多結晶体の融解・凝固過程での弾性波の性質 (II)

——ウッド合金中の横波——

岐阜大学工学部物理学教室 上 岡 宏 彰

(昭和 52 年 11 月 4 日受理)

Properties of Elastic Waves in a Polycrystalline Solid during Melting and Solidification Processes (II) — Shear Wave in Wood's Alloy

Hiroaki KAMIOKA

Department of Physics, Faculty of Engineering, Gifu University

(Received November 4, 1977)

Shear wave velocity and its attenuation in Wood's alloy were measured from room temperature to melting range. The present data are combined with those for dilatational wave, and the variations of elastic and anelastic properties during the melting process were analyzed. Although the shear wave vanished at the early stage of melting process, the rigidity was supposed to decrease continuously to zero at the end of total melting. The variations of the other quantities associated with melting were discussed based on the present data.

§ 1. はじめに

融解領域における弾性波の速度とその減衰の様子を知ることは、地球内部でのこれにかかわる部分の解明に役立つところは多い。

融解の理論はいろいろある。また、融点付近までの物性を明らかにする実験もいろいろある。しかし融解過程、凝固過程での物質の状態とその物性、特に弾性波の挙動に目を向けたものは、ほとんど見当たらない。この研究の目的は実験的に上記に関する知見を得ようとするものである。

ウッド合金について組織 (texture) とたて波の性質との間の関係については、先に報告した。本報では、これにつづいて横波についての研究結果を報告し、ついで先報の結果と合せて融解過程における物性の変化を論ずる。

§ 2. 実験方法

超音波装置, 加熱槽, 温度記録, 試料容器からなる測定システム, 試料および測定方法は, 先報のたて波測定で報告したものと同じである.

なお, 本試料の密度は室温付近の 23.5°C で 9.52 g/cm^3 , 融解前 65.5°C で 9.50 g/cm^3 , 融解後 75.5°C で 9.65 g/cm^3 である.

横波用超音波振動子としては, 1 MHz (Ycut) の水晶振動子を使い pulse transmission method により融解過程における横波速度とその減衰を測定した. 加熱速度は 0.10°C/min である.

§ 3. 実験結果

試料温度の上昇および融解に伴う横波速度 V_s の時間変化を Fig. 1 に示す. 横波は融解領域の前半で急激に消滅する. ただし, これは横波が実際に消滅し伝播速度が 0 となるのではなく, 大きな減衰のために観測にかからなくなるだけである. 横波が測定できなくなった温度は, たて波速度が 2.0% 減少するところ (融解によつて V_p は 19% 減少する) に相当し, 試料の組織の状態は, 前報の結果から考えて粒子境界面に数%の液相を含む状態に相当する.

次に, 温度に対する横波速度の変化を MIZUTANI and KANAMORI (1964) の結果と比較して Fig. 2 に示す. 両者はほぼ同じ傾向を示すが, 本実験の方が融点近くまで V_s の減少率が小さく, 融解の開始と共に急に減少している.

横波の quality factor Q_s は $Q_s = f\pi/\alpha V_s$ で与えられる. ここに f は周波数, α は減衰係

Fig. 1. Shear wave velocity, attenuation (arbitrary unit) and temperature of sample as a function of heating time. The frequency of the transducer vibration is 1 MHz .

Fig. 2. Shear wave velocity versus temperature. The results obtained by MIZUTANI and KANAMORI (1964) are also shown.

数, V_s は横波の速度である. Q_s の変化を求める具体的な方法は次の通りである. まず, ある温度 (30°C) の減衰係数の絶対値 ($\alpha_{30}=0.584 \text{ neper/cm}$) を求める. 次に, この温度における振幅 A_{30} と任意の温度 T における振幅 A_T とを用いて, 相対的な減衰係数の差 $\Delta_T\alpha=\alpha_T-\alpha_{30}$ を $\Delta_T\alpha=\ln(A_{30}/A_T)/L$ neper/cm (L は試料長) により求める. したがって温度 T における減衰係数

は $\alpha_T=0.584+\Delta_T\alpha$ より与えられ, このときの V_s の値を用いて Q_s を求める. こうして得られた Q_s の絶対値には, 幾分うたがう余地があるが, 相対的变化の様子を見るには十分であると考えられる.

§ 4. 議 論

i) 横波の減衰のタイプ

融解領域のせまい温度範囲における Q_s の時間的变化を Fig. 3 に示す. 融解の開始後 2 段階の減少が生じている様子が明らかによみとれる.

第 1 段階の減衰が生じている温度は, 先報で報告した A1 型のたて波の減衰が生ずる温度と厳密に一致する. 即ち, 固相 V が融解し数%の液相が生じた状態においてみられるのである.

第 2 段階の減衰は, 固相 IV の融解の進行に伴って液相の割合が増加しはじめると卓越し, 液相の量が 10% 程度になると減衰が大きすぎて横波が観測できなくなるものとする. このように液相の量が大きくなり, 横波の減衰が限度なく大きくなるのを C 型の減衰と呼んでおく.

Q_s の温度変化の様子を示したのが Fig. 4 である. 横波の Q_s の値については比較できる他のデータは見当らないが, 先報で報告したたて波の Q_p の

Fig. 3. Quality factor Q for shear wave as a function of heating time.

変化をあわせて示した。温度の増加につれて Q_s は減少し融解少し前に極小値を示して、一度増大して再び融点で急速に激減する。融解前に Q がいったん極小値を示す ($60\sim 68^\circ\text{C}$) B 型減衰は、先報のたて波についてもはじめて見られたもので、たて波、横波共に同じ温度領域で生じていることは注目になる。より低い温度領域での Q_p , Q_s の温度変化を融点まで外挿して考えれば、融点直下 $0\sim 3^\circ\text{C}$ の領域では、 Q が異常に大きくなるのだとも見ることがができる。

ii) 弾性定数の温度変化

先報では、たて波の速度、quality factor を明らかにし、本報では横波のそれらを測定した。すなわち V_p , V_s , Q_p , Q_s の全てのデータがそろつたので、これから弾性定数、非弾性定数を求める考察を試みる。

Fig. 5 は体積弾性率 k , ラメ定数 λ , ヤング率 E , 剛性率 μ , ポアソン比 σ の温度変化を示す。 20°C と 70°C での E と μ の減少割合は、 20°C での値を基準とし、それぞれ 24.3% と 26.1% であり、ほぼ同じ程度である。つまりウッド合金はやわらかい物質ではあるが、融点近くまで μ はさほど大きな変化を示さないで、大きな変化は主に融解領域でのみ生じる。

k は融点までほとんど変化することなく、液化によつてその値は 10.5% の減少をする。

Fig. 5 をみる限り、融点における

Fig. 4. Quality factor Q_s for shear wave versus temperature. Q_p for compressional wave are also shown.

Fig. 5. Variation of elastic constants with temperature.

物性の変化は不連続的である。

iii) 融解過程の進行に伴う弾性定数の変化

融解過程の比較的初期において横波は消滅して観測が不可能になる。測定されたデータを温度に対してプロットした限りでは、物性変化は不連続的にみえた。しかし、融解領域で、たて波は連続的に変化しているのであるから他の物性の変化も本当は連続的なのではないかと考える。したがって、たて波速度の変化に関する詳細なデータを基盤としてこの問題を考察することは可能である。

融解領域で V_s は波の消滅により途中でその値は測定できなくなるが、実際には連続的に減少して融解完了の液体に至つて $V_s=0$ になると考え、波の消滅以後融解完了点までの V_s の変化の仕方について、考えられる極端な場合のつもりで2通りのモデル (a, b) を仮定してみた (Fig. 6)。

この領域で、 V_p と ρ および仮定した V_s から弾性定数の変化を計算して Fig. 7 に示した。図から明らかなように k と λ は不自然な凸状変化を示す。つまり、 V_s の変化に関する a, b, どのモデルでも融解過程における k と λ の値が固体の場合よりも大きな値を一度示すことである。この領域では固体と液体が共存した状態にあるはずであり、物質全体としては、 k の値は高々固相のそれであり、これを上回るの是不合理と考えられる。

そこで、次に逆に k について融解領域内で考えられる2通りの極端な場合 (c, d) (Fig. 7) を考え、これより他の弾性定数を決めてみる。その各々に相当する V_s の変化を Fig. 6 に示す。c の場合には V_s が融解過程で一度大きな値をとることになり、妥当性を欠くようである。さらに、この c は Fig. 7 の k 以外の弾性定数についてみても不適当と思われる。d は V_s についても、 k 以外の弾性定数についても、妥

Fig. 6. The variations of shear wave velocity in the melting range. Several different cases; a, b, etc are shown.

Fig. 7. The variations of elastic constants in the melting range. Several different cases; a, b, etc are shown.

当性をもつようである。したがって、これを上限として少くとも k 及び V_s の変化は d に近い範囲内にあると考えられる。

λ が融解域の前半で、液体の値をとつて一定であるという条件は、 d に近い範囲内に入っている。そこで $\lambda = \text{一定}$ というモデルを設定してみると、Fig. 6, 7 のような変化を示す。つまり、 V_s , E , μ , σ いずれについても自然な変化を示す。即ち、 $\lambda = \text{一定}$ と仮定した場合が一番もつともらしいことになる。この場合 μ は予想通り融解の前半で 0 となるのではなく、融解領域を連続的に減少して融解完了点で 0 となるのである。

Fig. 8 には、融解過程における液相の量に対する各弾性パラメータの変化をプロットしてある。

iv) Q_k , Q_μ の温度変化

たて波、横波の quality factor Q_p , Q_s は Fig. 4 のような変化を示した。ところで弾性率 k , μ のそれぞれに対応する内部摩擦を Q_k^{-1} , Q_μ^{-1} とし下記の通り複素弾性率 k^* , μ^* で表わすことにする。

$$k^* = k(1 + iQ_k^{-1}) \quad (1)$$

$$\mu^* = \mu(1 + iQ_\mu^{-1}) \quad (2)$$

そうすると、 Q_p^{-1} 、 Q_s^{-1} との間に次の関係が導かれる。

$$Q_p^{-1} = \frac{k}{k + (4/3)\mu} Q_k^{-1} + \frac{4/3\mu}{k + (4/3)\mu} Q_\mu^{-1} \quad (3)$$

$$Q_s^{-1} = Q_\mu^{-1} \quad (4)$$

(3) 式と (4) 式より

$$Q_k^{-1} = \frac{k + (4/3)\mu}{k} Q_p^{-1} - \frac{(4/3)\mu}{k} Q_s^{-1} \quad (5)$$

固相の Q_k は融解の少し前まではほとんど温度変化しないものであり、減衰の温度変化は、主に Q_μ によるものであることがわかる。

融点直下の固相で生ずる A タイプの減衰は Q_μ より Q_k において著しく見られるのは注目に値する。 Q_μ に関する限り融点直下で減衰が減少すると言う方がわかりやすい。 $\log Q_\mu$ と $1/T$ の関係から減衰の活性化エネルギーを求めると $17.1 \text{ cal/mol} = 2.8 \text{ eV}$ となる。

固相・液相共存領域における減衰は Q_k においてピークを示す可能性がある。これは理論的に予測されている固-液の相転移に伴うエネルギー吸収とみても困らない。

一方、 $Q_k^{-1} \geq 0$ であるから (5) 式から

$$1 + \frac{4}{3} \frac{\mu}{k} Q_p^{-1} \geq \frac{4}{3} \frac{\mu}{k} Q_s^{-1} \quad (6)$$

でなければならない。したがって横波の Q_s^{-1} は融解の進行と共に急激に増大するかもしれないが μ も減少するので、その積 μQ_s^{-1} は有限の値をとることがわかる。

仮に融解が完了した状態においては $Q_k = Q_p$ でなければならないから $\mu Q_s^{-1} = 0$ である。

融解過程における (5) 式中の各要素の大きさの変化を Fig. 9 に示した。 μQ_s^{-1} の変化を 1, 2, 3, 4 と 4 通り仮定してある。現実には Q_k^{-1} あるいは μQ_k^{-1} の値がどのモデルに近いか

Fig. 8. The variation of elastic parameters as a function of liquid fraction in the melting range.

解部分の体積割合といった要因が、部分溶融している部分中を通過する地震波の性質に影響をおよぼすことが指摘されている。

この点に着目して行われた実験として、比較的重要な意味をもつものに SPETZLER・ANDERSON (1968) の塩水-氷系の実験がある。これは融点付近における弾性波速度と Q の性質を調べたものであつた。彼らは適用波長を固-液共存領域における粒子寸法より十分大きくなるように、低い周波数を採用した。一方、本実験で適用した周波数は、上記の意味では高い周波数である。しかしそれにもかかわらず、本実験で得た速度、 Q の変化に関する結果は SPETZLER・ANDERSON の結果に似ている。このことは、周波数および弾性波歪み振幅の程度などが異なるにせよ、融解が弾性波の伝播速度、および Q におよぼす効果が著しいものであることを指摘できる。

謝 辞

本文をまとめるにあたり、多くの貴重な助言と御指導をいただいた名古屋大学理学部熊沢峰夫助教授に心から感謝の意を表します。また、御討論下さりいろいろ教えていただいた、同研究室の方々に御礼申し上げます。

文 献

- MIZUTANI, H. and H. KANAMORI, 1964, Variation of Elastic Wave and Attenuative Property near the Melting Temperature, *J. Phys. Earth*, **12**, 43-49.
PRESS, F., 1959, Some Implications on Mantle and Crustal Structure from G Waves and Love Waves, *J. Geophys. Res.*, **64**, 565-568.
SPETZLER, H. and D. L. ANDERSON, 1968, The Effect of Temperature and Partial Melting on Velocity and Attenuation in a Simple Binary System, *J. Geophys. Res.*, **73**, 6051-6060.