

II—39 超音波による海水の強度特性について

北海道大学工学部 (学)

酒井 雅史

前田建設工業(株) (正)

五十嵐 勝美

北海道大学工学部 (正)

佐伯 浩・小野 敏行

§1 緒言

これまで海水の強度試験を行なう場合には現地で海水を採取して試験を行ないやすい寸法に整形した供試体を使用していた。

しかし海水の性質は採取後は非常に早く変化するもので、実際の氷盤上で直接的に強度を測定すること、また、氷盤の存在する場所が寒冷であるため、簡単にしかも短時間で強度を測定することが重要な問題である。現在、材料の強度・組成を知るための非破壊試験方法としては、超音波、電気抵抗、共振周波数、反発硬度、弾性波などを利用する方法がある。そこで本研究ではコンクリートなどですでに使用されており、非常によい実績のある超音波を用いて海水の組成および強度を知ろうとするものである。

この研究は著者等が海水の強度を非破壊試験により求めようとする過去の一連の研究の一環をなすものである。また、この方法を用いることにより、模型実験などに用いる低強度の薄い氷盤の強度の推定にも役立つものと思われる。

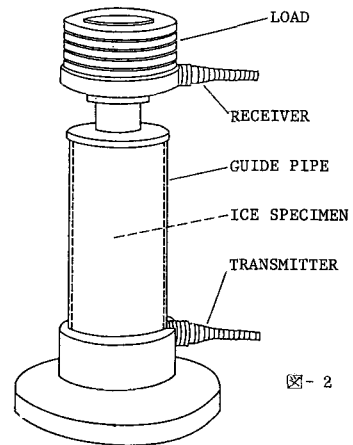
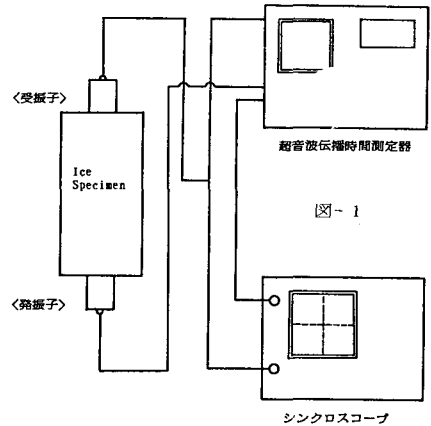
§2 実験装置と方法

実験装置は、超音波伝播時間測定器、シンクロスコープ、発振子受振子から成っていて、その構成は図-1 のようになる。海水の供試体に超音波パルスを発射し、既知距離間の伝播時間を測定器でデジタル表示し、同時にシンクロスコープを用いてアナログ的に観測できるようにし、音速と発振、受振での音圧を求めた。

また、探触子と供試体との密着をよくするために供試体との接触部にグリースを塗り、図-2 のように塩化ビニールのパイプに、供試体を入れ荷重をかけた。予備実験の結果から、最も安定した波形を得られるようにするために、接触圧は 0.21 kg/cm^2 とした。

実験はサロマ湖と実験室で作製した海水について、超音波の周波数を50 KHz、200 KHz、400 KHzの3種類に変えて行なった。同時に一軸圧縮試験を直径10 cm、高さ20 cmの円筒形供試体を用い、過去の著者等の結果から最大の強度を示す歪速度 $1 \sim 3 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の範囲で実験を行なった。

海水の強度は、氷温(T)、塩分量(S)、空隙率(K)、などに影響されるが、ここではさらに超音波の減衰というものを考慮した上で、主に超音波の伝播速度と一軸圧縮強度との関係について調べてみた。過去の実験結果から強度とヤング率との間に強い相関関係があり、また弾性体内を通過する超音波の音速は、棒状の場合には(1)式で表わされることから、音速がわかれば強度を求めることができる。超音波の減衰は、反射、屈折、散乱などにより起こり、その大小は減衰定数 α によって表わすことができる。一般に音波が媒質中を x 方向に伝播する場合では、



その音圧が減衰する様子は(2)式により表わされる。
 ここで海氷の組成と空隙率の決定法について説明する。
 海氷は一般に、純氷、気泡、ブラインより成り立っており、非常に複雑な組成をしている。その性質も結氷開始から融解まで時間とともに変化する。海氷の体積、重量、氷温、単位体積重量をそれぞれ、 $V(\text{cm}^3)$ 、 $W(\text{g})$ 、 $T(^{\circ}\text{C})$ 、 $\rho(\text{gr/cm}^3)$ とし、純氷、気泡、ブライン中に含まれる塩類、氷のそれぞれの体積を $V_i(\text{cm}^3)$ 、 $V_A(\text{cm}^3)$ 、 $V_B(\text{cm}^3)$ 、 $V_s(\text{cm}^3)$ 、 $V_w(\text{cm}^3)$ とする。また純氷、ブライン、ブライン中の塩類と水の密度をそれぞれ $\rho_i(\text{gr/cm}^3)$ 、 $\rho_B(\text{gr/cm}^3)$ 、 $\rho_w(\text{gr/cm}^3)$ とする。塩類の重量比を β とし、海氷の塩分量を $S(\%)$ とすると(3)~(6)式のような関係がある。(6)式の β はAssur³⁾ NelsonとThompsonの結果から $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ が析出する $T=-8.2^{\circ}\text{C}$ までは $\beta=-54.11$ であることを示しているが、Schrwerdtfegerは $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ の析出の影響はあまり大きくないので、 $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が析出しはじめる $T=-22.9^{\circ}\text{C}$ まではこの式で近似できるとしている。(3)~(9)式を用いると V_i 、 V_A 、 V_B は(10)~(12)式のように得られる。 $\rho=1.00(\text{gr/cm}^3)$ 、 $\rho_s=2.17(\text{gr/cm}^3)$ 、 $\beta=-54.11$ なので V_i/V 、 V_A/V 、 V_B/V は T 、 S および ρ の関数となることかわかる。ところで海氷の強度は純氷の部分のみが受け持つので、 V_A+V_B の量が増すと強度は低下することになるが、これは T 、 S 、 ρ が強度に影響を及ぼすことを示している。

§3 実験結果

1) サロマ湖における実験

サロマ湖における海氷では、塩分量が3~7%、氷温が、 $-4.0^{\circ}\text{C} \sim -6.0^{\circ}\text{C}$ 、 $-10^{\circ}\text{C} \sim -12^{\circ}\text{C}$ で海氷の成長方向に対して垂直に抜いた供試体を用いて実験を行なった。海氷中を通過する超音波は気泡やブラインの量によって大きな影響を受ける。ここでは氷温を変えることにより空隙率を変化させ、伝播速度と強度との関係について調べた。図-3は縦波速度と空隙率との関係を示したものである。空隙率が5%以下になると縦波速度はほぼ一定の値に近づき、空隙率が大きくなると速度は遅くなる。これは超音波が海氷の内部に気泡がある場合には反射し、ブライン内部では透過あるいは屈折するためである。また、氷温が低くなると水分の蒸発や氷の収縮のために空隙が大きくなり、速度は遅くなる。

$$V = \sqrt{E/\rho} \quad \text{--- (1)}$$

V : 伝播速度(m/s)
 E : 氷のヤング率(kg/cm²)
 ρ : 氷の密度(gr/cm³)
 P_x : 距離 x での音圧(mV)
 P_0 : $x=0$ での音圧(mV)
 α : 減衰定数(cm⁻¹)

$$P_x = P_0 e^{-\alpha x} \quad \text{--- (2)}$$

$$V = V_i + V_A + V_B \quad \text{--- (3)}$$

$$W = V_i \rho_i + V_w \rho_w + V_s \rho_s \quad \text{--- (4)}$$

$$\beta = V_s \rho_s / V_w \rho_w \quad \text{--- (5)}$$

$$T = \beta \cdot \beta \quad \text{--- (6)}$$

$$\rho_B = 1 + 0.8 \{1 / (1 + \beta/T)\} \quad \text{--- (7)}$$

$$V_s \rho_s = 0.001 \cdot S \cdot W \quad \text{--- (8)}$$

$$\rho_i = 0.91680 - 0.00014 T \quad \text{--- (9)}$$

$$\frac{V_i}{V} = \frac{\rho}{\rho_i} \left\{ 1 - \left(\frac{\beta}{T} + 1 \right) \cdot S \cdot 10^{-3} \right\} \quad \text{--- (10)}$$

$$\frac{V_A}{V} = \rho \cdot S \cdot 10^{-3} \left(\frac{\beta}{T} + 1 \right)^2 \frac{1}{\left(1 + \frac{\beta}{T} \right) + 0.8} \quad \text{--- (11)}$$

$$\frac{V_B}{V} = 1 - \frac{\rho}{\rho_i} \left\{ 1 - \left(\frac{\beta}{T} + 1 \right) \cdot S \cdot 10^{-3} \right\} - \rho \cdot S \cdot 10^{-3} \left(\frac{\beta}{T} + 1 \right)^2 \frac{1}{\left(1 + \frac{\beta}{T} \right) + 0.8} \quad \text{--- (12)}$$

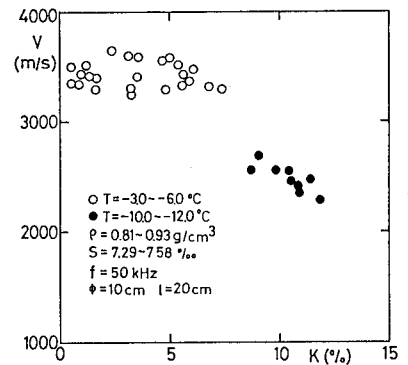


図-3

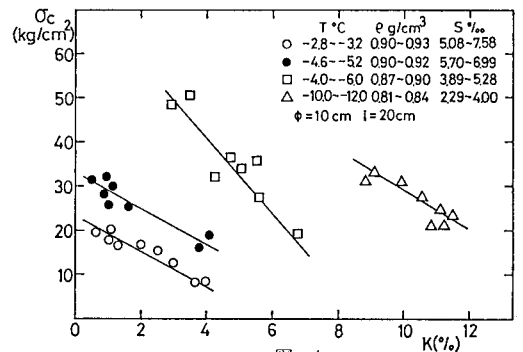


図-4

氷温別の圧縮強度と空隙率の関係を図-4に示す。図からも明らかなように氷温が低くなると、ブライン中の水分が蒸発するため、塩分量は少なくなるし、密度も小さくなり、そのため空隙率が大きくなる。このように空隙率が、氷温、塩分量、密度と強い相関があることがわかる。空隙率が増加すると圧縮強度が減少する。図-5は縦波速度と圧縮強度の供試体の寸法効果を示したものである。供試体の長さが短いほど伝播距離が短いので縦波速度は大きくなり、圧縮強度も大きくなる。

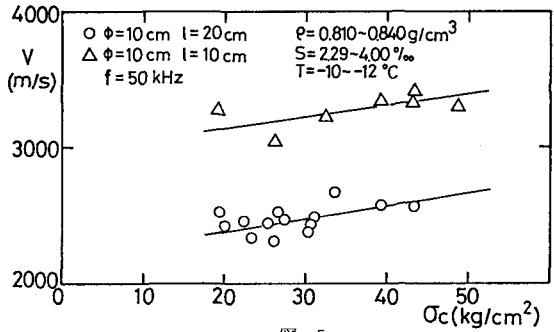


図-5

著者等の過去の実験から、供試体の径と長さの比 l/ϕ が大きくなるにつれて一軸圧縮強度は小さくなり、特に、 $l/\phi < 1$ の範囲では l/ϕ の増加とともに一軸圧縮強度は急激に小さくなり、 $l/\phi > 1$ の範囲では l/ϕ の増加に対してゆるやかに減少するという結果が得られている。

図-6は縦波速度と供試体の径と長さとの比 l/ϕ の関係を示したものである。前述のことと今回の実験結果より供試体の径は5 cm以上で径と長さの比 $l/\phi < 3$ が適当であり、 $l/\phi > 3$ になると音速は著しく減少するのがわかる。このことより、音速が供試体の径と長さとの関係で求めることができ、 $l/\phi < 3$ では音速が増加すると一軸圧縮強度も増加することがわかる。

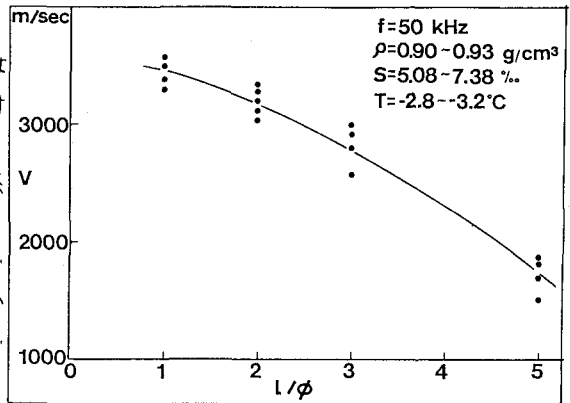


図-6

2) 実験室における実験

ここでは氷温を一定にし、塩分量を変化させて伝播速度と強度との関係を調べてみた。供試体は氷の成長方向に対して水平と垂直に採取したものを使用した。図-7は伝播速度と塩分量の関係で、塩分量が多くなるとブラインの体積も多くなり空隙率が増加するので、伝播速度は減少している。減衰定数を考えると図-8に示したようになり、縦波速度は減衰定数が0.35までほぼ一定値をとり、それ以上になるとゆるやかに減少する。ここで氷の成長方向に水平、垂直に採った供試体を比較すると、鉛直方向の方が水平方向の場合よりも縦波速度が遅くなっている。また、 -10°C では一軸圧縮強度は鉛直方向の方が小さな値を示している。これは鉛直方向の方が供試体の上下で氷の結晶が様ではなく、表面と海水に接している部分では弱い部分があるし、空隙も多いためと考えられる。図-9に塩分量と減衰定数の関係を示す。塩分量が0なのは淡水氷で、超音波の伝播を妨げるのは気泡しかないため減衰定数は海水の場合より小さくなる。

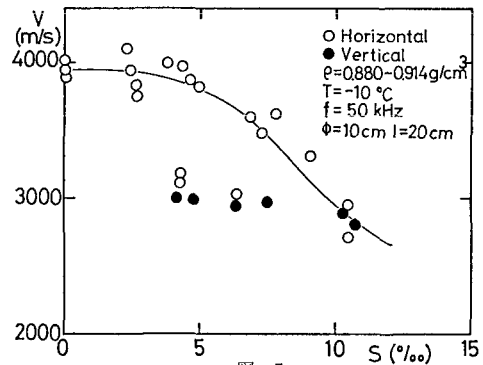


図-7

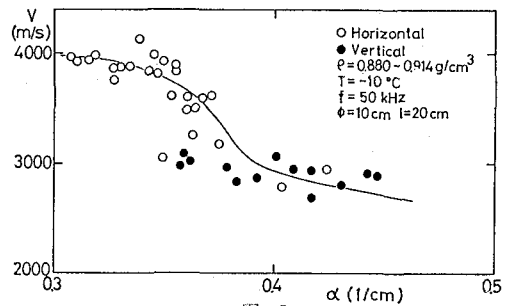


図-8

塩分量が増加すると減衰定数はほぼ直線的に増加し、減衰定数が増えれば塩分量を求めることができる。

以上の1)と2)の実験の結果から縦波速度と圧縮強度との関係を図-10に示す。減衰定数の違いにより数個の層に分類することができ、減衰定数が大きいと空隙率、塩分量ともに大きくなり、縦波速度と圧縮強度は小さくなる。したがって、縦波速度と減衰定数から空隙率と塩分量を決定し、さらに氷温に関係なく圧縮強度を求めることができる。

§4 まとめ

超音波の減衰の因子としては、海氷の塩分量、気泡、氷温、氷厚さらに周波数などがあげられるが、今回の実験結果より減衰に最も影響を与える要素が塩分量と空隙率であることがわかる。超音波の伝播速度と減衰定数を求めることで、塩分量や空隙率により海氷の内部組成や強度を知ることができる。また、今回の実験では周波数による伝播速度の違いはあまりは、きりとは得られなかった。これは周波数が高くなるほど指向性はよくなるが、超音波の減衰が大きくなるためである。

今後の課題としては、もっと長い棒状の供試体などの寸法効果や薄い氷盤の形状による変化、また氷盤の厚さを求めるということや減衰を最小にするような条件の決定などがあげられる。さらに横波を用いてその伝播速度から氷のヤング率やポアソン比を求めたり、供試体を水中につけての実験も行いたい。

最終的には、現地の氷盤上で表面伝播方法により、反射波を検出し、海氷の氷厚を求めるようにしたい。

最後に、海氷の強度の推定は超音波を用いた方法とツェミットハンマーを用いた方法を併用した複合非破壊試験法により、格段に向上するものと思われる。

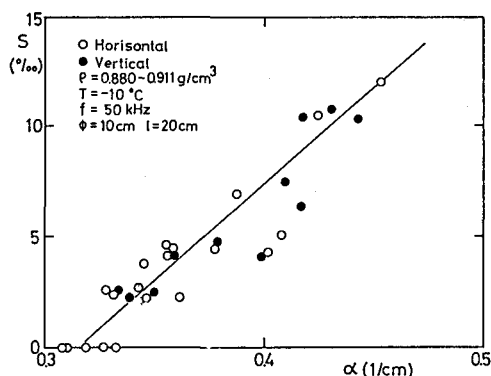


図-9

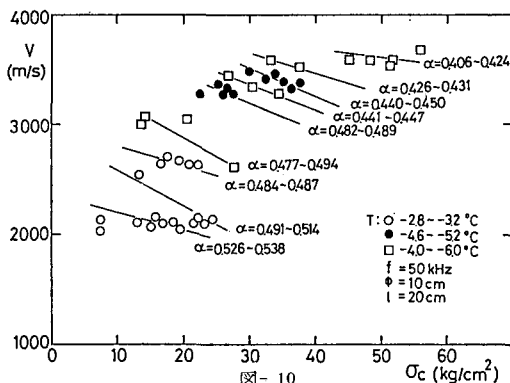


図-10

参考文献

- 1) 柏 忠二 編著 コンクリートの非破壊試験法 一日・欧・米の論文・規格・文献 一 技報堂
- 2) 山本 美明 著 超音波基礎工学 日刊工業新聞社
- 3) 五十嵐 寿一 著 音響と振動 共立出版
- 4) 丹羽 登 著 超音波計測 昭晃堂
- 5) R.J.ユースリック、土屋 明 訳 水中音響の原理
- 6) 佐伯 浩 海氷の強度特性と海岸・海洋構造物の耐氷設計法に関する研究