

第 部門 CO<sub>2</sub>ハイドレート含有地盤材料の分解実験とその解析

京都大学大学院 学生員 福田 知晃  
 京都大学大学院 正会員 木元 小百合  
 京都大学大学院 フェロー会員 岡 二三生  
 京都大学大学院 学生員 佐藤 朋弥

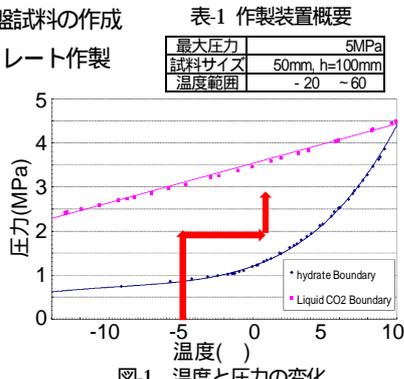
1. はじめに

新たなエネルギー資源として期待されるメタンハイドレートは永久凍土層や海洋堆積層に存在し、ここからメタンガスを安全かつ効率的に生産するためにメタンハイドレート分解時の地盤環境変化を把握する必要がある。本研究では、メタンハイドレートに比べ非可燃性でコストが安いCO<sub>2</sub>ハイドレートを用い、減圧法による分解実験を行った。さらに地盤材料の変形強度及び透水-透気係数にハイドレート飽和率依存性を考慮した、化学-熱-力学連成解析法<sup>(1),(2)</sup>を用いて分解実験のシミュレーションを行い、実験結果と比較した。

2. 実験装置及び実験方法

(1) ハイドレート含有地盤試料の作成

本研究で使用したハイドレート作製装置((株)丸東製作所製)の性能を表-1に示す。CO<sub>2</sub>ハイドレートの生成過程の温度と圧力の変化とCO<sub>2</sub>ハイドレートの平衡曲線を図-1に示す。今回は南海トラフを想定して、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%となるように調整した蒸留水と豊浦砂を混合する。直径50mm, 高さ100mmの混合した試料を金属円筒に入れ、側方から木槌で打撃を加えることにより試料全体をならす。これを水分が蒸発しないようにビニール袋に入れ冷凍庫に入れて凍結させる。循環式低温恒温水槽により-5℃に設定して容器内を冷やしたハイドレート製造装置にメッシュで巻いて凍結させた供試体をセットする(図-1)。そして容器内の空気を抜き真空にする。次に2MPaの高圧でCO<sub>2</sub>を圧入し(図-1)ハイドレート安定領域に移行させる。次に温度を徐々に1℃まで上昇させ(図-1), 1℃に達したところで3MPaでCO<sub>2</sub>を圧入し14~15時間待ち(図-1), ハイドレートの生成を収束させる。取り出す際には-7℃にして、分解曲線を急激に下回らないようにするため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ことで一度常圧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分解の進行を防ぐためである。取り出したらすぐに金属円筒に入れて液体窒素で冷却保存する。

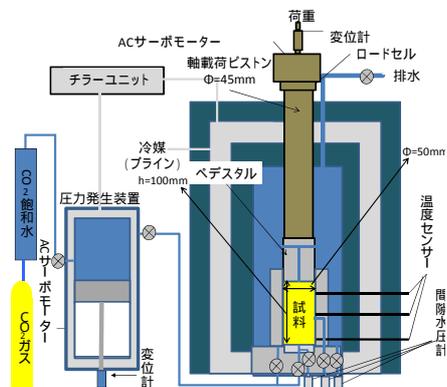
(2) ハイドレート分解実験

ハイドレート分解試験を行う低温高圧圧密機((株)丸東製作所製)の性能について表-2に、概略図を図-2に示す。

表-2 低温高圧圧密機概要

最大軸荷重	100kN
最大間隙圧	20MPa
試料サイズ	50mm, h=100mm
温度範囲	-20 ~ 30

軸荷重制御と外部に付属している圧発生装置により間隙圧制御が可能である。圧密容器はステンレス製の容器で内径50mmのものを用いる。ACサーボシリンダーにより、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、各ACサーボシリンダーとともに変位計がついており、軸変位、圧発生装置変位を測定することができる。温度範囲は-20~30℃の範囲で調節可能な分解圧密装置のフレームの内側を同じく側液(ナイブライン Z1)で満たすことで調節することが可能となっている。温度はセル内側の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、圧発生装置内の4点で測定する。

(ア) 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℃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。

(イ) 軸圧荷重とガスの圧入

まず、有効軸圧1MPa分を軸荷し、さらにハイドレートの液化ラインを超えないようにCO<sub>2</sub>ガスを2MPaで圧入する。温度が0℃付近になったところで3MPaに圧を上げる。このとき有効軸圧を一定に保つよう軸圧を調整する。

(ウ) CO<sub>2</sub>飽和水の注水

次にCO<sub>2</sub>ガスをCO<sub>2</sub>飽和水に置換する。蒸留水ではなくCO<sub>2</sub>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。CO<sub>2</sub>ガスと飽和水と分解装置をホースとステンレス管でつなく。この時通水中に温度が上がってCO<sub>2</sub>が溶け出さないようにホースなどの配管類は事前に冷やしておいたものを使う。CO<sub>2</sub>ガス3MPaでCO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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て来れば置換し終えたことになる。

(エ) 分解開始

間隙圧3MPaに固定し、5℃になるように設定し、外気の影響もあるために温度上部、中部、下部が±0.2℃の幅で安定したところで減圧

を開始する。圧発生装置内と圧密容器内がつながっていることで減圧とともに圧密容器内の圧力も下がり、減圧速度は1MPa/hで3MPaから1.5MPaまで減圧する。

### 3. 実験結果

間隙比0.76のハイドレート含有試料を用いた結果を図-3、図-4に示す。図-3より間隙圧が5 でのハイドレート分解圧力である2.2MPaを下回る0.8時間後辺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による吸熱反応によると考えられる。実験開始から1.5時間後に供試体上部温度は最大で0.9 ，中部は1.0 ，下部は0.6 減少している。図-4に示す垂直変位の変化より、減圧に伴う骨格応力(飽和土の場合は有効応力)の増加による沈下が生じ、沈下量は最終的に0.26mmに達している。また、分解が開始したと考えられる約1時間後を境に勾配が急になっており、分解による影響であると考えられる。1.5時間後の時点で沈下量は0.21mmであることから、骨格応力の増大する減圧プロセスの初期段階で全体の80.8%程度の圧密が進行したことになる。

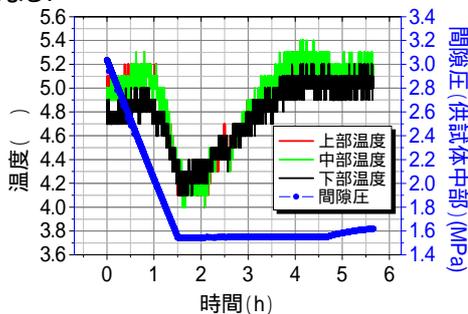


図-3 温度と間隙圧(実験)

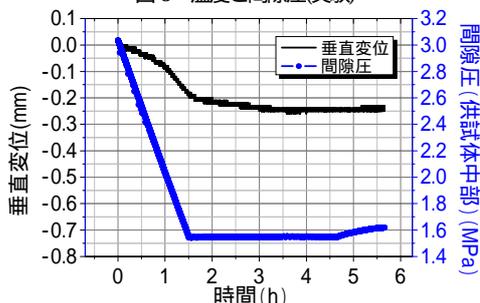


図-4 垂直変位と間隙圧(実験)

### 4. 解析モデルとパラメータ

伏田ら<sup>1)</sup>による有限要素解析法解析プログラムをCO<sub>2</sub>ハイドレートの物性、平衡曲線に変更したものをを用いて、図-5に示す二次元モデルでの分解実験のシミュレーションを行った。ただし解析は二次元平面ひずみ条件である。境界条件として変位境界は、上面、側面はx方向固定、下面はx, y方向固定とする。排気-排水境界は、上下面は排気-排水境界、側面は非排気-非排水境界とする。温度-熱流量境界は、上下面、側面の解析モデル周囲を等温境界とする。上下面の圧力を初期状態(3MPa)から設定圧力(1.5MPa)まで1.5時間かけて一定の割合で減圧させ、CO<sub>2</sub>ハイドレートを分解させる。地盤の材料パラメータは南海トラフにおける地盤材料を想定し決定した。初期状態では、土粒子骨格からなる間隙中に、CO<sub>2</sub>ハイドレートが飽和度0.5で存在しているとする。

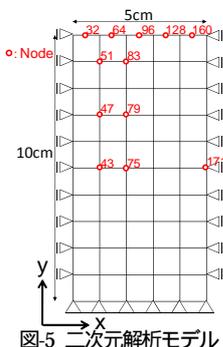


図-5 二次元解析モデル

### 5. 解析結果

図-6より温度は1.5時間後に最大で約3.6K低下した。図-7より全ての節点において、減圧終了時刻である1.5時間後までに急激な変形が生じているが、これは減圧に伴う変形であると考えられる。特に分解が開始したと考えられる約0.7時間後から1.5時間後までに急激に沈下しているのは、ハイドレート飽和率が低下したことによる地盤の軟化が起きているためと考えられる。1.5時間後以降は全ての節点において、緩やかな変形が続く。解析終了時刻では、モデル最上面の両端の要素の節点Node32とNode160で最終沈下量となる約5.8mmの沈下が生じた。CO<sub>2</sub>ハイドレート含有試料を用いて分解実験を行い、実験結果と解析結果を比較すると、実験と解析いずれも減圧終了となる約1.5時間後に温度が最大に低下し、分解が終了したと考えられる3~4時間後に初期温度に戻った。沈下は、実験と解析ともに開始から減圧終了時刻にかけて、特に分解が始まった辺りから減圧終了時刻にかけて急激な沈下が生じ、その後緩やかに沈下している。

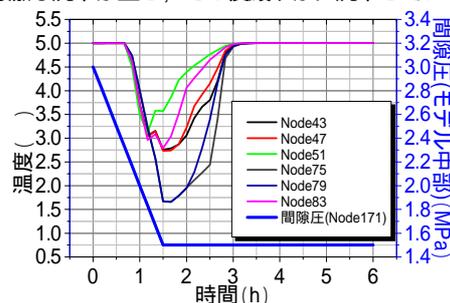


図-6 温度と間隙圧(解析)

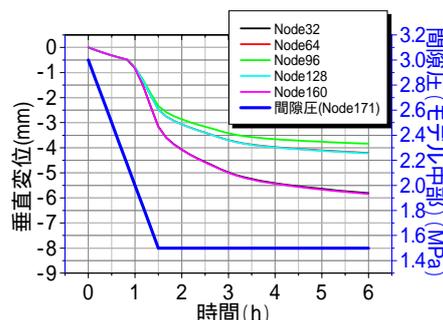


図-7 垂直変位と間隙圧(解析)

### 6. まとめ

以上より、実験と解析を比較すると定性的にはほぼ同様の挙動を示しており、分解時の挙動を解析によってよく再現できていると言える。しかし、実験と解析で温度境界条件が異なることや、実験では一次元変形であるのに対し、解析は平面ひずみ条件であることなど異なる条件も多い。また、実験しゅうは豊浦砂を用いたが、解析は南海トラフ採取試料を想定して地盤材料定数を決定しているため、沈下量などの定量的な比較はできないが、分解時の温度変化や沈下特性について、本解析手法である程度再現できたといえる。

### 7. 参考文献

- 1) 伏田智彦 木元小百合 岡二三生 三木祥弘: メタンハイドレートを含有する海底多相地盤の分解-変形シミュレーション, 第43回地盤工学研究発表会講演集, 広島, pp.783-784, 2008
- 2) S. Kimoto, F. Oka, T. Fushita and M. Fujiwaki : A Chemo-Thermo-Mechanically Coupled Numerical Simulation of the Ground Deformation due to Methane Hydrate Dissociation, Computers and Geotechnics, Vol.34, pp.216-228, 2007.