

メタンハイドレートの圧縮挙動に及ぼす諸要因

山口大学大学院 学生員○久保和子

山口大学工学部 正会員 兵動正幸 中田幸男 村田秀一

安藤建設 正会員 宮林健一郎

大阪ガス(株)研究開発部 中村和夫 山田研治

1.はじめに 20世紀に入り、人類の生活活動が活発となり、経済が高度に成長して人々の生活スタイルが大きく変化してきたことに伴って、世界のエネルギー使用量は急速に増加している。しかし、エネルギー資源には限りがある事は周知の事実である。そこで近年、見直されてきたのが天然ガスであり、中でも天然ガスハイドレートは、世界中に分布し、埋蔵量も豊富であることから有望なエネルギー資源として注目されている。メタンハイドレートの採取法および利用技術の構築のために、これまでに、その物性の解明および安定性に関する研究が行われてきた。図1¹⁾は、海底および永久凍土域におけるメタンハイドレートの化学的見地からの安定境界を示すものである。図のように、メタンハイドレートの強度は温度と拘束圧に依存し、低温・高圧になるほど安定に存在できることが示されている。これまでの筆者らの研究²⁾により、力学的にも同様な性質が存在することが明らかとなった。しかしながら、これまでに行った力学試験の結果には、ばらつきが多く見られた。そこで本研究では、さらに実験的検討を行う中で、実験から得られた応力-ひずみ曲線を大きく3つの破壊モードに分類し、破壊モードの違いによる、ばらつきの要因について検討を行った。

2.試料及び実験方法 実験に用いた試料は人工的に作成したメタンハイドレートである。メタンハイドレートは、メタン・水を原材料としてメタンハイドレート合成装置によって低温高圧下(10℃,10MPa)で顆粒状のハイドレートを合成し、さらに圧力晶析装置で更に高圧下(160MPa)で余剰水分を脱離して作成される。作成したメタンハイドレートの供試体の寸法は直径15mm、高さ30mmである。この供試体寸法は、現在メタンハイドレート合成装置から作成可能な限界値である。力学試験に用いた試験機は、セル内の温度を最低-34℃まで低下可能で、かつ圧

力を10MPaまで上げることが可能な低温高圧三軸圧縮試験機である。試験中の温度はベDESTAL上部と下部及びセル中央部の三カ所に取り付けたサーモスタットによって同時計測を行い、荷重載荷はひずみ制御式により行った。実験は、2種類のひずみ速度1.0%/minと0.1%/min、4種

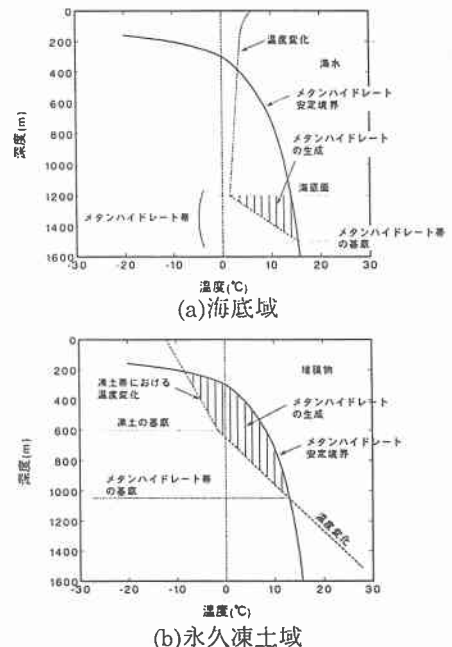
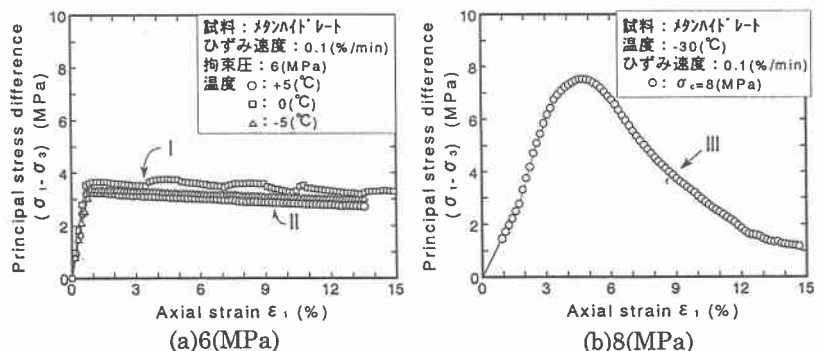
図1 メタンハイドレートの安定境界と分布領域¹⁾

図2 主応力差と軸ひずみの関係

類の温度条件($T=+5, -5, -10, -30^{\circ}\text{C}$)、そして4通りの拘束圧($\sigma_c=0, 4, 6, 8\text{MPa}$)の下でそれぞれ行った。

3.実験結果と考察 図2は、実験から得られたメタンハイドレートの主応力差($\sigma_1-\sigma_3$)と軸ひずみ ε_1 の関係について示したものであり、図(a)は拘束圧6MPaの結果、図(b)は拘束圧8MPaの結果である。図中[I]で示す 0°C の応力-ひずみ関係曲線において、最大主応力差($\sigma_1-\sigma_3$)_{max}を示した後残留状態の部分で、上下に増減を繰り返す挙動を示していることが観察される。これは、氷の融解温度が 0°C 付近であるために、氷が溶ける過程とその状態でも高拘束圧下ではメタンハイドレートは安定であるため、溶けた水を再度凝固させる過程が交互に現れているものと推察される。これは、メタンハイドレートの自己保存効果と呼ばれる現象¹⁾に対応するものである。図中[II]で表される $+5^{\circ}\text{C}$ 及び -5°C の応力-ひずみ関係は、最大主応力差($\sigma_1-\sigma_3$)_{max}を示した後、主応力差($\sigma_1-\sigma_3$)の若干の減少を伴うが、[I]とは異なりほぼ一定となり延性的挙動を示していることが認められる。また、図中[I]及び[II]の初期剛性については、最大主応力差($\sigma_1-\sigma_3$)_{max}に達するまでそれぞれの剛性はほぼ等しく、温度および拘束圧の影響はさほど認められない。図(b)は温度 -30°C で拘束圧8MPaの実験結果を示している。図(a)に比べ、応力・ひずみ挙動には明瞭なピークが現れ、最大主値を示した後、顕著な軟化を伴う脆性的挙動となることが観察される。これは、温度と圧力の条件が、低温・高圧というメタンハイドレートにとって安定な条件にあったため、高い強度となったためと考えられる。図3はメタンハイドレートの最大主応力差($\sigma_1-\sigma_3$)_{max}と温度 T の関係を表したものである。図中[I]~[III]の区分分けは、図3の主応力差と軸ひずみの関係における[I]~[III]と対応おり、それぞれの条件の実験結果をプロットしたものである。

図より、 -30°C 付近では[III]のパターンが大部分を占めているが、 -10°C 以上となると[I]や[II]のパターンが現れている。これより、温度条件により、現れる応力-ひずみの挙動パターンが異なることが分かる。[I]や[II]のパターンでは、それぞれの最大主応力差($\sigma_1-\sigma_3$)_{max}は、ほぼ似た値を示している。一方、[III]のパターンは、[I]や[II]のパターンに比べてばらつきが多い。この原因を調べるために、図中に示した各々の試料の密度に着目すると、密度が大きい試料ほど最大主応力差($\sigma_1-\sigma_3$)_{max}は大きな値を示していることがわかる。図4に、パターン[III]について、主応力差と軸ひずみの関係を、試料の密度をパラメータにまとめた。図より、メタンハイドレートの挙動に対する密度の影響は大きく、強度も密度に依存していると言える。ここで、メタンハイドレートの密度は、実験前に供試体の質量と寸法を計りそれから求めた値であるが、供試体中に若干の空気が内包されるため、密度が高いほどメタンハイドレートの純度が高いことになる。

4.まとめ メタンハイドレートの応力-ひずみ関係における挙動は、[I]自己保存効果の影響を受ける延性的な挙動、[II]延性的挙動、[III]脆性的挙動の3種類に分類する事ができる。これら3つのパターンの現れる割合は主として温度条件に依存する。また、同じパターンでの最大主応力差($\sigma_1-\sigma_3$)_{max}の値は、おおむね同一の値を示すが、中にはばらつきも見られる。このばらつきの原因として、メタンハイドレートの密度が影響しており、温度条件 -30°C では、メタンハイドレートの強度は、拘束圧よりも密度に依存している。

【参考文献】1) 松本良・奥田義久・青木豊(1993)：メタンハイドレート(Methane Hydrate)

～21世紀の巨大天然ガス資源～, pp. 9-107.

2) 久保・中田・兵動(1999)：メタンハイドレートの強度特性に及ぼす温度と拘束圧の影響

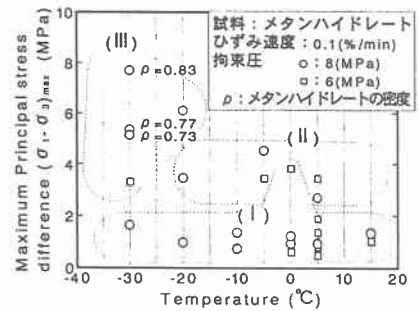


図3 最大主応力差と温度の関係

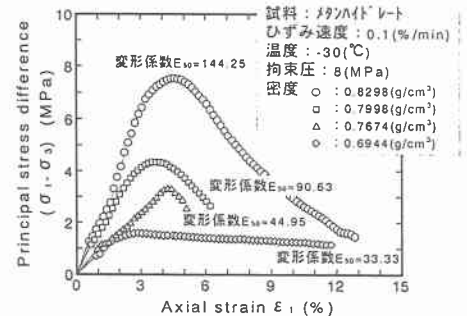


図4 主応力差と軸ひずみの関係