深海底におけるメタンハイドレート開発に伴う地盤の変形予測

山口大学大学院　学生会員　○米田　純
山口大学大学院　正会員　兵動正幸
山口大学大学院　正会員　中田幸男
山口大学大学院　正会員　吉本憲正

1. まえがき

次世代資源として注目されているメタンハイドレートを深海底地盤から生産する方法として減圧法，加熱法，インヒビター圧入法などが考えられている．これらの方法はメタンハイドレートが砂層の間隙に存在していることを考慮し，原位置でメタンハイドレートをメタンガスと水に分解して回収しようとするものである[1)]．その際生産井付近では地盤の温度・水圧が様々に変化し，固体であるメタンハイドレートが分解することで堆積土の力学強度は変化する．これらの変化は無視できないほど大きく[2)]，地盤に生じる応力やひずみを予測することが求められてきた[3)]．また2007年冬に行われた陸上産出試験[1)]では減圧による出砂が問題となり，その力学的な解明も求められている．本研究では土-水-ガス-熱の連成有限要素法解析を用いて，南海トラフを対象とした開発における生産井付近の力学的な評価を行った．

2. 支配方程式

地盤を線形弾性多孔質体と仮定し，土-水-ガス-熱連成問題に対する支配方程式の誘導を行い有限要素法により定式化する．

2.1 力のつり合い式

土骨格の力のつり合い式は，Bishopの有効応力原理$\sigma=\sigma'+(1-\chi)\ P_G+\chi\ P_W$中のパラメータ$\chi$を飽和度と仮定し，以下のように表わされる．

$$\sigma'_{ij,j}+\left(S_W P_W+S_G P_G\right)_{,i}+\gamma_i=0 \qquad (1)$$

ここに，σ'は有効応力，S_Wは水の飽和度，P_Wは水圧，S_Gはガスの飽和度，P_Gはガス圧，γは物体力を示す．不飽和領域において水圧，ガス圧が有効応力に与える割合は飽和度，及びガス飽和度と等しいと仮定している．

2.2 水の連続式

水の質量保存則を以下の式で表わす．

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho^W\cdot n^W\right)=-q^W{}_{i,i}+\dot{m}^W \qquad (2)$$

ここに，左辺は単位時間当たりの水の密度ρ^Wと水の体積含有率n^Wの変化，右辺第一項q^Wは境界面からの水の流入量，右辺第二項はメタンハイドレートの分解による水の発生量を示す．メタンハイドレートの分解反応式はKim-Bishinoi[4)]が提案した式を用いた．

2.3 ガスの連続式

ガスの質量保存則を以下の式で表わす．

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho^G\cdot n^G\right)=-q^G{}_{i,i}+\dot{m}^G \qquad (3)$$

ここに，左辺は単位時間当たりのガスの密度ρ^Gとガスの体積含有率n^Gの変化，右辺第一項q^Wは境界面からのガスの流入量，右辺第二項はメタンハイドレートの分解によるガスの発生量を示す．

2.4 エネルギー保存則

地盤のエネルギー保存則を以下の式で表わす．

$$\left(\sum_{\alpha=S,W,G,H} n_\alpha\rho_\alpha c_\alpha\right)\frac{\partial T}{\partial t}=-\left(\sum_{\alpha=W,G}\rho_\alpha c_\alpha v_{\alpha i}\right)T_{,i}+\left(\sum_{\alpha=S,W,G,H}\left(n_\alpha K_\alpha\right)T_{,i}\right)_{,i}-\left(1-n_S\right)\beta T\frac{\partial\varepsilon_{ij}}{\partial t}+\dot{Q}^H \qquad (4)$$

ここに，左辺は単位体積単位時間あたりのエネルギー変化，右辺第一項は水，ガスの移流項，右辺第二項は熱伝導項，右辺第三項は変形によって生じる熱エネルギー，右辺第四項はMHの分解によって生じるエネルギー変化を示す．Tは温度，c_αは比熱，$v_{\alpha i}$は流速，K_αは熱伝導率，βは熱膨張係数を示す．

3. 支配方程式の離散化および定式化

誘導した支配方程式(1),(2),(3),(4)に対して，重みつき残差法の一つであるGalerkin法を用いて離散化を行った．

なお，不飽和領域における浸透特性はVan Genuchtenの水分特性曲線モデルに従うものとし，不飽和土の透水係数・透気係数はMualemモデルを用いた．その際，Van Genuchtenモデルのパラメーターm=1-1/nとすることで不飽和透水係数モデルを簡単な関数形で与えている．

4. 解析モデルの詳細

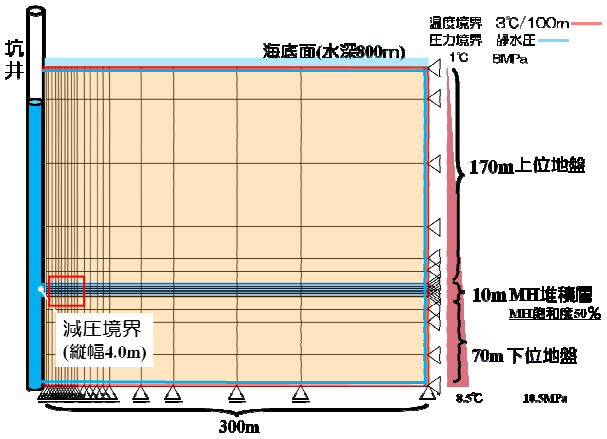
減圧法を用いた南海トラフ域におけるMH生

産を想定し，シミュレーションを行う．なお，本解析は坑井を中心軸とした軸対称問題として取り扱った．解析モデルの全体図を**図-1(a)**に示す．水深 800m，海底下 250m，半径 300m の地盤を解析対象とし，海底下 170m~180m 間を MH 飽和度 50%の一様な MH 堆積層とした．MH 堆積層の左端中央の水圧を 10,000kPa→4,000kPa へ 50000sec(約 15 時間)かけて線形的に減圧を行い，その後減圧源の圧力を保つことで MH 生産のシミュレーションを行った．境界条件は下端，右端を固定端とし，上・下・右端を等温，等圧境界とした．減圧源付近の拡大図を**図-1(b)**に示す．MH 堆積層の左端に Point A，Point B，Point C，を設け，中心部分から 10 m 離れた点を Point D とする．

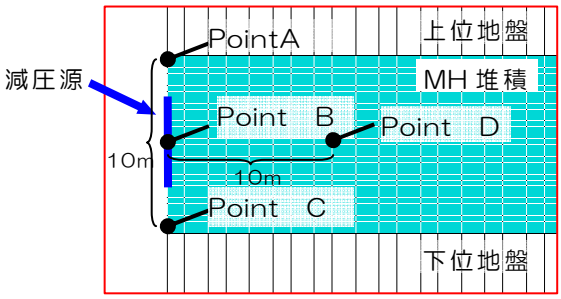
5. 減圧法による生産シミュレーション

解析に用いたパラメータを表-1 に示す．値は既往の研究から得られた値[1) 2)]，および一般的な値を用いた．**図-2** に減圧から 10000sec(約 30 時間)後の地盤の変形図，温度コンター，水圧コンター，ガス圧コンターを示す．水圧，ガス圧に注目すると，減圧源を中心とた圧力の減少が確認できる．減圧に伴う揚水により，周囲から放射状に浸透が起こり，坑井を中心軸とした椀型に圧力が減少していくことが確認された．このことから，鉛直坑井からの減圧では，水圧の減少は水平方向にあまり広がらないことが確認された．ここで，シミュレーションの結果ガス圧は水圧より低くなり，サクションが生じない程度の大きさであることが明らかとなった．この結果は，不飽和土の水分特性曲線による水の飽和度がほぼ 100%であることを意味し，地盤内がほぼ水で飽和されていることを表している．発生したガスは水に内包された形で存在し，水と共に回収されると推察される．次に変形に注目すると減圧源付近の収縮が著しく，直上の海底面が最大の変位を示すことが明らかとなった．これは減圧による有効応力の増加とメタンハイドレートの分解による剛性の低下で圧密が進行し，減圧源を中心とした収縮挙動が生じたものと考えられる．**図-3** に減圧後の体積ひずみコンターを示す．図からも減圧源付近で著しい圧縮挙動が確認できる．**図-4** にせん断ひずみコンターを示す．図より，減圧源を中心としてくさび状にせん断変形が生じることが明らかとなった．

次に減圧源付近に注目し，**図-1(b)**で示した各点の初期値からの鉛直方向変位量と時間の関係を**図-4** に示す．図より各点は，ほぼ同量の約 15cm 程度沈下が生じることがわかった．50000sec までは線形的に減圧を行っているため，急勾配で沈下が進み，その後，徐々に排水が行われることでさらに沈下が進行することがわかる．次に初期の応力状態からの水平有効応力増分を**図-5** に示す．ここで，応力は各点に最も近いガウス点の値を示している．図より，減圧



(a) 全体のモデル



(b) 減圧源付近拡大モデル

図-1 南海トラフを想定した解析モデル

表-1 使用したパラメータ

Symbol	Parameter	Unit	MH堆積層	通常地盤
E	弾性係数	kPa	1.0×10^5	1.5×10^5
ν	ポアソン比		0.33	0.33
ρ_s	土の単位体積重量	kN/m^3	25	25
ρ_w	水の単位体積重量	kN/m^3	10.0	10.0
ρ_H	MHの単位体積重量	kN/m^3	9.12	
k_W	透水係数	m/sec	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
k_G	透気係数	m/sec	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}
n	初期間隙体積比		0.4	0.4
n^H	メタンハイドレート体積比		0.2	0
A	膨張係数	/K	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}
k_{tW}	水の熱伝導率	cal/m・K・sec	0.14	0.14
k_{tS}	土粒子の熱伝導率	cal/m・K・sec	0.5	0.5
k_{tG}	ガスの熱伝導率	cal/m・K・sec	0.1	0.1
kth	ハイドレートの熱伝導率	cal/m・K・sec	0.1	
C_{vW}	水の比熱	cal/N・K	2.5×10^4	2.5×10^4
C_{vS}	土粒子の比熱	cal/N・K	1.0×10^5	1.0×10^5
C_{vG}	ガスの比熱	cal/N・K	1.0×10^4	1.0×10^4
C_{vh}	ハイドレートの比熱	cal/N・K	1.0×10^5	
M_G	メタンガスの物質量	g/mol	16	16
M_W	水の物質量	g/mol	18	18
M_H	メタンハイドレートの物質量	g/mol	119.5	119.5
R	気体定数	$kPa\cdot m^3/K\cdot mol$	8.314	8.314

源に近い Point B で最も高い水平有効応力が作用していることがわかる．これは，減圧源近傍にて減圧に伴う有効応力の増加が最も顕著に表れるためと考えられる．次いで下部側 Point C の水平応力が高く，上部側 Point A となるほど水平有効応力は小さい．本解析では，減圧源を水平方向固定端としているために変形が生じることなく高い水平有効応力が作用したと考えられるが，実現象では一部拘束されていない箇所で反力が取れず，この水平有効応力が出砂に繋がっていると推察される．図-6 に各点のメタンハイドレート飽和度と時間の関係を示す．減圧源に最も近い PointB では減圧に伴いメタンハイドレートが急速に分解されていることが確認できる．また，Point A と Point C では，徐々にメタンハイドレートの分解が始まっていることがわかる．Point D においては，メタンハイドレートは分解されず，初期の飽和度を保った．これより，減圧法を用いた生産は減圧源から離れた点に比べ，減圧源付近のメタンハイドレートの分解がより顕著に起こることが明らかとなった．

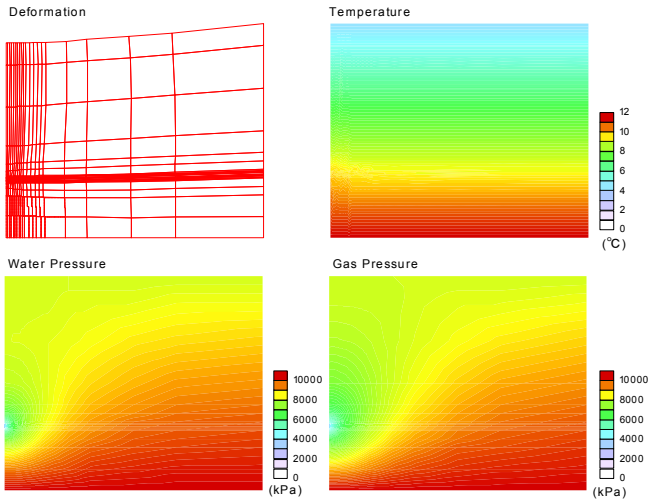


図-2　解析結果（左上：変形量を 50 倍にして描画，右上：温度，左下：水圧，右下：ガス圧，各図面のスケールは　図-1(a)に対応）

6.　まとめ

本研究では土-水-ガス－熱連成有限要素法解析を行い，MH 生産時に想定される地盤の変形予測を行った．その結果，減圧源付近で体積ひずみが最も大きくなり，減圧源近傍にて高い水平有効応力が生じることが明らかとなった．

[謝辞]本研究は、経済産業省「メタンハイドレート開発促進事業・生産手法開発に関する研究開発」の一部として実施された。記して謝意を表する次第である。

［参考文献］

1)メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム，http://www.mh21japan.gr.jp/japanese/index.html.

2)米田純，兵動正幸，中田幸男，吉本憲正，海老沼孝郎：深海底地盤を模擬したガスハイドレート堆積砂の三軸圧縮特性，地盤工学会中国支部論文報告集「地盤と建設」, Vol.25, No.1, pp.133-122, 2007

3)Kimoto Sayuri, Fusao Oka, Tomohiko Fushita, Masaya Fujiwaki: A Chemo-thermo-mechanicall coupled numerical simulation of the subsurface ground deformations due to methane hydrate dissociation, Computers and Geotechnics 34 (2007) pp216-228.

4)Kim,H.C.,Bishinoi, P.R., Heidemann, R.A. and Rizvi, S.S.H.: Kinetics of methane hydrate decomposition, Chem. Eng. Sci. , No.42, pp.1645-1653.

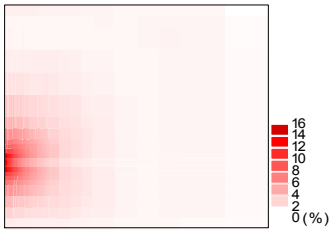


図-3　減圧による体積ひずみ分布

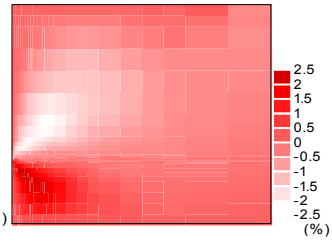


図-4　減圧によるせん断ひずみ分布

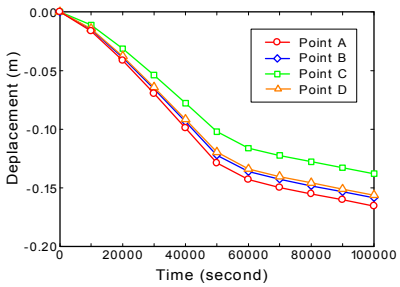


図-4　減圧源付近の変位

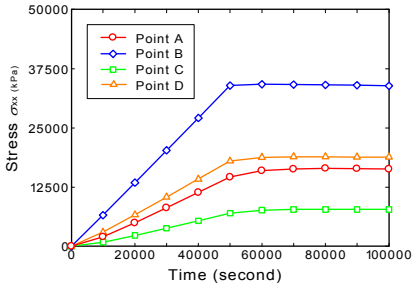


図-5　減圧源付近の水平有効応力増分

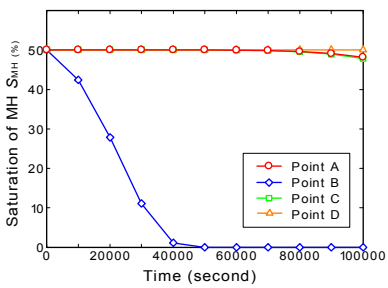


図-6　減圧源付近の MH 飽和度