレートが分解したことによると考えられる。また、 $T_b$  では管路中に生成してしまったメタンハイドレートを溶かすためにせん断過程から減圧過程に移行するまでに他の実験よりも時間を要したが、この間に応力比が一定のまま軸ひずみが進行し、クリープ変形を起こしていることが明らかとなった。以上のことおよびせん断試験によって得られた体積ひずみの関係から、メタンハイドレート減圧中の変形は、メタンハイドレートの分解による間隙の変化有効応力の増加に伴う変形、メタンハイドレート含有砂のクリープ変形、粒子破碎が影響を与えていることが推察される。

3.4.2 分解後の土の変形および強度特性

次に、間隙水圧回復過程に着目すると、いずれの試料もホスト砂より高い応力比に達すると、応力比一定のまま軸ひずみが進行し破壊に至っていることが確認される。減圧法によるMH分解後、間隙水圧を回復させ有効応力が低下していく際の供試体の画像からPTV解析を行った。PTV解析から求めた最大せん断ひずみコンター $\gamma_{\max}$ を図3-3-13に示す。ひずみの発達を細かく比較するために、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}=50\%$ 以上は全て同色で示している。図より、豊浦砂およびT<sub>b</sub>では元の間隙水圧にまでに達した時点でせん断帯が発生する様子が認められる。一方でT<sub>c</sub>では6MPa付近から $\gamma_{\max}=15\%$ 以上の最大せん断ひずみが広範囲に分布し、元の間隙水圧に達するとせん断帯が形成されており、細粒分含有率の違いによる差が認められる。

次に、これら細粒分による変形の違いを定量的に評価するために、PTV解析によって得られた供試体内の各要素の最大せん断ひずみからWeibull係数 $m$ を用いてばらつきを求めた。

最後に、Weibull分布によって求めたばらつきとコンターおよび供試体内の各要素の最大せん断ひずみの平均値 $\gamma_c$ を併せて変形挙動を評価した。

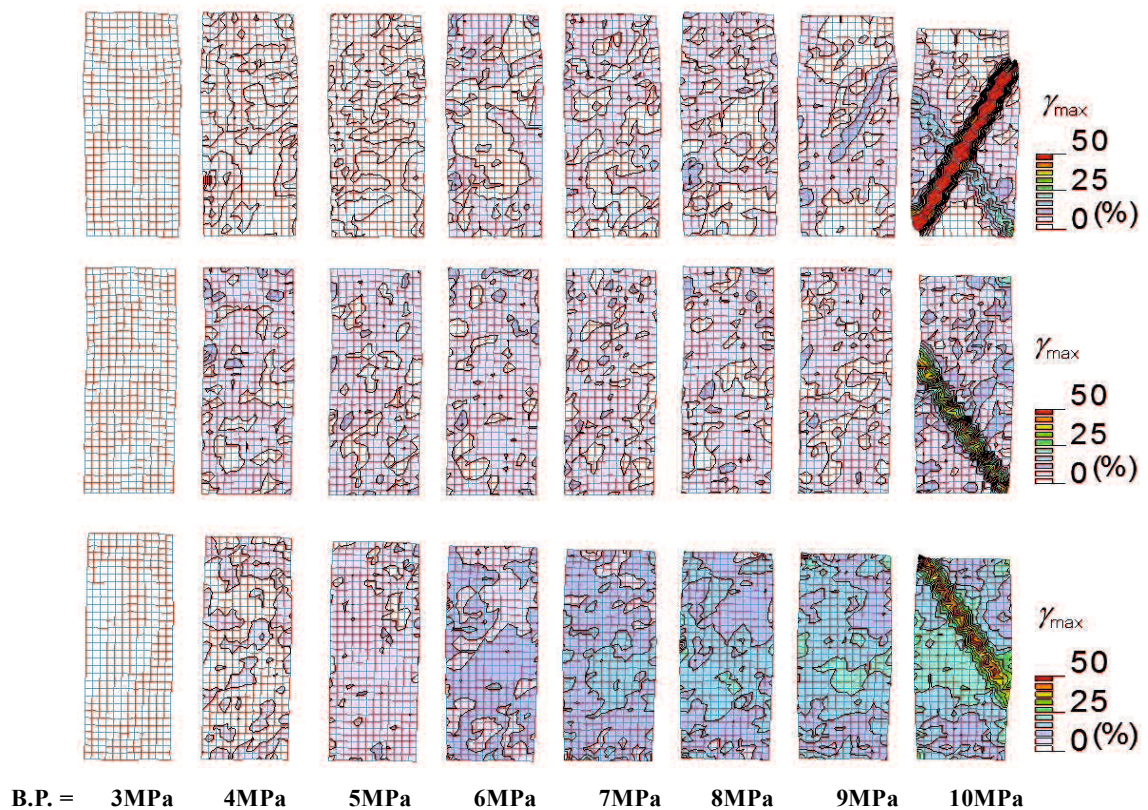


図 3-3-13 水圧回復中の最大せん断ひずみコンター

図3-3-14に間隙水圧回復中のWeibull係数 $m$ の変化を示す。また、図3-3-15に間隙水圧回復中の供試体各要素の最大せん断ひずみの平均値 $\gamma_c$ の変化を示す。図3-3-14より、豊浦砂および $T_b$ では、間隙水圧が9MPaに至るまでは、Weibull係数 $m$ は大きく変化していない。さらに、図3-3-15から、最大せん断ひずみの平均値 $\gamma_c$ にもほとんど変化が見られず、コンターからも供試体の変形が小さいことが分かる。一方、 $T_c$ では図3-3-14、図3-3-15より、間隙水圧が9MPaに至るまでにも、Weibull係数 $m$ および最大せん断ひずみの平均値 $\gamma_c$ が間隙水圧の上昇に伴って増加していることから、 $T_c$ の変形は全域的に変形が進行していることが分かる。また、この結果は図3-3-13からも明らかである。

最後に、間隙水圧が10MPaに達するといずれの試料においても急激にWeibull係数の値が低下し、ばらつきが大きくなっており、最大せん断ひずみの平均値 $\gamma_c$ も増加していることが分かる。図3-3-13より、最大せん断ひずみは供試体の一部に集中しており局所的に変形していることが明らかである。また、供試体が破壊した間隙水圧が10MPaになった時点の各試料を比較すると、図3-3-15より、最大せん断ひずみの平均値 $\gamma_c$ に関しては、 $T_b$ が最も小さく、豊浦砂および $T_c$ は同程度の値を示している。一方ばらつきの程度は、図3-3-16より細粒分含有率が低いほどにWeibull係数 $m$ が小さくなっている。

3種類の試料を相対的に評価すると、豊浦砂はばらつきの程度および最大せん断ひずみの平均値が最も大きい。 $T_b$ はばらつきの程度は3つの試料の中では中程度であり、最大せん断ひずみの平均値は最も低い。また、豊浦砂および $T_b$ は間隙水圧回復中、Weibull係数および最大せん断ひずみの平均値 $\gamma_c$ の推移に同様の傾向が認められ、供試体破壊時には高い最大せん断ひずみはせん断帯付近に集中していることコンターから分かる。 $T_c$ は、ばらつきの程度は最も低い一方

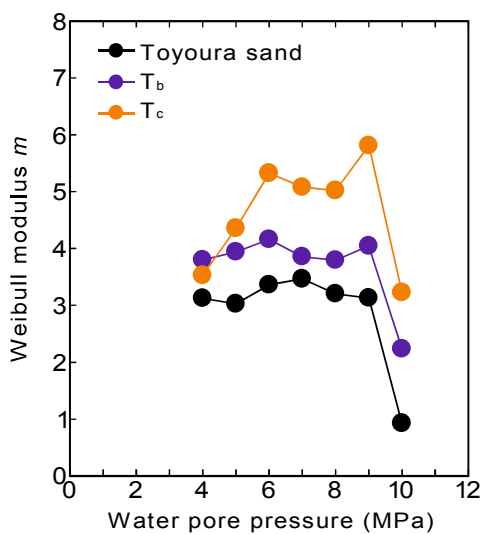


図 3-3-14 間隙水圧回復中の Weibull 係数の変化

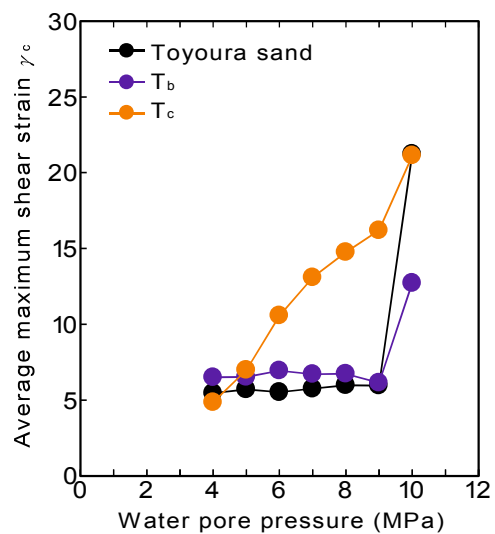


図 3-3-15 間隙水圧回復中の供試体の要素の最大せん断ひずみの平均値 $\gamma_c$ の変化



で、最大せん断ひずみの平均値 $\gamma_c$ は間隙水圧の上昇とともに増加し、最終的には豊浦砂と同程度のひずみが生じており、進行的な破壊が認められる。これより、細粒分含有率の低い試料は局所的に最大せん断ひずみが生じやすいと考えられる。

図3-3-16に、第2章のせん断試験によって得られたせん断帯の写真と、本章で得られた破壊後のせん断帯の写真を示す。図中に示すせん断試験のせん断帯画像は、豊浦砂と $T_c$ に関しては図2-4-21および図2-4-22に示すホスト砂の画像を使用し、 $T_b$ に関しては他のせん断試験で取得した画像と同条件の時点での画像を用いている。なお、分解実験中に得られた画像のせん断帯についても、Yonedaら(2013)の方法で定めた。図から、明らかな通り、いずれの試料に関しても、メタンハイドレート分解実験後のせん断帯の方が傾斜角は大きくなり、せん断帯の幅が大きくなる結果となった。これは、減圧の際に有効応力が大きくなったために、圧密が促進されたためであると推察される。

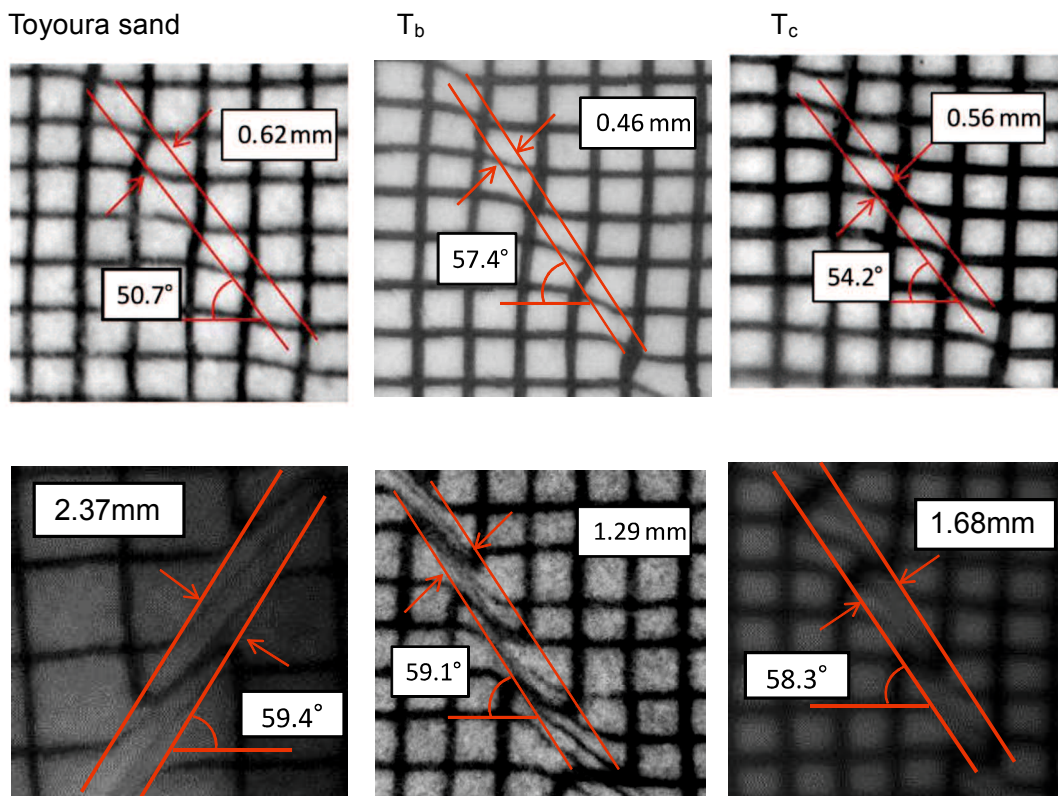


図3-3-16 せん断試験とメタンハイドレート分解実験後のせん断帯の比較

### 3.4 本章の要約

本章では、南海トラフ模擬試料を含む細粒分含有率の異なる3つの試料にメタンハイドレートを生成し、ホスト砂の強度以上であり、メタンハイドレート含有砂の強度以下となるせん断応力を与えた後に、減圧法を想定し、供試体上部側からのみ間隙水圧を減少させることでメタンハイドレート分解実験を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) メタンハイドレート含有砂を減圧すると、いずれの試料もメタンハイドレートの分解領域に至ると、メタンハイドレートの分解による吸熱反応で圧力境界を沿うようにして温度が減少する。
- (2) メタンハイドレート含有砂の減圧中、細粒分を含まない豊浦砂では大きな圧力差が認められなかったが、細粒分を含む  $T_b$  および  $T_c$  では供試体の上下端で圧力差が認められた。これは透水性が低いためと考えられる。また、時間の経過に伴いメタンハイドレートが分解し、徐々に圧力差が解消されることが明らかとなった。
- (3) 南海トラフのメタンハイドレート層の応力域で、減圧法によるメタンハイドレートを分解すると、有効応力の増加とともに軸ひずみの値が増加する。
- (4) 細粒分含有率に関わらず、メタンハイドレート分解後に間隙水圧を元の圧力まで回復させ、ホスト砂の破壊応力比に至ると破壊する。
- (5) 細粒分含有率の高い試料では、低い応力比から徐々に変形が進行し、破壊に至る軸ひずみの値も大きい。
- (6) 間隙水圧回復後の破壊した供試体のせん断帯は、有効拘束圧 3MPa で行ったせん断試験後の傾斜角よりも大きく、幅は大きくなる傾向がある。

【参考文献】

- Yoneda, J., Hyodo, M., Yoshimoto, N., Nakata, N., Kato, : A. Development of high-pressure low-temperature plane strain testing apparatus for methane hydrate-bearing sand, *Soils and Foundations*, Vol.53 (5), pp.774-783, 2013.
- 加藤晃：メタンハイドレートを含む砂の力学特性および分解変形挙動に関する研究，山口大学博士論文，2016.
- 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/> (2016年11月2日)
- 天満則夫，米田純，坂本靖英，攪本真代，青木一男，瀧口晃，森二郎，安井彩，方火浪：地層変形シミュレータ COTHMA の開発，第8回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集，pp.6-12，2016.
- 山本晃司，寺尾好弘，藤井哲哉，関誠，猪川晃道，松澤真樹，菅野貴行：南海トラフにおけるメタンハイドレートの第1回海洋産出試験作業，第5回メタンハイドレート総合シンポジウム，pp.77-78，2013.
- 山本晃司：4.「メタンハイドレートの海洋開発システム：在来型とどう違うか？」，メタンハイドレートフォーラム2016講演資料，2016.

## 第4章 メタンハイドレート生産を想定した粒状体の力学シミュレーション

### 4.1 概説

第2章、第3章において、土はメタンハイドレートによって固結されることで変形特性および強度特性が変化することを述べた。

また、変形および強度特性は、第2章においてメタンハイドレートの有無による強度差に関して述べたように、粒子間の固結の仕方によって巨視的な変形および強度特性に影響を与える可能性が考えられる。このことを考慮すると、たとえば粒子を固結している **Load bearing** 型のメタンハイドレートが分解した場合や **Pore filling** 型のメタンハイドレートが分解した場合など、メタンハイドレート生産に際して、砂粒子の周辺のメタンハイドレートの状態の違いが与える微視的な挙動を把握することは重要となってくる。

そこで本章では、第2章、第3章に用いたメタンハイドレートによって固結された状態のメタンハイドレート含有砂の固結力に着目し、固結された粒子が固結力を失った場合を想定し、個別要素法(以下、**DEM**)を用いてせん断シミュレーションおよびメタンハイドレート分解実験を想定したシミュレーションを行った。本研究では、2章で得られた知見をもとに、**Load bearing** 型のメタンハイドレート含有砂の特徴を再現するとともに、メタンハイドレートが土の変形および強度特性に与える影響を評価する。また、この解析モデルを用いて固結力を失った土のシミュレーションを行い、メタンハイドレート生産後の土の変形および強度特性の評価を行った。

以下に本章の構成を述べる。まず第2節において、本研究で用いた粒状体モデルの概要を述べる。第3節では、既往のメタンハイドレートに関する **DEM** の解析事例を踏まえながら、本研究で採用したメタンハイドレートのモデル化について述べている。第4節では、せん断シミュレーションを行った解析結果を示す。第5節ではメタンハイドレート分解実験を想定した、固結粒状体消去シミュレーションの解析結果を示す。

最後に、第5節に本章で得られた知見を要約し結論とする。

## 4.2 個別要素法による粒状体モデルの概要

### 4.2.1 個別要素法の基本的な計算サイクル

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。接触モデルにおいて、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ている。線形弾性ばねは、 $F=k_n\delta_n$  で表される。ここで、 $F$  は合力、 $k_n$  は法線方向のばね定数、 $\delta_n$  は接触点の法線方向の重なりを示している(Catherine, 2011 鈴木訳, 2014)。また、法線方向とは粒子間の接線方向に対して直交する向きである。接線方向ではさらに粒子間バネに加えスライダーを考える。法線方向モデルは粒子間の反発力、接線方向は粒子間の摩擦力を表現している(森口ら, 2015)。つまり、DEM では粒子同士が接触した時に初めて力が働く。接触の判定を全要素に対して行い、接触している場合、合力、変位の計算を行う。これにより新しい接触関係が生じ、再び粒子間の計算を行う。このサイクルの繰返しによって解析を行う。

### 4.2.2 粒子ばねの設定

本研究では粒子のばね定数を、伯野(1997)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定める方法を用いて決定した。以下に、伯野が提案した設定方法を簡略的に示す。

まず、1次元のばね・マスシステムを用いて、1次元の波動方程式は、式(4-1)で示される。

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 Y}{\partial X^2} \quad (4-1)$$

ここで、 $Y$  は時刻  $t$  における位置  $X$  での変位、 $V$  は波動伝播速度を示している。式(4-1)を差分方程式に変形すると、式(4-2)のようになる。

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = \frac{V^2}{\Delta X^2} (Y_{X-\Delta X} - 2Y_X + Y_{X+\Delta X}) \quad (4-2)$$

ここで、 $\Delta X$  は各要素の中心間距離、 $\Delta t$  は時間増分を示す。

次に、1次元分布質量系の振動方程式(4-3)を差分近似して式(4-4)となる。

$$m \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 Y}{\partial X^2} \quad (4-3)$$

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = \frac{E}{m} (Y_{X-\Delta X} - 2Y_X + Y_{X+\Delta X}) \quad (4-4)$$

ここで、 $m$  は各要素の質量、 $E$  はヤング率を示す。

また、1次元であることから、かかる応力を単位面積あたりに作用する力と考え、さらに単位長さで考えると、ヤング率とばね定数の関係は  $E=K$  と考えられる。

以上から、式(4-2)と式(4-4)を比較し、 $E=K$  を代入することで式(4-5)を得る。

$$K = m \frac{V^2}{\Delta X^2} \quad (4-5)$$

本研究では、3次元モデルで解析を行っていることから、要素の質量  $m$  は式(4-6)で表される。

$$m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \quad (4-6)$$

ここで、 $r$  は粒子の半径、 $\rho$  は要素の密度を示す。

また、中心間距離  $\Delta X$  は、半径を用いて式(4-7)で表すことができる。

$$\Delta X = 2r \quad (4-7)$$

また、弾性波  $V_p$ 、せん断波  $V_s$  は式(4-8)、式(4-9)のように表すことができる。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4-8)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (4-9)$$

ここで、 $\nu$  はポアソン比を示す。

式(4-5)、(4-6)、(4-7)より、法線方向のばね  $k_n$  および接線方向のばね  $k_s$  は式(4-10)、(4-11)で表すことができる。

$$K = k_n = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \frac{V_p^2}{4r^2} = \frac{1}{3} \pi r \rho V_p^2 \quad (4-10)$$

$$K = k_s = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \frac{V_s^2}{4r^2} = \frac{1}{3} \pi r \rho V_s^2 \quad (4-11)$$

さらに, (4-8), (4-9)を用いて(4-10), (4-11)を示すと,

$$k_n = \frac{1}{3} \pi r \rho \frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \frac{1}{3} \pi r E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (4-12)$$

$$k_s = \frac{1}{3} \pi r \rho \frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)} = \frac{1}{3} \pi r E \frac{1}{2(1+\nu)} \quad (4-13)$$

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, ホスト試料の要素(以下, ホスト粒子と記す)の物性値にガラスビーズの値を設定することとした. 土粒子密度は第2章に用いたガラスビーズの土粒子密度 $\rho_s=2.5\text{g/cm}^3$ とした. また, ポアソン比は今井ら(2004)によると,  $\nu=0.26$ であるが, 計算を簡略化するために $\nu=0.25$ とした. これにより, (4-12), (4-13)はそれぞれ, (4-14), (4-15)となる.

$$k_n = \frac{2}{15} \pi r E \quad (4-12)$$

$$k_s = \frac{2}{15} \pi r E \quad (4-13)$$

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バネ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(Catherine, 2011 鈴木訳, 2014). 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, Yang and Gu (2013)がガラスビーズに対して行ったせん断弾性係数 $G_0$ と拘束圧の関係から定めた. Yang and Gu によって行われたせん断弾性係数 $G_0$ と拘束圧の結果を図4-2-1に示す. このうち, 間隙比 $e=0.559$ の値を用いた. 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.

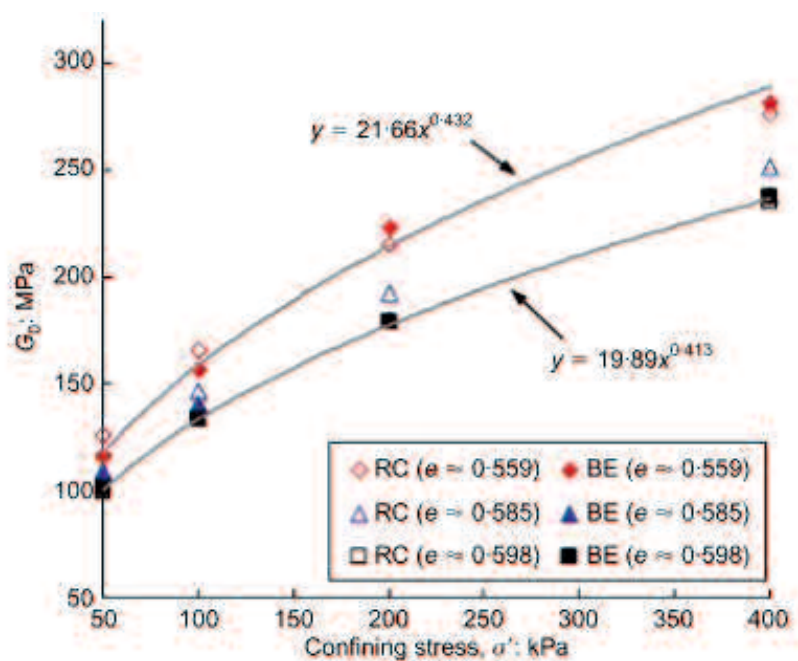


図 4-2-1 せん断弾性係数  $G_0$  と拘束圧の関係 (Yang and Gu, 2013)

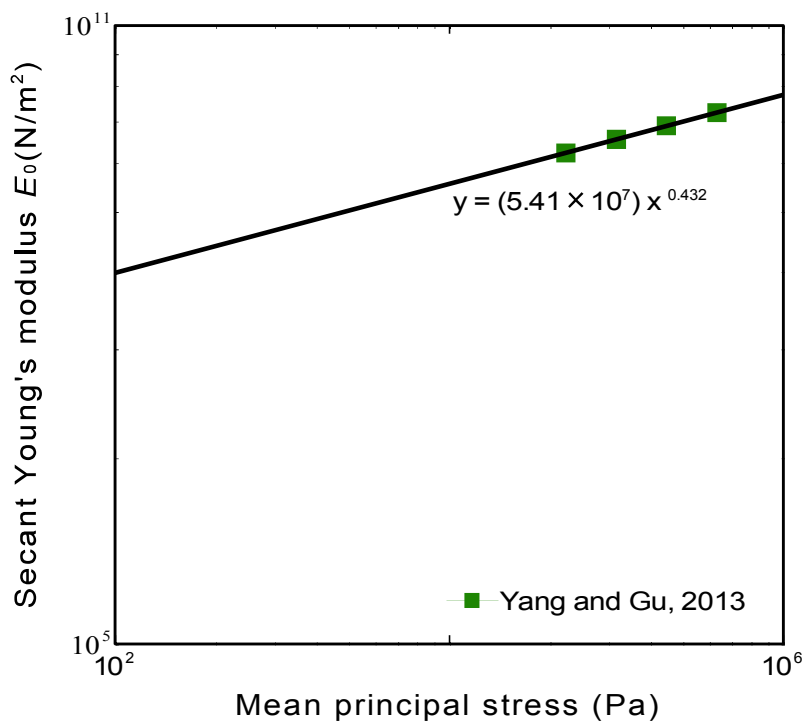


図 4-2-2 剛性  $E_0$  と拘束圧の関係 (Yang and Gu, 2013 より作成)



$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4-14)$$

この結果を図 4-2-2 に示す．これにより，ホスト粒子の剛性  $E_0$  を式(4-15)とした．

$$E_0 = (5.41 \times 10^7) \sigma^{0.432} \text{ (Pa)} \quad (4-15)$$

ここで， $\sigma$ は平均主応力である．

#### 4.2.3 粒子サイズと供試体の設定

供試体に用いる粒子のばねは 4.2.2 節で示した通りのばねを設定した．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 30×40×80mm の直方体の供試体を作製した．

粒子の生成は，重力下で所定の間隙率になる土粒子の体積を平均粒径を有する粒子の体積で除した個数である 4074 個を用意し，平均粒子の 2/3 の大きさの粒子を指定した領域に生成させた．この時の粒子間摩擦は 0.57 度とした．その後生成した粒子を拡大縮小して供試体を作製した．粒子のサイズが決定した後に粒子間摩擦を 28 度として安定させた．

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，30×80mm の面の壁の変位を固定し，40×80mm 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 4-2-3 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．粒子間のコンタクトボンドは，粒子同士が引き剥がされないう，4.3 章に示すように非常に高いボンド強度を設定している．

また，実験と境界条件を同じにするため，上下端 1 列目のメンブレン粒子は速度を 0 に設定して固定している．また，図 4-2-4 に解析に用いた供試体の粒度分布を示す．

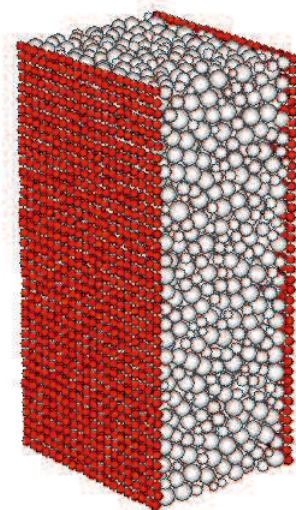
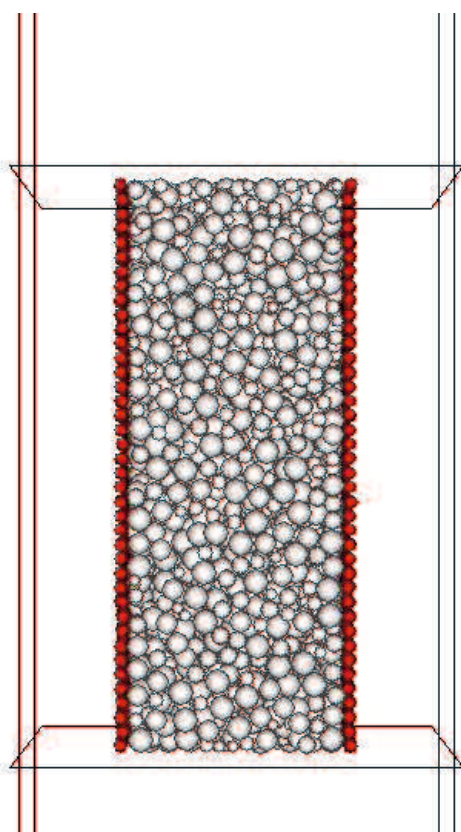


図 4-2-3 供試体の正面(上)と側面(下)の概観

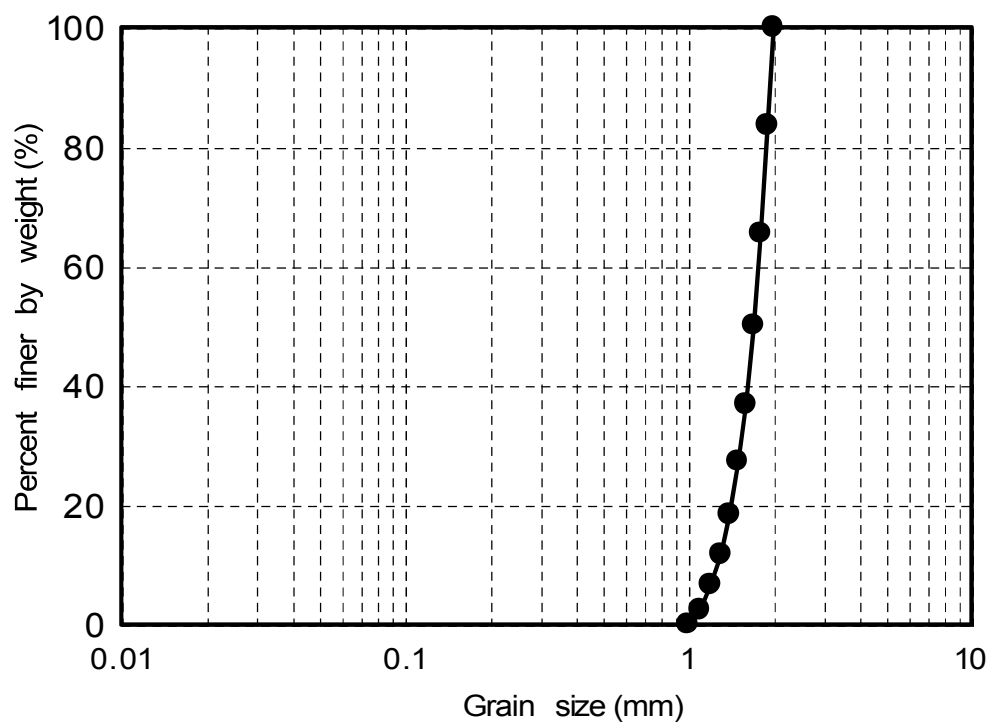


図 4-2-4 DEM 解析に用いた供試体の粒度分布

### 4.3 メタンハイドレートが土に与える影響のモデル化

#### 4.3.1 既往の個別要素法によるメタンハイドレート含有砂の解析

メタンハイドレート含有砂に対して DEM 解析を用いて力学特性や変形特性を微視的挙動から検討する研究が増加している。たとえば、力学特性に関して、近藤ら(2011)は2次元 DEM を用いて粒子間固結力を発生させて低速変位シミュレーションを行い、せん断応力が固結力よりも固結力の大きさ(メタンハイドレートの量)に大きく依存することを明らかにしている。また、片桐(2015)らはメタンハイドレートの存在形態に着目し、存在形態の異なるメタンハイドレート含有砂のモデルを作製し、同じ飽和率でも浸透率が異なることを示している。さらに、メタンハイドレート生産の生産効率の向上のために、メタンハイドレート層内に坑井から水圧をかけることで亀裂を発生させ、透水性を向上させてメタンガスを回収する、フラクチャリングという方法が提案されているが、これに対しても DEM を用いて亀裂の発達の評価がなされている(吉川ら, 2016)。この結果、粗粒子が多いほど、亀裂の発達が阻害されることが指摘されている。メタンハイドレート含有砂に対する DEM 解析のモデルにおいて、メタンハイドレートの再現は大きく分けて供試体を構成する砂粒子に直接固結力を持たせるモデル(Jiang et al., 2014)と、砂粒子の間隙中に MH を想定した粒子を有する供試体を作製するモデル(Brugada et al., 2010)が挙げられる。表 4-3-1 にメタンハイドレート含有砂を対象にして行われた DEM 解析の既往の研究の一例を示す。以下、固結力を持つ粒子を固結粒子、固結粒子を含有する供試体を固結粒状体と記す。

2章のせん断試験結果より、メタンハイドレート含有砂の体積ひずみはホスト砂の体積ひずみと比較するとより膨張挙動卓越する結果が得られた。また、2章のメタンハイドレート分解実験の結果から、メタンハイドレートが分解することによって軸ひずみが進行し、供試体が変形していくことが明らかとなった。これらの結果より、メタンハイドレート含有砂の変形特性はメタンハイドレート含有砂中のメタンハイドレートが固結力としての役割だけで無く体積を持つ個体として変形特性に影響を与えていると考えられる。そこで本研究では、メタンハイドレートを固体として取り扱う、供試体の間隙中にメタンハイドレートを想定した固結粒子を生成させるモデルを採用し、3次元 DEM 解析を行った。

表 4-3-1 メタンハイドレート含有砂に対する既往の研究一覧

	Dimension	Analysis object	Particle size of host particle $D$ (mm)
Brugada et al. (2010)	3	Axial compression simulation (Axisymmetric)	0.1–0.25
Jiang et al. (2014)	2	Biaxial compression simulation	6–9
Kondo et al. (2012)	2	Simple shear simulation	No contributions
Katagiri et al. (2015)	3	Penetration simulation	0.24
This study	3	Axial compression and MH dissociation simulation (Plane strain)	0.1–0.2

Normal stiffness of host particle $k_n$ (N/m)	Tangential stiffness of host particle $k_s$ (N/m)
$572 \times 10^6 \times D$	$0.7k_n$
$3.0 \times 10^8$	$3.0 \times 10^8$
$1.0 \times 10^8$	$2.5 \times 10^7$
No contributions	No contributions
$(2\pi r (5.41 \times 10^7) \sigma^{0.432})/15$	$(2\pi r (5.41 \times 10^7) \sigma^{0.432})/15$

Expression of methane hydrate	Bonding
Particles	Nonexistent
Bond between elements	Existent
Bond between elements	Existent
Particles or expansion of host particles	Nonexistent
Particles	Existent

Particle size of methane hydrate $D$ (mm)	Maximum and minimum value of boundary condition (N/m;2D, N/m <sup>2</sup> ;3D)
0.04	$1 \times 10^6 - 3 \times 10^6$
-	$1 \times 10^6$ **
-	$9.62 \times 10^1 - 2.886 \times 10^3$ ***
0.04 or 0.24–0.296*	0****
0.08–0.09	$0.5 \times 10^6 - 3 \times 10^6$

\*At host particle expansion (Contains host particle).  
 \*\*Set pressure with depth of 50cm (N/m<sup>2</sup>).  
 \*\*\*Only the top and bottom edges  
 \*\*\*\*Using OpenFOAM. Constant flow velocity on two sides (0.42mm/s), Slip condition on the other 4.

4.3.2 固結粒子のばね定数のパラメータの決定

固結粒子のばね定数には、ホスト粒子のばね定数と同様の考え方をを用いることとした。ここで、ばね定数を定めるためには必要な剛性  $E$  を定める必要がある。しかし、メタンハイドレート含有砂の弾性波速度は報告されているものの(メタンハイドレート資源開発コンソーシアム, 2008; Dai, 2012), メタンハイドレートそのものの弾性波速度についての研究はなされていない。そこで、メタンハイドレートの密度とほぼ等しいことから、氷の剛性を固結粒子の剛性  $E_{BP}$  とした。

固結粒子の剛性は大気圧下で行われた果粒状の氷の剛性を用いることとした(田畑, 1958)。図 4-3-1 に氷の剛性と間隙率の関係図を示す。これによって、田畑は式(4-15)を提案している。

$$E_{ice} = (8.6 + 0.024t - 0.27n) \times 10^9 \text{ (Pa)} \quad (4-15)$$

ここで、 $t$  は温度、 $n$  は間隙率である。本研究では温度  $t=0$ 、 $n$  はホスト粒子の間隙率である  $n=40\%$  とした。また、田畑の行った実験は大気圧状態であったため、固結粒子のばね定数の拘束圧依存性はホスト粒子と同じ勾配で上昇すると仮定し、 $E_{BP}$  を定めた。

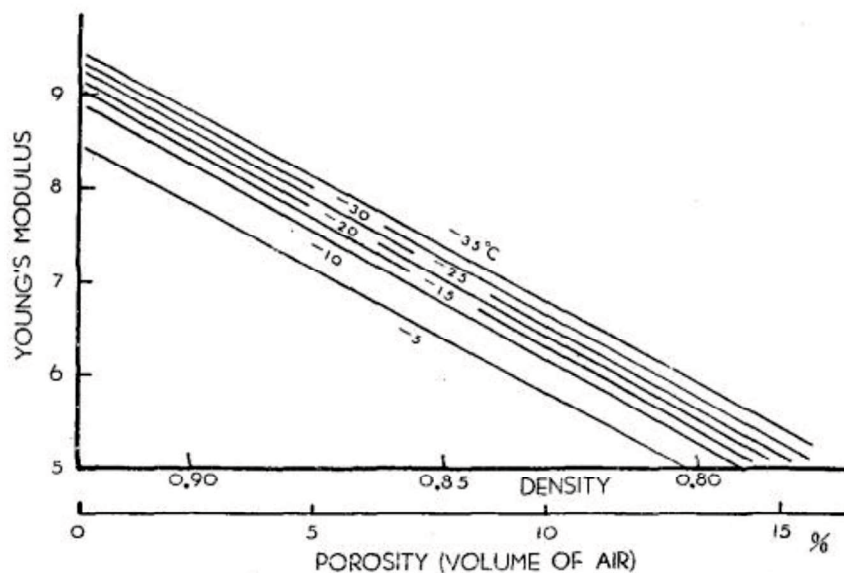


図 4-3-1 氷の剛性と間隙率の関係 (田畑, 1958)

$$E_{BP} = (5.41 \times 10^7) \sigma^{0.432} + 8.5 \times 10^9 \text{ (Pa)} \quad (4-16)$$

なお、固結粒子の粒子間摩擦角はホスト粒子と同じ 28 度とし、粒子密度は  $0.9\text{g/cm}^3$  とした。

#### 4.3.3 固結粒子サイズとメタンハイドレート飽和率の設定

本研究では、重力下で供試体を作製後、メタンハイドレートを想定した固結力を持つ粒状体を間隙に発生させた。メタンハイドレート飽和率  $S_{MH}$  は、間隙に占めるメタンハイドレートの割合であり、DEM では固結粒子の体積が間隙に占める割合を固結粒子飽和率  $S_{BP}$  としている。ここで、計算上は間隙の体積を球の体積で割ることで固結粒子の個数を求めることができるが、供試体の間隙中に固結粒子を発生させると、粒子の形状が球であることから、固結粒子飽和率が高くなると、非常に小さい粒子を生成する必要がある。片桐ら(2016)が行った DEM 解析によると、粒径  $0.24\text{mm}$  の単一粒子を間隙率  $n=47.2\%$  で生成した供試体に対して、メタンハイドレートを想定した  $0.04\text{mm}$  の単一粒径粒子を間隙に発生させると、飽和率が 28%以上は作製できない。

本研究では、固結粒子の大きさをホスト粒子の最小粒径である  $1\text{mm}$  よりも小さい  $0.8\text{mm}$  から  $0.9\text{mm}$  の粒径で再現した。固結粒子飽和率を変化させると固結粒子飽和率  $S_{BP}=25\%$  より高い飽和率では生成できず、生成可能な飽和率である固結粒子飽和率  $S_{BP}=20\%$  となった。

#### 4.3.4 固結粒子の固結力の設定

固結粒子の固結力の表現は、パラレルボンドを用いた。パラレルボンドは、球要素間のばねと並列に接続され、モーメント抵抗を有する特徴がある。パラレルボンドは、法線方向法線方向、接線方向それぞれのバネ定数  $\bar{k}_n$ ,  $\bar{k}_s$  およびそれぞれの強度  $pb\_nb$  と  $pb\_sb$ , さらに、パラレルボンドの作用する範囲であるボンド径を設定する必要がある。パラレルボンドの剛性は、吉川ら(2013)を参考に、式(4-17), 式(4-18)をそれぞれ用いて法線方向およびせん断方向の剛性を設定した。

$$\bar{k}_n = \frac{s_n}{A} \cdot k_{bn} = \left[ \frac{\left( \frac{V_{p\_bm}}{V_p} \right)^2 - 1}{A} \right] \cdot k_{bn} \quad (4-17)$$

$$\bar{k}_s = \frac{s_s}{A} \cdot k_{bs} = \left[ \frac{\left(\frac{V_{s,bm}}{V_s}\right)^2 - 1}{A} \right] \cdot k_{bs} \quad (4-18)$$

ここで、 $s_n$ および $s_s$ は透減率、 $k_{bn}$ および $k_{bs}$ は固結粒子のばね定数、 $V_{p,bm}$ 、 $V_{s,bm}$ は固結粒状体の波動伝播速度、 $A$ は平行ルボンドの断面積である。

固結粒状体の波動伝播速度を求めるために、Daiら(2012)が行ったハイドレート飽和率ごとのハイドレートの弾性波速度の測定結果を用いた。図4-3-2に弾性波速度とハイドレート飽和率の関係を示す。設定した固結粒子飽和率 $S_{BP}=20\%$ から、ハイドレート飽和率が20%、粒子の形状から、Load bearing型の弾性波を固結粒状体の弾性波速度とし、ハイドレート飽和率0%の弾性波速度との比を求めた。なお、本研究では、ハイドレート含有砂とホスト砂の弾性波速度の比は、拘束圧によらず一定であると仮定した。

平行ルボンドのボンド径は、固結粒子の平均粒径である0.85mmとした。また、ボンドの固結強度は、梶山ら(2015)で行った試験に加え、同じ粒度分布を持つガラスビーズを用いて拘束圧を変化させて軸対称条件でせん断試験を行い、モール円を描き、その粘着力をボンドの固結強度とした。図4-3-2に示す。図から、平行ルボンドの法線方向、接線方向の強度 $pb\_nb$ と $pb\_sb$ を2.5MPaとした。

以上、解析に用いたパラメータの一覧を表4-3-2に示す。



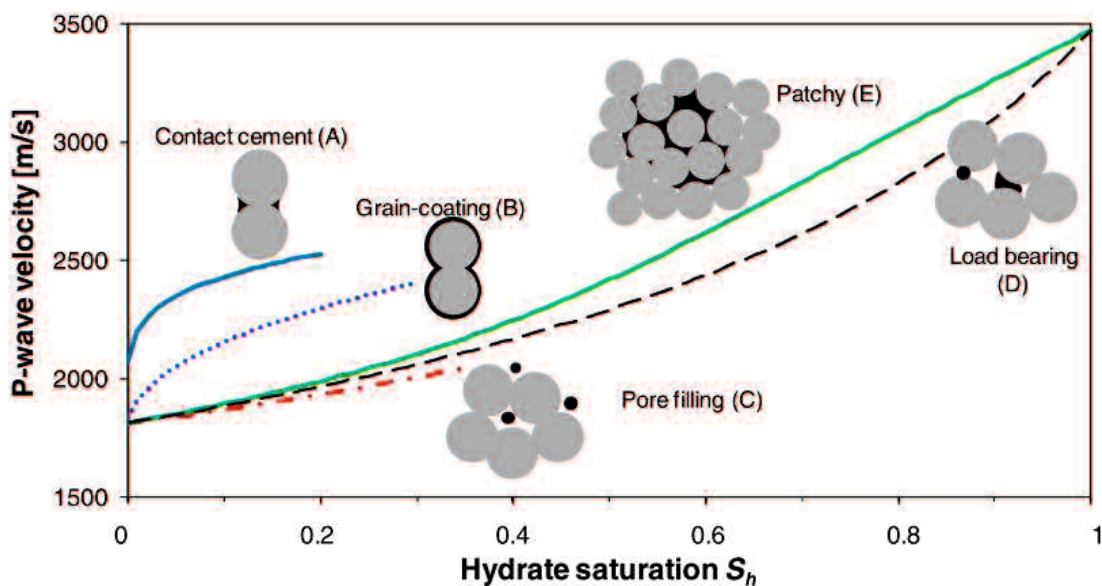


図 4-3-2 ハイドレートの弾性波速度とハイドレート飽和率の関係

(Dai et al., 2012 より一部抜粋)

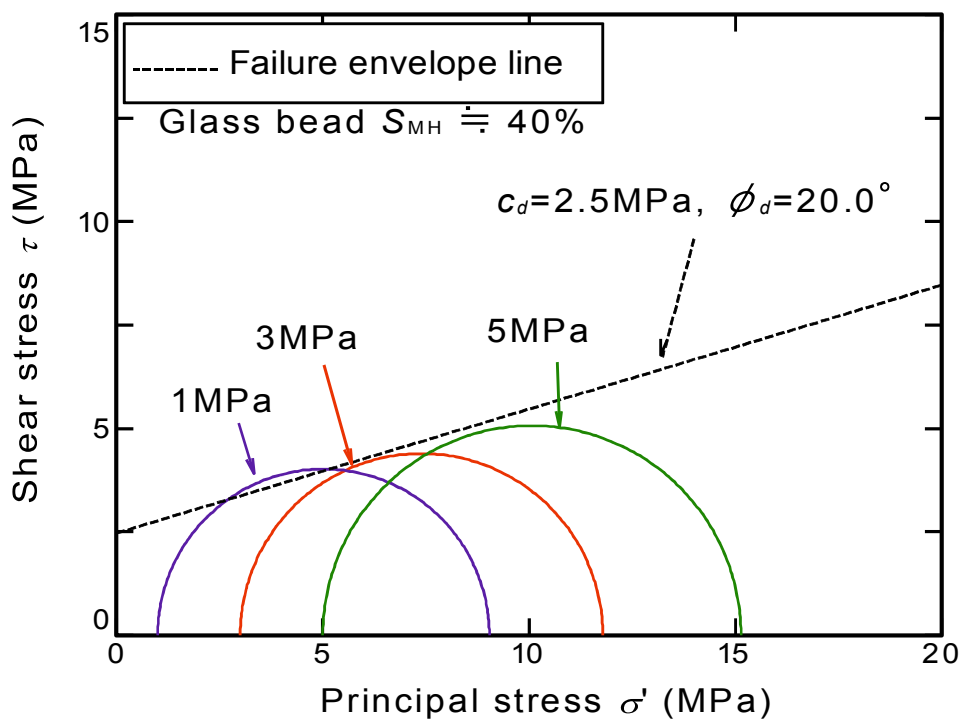


図 4-3-3 ガラスビーズのモールの応力円

表 4-3-2 解析に用いた各種パラメータ

	Host particle	Bonded particle	Membrane particle
Secant Young's modulus(N/m)	$E_0 = 5.41 \times 10^7 \sigma^{0.432}$	$E_{BP} = 5.41 \times 10^7 \sigma^{0.432} + 8.5 \times 10^9$	$E_0 = 5.41 \times 10^7 \sigma^{0.432}$
Normal stiffness (N/m)	$k_n = 2/15 \pi r E_0$	$k_{bn} = 2/15 \pi r E_{BP}$	$k_n = 2/15 \pi r E_0$
Tangential stiffness (N/m)	$k_s = 2/15 \pi r E_0$	$k_{bs} = 2/15 \pi r E_{BP}$	$k_s = 2/15 \pi r E_0$
Normal stiffness of contact bond (N)	-	-	$c_{nb} = 1 \times 10^{300}$
Tangential stiffness of contact bond (N)	-	-	$c_{sb} = 1 \times 10^{300}$
Normal stiffness of Parallel bond (N/m <sup>3</sup> )	-	$\overline{k_n} = S_n \cdot k_{bn}/A$	-
Tangential stiffness of Parallel bond (N/m <sup>3</sup> )	-	$\overline{k_s} = S_s \cdot k_{bs}/A$	-
Normal strength of Parallel bond (Pa)	-	$pb_{nb} = 2.5 \times 10^6$	-
Tangential strength Parallel bond (Pa)	-	$pb_{sb} = 2.5 \times 10^6$	-
Friction angle(°)	28	28	14
Particle size (cm)	0.1~0.2	0.08~0.09	0.1

## 4.4 粒状体モデルの変形および強度特性

### 4.4.1 解析手順

DEMによるせん断シミュレーションは、第2章に行った試験手順にできるだけ同じとなるように行った。以下に、手順を示す。

- 1) 有効主応力が 200kPa 時のばね定数を設定し、4.2.3 節に示した供試体の作製する。
- 2) 固結粒子をホスト粒子の間に生成した後、供試体を安定させる。
- 3) 所定の応力を与え、圧密を行う。具体的には、メンブレン粒子には設定した応力を与え、上下端の壁に設定した応力となった時点で所定の応力に達したとみなした。圧密過程ではまず、有効主応力を 200kPa に設定し、応力が 200kPa になり安定した後に、平行ボンドを固結粒子に与える。その後、応力を 50kPa ずつ上昇させてその都度粒子間ばね定数および平行ボンドのばね定数を更新し、拘束圧が 3MPa となるまで有効主応力を上昇させる。
- 4) 下端の壁を 0.01m/s の速さ上昇させ、せん断を行う。この時のタイムステップは、 $1 \times 10^{-6}$ s から  $1 \times 10^{-8}$ s とした。

### 4.4.2 粒状体モデルの変形および強度特性

せん断シミュレーションの解析結果と第2章で行ったガラスビーズの実験結果を図 4-4-1 に示す。図より、実験に比べ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。図 4-4-2 に有効拘束圧 0.5 から 3.0MPa まで変化させたときのシミュレーション結果を示す。図から、有効応力の増加に伴い、剛性およびピーク強度の増加が認められる。また、体積ひずみに関しては、有効応力が増加するほど収縮挙動が大きくなっている。

図 4-4-3 に固結粒子の有無による応力ひずみ関係の比較を示す。図から、固結粒状体では剛性はほとんど差が認められなかったが、ホスト試料よりも固結粒状体の方がピーク強度が高い結果となった。また、体積ひずみに関しては、ほとんど差が認められないものの、わずかに固結粒状体の方が膨張挙動がホスト試料より顕著となっており、メタンハイドレート含有砂の体

#### 第4章 メタンハイドレート生産を想定した粒状体の力学シミュレーション

積ひずみの傾向を再現できている。図 4-4-4 に Yoneda ら(2015)が描いたハイドレートによる強度増加量とハイドレート飽和率の関係に加筆し、本シミュレーションの強度増加量をプロットした。図より、概ね Yoneda らが提案した経験式の値付近にあり、特に有効主応力 3MPa で行ったシミュレーション結果とよく一致している。

図 4-4-5 に固結粒状体の軸ひずみ 0%時と軸ひずみ 8%時の供試体の変形の様子を示す。図から、軸ひずみ 8%の時点で供試体に変形している様子が分かる。また、図 4-4-6 に固結粒状体の平行ボンドの概観を示している。せん断シミュレーション開始時の平行ボンドの個数は 20656 個であり、軸ひずみ 8%時においても変化が認められず、平行ボンドは損傷していないことが分かった。図 4-4-5 および図 4-4-6 から、供試体の変形は固結粒子が付着しているホスト粒子以外のホスト粒子の移動によって起こったものと推察される。

図 4-4-7 に、1 粒子あたりの平均有効接触数と軸ひずみの関係を示す。ここで、有効接触は、接触力が 0 より大きい接触のことを示している。図中の All は全接触数、G-G はガラスビーズ粒子同士の接触、G-B はガラスビーズ粒子と固結粒子の接触を示している。図より、せん断が進むにつれガラスビーズ粒子同士の接触は少なくなり、ガラスビーズと固結粒子の接触が多くなることが明らかとなった。また、固結粒子飽和率 20%では、ガラスビーズと固結粒子の接触数は 1 以下で、固結粒子と有効接触していない粒子が存在することが分かった。

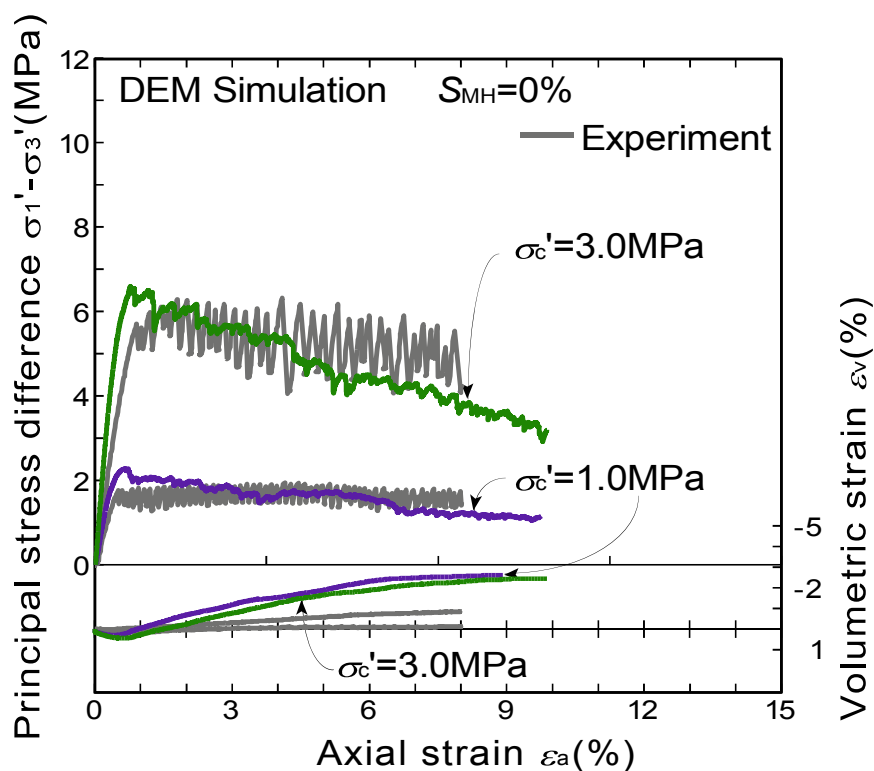


図 4-4-1 せん断シミュレーションと実験値の応力-ひずみ関係の比較

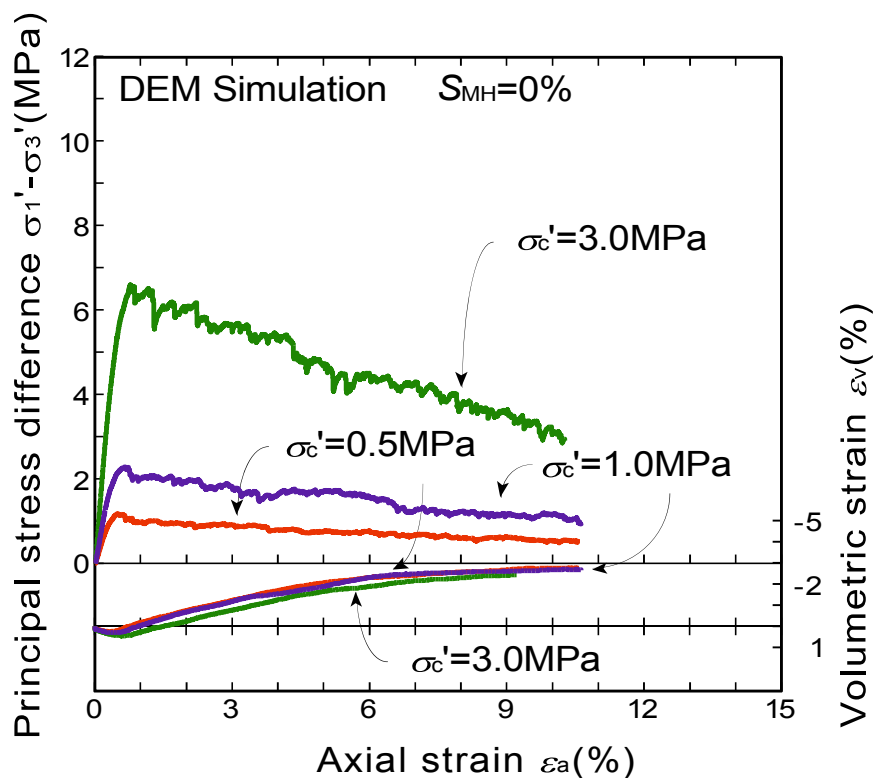


図 4-4-2 有効応力の違いによる応力-ひずみ関係の比較

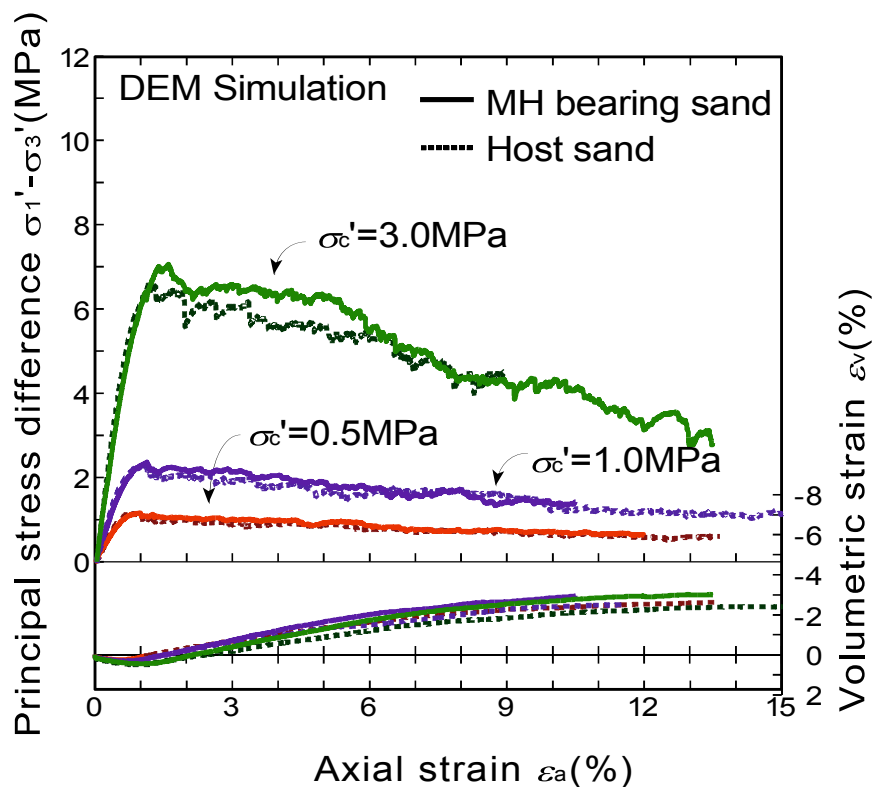


図 4-4-3 固結粒状体の応力比-ひずみ関係

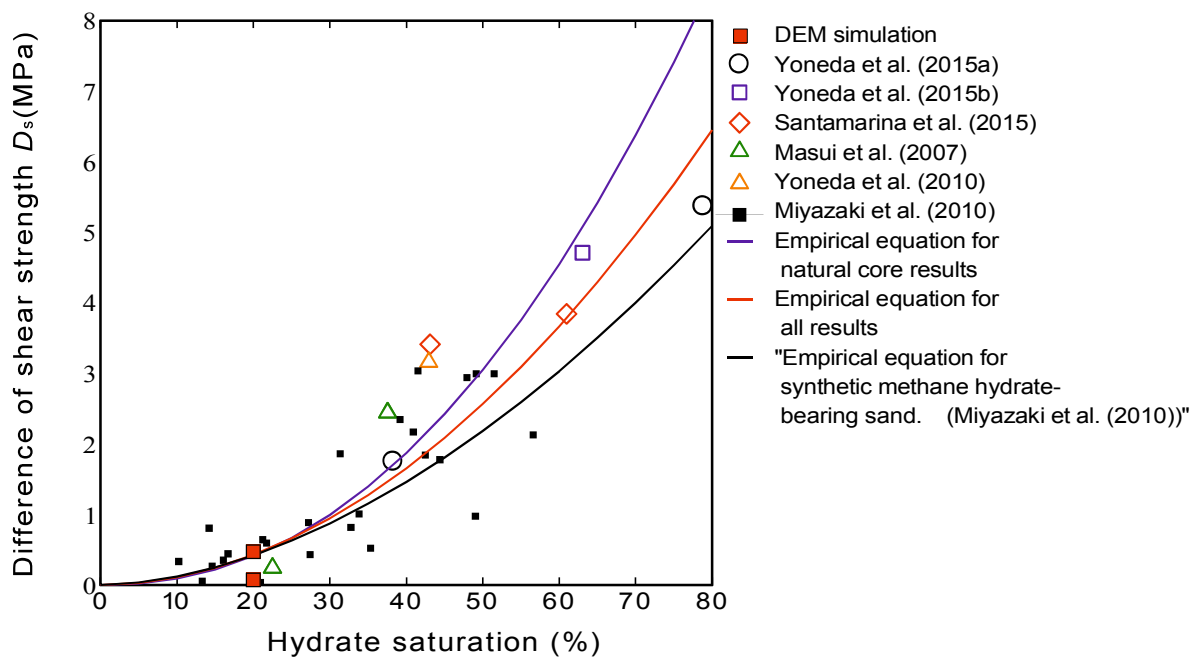


図 4-4-4 ハイドレートによる強度増加量とハイドレート飽和率の関係  
(Yoneda et al., 2015a をもとに作成)

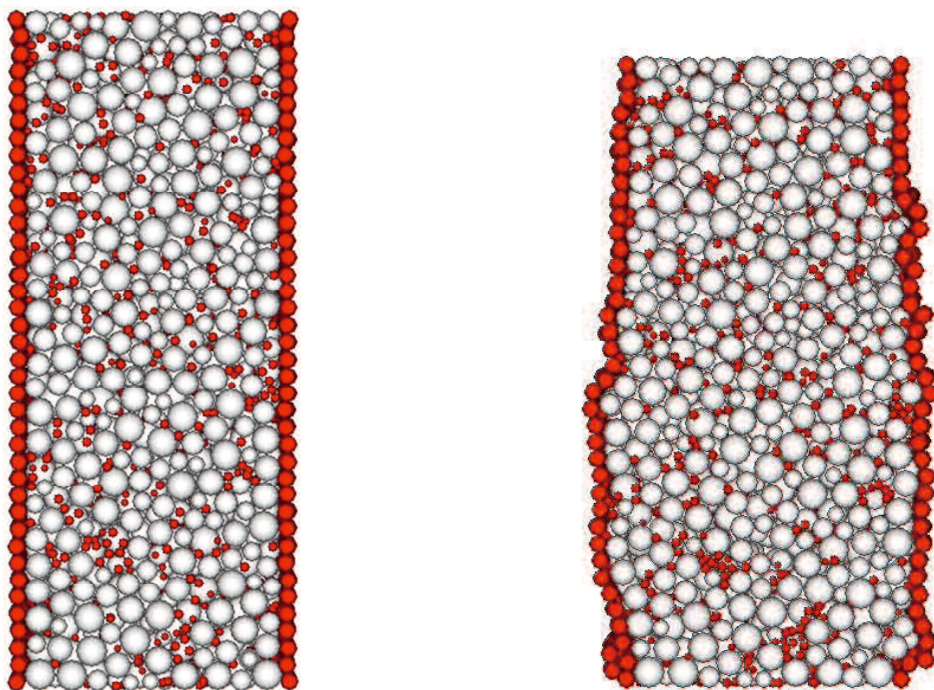


図 4-4-5 固結粒状体の軸ひずみ 0%時(左)と軸ひずみ 8%時(右)の供試体の変化

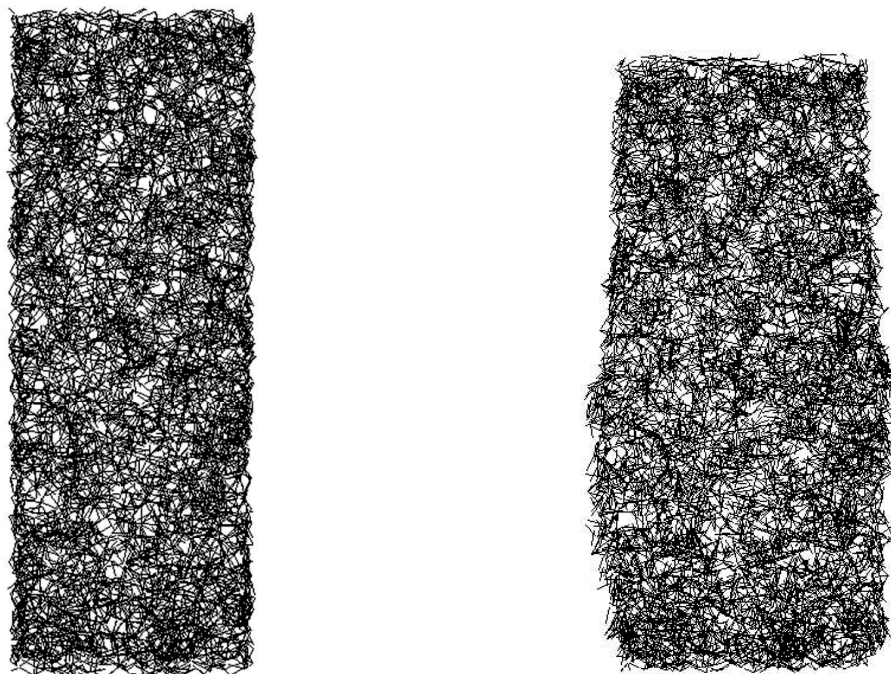


図 4-4-6 固結粒状体の軸ひずみ 0%時(左)と軸ひずみ 8%時(右)の平行ボンドの概観

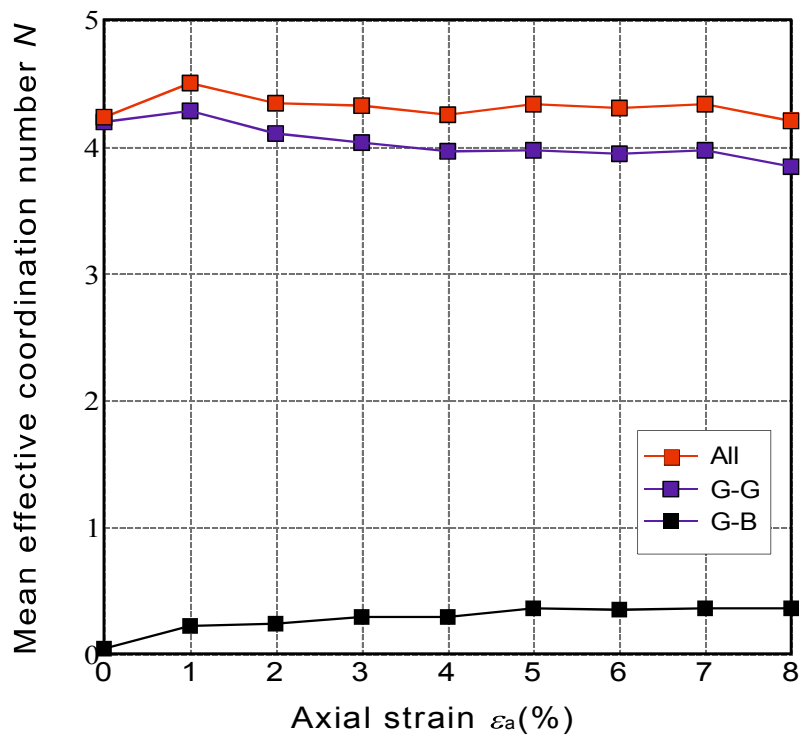


図 4-4-7 1 粒子あたりの平均有効接触数と軸ひずみの関係



### 4.5 生産を想定した粒状体の変形挙動

#### 4.5.1 解析手順

生産を想定した固結粒子消去シミュレーションは、前節で述べたせん断シミュレーションに用いた固結粒状体を用いて行う。また、シミュレーション中の固結粒状体にかかる有効応力は、第3章に述べたメタンハイドレート分解実験中の応力条件にできるかぎり沿う様に変化させた。以下に、手順を示す。

- 1) せん断シミュレーションに用いたピーク強度に達した固結粒状体および  $k_0=0.6$  の条件の固結粒状体を用意する。
- 2) 温度5度におけるメタンハイドレートの分解圧力が約 4.4MPa(3章のメタンハイドレート分解実験では有効応力 8.6MPa)であるため、軸差応力を一定に保ちながら有効主応力が 8.6MPa となるようにメンブレン粒子にかかる応力を 10kPa ずつ上昇させる。
- 3) 有効応力が 8.6MPa に達した時点で、供試体下端から 0.01cm 以下に存在する固結粒子のみを消去した後、供試体が安定するまでタイムステップを進める。この操作を 0.01cm ずつ行い、すべての固結粒子がすべて消去された後にメンブレン粒子にかかる応力と軸方向にかかる応力の比を一定に保ちながら、有効応力を 10MPa まで増加させる。
- 4) 供試体安定後、10kPa ずつ応力を 3MPa まで減少させる。
- 5) 供試体が安定するまでタイムステップを進める。

#### 4.5.2 生産を想定した粒状体の変形挙動

ピーク強度に達する直前の軸差応力 7MPa の状態で固結粒子消去シミュレーションを行った結果を図 4-5-1 に示す。この時の水平土圧係数  $K_h = \sigma_3' / \sigma_1' = 0.43$  である。また、図 4-5-2 に固結粒子消去過程を拡大した応力比とひずみの関係を示す。それぞれの図中の①から⑤は、①せん断過程、②有効主応力が 8.6MPa 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、これは本解析モデルでは破砕を考慮しておらず、初期にせん断応力を加えたことで供試体が密な状態にあり、メ

ンブレン側から高い応力を加えられたために上下端の応力が初期せん断応力を保とうと下端の壁が移動したためと考えられる。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ていることが明らかである。有効主応力を減少させる、つまり応力比が上昇すると、軸ひずみが大きくなっていることが分かる。その後、初期せん断応力に等しい軸差応力を保とうと下端の壁が動いた結果、軸ひずみは進行して供試体が破壊し、メタンハイドレート分解実験と同様の結果が得られた。図 4-5-3 に軸ひずみ 15%時の変形の様子を示す。図から、供試体がバルジ型に変形している様子が分かる。

次に、南海トラフにおけるメタンハイドレート生産時の土の挙動を評価するために、水平土圧係数を南海トラフの静止土圧係数となるように設定してシミュレーションを行った。南海トラフの静止土圧係数は、2003年に行われた南海トラフでの基礎試錘で採取された不攪乱試料の  $K_0$  圧密排水三軸試験の試験結果(米田ら, 2010)を参考に、水平土圧係数  $K_h=0.60$  とした。図 4-5-4 に  $K_h=0.60$  の条件で行った固結粒子消去シミュレーションを行った結果を示す。図中の①から⑤は図 4-5-1 に示す①から⑤の過程をそれぞれ示している。この結果、有効拘束圧が 3MPa に戻った後に、それ以降は安定し軸ひずみが進行しなかった。また、図 4-5-4 に  $K_h=0.60$  条件で固結粒子を消去した場合の安定後の供試体の変形の様子を示す。図からも分かるように、供試体に大きな変形は認められず、 $K_h=0.60$  の条件では固結力を失っても土は破壊しないことが明らかとなった。

図 4-5-6 および図 4-5-7 に、 $K_h=0.43$  条件、 $K_h=0.60$  条件で行った固結粒子消去シミュレーション中の有効接点数の変化をそれぞれ示す。図中の(a)から(g)および(g')はそれぞれ、(a)圧密終了時、(b)初期せん断終了時、(c)減圧時(有効主応力 8.6MPa)、(d)固結粒子消去時、(e)減圧時(有効主応力 10MPa)、(f)圧力回復時(有効主応力 3MPa)、(g)軸ひずみが 15%到達時、(g')供試体安定時の有効接点数を示している。図より、 $K_h=0.43$  条件では有効接点数が初期状態より減少していることが明らかである。一方で、 $K_h=0.60$  条件で行った分解シミュレーションでは有効接点数が初期状態より増加していることが分かる。このことより  $K_h=0.60$  条件ではメタンハイドレート生産後に地盤がより安定的になることが推察される。

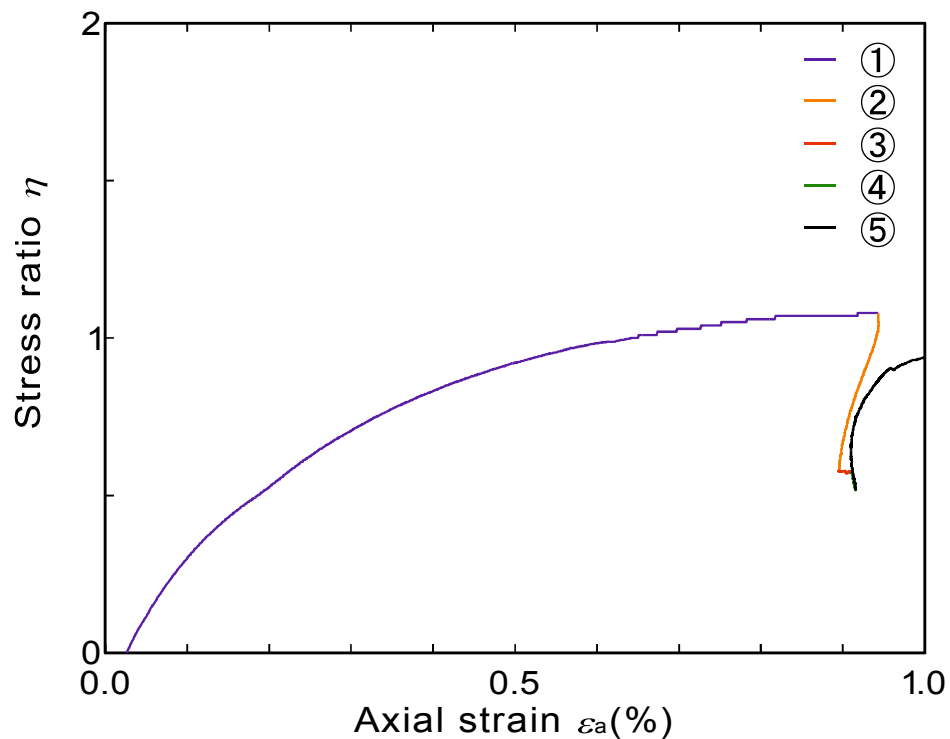


図 4-5-1  $K_h=0.43$  条件で固結粒子を消去した場合の応力-ひずみ関係

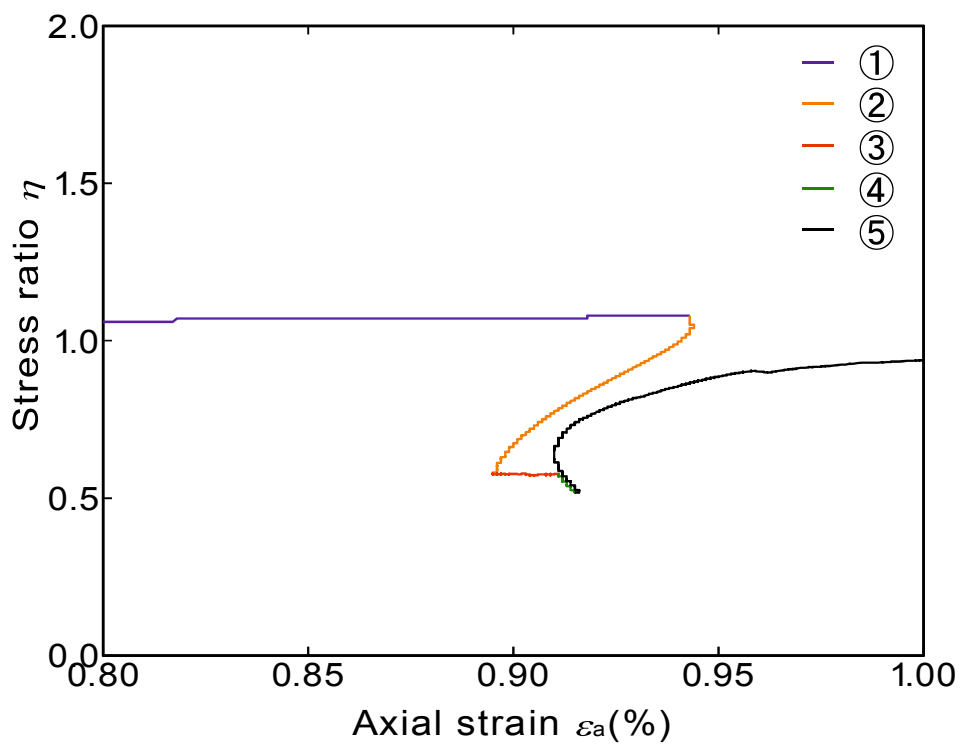


図 4-5-2  $K_h=0.43$  条件で固結粒子を消去した場合の粒子消去過程の応力-ひずみ関係

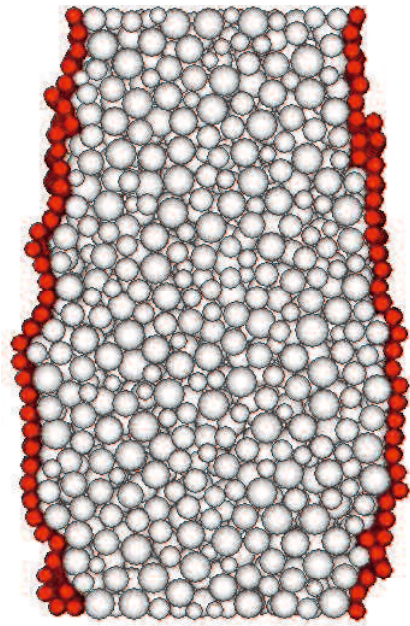


図 4-5-3 ピーク強度まで応力を与えた状態で固結粒子を消去した場合の  
軸ひずみ 15%時の供試体の変形の様子

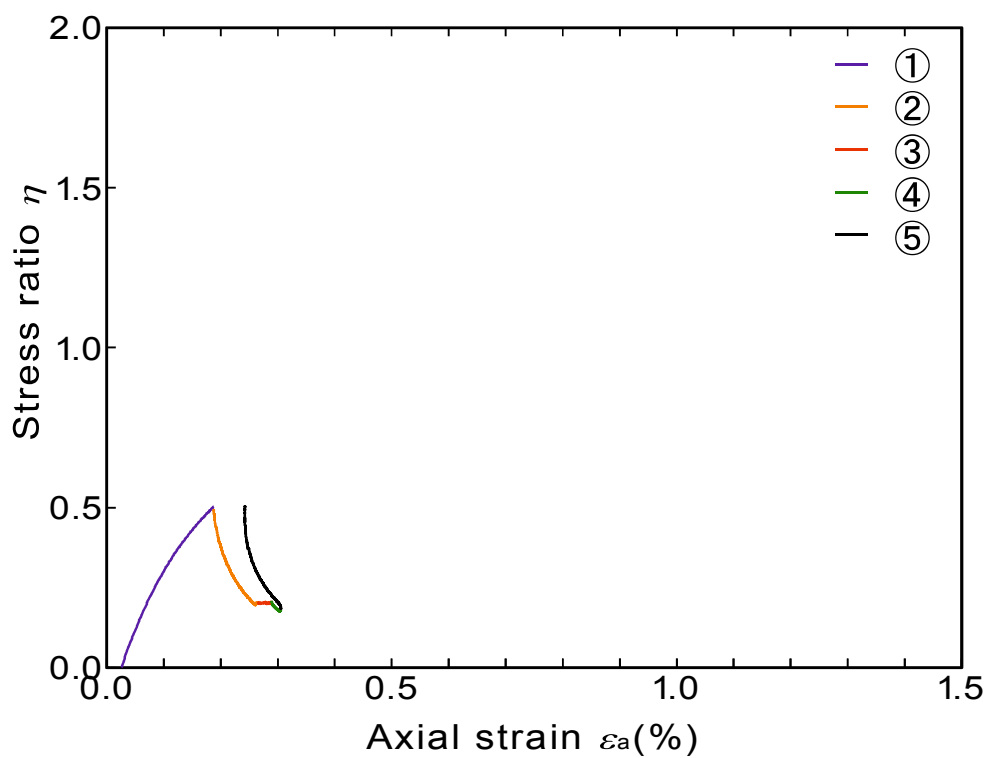


図 4-5-4  $K_h=0.60$  条件で固結粒子を消去した場合の応力ひずみ関係

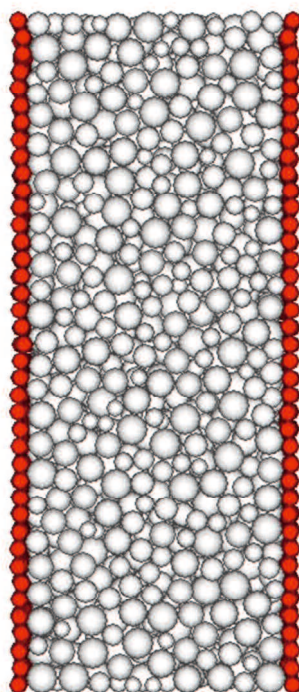


図 4-5-5  $K_h=0.60$  条件で固結粒子を消去した場合の軸ひずみ 0.25%時の供試体の変形の様子

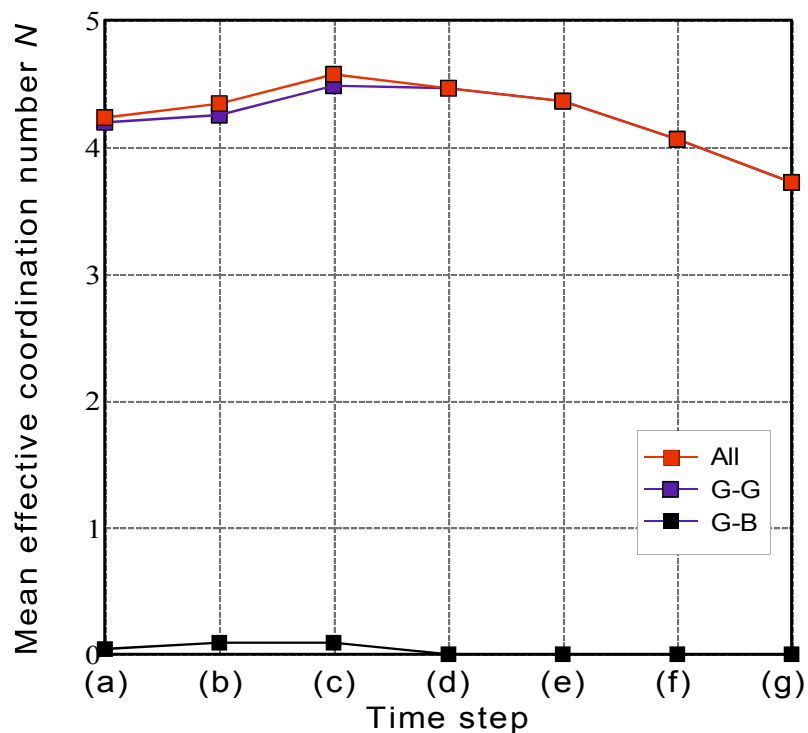


図 4-5-6  $K_h = 0.43$  条件の 1 粒子あたりの平均有効接触数とタイムステップの関係

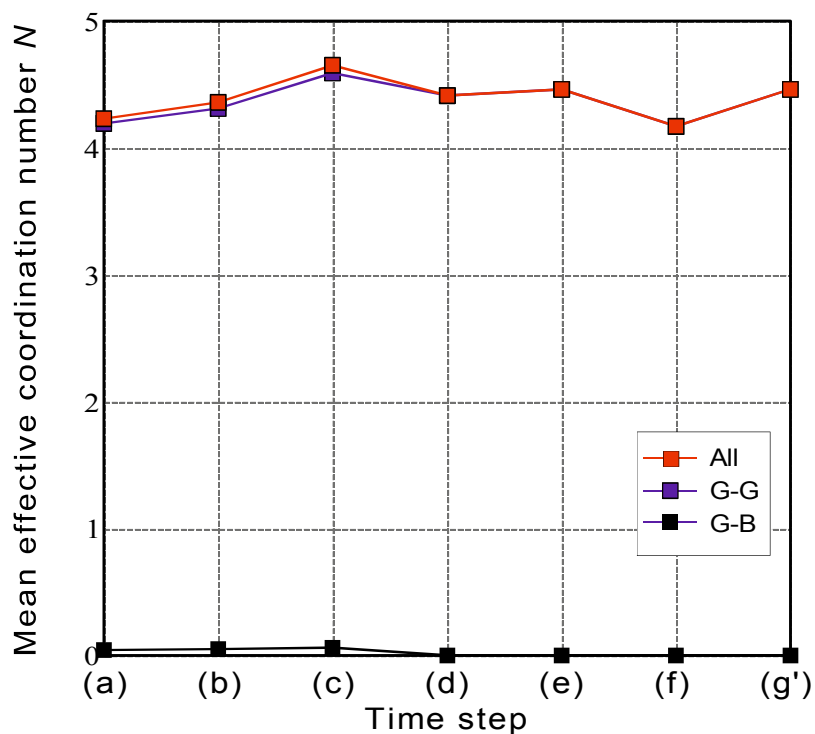


図 4-5-7  $K_h = 0.60$  条件の 1 粒子あたりの平均有効接触数とタイムステップの関係

#### 4.6 本章の要約

本研究では、2章で得られた知見をもとに、Load bearing 型のメタンハイドレート含有砂の特徴を再現するとともに、メタンハイドレートが土の変形および強度特性に与える影響を評価した。また、この解析モデルを用いて固結力を失った土のシミュレーションを行い、メタンハイドレート生産後の土の変形および強度特性の評価を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) せん断シミュレーションでは、固結粒子を含んだ固結粒状体は固結粒子を含まない供試体より強度が増加し、体積ひずみはやや膨張傾向を示す結果となり、メタンハイドレート含有砂の特徴を再現することができた。
- (2) 固結粒子消去シミュレーションの結果、 $K_h = 0.43$  の条件で固結粒状体から固結粒子を消去した場合、供試体が安定せず軸ひずみの値が大きくなり、類似の条件での実験結果と同様に、供試体は破壊することが明らかとなった。
- (3)  $K_h = 0.60$  の条件で固結粒子消去シミュレーションを行うと、軸ひずみがわずかに大きくなるものの、その後安定し、固結力を失っても破壊しないことが明らかとなった。
- (4) 固結粒子消去後の1粒子あたりの接点数は、 $K_h = 0.43$  の条件では減少し、 $K_h = 0.60$  の条件では増加することが明らかとなった。

【参考文献】

- Brugada J., Cheng Y. P. and Soga K. : Discrete element modelling of geomechanical behaviour of methane hydrate soils with pore filling hydrate distribution, *Granular Matter*, pp.517-525, 2010.
- Catherine O. : *Particulate Discrete Element Modelling*, CRC Press a member of the Taylor & Francis Group., 2011. 鈴木輝一(訳), 森北出版株式会社, 2014.
- Dai S., Santamarina J. C., Waite W. F. and Kneafsey T. J. : Hydrate morphology : Physical properties of sands with patchy hydrate saturation, *Journal of Geophysical Research*, Vol.117, B11205, 2012.
- Jiang M., Chen H., Tapias M., Arroyo M. and Fang R. : Study of mechanical behavior and localization of methane hydrate bearing sediments with different saturations by a new DEM model, *Computers and Geotechnics*, pp.122-138, 2014.
- Vinod J. S., Hyodo M., Indraratna B. and Kajiyama S. : Shear behaviour of methane hydrate bearing sand: DEM simulations, *Proc. The Int. Symposium on Geomechanics from Micro to Macro (IS-Cambridge 2014)*, pp.355-359, 2014.
- Yang J. and Gu X. Q. : Shear stiffness of granular material at small strains: does it depend on grain size?, *Geotechnique*, Vol.63 (2), pp.165-179, 2013.
- Yoneda J., Masui A., Konno Y., Jin Y., Egawa K., Masato K., Ito T., Nagao J., Tenma : Mechanical properties of hydrate-bearing turbidite reservoir in the first gas production test site of the Eastern Nankai Trough, *Marine and Petroleum Geology*, Vol.66 (2), pp.471-486, 2015.
- 今井剛, 高原利幸, 菊本あき子, 山上尚幸 : ガラスビーズ集合体の微小構造がマクロ挙動に与える影響, 第39回地盤工学研究会講演集, pp.391-392, 2004.
- 梶山慎太郎, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正 : 軸対称および平面ひずみ条件におけるメタンハイドレートによって固結された砂のせん断特性, 土木学会中国支部第67回研究発表会講演資料, pp.207-208, 2015.
- 片桐淳, 今野義浩, 米田純, 天満則夫 : 異なるモホロジを持つ多孔質体の輸送現象の微視的数値シミュレーション, 第8回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, pp.92-93, 2016.
- 吉川直孝, 堀智仁, 伊藤和也, 三田地利之 : 固結粒状材料における個別要素法パラメータの決定法の検討, *地盤工学ジャーナル*, Vol.8 (2) pp.221-237, 2013.
- 近藤邦彦, 上田高生, 松島亘志, 山田恭央 : 2次元DEMを用いたMH地盤材料のせん断強度に関する基礎的研究, *地盤工学会関東支部発表会発表講演集*, Vol.8 pp.124-126, 2011.
- 近藤邦彦, 上田高生, 松島亘志, 山田恭央 : 接触点にセメントボンドを有する粒状体の単純せん断及び一軸引張りシミュレーション, *土木学会第67回年次学術講演会講演集*, CDブッ



#### 第4章 メタンハイドレート生産を想定した粒状体の力学シミュレーション

ク, 論文番号 I-603, 2012.

伯野元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版株式会社, 1997.

田畑忠司: 海氷の力学的性質の研究 II: 振動法による弾性率の測定, 低温科学 物理篇, Vol.17, pp.147-166, 1958.

メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム: 「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」フェーズ1 総括成果報告書, 平成20年8月版, 2008.

森口周二, 前田健一, 松島亘志, 中田幸男, 小山倫史: 地盤工学のための個別要素法 3. 一次元の個別要素法, 地盤工学会誌, Vol.63 (5), pp.53-60, 2015.

吉川悠利, 清水浩之, 伊藤高敏, 天満則夫, 長尾二郎: 個別要素法による未固結地層フラクチャリング挙動に影響を与える要因の検討, 第8回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集, pp.22-25, 2016.

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, 66 (4), pp.742-756., 2010.

第5章 結論

本章では、第4章までに得られた知見をまとめ、結論とする。

- (1) 南海トラフのメタンハイドレート層の模擬試料においても、細粒分含有率が高いほどにMHによる強度増加が大きく、また、広範囲な変形を起こしやすくなると考えられる。
- (2) 初期剛性とメタンハイドレート飽和率の関係から、メタンハイドレートの存在形態はLoad bearing型あるいはPatchy型、またはそれらの混合形態をしていると推察される。
- (3) 減圧法でメタンハイドレートを分解すると、初期に強いせん断応力が与えられたメタンハイドレート含有砂は、メタンハイドレート分解後に間隙水圧を元の圧力まで回復させると破壊する。細粒分含有率の高い試料では、徐々に変形が進行し破壊に至る軸ひずみの値も大きい。
- (4) DEM解析より、南海トラフメタンハイドレート貯留槽の水平地盤を想定した $K_h=0.6$ の条件では、軸ひずみがわずかに大きくなるものの、その後安定し、固結力を失っても破壊せず、有効接点数が増加することが明らかとなり、メタンハイドレート生産前よりも安定化する可能性がある。

以上のことから、南海トラフ水平地盤においては、メタンハイドレート生産によってメタンハイドレートを失っても土は破壊せず、地盤は安定することが示唆された。また、大きな初期せん断応力を受けている状態でメタンハイドレート生産すると、メタンハイドレート分解後間隙水圧が回復すると破壊し、細粒分含有率が低い平行葉理層を模擬した $T_b$ の方が斜交葉理層を模擬した $T_c$ より局所的な変形を起こすことが明らかとなった。しかし、細粒分含有率が高い方が間隙水圧の回復途中から徐々に変形が進行することや、メタンハイドレートの消失による強度低下が大きいことから、現在メタンハイドレート生産が想定されている南海トラフ地盤においては、細粒分含有率が高い方が地盤工学的なリスクが高いと考えられる。