



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	凍結 : 融解による岩石の風化
Author(s)	福田, 正己; FUKUDA, Masami
Citation	低温科学. 物理篇, 32, 243-249
Issue Date	1974-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18262
Type	departmental bulletin paper
File Information	32_p243-249.pdf



凍結—融解による岩石の風化*

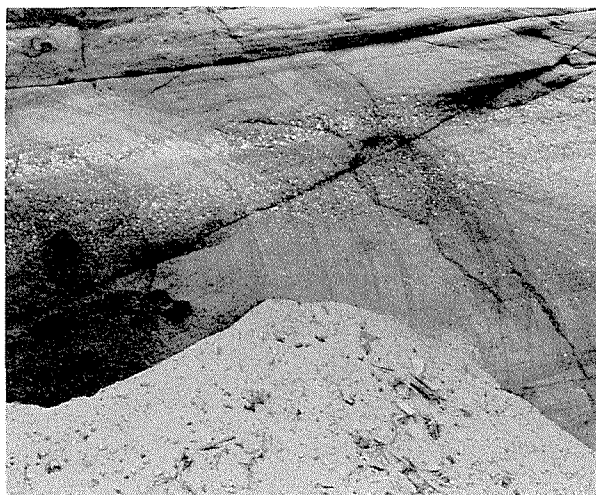
福田正己
(低温科学研究所)
(昭和49年10月受理)

I. はじめに

岩石内の空隙の水が、過冷却凍結して岩石の破壊されることについては、すでに報告した^{1)~3)}。岩石の種類(岩質)によって、凍結破壊抵抗性が異なるが、他の外的要因で破壊が生ずる場合との相違に着目して、凍結—融解による岩石風化の実験を行った。この研究は、野外の基盤岩体に刻まれた石像などの文化財保存のための地学的基礎調査に関連してなされた一部である⁴⁾。関連した実験のなかより、寒冷な条件下で生ずる破壊(凍結—融解の繰り返しによる破壊)についての実験とその結果について述べる。

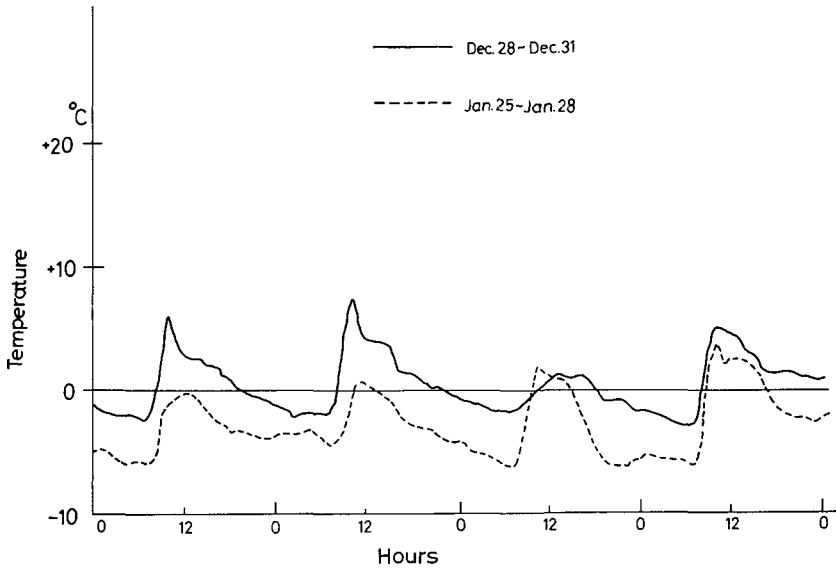
研究事例として、北海道余市町フゴッペ洞窟、九州大分県臼杵市石仏群を構成する岩石、及び比較のために天北地域第三紀層をとり上げた。実験に先立って、基盤岩体の剝落量と剝落をひき起こす原因を知る目的で、以下のような測定を行った。フゴッペ洞窟外側露岩部(地表より4m高位置)に、温度測定用素子を埋め込んで年間を通じた温度測定を行った。表面剝落量を推定するために露岩表面に、ベンチマークを打ち込んで剝離量を測定した。さらに崩落全量測定のために、堆積物質受け容器を斜面前部に設置して1年間の堆積量を測定した。その結果、冬季に著しい剝落が観測され

た。剝落量は厚さ5mmであった。第1図は3月下旬における剝落物堆積状況を示している。夏および秋の豪雨時の大規模崩落は、観測を行った3年間には発生しなかった。剝離の著しい冬季の露岩表面温度変化を第2図に示す。かなりの頻度で凍結—融解が繰り返されていた。以上の野外での観測より、この基盤岩石が、凍結—融解の繰り返しによって容易に破壊されることがわかった。そこで、現場にて採取した岩石試料をもちいて、凍結—融解の繰り返し



第1図 洞窟露岩からの剝落堆積物

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1330号



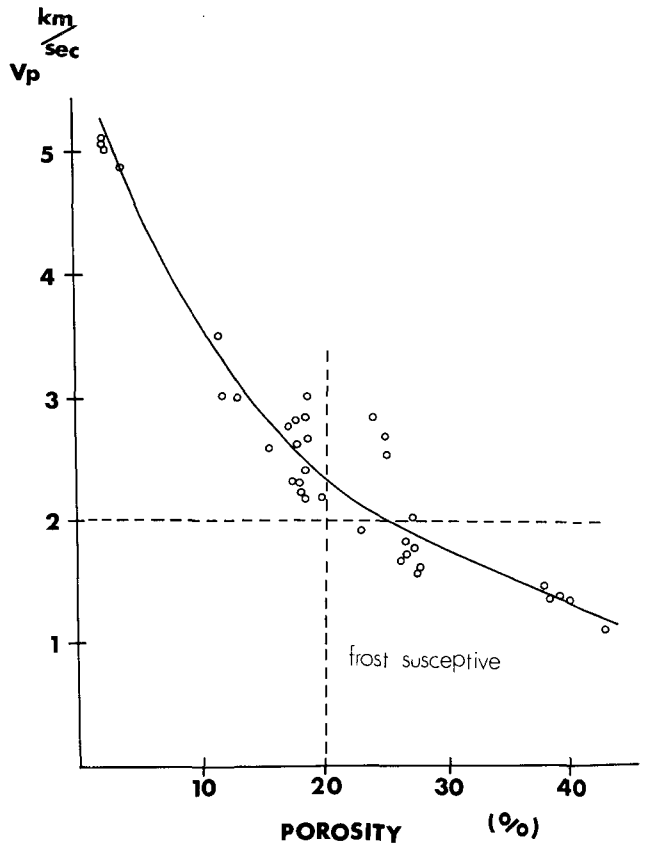
第2図 露岩表面の温度変化

による風化破壊様式の把握を目的とする各種の実験を行った。

II. 風化岩石の諸性質

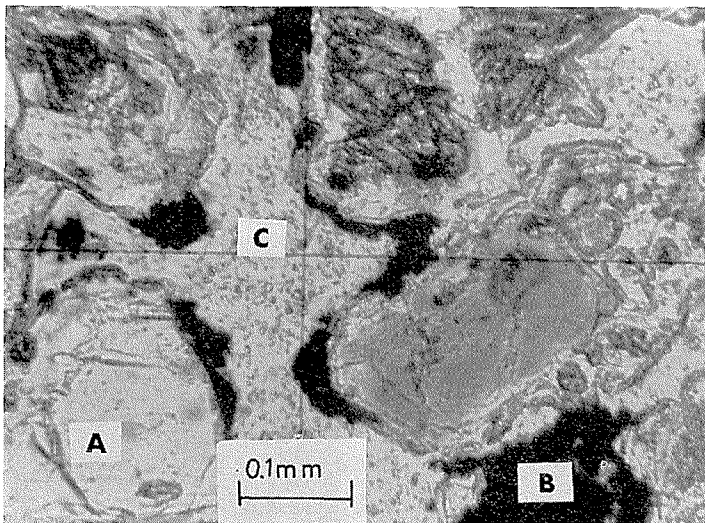
実験にもちいたフゴッペ基盤岩石は、第三紀凝灰岩である⁵⁾。天北地域第三紀泥岩と九州大分県地方の阿蘇泥熔岩を比較に実験試料としてもちいた。フゴッペ凝灰岩はかなり風化が進んでいて脆い。軽石を含む層では、粘土化が著しく、とくに脆くなっている。阿蘇の泥熔岩は、阿蘇火山噴出とカルデラ形成活動に伴う流下泥岩である。熔結度合が低く、普通の凝灰岩に近い性質を持つ。この2種の岩質は、いずれも熔結時に揮発ガスや水蒸気の放出によって、かなり多孔質であった。

岩石の風化状態を定量的に把握するために、空隙率・一軸圧縮強度・超音波伝播速度・薄片による組織の観察を行った。さまざまな種類



第3図 空隙率と弾性波速度の関係

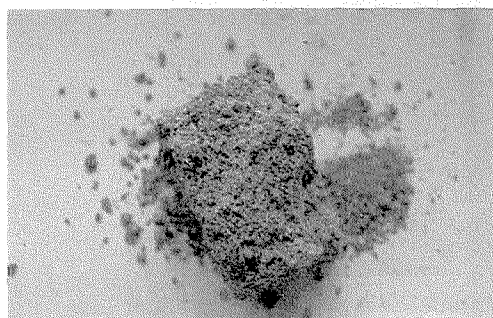
の岩石について、空隙率と超音波伝播速度 (V_p) を測定して得られた両者の関係を、第3図に示しておく、南雲⁶⁾、大久保⁷⁾らが報告しているように、 V_p は岩石の密度・ヤング率等の弾性係数によって決まる。さらに密度・弾性係数は、岩石の骨格組織・空隙の状態・含水量等の因子に依存する。第3図では、空隙率の増加に伴って、 V_p の減少する傾向が示されている。相関をとると、 $n=B \cdot e^{-A \cdot V_p}$ の関係が得られる。ここで n : 空隙率 (%), V_p : 速度 (km/sec) A , B : 常数である。新鮮な岩石ほど空隙率も小さく速度も大きい。風化が進んでいる状態では、一般には空隙率は20%以上となる。岩石の空隙は風化過程で増加・拡大するがそれは次のような原因による。凝灰岩は本来の性質としてある程度の空隙を持っている。それは前述のように、揮発ガス放出に由来する。しかし、風化のすすんでいない凝灰岩では、空隙率が10%を越えることはない。数10%にもおよぶ空隙率は風化過程で生じたものである。それは岩石中の膠着物質が溶脱することによって生じる。一般に膠着物質はガラス質であって、一次造岩鉱物に比べて化学的に不安定で、溶脱されやすい。溶脱の結果、空隙の拡大・増加が生じて、骨格組織が切断される。つまり、 V_p の低下をも生ずることになる。実験にもちいた試料の空隙率はいずれも20%を越えていた。次に岩石内部の骨格組織と空隙の状態を観察した。第4図に顕微鏡写真を示す。鉱物粒子(図中A)間に不透明の非結晶(図中B)が介在している。これが膠着物質である。そして中心部には0.2~0.3mmにも達する空隙(図中C)がある。風化の進んでいない場合には、こうした空隙は見られない。以上から、凝灰岩が風化の進行に従って、膠着物質の溶脱が生じ空隙の増加・拡大とその結果の強度の低下という過程をとることが推定される。こうした岩石の空隙内の水が凍結する場合には、かなり有効な破壊力が発生するものと予想される。これは、さきに述べた冬季間の著しい剝落、および0°Cを前後する温度変化という事実によって、裏付けられる。



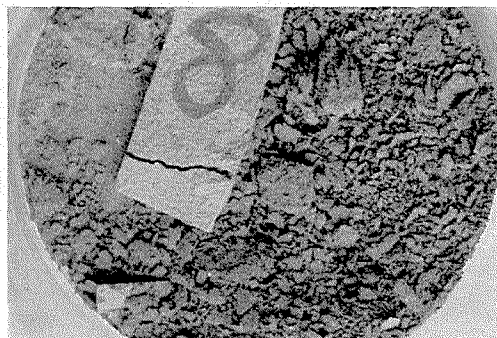
第4図 凝灰岩薄片の顕微鏡写真

III. 凍結—融解の繰り返し試験

冬季間では、かなりの頻度で凍結—融解が繰り返すことが観測された(第2図)。そこで温度幅 $+10^{\circ}\text{C}\sim-15^{\circ}\text{C}$ 、1日1サイクルの温度変化を制御することが可能な低温室内に岩石試料を置いて破壊試験を行った。コンクリートに対する凍結抵抗性試験では、加速試験を目的として、 $+5^{\circ}\text{C}\sim18^{\circ}\text{C}$ 1サイクル3時間で試験を行っている⁸⁾。今回の実験では、温度変化をゆっくりに行って、空隙内の水が完全に凍結—融解を繰り返させるためと、なるべく現実の条件に近づけるために1日1サイクルとした。岩石の水分条件として、次の3つの条件を設定した。十分に脱気した蒸留水に入れて、真空ポンプで排気した状態を24時間以上保ち、完全水分飽和とした。 110°C 24時間炉乾燥を行って、完全乾燥とした。エチレングリコール水溶液中に48時間以上放置して飽和させた。この溶液は -15°C では凍結しない。岩石試料の大きさは $5\times 5\times 5\text{ cm}$ 立方体であり、数個の試料内には熱電対が埋め込んであり、内部の温度変化を記録した。以上の準備ののち、凍結—融解を繰り返して、適当なサイクル数ごとに形状の変化記載(モータードライブカメラによる接写)や破壊損失量の測定を行った。その結果、第5図のような破壊が生じた。いずれも完全水分飽和条件で30サイクル後である。泥岩は3サイクル経た時点で明瞭な割れ目を生じ、10サイクルでは数片のブロックに細分した。サイクル数増加とともに細片化が進んで、30サイクル後では完全に破壊された。フゴッペ凝灰岩では試料が2分されることはなかった。しかし、図で明らかなように、表面からの粒子の剥落が生じて損失量は20%以上にも達した。これに対して乾燥条件および不凍液による飽和条件の試料は、いずれの岩質においても30サイクル後に破壊は見られなかった。泥岩の水分飽和時の破壊を観察すると、 $-5^{\circ}\text{C}\sim-7^{\circ}\text{C}$ で過冷却が破れて凍結し、潜熱による昇温が生ずる。再び冷却が開始して $-5^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ までの間で、試料表面に亀裂が発生する。サイクル数が増加するにつれて、この亀裂の密度も増えて細片化が進んだ。凝灰岩では、こうした顕著な亀裂形成は見られない。比較のために各種の岩石試料について同様の試験を行った。その結果、空隙率20%以上の岩石試料が水分飽和した状態で、凍結—融解を繰り返すと30サイクル程度で顕著な破壊が生ずることがわかった。また空隙内の水が凍結しなければ破壊は生じない。乾燥した試料でも破壊は生じないことから、鉱物の熱膨脹係数のちがいによる熱応力は、この程度($20\sim 25^{\circ}\text{C}$)の温度変



a: フゴッペ凝灰岩 (30 サイクル後)

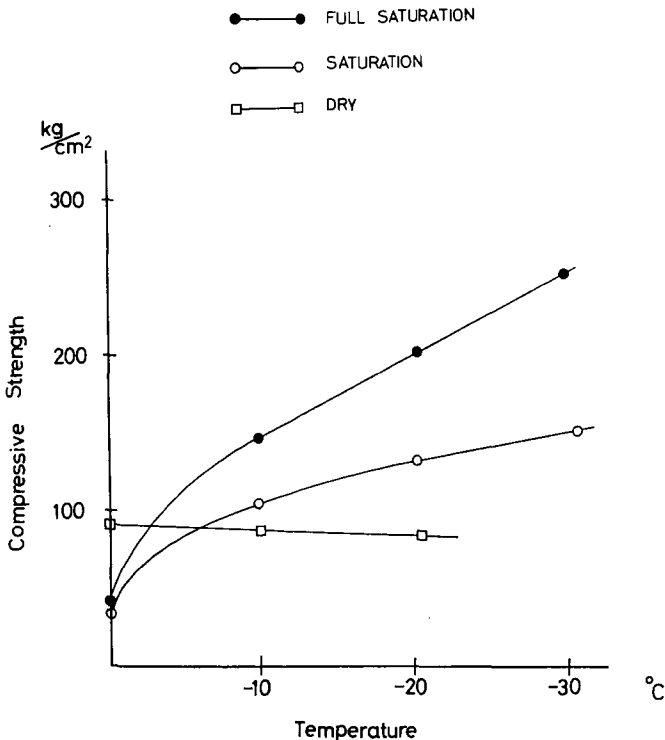


b: 天北第三紀泥岩 (30 サイクル後)

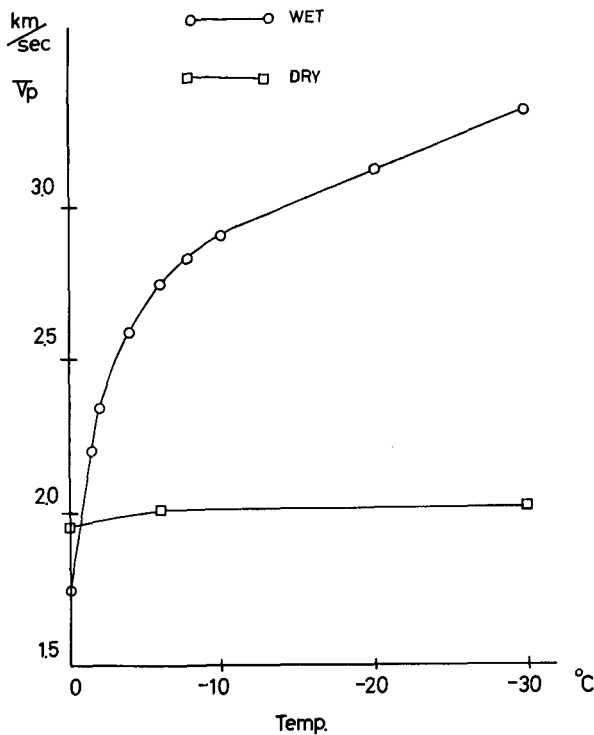
化では破壊をひきおこすことはない。しかし、どの程度の水分条件であれば破壊が生ずるかについては、岩石試料を飽和と乾燥の間の一定の湿度条件に保つことが出来なかったために、限界含水条件は得られなかった。

IV. 凍結時の強度変化について

空隙率の大きい岩石が凍結した状態に保たれると、強度が増加することがすでに報告されている⁹⁾。第6図はフゴッペ、凝灰岩の凍結時一軸圧縮強度変化を示している。含水条件は、乾燥、完全飽和、自然飽和の3通りである。水がまったく含まれていない場合には、温度の低下に伴い、わずかに強度は減少している。飽和条件では、温度低下に伴って強度は大きくなっている。この強度変化は、空隙中の水が凍結したのち、氷の結晶が膠着物と同様の働き、つまり鉱物粒子の結合作用を生じたためと説明される。第7図は同一の試料をもちいた V_p の温度変化を示している。この場合にも、温度低下につれて V_p は大きくなる。Timur¹⁰⁾ によれば、含水凍結岩石の V_p は、氷と鉱物粒子および水の速度の調和平均値をとる。ところが、乾燥条件では V_p はほとんど変化がない。これは鉱物粒子の V_p は、温度依存性がほとんどないことを意味する。同様に氷も 0°C から -30°C の温度範囲では、 3.8 km/sec から 4.2 km/sec という V_p の値をとる。従って、岩石の V_p が含水条件で温度依存性があるとすると、それは空隙内の水と氷の比率によるものと考えられる。 -10°C までの温度域で、 V_p が急に大きくなることは、この範囲内で不凍結水分が急に減少することを反映しているものと思われる。ただ空隙内の水



第6図 凝灰岩凍結時の一軸圧縮強度変化



第7図 凝灰岩凍結時の弾性波速度変化

れている空隙率の小さい岩石では、破壊はわずかしか生じない。空隙の多いことで骨格組織が切断されていることが推定されるので、破壊のされやすさの目安として、空隙率のある限界値で代表させてみる。20% 以上の場合には、凍結—融解の繰り返しが破壊を生じやすくなることがわかった。破壊の様式は構成粒子の大きさや潜在割れ目の状態によって異なる。砂質な凝灰岩では、細粒物の剥落が著しく、泥岩では細片状に破碎された。また、凍結状態を保つと、温度が低くなるのに従って力学的強度は増加した。しかし、水を含まない場合にはこの効果は生じない。過冷却凍結による破壊機構については、今後の問題として残された。

本研究にあたり、文化庁、余市町教育委員会に御協力いただいた。また東京大学理学部地理学教室故岩塚守公助教授には多くの御助言をいただいた。以上の諸機関および諸氏に深く感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 福田正己 1970 凍結—融解による岩石の風化について. 地理学評論, **43**, 408.
- 2) 福田正己 1971 岩石内の水の凍結—融解について (序報). 低温科学, 物理篇, **29**, 225-229.
- 3) 福田正己 1972 岩石内の水の凍結—融解について II. 低温科学, 物理篇, **30**, 183-189.
- 4) 余市町 1973 史跡フゴッペ洞窟保存工事報告, 55 pp.
- 5) 杉本 良・他 1957 地質図幅説明書・小樽東部. 北海道立地下資源調査所.
- 6) 南雲昭三郎 1957 碎屑岩を伝わる弾性波速度に関する研究. 地質調査所月報, **8**, 505-593.
- 7) 大久保彪・寺崎 晃 1971 岩石の物理的性質と弾性波速度. 土と基礎, **19**, 31-37.

が、どのような形で不凍結状態にあるのかは今後の問題となる。

以上の凍結時の物性変化は、空隙内の水が凍結によって膠着物質として粒子間の結合力を強めたためと考えられる。これは風化によって空隙が増加・拡大した岩石ほど、飽和凍結で力学的強度の増加効果が生ずることを意味する。将来、凍結工法をこうした風化岩石にも適用しうる可能性が示された。

V. まとめ

風化によって空隙が増加・拡大した岩石は、次の条件下で容易に破壊されることがわかった。空隙中に水が十分に含まれていて、凍結—融解を繰り返すことで破壊が生ずる。しかし、骨格組織が十分に全体にわたって形成さ

- 8) 永倉 正 1963 コンクリートの凍結抵抗性に関する研究. 学位論文集, **8**, 電力中央研究所, 190 pp.
- 9) 田沼邦雄・福田正己 1971 寒冷な条件下で示す風化岩石の諸性質について. 地学雑誌, **80**, 302-310.
- 10) Timur, A. 1968 *Velocity of Compressional waves in porous media at permafrost temperatures*. *Geophysics*, **33**, 548-595.

Summary

This paper presents the experimental work carried out to study rock weathering processes by multi-cycle freezing-thawing action under severe climatic environments. The surface of a tuff bedrock of the tertiary era at Fugoppe cave near Yoichi in Hokkaido was selected for this study. The rate of crumbling was measured by the degree of leveling of the surface relief. Both the daily and annual temperature alternations were measured by an on-the-spot recorder installed at this location. These measurements and field observations on the bedrock surface suggested that the activest crumbling takes place in winter and the multi-cycle freezing-thawing action initiates the active crumbling. The frost resistance of the bedrock was estimated by chipping rock specimens out from the bedrock and measuring their physical properties in the laboratory.

The microscopic observations of thin sections indicated that each specimen had such a distinctive structure as the existence of very large voids developed in the rock texture. The measurements also showed the high porosities and the low velocities of an ultrasonic wave passing through the specimens. When the specimens with different weathering degrees were compared with each other, the processes of dissolution of cementing materials into rock forming minerals were traced. These cementing materials, which consist of amorphous glass and clay minerals, are very unstable in chemical reaction with water. So, in the process of weathering, they are easily removed as chemical solution, causing the development of voids in rocks. The absence of cementing materials and the development of enlarged voids make weathered rocks easily breakable under a destructive impact.

If a porous rock in the state of full saturation of water in its voids is cooled to some degrees below 0°C, water in the voids is supercooled and frozen spontaneously, disintegrating the rock into small pieces by the expansion of its volume. So, the higher porosity weathered rocks have, the more susceptible they are to frost damage.

More than 200 different specimens were examined as to frost resistance, and their properties measured. It may be concluded that the percentage of the specimen with the critical porosity to frost damage stands for nearly 20% or more. A knowledge about the mechanism of frost damage will be of great help in a further study of rock weathering processes, if it is elaborated in connection with physicochemical properties of supercooled water in voids.