

平成22年 5月 24日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760313
 研究課題名（和文）ガスハイドレート分解および生成に伴う地盤の環境変動予測手法の開発
 研究課題名（英文）Development of a simulation method for the ground deformation during the dissociation and formation of gas hydrate
 研究代表者
 木元 小百合（KIMOTO SAYURI）
 京都大学・工学研究科・准教授
 研究者番号：70362457

研究成果の概要：南海トラフ海底におけるハイドレート含有地盤を模擬するため、CO₂ハイドレートを含有する模擬試料を作製し、減圧法による分解実験を実施し、地盤変形挙動および温度変化を計測した。また分解-変形連成解析手法を開発し、これにより分解実験のシミュレーションを行い解析手法について検証した。その結果、提案した解析手法により分解時の温度変化、沈下挙動等についてよく再現できることを確認した。

研究成果の概要（英文）： We have conducted dissociation tests by depressurizing method for sand containing CO₂ hydrates, in order to investigate the dissociation behavior of sediments in deep sea bottom at Nankai Trough. Also, we have developed a numerical method of chemo-thermo-mechanically coupled analysis, and simulated the dissociation tests. From the present study, we have confirmed that the proposed numerical method well reproduce the change in temperature, and settlement during the dissociation tests.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：ハイドレート，地盤環境，地盤数値解析

1. 研究開始当初の背景

国内外でメタンハイドレートの資源開発が進められている。従来の石油，石炭など資源開発では地下数千メートルの岩盤を対象

としており，地盤の変形は考慮する必要がなかったが，メタンハイドレート資源開発は海底面下せいぜい500メートルの未固結地盤を対象としており未知の領域である。

そのため開発時の地盤変形に伴う地盤環境変動の予測手法の開発が急務である。また、学術的には、放射性廃棄物の地層処分、地下水・土壌汚染、固化等による地盤改良、塩分溶脱に伴う地盤沈下など、物質移動や化学反応に伴う地盤環境変動の予測に対する社会的ニーズが高まりにより、地盤内の化学—熱—力学連成挙動を予測するための数値解析手法の開発がさかんである。

2. 研究の目的

まず、簡単な1次元セルを用いてガスハイドレート模擬含有試料の分解実験を行い、分解時の地盤変形などの挙動を把握する。ガスハイドレートの分解変形実験を実施した。なお、本研究ではメタンと比較して、不可燃性であり取り扱いが容易なCO₂を用い、減圧法による分解時の温度変化や地盤沈下などの変化を計測する。さらに、多相連成解析法を開発し、CO₂ハイドレート分解実験を再現することにより、開発した解析手法の検証を行う。

3. 研究の方法

(1) ハイドレート含有地盤試料の作成

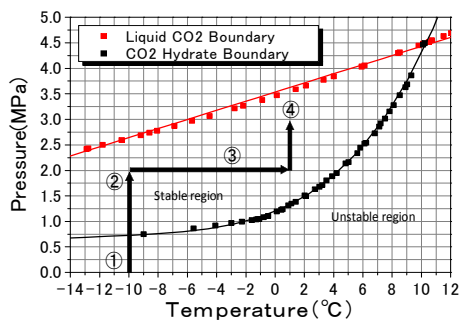


図-1 CO₂ハイドレート相平衡曲線

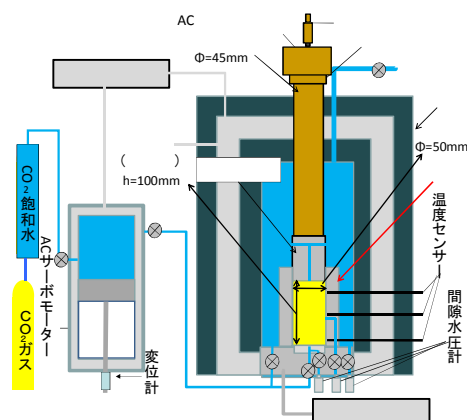


図-2 分解装置概略図

CO₂ハイドレートの生成過程の温度と圧力

の変化とCO₂ハイドレートの相平衡曲線を図-1に示す。試料は南海トラフ海底地盤を想定して、間隙比0.76、ハイドレート飽和率0.5を目標として作製した。まず、含水比13%となるように蒸留水と豊浦砂を混合する。混合した試料を金属円筒に入れ、側方から木槌で打撃を与えることにより試料全体をならし、直径50mm、高さ100mmの供試体を作成する。これを凍結させ、-10°Cに設定したハイドレート製造装置にセットする(図-1①)。次に2MPaの高压でCO₂を圧入し(図-1②)ハイドレート安定領域に移行させる。圧力が2MPaに達したところで温度を徐々に1°Cまで上昇させ(図-1③)、1°Cに達したところで圧力を3MPaまで上げ14~15時間放置すると、供試体中の氷は融解するとともにCO₂ガスを取り込んでハイドレートへと相変化する(図-1④)。このような生成法は氷置換法と呼ばれる。供試体を取り出す際には分解曲線を急激に下回らないように段階的に圧力を下げる。これはハイドレートを分解実験装置に移動させる際に一度常圧下にさらすことになるので大気圧下でも安定境界にできるだけ近づけハイドレートの分解を防ぐためである。取り出したらすぐに液体窒素で冷却保存する。また、今回の実験では間隙比の違いによる挙動を観察するために間隙比0.76の供試体に加え間隙比0.90の供試体も作製した。

(2) ハイドレート分解実験

ハイドレート分解実験を行う試験装置の概略図を図-2に示す。軸荷重制御と外部に付属している圧力発生装置により間隙圧制御が可能である。圧密リングはステンレス製の容器で内径50mmのものを用いる。ACサーボモーターにより、最大軸荷重は100kN、最大間隙圧は20MPaまで負荷することができる。また、軸変位、圧力発生装置変位を測定することができる。温度は供試体をセットする圧密リング内の上部、中部、下部の3点で測定する。圧力はセル内下部、圧密リング内中部、下部、圧力発生装置内の4点で測定する。実験手順を以下に示す。

・供試体のセット

分解実験装置は側面に断熱材のウレタンを巻き-10°Cに冷却しておく。液体窒素から出した供試体を予め透水性のポーラスメタルの入った分解装置圧密リング内にセットする。

・軸圧載荷とガスの圧入

有効軸圧1MPa分を載荷し、さらにハイドレートの液化ラインを超えないようにCO₂ガスを2MPaで圧入する。温度が1°C付近になったところで3MPaに圧力を上げ、さらに有効軸圧3MPa分を載荷する。

・CO₂飽和水の注水

次にCO₂ガスをCO₂飽和水に置換する。蒸

留水ではなく CO₂ 飽和水を用いるのは、ハイドレートの溶解を防ぐためである。3MPa の圧力で CO₂ 飽和水を分解装置内に入れ、またフレーム上方バルブからガスを逃がすことで容器内を 3MPa に保ちながらガスと CO₂ 飽和水を置換する。フレーム上部からガスではなく水が出れば置換し終えたことになる。

・分解開始

間隙圧を 3MPa に固定し、圧密リング内の上部、中部、下部の温度が 5°C になるように設定し、温度が安定したところで減圧を開始する。圧力は 3MPa から 1.5MPa まで供試体下部より減圧する。実験は軸方向のみの载荷による 1 次元側方拘束分解実験である。間隙比が 0.76 と 0.90 の 2 種類の供試体に対して、減圧時間をそれぞれ 1.5 時間、3.0 時間、0.5 時間と変化させて実験を行った。実験は以下の 7 ケースで実施した。Case 0 はハイドレートを含有しない試料である。Case 0~Case 3 では間隙比 0.76 (中密) を目標に、Case 4~Case 6 では間隙比 0.90 (緩詰め) を目標として作製したが、実際には目標値より小さい値となった。またハイドレート飽和率とは間隙体積に占めるハイドレートの体積比のことである。

(3) 支配方程式の定式化

多孔質媒体理論に基づき、多相混合体として支配方程式を定式化する。土骨格の構成式として、サクシオンおよびハイドレートによる強度増加を考慮した弾粘塑性構成式を用い、サクシオンと飽和度関係式として van Genuchten 式を用いた。updated Lagrangian 法により有限要素離散化を行う。未知数は、土骨格の変位、水圧、ガス圧、温度である。

図-3 に示す解析モデルを用いて減圧法による 1 次元分解実験のシミュレーションを行った。分解実験²⁾は豊浦砂の間隙中に CO₂ ハイドレートを生成させて作製した試料を用い、圧力セルの温度を 5°C に保ったまま 1 次元圧密容器内で間隙圧を減少させることにより、分解を進行させた。解析は 2 次元平面ひずみ条件で行った。実験条件を模擬して側面は非排気-非排水境界とし、上下面の間隙圧を初期状態 (3MPa) から設定圧力 (1.5MPa) まで 1.5 時間かけて減少させた。温度境界については、周面を等温境界 (5°C) とした。なお 5°C における平衡圧力が約 2.2MPa であることから、約 0.8 時間後に分解が開始する。解析ケースは Case 0 (中密・ハイドレートなし)、Case 1 (中密供試体)、Case 4 (緩詰め供試体) の結果について示す。地盤の材料パラメータは実験に用いた豊浦砂の中密、緩詰め供試体の非排水三軸試験のシミュレーションにより決定した。

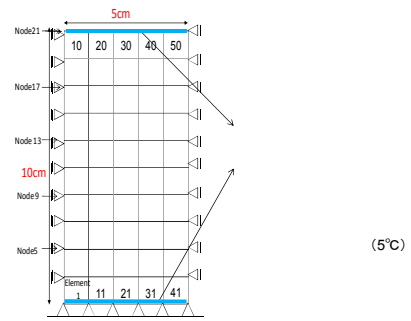


図-3 解析モデル (2次元平面ひずみ)

4. 研究成果

(1) 実験結果

図-4及び図-5にCase1及びCase 4の供試体上部、中部、下部の温度変化と、セル内中部の圧力変化を示す。図-4及び図-5より、間隙圧が5°Cにおけるハイドレート平衡圧力である2.2MPaを下回る約0.8時間あたりから温度が急激に低下している。これはハイドレートの分解が吸熱反応であることによる温度低下であると考えられる。どちらのケースにおいても減圧開始より1.5時間後に最低温度に達しており、供試体上部、中部、下部の順に約0.9°C、1.0°C、1.0°Cの温度低下が見られる。その後約3.0時間後に初期設定温度である5.0°Cまで温度が上昇している。

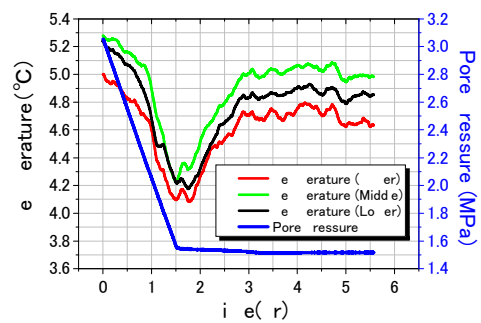


図-4 温度と間隙圧変化(Case 1)

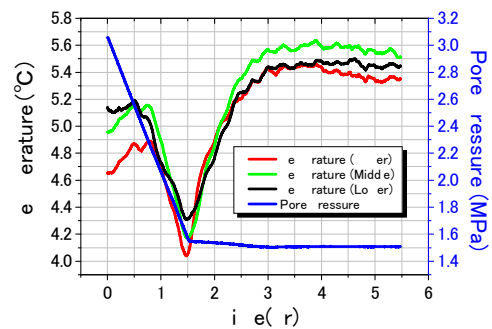


図-5 温度と間隙圧変化(Case 4)

図-6 に間隙比が中密のケースにおける垂直変位を、図-7 に緩詰めケースにおける垂直変位の結果を示す。図-6 よりハイドレートを含む Case 0 では最終的な沈下量は約 0.22mm であり、ハイドレートを含む Case 1~Case 3 と比較すると約 0.1mm 小さい。Case 1~Case 3 を比較すると Case 1, Case 2, Case 3 の順に沈下量は約 0.32mm, 0.32mm, 0.35mm といずれの場合においてもほぼ同様の値に収束しており、減圧時間の変化が最終的な沈下量に及ぼす影響は小さいと考えられる。図-7 より Case 4, Case 5, Case 6 における沈下量はそれぞれ約 0.6mm, 0.59mm, 0.6mm 中密の供試体を用いた場合と比べておよそ 2 倍の沈下量が生じているが、同様に減圧時間の違いによる大きな差は見られなかった。減圧過程において沈下量の発生勾配の変化が見られるが、これはハイドレートの分解が開始したことにより孔隙が増加し、急激に沈下が進行したためであると考えられる。また、減圧終了後も緩やかに沈下が発生しており、減圧時間が短い程、減圧終了後の沈下量は大きい。

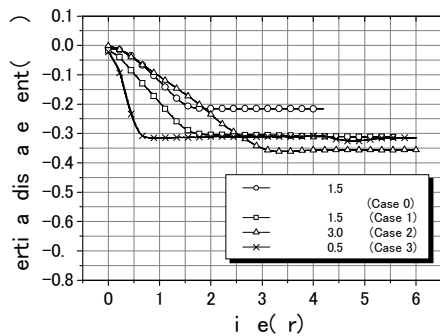


図-6 垂直変位 (中密供試体)

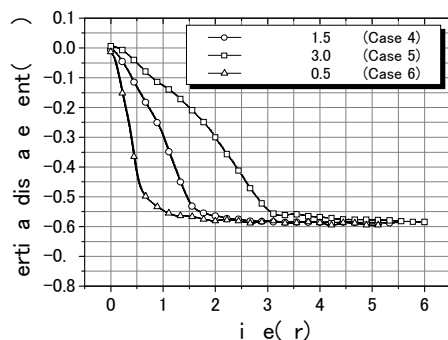


図-7 垂直変位 (緩詰め供試体)

(2) 解析結果

図-8 に上面の沈下量の時刻歴を示す。中密供試体のケース (図-8 (a), (b)) では解析

による沈下量のほうが実験値よりもやや小さいが、緩詰め供試体では実験結果をよく再現できている (図-8 (c))。分解が開始したと考えられる約 0.8 間後から急激に沈下が進行しており、解析ではその傾向が顕著である (図-8 (b), (c))。

図-9 から図-12 は Case 1 の解析時の供試体内部のハイドレート残存度、温度、平均骨格応力、体積ひずみの分布図を示す。図-9 より、供試体周囲の要素より分解が進行しており、4 時間後にはすべての要素で分解が終了していることが分かる。図-10 より、分解による吸熱により供試体内部の温度が約 3.5 度低下している。図-11, 図-12 より減圧に伴い平均骨格応力は全体的に増加し、体積圧縮ひずみが生じている。

(3) まとめ

CO₂ ハイドレート含有模擬試料を作成して減圧法による分解実験を行い、分解中の温度変化や沈下挙動について考察した。その結果、最終沈下量は主に間隙比に依存し、減圧時間の変化による影響は小さいことが分かった。しかし、減圧が終了した後の沈下の進行については、減圧時間の変化による影響が見られた。また、分解-変形連成解析法を用いて、CO₂ ハイドレート分解実験の再現を行った結果、分解時の挙動をほぼ再現できた。今後さらにモデルやパラメータの設定について検討等を進める必要がある。

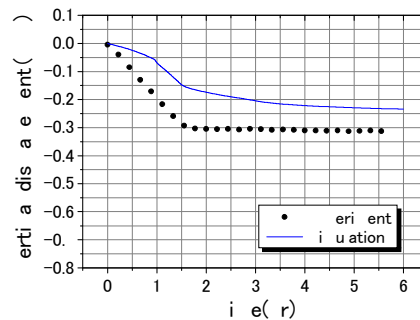


図-8 (a) 沈下量の比較 (Case 0)

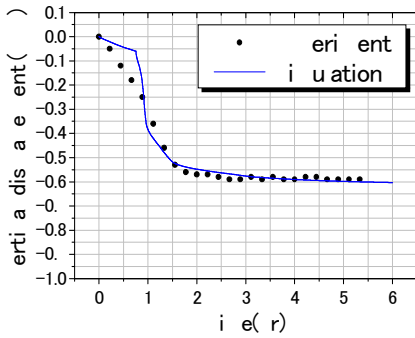


図-8 (b) 沈下量の比較 (Case 1)

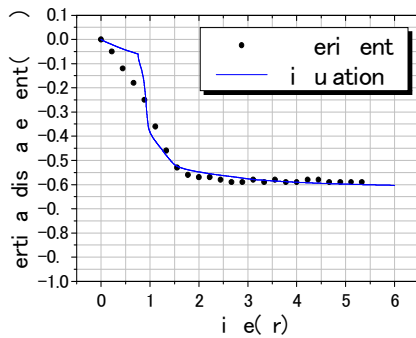


図-8 (c) 沈下量の比較 (Case 4)

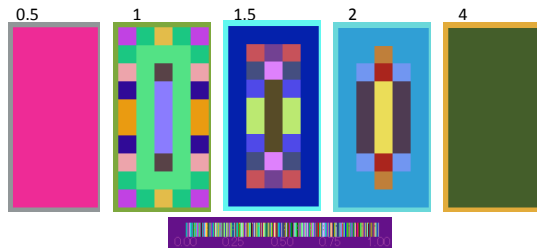


図-9 ハイドレート残存度分布図 (Case 1)

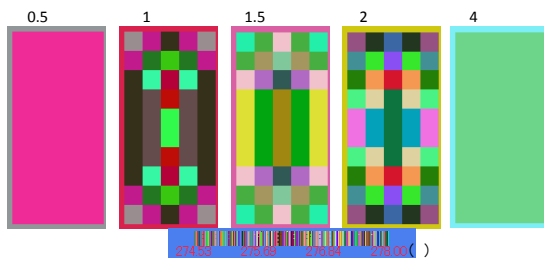


図-10 温度分布図 (K) (Case 1)

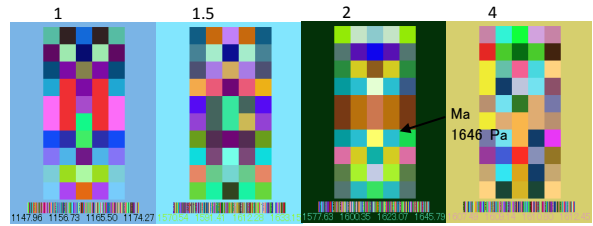


図-11 平均骨格応力分布図 (kPa) (Case 1)

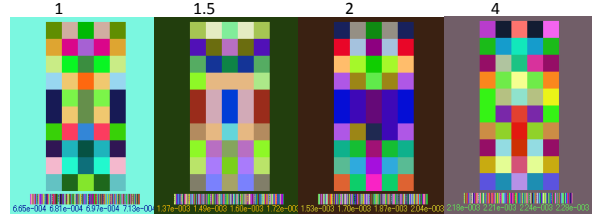


図-12 体積ひずみ分布図 (Case 1)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① Kimoto, S., Oka, F., Fushita, T., A chemo-thermo-mechanically coupled analysis of ground deformation induced by gas hydrate dissociation, International Journal of Mechanical Sciences, 52, 365-376, 2010, 査読有.

② Kimoto, S., Miki, Y. and Oka, Numerical modeling of gas hydrate formation in the ground, Proc. the 1st Int. Symp. on Computational Geomechanics, 1, 513-522, 2009, 査読有.

[学会発表] (計 5 件)

① 木元小百合, 多相連成解析法による CO₂ ハイドレート分解実験のシミュレーション, 平成 21 年土木学会第 64 回年次学術講演会, 2009 年 9 月 2 日, 福岡.

② 福田知晃, CO₂ ハイドレート含有砂を用いた分解実験, 平成 21 年土木学会第 64 回年次学術講演会, 2009 年 9 月 2 日, 福岡.

③ 三木祥弘, 透水・透気係数のメタンハイドレート飽和率依存性を考慮した分解-変形シミュレーション, 平成 20 年土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008 年 9 月 10 日, 仙台.

④ 木元小百合, メタンハイドレートを含む海底多相地盤の分解-変形シミュレーション, 平成 20 年 第 43 回地盤工学研究発

表会, 2008年7月9日, 広島.

⑤ S. Kimoto, T. Fushita, F. Oka , A
Chemo-Thermo-Mechanically Coupled
Analysis of Ground Deformation Induced by
Methane Hydrate Dissociation , 8th
International Workshop on Bifurcations
and Degradations in Geomaterials, lake
Louise, Alberta, Canada, 2008年5月28-31
日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木元 小百合 (KIMOTO SAYURI)
京都大学・工学研究科・准教授
研究者番号 : 70362457