メタンハイドレート賦存層の力学特性の推定

羽藤正実¹*·池田紘幸¹·稲盛隆穂²·鈴木清史³·尾西恭亮¹·松岡俊文¹

¹京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540京都市西京区京都大学桂Cクラスター) ²(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(〒261-0025千葉市美浜区浜田1-2-2) ³(独)産業技術総合研究所(〒062-8517札幌市豊平区月寒東2条17-2-1) *E-mail:mhato@ersdac.or.jp

海底下浅部の未固結堆積層に賦存しているメタンハイドレートの生産・開発のためには、堆積層の 力学特性を知る必要がある。本研究では、モール・クーロンの破壊理論に基づき、メタンハイドレートが 賦存する南海トラフ海域で取得された検層データを用いて、堆積層の力学特性(強度)の推定を試みた。 この結果、メタンハイドレートが賦存する堆積層の力学強度は、その賦存区間で強くなること、また、賦 存区間の下位の堆積層で弱化する傾向を確認した。これらの結果は、同一海域の近傍の坑井から採取され たコアサンプルの強度計測実験結果と調和的であった。本研究結果は、開発時のジオハザードの予測や生 産時の貯留層監視、さらに、メタンハイドレート賦存層の地質の解明にも有用である.

Key Words : Nankai Trough, methane hydrate, Mohr-Coulomb, cohesion

1. はじめに

経済産業省により、2001年より、メタンハイドレ ートの資源開発プロジェクト(MH21)が進められ ており、地震探査データや坑井検層データを用いた メタンハイドレート資源量の評価の試みがなされて いる。一方、メタンハイドレート賦存層からの開 発・生産手法の研究開発も進められているが、実際 の開発・生産時には、賦存層に対する何らかの刺激 を与えることで流体通路を確保し、流体の移動を促 すことが必要となる.これらの刺激は、賦存層や海 底面の変形を誘発する可能性もあり、これらのリス ク管理が必要となる.このことから、開発・生産の 対象となるメタンハイドレートが賦存する堆積層の 力学特性を事前に評価することは、非常に重要なこ とである.

南海トラフ海域での,掘削の結果,メタンハイド レート賦存層が力学的に強化し,賦存層に接するか たちで直下の堆積層が力学的に弱化していることが 検層データから示されている.下位堆積層は,以前 にメタンハイドレートが賦存していたものの,堆積 が進むにつれ、メタンハイドレート安定領域から外れ、 メタンハイドレートが分解したと推定される.従って, 下位堆積層での強度弱化は,メタンハイドレート分 解が一つの原因とも考えられる.このことは,堆積 層の力学強度評価を行うことで,履歴を含めたメタ ンハイドレート賦存堆積層を解明することに通じる. 本研究では、モール・クーロンの破壊理論に基づき、南海トラフ海域で取得した検層データから動的 ヤング率を計算し、日本周辺の堆積層の経験的知識 を基にして、岩体の力学的強度の指標である粘着力 を計算した.また、同海域の近傍の坑井で採取され たコアサンプルの力学強度測定が行われており、こ れらの結果と理論計算値との対比を行った.

2. 南海トラフ海域の検層データとその特徴

(1) 南海トラフ海域における坑井掘削と検層データ 南海トラフ海域では、1999年度に基礎試錐「南海 トラフ」(以後、「南海トラフ」)、2003年度に基 礎試錐「東海沖~熊野灘」(以後、「東海熊野」) の坑井掘削が行われている.いずれの坑井掘削も、 メタンハイドレートの賦存を確認することを目的と して掘削されたものであり、当初の目的を達成して いる.本研究では、東海熊野海域で掘削された坑井 のうち、ワイアーライン検層を行った坑井(以後、 「Well-A」と略称)の検層データを用いて力学強 度の評価を行った.尚、後述するコアサンプルも Well-Aの近傍に位置する坑井から採取されたもので ある.

(2) 検層データ上の特徴

図-1に、Well-Aにおける検層データのうち、キャ リパーと比抵抗のデータを示す. 図中、実線がキャ



図-1 Well-Aのキャリパーと比抵抗

リパーデータ,破線が比抵抗データである.キャリ パーは坑井の直径であり,坑壁崩壊を起こしている ような場合には,直径が大きくなったり,値が激し く変動する.つまり,堆積層の力学強度の指標とし て利用できる.図-1のキャリパーは,極めて安定し ている区間と,変動している区間,特に安定区間の 下位区間,とに明瞭に分けられる.また,メタンハ イドレート賦存層の特徴として,比抵抗値がメタン ハイドレートを含まない周辺の堆積層に比較して 大きいことが挙げられる.図中には,比抵抗値の大 きな区間が,キャリパーデータの安定区間と一致す るように,明瞭に出現している.この区間(海面下 約820mから約920mの区間)を,図中にメタンハイ ドレート賦存区間として示した.

メタンハイドレート賦存層の特徴として,弾性波 速度が大きくなることが挙げられる.純粋メタンハ イドレートのP波速度は,3,000m/sを超えることが 知られている.図-2に,図-1と同じくキャリパーデ ータと,音波検層にて解析された弾性波速度(P波 速度,S波速度)を示す.各深度における弾性波速 度からも、メタンハイドレート賦存区間が明瞭に判 定できる.

3. 堆積層の力学的強度の評価手法

(1) 凍土の力学特性

凍土地帯の堆積層の力学特性はひずみ速度に依存 し、静的応力下では、クリープ現象を生じることが 知られている.また、凍土中の氷や鉱物(マトリク ス)の再配列が生じた場合には、力学特性が変化す るであろうことが推察される.本研究では、メタン ハイドレート賦存層の力学特性が、凍土と定性的に 類似しているとして、強度評価を行った.

(2) モール・クーロンの破壊理論

岩盤・土質の力学特性は、モール・クーロンの破壊理論で記述でき、力学強度は、摩擦角と粘着力の2つのパラメータで定義される.前述した砂質凍土の摩擦角は、砂岩・頁岩などの組成鉱物と孔隙率に依存することが知られている.また、物理実験に使用される人工ハイドレートであるTHFハイドレートを用いた実験結果¹⁾から、孔隙内におけるTHFハイ



図-2 Well-Aのキャリパーと弾性波速度

ドレートの有無は、摩擦角へ影響を与えないことが 知られている.このことは、メタンハイドレート賦 存層の力学強度は、粘着力に大きく反映することを 意味する.

(3) 粘着力と弾性パラメータ

日本周辺海域の堆積層におけるコアの物性や強度 測定²⁾から,動的ヤング率(*E_D*)と粘着力 (*S₀*)の関係が以下の式(式1)となることが経 験的に知られている^{2).5)}.

$$S_0 = 1.5 \times 10^{-3} E_D \tag{1}$$

また、動的ヤング率は、弾性波速度(P波速度 (V_p),S波速度(V_s))と密度(ρ)と以下の 式2のように関係づけられる.

$$E_D = \rho V_S^2 \frac{3\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 4}{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1}$$
(2)

上記の式に含まれる,弾性波速度や密度は,い ずれも坑井検層データから評価できる.

4. 力学強度評価

本研究では、南海トラフ海域の坑井Well-Aで取得 した検層データから求めた弾性波速度と密度を上記 の式を適用して粘着力を計算した.その結果を、 図-3に示す.図中には、キャリパーデータを太実線 で示し、計算から求めた粘着力を細実線で示した. メタンハイドレート賦存層、およびその上位区間、 下位区間の粘着力に対して、それぞれ回帰曲線(破 線)を計算し、オーバーレイした.さらに、上位区 間の回帰曲線から、メタンハイドレート賦存区間を 外挿して表示した.図からも、メタンハイドレート 賦存層においては、粘着力が変動はするものの、明



図-3 Well-Aの検層データから評価した粘着力 (太実線はキャリパー,細実線は粘着力,破線で各 区間のデータから計算した回帰曲線)

らかに上位および下位区間のそれより大きな値をも ち,堆積層の力学強度が大きなことを示しているこ とが判る.

5. コアの力学強度測定結果

(1) コアおよびコア測定実験の概要

Well-Aの,海底面下120-160mの深度区間から, PTCS (Pressure Temperature Core Sampler) にて,原 位置の状況を維持して採取したコアサンプルの測定 実験を三軸圧縮試験装置を使用して行った.装置の 規格は,最大封圧25MPa,最大軸圧50MPa,最大背 圧25MPaである.回収コアをコア軸と平行に直径 50mm,長さ100mmに成形した.実験時の応力セッ ティングは,原位置条件に近づけるために,K0条 件,間隙水圧として与える背圧を採取深度に一致さ せ,温度は5℃を維持した.変形速度は0.1%/min.と した.

コアを採取した深度区間はメタンハイドレート賦 存層であり、回収コアには飽和率の差はあれ、メタ ンハイドレートを含んでいる.賦存層下位のメタン ハイドレートの賦存しない堆積層のコアを模擬する ためには、実験前にハイドレートを分解させた.測 定は、条件を変えた5つのコアに対して、行った.

1MPaの封圧下で飽和率の異なる2つのコア (2.7%と43%)とハイドレート分解後の2つのコア, また,3MPaの封圧下で分解後の1つのコアの強度 を測定した.

(2) 実験結果

上記の実験において、各コア資料が最大差応力を 発揮した時のモール円を描かせた(図-4).図中、 破線で示した2つのモール円が、ハイドレート分解 後の2つのコアの強度を示している(注:1MPaの 封圧で測定した2つのハイドレート分解後のコアの モール円はほとんど同じ形状のため重なっている). また、大小2つの実線のモール円は、それぞれ、小 円が飽和率2.7%のコア、大円が飽和率43%のコアの 測定結果である.粘着力は、分解後コアの測定結果 から求めた共通接線の切片の値として求まる.既述



図-4 コアの強度測定結果(モール円)

したように、堆積層の力学強度指標(摩擦角・粘着 力)のうち、摩擦角はハイドレートの有無に影響さ れないことが予測されている.このことより、分解 コアのモール円から求まった接線と同じ傾斜をもつ 接線を2つのハイドレート含有コアのモール円に適 用した.この結果、実線小円で示される低飽和率コ アの粘着力は、分解後コア(封圧1MPa)とほぼ同 ーの粘着力を示している.一方、実線大円で示され る高飽和率コアの粘着力は、分解コア(1MPa)お よび低飽和率コアの粘着力の約4倍を示している.

6. 検討

検層データから評価された,メタンハイドレート の賦存層および下位堆積層の力学強度は、近傍の坑 井で採取されたコアサンプルの原位置条件下におけ る強度測定結果と調和的な結果を示している. コア 測定実験結果は、メタンハイドレートが孔隙内に高 飽和率で存在している場合、堆積層は力学的に強化 されるが、低飽和率の場合、メタンハイドレートが 強度の強化には寄与しないことを示している. 検層 データによる強度評価において、メタンハイドレー ト賦存層内において変動する粘着力の低い部分があ る.これまでの研究においても、南海トラフ海域の 場合,メタンハイドレート賦存層は,タービダイト 砂泥互層の砂層部分に選択的にメタンハイドレート が賦存していることが示されている3).また、南海 トラフ海域の坑井データを参考にした弾性波速度分 布に関する研究⁴⁾から,メタンハイドレート賦存層 内においても高飽和率層、低飽和率層が存在するこ とが分かっており、メタンハイドレート賦存層内で、 変動する粘着力のうち、低粘着力部分が、メタンハ イドレートの低飽和率部分に相当するものと考えら れる.

7. 結論

メタンハイドレートが賦存する堆積層が受けた履 歴については,解明されていないことが多くあり, また、メタンハイドレート賦存層直下の堆積層の弾 性波速度の低下についても、 微量のガスの存在など の理由が論じられている. 堆積によるメタンハイド レート賦存層の沈降に起因するハイドレートの分解, その後の、例えば、海水準変動などの様々な理由に よるメタンハイドレート安定領域下面深度の変化に より、現在の安定層下位の堆積層は、過去に、ハイ ドレートの分解(あるいは、生成分解の繰り返し) を受けている可能性がある.本研究では、メタンハ イドレート賦存層下位堆積層が、上記のような分解 履歴をもつものと仮定して、その力学強度を評価し た. その結果,研究に際して設けた上記の作業仮定 をよく説明する結果を得た. Kleinberg and Dai (2005) によるMallik (カナダマッケンジーデルタ陸 域) での検層データを用いた同様の研究⁵⁾でも本研 究と調和的な結果を得ている.

仮定の妥当性の検討や,他の坑井の検層データに よる評価やコア実験を,更に進めることで,当該海 域における堆積層の力学評価がより確実になると共 に,力学評価技術が,今後の開発時におけるリスク モニタリング技術への適用も可能となると考えられ る.更に,メタンハイドレート賦存堆積層の履歴を 含めた解明にも有力な情報を与えるものと思われる.

謝辞:本研究は、メタンハイドレート資源開発
(MH21)で実施された研究の成果の一部である.
発表の許可いただいた経済産業省、MH21コンソー

シアムにたいして深謝する.また,研究に際して, 基礎試錐「東海沖〜熊野灘」のデータの使用および 公表の許諾を経済産業省からいただいた.ここに謝 意を表する.

参考文献

- Santamarina, J.C., Francisca, F., Yun, T-S., Lee, J-Y., Martin, A.L. and Ruppert, C.: Mechanical thermal, and electrical properties of hydrate-bearing sediments, AAPG Hedberg Research Conference, Vancouver, 2004.
- Hoshino, K., Kato, H., Tanaka, S., Omata, A., Moriguchi, Y., Hattori, M. and Imamura, T.: Handbook of Mechanical Properties of the Japanese Rocks under High Confining Pressure, Geological Survey of Japan, AIST, 2001.
- 3) 高野修,西村瑞恵,藤井哲哉,鈴木清史,林雅 雄,小林稔明:坑井および震探シーケン ス層序解析による東海沖三次元震探エリアの更 新統海底扇状地システムと MH 賦存砂岩層分布 の検討,日本地質学会第 112 年学術大会講演要 旨, P.25, 2005.
- 4) Hato. M, Minami, Y., Inamori, T. and Matsuoka, T.: Characterization of Physical Properties of Methane Hydrate-bearing Zone, Proceedings of the 10th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics, P.31-34., 2006.
- Kleinberg, R.L. and Dai, J.: Estimation of the Mechanical Properties of Natural Gas Hydrate Deposits from Petrophysical Measurements, OTC Abstract 17205, 2005.

Estimation Of Geomechanical Property Of Methane Hydrate-bearing Zone

Masami HATO, Hiroyuki IKEDA, Takao INAMORI, Kiyofumi SUZUKI, Kyosuke ONISHI and Toshifumi MATSUOKA

. For development and production of the methane hydrate (called 'hydrate'), the geomechanical property of the hydrate-bearing sediment should be known. In the study, based on the Coulomb-Mohr failure criterion we have tried to calculate the mechanical strength of the hydrate-bearing sediment by using well-logging data acquired in the Nankai Trough. The result shows that the sediment below the methane hydrate-bearing layer is apparently mechanically weaker than the hydrate-bearing layer. This result is also consistent with the result from strength measurement of the core samples recovered from the neighbour well. These results will be helpful for both understanding the geology of hydrate-bearing sediment and geohazard assessment for drilling and production.