岩石風化についての観察と実験

—とくに史跡の保存に関連して—

岩 塚 守 公*・福 田 正 巳**

Some Observations about Rock Weathering at Fugoppe Cave Wall, Hokkaido

Shukoh IWATSUKA* and Masami FUKUDA**

Abstract

On the wall of interior cave Fugoppe, many carvings consisting of reliefs were inscripted. Recently intensive crumbling of the cave wall were observed. In order to preserve the wall carvings, the investigations on basal rock of cave were carried out.

The entire cave consists of Tertiary tuff and tuff breccia. Weathering of the exposed rock portion is severe and crumbling in the form of sand granules has occurred. There are a number of joints in the bed rock and at some parts blocks of rock have fallen out along the lines of joints.

For the purpose of obtaining a concept of the state of weathering and crumbling of the cave walls, on-the-spot investigations and experimental works consisting of microscopic examinations of rocks, measurements of void ratios and monoaxial compressive strengths, measurements of elastic wave velocities (V_p) by Ultrasonic methods, freezing and thawing tests, vibration experiments and measuring of crumbling of outcrops were carried out in the present study.

As a result, the peculiar weathered condition of the bed rock, especially the increase and enlargement of voids accompanying weathering process was pointed out. However, when the cave has been closed off for a long period, the cave walls were preserved with relatively little weathering, and attention should be paid to this feature.

I はじめに

野外の基礎岩体に刻み込まれた石像や彫刻壁面は日本各地にある。近年これらの文化財に保存策をほどこす計画が具体化し、実施にうつされた事例もある。この報告では、とくに北海道余市町郊外のフゴッペ洞窟内の壁面彫刻の保存に関する調査のうち、岩石の風化（その過程と機構）についての若干の考察を扱う。岩石風化やその結果生ずる崩壊現象は、地形学の分野では外的営力と岩質の差に注目して、それらが斜面形や谷地形などに

反映される過程を中心課題として来た。対象とする風化現象も地質学的時間スケールで考えており、現在の基盤岩石の崩落や破壊の機構と過程の研究とは、かならずしも一致したアプローチをとっていない。しかし、数年～数10年の時間尺度で生ずる山地崩壊や小規模な岩体の崩壊が長期間にわたって断続する結果、斜面形など地形形成に反映される。したがって、石像などの崩落破壊現象は、地形形成とは直接的な関連を持たぬにせよ、この現象についての地形研究の立場からするアプローチは、基盤岩石の風化状態の把握につい

* 東京大学理学部地理学教室 昭和47年12月死去 Department of Geography, University of Tokyo.

** 北海道大学低温科学研究所 The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University.

て、土木工学的見地とは異なつた視点と研究方法とを提供するであろう。とくに将来にわたる崩壊防止保存について、ある程度の有効性を持つであろう。この報告は、その一つの事例である。調査は昭和43年—45年にわたつて、余市町教育委員会からの委託によつて行なわれた。また、保存工事事業は昭和47年に完了した²⁾。

II 洞窟および周辺地形について

余市町東北部地域では、なだらかな丘陵部がフゴッペ海岸付近で海にせまり、一部フゴッペ岬となつて海蝕崖をつくる。洞窟のある部分は、この丘陵が浅い谷で開析されて岬状にのびる末端部にあたっている(第1図)。山地部に入るフゴッペ河やモチャ沢、チシブタシナイ沢を中心として、1次支流河川が丘陵全体にわたり発達している。しかし開析谷は深く谷を切りこむことがない。そのため、谷壁は不明瞭で、なだらかな丘陵表面はゆるやかに波状にローリングしている。これは北海道各地の、とくに第三紀層地域に見られる地形に共通な特徴であつて、いわゆる周氷河性地形を呈している³⁾。形成年代の指標となる火山灰等が発見されず、編年上の対比はなされていない。しかし、すでに浅く広い谷状の地形があつて、新規の谷がわずかにその中に発達すること、および北海道各地にさまざまな化石周氷河現象⁴⁾が観察されていることなどから、かつての寒冷な気候環境下での地形形成を示唆するものと思われる。また、フゴッペ川では、中流域まで低地が入りこみ、河川の流路沿いに段丘は発達せず埋積谷状をなして

第1図 フゴッペ洞窟周辺の地形図

いる。海岸地域にも海成段丘は見られない。海岸線に平行して5m 比高の高まりが東西に走るが、これは砂丘で、2列の海岸砂丘が認められる。各河川の河口部が、この砂丘列によつて閉そくされたために、砂丘の内側には比較的広い低地が広がる。以上の地形からも、寒冷な環境下にあつて地形形成のなされたことが示唆される。なお、海岸線に沿つた砂丘状の高まりは、洞窟の堆積物と入口を閉そくする堆積条件に関連し、後にのべるボーリング調査の結果にある程度の説明を与える。

洞窟の開口部は東向きで、内部は高さ7m、幅6m、奥行き7mである。写真1はその前面を示す。ここで問題となる壁面彫刻は、洞窟の一番奥の壁面にほりこまれている。彫刻は磨研による陰刻であり、きざみ込みの深さは最深部で1.5cm 前後

写真1 洞窟前面(手前は保存工事後完成した覆屋)

写真2 彫刻壁面(人像)

である。写真2はそのうちの人像である。堆積物によって被われていた入口が1953年に発見されてから、この陰刻のきざみ込み部分が次第に不明瞭となるのが観察された。ブロック状に崩落することはなかったが、細粒物質が壁面から徐々に剝落することがわかった。そこで彫刻面からの剝落防止のため、具体的な施工が必要となり、剝落の原因と、剝落の機構を知り保存策をたてる目的で、基礎的な調査を行なった。

III 壁面崩落と調査の概要

洞窟全体を構成する基盤岩石は、新第三系上部、鮮新世に属する凝灰岩・凝灰質砂岩・角礫凝灰岩である⁹⁾。洞窟内では凝灰質砂岩が卓越しているが、軽石質の円礫混り砂岩を伴う。岩層はほぼ1mの厚さごとに異なる。洞窟内部には東西方向の2本の節理が入っている。この節理沿いに風化が著しく進んでいる。年間を通じた外壁表面の剝離状態を観察したところ、冬の間に細粒の崩落物質が厚く洞窟基部に堆積することが確認された。しかし調査を行なった3年間、ブロック状の崩落は認められなかった。

こうした剝落による基盤表面の磨耗が、彫刻壁面に与える影響を知るため、各種の条件を規定した実験を行なった。剝落をひき起すもつとも有力な外力をさがしだし、何らかの方法でこの外力の作用を防止することが、保存策であると考えてからである。実際に行なった実験は、凍結—融解の繰り返し、乾燥—湿潤の繰り返し、振動試験、一軸圧縮強度測定などである。これらの実験が、具体的にどういふ外力条件にあたるかについて、さらに検討を加える。

IV 岩石の風化状態とその特徴

露頭の観察では、基盤岩石の凝灰岩はかなり風化が進んでいて脆い。とくに粘土化した軽石の円礫を含む地層で著しく風化が進んでいる。こうした風化状態を定量的に把握する試みとして、空隙率・一軸圧縮強度・超音波伝播速度の測定、薄片による検鏡などを行なった。

第2図は北海道各地の岩石を用いて測定した空隙率と超音波伝播速度の関係を示している。周波

第2図 岩石の空隙率と弾性波速度との関係
黒丸がフゴッベ洞窟試料

数400KHZでパルス法をもちいて測定した*。岩石の力学的性質を間接的に知る手法として弾性波速度は有効である。すでに南雲¹⁰⁾が指摘しているように、弾性波速度は岩石を構成する物質の密度やヤング率などの弾性係数によって決まる。ところで密度や弾性係数はさらに、岩石の骨格組織、空隙、含水などの内部構造に依存する因子によって支配される。とくにこれらのなかで空隙率と弾性波速度に明瞭な関係がなりたつ⁹⁾。第2図では、 $N = b \cdot e^{-a \cdot V_p}$ として表わされる両者の相関関係がえられた。ただしNは空隙率、 V_p は超音波速度、a, bは定数である。これは空隙の増加に伴う速度の低下を示している。図中黒丸が洞窟を構成する凝灰岩である。きわめて高い空隙率が測定され、これは薄片による検鏡結果とも一致している。この空隙の拡大と増加は、風化過程において膠着物質(セメント物質)が溶脱した結果と、凝灰岩の本来の性質とに由来する。後者は、火山起源噴出物が流下後再堆積する際の、揮発ガスや

* 物理探鉱技術協会(1962)「岩石試料の速度測定要項」に従って測定した。誤差は2%以内であつた。

水蒸気の放出による。しかし、風化のほとんど進んでいない凝灰岩の空隙率は10%以内にすぎず、一次空隙率もこれ以上大きくない。洞窟の凝灰岩の場合、高い空隙率は主として、風化の著しく進行した結果を反映するといえる。一軸圧縮強度*は、乾燥時で100kg/cm²以下、飽和含水時では50kg/cm²以下である。

岩石内部の構造や空隙の様子を観察するため、バルサムで固化させて薄片をつくり、偏光顕微鏡下の観察を行なった(写真3)。一次造岩鉱物としては斜長石が多く、有色鉱物としては輝石がみられる。また、鉱物粒子間には不規則な形状で連結しあう空隙部分(写真で黒くみえる部分)があり、間隙は0.5mmにも達する。写真から空隙部の面積を算出すると、40~50%を占めており、前述の空隙率とほぼ一致している。検鏡によつても、風化の進行→膠質物質の溶脱と一次鉱物の粘土化→空隙の増加・拡大→力学的強度の低下という過程が推定される。

写真3 岩石薄片の顕微鏡写真

V 外的な条件変化について

基盤岩石の表面剝離に関連する外的条件変化としては、温度変化(凍結—融解の繰り返し)、水分変化(乾燥—湿潤の繰り返し)、振動や衝撃による力(付近を通る列車の振動)、地衣や苔の付着などが考えられる。ただ地衣や苔は、洞窟の内壁面には付着していないので影響は無視できるであろう。

温度変化については、洞窟の外側露出部(高さ

* 5×5×cm の立方体に整形して行つた。

4 m) に温度測定用素子を埋め込んで年間を通じた測定と記録を行なった。その結果、第3図に示されるように、冬の間かなりの頻度で凍結—融解の繰り返し記録された。これは frost action (とくに frost shattering) として、直接に岩石の破壊をひき起す要因の可能性を示唆している⁹⁾。

風化岩石では吸水膨潤で破壊の生ずることがある¹⁰⁾。しかし、今回の実験では、吸水過程での破壊は生じなかった。また極度の乾燥下では、構成粒子面に介在する水までが除去され、粒子間の水

第3図 洞窟外側露岩表面温度の測定例

が形成していたメニスカスは消滅する。その結果、粒子間結合力が急減する。この過程は、岩石の内部摩擦係数の急変(乾燥時の)によって確認されている¹¹⁾。つまり乾燥時には、表面から粒子が剝離する可能性がある。たとえば乾燥時に振動等が加えられた場合には剝離が促進されるであろう。実際には、洞窟付近を通過する列車によつて、かなりの振動が生じている。その影響については田治米らがすでに報告している¹²⁾。それによれば、列車通過によつて生ずる洞窟内の振動は、周期30 CPSで加速度10ガル程度である。これは地震の場合、震度Ⅲに相当する。つまり、乾燥が著しい場合、この程度の振動で剝離がひき起される可能性も考えられる。以上の外的条件と剝離の程度との関係を知るため、次に室内実験によつて破壊試験を行なった。

VI 各種条件下での破壊試験

1. 凍結—融解の繰り返し試験

冬季間の表面温度測定では、かなりの頻度で凍

結一融解が繰り返されていることがわかった*(第3図)。そこで第4図に示されるような温度幅と周期の温度制御可能な低温室内に岩石試料を置いて破壊試験を行なった。岩石は水で十分飽和させておいた。また比較のために、宗谷地域の第三紀泥岩と玄武岩とが、同一条件におかれた。数個の試料内には熱電対が埋め込んであり、岩石内の温度変化が測定された。またモータードライブカメラとタイマーにより1時間毎に表面変化を撮影した。その結果を写真4に示す。いずれも30サイクルを経たのちの状態である。2～3サイクルを経

第4図 凍結一融解の繰り返し試験時の温度変化

った。しかし、他の比較試料には見られない、次のような表面変化が生じた。すなわち、立方体の角や、あらかじめヤスリで刻み込んでおいた溝の上縁の角が剝離し、全体に角ばった部分が円味を帯びるようになった。

2. 振動試験

凝灰岩の破壊様式は、一般には表面から2～3mmの部分が発状になって母岩から剝離し、非常に不安定になっている。またすぐ近くを通過する列車の振動が壁面の剝離に与える影響も検討する必要がある。そこで、岩石の含水条件が異なるとき、どのような振動が加えられれば、どの程度の表面剝離が生ずるかという点を明らかにすることを目的とした、振動台による試験を試みた。試料の形状・大きさは、直径5cm 高さ5cm 円柱形である。24時間室温風乾による乾燥試料と48時間水に浸した水分飽和試料とをもちいた。なお、同一条件の振動継続時間はそれぞれ30分間である。結果を第1表に示す。定性的な実験であるが、傾向として周期が大きく加速度も大きい振動時には、乾燥試料の表面からの剝離が生ずる。つま

写真4-a フゴッペ洞窟試料(凍結一融解30サイクル)

写真4-b 北海道宗谷第三紀泥岩(凍結一融解30サイクル)

ると、泥岩は明瞭な割れ目を生じ、11サイクル後には試料は数片のブロックに分解した。さらにサイクル数の増加とともに細片化(破碎)が進んで、原形をとどめぬまで破壊された。これに対し、フゴッペ洞窟の試料はブロック状の破壊は生じな

り、岩石が水分を多量に含む場合には、たとえば列車通過時の振動で、表面剝離が起りにくいともいえよう。

3. 露岩斜面の崩壊と堆積物

洞窟出口上方の露岩斜面では、凍結一融解の繰り返しによる frost action と乾湿の交代などの作用によつて、年々かなり多量の物質が崩落する

* 東京大学工学部の野村豪助教授の測定結果による。

第1表 加速度振動試験結果

周 期 (cps)	加速度 (ガル)	変 化 の 状 況	
		乾 燥	飽 和
30	20	変 化 な し	変 化 な し
30	40	細粒物の微量剝離	変 化 な し
30	60	変 化 な し	変 化 な し
30	80	やや明瞭な粒子剝離	変 化 な し
30	100	顕 著 な 剝 離	変 化 な し
20	100	わずかな剝離	変 化 な し
5	100	変 化 な し	変 化 な し
2.5	100	変 化 な し	変 化 な し

ことが経験的に知られていた。写真5は、3月下旬の崩落堆積物の状態を示している。そこで、この崩落を量的に知り、斜面の後退速度を明らかにすることを目的として、洞窟前面の小屋の屋根の上に幅100cm、深さ50cmの木樋を設置し、約1年半の間にそこに貯った崩壊物質の量から斜面の後退速度を推定した。また、露岩表面上にクギを打ちこみ、打ち込み長さの変化からも表面剝離を測定した。この結果、洞窟出口上方の露岩斜面は、1年に約5cm ずつ後退することが明らかになった。

洞窟の入口を被う堆積物について、その性質を知るために、2カ所においてハンドオーガーによるボーリングを実施した。1.5m 深までは崩落ブロックを主とする堆積物である。外側になるにつれ、この崩落物による堆積物はうすくなる。さらに深くなると、すべて砂層となる。とくに砂層上

写真5 洞窟露岩上の剝落状態

部50cm 厚さでは、粒径も小さく、sorting の良いことからみて、風成砂層と考えられる。下部はやや粗粒は砂層からなり、層相からみて海成砂層と考えられる。従つて、かつての海蝕による洞窟が、海岸汀線の後退、海岸砂丘の発達によつて陸化し、かつ出口が閉られたのであろう。その後、顕著な表面剝離がひき続いたと考えられる。

VII 凍結時の性質変化について

風化過程とその特徴についての、以上の野外観察と実験に基づく考察は、保存策への一つの指針を提示する。これは後の考察でふれる。これらの作業と併行して、風化岩石の強度を増加させるためのいくつかの具体策のうち、軟弱地盤改良法としてすでに多く実施されている凍結工法¹⁸⁾の適用の可能性をさぐつてみた。それは、この風化岩石の特徴である空隙率の高い点に着眼したからである。強度の低下や剝離などが、構成粒子間の膠着物質溶脱によるものと考え、空隙内に別の物質を注入して強度を増加させることをねらつた。注入物質としては、プラスチック、セメントなどがあるが、ここでは空隙を水で満すことを試みた。これは凍結工法の応用といえる。勿論、これを保存

第5図 凍結時の一軸圧縮強度変化

× : 乾燥試料 (110°C 24h 乾燥)

○ : 飽和試料 (室温浸水24h)

● : 完全飽和試料 (室温浸水脱気24h)

策として直接に実施させるのが目的ではなく、風化状態の把握つまり空隙の増加・拡大で生ずる強度低下を知ることが主な目的である。一軸圧縮強度の温度依存については、すでに田沼らが実験の報告を行った¹⁴⁾。その結果とさらに若干の実験をつけ加えて、第5図のような強度変化が得られた。空隙を占める氷の量が多い程強度が増加する。同一の水分条件では、温度の低下に従い強度は増加する。氷が存在しない場合(乾燥時)、強度の変化はごくわずかにすぎない。以上の結果から、凍結時の岩石強度の変化は、明らかに空隙内の氷の量と性質(氷の強度の温度特性)に依存する。次に凍結時の弾性波速度(V_p)を超音波パルス法によって測定した(第6図)。すでにTIMUR¹⁵⁾

第6図 凍結時の弾性波速度変化

が報告しているが、凍結した岩石の V_p は、空隙の流体→固体変化による構成骨格形成* によって増加する。つまり、岩石内の氷粒子は、鉱物粒子と同じように弾性波の伝播にあずかる。これをTIMURは多結晶モデルと考え時間平均公式**の適用を行った。未凍結時には、水は弾性波伝播速度にとくに影響を与えない。これは、温度の低下→空隙内氷の量増加→空隙率と流体量(水分)の

減少→弾性粒子の連結形成→ V_p の増加という変化を意味する。この変化傾向と前述の一軸圧縮強度の変化とはよく一致している。以上の2つの実験結果は、洞窟基盤岩の風化状態の特異性(高い空隙率)をよく反映しているといえよう。

VIII 考察とまとめ

はじめに述べたように、本研究の主目的は洞窟内の壁面彫刻表面剝離の保存工事のために行った基礎調査であつた。そこで、具体的施行をほどこす前に、表面剝離の機構と条件(風化岩石の性質と外的営力との関係)について実験・観察結果より若干の考察を試みる。

まず第一に、いかなる外的条件が剝離の主因となるかを知る前に、風化岩石自体の性質をおさえてみる。凝灰岩質砂岩の特質として、空隙率の高いことが挙げられる。今回の事例でも、風化の進行程度が著しいことを反映して、極めて高い空隙率を示している。これは鉱物粒子間にあつた膠着物質の溶脱による。凝灰岩質砂岩は、火山噴出物の流下と再溶結を経ており、一次造岩鉱物間には非結晶質ガラスや細粒物質(二次再堆積物)が多く含まれている。また、揮発ガスの放出によつて、すでにある程度の空隙が形成されている。その数や体積比は、他の堆積岩に比べて大きい。従つて、水の浸透する量も多く粒子との接触面積も広い。その結果、膠着物質はかなりの速度で溶脱される。それは空隙の増加・拡大をひき起し、さまざまな含水条件で破壊されやすくなる。たとえば、空隙内の水の凍結による破壊(frost-shattering)が生ずることで、岩石は破碎される。洞窟のおかれた条件、とくに外側露岩ではこのfrost-shatteringは、破壊作用のうちで重要なものの1つであろう。つまり外気温が0°C以下になる場合には空隙内の水の凍結が多くの空隙中で生じ、高い空隙率を反映して強度が低下している岩石にかなり有効な破壊作用が働く。その反面未凍結時には、空隙の水は粒子間でメニスカスを形成して粒子間結合力を増加させる。極端な乾燥条件下で

* 弾性体が相互に連結しあう状態。

** 詳しくは南雲の解説を参照されたい。文献16)

は、加えられる振動などで表面剝離が生じやすい。なぜなら、表面部分がもつとも空隙率の高いことによる。含水条件（ある程度水を含む）でしかも一定温度（常温であれ0℃以上であれ）に保たれている場合には、この剝離はある程度おさえられる。

ところで、洞窟内彫刻が長期間よく保存された原因は、洞窟口が堆積物で閉られ外界の変化が直接およばなかったことにあろう。さらに、岩体節理に沿って流れ込む水が、洞窟内にある程度の湿気を与え、年間を通じて内部温度変動を小さくしていた。つまりこの岩石の風化状態の特徴（高い空隙率）からみて、一定の湿度と温度が、表面剝離の量を少なくおさえて来たといえる。現在の環境下でも露岩（外側壁面）では、顕著な表面剝離が継続している。とくに凍結—融解の繰り返す期間に多く剝落している。低温室内での実験でも飽和含水条件での剝離が確認された。一方、凍結した状態に保つと、かなりの強度の増加がみられた。これは空隙中の氷が、溶脱した膠着物質の働きを代行したことによる。乾燥時には低温下での強度増加は生じない。

以上の実験事例、観察と考察をまとめる。フゴッペ洞窟では、基盤岩石の凝灰岩が屑化した結果、特徴のある性質、すなわち空隙の増加・拡大の著しいことがわかった。また表面剝離によつて破壊が生ずる主な外的要因としては、凍結—融解の繰り返し、乾燥時に加えられる振動、付着植物などがあげられる。洞窟口が閉じられていた状態では、洞窟内の壁面からの剝離が少なかったことを留意するなら、温度や湿度の変動の大きいことが剝離を促す原因であろう。とくに空隙内の水の量を一定に保ち、かつ凍結—融解の繰り返を防ぐことが具体的保存策として重要となろう。また何らかの保存策をほどこした後も、さらに観察や実験を継続し、有効な保存法を検証することが望まれる。岩石の風化がどのような条件下でどのように進むかという問題は、地形学の重要なテーマであるが、同時にこうした文化財の保存にもかかわる問題でもある。不十分ながら今回の事例をその1つのケーススタディとしてあえて報告した。

おわりに、本調査の機会を与えられ、且つ結果

の発表を許可された余市町教育委員会、北海道教育庁、文化庁等の方々に深く感謝いたします。また日頃御教示御指導いただきました佐藤 久教授、吉川虎雄教授をはじめとする東京大学地理学教室の皆様にもあわせて感謝いたします。

—付記—

著者の一人、岩塚は昭和47年12月に急逝した。本稿は福田が余市町に提出した報告をもとにし、新たに行なつた実験結果をつけ加えてまとめた。故人の意向を十分には反映しきれなかつたのではないかと恐れつつも、遺稿として共著論文として。不備な点は、ひとえに福田の責任である。

引用文献

- 1) YATSU Eiju (1966): Rock Control in Gemorphology. 135 pp. Sozosya. Tokyo.
- 2) 余市町 (1973): 史跡フゴッペ洞窟保存工事報告. 50 pp. 余市町.
- 3) 鈴木秀夫 (1960): 北海道北部の周氷河地形. 地理評. 33, 625-628.
- 4) 小崎 尚・野上道男・岩田修二 (1974): ひがし北海道の化石周氷河現象とその古気候学的意義. 第四紀, 12, 177-191.
- 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): 砕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) 南雲昭三郎 (1961): 静的動的ヤング率の差について1 考察. 物理探査, 14, 138-141.
- 8) 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.
- 9) 福田正巳 (1970): 凍結—融解による岩石の風化について. 地理評, 43, 408.
- 10) 村井延雄・東 三郎・藤原晃一郎 (1965): 向寒別川流域の森林経営と保全に関する基礎的研究. 北大, 演習林業務資料, 11.
- 11) 福田正巳 (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.
- 12) 田治米鏡二・五十嵐 享・眼谷 努・殿内啓司・長能正武 (1970): 余市フゴッペ洞窟の振動測定, 北大, 地理物理学研究報告, 24, 189-196.
- 13) ゲ・デ・チュウプルウノフ (1968): 地盤改良法 (萩原・森訳), 165 pp. 産業図書.
- 14) 田沼邦雄・福田正巳 (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.

- 15) A. TIMUR (1968) : Velocity of Com-
pressional Waves in Porous Media at
Permafrost Temperatures. *Geophysics*,

33, 584-595.

- 16) 宮村 撰三編 (1968) : 地震・火山・岩石物
性. 第4編, 岩石物性, 351 pp. 共立出
版.

(1974年6月25日受理)