

液化天然ガスの地下貯蔵に関する基礎的研究

——特に低温領域における岩石の挙動について——

愛媛大学工学部海洋工学科 正員 ○ 稲田善紀

愛媛大学工学部海洋工学科 正員 八木則男

1. 緒言

国土も狭く、地形的にも山地が多く、可住地面積の小さい国では、石油やガス等の貯蔵用地は従来から住宅地と競合し、これを避けるために海岸の埋め立て地が利用されてきた。しかし、埋め立てによる海中汚染の防止、コスト上昇、海岸線の美観の欠損等の理由から、今日では、埋め立て地に石油やガスの備蓄用地を求めるのは必ずしも得策とはいえない。そこで、地上のみならず、地下にも空間を設け、土地を立体的に利用する工夫がなされる必要がある。

石油やガスの地下貯蔵については、欧米では軍事上の見地からもさかんに研究されてきたり、またわが国でもトンネル技術の応用あるいは鉱山の廃山の利用といった見地から研究がなされてきたりしている。

本研究では、液化天然ガスの地下空洞内の貯蔵に重点を置き、とくに -160°C という低温の影響により岩石はどのような挙動をするのかに着目して、岩石の強度的な実験結果ならびに偏光顕微鏡観察、X線回折法による岩石の組織の変化を調べた結果について述べる。

2. 低温の影響を受けた岩石の強度変化

岩盤内に空洞を設け、液化天然ガスを直接あるいは間接的に貯蔵する場合、岩盤は低温の影響を受けるであろう。極低温におけるセメントモルタルの力学的性質を求めた勝山らの実験結果によると、 -175°C では圧縮強度・引張強度とも常温の2倍強となっている。従って、岩石の強度についても同様のことが予想される。

しかし、一度低温の影響を受けた岩石がまた常温にもどった場合、あるいは低温・常温のサイクルを数回繰り返した場合の強度はどうなるであろうか。安全のために空洞内部を時々点検することが予想され、この場合岩盤表面近くは必ず常温にもどるはずである。こういった観点から、それぞれ所定の温度で処理された試料について実験を行なったが、実験に先立ち、試料の温度が低温域内で中心まで所要の一定温度になっている必要がある。

そこで、試料を一定温度に保つべき時間を決定するために、まず計算にて試算し、さらに筆者の高温における実験²⁾等から総合的に勘案して20分ほどよいことがわかった。しかし、さらに安全を期し、今回は試料を炉が所要の一定温度になる前から入れておき、所要温度になつてからさらに30分間一定温度を保つことにした。

なお、熱処理される前の試料はいずれも端面の平行度及び平坦度にはとくに留意して成形し、精度 $1/100\text{mm}$ ダイヤルゲージにて測定し、すべての試料について中心部及び周辺部の平行度及び平坦度の誤差を3%以内に収めるようにした。

成形された試料は、冷却速度 $20^{\circ}\text{C}/10\text{min}$ で徐々に冷却し、次の2通りの方法で熱処理した。

- (1) 所要温度に達してから30分間その温度を保った後、炉からとり出し空気中で常温までもどしたもの
- (2) (1)で述べたサイクルを3回繰り返したもの

以上の2種類の処理を施した試料を用意し、これらについて圧縮試験、引張試験を行なった。なお、引張試験は圧裂試験で代用した。また、実験に使用した岩石試料は表-1のとおりである。

次に、図-1は圧縮強度の変化を、また、図-2は引張強度の変化を表わしている。これらの値はそれぞれ試料5〜6個の平均値である。もともと岩石には潜在的にマイクロクラックが存在し、いわゆる“強度的なバラツキ”を生じているうえに、さらに温度等の外的影響を与え、もともとのマイクロクラックをさらに助長する

表-1 実験に使用した岩石試料

岩石の種類	通 称	産 地
花 崗 岩	大島みかゲ	愛媛県越智郡大島
安 山 岩	久万石	愛媛県上浮穴郡久万町

か否かで強度が左右され、さらにバラツキが大きくなる。

図-1 では、圧縮強度の変化にはバラツキの影響が大きい。傾向として冷却温度が低いほどやや強度が低下し、いずれの岩石においても、1 回熱処理された試料よりもサイクルを3 回繰り返されたものの方がやや強度が低下することがわかる。

図-2 は、引張強度に及ぼす冷却温度の影響を示している。

圧縮強度と異なると、岩石内に少しでも弱い部分があるところから引張破壊が生ずるから、冷却温度に従っていずれの岩石も全体として強度が低下していく様子がよくうかがえ、引張強度は圧縮強度よりも低温の影響が大きいことがわかる。また、安山岩では強度低下の様子が温度の1 回と3 回ではほぼ大きな差が出ていないが、花崗岩の場合には1 回と3 回の影響の差が顕著にあらわれている。このことは、安山岩よりも花崗岩の方が構成鉱物粒子が大きく、それだけ熱による収縮、膨張量も大きく、従って、隣接鉱物粒子間に大きなクラックを生ずることになる結果であると思われる。

次に、圧縮強度試験における応力-ひずみ曲線から、立ち上がり附近、破壊応力の30%附近、破壊応力の70%附近の接線弾性率すなわち、 E_t 、 E_{30} 、 E_{70} をそれぞれ求めたが、今後の計算に用いるため E_{30} を図示したものが図-3 であり、同様の応力附近のポアソン比、 μ_t 、 μ_{30} 、 μ_{70} を求め、 μ_{30} を図示したものが図-4 である。

図-3 と図-4 とを比較してみると明らかなように、花崗岩と安山岩とでは全く異なった様相を呈している。

すなわち、まず接線弾性率では、安山岩よりも花崗岩の方が常温に於いては値が大きく、冷却温度が低いほどその値が低下していくが、逆に安山岩では冷却温度の低下と共に値が上昇していく傾向をみせている。このことは、常温では同じ応力に対し花崗岩の方がひずみにくいが、冷却温度の低下と共にひずみやすい状態になることを表わしている。逆に安山岩は、常温では花崗岩よりひずみ量が大きいが、冷却温度と共にひずみにくくなることからわかる。ただし、安山岩については、バラツキ状態から、値は常温のそれとあまり変化がないと考えることもできる。一方、ポアソン比では、図-4 に示されているように、常温では安山岩の方が大きい。

これは、安山岩より花崗岩の方がマイクロクラックが大きく、圧縮軸方向のマイクロクラックの空隙を埋める方向に圧縮エネルギーが費やされる結果、横ひずみに対して縦ひずみの方が大きく、従ってポアソン比の値としては花崗岩の方が小さくなるものと考えられる。また、安山岩では、冷却温度の低下と共にポアソン比の値も低下をみせており、このことは、冷却の度合いが高いほどクラックが大きく成長していくことを示している。

一方、花崗岩の方は、1 回も3 回も温度によるバラツキが大きく、ゆえにもある傾向がはっきりとあらわれないとはいえない。

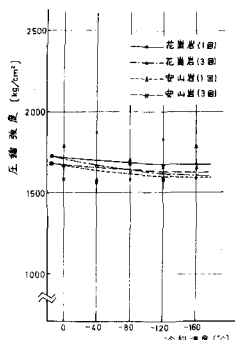


図-1 冷却後空气中で常温にもどした場合の圧縮強度の変化

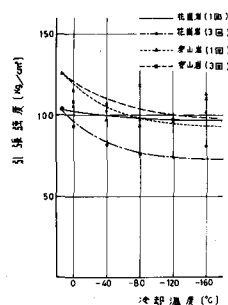


図-2 冷却後空气中で常温にもどした場合の引張強度の変化

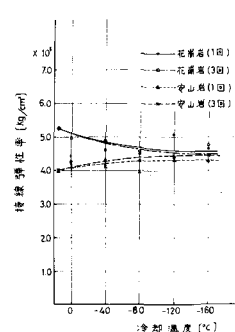


図-3 冷却後空气中で常温にもどした場合の接線弾性率の変化

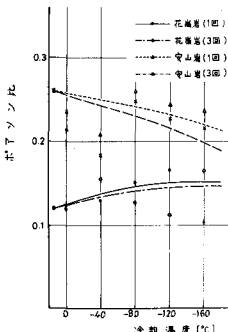


図-4 冷却後空气中で常温にもどした場合のポアソン比の変化

3. 低温の影響を受けた岩石の組織の変化

1) 顕微鏡による岩石の組織の変化の観察

冷却温度の影響を受けた岩石の組織の変化を偏光顕微鏡にて観察した結果をとりまとめたものが写真1~4である。このうち、写真1及び写真2は花崗岩の組織の変化を示している。冷却温度の低下の度合に応じてクラックの大きさも大きくなっていくことがよくあらわれている。とくに1回よりもサイクルを3回繰り返す方が、クラックの大きさや数もふえていくことがよく観察でき、これらのことは図1~4で述べた結果と裏付けている。

次に、写真3及び写真4は安山岩の組織の変化を示しているが、構成鉱物粒子が花崗岩に比べて非常に小さく、従って温度変化による収縮、膨張量も花崗岩に比べて非常に小さい。このことは、隣接鉱物粒子間に花崗岩ほど温度の差によるクラックの発達が大きくなることを意味する。以上のことは、図-3及び図-4で述べた結果と裏付けている。ただ、今回の偏光顕微鏡観察では安山岩におけるマイクロクラックの発達を十分観察することができなかった。

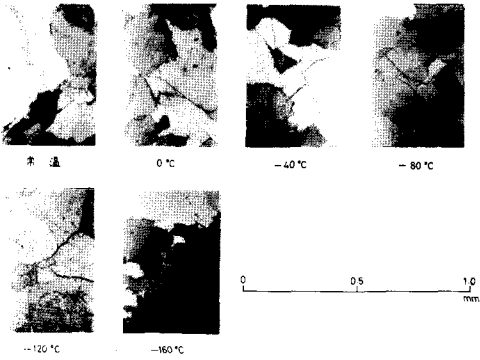


写真-1 各温度に冷却し常温にもどした場合の花崗岩の組織の変化(サイクル1回)

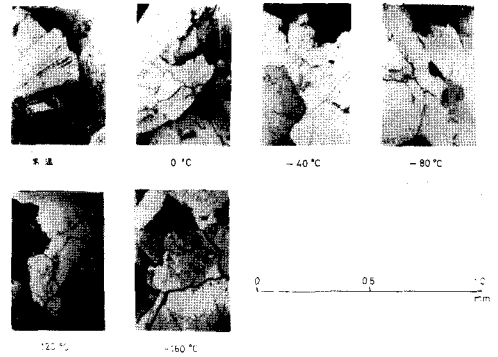


写真-2 各温度に冷却し常温にもどした場合の花崗岩の組織の変化(サイクル3回)

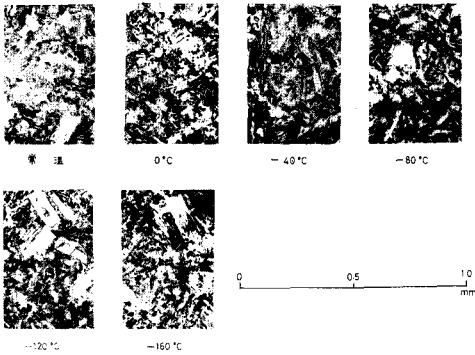


写真-3 各温度に冷却し常温にもどした場合の安山岩の組織の変化(サイクル1回)

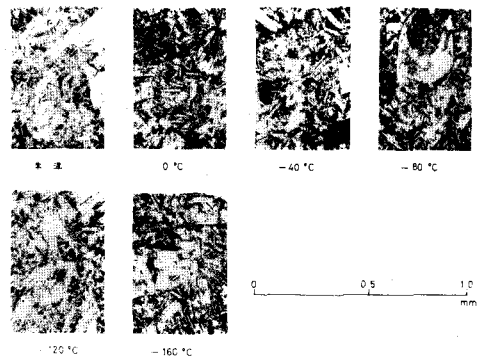


写真-4 各温度に冷却し常温にもどした場合の安山岩の組織の変化(サイクル3回)

2) X線回折法による構成鉱物粒子の結晶軸の温度変化

各冷却温度で熱処理された試料について、X線回折法にて構成鉱物粒子の結晶軸の変化を調べ、とりまとめたものが図-5である。結晶軸の長さは、たとえ温度による影響を受けたとしても、もし挙動が回復性であると仮定するならば、冷却後常温にもどせばもとの常温の長さにもどるはずであるが、図-5からわかるように、Quartzを除いてはもとにもどっていない。いいかえると、このことは低温の影響を受けたとき、Quartz以外の結晶軸

はずだに回復性を失っており、いわば変質した状態であるといえる。すなわち、常温にもどった結晶格子間隔はもとにもどらないものと思われる。

さて、Biotite についてみると、b 軸、c 軸とも冷却温度と共に変質が大きくなっていく様子がよくあらわれており、とくに c 軸の変質は著しい。一方、a 軸は、b 軸及び c 軸とは異なり、逆に伸びている。これは、b 軸、c 軸の縮みが遂に a 軸にしわ寄せされて伸びたのか、あるいは a 軸は単独に伸びる性質をもっているかいずれかであるが、今の段階では明らかでない。

次に、Albite については、c 軸の縮みが顕著であり、冷却温度と共に変質していく様子があらわれている。また、Quartz については、a 軸、b 軸、c 軸とも変質せず、今回の冷却温度範囲では弾性的な挙動を示すことがわかる。

以上のことから、冷却しそれを常温にもどした場合、Quartz と Biotite 又は Quartz と Albite とが接触している境界面にフラックが生じやすいのではないかと推察される。

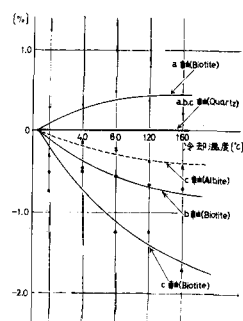


図-5 冷却後空气中で常温にもどした場合の結晶軸の変化

4. 結 言

岩盤内に空洞を設け、液化天然ガスも直接あるいは間接的に貯蔵する場合、安全性から考えると温度変化による低下したときの強度で設計する方がより現実に近いといえる。そこで、今回は岩石試料とそれぞれ所定の温度に冷却し、それを空气中で常温にもどしたもののあるいはそれらのサイクルを3回繰り返したものについて、強度的な変化を調べ、組織の変化を観察した。それらの結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 圧縮強度については、花崗岩、安山岩ともわずかながら冷却温度と共に強度の低下がみられ、冷却サイクル3回のものの方が1回のものよりやや強度が低下する。
- (2) 引張強度については、花崗岩、安山岩とも強度低下がみられ、とくに花崗岩では冷却サイクル3回のものの強度低下が著しい。
- (3) 接線弾性率については、安山岩は冷却温度にあまり大きな影響を受けないが、花崗岩は冷却温度と共に低下を示し、ひずみやすくなることを示している。
- (4) ポアソン比から、冷却温度に対し、安山岩はそれほど大きなフラックが生じないことが推察され、花崗岩には温度低下と共に大きなフラックが生じることを推察される。
- (5) 偏光顕微鏡による組織の観察結果から、安山岩は冷却温度によるフラックの発生が顕著に認められなかったが、花崗岩は顕著に認められ、冷却サイクルが多いほどフラックが大きくなることが観察された。
- (6) X線回折法による構成鉱物粒子の結晶軸の観察結果から、冷却し常温にもどした場合、Quartz と Biotite あるいは Albite とが接触している境界面にフラックが生じやすいことが推察された。

謝 辞 本研究遂行にあたり、愛媛大学工学部海洋工学教室技官二神治氏、坂下裕明、向井英二両君の協力を得たことを記しここに感謝する。また、愛媛県土木研究所長岡崎計孝氏、(株)マリエ、(株)浪辺測海の御協力を賜ったことをここに記し、厚く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 勝山邦久、厨川道雄、加藤真蔵：低温におけるコンクリートモルタルの強度と試料内に生ずる熱応力；日本鉱業会昭和53年度春季大会講演要旨集、P.131～P.132
- 2) 稲田善紀、寺田亨、伊藤一郎：岩石の線膨張係数について；水曜会誌、オ17巻、オ5号、昭和46年11月、P.200～P.203

A Fundamental Study on Underground Storage
of Liquefied Natural Gas
— Characteristics of Rocks at Low
Temperature—

By Yoshinori INADA and Norio YAGI

One of the problems of underground storage of L.N.G. is a rock stability at low temperature or after having been at low temperature.

In this study, the physical and the mechanical properties of rocks which had been at low temperature of 0, -40, -80, -120, -160°C are investigated. But every sample was at normal temperature during the physical and the mechanical tests.

Main results obtained are as follows :

- 1) Both the compressive and the tensile strength of these rocks are smaller than ones of the rock which had not been at low temperature.
- 2) Increase of micro cracks of the Granite with falling temperature which was guessed from the test results of the Young's modulus and the Poisson's ratio, was observed by the microscope.
- 3) The results of the X-Ray diffraction show that cracks seem to be grow between Quartz and Biotite, and between Quartz and Albite in the Granite and the Andesite.