

## メタンハイドレート分解に伴う多相地盤の有限要素変形シミュレーション

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	岡 二三生
西日本電信電話株式会社	正会員	藤田 裕司
京都大学大学院	学生会員	高田 直明

## 1. はじめに

日本を含め、世界中に広く分布しているメタンハイドレート (MH:Methane hydrate) を新しいエネルギー源として利用する方法が注目されている。埋蔵量が多い、温室効果ガスの排出が少ないなどのメリットはあるが、大深度掘削や MH 分解が地盤環境に与える影響については未解明な部分が多く、安全にメタンを生産するための研究が進められている。また、シミュレーションによる研究も行われている<sup>1)2)</sup>。そこで、MH 含有地盤のモデル化を試み、分解・変形のプロセスをシミュレートし、MH 分解が地盤環境に与える影響評価について考える。モデル化に際しては、水・メタンガスの流れ、地盤の変形、相変化に着目した。

## 2. 支配方程式と地盤のモデル化

MH 含有地盤の構成材料を土粒子骨格 (S 相)、MH (H 相)、水 (W 相)、メタンガス (G 相) とし、地盤を分解層 (V1)、層境界 ( $\Sigma$ )、ハイドレート層 (V2) に分ける。ただし、ハイドレート層は S 相、W 相、H 相、層境界は S 相、W 相、G 相、H 相、分解層は S 相、W 相、G 相で構成されているとする。地盤材料を多相混合体として、支配方程式の定式化を行う。支配方程式は以下ようになる。

支配方程式とその他の場の方程式は以下ようになる。

$$\text{W 相の連続式} \quad sD_{ii} + \dot{s}n = -V_{i,i}^W - \frac{Q_M^W}{\rho^W} \quad (1) \quad \text{全体の力の釣り合い式} \quad \dot{S}_{ij,j} = 0 \quad (7)$$

$$\text{G 相の連続式} \quad (1-s)D_{ii} - \dot{s}n + (1-s)n\frac{\rho^G}{\rho^S} \quad (2) \quad \text{全体のエネルギー保存則} \quad (\rho c)^E \dot{\theta} = D_{ij}^{vp} \sigma'_{ij} - h_{i,i} \quad (8)$$

$$= -\frac{(\rho^G V_i^G)_{,i}}{\rho^G} - \frac{Q_M^G}{\rho^G} \quad (2) \quad \text{S 相の分応力} \quad \sigma_{ij}^S = \sigma'_{ij} + (1-n)sP^F \delta_{ij} \quad (9)$$

$$\text{有効応力テンソル} \quad \sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} P^F \delta_{ij} \quad (3) \quad \text{W 相の分応力} \quad \sigma_{ij}^W = nsP^W \delta_{ij} \quad (10)$$

$$\text{間隙圧} \quad P^F = sP^W + (1-s)P^G \quad (4) \quad \text{G 相の分応力} \quad \sigma_{ij}^G = n(1-s)P^G \delta_{ij} \quad (11)$$

$$\text{Darcy 則} \quad V_i^\beta = \frac{k^\beta}{\rho^\beta g} (P_{,i}^\beta + F_i^\beta) \quad (5) \quad \text{速度-ストレッチ関係} \quad D_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (12)$$

$$\text{構成式} \quad \dot{\sigma}'_{ij} = C_{ijkl} D_{kl} - R_{ij} \quad (6) \quad \text{MH の分解速度} \quad \dot{n}^H = \frac{\dot{Q}^H}{Q_o^H} \quad (13)$$

ここで、 $s$  は飽和度、 $D_{ij}$  はストレッチングテンソル、 $n$  は間隙率、 $V^\beta$  は  $\beta$  相の流速、 $\rho^\alpha$  は  $\alpha$  相の密度、 $Q_M^\beta$  は  $\beta$  相の湧き出し、 $\sigma'_{ij}$  は有効応力テンソル、 $\sigma_{ij}$  は全応力テンソル、 $P^\beta$  は  $\beta$  相の圧力、 $k^\beta$  は  $\beta$  相の透水 (気) 係数、 $g$  は重力加速度、 $F_i^\beta$  は  $\beta$  相の物体力、 $\dot{\sigma}'_{ij}$  は有効応力の Jaumann 速度テンソル、 $C_{ijkl}$  は 4 階の接線剛性テンソル、 $R_{ij}$  はリラクゼーション応力テンソル、 $S_{ij}$  は公称応力テンソル、 $(\rho c)^E = \sum_\alpha \rho^\alpha c^\alpha$  で  $c^\alpha$  は  $\alpha$  相の比熱容量、 $\theta$  は温度、 $D_{ij}^{vp}$  は粘塑性ストレッチングテンソル、 $h_i$  は移流・拡散・融解熱からなる熱フラックス、 $\sigma_{ij}^\alpha$  は  $\alpha$  相の分応力テンソル、 $v_i$  は骨格の速度、 $n^H$  は H 相の体積占有率、 $Q^H$  は H 相の融解熱、 $Q_o^H$  は初期の H 相の融解熱である。また、 $\beta = W, G$  とし、 $\alpha = S, H, W, G$  とした。H 相の分応力は W 相に含まれると仮定している。構成式には、内部構造変化を考慮した弾粘塑性構成式<sup>3)</sup>を用いた。高压条件下や非排気条件下でのサクシヨンの影響については、未解明な部分が多く考慮していない。

上記の関係を用いて支配方程式の弱形式を有限変形理論に基づく updated Lagrangian 法によって有限要素定式化すると以下ようになる。

$$[K_1^m]\{x\} + [K_2^m]\{\dot{x}\} = \{F^m\} \quad (m = V1, \Sigma, V2) \quad (14)$$

ここで、 $[K_1^m]$  は剛性マトリクス、 $[K_2^m]$  は増分剛性マトリクス、 $\{x\} = \{\Delta u, u^W, u^G, \theta\}^T$  ( $\Delta u$ : 変位、 $u^W$ : (過剰) 水圧、 $u^G$ : (過剰) ガス圧、 $\theta$ : 温度) は未知数ベクトル、 $\{F^m\}$  は既知ベクトルである。要素の状態 ( $m = V1, \Sigma, V2$ ) に応じて  $[K_1^m]$ 、 $[K_2^m]$ 、 $\{F^m\}$  を変える必要がある。上式の未知数を変位、水圧、ガス圧、温度にするため、 $\{\dot{x}\}$  中の速度、水圧速度、ガス圧速度、温度速度に関しては差分法を用いて以下のようした。

$$(\Delta t [K_1^m] + [K_2^m]) \{x\}_{t+\Delta t} = \Delta t \{F^m\} + [K_2^m] \{x\}_t \quad (m = V1, \Sigma, V2) \quad (15)$$

実際に計算を解くに当たっては、未知数を求めた後に収束計算を行い、解が収束してから H 相の分解の計算、ひずみと応力の計算をして次のステップに進む。

キーワード メタンハイドレート、分解、変形、シミュレーション

連絡先 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 075-753-5086

3. 解析例

Mackenzie Delta での Mallik プロジェクト<sup>4)</sup>を参考に地表面下 1100m 地点に MH 含有地盤を想定し、2次元平面ひずみ条件によるシミュレーションを行う。解析モデルは、図1に示すとおりである。境界条件は、図1に従って①は応力一定・排水・排気・等温(280K)、②は水平方向変位固定・非排水・非排気・断熱境界、③は変位固定・排水・排気・等温(280K)、④は水平方向変位固定・排水・排気・等温(280K)とする。⑤は加熱減圧源であり、加熱温度を 300K、減圧後の圧力を 5MPa とする。解析に用いたパラメータを表1に示す。

図2は各節点の沈下量である。各節点とも、加熱、減圧開始時には大きく沈下しているが、その後はなだらかに沈下している。図3は分解度のコンター図である。最初は全要素ハイドレート層であり、黒色であるが、時間の経過に伴い、加熱減圧源から分解が進んでいく。また、メッシュが歪んでいることから地盤が変形していることが分かる。図4に単位幅当たりのメタンガス生成量を示す。200日以降はほとんどメタンガスが発生せず分解があまり進まないことが分かる。

4. まとめ

加熱、減圧などによって地盤の環境を変化させることによって、MH が分解する。MH 分解に伴い、地盤間隙の水、メタンガスに流れが生じ、また、地盤内の内部構造が変化することによって、地盤が変形することが確認された。今後は実験との比較を行い、変形メカニズムを解明し、実現象をより正確に表現できるモデルを開発していきたい。

参考文献

- 1) Y. Masuda, et al., A field-scale simulation study on gas productivity of formations containing gas hydrates, *Proc. 4th Int. Conf. on Gas Hydrates*, pp.40-46, 2002.
- 2) 藤田裕司, 岡二三生, 木元小百合, 高田直明, メタンハイドレート分解に伴う地盤の変形シミュレーション, 第39回地盤工学研究発表概要集, 2004.
- 3) S. Kimoto, *Constitutive models for geomaterials considering structural changes and anisotropy*, Doctoral thesis, Kyoto University, 2002.
- 4) マリック国際シンポジウム新聞発表資料. マリック国際シンポジウム, 2003.

表1 解析に用いたパラメータ

初期状態に関するパラメータ		メタンガスに関するパラメータ		分解層、層境界土粒子骨格に関するパラメータ	
初期間隙率	$n_0 = 0.5$	メタンガスの比熱容量	$c^G = 2100(\text{J/kg} \cdot \text{K})$	せん断弾性係数	$G = 10(\text{MPa})$
MH 飽和度	$s_H^0 = 0.5$	メタンガスの熱伝導率	$\lambda^G = 0.03(\text{W/m} \cdot \text{K})$	静止土圧係数	$K_0 = 0.5$
初期温度	$\theta_0 = 280.0(\text{K})$	透気係数	$k^G = 1.0 \times 10^{-5}(\text{m/s})$	粘塑性パラメータ	$m' = 7.0$
初期圧密応力	$\sigma_{vo} = 11(\text{MPa})$	気体定数	$R = 8314(\text{J/kmol} \cdot \text{K})$	粘塑性パラメータ	$C_0 = 1.3 \times 10^{-13}(1/\text{s})$
土粒子に関するパラメータ		メタンハイドレートに関するパラメータ		破壊応力比	$M^* = 1.09$
土粒子の密度	$\rho^S = 2700(\text{kg/m}^3)$	MH の密度	$\rho^H = 920(\text{kg/m}^3)$	接線剛性法のパラメータ	$\tau = 0.5$
土粒子の比熱容量	$c^S = 800(\text{J/kg} \cdot \text{K})$	MH の比熱容量	$c^H = 2700(\text{J/kg} \cdot \text{K})$	圧縮指数	$\lambda = 0.508$
土粒子の熱伝導率	$\lambda^S = 1.9(\text{W/m} \cdot \text{K})$	MH の熱伝導率	$\lambda^H = 2.1(\text{W/m} \cdot \text{K})$	膨潤指数	$\kappa = 0.0261$
水に関するパラメータ		MH の分解熱	$Q^H = 510000(\text{J/kg})$	先行圧密応力	$\sigma'_{mhi} = 11(\text{MPa})$
水の密度	$\rho^W = 1000(\text{kg/m}^3)$	ハイドレート層土粒子骨格に関するパラメータ		変相応力比	$M_m^* = 1.09$
水の比熱容量	$c^W = 4200(\text{J/kg} \cdot \text{K})$	ポアソン比	$\nu = 0.25$	軟化パラメータ	$G_2 = 11(\text{MPa})$
水の熱伝導率	$\lambda^W = 0.58(\text{W/m} \cdot \text{K})$	せん断弾性係数	$G = 50(\text{MPa})$	内部構造パラメータ	$\sigma'_{maf} = 8(\text{MPa})$
淡水係数	$k^W = 1.0 \times 10^{-7}(\text{m/s})$	静止土圧係数	$K_0 = 0.5$	内部構造パラメータ	$\beta = 20.0$

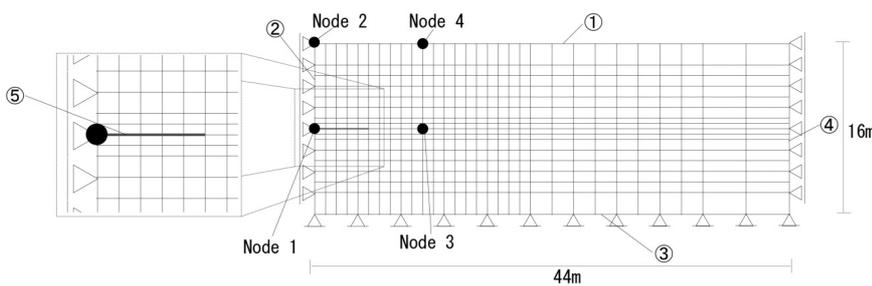


図1 解析に用いたメッシュ図

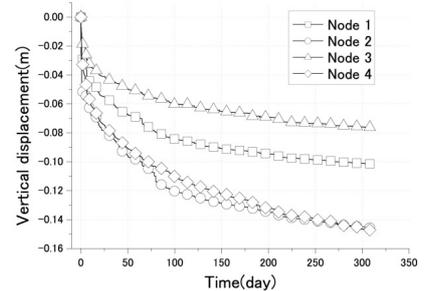


図2 各節点の沈下量

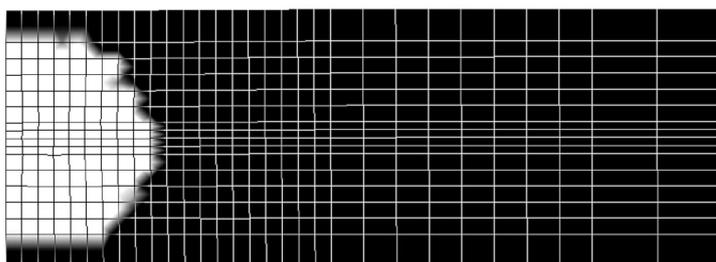


図3 分解度のコンター図 (100日後, 白:分解層, 黒:ハイドレート層)

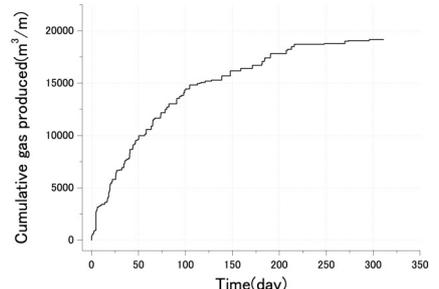


図4 単位幅当たりのメタンガス生成量