応力－浸透流－熱移動連成解析によるメタンハイドレート生産時における海底地盤の変形挙動予測

長崎大学大学院　学生会員　○中園雅之　長崎大学工学部　正会員　蒋　宇静
長崎大学大学院　フェロー　棚橋由彦

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及ぼ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、一般的な MH の生産手法である「減圧法」を対象として、応力－浸透流－熱移動連成解析によって、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・熱を連成した解析が必要である。しかし、本研究ではまず第一歩として、MH 層を固液 2 相状態とし、気体（メタンガス）の影響は考慮しない。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は考慮しないという仮定に基づき、三次元有限差分法による応力－浸透流－熱移動連成解析を行った。なお、入力パラメータはこれまでの成果をもとに設定した。

2.2 解析モデル

解析モデルの立体図を図-1 に示す。海底面から 1000m 以深の海底地盤を対象とし、解析領域は水平方向 200m、垂直方向は海底面より 300m の 3 次元軸対称モデルとする。生産坑井（半径 1.2m）を 1 本のみ配置し、図-1 は坑井周辺の 4 分の 1 を表している。境界条件として、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。また、解析モデルは上層、MH 層及び下層を考慮する。MH 相平衡関係図を図-2 に示す。基本物性値を表-1、解析ケースを表-2 のように設定した。初期温度を 5℃(278K)、初期圧力を 12MPa とし、MH の存在領域は、低温高圧下であることから、温度を 5℃(278K)に固定して、圧力を 1MPa、3MPa にそれぞれ減圧させることによって分解させる。なお、分解過程では、メタンハイドレートの粘着力の低下に伴い強度は低下し、分解後の強度は分解前の 1/2～1/4 程度になることが

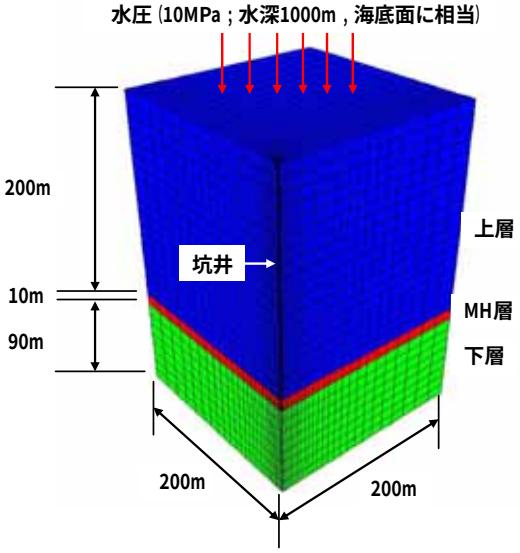


図-1　解析モデル

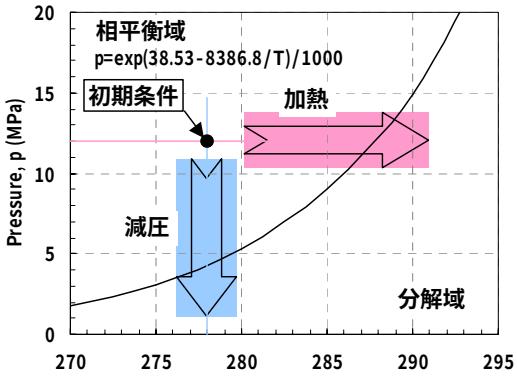


図-2　MH 相平衡関係図

表-1　物性値

パラメータ	MH 層	上層・下層
変形係数　E　(MPa)	385	113
ポアソン比　ν	0.3	
内部摩擦角　φ　(°)	30	
粘着力　c　(MPa)	1.0	0.3
透水係数　k　(m/s)	1.0×10^{-13}	1.0×10^{-16}
孔隙率　n	0.4	
水の圧縮係数　K_P　(1/Pa)	0.5×10^{-9}	0.5×10^{-9}
熱伝導率　C_c　(J/m･s･K)	1.47	
比熱　C_p　(J/kg・K)	1300	
水の単位体積重量 γ_w　(N/m^3)	9800	
初期温度　T_0　(℃)	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	Case-1	12MPa → 1MPa
	Case-2	12MPa → 3MPa

判明されている [2]。従って、本解析では、分解後の強度定数を分解前の 1/2 に設定した。

3.解析結果と考察

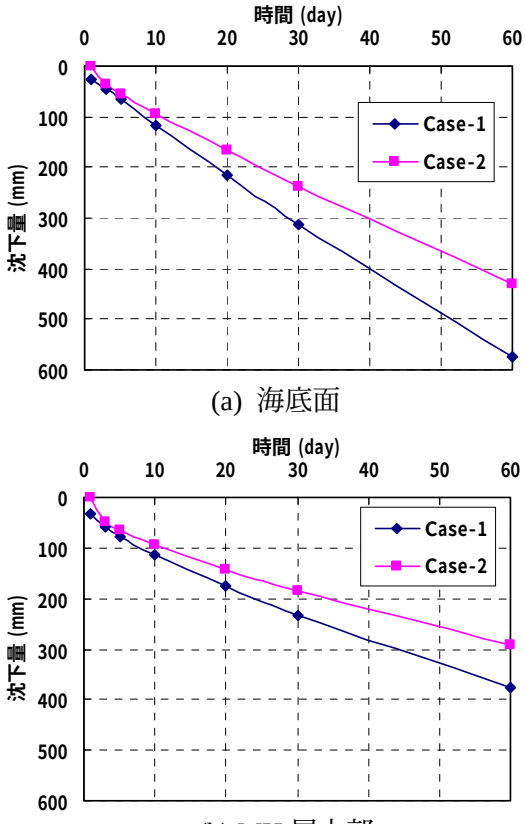
図-3 に坑井付近の海底面及び MH 層上部での沈下量の経時変化を示す。まず、沈下量の最大値は、海底面において、Case-1 では約 570mm、Case-2 では約 430mm、MH 層上部において、Case-1 では約 380mm、Case-2 では約 290mm とその半分程度であった。また、MH 層上部に比べ、海底面の沈下量のほうが大きい。これは、上層に対して MH 層の強度が高いこと、圧密現象による沈下量の変化が大きいためであると考えられる。つぎに、海底面、MH 層上部ともに時間の経過に伴って沈下量が増加していることが分かる。これは、MH 層の分解による強度低下、分解とともに圧密が進行したためであると考えられる。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、間隙水圧に推移が見られ、圧密が進行していることが確認できた。また、それぞれのケースを比較すると、60 日後の沈下量は海底面では 150mm程度、MH 層上部では 80mm程度の差が生じている。これは、60 日後の MH 層の分解距離（坑井軸からの MH の分解が進行した距離）が Case-1 では約 8.4m であるが、Case-2 では約 2.1mであり、MH の分解量の違いが原因として考えられる。

図-4 に 60 日後の各ケースにおける、坑井軸からの距離による沈下量の変化をそれぞれ示す。各ケースにおいて、海底面、MH 層上部ともに坑井付近において沈下量が最大となっている。また、MH の分解は、減圧量が大きくなるにつれて広がっており、MH 層上部では、先ほど述べた MH の分解距離で沈下量が大きくなり、その後収束していくことが分かる。これにより、MH の分解が沈下量に影響を及ぼすことが確認できる。

各ケースにおいて、MH 分解による海底地盤のせん断、引張り破壊は生じなかった。

4.おわりに

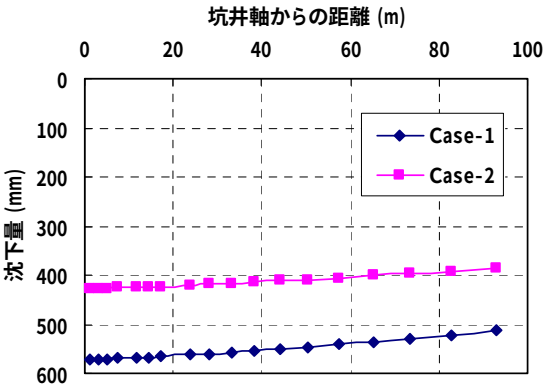
三次元有限差分法による応力 - 浸透流 - 熱移動連成解析を実施し、分解や圧密現象による沈下挙動等を解析的に表現することができた。しかし、MH を取り巻く環境は非常に複雑であり、今後は気体の影響を考慮した 3 相モデルの構築や坑井が複数存在する場合での相互影響などを表現していくこと、MH の分解範囲を拡大し、生産性を向上させる手法の確立が課題として挙げられる。



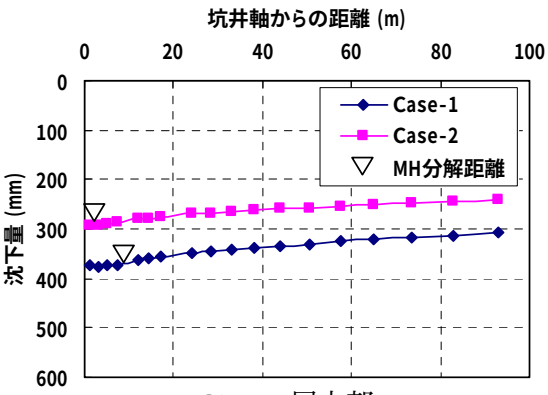
(a) 海底面

(b) MH 層上部

図-3　坑井付近の沈下量の経時変化



(a) 海底面



(b) MH 層上部

図-4　坑井軸からの距離による変化

【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（宇部）秋季講演会論文集，B4-1，pp.235-236，2003

2） メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム：フェーズ１目標達成度に係る自己評価表，2008