# メタンハイドレート生成に伴う地盤変形シミュレーション

## <u>1. はじめに</u>

新しいエネルギ源として注目されているメタンハイドレートを含む地盤からメタンガスを安全かつ効率的に生産する ためには、メタンハイドレート分解時の圧力変化,変形を含 む地盤環境変化を把握する必要がある。メタンガス抽出時に は、メタンガスが上昇し海底面付近で冷却され、メタンハイ ドレートが再生成する可能性がある。本研究では、生成速度 式を仮定し、地盤材料の変形強度及び透水・透気係数にメタ ンハイドレート飽和率依存性を考慮した、化学-熱-力学連 成解析を行った。地盤中でメタンハイドレートが生成する状 況を想定したシミュレーションを行い、生成過程における地 盤内の挙動について考察した。

# 2. 多相系地盤における支配方程式の定式化

多孔質媒体理論(TPM)に基づき、多相混合体として支 配方程式を定式化する<sup>1)</sup>。サクションと飽和度の関係であ る水分特性曲線を van Genuchten 式により定義し、構成式 として用い、土骨格の構成式として、弾粘塑性構成式を用い た。さらに、Cauchy 応力の Jaumann 速度を用いた updated Lagrangian 法により有限要素離散化を行う。未知数は、変 位、水圧、ガス圧、温度である。

### (1) 応力の定義とつりあい式

構成式中の応力変数として、全応力から平均間隙圧  $P^F$  を引いたものである骨格応力  $\sigma'_{ii}$  を用いた。

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

ここでsは飽和度、 $P^W$ 、 $P^G$ は水圧およびガス圧である。 各相の運動量保存則を足し合わせることで、公称応力テンソ  $\nu S_{ii}$ を用いた増分型の運動量保存則が得られる。

$$\int_{V} \dot{S}_{ji,j} dV = 0 \tag{2}$$

#### (2) 質量保存則

各相について、質量保存則を仮定する。S相、W相、G相の 質量保存則は次のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho^{\alpha}n^{\alpha}) = -q_{Mi,i}^{\alpha} + \dot{m}^{\alpha} \quad (\alpha = S, W, G)$$
(3)

 $q_{Mi}^{\alpha}$ は流量フラックスベクトル、 $\dot{m}^{\alpha}$ は MH 分解による単位体積あたりの質量変化速度である。W 相は非圧縮性とし、G 相は理想気体とする。さらに、W 相、G 相の流れは共に Darcy 則に従うものとする。

## (3) エネルギ保存則

系全体のエネルギ保存則は以下のようになる。

$$\sum_{\alpha} (n^{\alpha} \rho^{\alpha} c^{\alpha}) \dot{\theta} = D_{ij}^{vp} \sigma_{ij}' - \sum_{\alpha} q_{Hi,i}^{\alpha} + \dot{Q}^{H}$$

 $(\alpha = S, W, G, H)$  (4)  $c^{\alpha}$ は  $\alpha$  相の比熱容量 (kJ/(tK))、 $\theta$  は温度、 $q_{Hi}^{\alpha}$ は  $\alpha$  相の熱 フラックスベクトル、 $\dot{Q}^{H}$  は単位時間・単位体積あたりの分 解熱 (kJ/(m<sup>3</sup>s)) である。

#### (4) 弾粘塑性構成式

ひずみ速度依存性挙動を表現できる粘塑性ストレッチングテ ンソル D<sup>vp</sup><sub>ii</sub> は、非関連流動則により次のように書ける。

$$D_{ij}^{vp} = C_{ijkl}\sigma'_m \exp\left\{m'\left(\bar{\eta}^* + \tilde{M}^*\ln\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}}\right)\right\}\frac{\partial f_p}{\partial\sigma'_{kl}}$$
(5)

 京都大学大学院
 学生会員
 ○
 三木 祥弘

 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
 学生会員
 伏田 智彦

ここで、 $f_p = 0$ は粘塑性ポテンシャル関数、 $M^*$ はダイレイ タンシー係数、 $C_{ijkl}$ とm'は粘塑性パラメータ、 $\sigma'_{mb}$ は硬化 パラメータである。なお、 $C_{ijkl}$ において温度変化の影響を 考慮し、 $\sigma'_{mb}$ において内部構造の変化、サクション依存性、 MH 依存性を考慮<sup>1)</sup>している。

#### (5) MH 生成反応式

Englezos *et al.*<sup>2)</sup> はハイドレート1 粒子あたりの結晶生成速 度を次式で与えている。

$$\left(\dot{N}_H\right)_P = K^* A_P (f - f_{eq}) \tag{6}$$

 $(\dot{N}_H)_P$ はハイドレート1粒子あたりの結晶生成速度の時間微分(kmol/s)、K\*はハイドレート生成速度に関するパラ メータ、 $A_P$ は粒子の表面積、fはフガシティ、 $f_{eq}$ は平衡状態におけるフガシティを意味する。また、生成速度の温度依存性はそれほど大きくないとしている。これを基に、本研究では、生成速度式として次式を仮定した。

$$\dot{N}_H = -K(P_C - P)N_W \{1 - \exp(-\alpha N_G)\}$$
(7)

上式中で、 $N_H, N_W, N_G$  は領域 V に含まれる現在の MH 物 質量 (kmol), 水の物質量 (kmol), メタンガスの物質量 (kmol) である。また、P は現在の圧力 (kPa)、 $P_C$  は現在の温度  $\theta$ における分解圧力である。 $\alpha, K$  はパラメータであり、K は Englezos *et al* の実験を基に決定した。これにより、質量保 存則中の質量変化速度  $\dot{m}^{\alpha}$ 、H 相の間隙率変化速度  $\dot{n}^H$  及び エネルギ保存則中の分解熱  $\dot{Q}^H$  を算出する。

# (6) 透水・透気係数のメタンハイドレート飽和率依存性

透水係数  $k^W$ (m/s)、透気係数  $k^G$ (m/s) は間隙比  $e \ge MH$  飽 和率  $S_r^H$  に依存しているとし、以下の関係で表されるものと する。<sup>3)</sup>  $w = w = (e = e_0)$  w = w N

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

$$k^G = k_0^G \exp\left(\frac{e - e_0}{2}\right) \left(1 - S_r^H\right)^N \tag{9}$$

ここで、e、 $e_0$  はそれぞれ現在及び初期の間隙比、 $k_0^W$ , $k_0^G$  は それぞれ MH 飽和率が 0 の場合の透水係数 (m/s)、透気係 数 (m/s) を表している。また透水・透気係数の MH 飽和率 依存性を考慮するにあたっては、 $S_r^H = 0.4$  のとき、透水・透 気係数は 1/30 から 1/50 に低下する <sup>4)</sup> ことから N=7 と決 定した。



Yoshihiro MIKI, Sayuri KIMOTO, Fusao OKA, Tomohiko FUSHITA

# 3. 解析モデルとパラメータ

前節までで定式化した有限要素解析法を用いて、図1に 示す1次元モデルでのMH生成時の地盤の変形シミュレー ションを行った。境界条件は、側面と下面を非排水・非排気、 側面は断熱境界、上面を水圧・ガス圧一定、等温境界とし、 下面を5時間かけて初期温度285Kから275Kへ減熱するこ とでメタンハイドレートを生成させる。解析に用いたモデル は、上面よりガス及び水が供給されることを想定し、上面の 水圧・ガス圧一定境界では水圧・ガス圧を初期値の9MPaに 固定する。解析に用いたパラメータを表1に示す。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、水、メタンガスが飽 和度0.5 で存在しているとする。

#### 4. 解析結果

図2は各要素のMH物質量の時系列変化である。減熱源に近い下の要素から順にMHが生成している様子がわかる。図3 は各要素の温度の時系列変化である。4時間後のelement2が 初期温度285Kより高い289K辺りまで温度が上がっている。 これは、MH生成反応は発熱反応であるために、element1が 急激に生成し、発生した反応熱により、element2が加熱され たと考えられる。図4は各節点の鉛直変位を示している。各 要素にMHが生成していくに伴い、要素が膨張しているこ とがわかる。また、図5から平均骨格応力が低下しているこ とがわかる。このとき間隙水圧も大きく減圧している。各節 点が大きく減圧される時点でその要素の飽和度は0に近く、 平均骨格応力などには影響していない。MH生成に伴い、水 が消費されるため、水圧が減少すると思われる。

## 5. まとめ

化学-熱-力学連成有限要素解析法を用いて、1次元モデルでのMH生成時の地盤の変形シミュレーションを行った。結果として、生成に伴い要素が膨張し、平均骨格応力が低下することがわかった。しかし、本解析では、MH飽和率がほぼ1になるまで生成しており、非常に生成率が高い。MHの生成が収束するメカニズムを解明し解析に取り入れたい。 参考文献

- Kimoto, S. Oka, F. Fushita, T. Fujiwaki, M.: A Chemo-Thermo-Mechanically Coupled Numerical Simulation of the Subsurface Ground Deformation due to Methane Hydrate Dissociation, Computers and Geotechnics, Vol.34, pp.216-228, 2007.
- Englezos, P. Kalogerakis, N. Dohlabhai, P.D. and Bishnoi, P.R. : Chem.Eng.Sci., 42(1987), 2647-2658.
- 3) Masuda, Y., Kurihara, M., Ohuchi, H. and Sato, T.: A field-scale simulation study on gas productivity of formations containing gas hydrates, *Proc. 4th Int. Conf. on Gas Hydrate*, Yokohama, Japan, pp. 40-46, May 2002.
- 4) 坂本 靖英, 駒井 武, 川辺 能成, 天満 則夫, 山口 勉: 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1報)-, 資源と素材, 120, pp. 85-90, 2004.

表1 解析に用	いたパラメータ
---------	---------

初期間隙率, n0	0.47
初期 MH 飽和率, $S_{r_0}^H$	0.0
初期温度, $\theta_0$	285.0 (K)
初期間隙圧力, $P_{s0}$	9000 (kPa)
初期鉛直有効応力, $\sigma'_{v0}$	1150.0 (kPa)
静止土圧係数, K0	1.0
圧密降伏応力, $\sigma'_{mbi}$	1150.0 (kPa)
初期せん断弾性係数, G0	53800 (kPa)
粘塑性パラメータ, m'	23.0
粘塑性パラメータ、 $C_0$	$1.0 \times 10^{-12} (1/s)$
熱粘塑性パラメータ, α	0.15
破壞応力比, $M^*$	1.09
圧縮指数, $\lambda$	0.169
膨潤指数, κ	0.017
変相応力比, $M^*$	1.08
内部構造パラメータ, $\sigma'_{maf}$	1150.0 (kPa)
内部構造パラメータ,β	0.0
サクションパラメータ, $S_I$	0.2
サクションパラメータ, $s_d$	0.25
サクションパラメータ, $P_i^C$	100 (kPa)
MH パラメータ, $n_m$	0.6
MH パラメータ, $n_d$	0.75
MH パラメータ, $S_{ri}^H$	0.65
最大飽和度, $S_{rmax}$	1.0
最小飽和度, $S_{rmin}$	0.0
van Genuchten パラメータ, $\alpha$	$0.0025 \ (1/kPa)$
van Genuchten パラメータ, $n$	10
透水係数, $k^W$	$1.0 \times 10^{-5} (m/s)$
透気係数, $k^G$	$1.0 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}$
MH パラメータ, $N$	7
生成に関するパラメータ, K	$7.15 \times 10^{-7} (1/s/kPa)$
生成に関するパラメータ, α	5000
初期飽和度, $S_{r0}$	0.5



図 2 各要素内の MH 物質量 (mol)



