

# シングア라운드式音速測定法による岩石の 凍結-融解破壊の判定

石造文化財の凍結-融解による劣化とその防止法に関する研究(Ⅲ)

三浦 定俊・福田 正己\*・西浦 忠輝

## 1. はじめに

試料中の音速を測定する方法として、前報で用いたのは、試料に振動子を圧着して(透過法)試料中を音波が伝播するのに要する時間とは無関係に、ある時間間隔で送信振動子から超音波パルスを発信し、受信振動子に届くまでの時間を測定するという方法であった。本報で用いたのは、試料を液体に漬けて(液浸法)送信振動子からの超音波パルスが受信振動子に届くのを待って、これに同期させながら次の超音波パルスを発信させ、試料中を伝わる音速を測定する方法である。この方法は、ちょうど1個の超音波パルスが送信振動子-試料-受信振動子-電気回路-送信振動子の同一閉回路をぐるぐる繰り返して回っているように見えるので、シングア라운드法とよばれている。

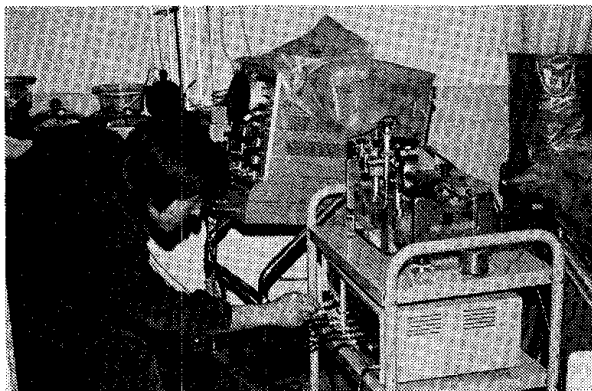


図-1 調整中のシングア라운드式音速測定装置

Fig. 1 Apparatus for a sing-around measurement of ultrasonic velocity

音速測定の原理を簡単に説明すると、電子回路系での超音波パルス遅延時間を一定にしておけば、

$$T_1 - T_2 = \frac{L}{C_0} - \frac{L}{C}$$

ただし

$T_1$ : 試料がない場合(液体のみ)の超音波パルス伝播時間

$T_2$ : 試料がある場合(液体と固体)の超音波パルス伝播時間

$L$ : 試料の厚み

$C_0$ : 液中の音速

$C$ : 固体試料中の音速

これから

$$C = \frac{L}{\frac{L}{C_0} - (T_1 - T_2)}$$

すなわち、液体の音速  $C_0$  と、試料がない時の超音波パルス伝播時間  $T_1$  をあらかじめ測定しておき、試料ごとにその厚み  $L$ 、試料を入れた時の伝播時間  $T_2$  を測れば、試料中の音速  $C$  を求めることができる。さらに、 $C_0 \cdot T_1$  はいずれも温度に依存するので、それぞれの温度に対する関係式を前もって求めておけば、測定の際には液体の温度  $t$  さえ知れば、関係式から  $C_0 \cdot T_1$  を決めることができ、いちいち試料をひきあげて  $C_0 \cdot T_1$  を測定しなくても試料を液体に

\* 北海道大学、低温科学研究所(昭和56年度招へい研究員)

漬けたまま連続測定ができる，本報で用いたケロシンについての  $C_0 \cdot T_1$  の関係式は次の通りである。

$$C_0 = 1396.9 - 4.2917 t$$

$$T_1 = 295.129 + 0.1052 t$$

ここで  $C_0$ (m/sec),  $T_1$ ( $\mu$ sec),  $t$ ( $^{\circ}$ C)

振動子間距離 45 mm, 電子回路系の遅延時間 256  $\mu$ sec, トリガーレベル 2.90。

シングア라운드法は他の音速測定法に比べて測定精度が高く，比較的少量の試料でも精度良く測定できることが特長である。また液浸法で試料の音速測定を行えば，透過法でしばしば見られる振動子と試料との接触不良による測定結果のバラツキを避けることができる。その他，脆く壊れやすいため振動子を圧着できない試料でも，液浸法を使えば測定は可能となる。古文化財の試料は少量しか得られないことが多い上，保存修復処置の際には，表面近くの風化した部分の石の強度を調べたいことが多い。いずれの場合についても，液浸法によるシングア라운드式音速測定法は岩石の力学的強度を知るための有力な手段となる。

本報では，第1報や第2報で述べられた超音波速度による岩石の風化の判定が，シングア라운드法を用いた測定によっても可能であるか，可能であるとしても，透過法で得られた結果とどのような違いがあるかを調べることを目的として実験した結果について報告する<sup>1)2)3)</sup>。

## 2. 実 験

### 2.1 装 置

使用した装置はシングア라운드式音速測定装置 UVM-2 (超音波工業株式会社) である。ただし超音波パルス発振周波数は，測定対象が超音波の減衰しやすい石であることを考慮して，標準仕様の 2 MHz より低い 0.5 MHz に改造した。液浸用の液体は試料の含水率に影響がないようにケロシンを用いたが，それでも凍結-融解を繰り返して長時間試料をケロシン中に浸しておく，試料中の水分がいくらかケロシンに溶出していくので，測定は試料を薄いラップで包みこんで行った。

試料とケロシンの温度はごく細い C-C 熱電対で測定した。熱電対の出力は一度マイクロコンピュータ (CBM 3032) からの指令によって動くスキャナをとおして，高性能の直流アンプ

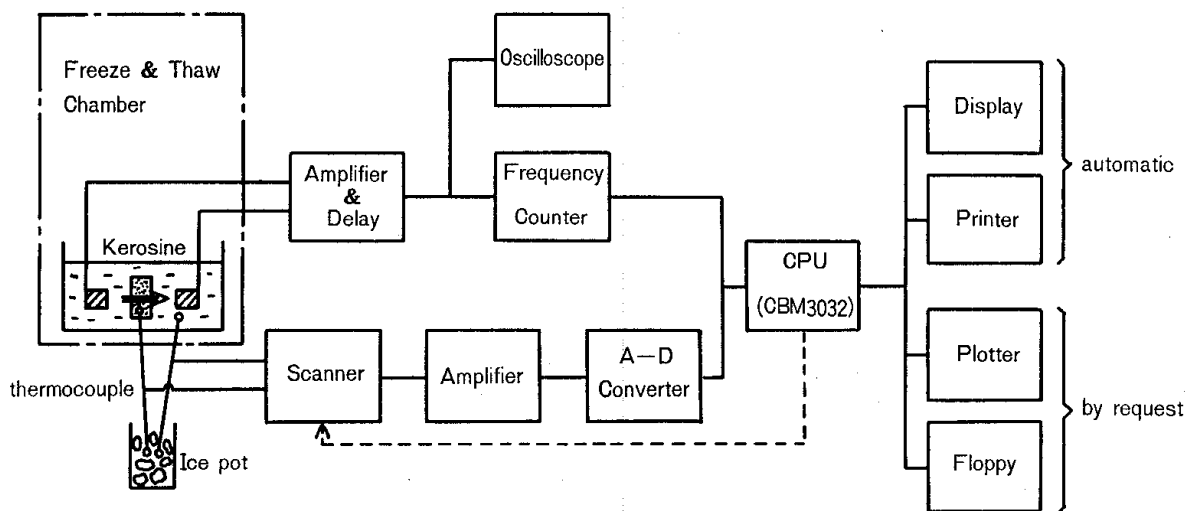


図-2 装置概念図  
Fig. 2 Diagram of a measurement system.

で増幅し、GPIB 付デジタルマルチメータでマイクロコンピュータに接続した。一方、シングア라운드式音速測定装置の出力も、GPIB 付周波数カウンタをとおしてマイクロコンピュータに入れ、先の関係式を使って液温  $t$  から  $C_0$  と  $T_1$  を求め、あらかじめノギスで正確に計測した試料の厚み  $L$  とで試料中の音速  $C$  を自動的に計算した。

凍結・融解装置もプログラム式で自動的に運転されるので、この計測システム全体は完全に自動化されている。試料の温度-音速のデータは計測された時間、ケロシンの液温などとあわせてマイクロコンピュータに記憶されるので、人間のすることは試料の交換、熱電対の冷接点用の氷の補充および測定が終了した時点でマイクロコンピュータのメモリ内にたまったデータのフロッピーディスクへの書き込みとプロッタによる図化をキーボードから指示することだけである。

## 2.2 試料

用いた岩石試料は第1報と同じ凝灰岩（大谷石）と安山岩（白河石）である。形状はシングア라운드装置のホルダにあわせて直径 30 mm の円板状、厚み 3~5 mm とした。この試料を各10個ずつ作り、凝灰岩については、その内の4個を合成樹脂処置した。樹脂は、石造文化財の保存処置に広く用いられ、特に凍結-融解作用に対して優れた抵抗効果があるとされる有機シリコン樹脂 <SS-101> である<sup>13)</sup>。処置は、試料を乾燥後、樹脂中に4時間浸漬し、風乾後熱風乾燥する方法で行った。樹脂含浸率（含脂率）は約10%であった。この含脂率は、試料が薄く小さいために、一回の処理で得られるほぼ最大値に近い。全ての試料は、減

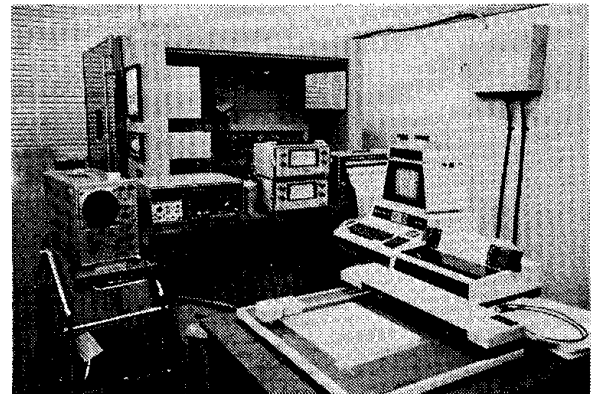


図-3 測定装置外観  
Fig. 3 Measurement system

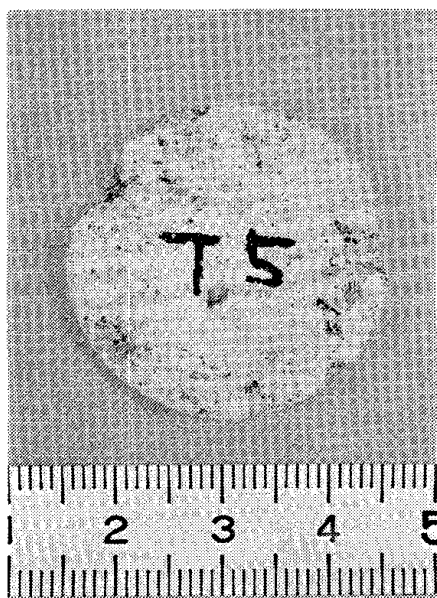


図-4 凝灰岩試料（未処置）  
Fig. 4 Sample (Tuff-untreated)



図-5 凝灰岩試料（シリコン樹脂処置）  
Fig. 5 Sample (Tuff-treated by silane)

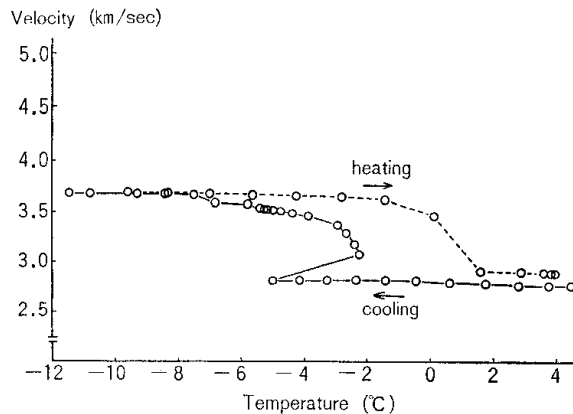


図-6 温度による超音波速度の変化（凝灰岩—シリコン樹脂処置）

Fig. 6 Vp change due to cooling and heating (Tuff-treated with silane)

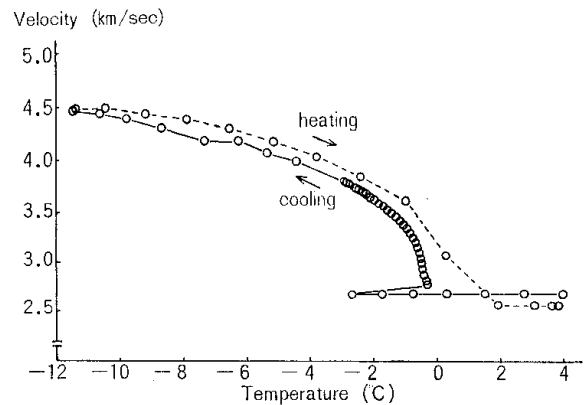


図-7 温度による超音波速度の変化（凝灰岩未処置）

Fig. 7 Vp change due to cooling and heating (Tuff-untreated)

圧下で水を含浸飽和させて測定に供した。

実験は、 $+4^{\circ}\text{C}$  から  $-12^{\circ}\text{C}$  までの温度範囲を1サイクル24時間の周期で繰り返した。第2報のように  $+10^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$  の範囲で行なわなかったのは、第2報に比べて試料がずっと小さく薄いので、 $0^{\circ}\text{C}$  よりわずかに温度をあげるだけで試料中の水分は再融すると考えられたから（図6，7参照）と、できるだけ温度の時間変化を小さくした方がケロシンや試料中の温度勾配を少なくし正確な測定ができるからである。

以上述べた条件で実験を行った所、白河石については、凍結-融解の繰り返しによる破壊が10回程度の繰り返しではほとんど見られなかった。そのため、以下の議論は、凍結-融解の繰り返しによる影響がはっきり見られた大谷石について進めていく。

### 2.3 結果

大谷石試料で合成樹脂処置した試料としなかった試料の温度-超音波速度の関係図をそれぞれ図6，図7に示す。未処置試料は再融解後の音速が当初より低くなり、石の内部に小さなクラックが生じたことをあらわしている。一方、処置試料は凍結点温度が  $-2.3^{\circ}\text{C}$  と未処置試料に比べてずっと低く凍りにくくなっている上、再融解後の音速の低下も見られない。未処置試料の空隙率が50%と、第1報の同じ大谷石試料（35%）に比べて高かったが、水を減圧含浸させると試料が薄いために試料中のすべての空隙に水が入ってしまうからと考えられた。

図8は凍結-融解の繰り返しによる超音波速度の変化の様子を5サイクルまで示したものである。未処置試料は当初  $2.7\text{ km/sec}$  あったものが、凍結-融解の繰り返しと共にだんだん低くなり、5サイクル終了時には  $2.3\text{ km/sec}$  程度にまで下っている。一方、樹脂処置した試料はあまり変わらず、凍結-融解による破壊がみられないことを示している。

試料によっては凍結-融解を繰り返している内に割れが生じたものもあったが、その際の音速の極端な変化は見られなかった。このことは、シングア라운드式測定法においては超音波が試料のある部分だけを選択的に透過していることを表わしていると考えられる。つまり、測定によって得られている音速は、ホルダ中におかれた試料全体の平均的な超音波速度ではなく、大谷石のように不均質な試料の場合には、比較的超音波の透過しやすい固い部分の音速を示していると考えられる。このため試料中に割れが生じた時に、透過法でみられるような音速の極端な変化がみられず、音速自体も透過法に比べて同一試料でもかなり高くするのである。

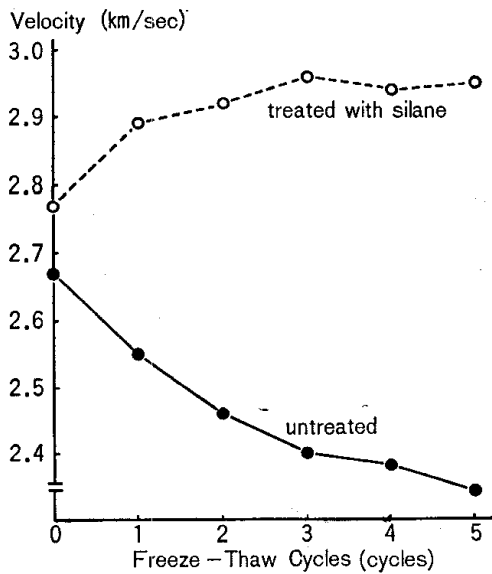


図-8 凍結-融解サイクルによる超音波速度の変化

Fig. 8 Vp changes due to freeze-thaw cycles

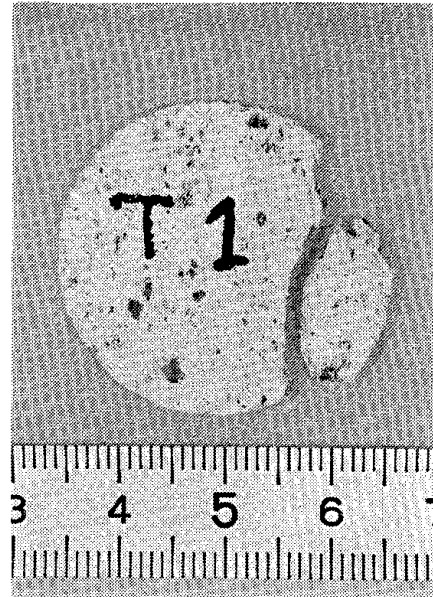


図-9 凍結-融解の繰り返しによって割れが生じた凝灰岩試料(未処置)

Fig. 9 Sample broken by freeze-thaw cycles (Tuff-untreated)

### 3. ま と め

シングア라운드法によっても、岩石の凍結-融解の繰り返しによる破壊の様子を調べられることがわかった。この方法では特に、試料の形状が小さくてすむ上、液浸法を用いれば非接触で測定できるから、少量しかサンプルがとれず、しかも脆い岩石の力学的強度を判定する方法として優れている。また音速の測定分解能が高いので、経時変化ごとの音速を測定して図-6, 7に示したような岩石の超音波速度の温度依存性を調べ、第2報と同様に岩石中の水分量を推定するなど<sup>4)</sup>、石の破壊に関するより詳細な研究ができる。

シングア라운드法の問題点は、試料が小さいために大谷石のような不均質な試料の場合その不均質さが無視できなくなって、透過法で得られた岩石の空隙率と超音波速度の関係図(第1報の図3)がそのまま使えないことである。試料を厚くすれば不均質さを少なくできるが、反面超音波の透過が悪くなり、水分飽和状態でも大谷石では厚さ5mmが限度である。いくつもの試料を使ってバラツキを平均化した上で、シングア라운드法における岩石の空隙率と超音波速度の関係図をつくる必要がある。

シングア라운드法のもう一つの問題点として、試料を液浸法で測定するために含水状態を長時間一定にすることができないということと、透過法で行っているようなより自然条件に近い、常に水分が供給されている状態での凍結-融解実験ができないということがある。

ただいずれにせよ、シングア라운드法、透過法のいずれの測定法も一長一短があり、お互い合い補いながら用いられていくべきものであろう。例えば、ボーリング等により大きな試料を採取して、透過法で岩盤の強度を調べ、少量しか試料のとれない石造文化財自体についてはシングア라운드法で強度を測定し、両方の結果をあわせて上で保存修復処置を検討するといった方策もその一つである。そのためにも、両測定方法でデータが互換性を持つように実験を進めて行きたいと考えている。

本研究は、著者の一人福田が招へい研究員(昭和57年1~2月)として東京国立文化財研究所に滞在していた際に行った共同研究の成果の一部であり特別研究「石造文化財の保存と修復

に関する科学的、技術的研究」の内の1研究をなすものでもある。実験研究について多くの便宜をはからい御指導下さった保存科学部長江本義理氏他の皆様方に感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) 福田正己・三浦定俊・西浦忠輝・松岡憲治：石造遺跡の凍結破壊と樹脂によるその防止効果の実験，保存科学，22号，1/14（1983）
- 2) 岩塚守公・福田正己：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—，地学雑誌，83，59/67（1974）
- 3) 福田正己・三浦定俊・西浦忠輝：石造遺跡の凍結-融解による破壊と樹脂による防止効果の実験，雪氷，44-2，101/103（1982）
- 4) 福田正己・松岡憲知：岩石内の水の凍結点降下と弾性波速度変化について，保存科学，22号，15/19（1983）

## The Detection of Stone Breaking Caused by Freeze-thaw Cycles Using a Sing-around Measurement of Ultrasonic Sound

—Studies on the Deterioration of Stone Caused by  
Freeze-thaw Cycles and Its Preservation (III)—

Sadatoshi MIURA, Masami FUKUDA and Tadateru NISHIURA

The breaking of a small stone sample (Tuff) caused by freeze-thaw cycles was detected by sing-around measurement of ultrasonic sound. The measurement system was automatically controlled by a computer. The velocity of ultrasonic sound ( $V_p$ ) through the stone sample and the temperature of the sample ( $t$ ) were recorded by a printer and stored in a floppy disk. When a freeze-thaw cycle was completed, a graph showing the relation between  $V_p$  and  $t$  was drawn by a plotter (Fig. 2).

The condition of the experiment :

1. Sample : Tuff (30 mm diameter, 3 — 5 mm thick)  
4 pieces—treated by synthetic resin (silane)  
6 pieces—untreated

\* for the experiment, samples were saturated by water and dipped in kerosene

2. Ultrasonic sound : 0.5 MHz (sing-around measurement)
3. Cooling & heating : from +4 to  $-12^{\circ}\text{C}$  and vice versa

The effectiveness of silane was certified by measuring  $V_p$  changes of samples.  $V_p$  of a treated sample did not change so much after 5 cycles of freeze-thaw, while  $V_p$  of an untreated sample largely decreased (Fig. 8), and some were broken into two pieces (Fig. 9).

The main advantage and disadvantage of the sing-around measurement are as follows :

### 1. Advantage

$V_p$  of the small sample such as a husk deteriorated by an air pollution can be measured by this method. The strength of the sample may be estimated from  $V_p$ .

### 2. Disadvantage

If the sample is a heterogeneous stone, the variety of the rock composition is not negligible for the  $V_p$  measurement of a small and thin sample. For example,  $V_p$  of Tuff measured by the sing-around method differs from  $V_p$  measured by another method using a thick sample of the same Tuff, because the later  $V_p$  value is averaged along the path of the sound. To avoid this  $V_p$  variance, the sing-around measurement for a heterogeneous stone should be done taking several samples from the same stone.