

メタンハイドレートを含む砂の力学特性および  
分解時変形挙動に関する研究

(Mechanical characteristics and deformation behavior  
during dissociation of methane hydrate bearing sand)

平成 28 年 3 月

加藤 晃

山口大学大学院理工学研究科

# 目次

|   |    |
|---|----|
| 第一章 序論 .....                                | 3  |
| 1.1 概説 .....                                | 3  |
| 1.2 世界のエネルギー動向 .....                        | 5  |
| 1.2.1 国際エネルギー動向 .....                       | 5  |
| 1.2.2 国内エネルギー動向 .....                       | 6  |
| 1.3 メタンハイドレートとは .....                       | 8  |
| 1.3.1 メタンハイドレートの構造と性質 .....                 | 8  |
| 1.3.2 メタンハイドレートの歴史 .....                    | 10 |
| 1.3.3 メタンハイドレートの賦存状況と存在状態 .....             | 12 |
| 1.4 メタンハイドレート生産における工学的課題 .....              | 17 |
| 1.5 メタンハイドレート生産に関する既往の研究 .....              | 19 |
| 1.5.1 メタンハイドレート含有砂の力学特性および変形挙動に関する既往の研究 ... | 19 |
| 1.5.2 メタンハイドレートの分解特性に関する既往の研究 .....         | 21 |
| 1.5.3 連成解析シミュレータの種類と位置づけ .....              | 21 |
| 1.6 本論文の目的と構成 .....                         | 23 |
| 参考文献 .....                                  | 24 |
| 第二章 海底地盤環境下におけるメタンハイドレート含む砂の力学特性 .....      | 26 |
| 2.1 概説 .....                                | 26 |
| 2.2 恒温高压平面ひずみ試験装置の概要 .....                  | 28 |
| 2.3 試験条件と試験方法 .....                         | 30 |
| 2.4 メタンハイドレートを含む砂の巨視的挙動 .....               | 34 |
| 2.5 メタンハイドレート含有砂の微視的挙動 .....                | 39 |
| 2.6 本章の要約 .....                             | 46 |
| 参考文献 .....                                  | 46 |
| 第三章 メタンハイドレート分解時の砂の変形挙動 .....               | 49 |
| 3.1 概説 .....                                | 49 |
| 3.2 減圧法によるメタンハイドレート分解実験の概要 .....            | 49 |
| 3.3 実験結果 .....                              | 51 |
| 3.4.1 減圧過程 .....                            | 51 |
| 3.4.2 水圧回復過程 .....                          | 54 |
| 3.5 本章の要約 .....                             | 59 |
| 参考文献 .....                                  | 60 |

|   |    |
|---|----|
| 第四章 有限要素法解析手法によるメタンハイドレートを含む砂の分解時変形シミュレーション ..... | 61 |
| 4.1 概説 .....                                      | 61 |
| 4.2 地層変形シミュレータ COTHMA .....                       | 61 |
| 4.3 メタンハイドレートの固結力を考慮した弾塑性構成式 .....                | 62 |
| 4.3.1 構成式の概要 .....                                | 62 |
| 4.3.2 塑性ポテンシャル関数と降伏関数の誘導 .....                    | 62 |
| 4.3.3 応力ひずみ関係の誘導 .....                            | 66 |
| 4.4 圧縮試験シミュレーション .....                            | 68 |
| 4.5 分解実験シミュレーション .....                            | 74 |
| 4.5.1 解析条件 .....                                  | 74 |
| 4.5.2 解析結果 .....                                  | 75 |
| 4.6 本章の要約 .....                                   | 78 |
| 参考文献 .....  | 78 |
| 第五章 結論 .....                                      | 79 |

# 第一章 序論

---

## 1.1 概説

我々はエネルギー源の有効活用によりこれまで目覚ましい経済発展を遂げてきた。経済発展とともにエネルギー資源を有効的に利用し、大量生産、大量消費により、豊かな物質文明を築き上げることに成功した。それゆえ、今日のような便利で快適な生活を手にすることができるようになってきている。しかしながら、ライフスタイルの変化等により、我が国のエネルギー消費は増え続け、中国、インド、ブラジルなどの新興国においても急速な経済発展のためにエネルギーの需要が大幅に拡大しており、エネルギー資源の獲得競争は世界的に激しくなっている現状がある。こうした背景から、国内で消費するエネルギーの安定供給を目的とした資源の自主開発比率の向上と供給源の多様化が急務となっている。特に資源の乏しい日本は、エネルギーの対外依存度が極めて高い状況にある。そこで近年、次世代資源としてメタンハイドレートが注目されている。

メタンハイドレートとは、水分子とメタンガスの水和化合物、つまり水分子が構成する籠状の結晶構造の内部にゲストガス分子が内包された固体状の物質であり、低温高圧下で安定する。メタンハイドレートの相平衡条件は **Katz** ら (1959) によって求められ、**Kvenvolden** (1998) は海底面からの深度と温度の関係を使ってメタンハイドレートの安定領域を示している。メタンハイドレートの研究開発が行われている東部南海トラフ海域における推定資源量は日本の LNG 輸入量 (2011 年) の約 5.5 年分とされている。2001 年にメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21) が設立された。2003 年には再び基礎試錐が実施されメタンハイドレートを含む堆積層コアを採取し、メタンハイドレートが多く存在するメタンハイドレート濃集層とそれ以外のメタンハイドレート賦存層が存在することが新たに判明した。さらに、東部南海トラフ海域において、2012 年 2 月から 3 月 (2011 年度) には、事前掘削作業として生産井やモニタリング井の坑井掘削を行い、同年 6 月から 7 月には、メタンハイドレート濃集層から、地下の圧力を保持してハイドレートの状態を保ったコアサンプル (地質試料) の採取作業を行っている。そして 2013 年には、東部南海トラフ海域において世界初の海洋産出試験が行われ、大きな成果を挙げている。

このような東部南海トラフ海域のメタンハイドレートを回収する方法として、メタンハイドレート貯留層まで井戸を掘削し、井戸内を減圧することで海底地盤内においてメタンハイドレートをメタンガスと水に分解し、メタンガスとして回収する方法が有効であることが明らかにされてきた。この場合、土粒子間の隙間に固体として存在するメタンハイドレートを気体として回収するため、メタンハイドレート生産開発中に以下のような問題が危惧される。掘削に伴う応力変化による海底地盤の変形、減圧に伴う有効応



力の増加による地盤沈下、地すべり、効率的な減圧手法の選択、生産中のガス漏洩、水圧の回復に伴う有効応力の減少による地盤の変形などである。これらの問題は、高い間隙圧での土の構造の変化や熱の伝導、間隙流体内でのガス発生による飽和から不飽和への浸透特性の変化、メタンハイドレート分解による土骨格の変化などを総合的に評価する必要があるため、地盤工学の総合的な知識が必要である。これらが解決されて初めて、安全で効率的なメタンハイドレートの生産が可能となる。メタンハイドレートの開発によって生じる海底地盤の様々な変化を事前に予測するため、メタンハイドレートを含む海底地盤の力学特性および変形挙動の解明や、メタンハイドレートの分解特性についての解明、それらを正確にシミュレーションするための解析手法の確立が求められている。

第2節では、現在の世界のエネルギー動向について述べる。第3節では、現在までに行われてきたメタンハイドレートに関する研究の歴史について概観する。第4節では、メタンハイドレート開発に想定される地盤工学的課題に触れ、第5節では、それら課題に対して現在までにどのような研究が行われてきたかを述べる。最後に第6節では、本論分の目的とその構成を示す。

## 1.2 世界のエネルギー動向

### 1.2.1 国際エネルギー動向

世界のエネルギー需要は、経済成長とともに増加を続けており、石油換算で1965年の38億トンから年平均2.6%で増加し続け、2013年には127億トンに達している。さらに近年では、先進国（OECD諸国）では伸び率が低く、開発途上国（非OECD諸国）では伸び率が高い傾向にある（図1-1）。これは、人口増加の伸び率と産業構造の変化、エネルギー消費機器の効率改善などが要因であると考えられている。国連が、2100年までの世界の人口推計をまとめた報告書「2012年度版世界人口展望」によれば、2013年7月現在での人口推計は71億6212万人、2050年では95億5094万人、2100年には108億5385万になると推計している。しかし、人口の増加率は徐々に減少することからエネルギー需要の伸び率は低下すると予測されるが、図1-2のようにエネルギー消費量そのものは今後も増加すると考えられる。

1970年代あたりから、中国や東アジア地域では、農林水産業から鉱工業へと主たる産業が変化していることから、それに比例してエネルギー需要が徐々に高まった。そのため、近年では安価な発電用燃料を求めて、中国やアジア地域の石炭輸入量が増加している。一方、先進国では気候変動の対応が強く求められる欧州における先進国で、天然ガスの需要が高まった。さらに近年では、低炭素化への要請に応えるために、原子力や新エネルギー、自然エネルギーの需要が高まっている。

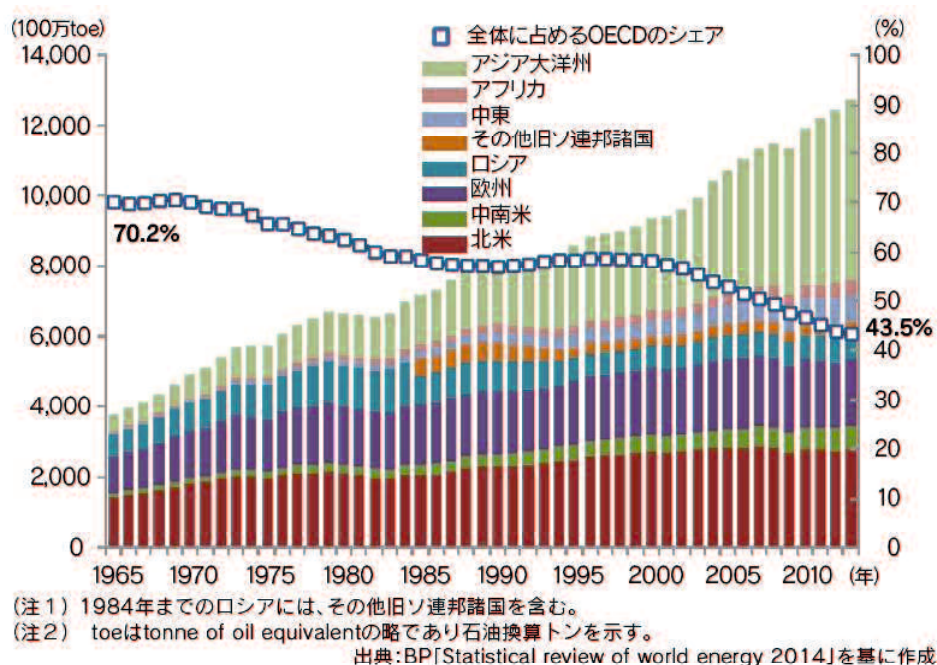


図-1-1 地域別の世界の一次エネルギー消費量の推移

(出典：エネルギー白書 2015)

## 1.2.2 国内エネルギー動向

我が国のエネルギー動向に目を向けると、1960年代の高度経済成長からエネルギー消費率が急速に高くなり、その後もエネルギー需要量は増加している（図 1-3）。高度経済成長期は、主に国産石炭をエネルギーの供給源であったが、中東地域などで大量に生産される石油を安価で輸入するようになり、現在も石油が主なエネルギー供給源である。油の供給先は主に中東地域であるため、第四次中東戦争によって原油調達が困難となり、原油の価格 70% も上昇した。これにより第一次オイルショックが起こったため、石油依存度を低減させるために、石油に代わるエネルギーとして、原子力、天然ガス、石炭などの導入が推進されてきた。その後、イラン革命による第二次オイルショックが起こり、再び原油価格が高騰した。イランから直接原油を大量に輸入していたこともあり、第二次オイルショックの影響を直接受けることになった。この二回のオイルショックを経験したこともあり、エネルギーの安定供給に重点を置き、代替エネルギー（原子力エネルギー、風力エネルギー、太陽エネルギーなど）の開発が進められてきた。

上記のような背景と原子力発電は安全で安価で安定しているという認識から、「原子力の平和利用」というキャンペーンのもとで、原子力発電が日本全国に普及した。2011年現在で、原子力発電所の数は 54 基となり、日本のエネルギーの安定供給に貢献してきた。しかし、2011年 3月 11日に起きた東日本大震災の福島原子力発電所の事故を受け、原子力発電の短所や人体への危険が露となった。この事故を機に原子力発電を停止したため、LNG の輸入が増加し、現在では日本の財政を圧迫している。

さらに近年では、エネルギー確保のために水素エネルギーや石油をつくる藻であるオーランチオキトリウムなどのバイオマスエネルギーの開発が行われている。しかし、コスト面や安定供給が困難であることから、主なエネルギーの供給方法となることができない。また、掘削技術の発達により、アメリカ合衆国ではシェールガスの開発・生産が行われている。我が国では、海洋掘削技術の進歩により、海底地盤中に存在するメタンハイドレートを地中で分解し、回収する事業が進められている。

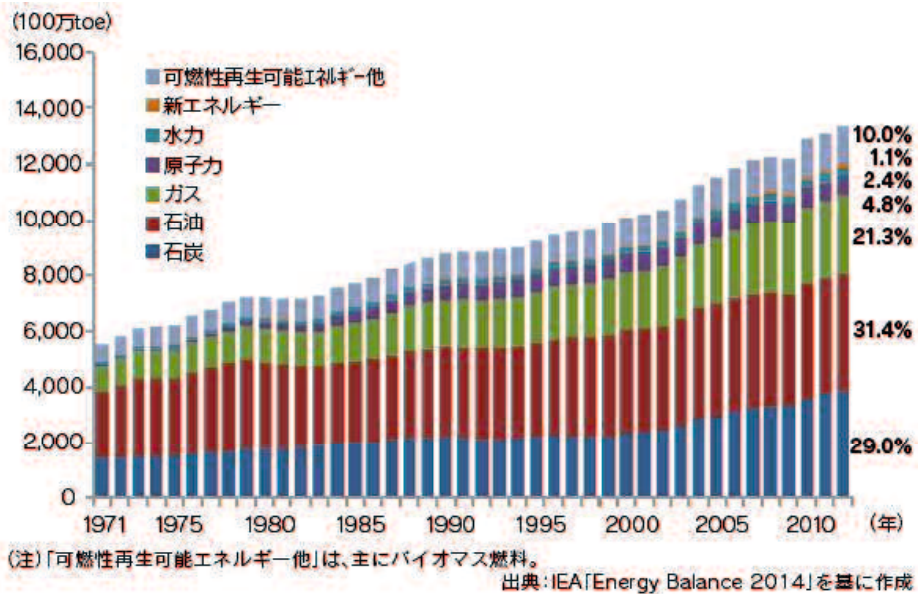


図-1-2 エネルギー源別の世界の一次エネルギー消費量の推移  
(出典：エネルギー白書 2015)

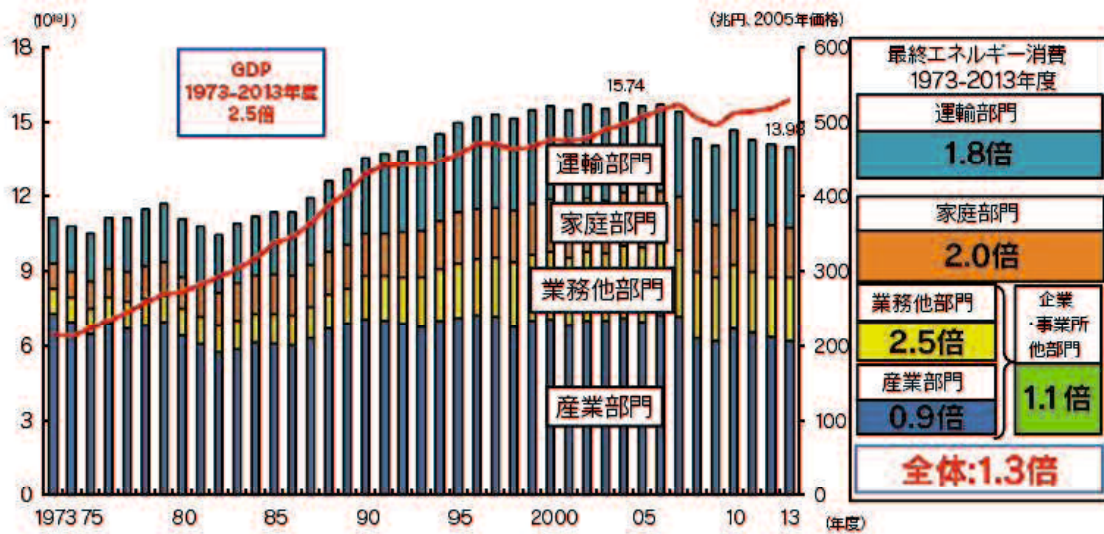


図-1-3 最終エネルギー消費と実質 GDP の推移  
(出典：エネルギー白書 2015)

### 1.3 メタンハイドレートとは

#### 1.3.1 メタンハイドレートの構造と性質

メタンハイドレートは、見た目が氷に言えること、火を近づけると燃えることから「燃える氷」と呼ばれている。また、メタンハイドレートは網状の結晶構造をもつ包接水和物の固体である。これは、水分子はある温度および圧力が条件になると、ガス分子（メタン、硫化水素、二酸化炭素など）を取り込むことができる籠型のマクロ分子構造を形成するからである。氷の分子構造も結晶構造をもつ固体であるが、メタンハイドレートの分子構造とは異なる。ガスハイドレートは、安定して存在できる条件を満たす温度および圧力に達したとき、水分子がガス分子を包接して次の3種類の立体網状構造物（多面体構造）を形成する。ガスハイドレートの構造は、含まれるゲスト分子によって変化することが知られており、ゲスト分子がメタンのみの場合にはI型と呼ばれる結晶構造、メタンだけでなくエタンやプロパンなどを多く含むようになるとII型と呼ばれる結晶構造を示すことがある。

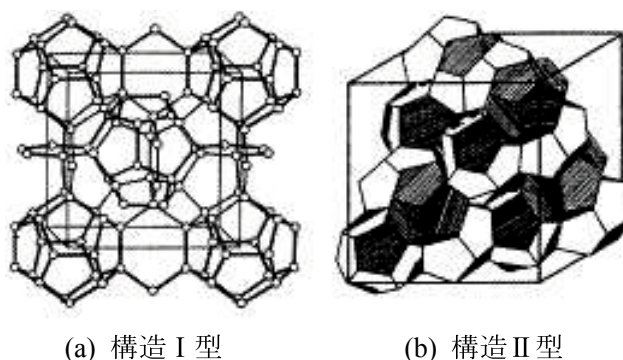
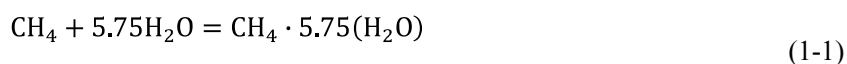


図 1-4 ガスハイドレート結晶の単位構造

構造 I 型の単位胞は、2 個の多面体と 6 個の多面体から成るが、8 個のガス分子を 46 個の水分子がとり囲むことを意味しており、従って水和数（ガス分子 1 個に対する水分子の数）は、5.75 と計算される。このためメタンハイドレートの分子式は以下のように示される。



式 1-1 から計算されるメタンハイドレート中のメタンガス含有量は、例えば  $1\text{m}^3$  のメタンハイドレートに対して、約  $160\sim 170\text{m}^3$  ( $0^\circ\text{C}$ 、1 気圧) である。

メタンハイドレートは、「低温高压」条件で安定して存在し得る物質であるため、普段の私たちの生活では見ることはない。例えば、圧力が大気圧のときメタンハイドレートが安定して存在し得るには、マイナス 80 度よりも低い温度である必要がある。また東部南海トラフ海域におけるメタンハイドレートが安定して存在している温度圧力条件はメタンハイドレートの平衡曲線に近い。メタンハイドレートの相平衡条件は Katz ら（1959）によって

求められている。圧力減少によってメタンハイドレートが分解すると、メタンハイドレートの自己保存効果により吸熱反応を起こすことがわかっている。この温度低下により、メタンハイドレートの分解が抑制され再生成を起こし、メタンガスの生産が止まってしまう。そのため、実地盤でメタンハイドレートを分解させる場合、地熱もしくは坑井から温水を流すことによって温度を上昇させ、分解を促進させる方法が検討されている。



### 1.3.2 メタンハイドレートの歴史

1930年代にシベリアなどの寒冷地域でガス田と消費地を結ぶ天然ガス輸送ラインの閉塞事故が多発し、その原因が低温・高圧の状況下で存在するガスハイドレートであると推測された。それ以降、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。それと同時に、同様な条件を満たす場所が天然にも存在すると推定され、シベリア、アラスカ、カナダ等極地の石油、天然ガス田の永久凍土層下部はこの条件を満たしていることが推定された。1950～1960年代には極地の陸域や海岸付近の海底地層中にハイドレートの発見が続き、エネルギー資源としてのポテンシャルが確認され、1970年代には極地以外に、黒海やカスピ海の湖底堆積物中や大陸斜面の水深300m程度以深の海底地層中にメタンハイドレートが賦存することが確認されている。Kvenvolden (1998) は海底面からの深度と温度の関係を使ってメタンハイドレートの安定領域を示している。近年では、図1-5のようにメタンハイドレートは世界中に分布していることから、メタンハイドレートに対する研究は欧米やインド、中国など全世界で進められている。



図 1-5 世界におけるメタンハイドレート分布図  
(出典：MH21 ホームページ)

わが国では、2001年に官民学共同体のメタンハイドレート資源開発コンソーシアム（通称：MH21）が発足され、日本近海に賦存するメタンハイドレートの資源化に向けた調査・研究が行われてきた。MH21発足からメタンハイドレートの商業化までの流れとして、大き

く3つのフェーズに分かれている。まずフェーズ1では、東部南海トラフ（静岡県沖～和歌山県沖）の地震探査や掘削調査を実施し、資源量の推定やメタンハイドレートの堆積状況の確認が行われた。その結果、東部南海トラフ海域では、開発可能性が高いメタンハイドレートを多量に含む地層（またはメタンハイドレート濃集層）が発見され、メタンハイドレートは砂泥互層（タービダイト）の砂分を多く含む地層に多く含まれていることが確認された。フェーズ2では、生産手法の高度化、賦存状況の評価、環境リスクの分析が行われ、さらに2013年には世界初の海洋産出試験が行われた。

2002年には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メタンハイドレートを含む地層からの天然ガス生産テストが行われた。さらに、2007年にマッケンジー川河口域において第2回メタンハイドレート陸上産出試験が減圧法によりメタンガスの生産に成功した。しかし、メタンハイドレートを含む地層は未固結堆積物のため、メタンガスや水とともに砂も生産されてしまい（出砂現象）、その砂がポンプを停止させてしまったため、試験は12.5時間で終了せざるを得なかった。翌年の2008年には、出砂対策を施し、減圧法による生産試験を実施したところ、約5.5日間の連続生産に成功した。試験期間に生産されたメタンガスは約13,000m<sup>3</sup>におよび、2007年におけるメタンガス産出量470m<sup>3</sup>を大きく上回る結果となった。

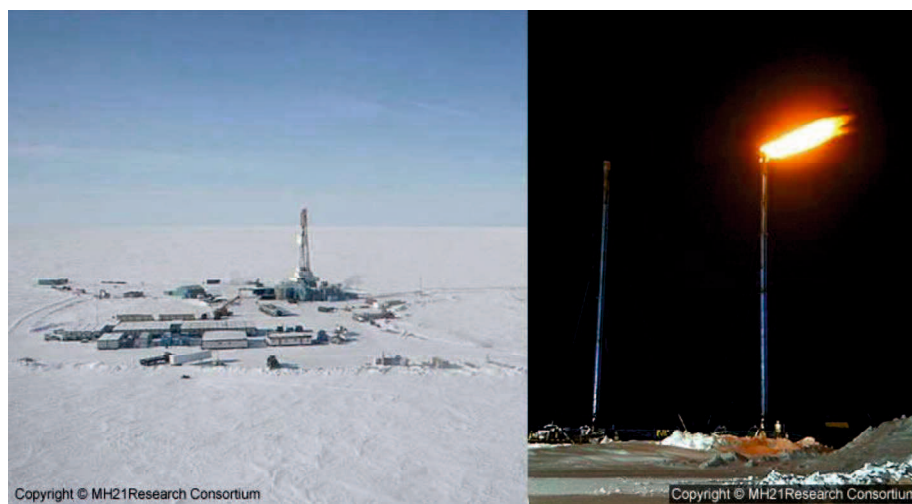


写真 1-1 （左）第2回陸上産出試験サイトの遠景  
（右）陸上産出試験より生産されたメタンガスのフレア

また近年では、2013年には東部南海トラフ沖において世界初の海上でのメタンハイドレート産出試験が行われた。このとき、JAMSTECが所有する地球深部探査船「ちきゅう」が生産試験に用いられた。6日間に渡る海上産出試験の結果、およそ120,000m<sup>3</sup>ものガス生産に成功した。これは日平均20,000m<sup>3</sup>/dayの計算であり、メタンハイドレートの資源化するにあたって十分な量のメタンガスが採取されたことになる。しかし、



出砂による生産障害や継続してメタンガスの生産を続けられない問題が生じたため、商業化に至るまでに未だに多くの課題が残っている。

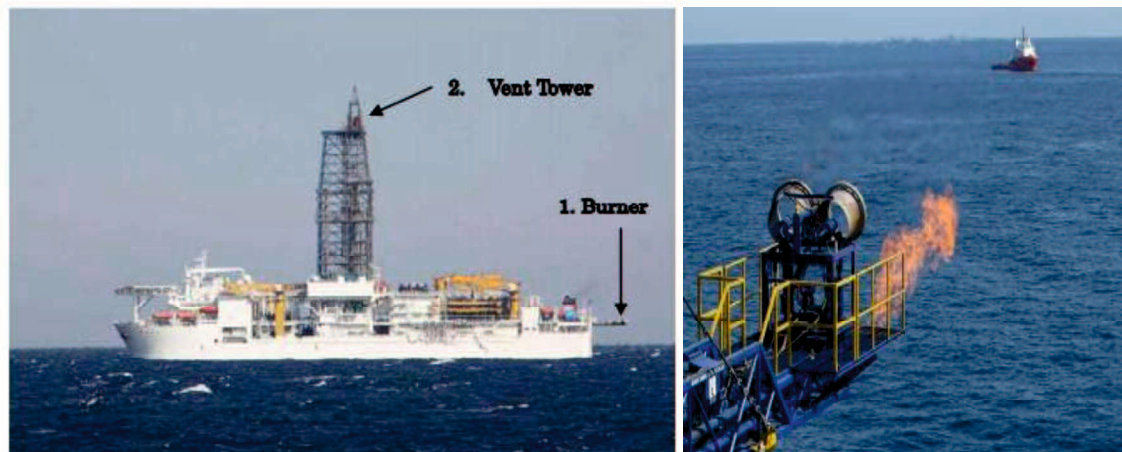


写真 1-2 (左) 地球深部探査船「ちきゅう」の写真  
(右) 海上産出試験より生産されたメタンガスのフレア

### 1.3.3 メタンハイドレートの賦存状況と存在状態

我が国の近海では、メタンハイドレートの存在の指標として BSR (Bottom Simulating Reflector: 海底擬似反射面) が用いられている。地震探査により BSR の存在が多数確認され、メタンハイドレート賦存状況の開発可能性があることが示唆している。先に述べたように、東部南海トラフ海域に存在するメタンハイドレートは BSR よりも上部に堆積しているタービダイト (Turbidite) と呼ばれる砂泥互層の砂層中に存在する。混濁流、乱泥流 (Turbidity Current) により、浅い水深に堆積した粗粒堆積物を、地震・暴風・津波などによって数十年や数百年に一度の割合で、周りの流体と混合し流動化して深海へ運搬する。通常は細粒の泥しか堆積しない沖合において、砂泥互層は海底扇状地とよばれる地形に砂泥互層を形成する。周囲の地盤より間隙が大きいいため、この砂泥互層にメタンガスが集積し、メタンハイドレートを形成する。一方で、日本海側においてもメタンハイドレートの存在が確認され、研究開発が行われている。日本海側のメタンハイドレートは、太平洋側とは存在状態が異なり、表層部に塊状で存在している。これは、地中の深い所から「ガストムニー」と呼ばれるガスの通り道を経て供給されるメタンガスにより海底付近で形成されるからである。そのため、太平洋側に存在するメタンハイドレートを「砂層型ハイドレート」、日本海側に存在するメタンハイドレートを「表層型ハイドレート」と呼ばれている。

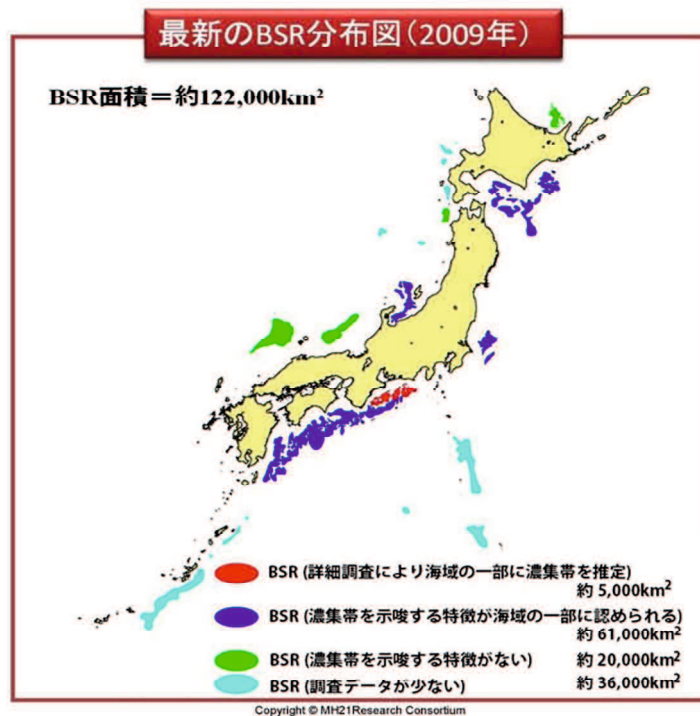
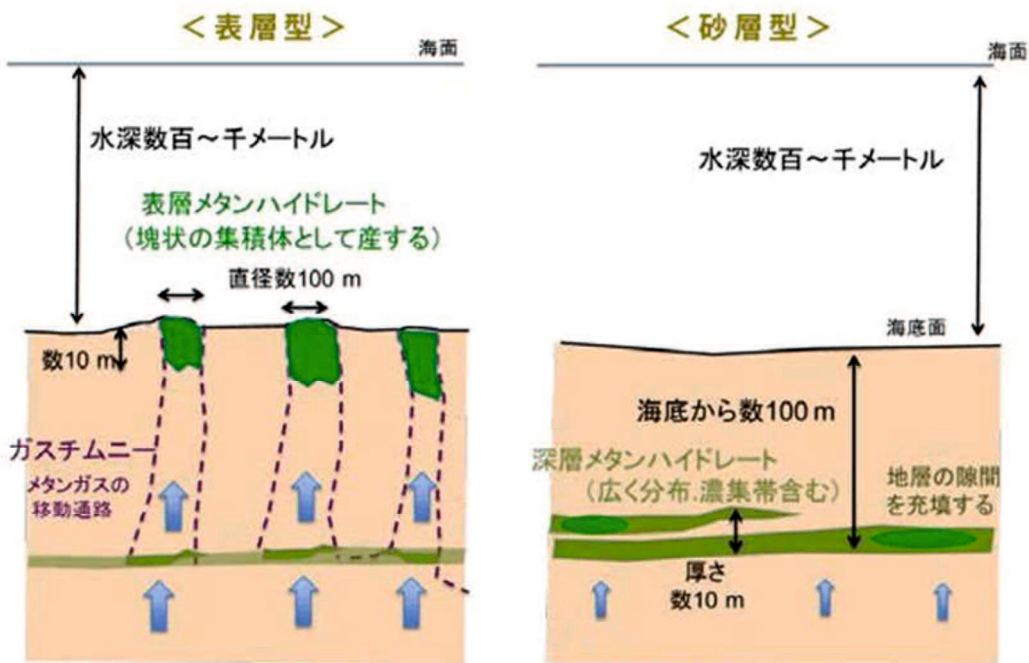


図 1-6 世界におけるメタンハイドレート分布図  
(出典：MH21 ホームページ)



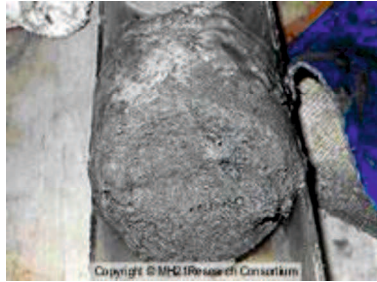
(a) 表層型ハイドレート

(b) 砂層型ハイドレート

図 1-7 メタンハイドレートの存在状態 (松本ら、2012)



(a) 表層型ハイドレート（松本ら、2006）



(b) 砂層型ハイドレート（出典：MH21 ホームページ）

写真 1-3 掘削調査によって得られた天然コア写真

鈴木ら（2009）は、東部南海トラフ海域から採取されたメタンハイドレートを含む堆積物がどのような産状であるか調べるために、メタンハイドレートが昇華しないように冷却室に設置された走査顕微鏡を用いて、微視的観察を行っている。写真 1-4 にその画像と写真 1-4 からガスハイドレート、砂および空隙に大別してマッピングした画像を図 1-10 に示す。これらの写真と画像から、メタンハイドレートは砂粒子を固結している構造や、メタンハイドレートが土粒子をコーティングしている構造がみられる。

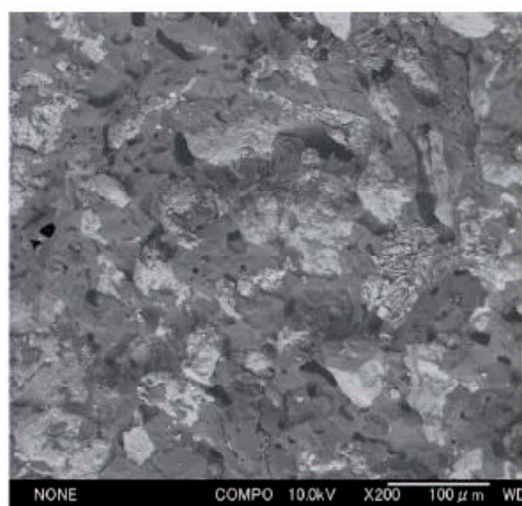


写真-1.3 メタンハイドレート含む地層の走査顕微鏡画像（鈴木ら、2009）

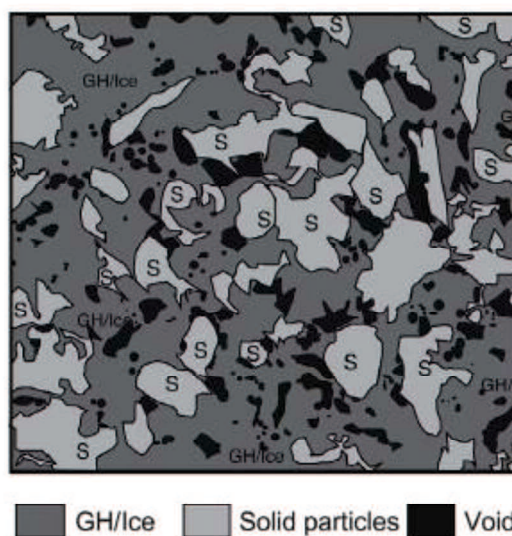


図 1-8 メタンハイドレート含む地層のマッピング画像（鈴木ら、2009）

東部南海トラフ海域において実施された採掘調査された天然コア試料より、メタンハイドレートが濃集している範囲の構成物質は数種類の鉱物によって構成されていることが明らかになっている。図-1.9 にメタンハイドレート濃集層の鉱物組成を示す。図より、メタンハイドレート濃集層の主な鉱物組成は雲母、カオリン、石英によって構成されていることがわかる。図-1.10 に天然コア試料の粒度分布を示す。図の灰色線で示しているのが、天然コア試料の粒度分布である。前述したように、東部南海トラフ海域におけるメタンハイドレートを含む地層はタービタイト砂泥互層となっているため、0.5m の間に砂から粘土まで堆積しており、図のような幅の広い粒度分布になっている。そのうち、水色で示す領域はメタンハイドレートが濃集する地層の粒度分布である。



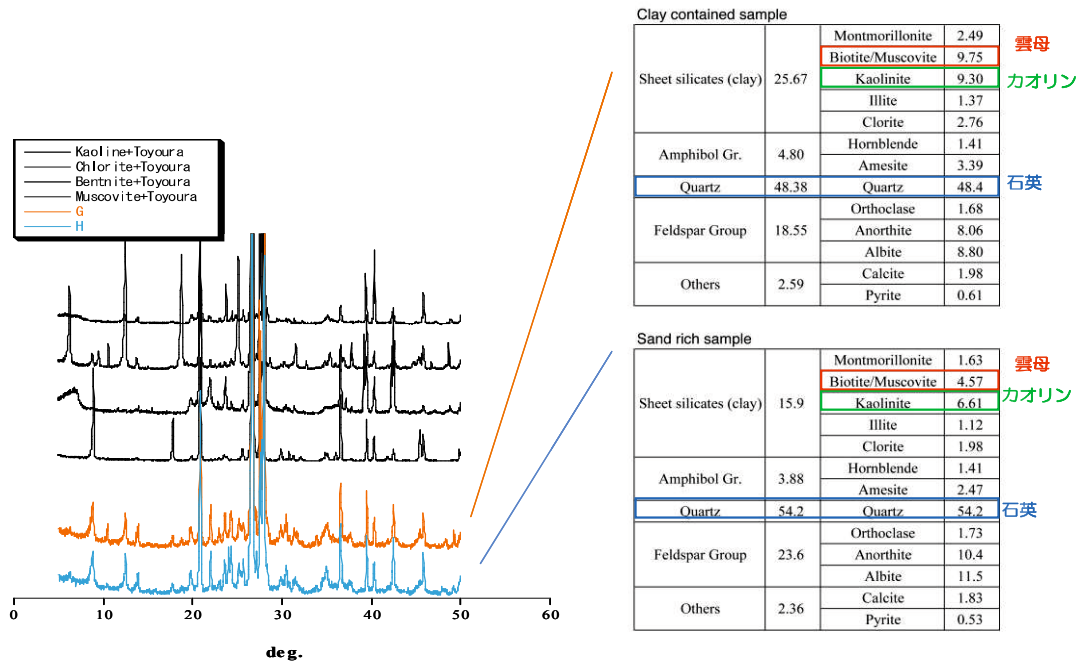


図-1.11 メタンハイドレートが濃集する地層の鉱物組成

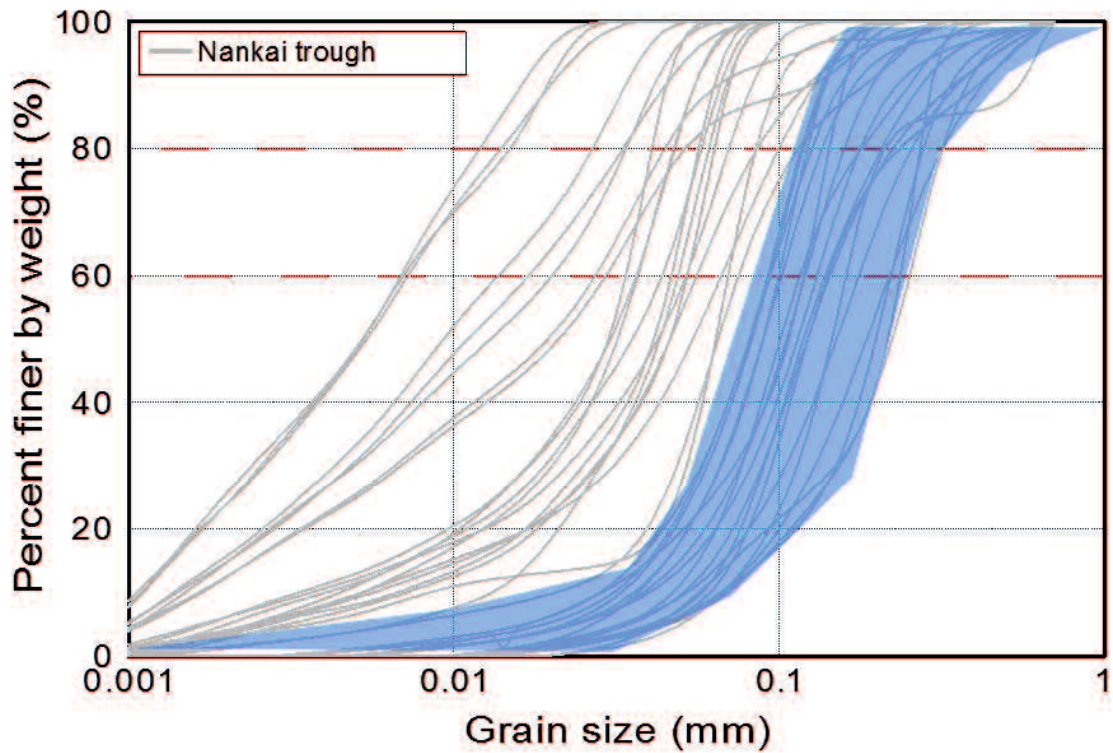


図-1.12 天然コア試料の粒度分布とメタンハイドレートが濃集する地層の粒度分布の範囲

#### 1.4 メタンハイドレート生産における工学的課題

メタンハイドレートを含む地層においてメタンハイドレートを分解し、メタンガスを採取する方法として、減圧法が主な方法として検討されている。実際には、減圧法に加熱法やインヒビター注入法などを複合的に使用することで効率の高いメタンハイドレート生産を目指している。図 1-11 に、生産方法として主力である減圧法を適用したメタンハイドレート生産の概念図を示している。まず、メタンハイドレート含む地層に対して生産井の掘削を行う。次に、メタンハイドレート含む地層の深度でガス生産用の穴を設ける。その後、生産井内の水をポンプで汲み上げることで、メタンハイドレートを含む地層内部の間隙水圧を下げ、メタンハイドレートをメタンガスと水に分解する。生産井の圧力が最も低く保たれているため、動水勾配の影響で地盤内のメタンガスは生産井に向かって移動する。そして、メタンガスは水と同じく汲みあげられ、メタンガスだけが回収される。

上記のようにしてメタンガスが回収されるが、その際の有効応力の増加およびメタンハイドレートの分解により、地盤中の応力変化や地盤変形が考えられる。また、生産対象が深海底であることから地盤の変形挙動を計測することも容易では無いため、事前に十分な予測・検討が必要である。しかしながら、石油化学分野では深海底におけるこのような未固結地盤に坑井を掘削し、資源を回収する技術は既存のものとしては存在しなかった。一方、地盤工学の分野では粒状体を主とした研究が進められており、中には杭基礎の先端や、ダム、高盛土など高圧域における研究も進められてきた現状にある。こうした背景から、メタンハイドレートからメタンガスを生産する際の地盤変形挙動を評価することが可能であると考えられる。以下にメタンガスの生産中に想定される地盤工学的課題を挙げる。まず、生産井掘削による地盤内の応力変化が挙げられる。生産井は掘削に莫大な費用をようするため、その健全性を十分に検討しなければならない。そのためには、メタンハイドレートを含む地層の力学的特性を十分に把握する必要がある。次に、メタンガス生産中の地盤の変形挙動が挙げられる。減圧法の適用は、地盤内の有効応力を増大させる。それに伴う地盤沈下や海底地すべりなどが危惧される。また、その増加幅は、地盤工学の分野で高圧とされている領域であり、粒子破碎の影響なども考えられる。最後に、メタンガス生産終了後に周りから水圧が回復した場合が挙げられる。このとき、水圧の増加に伴い有効応力が減少することにより、土粒子間の応力が緩和され、地盤のリバウンドが起こることが予想される。さらには、もともと固体として存在していたメタンハイドレートが分解により消失するため、それによる地盤の変形挙動がどのようになるかは未知である。メタンハイドレートから安全かつ経済的にメタンガスを生産するためには、以上のような地盤変形挙動を正確に評価しなくてはならない。

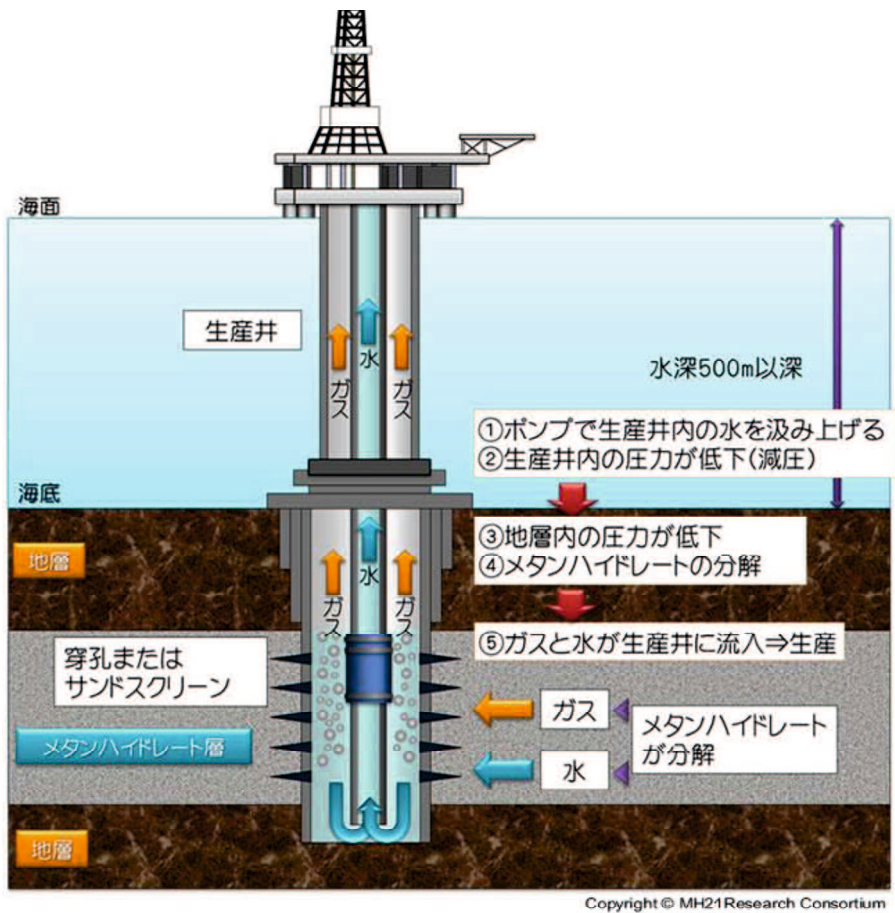


図-1-11 減圧法概念図  
(出典：MH21 ホームページ)

## 1.5 メタンハイドレート生産に関する既往の研究

### 1.5.1 メタンハイドレート含有砂の力学特性および変形挙動に関する既往の研究

メタンハイドレートを含む砂の力学特性や変形特性についての調査は、これまでに多くの研究がなされている。Hyodo ら (2002、2005) は、冷蔵庫の中に高圧試験装置を設置し、メタンハイドレートが存在し得る環境下でのメタンハイドレートと砂を混合した供試体での三軸圧縮試験を行っている。それら試験結果より、メタンハイドレートと砂を混合した試料の強度は、拘束圧の増加、温度、ひずみ速度に依存することを示している。米田ら (2007) は、温度と高い圧力を制御できる三軸試験機を開発し、拘束圧、温度、間隙圧、密度を変化させ試験を行っている、米田らは、所定の含水比で調整された豊浦砂にメタンガスを圧入させることによってメタンハイドレートを生成させた供試体を用いて試験を行っている。この供試体作製方法により、兵動らが用いた供試体よりも実地盤のメタンハイドレートの状況を再現できていると考えられている。その結果、メタンハイドレートが強度増加に寄与し、体積変化は膨張傾向を示すこと明らかにした。宮崎ら (2007) も同様に、豊浦砂にメタンハイドレートを生成させ、載荷速度やクリープ応力の影響を明らかにしている。Masui ら (2008) は、東部南海トラフ海域で行われた基礎試験により得られた天然コア試料を用いて、三軸圧縮試験を行っている。その結果、天然コア試料においても、メタンハイドレートの含まれる量に応じて、強度や剛性が増加することが明らかとなった。Yun ら (2007) は、メタンガスの代わりにテトラヒドロフラン (THF) を用いて、ガスハイドレートの力学特性について述べている。図 1-12 に示すように、土粒子間に存在するガスハイドレートは土粒子同士を結合する働きをすること、またガスハイドレートの量が増加すると、結合する働きも大きくなると推察している。また、メタンハイドレートが強度に顕著に寄与し出すメタンハイドレート飽和率は、40%と推察されている。その推察は、宮崎ら (2010) のメタンハイドレート飽和率を変化させた試験結果から示唆される。Yoneda ら (2013) は、供試体の観察が可能な平面ひずみ型の試験装置を開発し、圧縮試験を行うと同時に、デジタルカメラで供試体を撮影し、得られた画像から局所変形の評価を行っている。さらに Yoneda ら (2015) は、第一回海洋産出試験より得られた天然コア試料を、温度圧力を保持したまま試験装置に設置出来る装置 (TACTT) を用いて、供試体を観察できる試験装置を使用して圧縮試験を行うと同時に、局所変形の評価も行っている。Yoneda ら (2015) は、第一回海洋産出試験より得られた天然コア試料の排水および非排水で圧縮試験を行い、新たな知見を得ている。



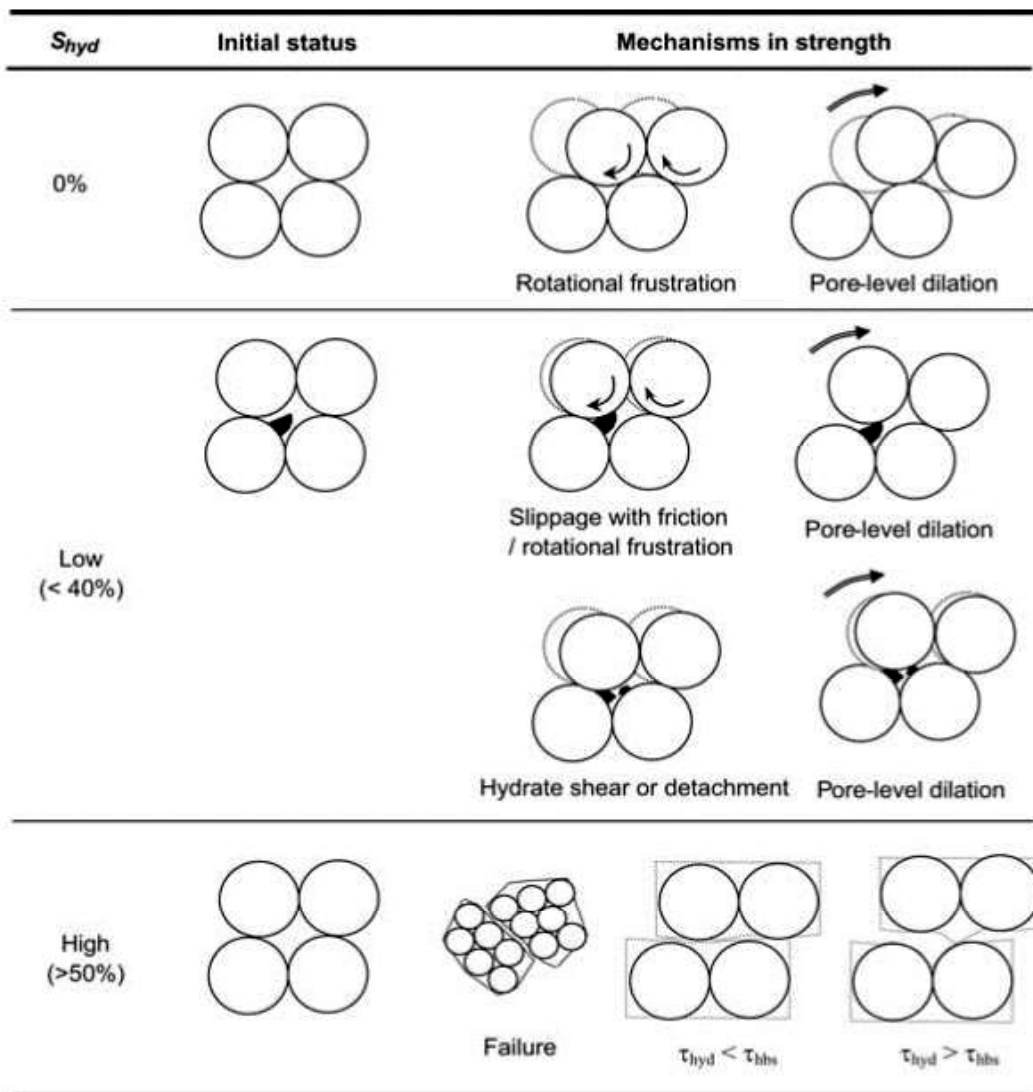


図-1-12 ガスハイドレートの強度に与えるメカニズム (Yun ら、2007)

### 1.5.2 メタンハイドレートの分解特性に関する既往の研究

メタンハイドレート生産の主たる方法として、減圧法が考えられていることとその工学的課題を前節で既に述べた。また、減圧法や他の方法を併用して生産を行う際、地層中で何が起きているか、メタンガスをどの程度回収できるかを正確に予測しなければ、海底地盤環境を乱す恐れや採算が取れなくなる可能性がある。そのため、メタンハイドレートの分解特性に関する研究は数多く行われてきた。坂本ら（2004）は、豊浦砂、7号硅砂、8号硅砂にメタンハイドレートを生成させ、さらにメタンハイドレート飽和率を変化させることによって、透水係数に与える砂の粒度およびメタンハイドレート飽和率の影響について述べている。さらに、坂本ら（2008）は、同様に豊浦砂、7合硅砂、8合硅砂を用いて、減圧によるメタンハイドレート分解実験を行っている、その結果、砂の粒径が小さいほど、圧密が生じやすいが、間隙内に残存するガス量が少ないため、生産性が高くなる結果が得られている。Oyamaら（2009）は、メタンハイドレート含む砂の間隙圧を低下させ、メタンハイドレートを分解させることにより、砂中のメタンハイドレートの分解特性について述べている。メタンハイドレートの分解が生じると、メタンハイドレートの持つ自己保存効果により温度が減少する結果が確認された。

### 1.5.3 連成解析シミュレータの種類と位置づけ

メタンハイドレートが存在する地層からメタンガスを回収する前に、どれだけのメタンガス量が採れるか、地盤変形はどの程度起こるのかなどを事前に把握し、生産効率を向上させる必要がある。そのため、連成解析を行えるシミュレータの開発がいくつか行われてきた。表 1-1 に各研究機関で使用されている連成解析シミュレータの一覧を示す。各シミュレータで、水、ガス、メタンハイドレート、熱、の変化をシミュレーションできる仕様になっている。Kuriharaら（2009）は、加熱法もしくは減圧法、またはそれらを併用して生産を行ったときのシミュレーションを行い、採算性について議論している。栗原らの結論では、減圧法が現在考えられる最適な生産方法であると述べている。

| 開発者                                      | プログラム名                          | 解法    | 土粒子骨格                              | 連成                   | 文献情報   |
|--|---------------------------------|-------|------------------------------------|----------------------|--|
| 産総研<br>東京大学<br>日本オイルエンジニアリング             | MH21-<br>HYDRES                 | 有限差分法 | 変形しない                              | 流体, MH, 氷, 析出塩, 熱    | ◆栗原正典ら, 2009.<br>◆Konno, Y. et al., 2010.                  |
| Lawrence Berkeley<br>National Laboratory | TOUGH+Fx/<br>HYDRATE            | 有限差分法 | 変形しない                              | ガス, 水, 熱             | ◆Moridis, G. J. et al., 2006.                              |
| Pacific Northwest<br>National Laboratory | STOMP-HYD                       | 有限差分法 | 変形しない                              | ガス, 水, MH, 氷, 析出塩, 熱 | ◆White, M. D. and M.<br>Oostrom, 2006.                     |
| Cambridge Univ.                          |                                 | 有限差分法 | 弾完全塑性体<br>特徴: MHを含むこと<br>による強度変形特性 | ガス, 水, MH            | ◆Klar, A. and Soga, K,<br>2005.<br>◆Klar, A. et al., 2010. |
| Lawrence Berkeley<br>National Laboratory | TOUGH+HYD<br>RATE and<br>FLAC3D | 有限差分法 | 弾塑性体                               | 流体, 熱, 塩分濃度          | ◆Rutqvit, J. and Moridis, G.<br>J., 2007.                  |
| 京都大学                                     | COMVI-MH                        | 有限要素法 | 弾粘塑性体<br>特徴: MHを含むこと<br>による硬化      | ガス, 水, 熱             | ◆Kimoto, S. et al., 2007.<br>◆Kimoto, S. et al., 2010.     |
| 産総研<br>西日本技術開発<br>山口大学                   | COTHMA                          | 有限要素法 | 弾塑性体<br>特徴: MHを含むこと<br>による強度変形特性   | ガス, 水, MH, 氷, 熱      | ◆天満則夫ら, 2010.<br>◆坂本靖英ら, 2010.                             |

表-1-1 連成解析シミュレーター一覧 (木元、2015 に加筆修正)

## 1.6 本論文の目的と構成

長期にわたるメタンハイドレート研究開発を安全且つ経済的に行うためには、メタンハイドレートの存在状態を再現したメタンハイドレート含む砂の力学挙動の把握は不可欠である。これまで、メタンハイドレート研究開発に起こり得る地盤変形や応力変化について、実験および解析を用いて地盤変形予測を行うため、メタンハイドレートの固結力を考慮した構成則が開発されてきた。しかし、軸対称供試体によって得られた強度や変形特性は、実地盤の応力状態を忠実に再現できていない。そのため、より現実の地盤の再現において取り上げられることが多い、平面ひずみ条件での試験を行うことが望ましいと言える。また高圧下において平面ひずみ条件での変形を可視化しつつ、供試体の局所変形を分析することも必要と考える。

第一章では、世界のエネルギー動向について概観し、国産エネルギーの必要性を述べた。また、メタンハイドレートの性質や賦存状況について言及し、メタンハイドレートが国産エネルギーになり得る可能性について述べた。さらに、メタンハイドレートを生産開発する際に、地盤工学的課題は何か、それら課題に対して過去にどのような研究が行われてきたかを述べた。最後に本論分の目的と構成を示した。

第二章では、恒温高圧平面ひずみ試験装置を使用し、有効拘束圧とメタンハイドレート飽和率を変化させ、圧密排水平面ひずみ圧縮試験を行った結果を示している。既往の研究より得られた軸対称応力条件での試験結果との比較し、応力条件の影響を述べている。また、平面ひずみ応力条件で解析を行う際に、メタンハイドレート含む砂の破壊強度を正確に予測するために、破壊基準として何を適用すべきか検討を行っている。さらに、試験中に供試体写真を撮り、画像解析を行い、メタンハイドレート含む砂の微視的変形挙動について述べている。

第三章では、恒温高圧平面ひずみ試験装置を使用し、豊浦砂および実地盤の粒度分布と鉱物組成を模擬した試料に対して減圧法による分解実験を行った結果を示している。等方応力条件および初期せん断を与えた条件から間隙圧を低下させ、メタンハイドレートを分解させることによって、砂の変形挙動に対する分解前の応力条件の影響について述べている。また、供試体温度を測定し、砂中のメタンハイドレートの分解特性について述べている。

第四章では、地層変形シミュレータに、提案するメタンハイドレート含む砂の力学特性および変形挙動を表現できる弾塑性構成式を導入し、分解実験のシミュレーションを行っている。

第五章では、各章で得られた結果をまとめて結論とした。

## 参考文献

- 1) D.L. Katz, D. Cornell, R. Kobayashi, F.H. Poettmann, J.A. Vary, J.R. Elenbaas and C.F. Weinaug: Handbook of Natural Gas Engineering, McGraw-Hill Inc., New York, USA, 1959.
- 2) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構編 (2015) 「NEDO 水素エネルギー白書」 日刊工業新聞社
- 3) Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Nakata, Y., Yoshimoto, N., Fukunaga, M., Kubo, K., Nanjo, T., Matsuo, T. and Nakamura, K., 2002, Triaxial compressive strength of methane hydrate, *Proceedings of 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 422–428.
- 4) Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N. and Ebinuma, T., 2005, Basic research on the mechanical behavior of methane hydrate-sediments mixture, *Soils and Foundations* 45 (1), pp. 75–85.
- 5) Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N. and Yoneda, J., 2008, Shear strength of methane hydrate bearing sand and its deformation during dissociation of methane hydrate, *Proceedings of the 4th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, pp. 549–556.
- 6) 経済産業省 (2015) 「エネルギー白書 2015」 <http://www.iae.or.jp/publish/tenbou/1997-HIZAIRAI/2shou.html>
- 7) 木元小百合 (2015) 「メタンハイドレート生産時の地盤変形シミュレーション」、地盤工学会誌、第 63 巻 (2 号)、22～25 頁
- 8) Kurihara, M., Sato, A., Ouchi, H., Ohbuchi, Y., Masuda, Y., Narita, H., Ebinuma, T., Saeki, T., Fujii, T., 2009, Examination of gas producibility from Eastern Nankai Trough methane hydrate resources, *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology* 74 (4), pp. 311-324.
- 9) Kvenvolden, K. A.: Methane hydrate—a major reservoir of carbon in the shallow geosphere, *Chemical Geology*, 71, pp.41-51, 1998.
- 10) Masui, A., Miyazaki, K., Haneda, H., Ogata, Y. and Aoki, K., 2008, Mechanical characteristics of natural and artificial gas hydrate bearing sediments, *Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates*, Chevron, Vancouver, B. C., Canada, 6-10 July.
- 11) 松本良 (2006) 「新潟県上越市沖の海底に露出した熱分解起源メタンハイドレートを確認、採取に成功」 東京大学大学院理学系研究科・理学部プレリリース
- 12) MH21 Research Consortium, 2001 Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan. <<http://www.mh21japan.gr.jp/>>.
- 13) Miyazaki, K., Masui, A., Sakamoto, Y., Haneda, H., Ogata, Y., Aoki, K., Yamaguchi, T. and Okubo, T., 2007, Effect of strain rate on the preparation of triaxial compression test specimen of deposits containing methane hydrate, *Journal of MMIJ* 123 (11), pp. 537–544 (in Japanese).
- 14) Miyazaki, K., Yamaguchi, T., Sakamoto, Y., Tenma, N., Ogata, Y. and Aoki, K., 2010, Effect of confining pressure on mechanical properties of sediment containing synthetic methane hydrate, *Journal of MMIJ* 126 (7), pp. 408–417 (in Japanese)

- 15) Miyazaki, K., Masui, A., Sakamoto, Y., Aoki, K., Tenma, N. and Yamaguchi, T., 2011, Triaxial compressive properties of artificial methane- hydrate-bearing sediment, *Journal of Geophysical Research* 116, B06102.
- 16) Oyama, H., Konno, Y., Masuda, Y. and Narita, H., 2009, Dependence of depressurization-induced dissociation of methane hydrate bearing laboratory cores on heat transfer, *Energy Fuels*, 23, 4995-5002.
- 17) 坂本靖英・駒井武・川辺能成・天満則夫・山口勉 (2004) 「多孔質体におけるメタンハイドレートの生成・分解挙動 –メタンハイドレート貯留層の浸透率評価に関する研究 (第一報)」資源と素材、第 120 巻、85～90 頁
- 18) 坂本靖英・下河原麻衣・大賀光太郎・宮崎晋行・駒井武・青木一男・山口勉 (2008) 「減圧法におけるメタンハイドレート分解時の圧密挙動ならびに浸透率特性に関する室内実験研究 –メタンハイドレート貯留層の浸透率評価に関する研究 (第 6 報) -」 *Journal of MMIJ*、第 124 巻、498～507 頁
- 19) Suzuki, K., Ebinuma, T. and Narita, H., 2009, Features of methane hydrate-bearing sandy-sediments of the forearc basin along the Nankai trough: effect on methane hydrate-accumulating mechanism in turbidite, *Journal of Geography* 118 (5), pp. 899–912 (in Japanese)
- 20) Waite, W. F., Winters, W. J. and Mason, D. H., 2004, Methane hydrate formation in partially water-saturated Ottawa sand, *American Mineralogist* 89, pp. 1202-1207.
- 21) 渡邊信編 (2010) 「新しいエネルギー藻類バイオマス」みみずく舎
- 22) Yamamoto, K., 2009, Examination of gas producibility from Eastern Nankai Trough methane hydrate resources, *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology* 74 (4), pp. 311-324.
- 23) Yoneda, J., Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N., Kokura, Y., Tsuda, N. and Ebinuma, T., 2007, Mechanical property of gas hydrate sediment at deep seabed on triaxial compression test, *Ground Engineering* 25 (1), pp. 113–122 (in Japanese)
- 24) Yoneda, J., Hyodo, M., Yoshimoto, N., Nakata, Y. and Kato, A., 2013, Development of high pressure and low temperature plane strain testing apparatus for methane hydrate-bearing sand, *Soils and Foundations* 53 (5), pp. 774-783.
- 25) Yoneda, J., Masui, A., Konno, Y., Jin, Y., Egawa, K., Kida, M., Ito, T., Nagao, J., Tenma, N., 2015, Mechanical behavior of hydrate-bearing pressure-core sediments visualized under triaxial compression, *Marine and Petroleum Geology*, 66, pp. 451-459.
- 26) Yoneda, J., Masui, A., Konno, Y., Jin, Y., Egawa, K., Kida, M., Ito, T., Nagao, J., Tenma, N., 2015, 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.
- 27) Yun, T. S., Santamarina, J. C. and Ruppel, C., 2007, Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate, *Journal of geophysical research* 112, B04106.

## 第二章 海底地盤環境下におけるメタンハイドレート含む砂の力学特性

---

### 2.1 概説

世界におけるメタンハイドレートの存在形態は様々であるが、東部南海トラフ地域におけるメタンハイドレートは、砂層の間隙内に存在しており、メタンハイドレートそのものの塊として存在することは少ない (Waite, 2009)。そして、東部南海トラフにおける天然メタンハイドレートコア試料の微視的観察より、メタンハイドレートを含む地層のメタンハイドレートは砂土粒子間を固結する、もしくは間隙に小さな塊として存在することが明らかとなった (鈴木ら, 2009)。そのため、これまでにメタンハイドレートを砂もしくは砂質土に含ませ、その力学特性を調査するための多くの研究がなされてきた。兵動ら

(2002, 2005) は、冷蔵庫の中に高圧試験装置を設置し、メタンハイドレートが存在し得る環境下において、粒状のメタンハイドレートを砂と混合させ三軸圧縮試験を行っている。それらの試験結果より、メタンハイドレート含む砂の強度は、拘束圧の増加、温度、ひずみ速度に依存することを示した。米田ら (2007) は、温度と高い圧力を制御できる三軸試験機を用いて、水を含ませた豊浦砂にメタンガスを圧入させることでメタンハイドレートを生成させた供試体を作製し、拘束圧、温度、間隙圧、密度を変化させ三軸圧縮試験を行っている。その結果、拘束圧の増加による強度増加、体積変化は圧縮傾向を示すことを明らかにした。さらに、メタンハイドレートを含むことによって強度は増加し、体積変化は膨張傾向を示すことを明らかにした。宮崎ら

(2007) も豊浦砂にメタンハイドレートを生成させ圧縮試験を行い、載荷速度やクリープ応力の影響を明らかにしている。Masuiら (2008) は、東部南海トラフで行われた基礎試験により得られた天然のメタンハイドレートを含む砂もしくは砂質土を用いて、三軸圧縮試験を行っている。その結果、天然コア試料においても、メタンハイドレートの含まれる量に応じて、強度や剛性が増加することが明らかとなった。Yunら (2009) は、メタンガスの代わりにテトラヒドロフラン (THF) を用いて、砂および砂質土に含ませ、ガスハイドレートを含む砂および砂質土の力学特性について述べている。土粒子間に存在するガスハイドレートは土粒子同士を結合する働きをすること、またガスハイドレートの量が増加すると結合する働きも大きくなると推察している。既往の研究からも、メタンハイドレートの含まれる量が増加すると強度も増すことから、Yunらの推察が概ね妥当であることを示している。また、Yunらはメタンハイドレートが強度に顕著に寄与し出すメタ

ンハイドレート飽和率は40%以降であると推察されている。その推察に関しても、宮崎ら(2010)のメタンハイドレート飽和率を変化させた試験結果から明らかとなっている。

以上に挙げた既往の研究からメタンハイドレートを含み砂もしくは天然コア試料に対する力学試験、主に三軸圧縮試験は数多く行われ、力学パラメータを十分に取得している状況である。しかしながら、いずれの試験においても試験機の構造上、試験中に実際にメタンハイドレートを含む砂もしくは天然コア試料の全体的な変形を知ることができるが、どのように局所的に変形を起こしている詳細は明らかにされていない。また、実際の地層内応力はさまざまであり、三軸応力条件つまり軸対象応力条件で得られた力学パラメータを用いて地層変形解析を行った場合、地層変形を過小評価してしまう可能性がある。そのため、一般的な応力条件つまり三次元応力で地層変形を考慮する必要がある。

そのため、恒温高圧平面ひずみ試験装置を使用し、平面ひずみ条件で圧縮試験を行った。その際、有効拘束圧とメタンハイドレート飽和率を変化させた。また、既往の研究より得られた軸対称応力条件での試験結果との比較し、応力条件の影響を述べている。さらに、三次元応力で考えたときに、メタンハイドレートを含む砂の破壊強度を正確に予測するために、破壊基準として何を適用すべきか検討を行った。最後に、試験中に供試体写真を撮り、画像解析を行い、メタンハイドレート含む砂および含まない砂の微視的変形挙動について調べた。



## 2.2 恒温高圧平面ひずみ試験装置の概要

本研究では深海底におけるメタンハイドレートを含む地層と同様な温度環境を再現することが可能な恒温高圧平面ひずみ試験装置を開発した。写真 2-1 に恒温室の外観を示す。恒温室内に実験装置を設置し、温度管理を行っている。実験装置の制御および実験データの計測は、恒温室外に設置したパーソナルコンピュータにより行う。冷蔵室の内部及び実験装置の外観を写真 2-2 に示す。冷蔵室内の詳細な配管系統を図 2-1 に示す。以下に装置の仕様について解説する。

供試体①のサイズは、高さ 160mm×幅 60mm×奥行き 80mm である。透明性の高いシリコンメンブレンを用いることで様々な材料に対して観察することが可能である。圧力セル②は耐圧が 20MPa であり、セル前面と背面にそれぞれ厚さ 140mm、直径 75mm のアクリル製の観察窓が取り付けられている。これにより、供試体前面と背面での供試体の撮影が可能となる。供試体の観察はデジタル一眼レフカメラを用いて、リモート制御によりタイマー撮影したデジタル画像に対して行う。拘束板③は、厚さ 60mm のアクリル製で観察窓と一体となり中間主応力方向を拘束し、平面ひずみ状態を再現している。また、セル後ろ側の観察窓から LED で照射することで、供試体の撮影環境を整えている。そして、拘束板表面にシリコングリースを薄く塗ることで、拘束板とメンブレンとの摩擦を軽減させている。シリンジポンプ④、⑤、⑥、⑦は、供試体の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。またこれらは最大許容背圧は 20MPa で、モーターの制御は最小 25 パルスから最大 100000 パルスの制御を行うことが可能で、体積ひずみ±0.001%の精度で計測することが可能となっている。ガスフローメーター⑧は、実験後の MH 産出量を計測するために用いる。分離槽⑨は、水とメタンガスの混合体として産出された流体を、内部で大気圧まで圧力を下げることにより、水とガスに分離させるものである。メタンガスボンベ⑩は、ガス浸透法により MH 生成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、セル内部の加圧用の側液が入っており、側液温度管理タンク⑫によって側液の温度管理を行う事が出来る。側圧負荷装置⑬は、側液の圧力制御に用いられる。背圧回路加熱チャンバー⑭及び予熱タンク⑮は、供試体内及び管路に流れる間隙水の温度管理を行う。側液循環装置⑯は、温度管理された側液を循環させることで供試体側面の温度管理を行う。変位計⑰は、軸方向の変位を計測する。最大許容変位は 100mm である。また、ロードセル⑱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 の精度で計測可能である。そしてこのロードセルは、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無い。載荷装置⑲により、軸方向に下部からセルを載荷板で下させ荷重を加える。圧力計⑳により上・下の間隙水圧と側圧の測定を行う。



写真 2-1 冷蔵室の外観

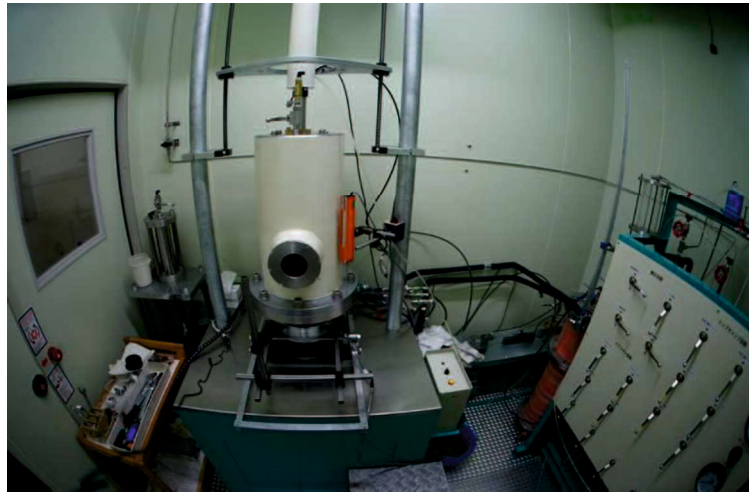
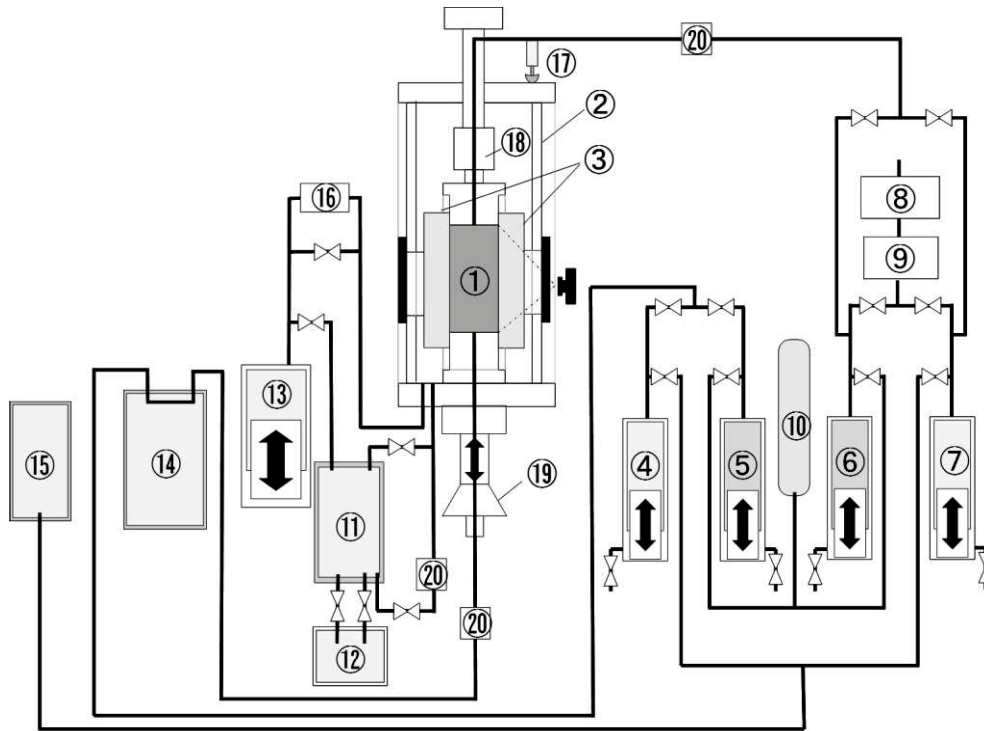


写真 2-2 実験装置の外観



①供試体②圧力セル③拘束板④シリンジポンプ(下・水)⑤シリンジポンプ(下・メタン)⑥シリンジポンプ(上・メタン)⑦シリンジポンプ(上・水)⑧ガスフローメーター⑨分離槽⑩メタンガスボンベ⑪側液メインタンク⑫側液温度管理タンク⑬側圧負荷装置⑭背圧回路加熱チャンバー⑮予熱タンク⑯側液循環装置⑰変位計⑱ロードセル⑲載荷装置⑳圧力計

図 2-1 実験装置の配管系統

### 2.3 試験条件と試験方法

東部南海トラフから採取した不攪乱試料の観察結果（鈴木，2009）から，原位置におけるメタンハイドレートは土粒子に固結して土粒子の間隙を埋める形で存在していると考えられる。メタンハイドレートの多くが砂泥互層の砂層部分に存在し，その中でもメタンハイドレート飽和率の高いものほど，細粒分含有率の低い砂中に存在する傾向があったとされる。そこで，以下の方法によりメタンハイドレートを含む砂供試体を作製した。なお，模擬試料の構成砂として，砂分の平均粒径に近い豊浦砂を用いた。表2-1にその物性を示す。宮崎ら（2010）の研究から，供試体に含まれるメタンハイドレートの含有量が力学特性に大きく影響することが明らかとなっており，その含有量を定量的に評価するため図2-3の3相モデルにより，メタンハイドレート飽和率 $S_{MH}$ を次式で定義している。

$$S_{MH} = \frac{V_{MH}}{V_v} \times 100 \text{ (\%)} \quad (2-1)$$

ここに $V_{MH}$ はメタンハイドレートの体積であり， $V_v$ はメタンハイドレートも含む間隙の体積を表す。これまで実施された基礎試錐では，メタンハイドレートが濃集する層で $S_{MH}=50\%$ 前後であることがわかっている。本研究では，実地盤のメタンハイドレート飽和率 $S_{MH}$ を再現するために供試体の初期含水比を定めて目標の $S_{MH}$ を生成した。目標とする $S_{MH}$ から水の量を式(2-2)によって算出し，目標の湿潤密度の供試体を作製した。

$$w_{ini} = \frac{\left(\frac{S_{MH}}{100}\right) V_v \rho_{MH}}{m_s} A \text{ (\%)} \quad (2-2)$$

ここに $w_{ini}$ は供試体初期含水比， $\rho_{MH}$ はメタンハイドレートの密度（ $0.912 \text{ g/cm}^3$ ）， $m_s$ (g)は砂の質量であり， $A$ はメタン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（内田，1996）。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を含む砂供試体は以下の手順で作製を行った。まず，目標のメタンハイドレート飽和率に必要な水を式(2-2)により算定し，所定の間隙率となるよう計量した砂と混ぜ合わせ，横幅60mm，奥行80mm，高さ160mmの直方体モールドに12層に分けてタンパーで突固めた。

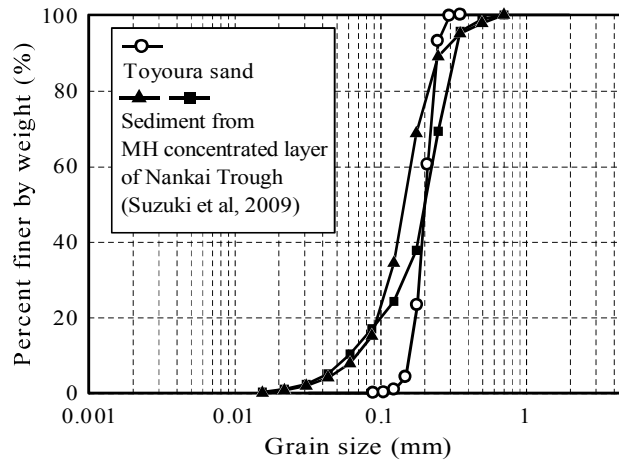


図 2-2 豊浦砂および南海トラフから採取された不攪乱試料の粒度分布

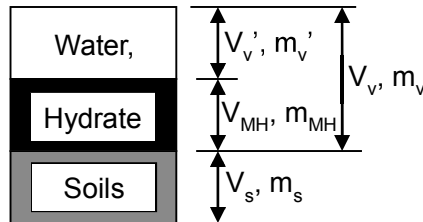


図 2-3 メタンハイドレート含有砂の三相モデル (Hyodo et al., 2005 に加筆)

表 2-1 豊浦砂の物性

| $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $D_{max}$<br>(mm) | $D_{50}$<br>(mm) | $e_{max}$ | $e_{min}$ | $U_c$ |
|----------------------------------|-------------------|------------------|-----------|-----------|-------|
| 2.655                            | 0.425             | 0.210            | 0.973     | 0.613     | 1.480 |

本研究におけるメタンハイドレートを含む砂供試体を作製する段階から実験の初期条件を付与するに至る温度-間隙圧履歴を図2-4に示す。図中のパスに示すように、まず、温度5°Cおよび大気圧の状態で作成する(図2-4, (a))。このとき、恒温室内にて作業を行っている。供試体作成後、間隙圧を5MPaまで徐々に増加しながらメタンガスを圧入し(図2-4, (b))、供試体間隙内および試験機管路内をメタンガスで充満する。このとき、圧入によって供試体水分が不均一にならないよう十分に時間をかけてガス圧を増加する。ここで、供試体間隙へつながる上下シリンジポンプのガス圧を一定に保つように制御することでガス流入量を逐次監視し、ガス量に顕著な増加が認められなければ、供試体中の水のハイドレート化が完了したと判断する。メタンハイドレート生成後、圧力を保ったまま管路内のガスを水に置換し、供試体内の通水を行う。通水完了後、間

隙圧 $P.P=10\text{PMa}$ を負荷し（図2-4, (c)）、間隙圧一定のまま所定の有効応力まで圧密を行い、載荷速度 $0.1\%/\text{min}$ で軸方向載荷を行う。圧縮試験終了後、供試体温度を上昇させることでメタンハイドレートを水とメタンガスに分解させ、分解したガス量を測定することで各試験におけるメタンハイドレート飽和率 $S_{MH}$ を算出する。

メタンハイドレートの分子式 $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ より、メタンハイドレート1 molの質量は124 gとなる。メタンハイドレートの密度は $0.912 \text{ g/cm}^3$ であるので、メタンハイドレート1 molの体積は $124 / 0.912 = 135.965 \text{ cm}^3$ となる。メタンハイドレートが $135.965 \text{ cm}^3$ あるときメタンガスが1 mol発生するので、メタンハイドレート $1\text{cm}^3$ の時発生するメタンガスのモル数は $1 / 135.965 = 7.355 \times 10^{-3} \text{ mol}$ となる。次に、式(2-3)で表される理想気体の状態方程式を使用する。

$$PV = nRT \quad (2-3)$$

ここに $P$  (atm)は大気圧、 $V$  (L)は $1\text{cm}^3$ のメタンハイドレートから発生するメタンガス量、 $n$ は $1\text{cm}^3$ のメタンハイドレートから発生するメタンガスのモル数、 $R$  ( $\text{L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ) = 0.082は気体定数、 $T$  (K) はガス量測定時の室温を表し、それぞれ代入すると $V = 7.355 \times 10^{-3} \times 0.082 \times T$ となる。以上を踏まえ、供試体内のメタンハイドレートの体積は式(2-4)で表される。

$$V_{MH} = \frac{V_{mes}}{V} \quad (2-4)$$

ここに  $V_{mes}(\text{cm}^3)$  は供試体から測定したメタンガス量を表す。式(2-4)を式(2-2)に代入することで具体的なメタンハイドレート飽和率を算出する。

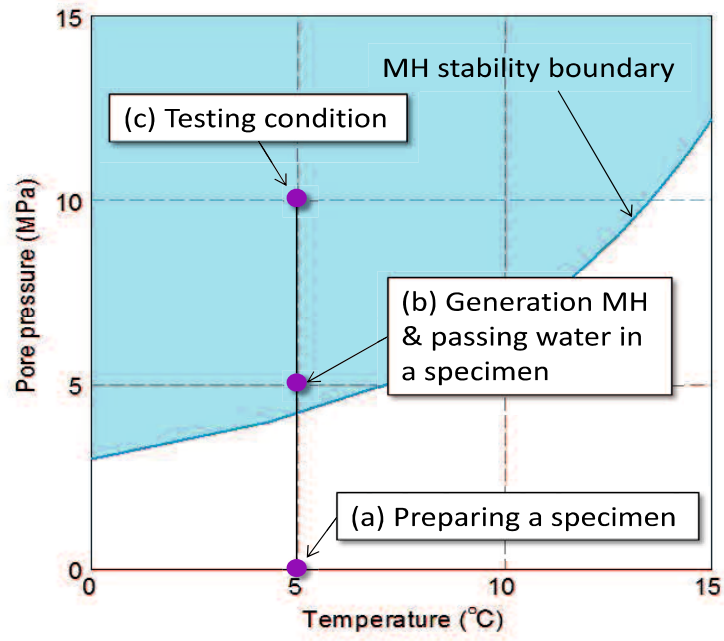


図-2.4 試験中の温度圧力条件

## 2.4 メタンハイドレートを含む砂の巨視的挙動

図 2-8 に三軸圧縮試験から得られた結果と、同条件の平面ひずみ試験結果の比較を示す。図に載せている三軸試験結果は、兵動ら (2012) によって得られた結果である。三軸試験の結果は、ピーク応力比に達した後に徐々に減少する傾向にあるが、平面ひずみ試験の結果は、ピークに達した後は強度が急激に減少し、残留状態に至る。また、メタンハイドレートを含んだ場合も同様のことがいえる。しかし、メタンハイドレートの固結力によってピーク応力比は増加する。図 2-9、図 2-10 に有効拘束圧 $\sigma'_c=3\text{MPa}$ 、 $5\text{MPa}$ の結果を示す。有効拘束圧 $\sigma'_c$ の増加に伴い、ピーク主応力比の発現する軸ひずみは増加する。各有効拘束圧の結果について、三軸試験の結果はメタンハイドレートが含まれることによって、正のダイレイタンスーを顕著に示すが、平面ひずみ試験の結果は三軸試験の結果よりもダイレイタンスーが抑制される。これは、中間主応力方向の変形を拘束していることが要因に挙げられる。図 2-8 に、有効拘束圧 $\sigma'_c$ ごとに比較したせん断試験結果を示す。低圧域のせん断試験結果 (中田ら, 2010) の結果と本研究で得られた結果を併せて示す。低圧域では、ピーク主応力比を顕著に示すが、有効拘束圧 $\sigma'_c$ の増加により、ピーク主応力比が減少傾向にある。また徐々にピーク応力比と残留時の応力比の差が減少する傾向にある。体積変化は、有効拘束圧 $\sigma'_c$ の増加により圧縮傾向を示す。

図 2-12 に図 2-9~2-11 から得られた有効拘束圧とピーク応力比の関係を示す。低圧域から高圧域にかけての三軸圧縮試験の結果も併せて示す。図より、三軸試験および平面ひずみ試験の結果は、有効拘束圧の増加に従って、ピーク応力比は減少傾向にあることがわかる。先述したように中間主応力の影響により、三軸試験結果より平面ひずみ試験結果のほうがピーク応力比は高い傾向にある。また、豊浦砂の平面ひずみ試験結果において、三浦らの結果と同様に、ある応力域に達すると、ピーク応力比が再び増加する傾向を示した。図 2-13 に有効拘束圧とダイレイタンスーの関係を示す。この図に示すダイレイタンスー比は、各試験のピーク主応力比に達した時点での値である。有効拘束圧の増加に伴い、せん断変形が抑制され、ダイレイタンスー比は徐々に増加する。メタンハイドレートを含む試験結果は、砂のみの結果よりもダイレイタンスー比は低く、膨張側を示すことがわかる。

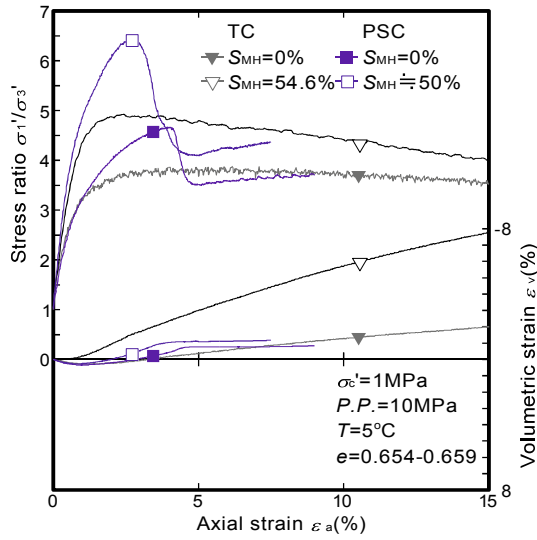


図 2-8 有効拘束圧 $\sigma_c'=1\text{MPa}$ における応力比ひずみ関係

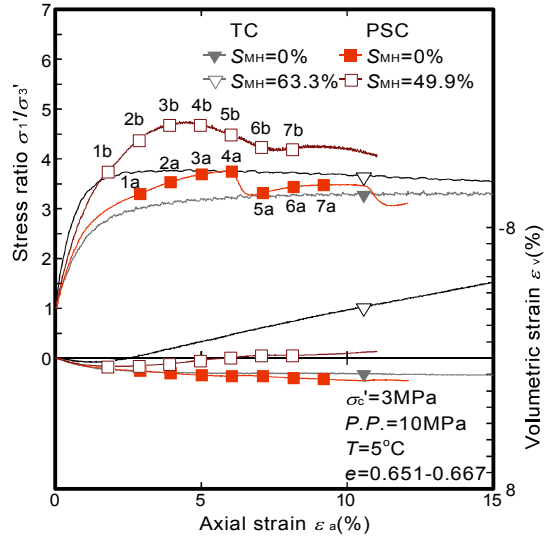


図 2-9 有効拘束圧 $\sigma_c'=3\text{MPa}$ における応力比ひずみ関係

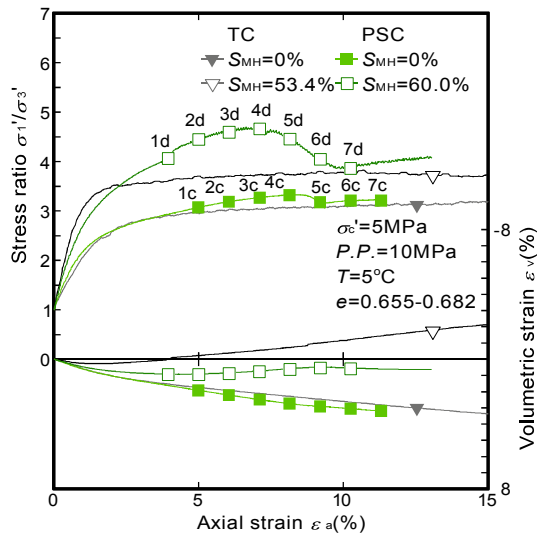


図 2-10 有効拘束圧 $\sigma_c'=5\text{MPa}$ における応力比ひずみ関係

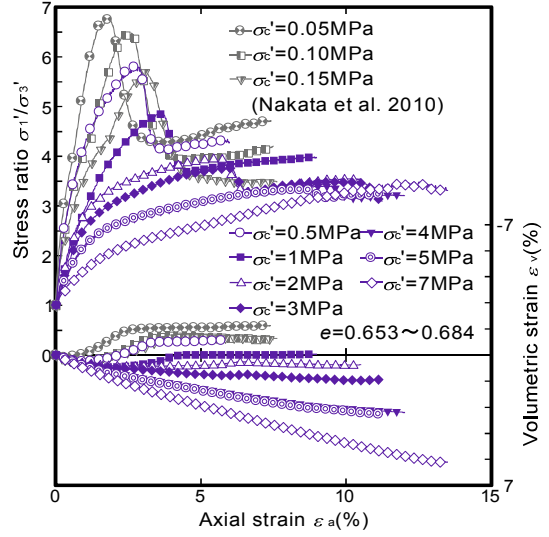


図 2-11 有効拘束圧 $\sigma_c'=3\text{MPa}$ における応力比ひずみ関係



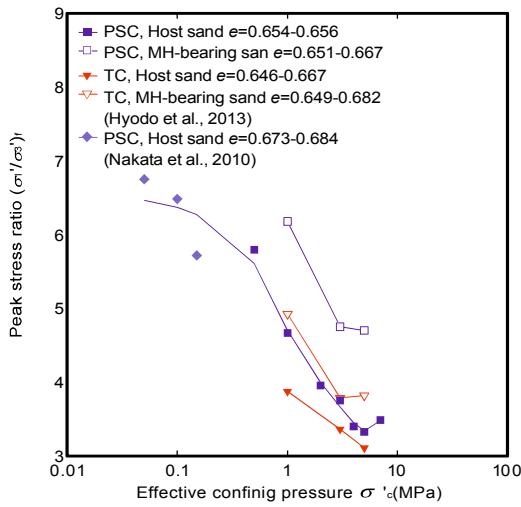


図 2-12 有効拘束圧とピーク主応力比の関係

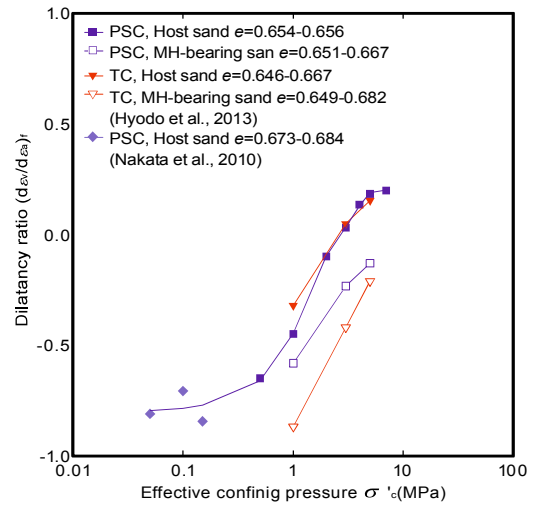


図 2-13 有効拘束圧とピーク時のダイレイタンス比の関係

初期に提案された土の弾塑性構成式には、強度の基準として **Extended Mises** 基準を採用することが多かった。しかし現在では、土の挙動にふさわしい破壊基準として、**Mohr-Coulomb** 基準、**SMP** 基準(参考文献) (参考文献)および **Lade-Duncan** 基準(参考文献)が挙げられる。今回得られた結果に対して、これらの破壊基準を適用し、高圧域においてどの破壊基準が適切なのかを議論する。また本試験装置では、画像取得を優先し、中間主応力の測定を行っていない。そのため、過去に行われた平面ひずみ試験結果(参考文献) (参考文献)から中間主応力係数  $b=0.25$  と仮定し、破壊強度の計算を行った。各破壊基準は以下の式で表現される。

Mohr-Coulomb

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (2-5)$$

Lade-Duncan

$$\frac{I_1^3}{I_3} = k_1 \quad (2-6)$$

Matsuoka-Nakai

$$\frac{I_1 I_2}{I_3} = k_2 \quad (2-7)$$

ここに、 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ はそれぞれ応力不変量であり、次式で表される。

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ I_2 &= \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1 \\ I_3 &= \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \end{aligned} \quad (2-8)$$

さらに、式(2-5)、(2-6)、(2-7)を応力比 $\eta$ とロードアングル $\theta$ との関係式で表すと以下のようになる。

Mohr-Coulomb

$$\eta = \frac{6 \sin \phi}{\sqrt{3}(1 + \sin \phi) \sin \theta + (3 - \sin \phi) \cos \theta} \quad (2-9)$$

Lade-Duncan

$$\eta = \frac{1}{2\sqrt{C/3} \cos \alpha} \quad (2-10)$$

$$\alpha = \frac{1}{3} \cos^{-1} \frac{D}{2\sqrt{C/3}^3} \cos 3\theta \quad (2-11)$$

$$C = \frac{k_1}{3(k_1 - 27)} \quad (2-12)$$

$$D = -\frac{2k_1}{27(k_1 - 27)} \quad (2-13)$$

Matsuoka-Nakai

$$\eta = \frac{1}{2\sqrt{C/3} \cos \alpha} \quad (2-14)$$

$$\alpha = \frac{1}{3} \cos^{-1} \frac{D}{2\sqrt{C/3}^3} \cos 3\theta \quad (2-15)$$

$$C = \frac{13 + k_2}{39 + k_2} \quad (2-16)$$

$$D = -\frac{2k_2}{27(9 + k_2)} \quad (2-17)$$

またロードアングル $\theta$ と中間主応力係数 $b$ には以下のような関係がある。

$$b = \frac{2 \tan \theta}{\sqrt{3} + \tan \theta} \quad (2-18)$$

図 2-14 に中間主応力係数と平面ひずみ試験によって得られた破壊強度 ( $b=0.25$ ) の関係を示す。併せて、図 2-8 ~ 2-10 に示した三軸試験結果を各破壊基準に適用することによって、破壊強度線を描いている。図 - 9(a)より、豊浦砂の場合では破壊強度は SMP 基準に近いことがわかる。しかし、図 2-10(b)(c)と有効拘束圧が増加するに伴い、破壊強度は SMP 基準から Mohr-Coulomb 基準に近づくことがわかる。これは、せん断帯に発生した粒子破碎によって、せん断面での摩擦抵抗が低減したためだと考えられる。メタンハイドレートを含む砂の場合では、豊浦砂の場合のような傾向はみられず、SMP 基準と Mohr-Coulomb 基準の間で破壊強度を示した。図 2-11 より、

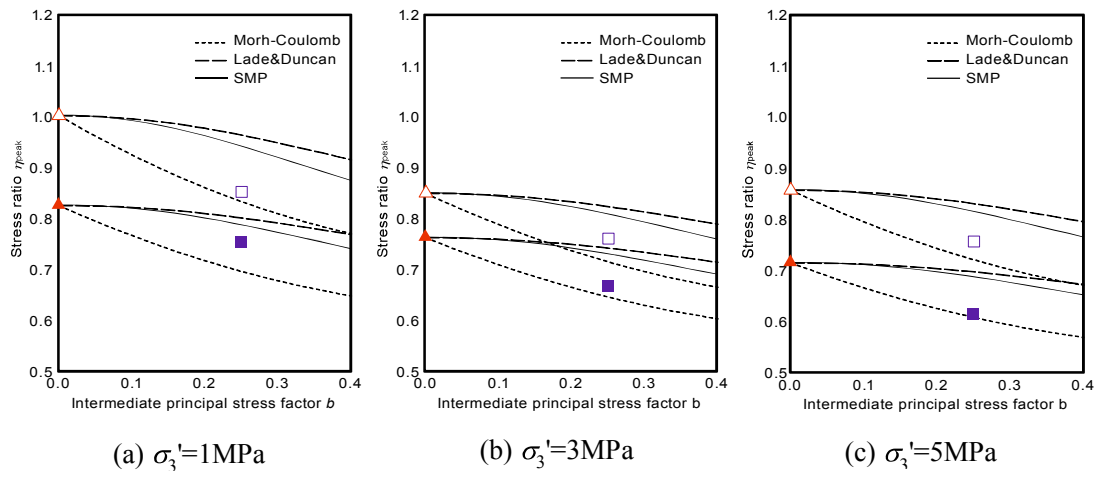


図 2-10 各有効拘束圧における中間主応力係数とピーク応力比の関係

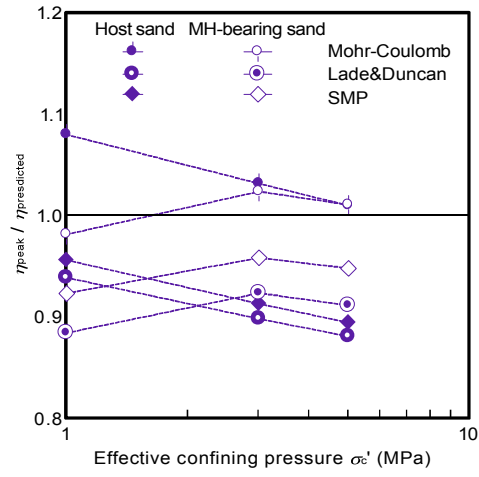


図 2-11 有効拘束圧と $\eta_{peak}/\eta_{predicted}$ の関係

## 2.5 メタンハイドレート含有砂の微視的挙動

過去の研究より、せん断中に起こる局所変形について研究されている。Desrues ら (1985) は、ピーク強度に至る前の軸ひずみの早い段階で、局所変形が起こっていることについて明らかにしている。また、ピーク強度を過ぎて軸ひずみが徐々に進行するにつれて、せん断帯内で膨張挙動を起こすことを多くの研究者が言及している (Oda and Kazama, 1998., Tatsuoka ら, 1990., Tsutsumi ら, 200)。さらに、Yun ら (2007) によれば、メタンハイドレートの存在はせん断による膨張挙動を助長させる働きをすると推察している。高圧下においてメタンハイドレート含有砂およびホスト砂がせん断によってどのような局所変形挙動を示すかを評価するために、せん断中に得られた画像から画像解析を行った。

写真 2-1 に有効拘束圧  $\sigma'_c = 3\text{MPa}$  における (a) 圧密後, (b) ピーク時, (c) 残留時での供試体画像を示す。写真より、ピーク時と残留時に局所変形が目視で確認できる。これらの画像を用いて、画像解析を行う。

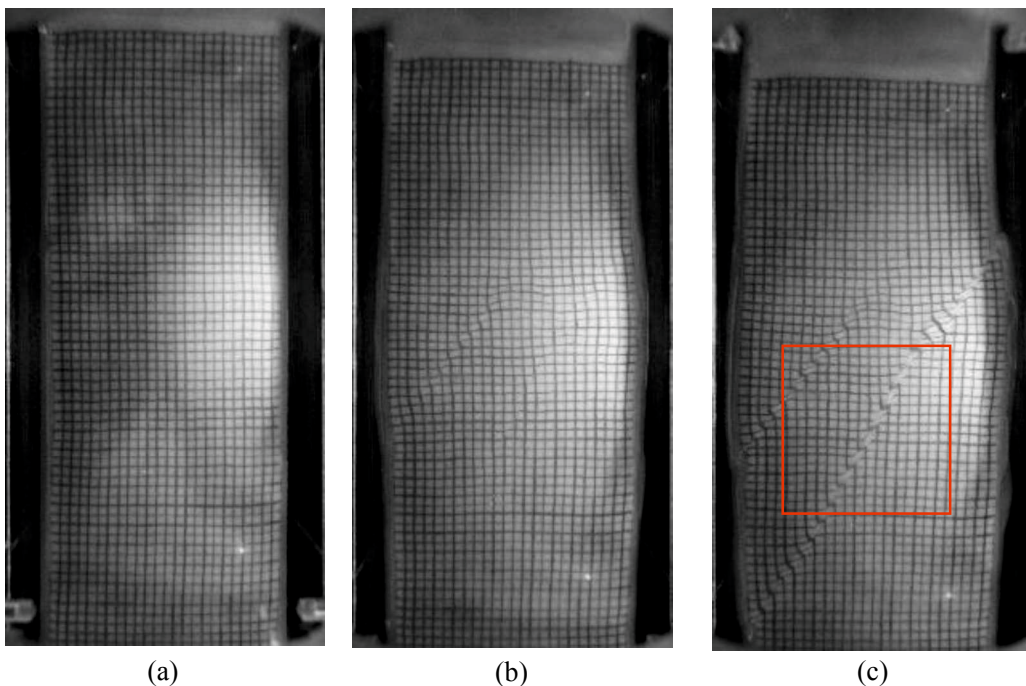
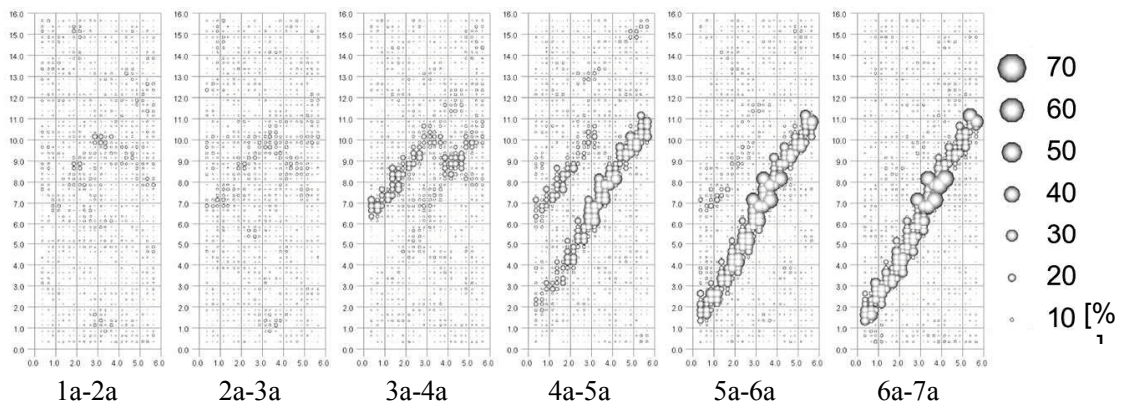


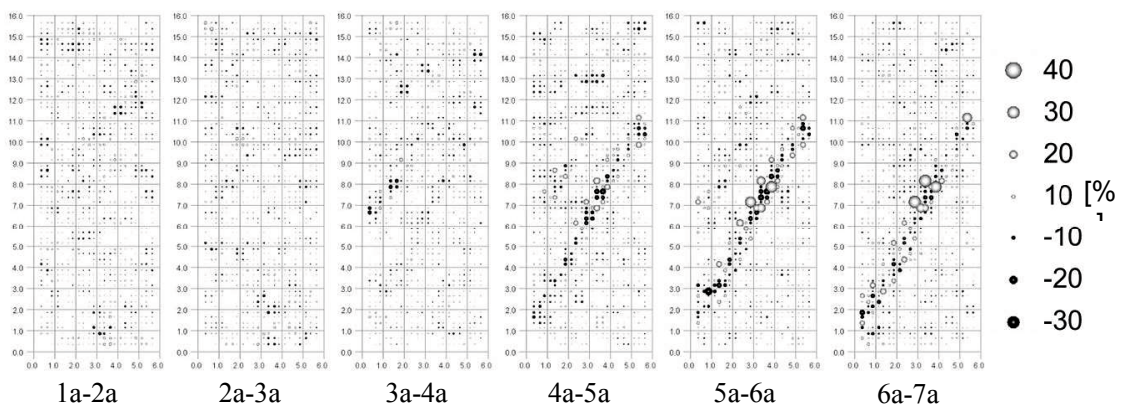
写真 2-1. 有効拘束圧  $\sigma'_c = 3\text{MPa}$  におけるメタンハイドレート含有砂の供試体画像  
(a) 圧密後, (b) ピーク時, (c) 残留時

図 2-12A に有効拘束圧  $\sigma'_c = 3\text{MPa}$  におけるホスト砂の最大せん断ひずみコンタ図を示す。図中の白丸および黒丸は、画像間隔軸ひずみ  $\varepsilon_a = 1\%$  ガウス点におけるひずみ増分値を示している。ひずみ増分は、要素におけるひずみは線形変化すると仮定した上で、四つの節点において測定された変位増分から計算されている。図 2-12 より、供試体はピーク強度に達する前までは、均一に変形しているが、ピーク強度発現後にせん断帯において最大せん断ひずみ

が集中していることがわかる。図 2-12B に体積ひずみコンタ図を示す。図 2-12B より、顕著な体積圧縮および体積膨張が、せん断帯が発生した箇所で起きていることがわかる。図 2-13A に有効拘束圧 $\sigma_3'=3\text{MPa}$ におけるメタンハイドレート含有砂の最大せん断ひずみコンタ図を示す。まず、ピーク強度に達する前から局所変形が進行していることがわかる。ピーク強度に達した後、ピーク前の局所変形とは別の変形が生じている。ホスト砂の解析結果と同じように、せん断帯が発生した箇所で、体積圧縮および体積膨張を交互に起こしていることがわかる。図 2-15A に有効拘束圧 $\sigma_3'=5\text{MPa}$ におけるホスト砂の最大せん断ひずみコンタ図を示す。図 2-15A より、ピーク強度発現後、左上からせん断帯が形成されていることがわかるが、図 2-15B の体積ひずみのコンタ図より、せん断帯の発生した箇所で有効拘束圧 $\sigma_3'=3\text{MPa}$ の結果でみられたような顕著な体積圧縮および体積膨張は起きない。図 2-16A に、有効拘束圧 $\sigma_3'=5\text{MPa}$ におけるメタンハイドレート含有砂の最大せん断ひずみコンタ図を示す。メタンハイドレートが含むことによって、せん断帯がはっきりと形成され、図 2-16B における体積ひずみのコンタ図より、体積圧縮および体積膨張を示していることがわかる。



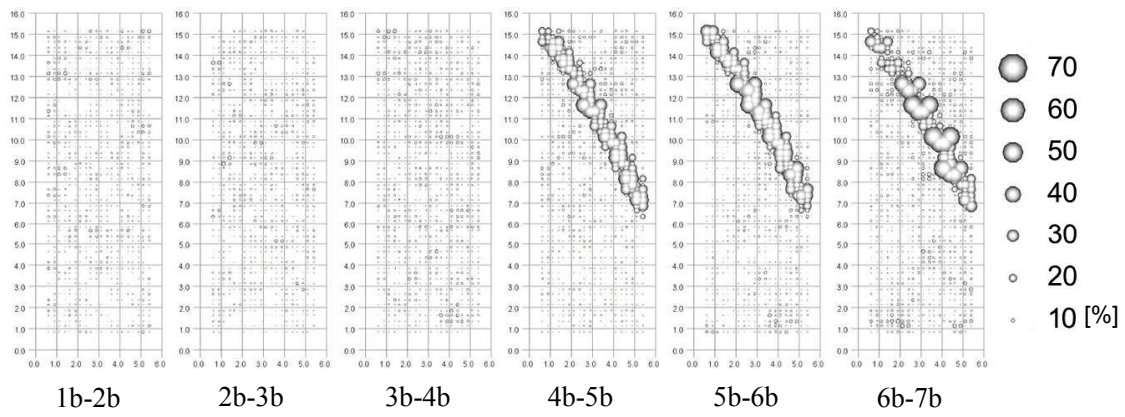
(A) 最大せん断ひずみ増分分布図



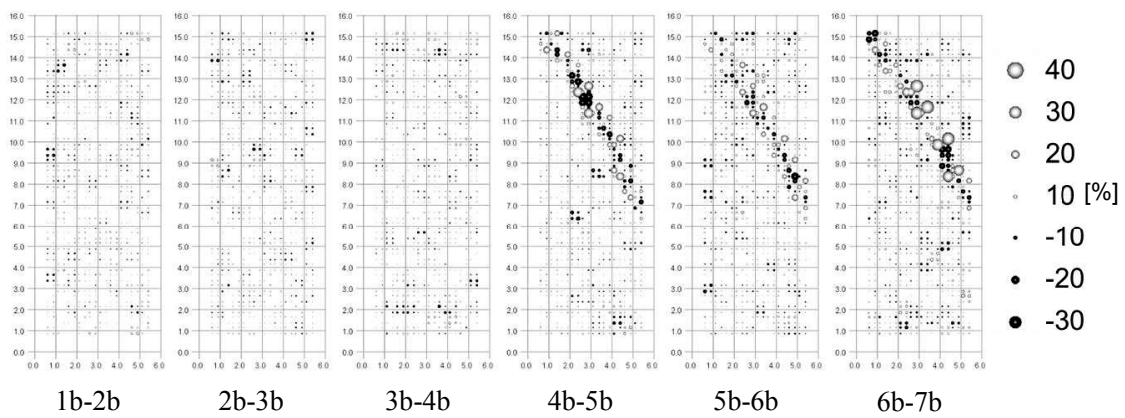
(B) 体積ひずみ増分分布図

図 2-12 メタンハイドレート含有砂に対する画像解析より得られた最大せん断ひずみ増分および体積ひずみ増分分布図



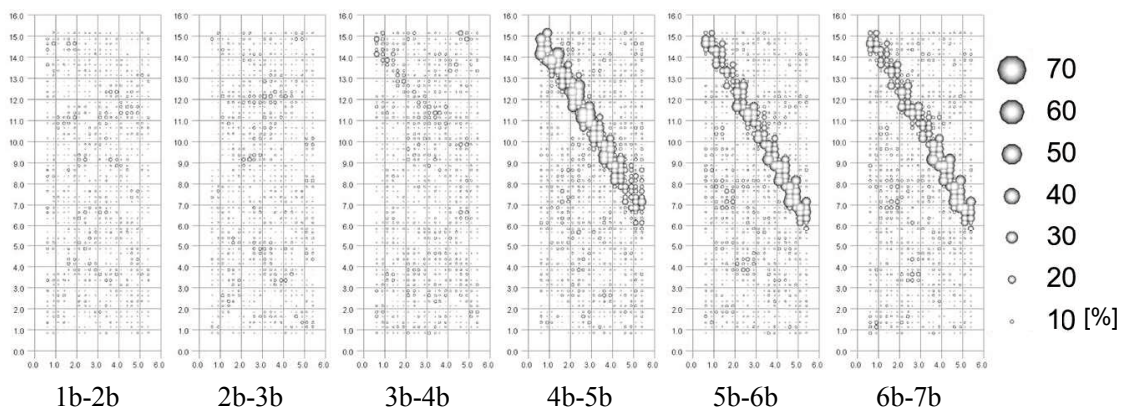


(A) 最大せん断ひずみ増分分布図

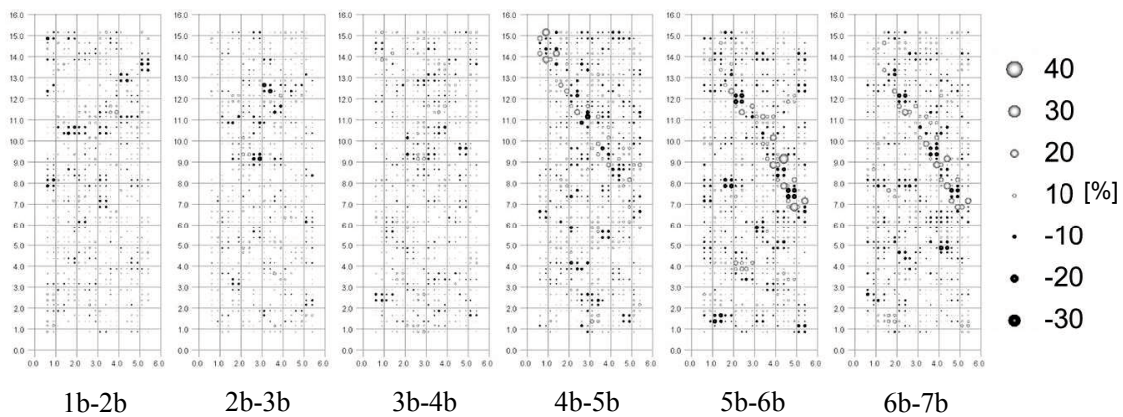


(B) 体積ひずみ増分分布図

図 2-13 ホスト砂に対する画像解析より得られた最大せん断ひずみ増分および体積ひずみ増分分布図



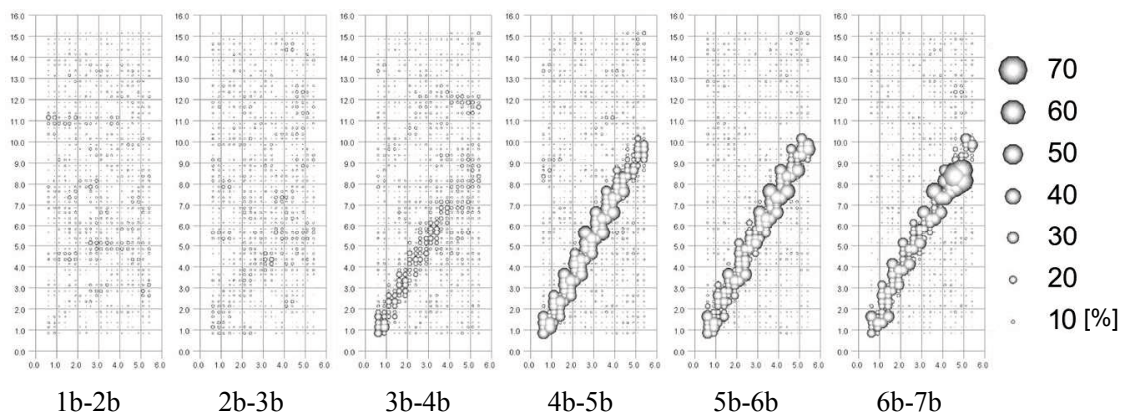
(A) 最大せん断ひずみ増分分布図



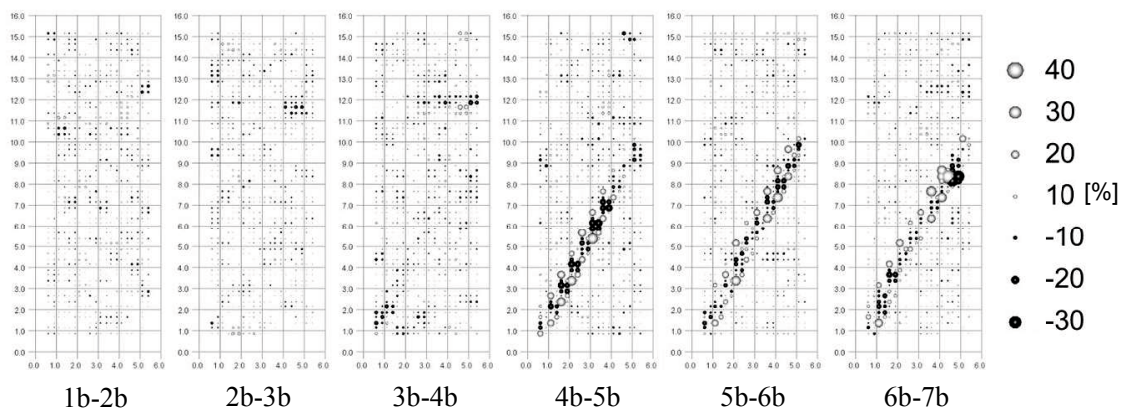
(B) 体積ひずみ増分分布図

図 2-14 メタンハイドレート含有砂に対する画像解析より得られた最大せん断ひずみ増分および体積ひずみ増分分布図





(A) 最大せん断ひずみ増分分布図



(B) 体積ひずみ増分分布図

図 2-15 メタンハイドレート含有砂に対する画像解析より得られた最大せん断ひずみ増分および体積ひずみ増分分布図

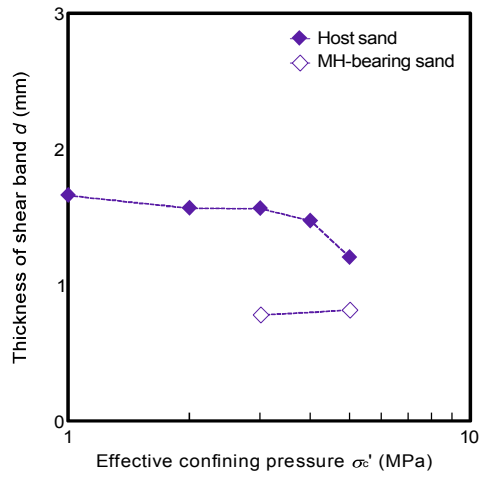


図 2-16 有効拘束圧とせん断帯幅の関係

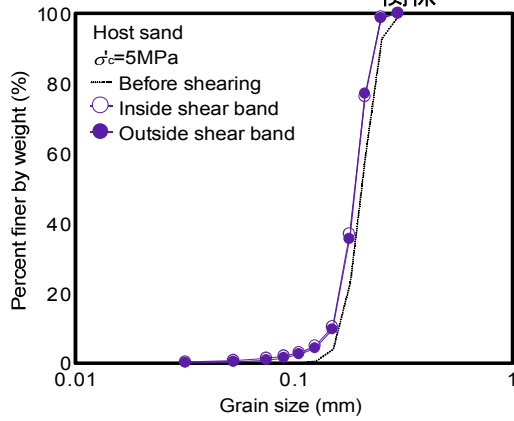


図 2-17 有効拘束圧  $\sigma'_c=1\text{MPa}$  におけるせん断試験後の粒度分布

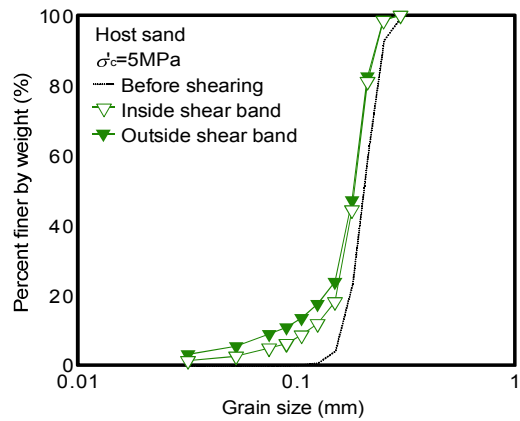


図 2-18 有効拘束圧  $\sigma'_c=5\text{MPa}$  におけるせん断試験後の粒度分布

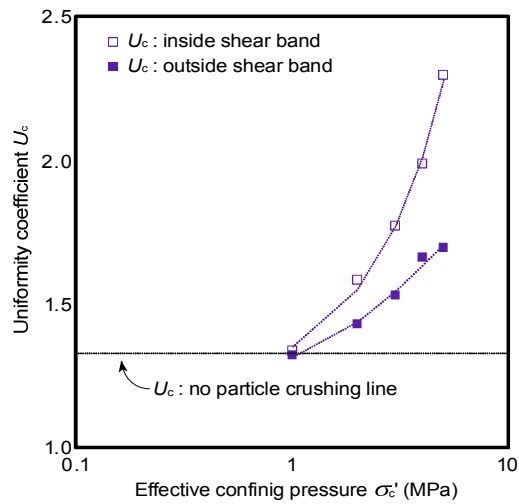


図 2-19 有効拘束圧と均等係数の関係

## 2.6 本章の要約

- ❖ 平面ひずみ試験より得られた応力比ひずみ関係は、三軸試験より得られた結果よりも明確なピーク強度を示した。メタンハイドレートを含むことによって、強度は増加し、体積は膨張傾向を示す。しかし、有効拘束圧が増加すると、明確なピークはみられなくなり、体積は圧縮傾向を示すようになる。
- ❖ 有効拘束圧に関わらず、メタンハイドレート含有砂の破壊強度は SMP 基準によって予測することができることを明らかにした。しかし、ホスト砂の場合は拘束圧の増加に伴い、SMP 基準からモール・クーロン基準へ移行する傾向がみられた。
- ❖ 有効拘束圧の増加に伴い、せん断による粒子破砕量が増加することを確認した。さらに、粒子破砕はせん断帯内で顕著に起こることが明らかとなった。

## 参考文献

- 28) Coop, M. R. and Atkinson, J. H., 1993, the mechanics of cemented carbonate sands, *Géotechnique* 43 (1), pp. 53–67.
- 29) Desrues, J., Lanier, J. and Stutz, P., 1985, Localization of the deformation in tests on sand sample, *Engineering Fracture Mechanics* 21 (4), pp. 909-921.
- 30) Dvorkin, J., Helgerud, M.B., Waite, W.F., Kirby, S.H., and Nur, A., 2000, Introduction to physical properties and elasticity models. In M.D. Max, Ed., *Natural Gas Hydrate In Oceanic and Permafrost Environments*, pp. 245-260.
- 31) Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Nakata, Y., Yoshimoto, N., Fukunaga, M., Kubo, K., Nanjo, T., Matsuo, T. and Nakamura, K., 2002, Triaxial compressive strength of methane hydrate, *Proceedings of 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 422–428.
- 32) Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N. and Ebinuma, T., 2005, Basic research on the mechanical behavior of methane hydrate-sediments mixture, *Soils and Foundations* 45 (1), pp. 75–85.
- 33) Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N. and Yoneda, J., 2008, Shear strength of methane hydrate bearing sand and its deformation during dissociation of methane hydrate, *Proceedings of the 4th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, pp. 549–556.
- 34) Hyodo, M., Yoneda, J., Norimasa, N. and Nakata, Y., 2013, Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed, *Soils and Foundations* 53 (2), pp. 299-314.
- 35) Katsuki, D., Nakata, Y., Hyodo, M., Norimasa, Y. and Hidekazu, M., 2004a, Roles of structural bonding and particle physical property in one-dimensional compression behaviour of bonded granular geomaterials, *Journal of JSCE*, 764/III-67, pp. 193-206.

- 36) Katsuki, D., Nakata, Y., Hyodo, M., Norimasa, Y. and Hedekazu, M., 2004b, *The Society of Materials Science, Japan*, 53 (1), pp. 13-16.
- 37) Kneafsey, T. J., Tomutsa, L., Moridis, G. J., Seol, Y., Freifeld, B. M., Taylor, C. E. and Gupta, A., 2007, Methane hydrate formation and dissociation in a partially saturated core-scale sand sample, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 56, pp.108-126.
- 38) Kurihara, M., Sato, A., Ouchi, H., Ohbuchi, Y. Masuda, Y., Narita, H., Ebinuma, T., Saeki, T., and Fujii, T., 2009, Examination on gas producibility from Eastern Nankai Trough methane hydrate resources, *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology* 74 (4), pp. 311-324. (in Japanese)
- 39) Kvenvolden, K.A., Ginsburg, G.D. and Soloviev, V.A., 1993, Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates, *Geo-Marine Letters* 13, pp. 32–40.
- 40) Lade, P. V. and Duncan, J. M., 1975, Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil, *journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 101 (10), pp. 1037-1053.
- 41) Lade, P. V. and Overton, D. D., 1989, Cementation effects in frictional materials, *Journal of Geotechnical Engineering* 115 (10), pp. 1373-1387.
- 42) Lam, W. and Tatsuoka, F., 1988, Effect of initial anisotropic fabric and  $\sigma_2$  on strength and deformation characteristics of sand, *Soils and Foundations* 28 (1), pp. 89-106.
- 43) Leroueil, S. and Vaughan, P. R., 1990, The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks, *Géotechnique* 40 (3), pp. 467–488.
- 44) Masui, A., Miyazaki, K., Haneda, H., Ogata, Y. and Aoki, K., 2008, Mechanical characteristics of natural and artificial gas hydrate bearing sediments, *Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates*, Chevron, Vancouver, B. C., Canada, 6-10 July.
- 45) Matsuoka, H. and Nakai, T., 1974, Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stresses, *Proceedings of JSCE* 232, pp.59-74.
- 46) Matsuoka, H., 1976, On the significance of the spatial mobilized plane, *Soils and Foundations* 16 (1), pp. 91-100.
- 47) MH21 Research Consortium, 2001 Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan. <<http://www.mh21japan.gr.jp/>>.
- 48) Miyazaki, K., Masui, A., Sakamoto, Y., Haneda, H., Ogata, Y., Aoki, K., Yamaguchi, T. and Okubo, T., 2007, Effect of strain rate on the preparation of triaxial compression test specimen of deposits containing methane hydrate, *Journal of MMIJ* 123 (11), pp. 537–544 (in Japanese).
- 49) Miyazaki, K., Yamaguchi, T., Sakamoto, Y., Tenma, N., Ogata, Y. and Aoki, K., 2010, Effect of confining pressure on mechanical properties of sediment containing synthetic methane hydrate, *Journal of MMIJ* 126 (7), pp. 408–417 (in Japanese).
- 50) Miyazaki, K., Masui, A., Sakamoto, Y., Aoki, K., Tenma, N. and Yamaguchi, T., 2011, Triaxial compressive properties of artificial methane- hydrate-bearing sediment, *Journal of Geophysical*

*Research* 116, B06102.

- 51) Nagakubo, S., 2009, Methane hydrate as a domestic energy resource: Japan's methane hydrate R&D program. *Journal of Geography* 118 (5), pp. 758–775. (in Japanese)
- 52) Nakata, Y., Kikkawa, N., Hui, Q., Orense, R. and Hyodo, M., 2009, Shear band observation for crushable ground beneath string footing using PIV, *AIP Conference Proceedings* 1145, 157.
- 53) Nakata, Y., Hyodo, M., Yoshimoto, N., Quio, H. and Kajiwara, T., 2010, Shear behavior of sand in plane strain compression test with PIV analysis, *Japan Society of Civil Engineers 2010 Annual Meeting* 65 III-254, pp. 507-508 (in Japanese).
- 54) Oda, M. and Kazama, H., 1998, Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils, *Géotechnique* 48 (4), pp. 465-481.
- 55) Suzuki, K., Ebinuma, T. and Narita, H., 2009, Features of methane hydrate-bearing sandy-sediments of the forearc basin along the Nankai trough: effect on methane hydrate-accumulating mechanism in turbidite, *Journal of Geography* 118 (5), pp. 899–912 (in Japanese)
- 56) Tsutsumi, Y., Koseki, J. and Sato, T., 2008, Strain localization characteristics of dense Toyoura sand in plane strain compression tests under different confining pressures, *Deformational Characteristics of Geomaterials* 1, pp. 365-370.
- 57) Waite, W. F., Winters, W. J. and Mason, D. H., 2004, Methane hydrate formation in partially water-saturated Ottawa sand, *American Mineralogist* 89, pp. 1202-1207.
- 58) Yamamoto, K., 2009, Examination of gas producibility from Eastern Nankai Trough methane hydrate resources, *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology* 74 (4), pp. 311-324.
- 59) Yoneda, J., Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N., Kokura, Y., Tsuda, N. and Ebinuma, T., 2007, Mechanical property of gas hydrate sediment at deep seabed on triaxial compression test, *Ground Engineering* 25 (1), pp. 113–122 (in Japanese).
- 60) Yoneda, J., Hyodo, M., Yoshimoto, N., Nakata, Y. and Kato, A., 2013, Development of High Pressure and Low Temperature Plane Strain Testing Apparatus for Methane Hydrate-Bearing Sand, *Soils and Foundations* 53 (5), pp. 774-783.
- 61) Yun, T. S., Santamarina, J. C. and Ruppel, C., 2007, Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate, *Journal of geophysical research* 112, B04106.

## 第三章 メタンハイドレート分解時の砂の変形挙動

---

### 3.1 概説

メタンハイドレートの主な生産方法として減圧法が検討されている。他にも熱刺激法、分解促進剤注入法の3手法を組み合わせて生産することも考えられている(山本, 2009)が、エネルギー効率面や経済面の観点から、減圧法を用いることが最も適しているとされている。しかし、減圧法を用いることによって有効応力が増加し、地盤の圧密変形が起こることが予想される。また分解フロントを境に不等圧密沈下が発生し、せん断変形を伴う可能性がある。さらに、海底斜面のようなメタンハイドレート生産前からせん断応力を受けている地盤に対して、減圧法によるメタンハイドレート分解を行った際にどのような地盤変形挙動を伴うか把握する必要がある。そして、第1章でも示したように、メタンハイドレート濃集層は砂泥互層をなしているため、各地層で透水性の違いにより分解挙動や地盤変形挙動に違いが生じると予想される。以上を踏まえて、メタンハイドレート分解前の応力状態および細粒分含有率を変化させて実験条件を設定し、減圧法によるメタンハイドレート分解実験を行った。

### 3.2 減圧法によるメタンハイドレート分解実験の概要

メタンハイドレート固結砂供試体を作製し、圧密までの手順はせん断試験と同様である。図4-1に、分解実験の有効応力経路を示す。経路1は圧密後に分解実験を行った時の経路、経路2は圧密後にせん断応力を加え、分解実験を行った時の経路である。経路2におけるせん断応力は、メタンハイドレート固結砂のピーク強度よりも低くホスト砂よりも高い値まで与えている。図4-2に分解実験模式図を示す。図に示すように、供試体の上部と下部から、もしくは上部のみから間隙水圧を減少させることによりメタンハイドレートを分解させる。間隙圧の減圧速度は、0.5MPa/minで行った。メタンハイドレート分解が終了した後、間隙水圧を圧密後圧力まで増圧させる。間隙水圧の増圧速度は、0.5MPa/minで行った。

表4-1に実験条件一覧を示す。試料はせん断試験と同様にTcと比較として豊浦砂を用いている。いずれの実験も間隙圧を10MPaから3MPaまで減少させることによって、メタンハイドレートをメタンガスと水に分解する。それぞれ $S_{MH}=50\%$ を目標にメタンハイドレートを生成させ分解実験を行っている。

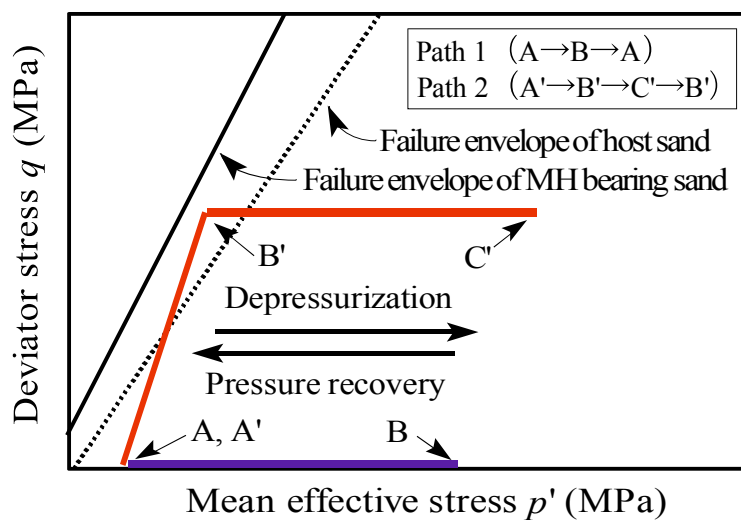


图 4-1 有效应力経路

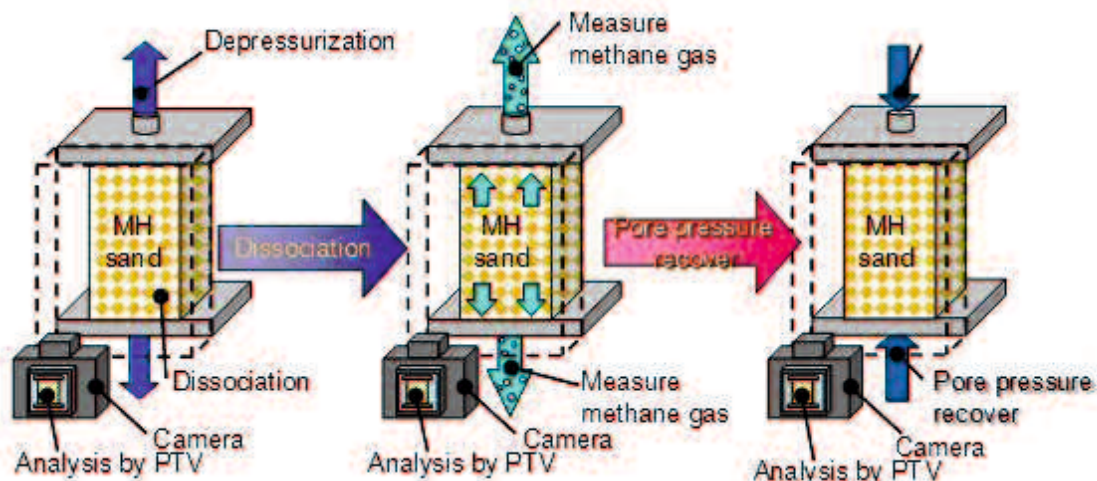


图 4-2 分解実験模式図

表 4-1 分解実験一覽

| Sample name  | Test name | Effective confining pressure $s_c'$ (MPa) | Initial shear stress $q$ (MPa) | Depressurization (MPa) | Initial temperature $T$ (°C) | Porosity $n$ (%) | MH saturation $S_{MH}$ (%) |
|--------------|-----------|---|--------------------------------|------------------------|------------------------------|------------------|----------------------------|
| Toyoura sand | Case1     | 3→10→3                                    | 0                              | 10→3→10                | 5                            | 39.5             | 57.5                       |
|              | Case2     |   | 11.3                           |                        |                              | 39.5             | 54.9                       |
| $T_c$        | Case3     |   | 0                              |                        |                              | 39.4             | 48.1                       |
|              | Case4     |   | 10.1                           |                        |                              | 39.5             | 40.0                       |



### 3.3 実験結果

#### 3.4.1 減圧過程

図 4-3 に MH 分解中の圧力の経時変化, 図 4-4 に温度の経時変化, 図 4-5 にメタンガス発生量の経時変化及び図 4-6 に軸ひずみの経時変化を示す. すべての実験について間隙圧を 10MPa から 3MPa まで減圧し, MH を分解させる. 減圧途中において, MH の安定境界上の温度 5°C にあたる 4.2MPa を下回ると同時に供試体温度が急激に減少した. 同時にメタンガスの発生が伺えることから, これは MH 分解の際の吸熱反応によって生じたものと考えられる. MH 分解が進行し, 供試体温度が 5°C に回復しているのは, セル水を 5°C に保っているためである. 軸ひずみに注目すると, 初期の減圧による有効応力の増加で Case1, Case4 では 1%程度増加している. Case2, Case3, Case5 では, 初期せん断応力の影響により, 軸ひずみの進行が顕著である. しかし, MH 分解が収束するに従って軸ひずみの進行も収束に向かうことが確認された.

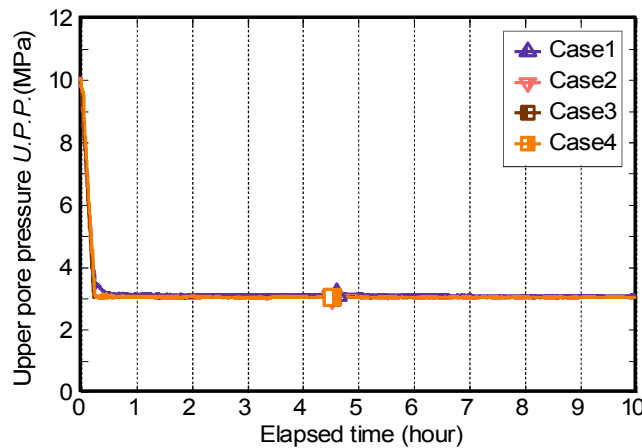


図 4-3 減圧および MH 分解過程における圧力の経時変化

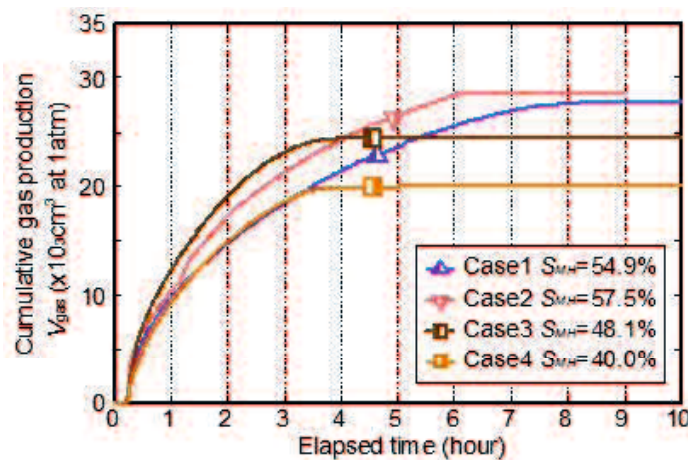


図 4-4 減圧および MH 分解過程における温度の経時変化



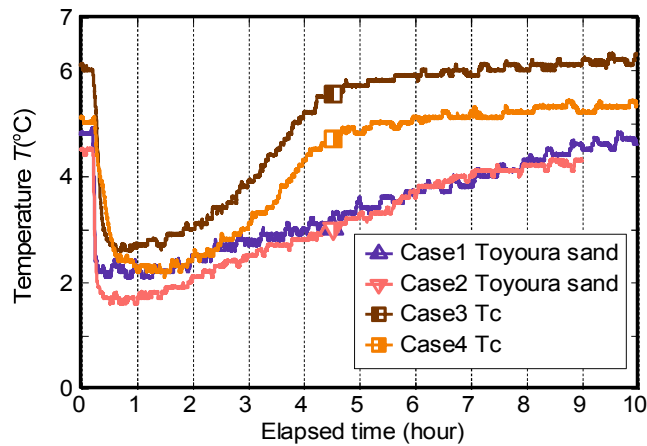


図 4-5 減圧および MH 分解過程におけるガス発生量の経時変化

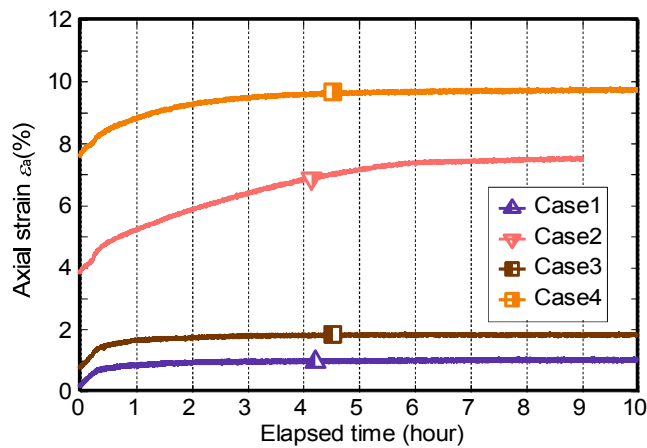


図 4-6 減圧および MH 分解過程における軸ひずみの経時変化

図 4-7 から図 4-11 に、Case1 から Case4 それぞれの減圧開始から 1 時間経過するまでの上部圧力計と下部圧力計との圧力差および温度の経時変化を示す。まず、図 4-7 より、減圧開始から 10 分が経過してから温度が急激に減少していることがわかる。それと同時に急に圧力差が生じていることがわかる。これはメタンハイドレートの分解により、ガス圧が急激に増加したためであると考えられる。図 4-8 より、温度の減少が始まる前から圧力差が急に生じていることがわかる。これは、初期にせん断を与えた後に分解実験を行ったため、供試体が密になり透水性が低下したため起こった現象であると考えられる。その後圧力差は急激に解消されるが、温度減少と同時にメタンハイドレートが分解し、ガス圧が急激に増加することによる圧力差が生じる。図 4-9 より、Case1 の豊浦砂の結果と比較して、倍近くの圧力差が生じていることがわかる。これは、Tc が細粒分を多く含む試料であり、豊浦砂よりも透水性が低いことが要因であると考えられる。図 4-10 より、Case2 と同様に、初期せん断により供試体が密になっているため、メタンハイドレート分解前から顕著に圧力差を生じている。Case1 および Case2 の豊浦砂の結果では、減圧開始から 30 分経過したところで圧力

差はほとんど解消されているが、Case3 および Case4 の Tc の場合では、緩やかに圧力差が解消されていくことがわかる。

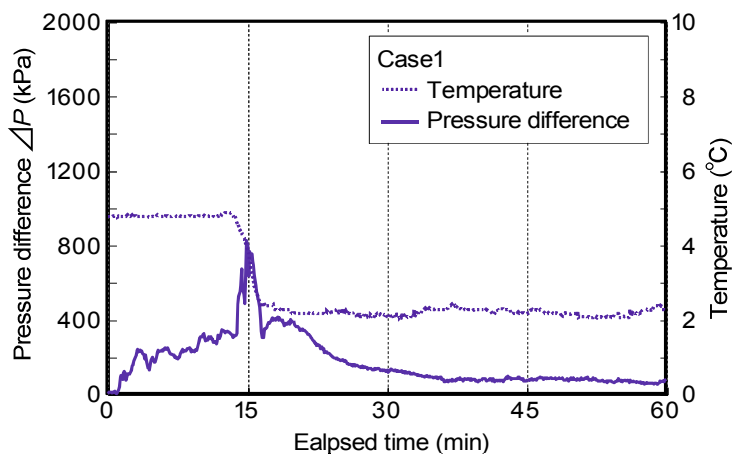


図 4-7 Case1 における供試体間の圧力差と温度の経時変化

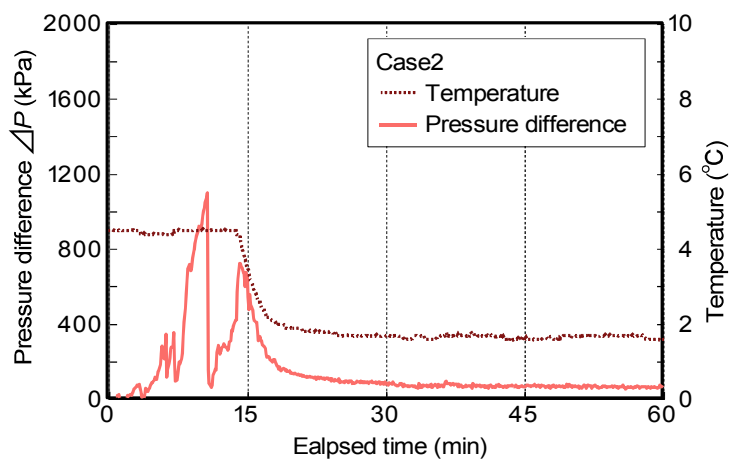


図 4-8 Case2 における供試体間の圧力差と温度の経時変化

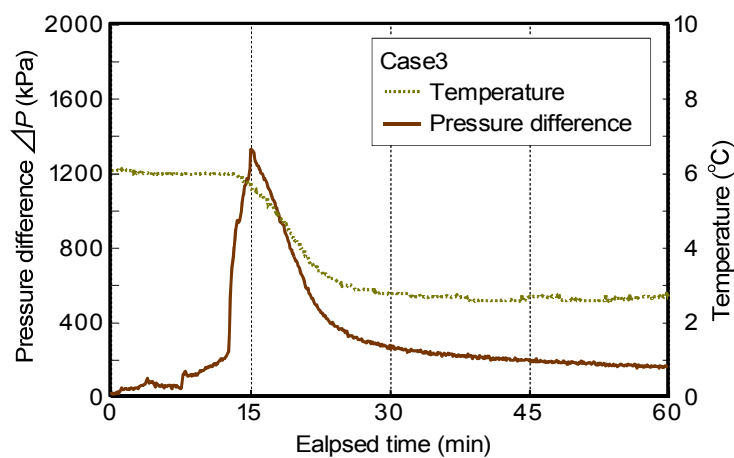


図 4-9 Case3 における供試体間の圧力差と温度の経時変化

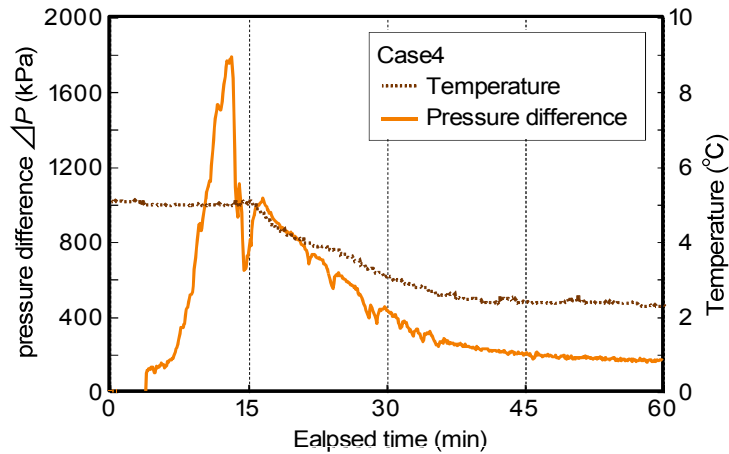


図 4-10 Case4 における供試体間の圧力差と温度の経時変化

図 4-11 に示すように、減圧およびメタンハイドレート分解中は供試体上部で圧力を測定し、供試体下部から 3cm の位置で温度を測定している。図 4-12 は、メタンハイドレート分解時の図 4-11 に示す供試体下部温度と供試体上部圧力の関係を示す。全ての実験結果について、間隙圧を低下させる過程で、安定境界線上のそれぞれの供試体温度に相当する圧力に達すると、メタンハイドレートの安定境界に沿って温度が減少していることがわかる。

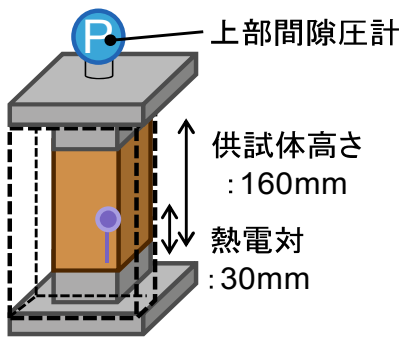


図 4-11 上部間隙圧計と熱電対の位置

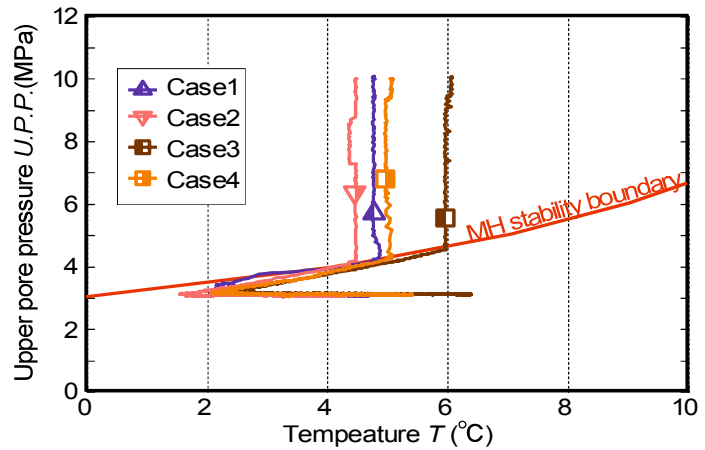


図 4-12 上部間隙圧計と供試体温度の関係

### 3.4.2 水圧回復過程

図-4.11 に水圧回復過程の圧力の経時変化、図-12 に温度の経時変化、図-13 に軸ひずみの経時変化を示す。メタンハイドレート分解後、3MPa から 10MPa まで間隙水圧を上昇させる。同時に温度の上昇が確認できる。これは、供試体に回収されずに残ったメタンガスが、

圧力の上昇によりハイドレート化したことが考えられる。等方応力条件の場合（Case1、Case4）について、間隙水圧の上昇とともに弾性膨張を起こしていることが確認された。しかし、圧密後の圧力まで水圧を戻しても体積は完全に元の状態には戻らない。この戻らない体積量は、メタンハイドレート分解によって減少した体積量と、過圧密を受けたために塑性変形を起こした体積量とが考えられる。減圧前にせん断応力を受けた場合（Case2、Case3、Case5）について、間隙水圧が 10 MPa に戻りきる前に急激な軸ひずみの進行が確認された。つまり、供試体が強度を失って破壊が進行したと考えられる。

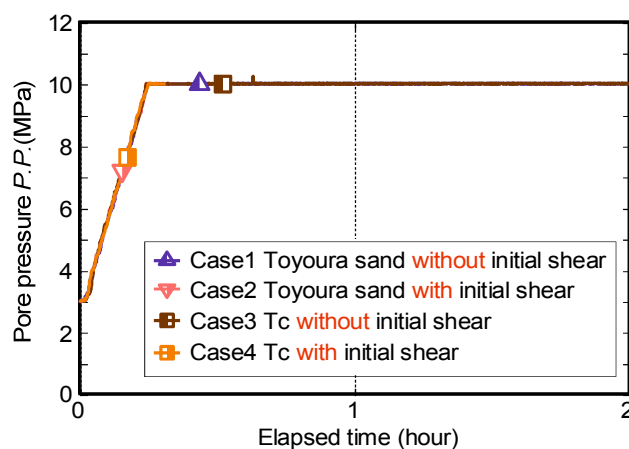


図-4.11 水圧回復過程における圧力の経時変化

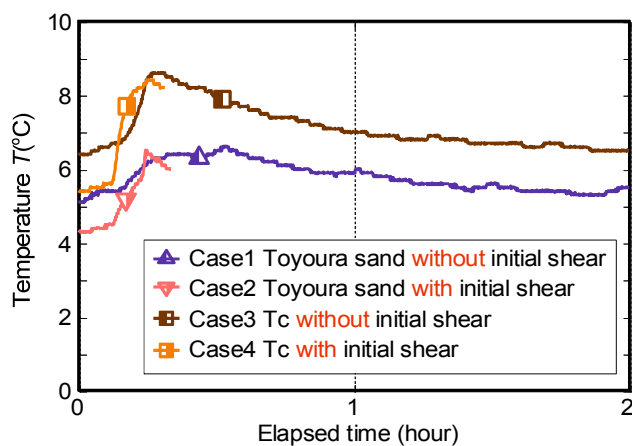


図-4.12 水圧回復過程における温度の経時変化

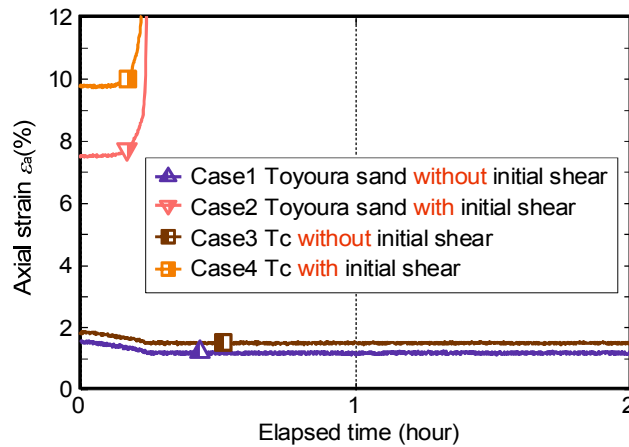


図-4.13 水圧回復過程における軸ひずみの経時変化

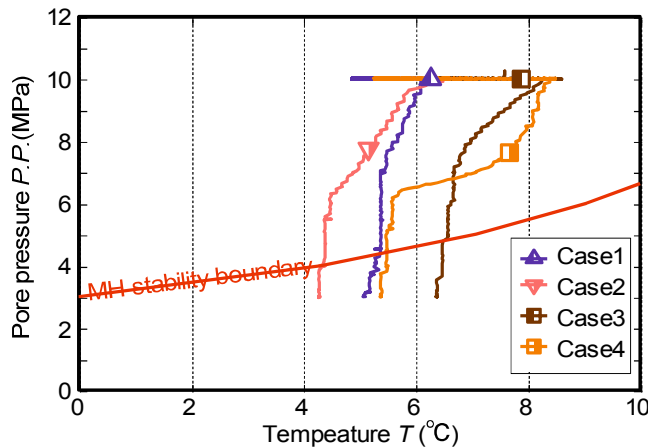


図-4.14 水圧回復過程における軸ひずみの経時変化

### 3.4.3 メタンハイドレート分解実験中の強度変化および変形挙動

図 4-15 および図 4-14 に分解実験中の軸ひずみと応力比の関係を示す。せん断過程までは、まだ供試体にはメタンハイドレートが存在する状態であるので、強度はホスト砂よりも高い。前章でも述べたが、豊浦砂と Tc を比較すると、ピーク強度の出現が豊浦砂の場合ホスト砂よりも早く出現するが、Tc の場合ホスト砂とほぼ同時期に出現する。せん断試験の結果で示したピーク強度に達した時点でせん断を止めて減圧過程に移る。

減圧過程を経ることによって軸ひずみが進行する。豊浦砂の場合、減圧による軸ひずみの進行が顕著であるのに対し、Tc の場合ではせん断時に軸ひずみがある程度進行しているため、減圧過程における変形量は少ない。

メタンハイドレート分解が終了し、水圧回復過程に移る。水圧を徐々に増圧させていくと、供試体はホスト砂の強度に達した時点から急激な軸ひずみの進行が確認できる。メタ

ンハイドレートが分解され固結力を失った供試体は、メタンハイドレートを含まない砂の強度となることがこれら図から確認できる。

図 4-15 および図 4-16 に示した図中の各点の供試体画像を写真 3-1 と写真 3-2 に示す。写真より、減圧・メタンハイドレート分解過程を経ることによって、供試体の軸ひずみ進行が肉眼で確認できる。また水圧回復過程を経て供試体の軸ひずみの進行がみられたが、画像からも確認でき、せん断試験と同様にせん断帯を形成し、破壊に至ることが確認できる。これら得られた供試体画像から画像解析を行った。図 4-17 と図 4-18 に体積ひずみコンタ図を示す。それぞれの実験結果について、減圧・メタンハイドレート分解過程を経ることで、体積は全体的に圧縮されていることが確認できる。水圧回復過程を経て破壊に至ることでせん断帯を生じるが、せん断帯外では体積圧縮を起し、せん断帯内は局所的に体積膨張を起していることが明らかとなった。

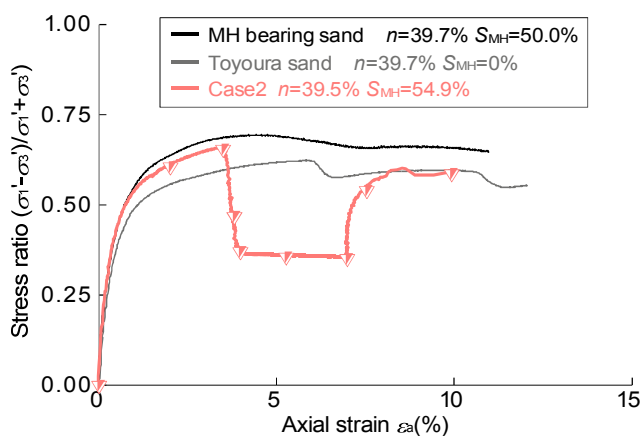


図-4.15 水圧回復過程における圧力の経時変化

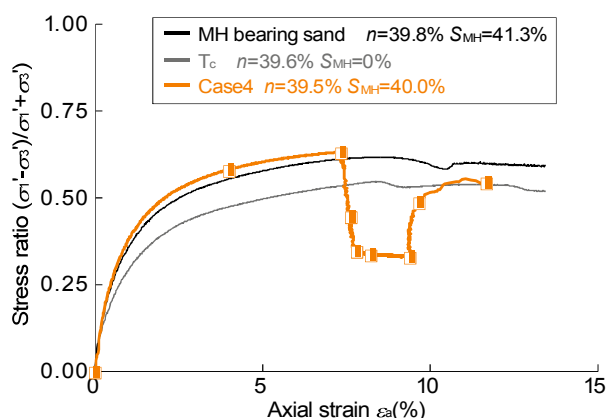


図-4.16 水圧回復過程における温度の経時変化



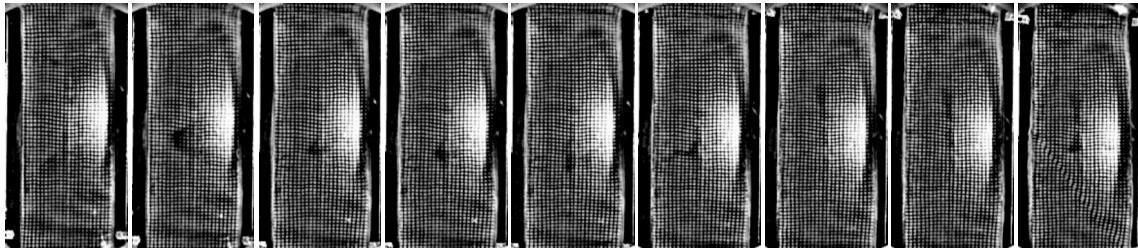


写真 3-1 分解実験における Case2 の供試体画像

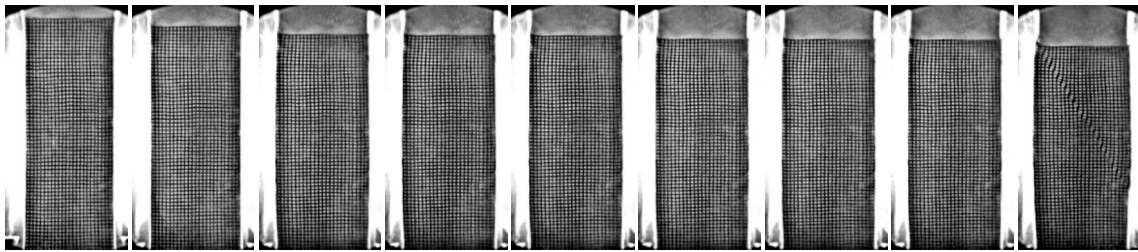


写真 3-2 分解実験における Case4 の供試体画像

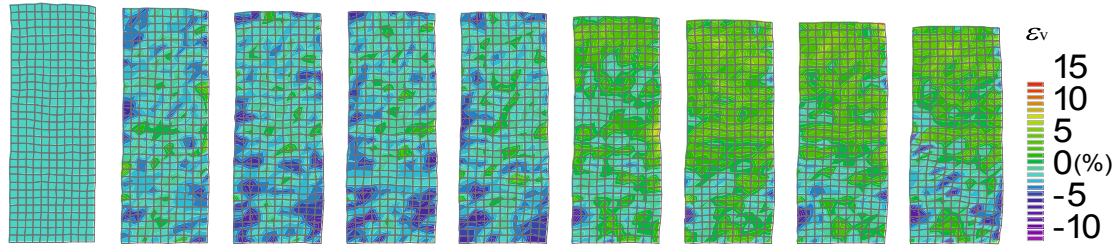


図 4-17 分解実験における Case2 の体積ひずみコンタ図

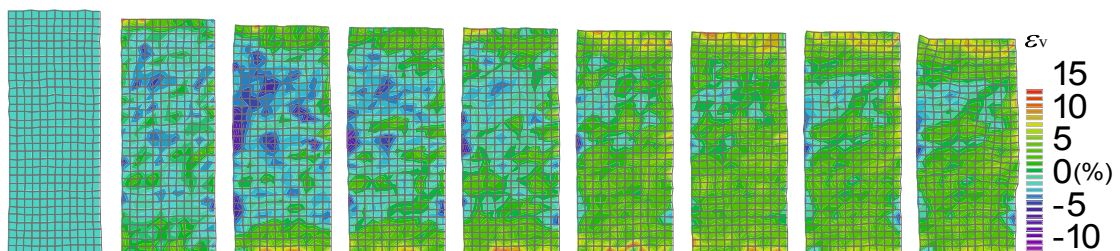


図 4-18 分解実験における Case4 の体積ひずみコンタ図

### 3.5 本章の要約

- ❖ 減圧過程において、圧力の減少とともに吸熱反応による温度減少、メタンガスの発生が観測された。また、減圧による有効応力の増加およびメタンハイドレート分解による軸ひずみの進行が確認された。このとき、初期にせん断応力を受けている状態では、メタンハイドレート分解による固結力の減少によりメタンハイドレート分解中も軸ひずみが進行することが明らかとなった。
- ❖ 細粒分を多く含む砂はその透水性の低さから、減圧時に顕著に圧力差を生じることが明らかとなった。
- ❖ 水圧過程において、等方応力条件の場合、弾性膨張を起こし定常状態に至る。このとき、メタンハイドレート分解と過圧密の影響により体積は減圧前の体積まで戻らない。初期にホスト砂よりも高いせん断応力を受けた場合、メタンハイドレートの固結力を失い、水圧回復による有効応力の減少により破壊に至ることが明らかとなった。



## 参考文献

- 62) Kurihara, M., Sato, A., Ouchi, H., Ohbuchi, Y., Masuda, Y., Narita, H., Ebinuma, T., Saeki, T., and Fujii, T., 2009, Examination on gas producibility from Eastern Nankai Trough methane hydrate resources, *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology* 74 (4), pp. 311-324. (in Japanese)
- 63) Oyama, H., Nagao, J., Suzuki, K., Narita, H., 2010, Experimental analysis of sand production from methane hydrate bearing sediment applying depressurization method, *The Mining and Materials Proceeding Institute of Japan*, 126, pp. 497-502.
- 64) Sakamoto, Y., Komai, T., Kawabe Y., Tenma, N., Yamaguchi, T., 2004, Formation and dissociation behaviour of methane hydrate in porous media –Estimation of permeability in methane hydrate reservoir, Part 1-, *The Mining and Materials Proceeding Institute of Japan*, 120, pp. 85-90.
- 65) Sakamoto, Y., Simokawa, M., Ohga K., Miyazaki, S., Komai, T., Aoki, K., Yamaguchi, T., 2008, Experimental study on consolidation behavior and permeability characteristics during dissociation of methane hydrate by depressurization process –Estimation of permeability in methane hydrate reservoir, Part 6-, *The Mining and Materials Proceeding Institute of Japan*, 124, pp. 498-507.
- 66) Waite, W. F., Winters, W. J. and Mason, D. H., 2004, Methane hydrate formation in partially water-saturated Ottawa sand, *American Mineralogist* 89, pp. 1202-1207.
- 67) Yun, T. S., Santamarina, J. C. and Ruppel, C., 2007, Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate, *Journal of geophysical research* 112, B04106.

## 第四章 有限要素法解析手法によるメタンハイドレートを含む砂の分解時変形シミュレーション

---

### 4.1 概説

減圧法では、坑井内の水をポンプでくみ上げることで水圧を下げ、坑底から地盤内の間隙水圧を減圧する。圧力低下が坑井の近傍より周辺へと層内を伝搬するのに伴い MH の分解が進行し、分解したガスは圧力勾配によって坑井の方向へ移動する。この間、固体であるメタンハイドレートが気体に変化し、間隙水圧が減圧されることで有効応力が増加する。さらには、分解したメタンガスの移動や水の移動、およびメタンハイドレートの分解に伴う吸熱と熱の移動などの物理化学現象が複雑に絡み合うことが予想される。それに伴う圧密沈下や海底地すべりなど、海底地盤に様々な影響を与えることが危惧されている。そこで、境界値問題として生産対象となる地盤全体の生産時の地盤変形シミュレーションを行うため、地層変形シミュレータ COTHMA が開発された(天満ら, 2010)。COTHMA は地層応力・変形や熱と水、ガスの流れを連成し解くことができる。さらに、提案する弾塑性構成式を組み込み、地層応力変化・変形をより正確に予測できるようになっている。その他にも、第一章で示したように、MH21-HYDRES などの生産シミュレータの開発が行われ、数値シミュレーションが数多く行われている(Konno ら, 2008., Kurihara ら, 2011)。

本章では、第 2 節で地層変形シミュレータ COHTMA の特徴について述べる。第 3 節では、COTHMA に組み込んだ弾塑性構成式の概要を説明する。第 4 節では、地層変形シミュレータ DIANA を用いて既往の研究によって得られた三軸試験に対して圧縮試験シミュレーションを行った。第 5 節では、前章で得られた分解実験の結果を踏まえて、軸対称応力下における分解実験シミュレーションを行った。最後に第 6 節では、得られた知見をまとめて要約する。

### 4.2 地層変形シミュレータ COTHMA

地層変形シミュレータ COTHMA は、固相の応力つり合い式、水質量保存式、メタンガス質量保存式、ハイドレート質量保存式、氷質量保存式、エネルギー保存式を基本支配方程式とする。また、気相での 2 成分移流拡散を考慮するため、気相での成分質量保存式から得られた気相成分の移流拡散式を用いる。これらの支配方程式の弱形式は Galerkin 法または Eulerian-Lagrangian 法により有限要素定式化を行う。COTHMA は、①減圧法、坑井加熱法、

熱水圧入法、異種ガス圧入法等によるメタンハイドレート堆積層の圧密変形挙動およびガス生産性、②メタンハイドレートの分解・再生成および氷の生成・融解による相状態の変化、③相状態変化により生じた堆積層の変形・強度特性の変化、④相変化および圧密による堆積層の浸透率の変化、⑤坑井と周り地層の相互作用を考慮した坑井の安全性、などの検討に対応できる。

#### 4.3 メタンハイドレートの固結力を考慮した弾塑性構成式

##### 4.3.1 構成式の概要

提案する構成式は、主に以下に示すような考え方や特徴を有している。

- ① 全ひずみ増分は、弾性ひずみ成分と塑性ひずみ成分の線形和で与えられる。
- ② 既存の修正Cam-clayモデルを拡張し、下負荷面モデルを適用する。
- ③ メタンハイドレートによる土粒子のセメンテーションを表現するために、内部応力の平均有効主応力成分として $p_{int}$ を導入し、降伏曲面を拡張する。 $p_{int} > 0$ であればメタンハイドレートを含む砂の構成則となり、 $p_{int} = 0$ であれば土のみの構成則（修正カムクレイ）となる。

なお、三次元応力空間において応力・ひずみパラメータは、以下のように表現される。

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \quad q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4-1)$$

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p, \quad d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_1^p + d\varepsilon_2^p + d\varepsilon_3^p, \\ d\varepsilon_d^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_2^p)^2 + (d\varepsilon_2^p - d\varepsilon_3^p)^2 + (d\varepsilon_3^p - d\varepsilon_1^p)^2} \quad (4-2)$$

また、応力と塑性ひずみ増分が同軸上にあると仮定している。さらに、塑性ポテンシャル関数と降伏関数に対して関連流れ則を適用する場合、以下のような関係式が得られる。

$$d\varepsilon_v^p = \Lambda \frac{\partial g}{\partial p'}, \quad d\varepsilon_d^p = \Lambda \frac{\partial g}{\partial q} \quad (4-3)$$

ここに、 $\Lambda$ は比例定数である。

##### 4.3.2 塑性ポテンシャル関数と降伏関数の誘導

塑性ポテンシャル関数を決定するために、直交則を利用する。つまり、

$$\frac{dq}{dp^*} \frac{d\varepsilon_d^p}{d\varepsilon_v^p} = -1, \quad p^* = p + p_{int} \quad (4-4)$$

$p_{int}$ は、固結力によって増加した内部応力である。さらに、塑性仕事式と内部消散エネルギー式を仮定して、両者が等しいと仮定する。まず、塑性仕事式は、

$$dW^p = \sigma_1 d\varepsilon_1^p + \sigma_2 d\varepsilon_2^p + \sigma_3 d\varepsilon_3^p = p^* d\varepsilon_v^p + q d\varepsilon_d^p \quad (4-5)$$

また、内部消散エネルギー式は、

$$dW^{in} = (p + p_{int}) \sqrt{(d\varepsilon_v^p)^2 - \chi d\varepsilon_v^p d\varepsilon_d^p + (M d\varepsilon_d^p)^2} - p_{int} d\varepsilon_v^p \quad (4-6)$$

ここで示す内部消散エネルギー式は、Kasama ら(2000)が提案した式の $p_r$ を $p_{int}$ を置き換え表現した。 $dW^p$ と $dW^{in}$ は等しいと仮定するとき、式(4-5)と式(4-6)より以下のストレスダイレイタンス式が導かれる。

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_d^p} = \frac{M^2 - \eta^{*2}}{2\eta^* + \chi} = \frac{M^2 - \eta^{*2}}{c\eta^*}, \quad \chi = (c-2)\eta^*, \quad \eta^* = \frac{q}{p + p_{int}} \quad (4-7)$$

ここで直交則（式(4-4)）を利用することにより $c \neq 0$ のときの塑性ポテンシャル関数が求まる。

$$g = \frac{c}{2(c-1)} \ln \left( \eta^{*2} + \frac{M^2}{c-1} \right) + \ln(p + p_{int}) - C = 0, \quad C \text{は積分定数} \quad (4-8)$$

また、 $c = 1$ のとき、

$$g = \frac{1}{2} \frac{\eta^{*2}}{M^2} + \ln(p + p_{int}) - C = 0, \quad C \text{は積分定数} \quad (4-9)$$

関連流れ則を仮定し、降伏関数を導くと、

$$f = (p + p_{int}) \left[ 1 + (c-1) \frac{q^2}{M^2(p + p_{int})^2} \right]^{\frac{c}{2(c-1)}} - (p_0 + p_{int}) = 0 \quad (4-10)$$

また、 $c = 1$ のとき、

$$f = 2 \ln \left( \frac{p + p_{int}}{p_0 + p_{int}} \right) + \frac{q^2}{M^2(p + p_{int})^2} = 0 \quad (4-11)$$

となる。さらに、塑性ポテンシャル関数と降伏関数が非関連流れ則であると仮定したとき、塑性ポテンシャル関数と降伏関数は以下のように書き改められる。

<塑性ポテンシャル関数>

$$g = (p + p_{int}) \left[ 1 + (d-1) \frac{q^2}{M^2(p + p_{int})^2} \right]^{\frac{d}{2(d-1)}} - (p_0 + p_{int}) = 0, \quad \text{if } d \neq 0 \quad (4-12)$$

$$g = 2 \ln \left( \frac{p + p_{int}}{p_0 + p_{int}} \right) + \frac{q^2}{M^2(p + p_{int})^2} = 0, \quad \text{if } d = 1 \quad (4-13)$$

<降伏関数>

$$f = (p + p_{int}) \left[ 1 + (c-1) \frac{q^2}{M^2(p + p_{int})^2} \right]^{\frac{c}{2(c-1)}} - (p_0 + p_{int}) = 0, \quad \text{if } c \neq 0 \quad (4-14)$$

$$f = 2 \ln \left( \frac{p + p_{int}}{p_0 + p_{int}} \right) + \frac{q^2}{M^2(p + p_{int})^2} = 0, \quad \text{if } c = 1 \quad (4-15)$$

係数  $d$  および  $c$  は、塑性ポテンシャル関数と降伏関数のそれぞれの形状を決定するパラメータである。

上記の塑性ポテンシャル関数および降伏関数に対して、下負荷面の概念を導入し、降伏面内でも弾塑性的挙動を表現できるよう誘導する。下負荷面は現応力点を通り、正規降伏面に相似な面であるとする、現応力パラメータ  $(p, q)$  は以下のように表記できる。

$$(p, q) = (Rp_y, Rq_y) \quad (4-16)$$

ここに、 $R(0 < R < 1)$  は下負荷面と正規降伏曲面の相似比、 $p_y$  および  $q_y$  は、原点と現応力点を通る直線と正規降伏曲面の交差する応力点である。正規降伏局面の降伏関数は、式(4-9)および式(4-10)より、

$$F = (p_y + p_{int}) \left[ 1 + (c - 1) \frac{q^2}{M^2(p_y + p_{int})^2} \right]^{\frac{c}{2(c-1)}} - (p_0 + p_{int}) = 0, \quad \text{if } c \neq 0 \quad (4-17)$$

$$F = 2 \ln \left( \frac{p_y + p_{int}}{p_0 + p_{int}} \right) + \frac{q^2}{M^2(p_y + p_{int})^2} = 0, \quad \text{if } c = 1 \quad (4-18)$$

であるため、式(4-16)を代入して下負荷面の降伏関数が得られる。

$$f = (p + Rp_{int}) \left[ 1 + (c - 1) \frac{q^2}{N^2(p + Rp_{int})^2} \right]^{\frac{c}{2(c-1)}} - R(p_0 + p_{int}) = 0, \quad \text{if } c \neq 0 \quad (4-19)$$

$$f = 2 \ln \left[ \frac{p + Rp_{int}}{R(p_0 + p_{int})} \right] + \frac{q^2}{N^2(p + Rp_{int})^2} = 0, \quad \text{if } c = 1 \quad (4-20)$$

図4-1に構成式の硬化則におけるメタンハイドレートを含む砂と砂のみの  $e - \ln p$  関係を示す。ここで  $p'_0$  および  $p_0^*$  は、それぞれメタンハイドレートを含む砂および砂のみの圧縮降伏応力であり、その時の間隙比をそれぞれ  $e_0$  および  $e_0^*$  とする。さらに  $p'_c$  は等方圧密開始時の平均有効主応力であり、その時の間隙比を  $e_c$  とし、 $p'_i$  は基準応力であり、その時の間隙比を  $e_i$  とする。  $p_0^*$  および  $e_0^*$  は以下のように示される。

$$p_0^* = \exp \left\{ \frac{e_i - e_c + \lambda \ln p'_i - \kappa \ln p'_c}{\lambda - \kappa} \right\}, \quad e_0^* = e_i - \lambda \ln \left( \frac{p_0^*}{p'_c} \right) \quad (4-21)$$

ここで、同平均有効主応力下におけるメタンハイドレートを含む砂と砂のみの間隙比の差  $\Delta e$  を以下のように定義する。

$$\Delta e = \frac{p_{int}}{\alpha + \beta \times p_{int}} \quad (4-22)$$

さらに、図中の関係から

$$\Delta e = \lambda \ln \left( \frac{p'_0}{p_0^*} \right) - \kappa \ln \left( \frac{p'_0}{p_0^*} \right) \quad (4-23)$$

式(4-22)と式(4-23)の関係から、メタンハイドレートを含む砂の降伏応力は以下のように与えられる。

$$p'_0 = \exp \left\{ \ln p_0^{*'} + \frac{p_{int}}{(\alpha + \beta \times p_{int})(\lambda - \kappa)} \right\} \quad (4-24)$$

$\alpha$ および $\beta$ は $p_0^{*'}$ と $p'_0$ の関係を表す材料定数である。図中の関係から、硬化則は次の式のように定義する。

$$dp'_0 = \frac{\partial p'_0}{\partial p_0^{*'}} dp_0^{*'} + \frac{\partial p'_0}{\partial p_{int}} dp_{int} = \frac{\partial p'_0}{\partial p_0^{*'}} \frac{1+e}{\lambda - \kappa} p_0^{*' \times} d\varepsilon_v^p + \frac{\partial p'_0}{\partial p_{int}} dp_{int} \quad (4-25)$$

ここで、 $d\varepsilon_v^p$ は式(4-3)より、

$$dp'_0 = \frac{\partial p'_0}{\partial p_0^{*'}} \frac{1+e}{\lambda - \kappa} p_0^{*' \times} \Lambda \frac{\partial f}{\partial p'} + \frac{\partial p'_0}{\partial p_{int}} dp_{int} \quad (4-26)$$

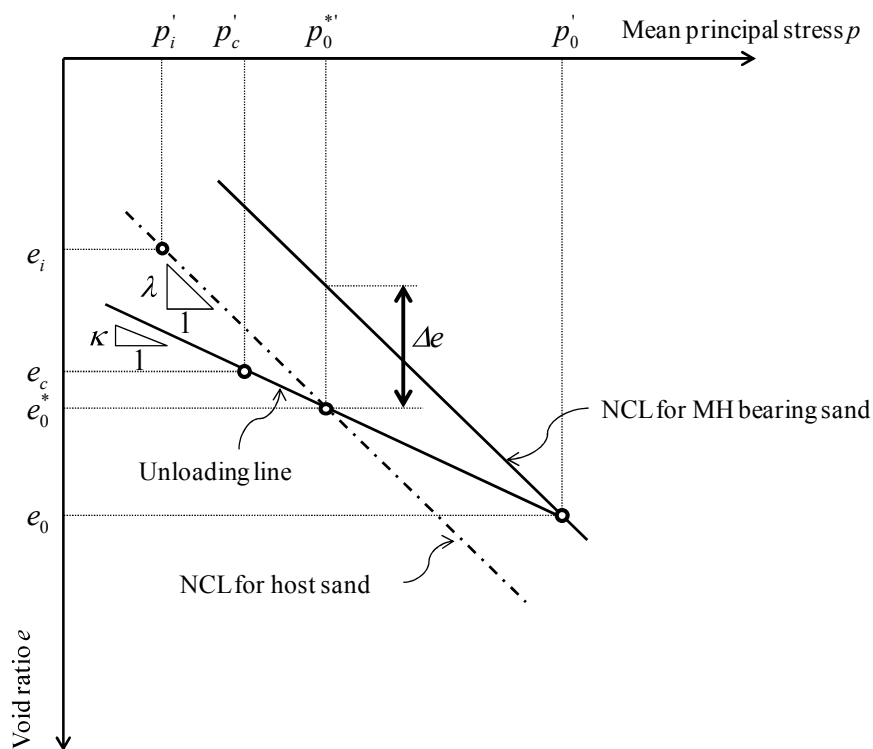


図4-1 メタンハイドレートを含む砂と砂のみの $e$ - $\ln p$ 関係

降伏関数 $f$ の適合条件 $df = 0$ を考えると、

$$\begin{aligned}
df &= \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T \{d\sigma\} + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} d\varepsilon_v^p + \frac{\partial f}{\partial R} dR + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} dp_{int} \\
&= \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T \{d\sigma\} + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \Lambda \bar{k} + \frac{\partial f}{\partial R} \Lambda \bar{R} + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} (\Lambda \bar{p}_{int} + \zeta dS_{MH}) \\
&= \left( \frac{\partial f}{\partial p} \left\{ \frac{\partial p}{\partial \sigma} \right\}^T + \frac{\partial f}{\partial q} \left\{ \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right\}^T \right) \{d\sigma\} + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \Lambda \bar{k} + \frac{\partial f}{\partial R} \Lambda \bar{R} \\
&\quad + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} (\Lambda \bar{p}_{int} + \zeta dS_{MH}) = 0
\end{aligned} \tag{4-27}$$

式(4-27)の関係から比例定数 $\Lambda$ を求めると、

$$\begin{aligned}
\Lambda &= \frac{\left( \frac{\partial f}{\partial p} \left\{ \frac{\partial p}{\partial \sigma} \right\}^T + \frac{\partial f}{\partial q} \left\{ \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right\}^T \right) \{d\sigma\} + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \zeta dS_{MH}}{\frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \bar{k} + \frac{\partial f}{\partial R} \bar{R} + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \bar{p}_{int}} \\
&= -\frac{1}{H} \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial p} \left\{ \frac{\partial p}{\partial \sigma} \right\}^T + \frac{\partial f}{\partial q} \left\{ \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right\}^T \right) \{d\sigma\} + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \zeta dS_{MH} \right] \\
H &= -\left( \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \bar{k} + \frac{\partial f}{\partial R} \bar{R} + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \bar{p}_{int} \right)
\end{aligned} \tag{4-28}$$

以上のことから降伏関数による塑性体積ひずみ増分 $d\varepsilon_v^p$ と塑性軸差ひずみ増分 $d\varepsilon^p$ が求められる。

#### 4.3.3 応力ひずみ関係の誘導

応力増分とひずみ増分関係の関係は、

$$\begin{aligned}
\{d\sigma\} &= [D]\{d\varepsilon^e\} \\
\{d\sigma\} &= [D](\{d\varepsilon\} - \{d\varepsilon^p\})
\end{aligned} \tag{4-29}$$

塑性ひずみ増分を塑性ポテンシャルで表すと、

$$\{d\varepsilon^p\} = \Lambda \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \tag{4-30}$$

全ひずみ増分は、弾性ひずみ増分と塑性ひずみ増分で構成されると仮定する。

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\} \tag{4-31}$$

代入すると、

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \Lambda \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \tag{4-32}$$

両辺に左から弾性マトリクスをかける



$$[D]\{d\varepsilon\} = \{d\sigma\} + \Lambda[D]\left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\} \quad (4-33)$$

$\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T$  を左からかける

$$\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\{d\varepsilon\} = \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T \{d\sigma\} + \Lambda \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\} \quad (4-34)$$

以下誘導を示し、山口大学モデルの応力ひずみ関係を得る。

$$\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\{d\varepsilon\} = \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T \{d\sigma\} + \Lambda \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\} \quad (4-35)$$

$$\begin{aligned} \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\{d\varepsilon\} = & - \left[ \frac{\partial f}{\partial\varepsilon_v^p} \Lambda \bar{k} + \frac{\partial f}{\partial R} \Lambda \bar{R} + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} (\Lambda \bar{p}_{int} + \zeta dS_{MH}) \right] \\ & + \Lambda \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\} \end{aligned} \quad (4-36)$$

$$\begin{aligned} \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\{d\varepsilon\} = & - \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \zeta dS_{MH} - \Lambda \left( \frac{\partial f}{\partial\varepsilon_v^p} \bar{k} + \frac{\partial f}{\partial R} \bar{R} + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \bar{p}_{int} \right) \\ & + \Lambda \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\} \end{aligned} \quad (4-37)$$

$$\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\{d\varepsilon\} + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \zeta dS_{MH} = \Lambda H + \Lambda \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\} \quad (4-38)$$

$$\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\{d\varepsilon\} + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \zeta dS_{MH} = \Lambda \left( H + \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\} \right) \quad (4-39)$$

$$\Lambda = \frac{\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\{d\varepsilon\} + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \zeta dS_{MH}}{H + \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\}} \quad (4-40)$$

$$\{d\varepsilon^p\} = \Lambda \left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\} = \frac{\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\{d\varepsilon\} + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \zeta dS_{MH}}{H + \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\}} \left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\} \quad (4-41)$$

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} &= [D](\{d\varepsilon\} - \{d\varepsilon^p\}) = [D] \left( \{d\varepsilon\} - \Lambda \left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\} \right) \\ &= [D] \left( \{d\varepsilon\} - \frac{\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\{d\varepsilon\} + \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \zeta dS_{MH}}{H + \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T [D]\left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\}} \left\{\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right\} \right) \end{aligned} \quad (4-42)$$

$$\begin{aligned}
\{d\sigma\} &= [D]\{d\varepsilon\} - [D] \left( \frac{\begin{pmatrix} \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D] \{d\varepsilon\} + \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \zeta dS_{MH} \end{pmatrix}}{H + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\}} \right) \\
&= [D]\{d\varepsilon\} - \left( \frac{[D] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D]}{H + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\}} \right) \{d\varepsilon\} \\
&\quad - \left( \frac{[D] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \zeta}{H + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\}} \right) dS_{MH} \tag{4-43}
\end{aligned}$$

$$\{d\sigma\} = \left( [D] - \frac{[D] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D]}{H + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\}} \right) \{d\varepsilon\} - \left( \frac{[D] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \frac{\partial f}{\partial p_{int}} \zeta}{H + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\}} \right) dS_{MH} \tag{4-44}$$

$$\{d\sigma\} = [D^{ep}]\{d\varepsilon\} + D^{eS_{MH}} dS_{MH} \tag{4-45}$$

#### 4.4 圧縮試験シミュレーション

地層変形シミュレータ DIANA に山口大学モデルを導入し、既往の研究により得られた圧密排水三軸圧縮試験のシミュレーションを行う。以下に解析条件、パラメータの決定方法、解析結果を示す。

##### (a) 解析条件

山口大学モデルで使用するパラメータの詳細は表 4-1 に示す通りである。パラメータ  $\lambda$ 、 $\kappa$ 、 $e_i$ 、 $p_i$ 、 $M$  は、等方圧縮除荷試験および圧密排水三軸圧縮試験より得られるパラメータである。これらのパラメータはホスト砂に関するパラメータであり、メタンハイドレートの有無に依らず決定される。パラメータ  $u$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\chi$ 、 $\zeta$  は、試験結果に対してフィッティングすることにより決定するパラメータである。図 4-2 に解析モデルを示す。圧縮試験と同じ初期条件で解析を行うため、高さ 60mm、半径 15mm の円柱供試体を模擬し、2次元応力の軸対称条件である。要素数は 36、節点数は 52 である。左端は水平方向固定、下端は垂直方向固定、上下端は水平方向に自由であり、供試体上部と下部の端面の影響は考慮していない。DIANA は荷重制御での解析を行うため、上左端に節点荷重を与え、その荷重により生じた変位と同じ変位を他の上端節点にも与えるように制御している。応力ひずみ関係を示すために、図 4-2 に示す要素番号 20 を選び代表的な結果としている。

##### (b) パラメータの決定方法

メタンハイドレート濃集層模擬試料である  $T_b$  (前章参照) を解析対象とした。山口大学モデルのパラメータ  $\lambda$ 、 $\kappa$ 、 $e_i$ 、 $p_i$ 、 $M$  は、それぞれの試料に対して行った等方圧縮除荷試験

および圧密排水三軸圧縮試験により得られた値を用いた。パラメータ $\lambda$ 、 $\kappa$ 、 $e_i$ 、 $p_i$ 、 $M$ の詳細な決定方法は図 4-3 および図 4-4 に示す。図 4-3、 $\lambda$ は圧縮試験での応力域を考慮して等方圧縮曲線上の 20MPa における傾きを用いた。 $\kappa$ は 0.02MPa から 0.3MPa までの各プロット間隔から計算された傾きを平均した数値を用いた。 $p_i$  および  $e_i$  は、以下の式で関係づけられる。

$$e_i = e + \lambda(\ln p - \ln p_i) \quad (4-46)$$

式(4-46)を用いて、 $p_i=1\text{MPa}$  したときの  $e_i$  を計算した。試料 T<sub>b</sub> について、間隙率  $n=45\%$  のとき、実験値より  $p=19.93\text{MPa}$  のとき  $e=0.5714$  なので  $e_i=0.8805$  となる。 $M$ は図 4-4 に示す通り、ホスト砂供試体および MH 含有砂供試体とも軸ひずみ 15%に達しても限界状態に至らないことから、軸ひずみが 30%に到達したときの応力比を限界応力比として用いた。 $u$  は、図 4-5 のように各試料の等方圧縮曲線に最も整合したときの値を用いた。試料 T<sub>b</sub>、間隙率  $n=45\%$  について、 $u=42$  のとき最も実験結果と計算結果が整合した。 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\chi$ 、 $\zeta$ は、メタンハイドレート含む砂の応力ひずみ関係に整合するようにフィッティングを行い、各パラメータを決定した。図 4-6 で示すように、実験結果に対して要素シミュレーションによる計算結果が整合するように計算を行った。図 4-6 に示した計算結果に使用されているパラメータは、表 4-2 の通りである。

### (c) 解析結果

図 4-7 にメタンハイドレート飽和率で比較した試験結果および解析結果の応力ひずみ関係を示す。パラメータは表 4-2 で示した数値を使用した。有限要素法により近似計算を行っているため、全ての結果について図 4-6 に示した計算結果よりも強度は低く計算され、体積変化は圧縮側を示す。また、 $S_{MH}=47.4\%$ の計算結果は、荷重制御で計算を行ったため、ピーク強度に達した時点で計算が終了している。図 4-7 より、弾塑性的な応力ひずみ挙動およびメタンハイドレート飽和率による強度増加と体積膨張を表現できていることがわかる。図 4-8 に山口大学モデルと関口太田モデルによるシミュレーション結果の比較を示す。解析対象は、試料 T<sub>b</sub>、 $S_{MH}=47.4\%$ の結果である。図 4-8 より、山口大学モデルは他の弾塑性構成式と比較して、初期剛性、収縮挙動およびダイレイタンスを比較的良く表現することができていることが明らかである。

表 4-1 山大モデルで使用するパラメータの詳細

| 記号        | 各パラメータの詳細                   |
|-----------|-----------------------------|
| $\lambda$ | $e\text{-ln}p'$ 空間における圧縮指数  |
| $\kappa$  | $e\text{-ln}p'$ 空間における膨張指数  |
| $p_i$     | 正規圧密曲線の位置を規定                |
| $e_i$     | 正規圧密曲線の位置を規定                |
| $M$       | 限界応力比                       |
| $u$       | 塑性ひずみ増分の大きさを規定              |
| $\alpha$  | 内部応力の変動に伴う $p_0'$ の変化の程度を規定 |
| $\beta$   | 内部応力の変動に伴う $p_0'$ の変化の程度を規定 |
| $\chi$    | 内部応力の損傷の程度を規定               |
| $\zeta$   | メタンハイドレートの固結力の程度を規定         |

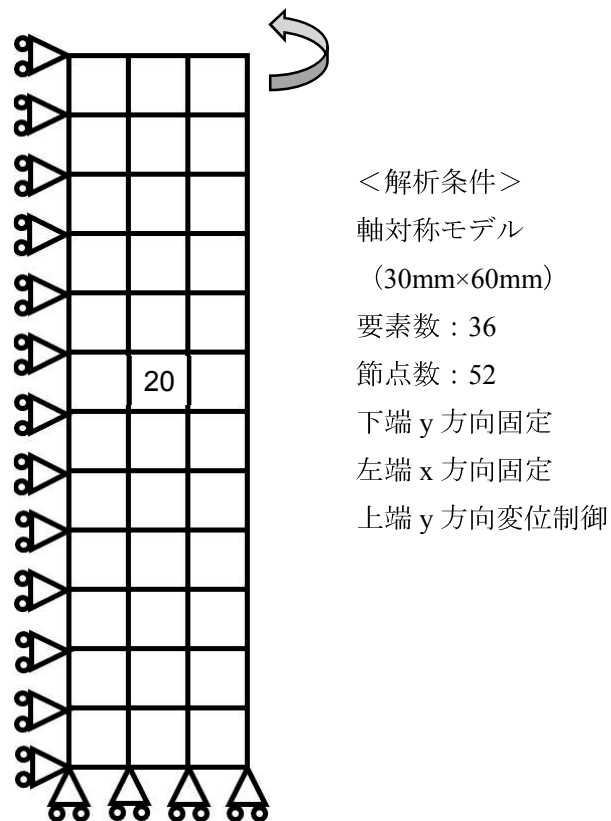


図 4-2 解析モデル

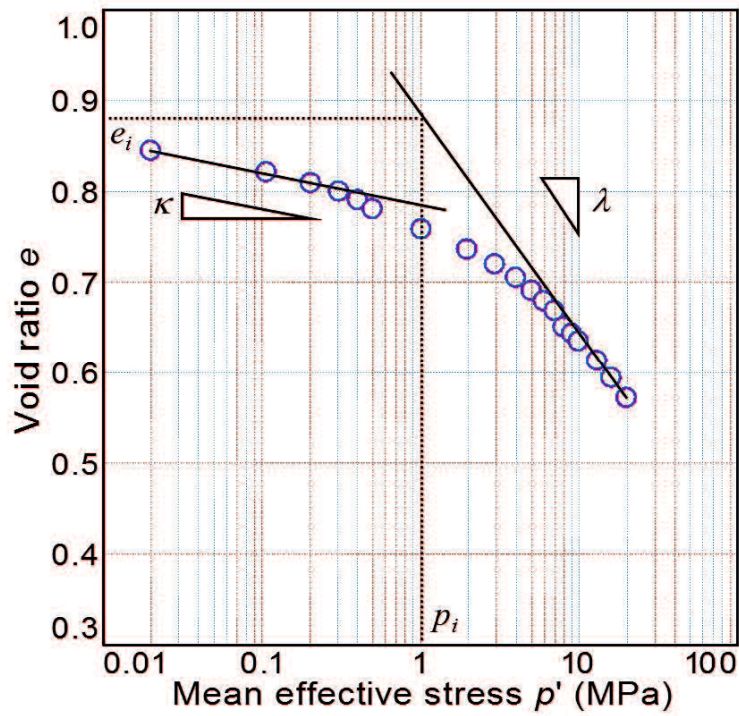


図 4-3 試料  $T_b$ ,  $n=45\%$ における等方圧縮曲線とパラメータ  $\lambda$ ,  $\kappa$ ,  $e_i$ ,  $p_i$ の決定方法

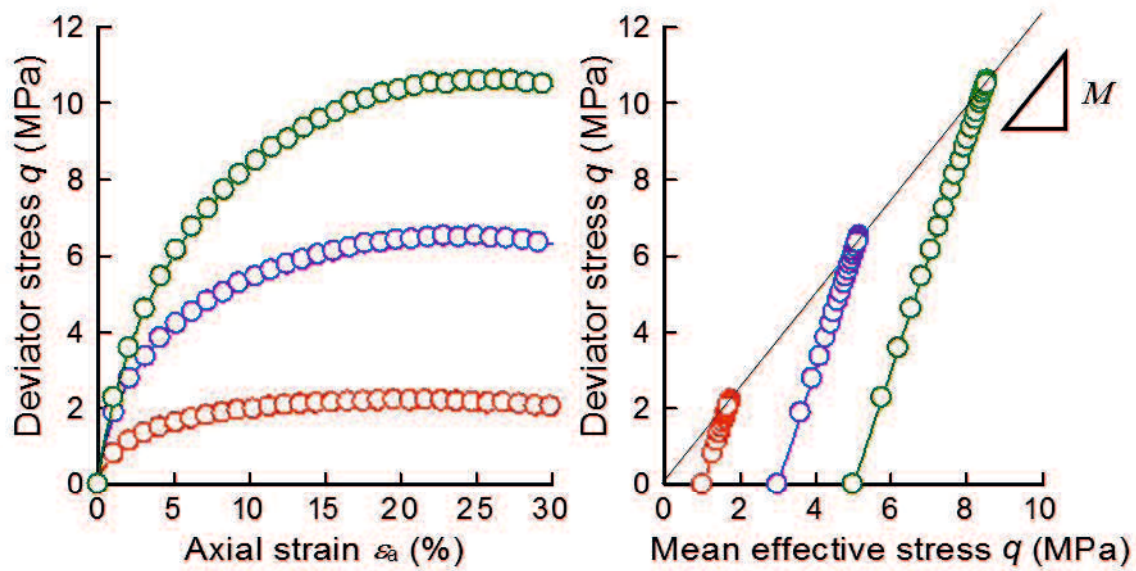


図 4-4 試料  $T_b$ における有効拘束圧  $\sigma'_p = 1, 3, 5$  MPaにおける応力ひずみ関係および有効応力経路とパラメータ  $M$ の決定方法

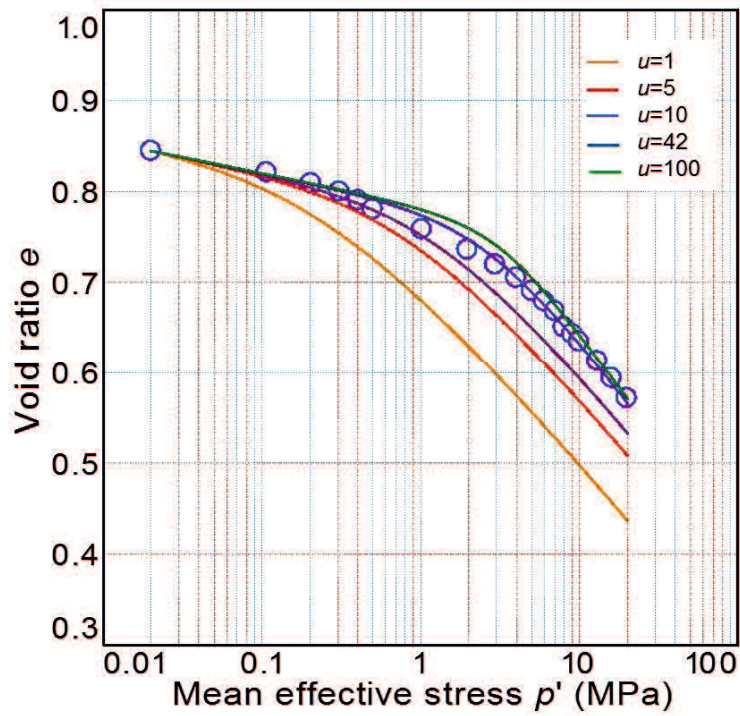


図 4-5 試料 T<sub>b</sub>, n=45%における等方圧縮曲線とパラメータ  $u$  の決定方法

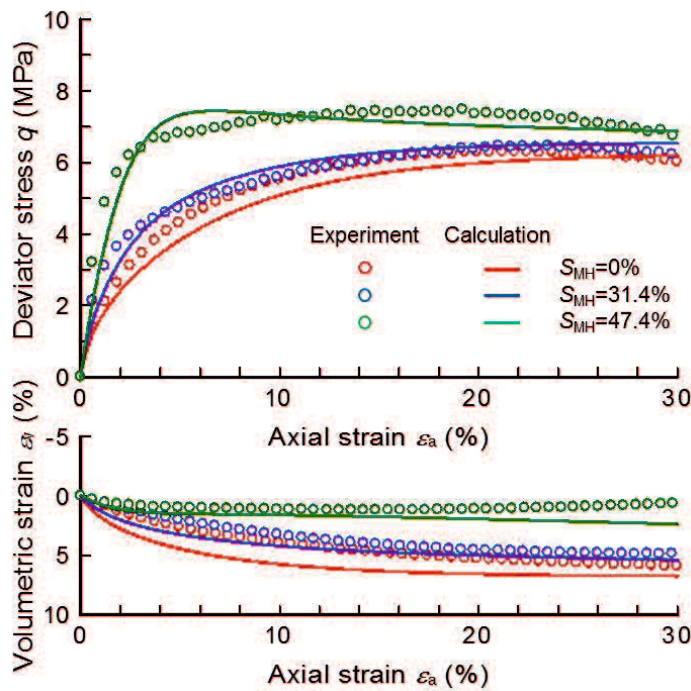


表 4-2 フィッティングにより得られたパラメータ

| パラメータ     | ホスト砂 | MH含有砂  |       |
|-----------|------|--------|-------|
| $\lambda$ |      | 0.103  |       |
| $\kappa$  |      | 0.015  |       |
| $e_i$     |      | 0.8805 |       |
| $M$       |      | 1.23   |       |
| $u$       |      | 42     |       |
| $S_{MH}$  | 0    | 0.314  | 0.474 |
| $\alpha$  | -    | 4      | 3     |
| $\beta$   | -    | 4      | 3     |
| $\chi$    | -    | 1      | 1     |
| $\zeta$   | -    | 1.2    | 1.5   |

図 4-6 試料 T<sub>b</sub>, n=45%における応力ひずみ関係および実験結果と計算結果の比較



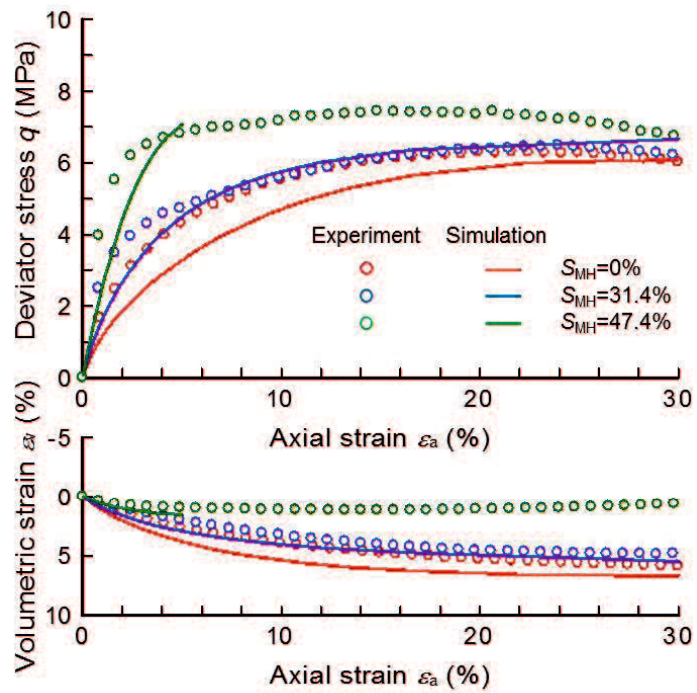


図 4-7 有限要素法解析による圧縮試験シミュレーション結果

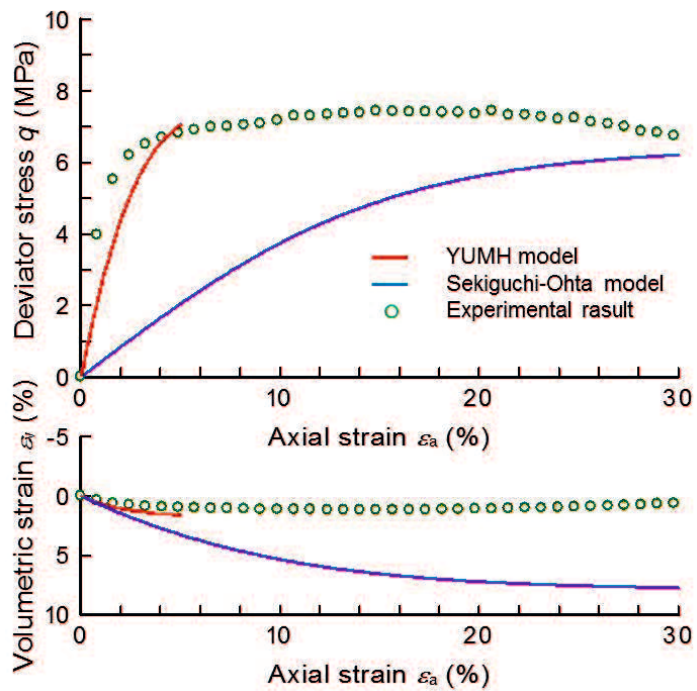


図 4-8 山口大学モデルおよび関口太田モデルによる圧縮試験シミュレーション結果比較



## 4.5 分解実験シミュレーション

### 4.5.1 解析条件

前章で行った実験結果の Case2 を参考にして分解実験シミュレーションの解析条件を決定した。図 4-9 のように分解実験で使用した供試体サイズを中央で半分に分割し、幅 30mm、奥行き 80mm、高さ 160mm の長方形を模擬し、応力条件は三次元応力とした。メタンハイドレート分解時の変形挙動を把握する目的で、温度は全境界で 5 度に固定した。分解前の荷重載荷を模擬するために、変位制御で z 方向上端面を z 方向ひずみ 4%まで変位させた。次に、z 方向上端面から水圧を 10MPa から 3MPa まで減圧させ、減圧開始から 10 時間後に 3MPa から 10MPa まで水圧を増圧させた。

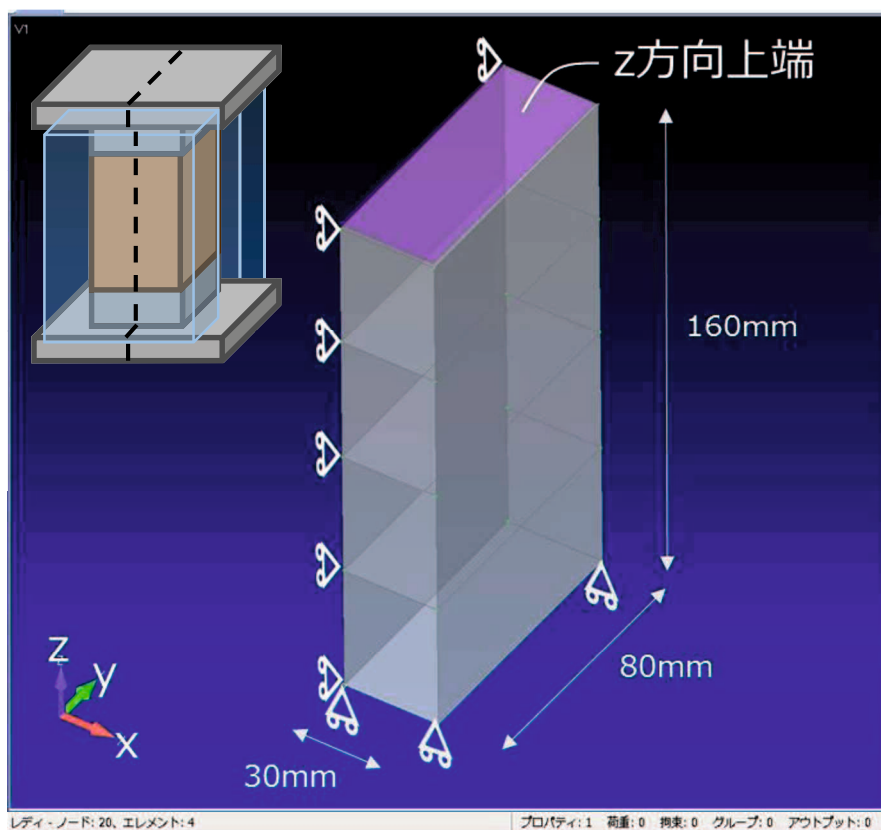


図 4-9 解析モデルの概要

## 4.5.2 解析結果

メタンハイドレートを含む砂のパラメータは、前節と同様の方法で、表 4-3 のように決定した。分解実験シミュレーションを行う前に、先に平面ひずみ条件における圧縮試験シミュレーションを行った。図 4-9 にメタンハイドレートを含む砂と砂のみの圧縮試験シミュレーションの結果と第二章で得られた試験結果を示す。図 4-9 より、強度の増加傾向は解析結果と試験結果では同程度であるが、局所化による強度低下はシミュレーションできていない。これらの結果を利用して、Case2 の分解実験シミュレーションを行う。図 4-10 は、Case2 の分解実験中の強度とひずみの変化を示している。模擬試料 Tc と同様に、メタンハイドレートの固結力の消失により、水圧回復の際に供試体の破壊が進行する結果となっている。図 4-11 に Cas2 のシミュレーション結果を示す。分解実験と同様に、軸ひずみ 4% 載荷を行い、水圧減少を行う。図 4-10 と図 4-11 を比較すると、強度低下に対する軸ひずみの進行は異なるが、減圧による最終的な軸ひずみ量は同程度であることがわかる。また、塑性変形とメタンハイドレートによる分解をわけて把握するために、減圧を行っただけでメタンハイドレートの分解を行わない場合のシミュレーションを行った。その結果は、図 4-11 の青線で示しているが、メタンハイドレートを分解させた結果と比較すると軸ひずみの進行も少ないことがわかる。図 4-12 に、分解実験シミュレーションの  $e\text{-ln}p'$  関係を示す。図 4-12 より、減圧を行うことにより間隙比は減少し、弾塑性的に体積が圧縮されていることがわかる。また、メタンハイドレートを分解させた場合と分解させない場合とを比較すると、図 4-12 のように塑性変形とメタンハイドレートの分解による変形を分けて考えることができる。これらのシミュレーション結果より、減圧法を用いて生産を行った場合、メタンハイドレートの分解による変形よりも、有効応力の増加による塑性変形が大きいことが明らかとなった。

表 4-3 解析に使用したパラメーター一覧

| 記号        | $S_{MH}=0\%$ | $S_{MH}=49.9\%$ |
|-----------|--------------|-----------------|
| $\lambda$ |              | 0.096           |
| $\kappa$  |              | 0.0048          |
| $p_i$     |              | 1               |
| $e_i$     |              | 0.8484          |
| $u$       |              | 58              |
| $M$       |              | 1.21            |
| $a$       | -            | 1               |
| $\beta$   | -            | 5               |
| $\chi$    | -            | 5               |
| $\zeta$   | -            | 1               |

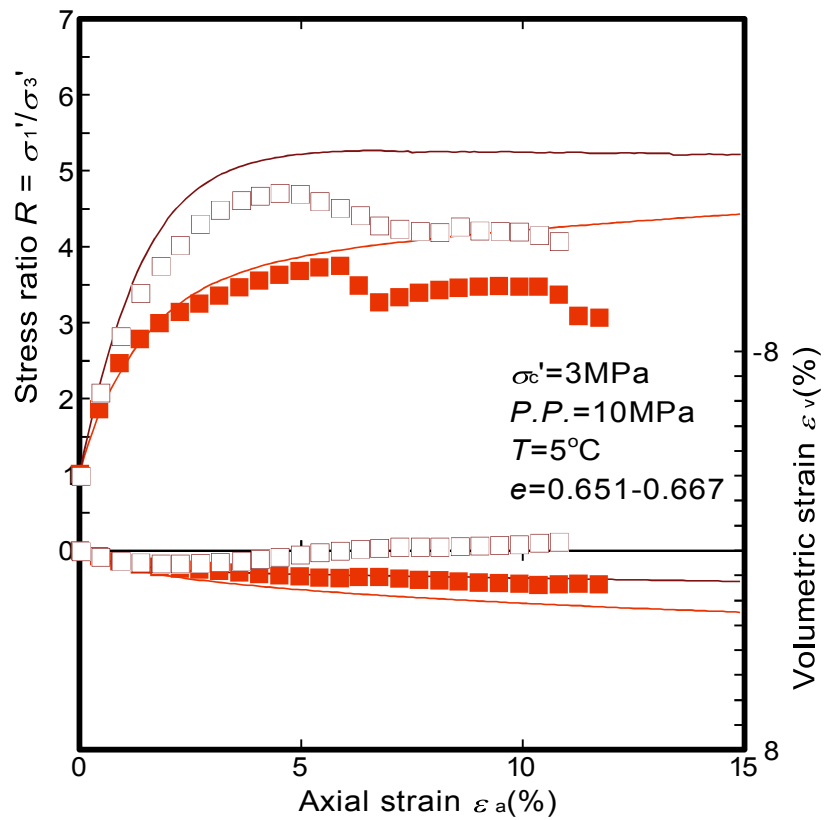


図 4-9 解析モデルの概要

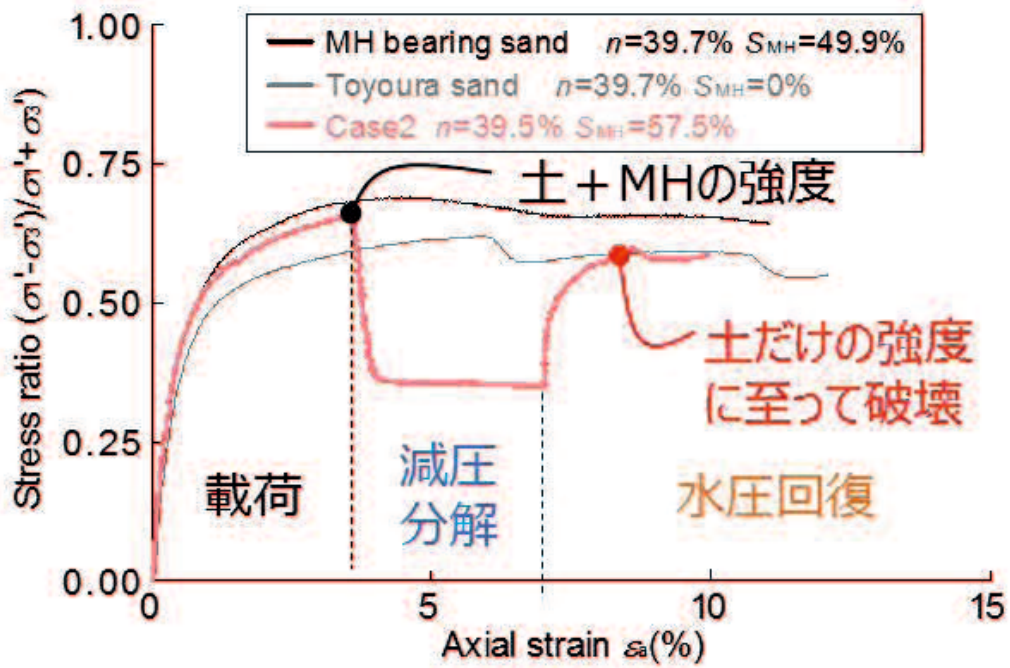


図 4-10 分解実験 Case2 の応力比とひずみの関係

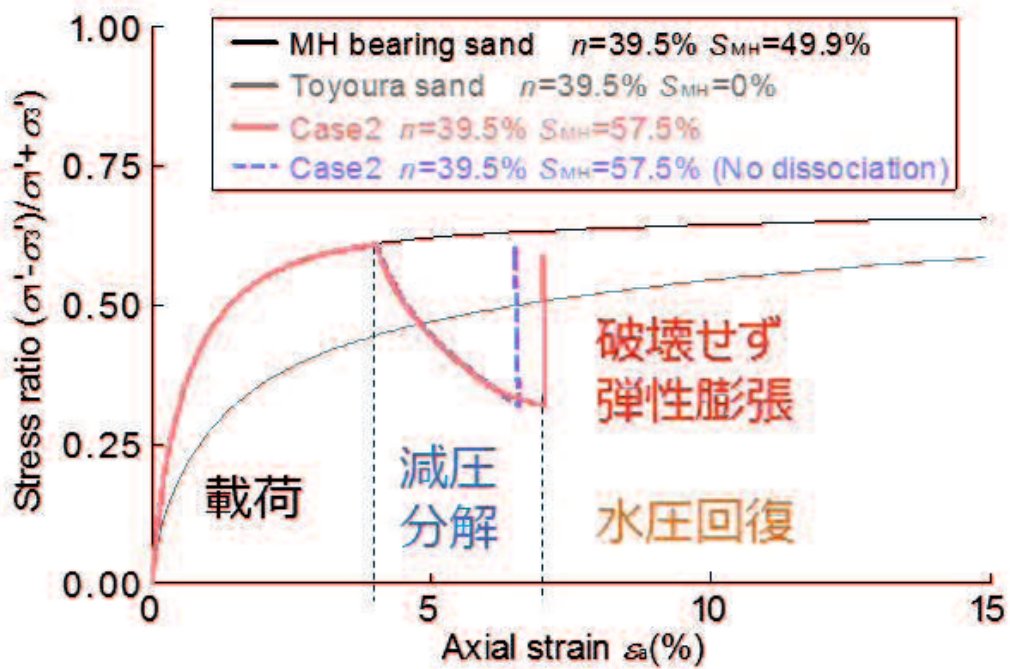


図 4-11 分解実験シミュレーションの応力比とひずみの関係

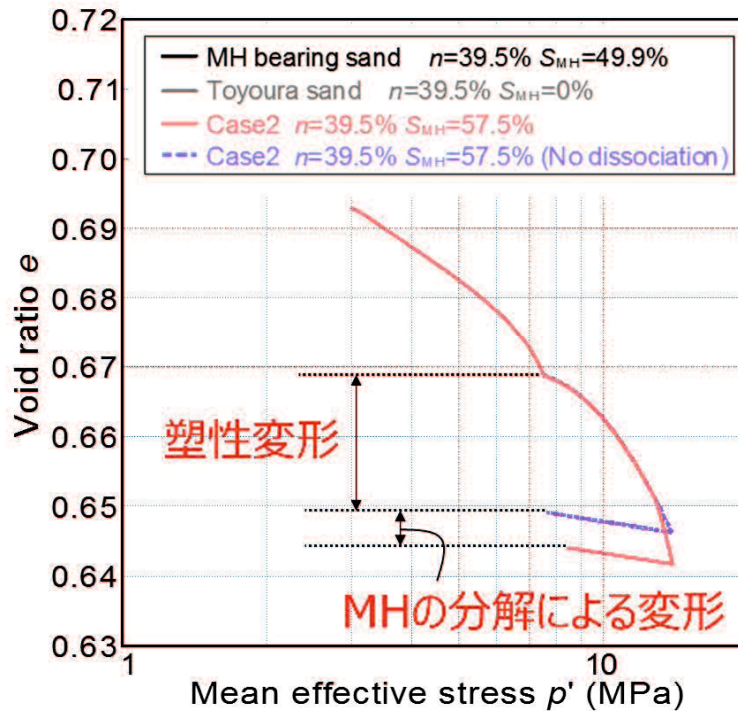


図 4-12 分解実験シミュレーションの  $e$ - $\ln p'$  関係

#### 4.6 本章の要約

- ❖ 地層変形シミュレータ COHMA に、既往の研究により提案されている弾塑性構成式を導入し、解析を行えるように環境を整えた。
- ❖ 提案している弾塑性構成モデルにより、減圧・MH 分解中の変形の進行を再現できることを確認した。

#### 参考文献

- 68) Konno, Y., Masuda, Y. and Takenaka, T., 2008, Numerical study on permeability hysteresis during hydrate dissociation in hot water injection. *Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008)*, Vancouver, British, Columbia, CANADA, July 6-10, 2008.
- 69) Kurihara, M., 2011, Prediction of performances of methane hydrate production tests in the eastern Nankai trough, *Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011)*, Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 17-21, 2011.
- 70) 天満則夫, 覺本真代, 宮崎晋行, 青木一男, 森二郎: メタンハイドレート開発にかかわる地層特性評価技術について, 第 2 回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集 237-238 頁, 2010.

## 第五章 結論

---

本論文では、メタンハイドレートを含む砂の力学特性および変形挙動、砂中のメタンハイドレートの分解特性を把握するために、恒温高圧平面ひずみ試験装置を用いて、圧密排水平面ひずみ圧縮試験および減圧法による分解実験を行った。圧縮試験では、試験中に取得した画像から画像解析を行い、局所変形の評価を行った。また、それらの挙動を表現する応力ひずみモデルの開発およびそれを組み込んだシミュレータを用いて分解実験のシミュレーションを行った。さらに、以下に各章で得られた知見をまとめる。

### 第一章「序論」

本章では、世界のエネルギー動向について概観し、国産エネルギーの必要性を述べた。また、メタンハイドレートの性質や賦存状況、資源としてどのように活用されるかについて言及し、メタンハイドレートが国産エネルギーになり得る可能性について述べた。さらに、メタンハイドレートを資源化する際に、工学的課題は何か、それら課題に対して過去にどのような研究が行われてきたかを述べた。最後に本論分の目的と構成を示した。

### 第二章「海底地盤環境下におけるメタンハイドレートを含む砂の力学特性」

本章では、メタンハイドレート含有砂の力学特性および変形挙動を調べるために、平面ひずみ応力条件下における圧密排水圧縮試験を行った。以下に得られた知見を要約する。

1) 平面ひずみ試験より得られた応力比ひずみ関係は、三軸試験より得られた結果よりも明確なピーク強度を示した。メタンハイドレートを含むことによって、強度は増加し、体積は膨張傾向を示す。しかし、有効拘束圧が増加すると、明確なピークはみられなくなり、体積は圧縮傾向を示すようになる。

2) 有効拘束圧に関わらず、メタンハイドレート含有砂の破壊強度は **SMP** 基準によって予測することができることを明らかにした。しかし、ホスト砂の場合は拘束圧の増加に伴い、**SMP** 基準からモール・クーロン基準へ移行する傾向がみられた。

4) 有効拘束圧の増加に伴い、せん断による粒子破砕量が増加することを確認した。さらに、粒子破砕はせん断帯内で顕著に起こることが明らかとなった。

### 第三章「メタンハイドレートを含む砂の分解時変形挙動」

本章では、細粒分含有率の異なるメタンハイドレート含有砂に対して、減圧法による分解実験を行い、メタンハイドレート分解時のメタンハイドレート含有砂の変形挙動および砂中のメタンハイドレートの分解特性に与える細粒分含有率の影響を調べた。また、初期せん断を与えて分解実験を行うことで、分解前の応力状態が水圧回復時にどのような影響を与えるかを調べた。以下に得られた知見を要約する。

1) 減圧過程において、圧力の減少とともに吸熱反応による温度減少、メタンガスの発生が観測された。また、減圧による有効応力の増加およびメタンハイドレート分解による軸ひずみの進行が確認された。このとき、初期にせん断応力を受けている状態では、メタンハイドレート分解による固結力の減少によりメタンハイドレート分解中も軸ひずみが進行することが明らかとなった。

2) 細粒分を多く含む砂はその透水性の低さから、減圧時に顕著に圧力差を生じることが明らかとなった。

3) 水圧過程において、等方応力条件の場合、弾性膨張を起こし定常状態に至る。このとき、メタンハイドレート分解と過圧密の影響により体積は減圧前の体積まで戻らない。初期にホスト砂よりも高いせん断応力を受けた場合、メタンハイドレートの固結力を失い、水圧回復による有効応力の減少により破壊に至ることが明らかとなった。

#### 第四章「有限要素法解析手法によるメタンハイドレートを含む砂の分解時変形シミュレーション」

本章では、地層変形シミュレータ COTHMA にメタンハイドレート含有砂の力学特性および変形挙動を表現できる弾塑性構成式を導入し、前章の分解実験の参考にした分解実験シミュレーションを行った。以下に得られた知見を要約する。

1) 地層変形シミュレータ COTHMA に、既往の研究により提案されている弾塑性構成式を導入し、解析を行えるように環境を整えた。

2) 提案している弾塑性構成モデルにより、減圧・MH 分解中の変形の進行を再現できることを確認した。