

京都大学工学部 学生員 ○赤木 俊文
 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 正会員 肥後 陽介
 京都大学大学院 学生会員 岩井 裕正

1. はじめに 近年新しいエネルギー資源として注目されているメタンハイドレート（以下 MH）であるが、生産時に海底地盤の変形が与える影響については不明な点が多い。北野 (2011)¹⁾は MH 分解時の相変化、熱の移動、土骨格変形を考慮した化学-熱-力学連成解析法によって減圧法による MH の産出時の地盤の変形挙動を調べている。その際、大きな減圧量を与えたケースにおいて地盤に大規模な破壊が生じる可能性があることが示されている。そこで本研究では化学-熱-力学連成解析法において材料パラメータが与える影響を検討した。

2. 地盤の支配方程式 MH 含有地盤の構成材料を土粒子 (S 相), MH(H 相), 水(W 相), メタンガス(G 相)とし、多孔質媒体理論に基づき、多相混合体として定式化する。支配方程式を有限要素法により空間離散化して解く。

2.1 速度型つり合い式 本研究では応力変数として次式で定義される骨格応力を用いている。

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij} \quad P^F = sP^W + (1-s)P^G \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = \sum_{\alpha} \sigma_{ij}^{\alpha} \quad (\alpha = S, W, G, H)$$

ここに σ_{ij}^{α} は各相の分応力, s は飽和度である。 P^F は平均間隙圧力である。なお P^W, P^G は正とする。S 相と H 相は一体となって運動するとし、速度型のつり合い式は以下で与えられる。

$$\dot{S}_{j,i}^t = 0 \quad \dot{S}_{ij}^t = \dot{\sigma}_{ij} + L_{pp} \sigma_{ij} - \sigma_{qj} L_{qi} \quad (2)$$

ここで L_{ij} は S(H)相の速度勾配テンソル, \dot{S}_{ij}^t は基準配置を現在配置に一致させた公称応力速度テンソルである。

2.2 連続式 W 相, G 相の連続式は次式で与えられる。

$$sD_{ii} + \dot{s}n^F - s \frac{\dot{m}^H}{\rho^H} + V_{i,i}^W - \frac{\dot{m}^W}{\rho^W} = 0 \quad (3)$$

$$(1-s)D_{ii} - \dot{s}n^F - (1-s) \frac{\dot{m}^H}{\rho^H} + V_{i,i}^G + n^F(1-s) \frac{\dot{\rho}^G}{\rho^G} - \frac{\dot{m}^G}{\rho^G} = 0 \quad (4)$$

ここで $V_{i,i}^W, V_{i,i}^G$ は水とガスの S (H)相に対する見かけの相対速度であり、ダルシー則により与えられる。 m^{α} は各相

の MH 分解による質量変化速度である。

2.3 エネルギー保存則 各層で温度は共通として系全体のエネルギー保存則は次式で与えられる。

$$(\rho c)^E \dot{\theta} = \sigma'_{ij} D_{ij}^{vp} + (\lambda^E \theta_{,i})_{,i} + \dot{Q} \quad (5)$$

$$(\rho c)^E = \sum_{\alpha} n^{\alpha} \rho^{\alpha} c^{\alpha} \quad \lambda^E = \sum_{\alpha} n^{\alpha} \lambda^{\alpha} \quad (\alpha = S, W, G, H)$$

$n^{\alpha}, \rho^{\alpha}, c^{\alpha}, \lambda^{\alpha}$ はそれぞれ各相の体積含有率, 密度, 比熱容量, 熱伝導率である。 \dot{Q} は単位時間あたりに発生する分解熱である。

2.4 MH 分解速度式 MH の平衡条件は温度と圧力に依存し、低温、高压条件下では MH として存在し、高温、低压条件下ではメタンと水に分解する。MH の平衡条件式として式(6)を用い、MH 分解速度式として Kim-Bishnoi²⁾の式を用いる。

$$\dot{N}_H = -D_H \exp(-9400/T)(P_c - P^F) N_{H0}^{\frac{1}{3}} N_H^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

$$P_c = 1.0 \times 10^{-6} \exp(49.3185 - 9459/T_c) \quad (7)$$

P_c, T_c は平衡圧力(MPa), 平衡温度(K)。 N_H, N_{H0} は領域内の MH 物質質量とその初期値である。 D_H は領域内の MH の表面積によって決まる定数である。領域の平均間隙圧が平衡圧力を下回ると MH が分解する。なお、MH の生成反応は考慮していない。

2.5 地盤の構成式 地盤の構成式には MH 及びサクシオンによる強度増加と変形挙動の温度依存性を考慮した弾粘塑性構成式を用いる。飽和度-サクシオン関係式として van Genuchten 式を用いる。また間隙流体の浸透性が MH が間隙中を占める割合(MH 飽和率 S_r^H) に依存するとした透水、透気係数式を用いる。 e, e_0 は間隙比とその初期値である。

$$k^W = k_0^W \exp\left(\frac{e - e_0}{2}\right) (1 - S_r^H)^N \quad (8)$$

3. 解析モデル 本研究の解析モデルは減圧法による MH の産出を想定し、減圧源中央付近の地盤を水平方向に取り出した 1 次元のモデルを用いている。初期温度は約

286.7K, 初期水圧は約 13MPa を与えている. 減圧源では 25 時間かけて減圧し, 減圧量として 6MPa と 7MPa を与えた. また, 本研究では土骨格に関するパラメータを南海トラフで採取された試料の力学試験より決定している.

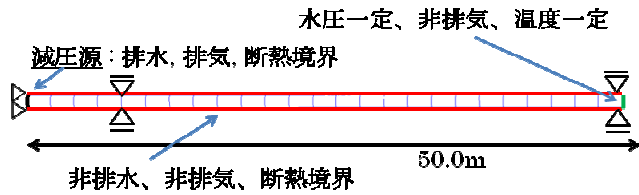


図 1 解析モデル

4. 解析ケース MH 分解速度式中の D_H は MH の表面積で決まる定数であり, Kim²⁾ は粉状の MH に対し $D_H=5.85 \times 10^{12}$ (1/MPa·s) を与えている. しかし, 現実に存在する MH はその存在形態によって表面積が様々であり, D_H の値も変化すると考えられることから本研究では D_H を検討の対象とした. 6MPa, 7MPa の 2 種類の減圧量に対して分解速度係数 D_H , 透水係数 k^w の値を以下の表のように変化させ結果を比較検討した. なお, 透気係数は透水係数の 10 倍としており, 表には記していない. ケース名の先頭 6M は減圧量を表わしており, 7MPa の減圧量を与えたケースでは 7M-1-1 のようになる. 表では減圧量 6MPa で表記しているが減圧量 7MPa のケースでも検討したパラメータの値は同様である.

表 1 解析ケース(D_H を変化させたケース)

ケース名	6M-1-1	6M-1-2	6M-1-3	6M-1-4
D_H (1/MPa·s)	5.0×10^{11}	8.0×10^{11}	1.0×10^{12}	2.0×10^{12}
	6M-1-5	6M-1-6	6M-1-7	6M-1-8
	4.0×10^{12}	6.0×10^{12}	8.0×10^{12}	1.0×10^{13}

表 2 解析ケース(k^w を変化させたケース)

ケース名	6M-2-1	6M-2-2	6M-2-3
k^w (m/s)	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}
	6M-2-4	6M-2-5	6M-2-6
	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-2}

5. 解析結果 図 2, 3 に D_H を変化させた場合の MH 残存度の時間経過を示している. 図 2 と図 3 中の \times はその時点で発散して計算が停止していることを示している. 図 2 を見ると 6M-1-4~6M-1-8 で MH 残存度が大きく減少している時点が見られ, このときに短時間で激しい分解が生じていることが分かる. 減圧量を 7MPa とすると図 3 に示すようにすべてのケースでこのような短時間に大きな分解が生じ, D_H が大きいケースでは発散する. 図 4 と 5 に減圧量 6MPa で透水係数を変化させたケースの MH 残存量と MH 分解速度の時間経過を示す. 図 4 より 6M-2-3 で短時間で分解が生じている. 6M-2-2 では約 320

時間後に計算が停止している. これに関して, 図 5 より透水係数の小さな 6M-2-2, 6M-2-3 で分解速度が時間的に増加する傾向があるのに対し, 透水係数の大きな 6M-2-4~6M-2-6 では時間とともに減少する傾向にあることが見て取れ, MH 分解挙動の違いがよりはっきりと分かる.

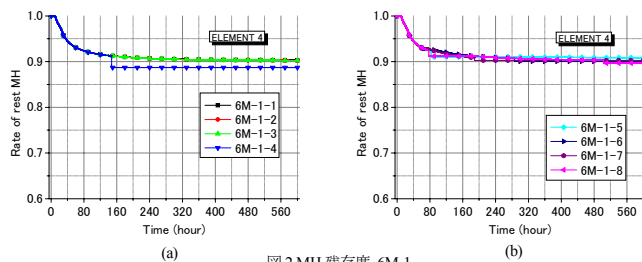


図 2 MH 残存度 6M-1

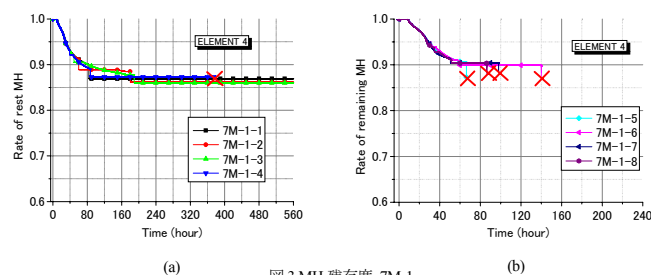


図 3 MH 残存度 7M-1

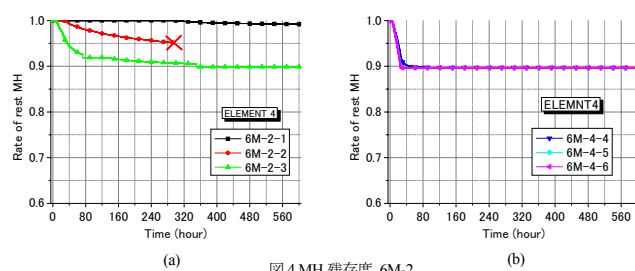


図 4 MH 残存度 6M-2

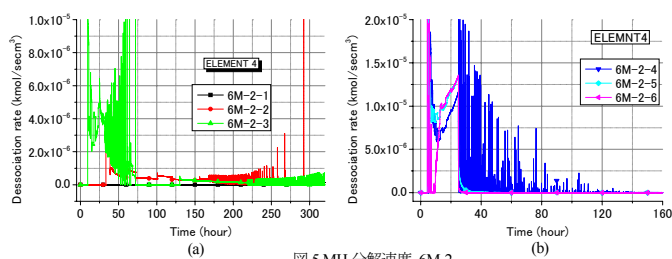


図 5 MH 分解速度 6M-2

6. まとめ 本研究では 1 次元のモデルを用いて化学-熱-力学連成解析に材料パラメータが与える影響を減圧量 6MPa と 7MPa の 2 種の条件で検討した. 結果 D_H が大きいほど MH の分解挙動が激しくなる傾向にあり, 減圧量 7MPa のケースでは D_H が大きいケースで発散した. 透水係数の差が MH の分解挙動に大きく影響し, 透水係数の小さい範囲で時間とともに分解が激しくなり, 非常に大きな分解が生じる傾向にあることが分かった.

参考文献

- 1) 北野貴士: 化学-熱-力学連成解析法によるメタンハイドレート海洋産出試験のシミュレーション, 京都大学卒業論文, 工学部, 2011.
- 2) Kim, H. C., Bishnoi, P. R., Heidemann, R. A. and Rizvi, S. S. H.: Kinetics of methane hydrate decomposition, Chem. Eng. Sci., No.42, pp. 1645-1653, 1987.