

温度 - 応力 - 浸透流連成解析によるメタンハイドレート生産時海底地盤の変形挙動の予測評価

長崎大学大学院 学生会員○宮城卓史 フェロー会員 蔣 宇静
長崎大学大学院 正会員 杉本知史 正会員 李 博

1.はじめに

近年、メタンハイドレート（Methane Hydrate、以下 MH と略す）は、次世代エネルギー資源として国際的に注目されている。MH の生産が実現すれば供給面において高い効果を発揮できると考えられるが、MH の生産・開発を行う際、MH の分解による堆積層の強度低下や間隙中の流体移動に伴い、海底地滑りや地盤沈下といった海底地盤の環境変化を引き起こす可能性が危惧されている¹⁾。本研究では、MH 生産時における海底地盤の変形特性を把握するために、一般的な MH の生産手法である「熱刺激法」と「減圧法」を対象として、温度 - 応力 - 浸透流連成解析によって、MH 生産時における海底地盤の変形予測を行うことを目的とする。

2.MH 生産時における変形挙動評価の解析手法

2.1 解析概要

MH 生産時における海底地盤の変形挙動を高精度で予測するためには、温度の影響を考慮できる応力 - ひずみ関係モデルと MH 層の骨格・水・気体・熱を連成した解析手法が必要である。しかし、それらの要素をすべて考慮した解析モデルが複雑で、計算時間が長くなることに加え、どの要素がどのように影響してくるのかが理解しにくくなる恐れがある。そこで、本研究ではまず、MH 層中の気体（メタンガス）の影響、また、MH 層中の水の流れと熱移動現象との相互作用の影響を考慮しないと仮定し、三次元有限差分法による温度 - 応力 - 浸透流連成解析を行う。なお、入力パラメータは既往研究で得られたデータをもとに設定した。

2.2 解析モデル

解析モデルを図-1 に示す。海面から 1000m 以深の海底地盤を対象とし、解析領域は水平方向 500m、垂直方向が海底面から 300m 以深の軸対称モデルとした。境界条件として、MH 層より上層の坑井部分を非排水（水平方向変位固定）、MH 層の坑井部分を排水（水平方向変位固定）とした。MH 相平衡関係図を図-2 に示す。今回は以下の式を用いて MH の分解に関する判定を行った。式(1)は既往研究により得られた関係式²⁾である。

$$p = \exp(38.53 - 8386.8/T)/1000 \quad \cdots (1)$$

基本物性値を表-1、解析ケースを表-2 のように設定し、初期温度を 5℃、初期圧力を 12MPa とした。減圧法では、温度を 5℃に固定して、圧力を 1MPa、3MPa までにそれぞれ減圧させることによって分解させる。熱刺激法では、圧力を 12MPa に固定して、温度を 50℃、90℃までにそれぞれ上昇させることによって分解させる。

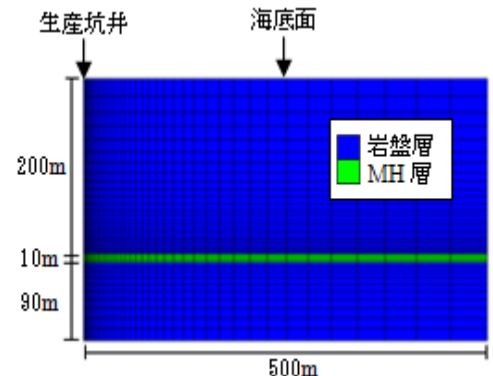


図-1 モデル図

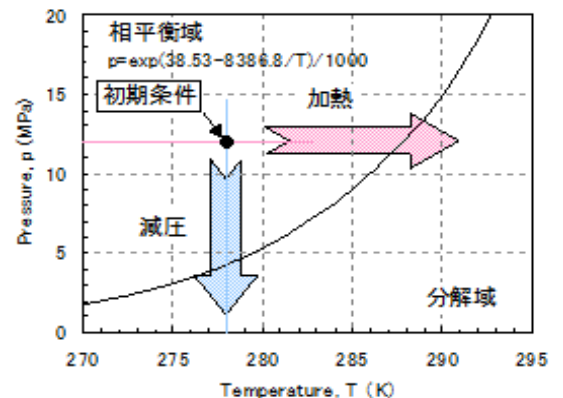


図-2 MH 相平衡関係図

表-1 物性値

パラメータ	MH 層	岩盤層
変形係数 E (MPa)	1.0×10^8	1.5×10^8
密度 ρ (kg/cm ³)	3480	2450
透水係数 k (cm/s)	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}
粘着力 c (MPa)	1.0	0.3
ポアソン比 ν		0.33
内部摩擦角 ϕ (°)		30
間隙率 n		0.4
水の圧縮係数 K_p (1/Pa)		0.5
熱伝導率 C_t (J/m · s · K)		2.09
比熱 C_p (J/kg · K)		4000
初期温度 T_0 (°C)		5

表-2 解析ケース

生産手法	解析ケース	温度・圧力の設定
減圧法	Case1	12MPa→3MPa
	Case2	12MPa→1MPa
熱刺激法	Case3	5℃→50℃
	Case4	5℃→90℃

3.解析結果と考察

3.1 減圧法での変形挙動

図-3、4 にそれぞれ減圧法における坑井付近の海底面及び MH 層上部での沈下量の経時変化と坑井軸からの距離による 100 時間後の沈下量の変化を示す。沈下量の最大値は、海底面において Case1 で約 98mm、Case2 で約 334mm、MH 層上部において、Case1 で約 156mm、Case2 で約 335mm となった。各ケースにおいて、海底面、MH 層ともに坑井付近で沈下量が最大となり、海底面、MH 層ともに時間の経過に伴って沈下量が増加している。これは、MH 層の分解による強度低下、分解とともに圧密が進行したためと考えられる。圧密現象については、減圧を行った MH 層の坑井部分から間隙水が排出されることによって、時間の経過とともに、間隙水圧の推移が見られ、圧密が進行していることが確認できた。

3.2 熱刺激法での変形挙動

図-5、6 に熱刺激法における坑井付近の海底面及び MH 層上部での沈下量の経時変化と坑井軸からの距離による 100 時間後の沈下量の変化を示す。沈下量の最大値は、海底面において、Case3 では約 45mm、Case4 では約 46mm、MH 層上部において、Case3 では約 55mm、Case4 では約 56mm となった。温度の上昇による分解範囲の拡大は殆ど見受けられなかった。図-4、6 に示すように、MH 層より海底面の沈下量が大きくなっている。それは、MH の分解に伴う強度低下範囲が局所的に生じるため、MH 層の坑井付近での沈下量が大きくなるが、岩盤部ではそれに伴い全体的に変形が生じたためと考えられる。

3.3 MH 分解範囲

図-7 は、Case2 (減圧法) の 100 時間後における、MH の分解範囲を示す。それぞれの MH 分解範囲は、Case1 で約 3m、Case2 で約 15m、Case3 で約 0.86m、Case4 で約 0.96m となった。両手法とも、MH の分解が沈下量に影響を与えている。減圧法による分解効果が高く沈下量が多いことに対して、熱刺激法では、沈下量が小さく、海底面に及ぼす影響は少ないが、MH の分解範囲が狭く、生産量も少ない。これらより、効果的な MH 生産を行うには、減圧法が優位な手法であると考えられる。

4.おわりに

本研究では三次元有限差分法による温度 - 応力 - 浸透流連成解析を実施し、MH 生産時における分解や圧密現象による沈下挙動等を解析的に予測することができた。しかし、MH を取り巻く環境は非常に複雑であり、今後は気体の影響を考慮した 3 相モデルの構築や坑井が複数存在する場合での相互影響などを考慮していくこと、MH の分解範囲を拡大し、生産性を向上させる手法を確立することが課題として挙げられる。

- 【参考文献】 1) 青木一男他：メタンハイドレート生産に伴う地盤変形について，資源・素材2003（宇宙）秋季講演会論文集 B4-1, pp.235-236, 2003
2) Winters, W.J.他：Natural gas hydrate oceanic and permafrost environments, pp.241-250, 2002

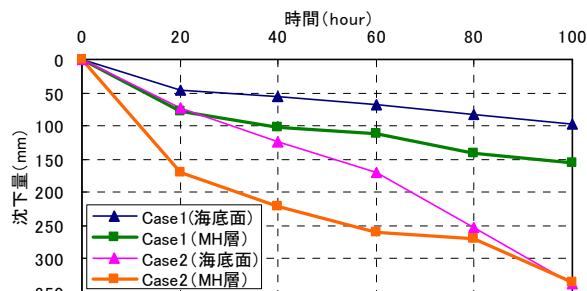


図-3 坑井付近の沈下量の経時変化（減圧法）

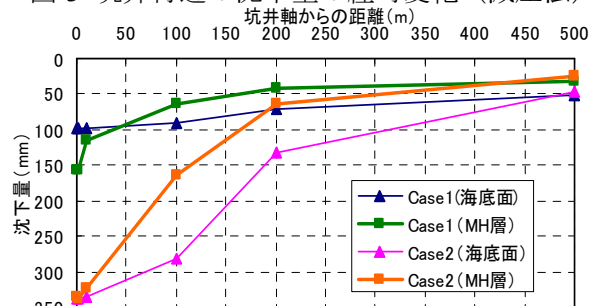


図-4 坑井軸からの距離による変化（減圧法）

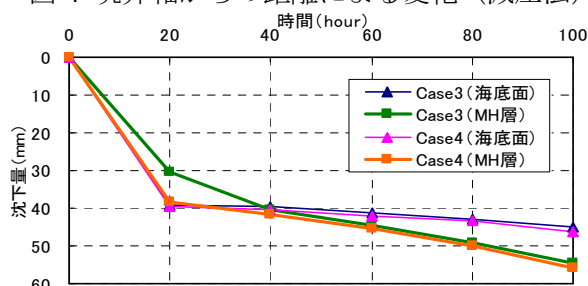


図-5 坑井付近の沈下量の経時変化（熱刺激法）

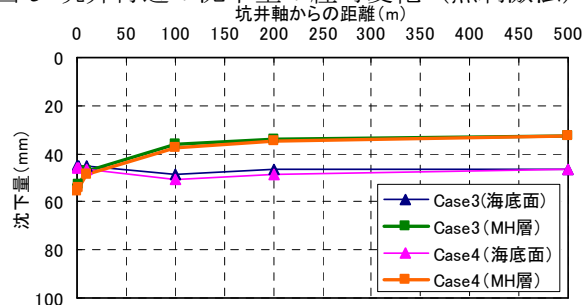


図-6 坑井軸からの距離による変化（熱刺激法）

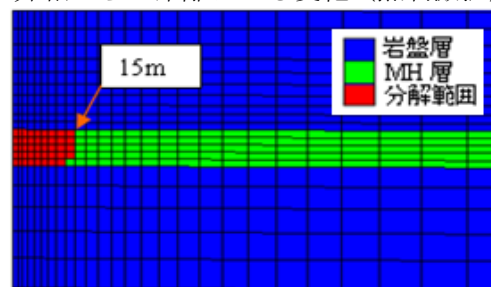


図-7 MH 分解範囲（Case2）