

メタンハイドレートの力学特性に及ぼす密度の影響

山口大学大学院 学生会員○松居梓 武富一樹 古屋敷龍成
山口大学工学部 正会員 兵動正幸 中田幸男 吉本憲正

1. はじめに

日本はエネルギー消費大国であるが資源が極度に乏しく、その多くを海外に依存している。今後は、輸入に頼らない新エネルギー源の確保が重要な課題である。その際配慮すべき点として、石油代替エネルギーの積極的導入、地球温暖化問題に対する取り組みが挙げられる。これらの条件を満たす次世代エネルギーとして、メタンハイドレート（以下 MH と略す）が注目されている。MH は日本近海において賦存が認められているばかりではなく、二酸化炭素、硫黄酸化物、窒素酸化物の排出量が石油や石炭に比べて少なく、クリーンである。MH は、大陸沿岸や大陸棚の堆積物中や、極域凍土中・沿岸堆積物など比較的弱い地層中に存在しているため、開発に際し、海底地すべり、地層の崩壊等のジオハザードについて懸念されている。本研究では、MH 及び MH を含む堆積物の力学特性¹⁾を解明するために、人工的に作製した MH を対象に様々な条件下において試験を行った。特に、密度の変化が MH の強度に及ぼす影響について調べることを主眼とした。

2. 試料及び試験方法

MH の強度特性を把握するため、人工的に作製された顆粒状の MH を用いて三軸圧縮試験を行った。この顆粒状 MH を圧力晶析装置により -30°C の温度条件下で所定の圧力で加圧し、三軸供試体を作製した。供試体寸法は、直径 15mm、高さ 30mm であり、初期密度を $0.675\sim 0.802\text{ g/cm}^3$ の範囲で変化させた。比較のために、精製水を凍結させ、かき氷粉碎機で砕いたかき氷精製氷についても同様の方法で、初期密度 $0.679\sim 0.856\text{ g/cm}^3$ の供試体を作製した。次に、堆積砂中の MH の存在状態が力学特性に与える影響について調べるため、砂と氷を用い試験を行った。堆積物中の MH の存在状態として、図-1 に掲げる 2 つのケースが想定されている。図中黒塗りの円が土粒子、白い部分が MH を表している。すなわち、MH が土粒子間隙中に浮遊した状態と、土粒子同士を固着した状態である。この 2 種類の状態を模擬するため、土粒子固着型供試体は試料と精製水を入れたモールドを -30°C の冷凍庫で凍結させ作製した。また、間隙浮遊型供試体は試料とかき氷精製氷を混合し、圧力晶析装置で加圧し作製した。凍砂の供試体寸法は、砂の最大粒径との関係から、直径 30mm、高さ 60mm とし、相対密度 0%，飽和度 25%で統一した。使用した砂は秋穂砂であり、永久凍土域で MH が産出されるカナダのマッケンジーデルタにおける試験錐試験の際に採取された堆積土の粒度に近づけるよう粒度調整した。三軸圧縮試験は、セル内の温度を -34°C まで下げることが可能で、かつセル内の圧力を 10MPa まで上げることが可能な低温高压三軸圧縮試験機を用いて行った。試験中の供試体温度は、ペDESTAL 上部、下部及びセル中央部の 3ヶ所に取り付けた熱電対によって計測を行った。試験条件は、温度 $T = -5, -10, -30^{\circ}\text{C}$ 、拘束圧 $\sigma_c = 0, 1.5, 4, 8\text{MPa}$ とし、軸荷重はひずみ制御式により载荷を行った。

表-1 粒度調整した試料の物理的性質

Gs	$D_{\max}$ (mm)	D_{50} (mm)	$e_{\max}$	$e_{\min}$
2.666	2.38	0.23	0.978	0.625

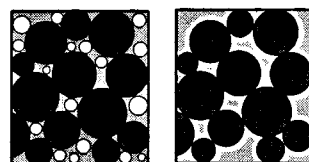


図-1 メタンハイドレートの生成状態

3. 試験結果と考察

まず、MH の力学特性に及ぼす密度の影響について検討する。密度を変化させた MH 試料の三軸試験から得られた軸差応力と軸ひずみの関係を図-2 に示す。図-3 はかき氷精製氷における同様の試験結果である。いずれも延性的な応力ひずみ挙動を示したあと、定常状態に至る様子を示している。MH においては、拘束圧の増加に伴い強度も増加する傾向を示しているが、密度の違いによる変化は拘束圧 1.5, 8MPa 共にほぼ同程度である。氷の場合は拘束圧 1.5MPa では密度の違いによる差が大きい、8MPa では小さくなっている。温度・拘束圧等の条件を変化させて行った MH 及びかき氷精製氷の最大軸差応力と初期密度の関係をそれぞれ、図-4、図-5 に示す。最大軸差応力とは、本研究では軸ひずみ 15%に至るまでの最大の軸差応力のことを指す。いずれの試料も温度 -30°C では初期密度の影

響を受けているが、温度-10℃においては、同一の拘束圧下では初期密度の影響をほとんど受けて強度は一定である。これより、低温になるほどMHの力学特性に及ぼす初期密度の影響は顕著になることが推察される。理由としてMHは温度の低下に伴い安定性が増加することが挙げられる。また、MHでは各拘束圧とも増加傾向は同様に現れている。それに対し、かき氷精製氷は密度が低いと拘束圧の影響を大きく受けるが、密度が高くなるにつれ、その差は消失する傾向が認められる。これらの理由として、MHは、如何なる密度においても拘束圧の違いによってその性質が変化するため、強度にも大きく影響を及ぼすことが考えられる。一方、かき氷精製氷は、それぞれの拘束圧による圧密後の密度に強度が依存する傾向を示しており、高い初期密度においては、拘束圧によらず圧密後の密度がほぼ同一となるため、強度は拘束圧の影響を受けないことが考えられる。次に、堆積砂中の生成状態が力学特性に及ぼす影響について

検討する。図-1に示す2種類の生成状態による力学特性を比較するため、異なった2つの生成状態における供試体の軸差応力と軸ひずみの関係を図-6に示す。いずれの条件においても土粒子固着型の方が強度が高く表れている。これは、間隙浮遊型は氷と土粒子が混在した状態で生成しているのに対し、土粒子固着型は氷が土粒子を覆った状態で生成しているため氷の固結力が発揮され強度が高くなった為と考えられる。また、図より、土粒子固着型では存在する温度依存性が、間隙浮遊型では生じていない。理由として、図-1から推測されるように氷同士の接着点の違いにより、氷の特性²⁾が現れたものと推察される。図-7にそれぞれの強度定数を示す。土粒子固着型は温度の低下に伴い粘着力が増加していく傾向がみられるが、間隙浮遊型では、粘着力は温度の変化によらず一定である。これは、前者は氷が土粒子を覆っているため、氷の接着点が多く、氷の固結力が発揮された為と考えられる。さらに、氷は温度による影響を受けやすい³⁾ため、温度の低下とともに固結力も増加し、粘着力の増加につながったと推察される。土粒子固着型に比べ間隙浮遊型の内部摩擦角が若干大きいのは、土粒子固着型は土粒子を覆う氷同士が接着しているのに対し、間隙浮遊型は土粒子が骨格を成していることによると考えられる。

4. まとめ

本研究の結果を以下に示す。①人工MHの強度は密度増加に伴い増加し、その影響は低温になるほど大きくなる。②砂中でのMHの生成状態の違いが強度に与える影響を氷を用いた模擬試料により検討した結果、土粒子固着型の方が強度が高く、間隙浮遊型では見られなかった温度依存性が確認された。

【参考文献】1) 武富一樹・兵動正幸・中田幸男・吉本憲正ら：様々な条件化におけるメタンハイドレートの力学特性，平成15年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集，pp.327-328。2) 前野紀一，黒田登志雄：基礎雪氷学講座①雪氷の構造と物性，古今書院，1986，pp.20-24。

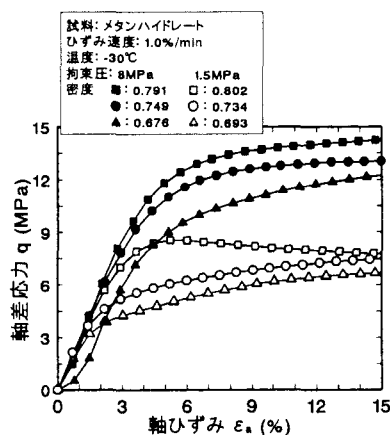


図2 軸差応力と軸ひずみの関係 (MH)

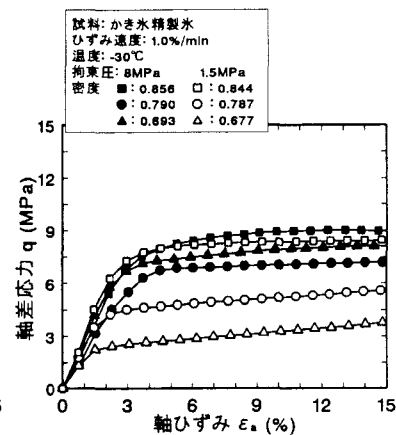


図3 軸差応力と軸ひずみの関係 (かき氷精製氷)

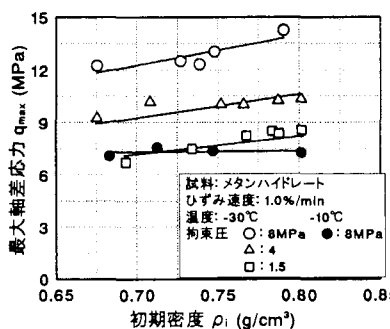


図4 最大軸差応力と密度の関係 (MH)

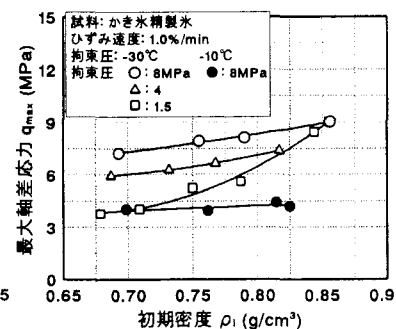


図5 最大軸差応力と密度の関係 (かき氷精製氷)

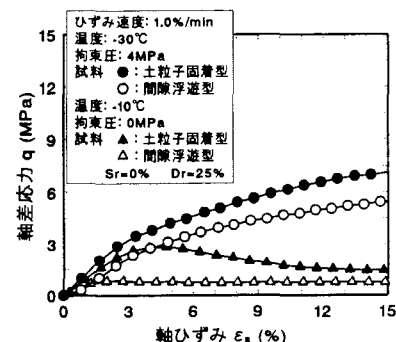


図6 軸差応力と軸ひずみの関係の比較

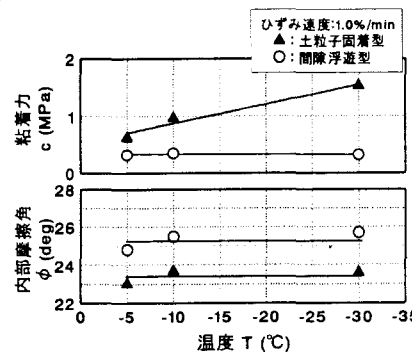


図7 強度定数c, φと温度の関係