ステップ状応力変化に対する超音波 伝ば速度の応答について*

金 持 昭 治** 赤 星 通 次 郎** 水 野 兼 雄**

On the Response of Ultrasonic Velocity to Stepwise Change of Stress Condition

by

Shoji KANEMOCHI, Michijiro AKABOSHI and Kaneo MIZUNO

(Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University, Neyagawa)

In an experimental study of acousto-elastic effect, some anomalous phenomena in ultrasonic velocity, that could not be interpreted by the lattice anharmonicity, have been observed. In this paper, we have observed in detail the behaviors of an ultrasonic velocity propagating in a copper specimen (99.98% of purity) perpendicularly to the stress axis, as the uniaxial tensile and compressive stresses exceeding the range of plastic deformation were applied or released stepwisely. The results obtained are summarized as follows:

(1) The decrease of the traveling time (in a traveling path of 10 mm) after one minute of stress application under a constant stress level (ΔT_m) seems to be related with the pinning of dislocation lines similar to the Köster effect.

(2) The difference between the traveling time at T_0 and that after stress release (ΔT_{or}) increased with the plastic strain (ϵ_{ply}). The dislocation is in un-stable state when the plastic strain appears, so that its mobility becomes larger. Even in the elastic range, ΔT_{or} was observed.

(3) The change in traveling time (ΔT_a) during stress application increased parabolically with the stress in the elastic range, similar to (ΔT_r) during stress release. When some plastic strain pre-existed, they decreased at first depending on the amount of the plastic strain, reached a minimum, and then increased with the stress.

(Received May 19, 1978)

キー・ワード：超音波伝ば速度，応力低存性，ステップ応答

1 緒 言

鋼，銅およびアルミニウムなどの金属材料における超音波伝ば速度の応力依存性（音弾性効果）や3次弾性定数の実測を目的とした実験の際に，筆者らは，一定応力状態や除荷後の無応力状態において，伝ば速度が徐々に増加すること，除荷後の伝ば速度は応力の履歴による影響が大きいこと，塑性ひずみが生じた場合の伝ば速度は複雑な挙動を示すことなどを経験的に知った。当初，これらの現象は実験方法にも一因があるものと思われたが，実験を重ねるに従い，また低応力においても転位の影響¹⁾²⁾が考えられることから，これらの現象も同様に，転位の影響として説明できるものと思われる。

そこで，本研究では，銅多結晶金属について，単軸引張りおよび圧縮応力をステップ状に負荷および除荷

したときの超音波（5 MHz）伝ば速度の応答を詳細に測定し検討した。なお，応力範囲は塑性域まで含み，超音波の伝ば方向は応力軸に垂直であり，また応力軸に垂直に偏向した横波を用いた。

2 実験装置および試料

一定応力状態に比較的長く（20分間）保ち，そのときの超音波伝ば速度の挙動を測定するため，応力（単軸応力）の負荷は引張り，圧縮とも Fig. 1 に示す重すいとレバーからなる装置で行った。Fig. 1 は引張りの場合を示し，圧縮の場合はレバーを左右逆にして取り付ける。また，応力値（ σ_y ）の算出は，重すいとレバー比で定る軸荷重を試片断面積（1.89 cm²）で割って求めた。低応力範囲（約 50 kg/cm² 以下）においてはひずみ計式ロードセルを併用し，これらの間に差違のないことを確めた。

試片の表裏に貼り付けたひずみゲージにより，それらの平均として応力方向のひずみ（ ϵ_y ）を測定した。

* 原稿受理 昭和53年5月19日

** 正 会 員 大阪電気通信大学 寝屋川市初町

Fig. 1. The equipment of stress application in an arrangement for tensile stress. The lever would be re-arranged for compressive stress, as shown in the figure. A load-cell was used in the stress level lower than 50 kg/cm². The vibrator retainer has been shown in Ref. 2).

超音波伝ば速度、実際には無応力状態での伝ば距離 (L_0) が 10 mm である試片を通過する時間 (T) の測定はシングアランド (sing-around) 装置で行い、ペンレコーダに記録した。送受信振動子 (直径 10 mm, 共振周波数 5 MHz) の試片への取付は特殊な金具を用いて行った。シングアランド装置は $+0.015 \mu\text{s}/^\circ\text{C}$ の温度特性があるため、環境温度の変化を極力避けた。また、測定した伝ば時間 (T) をすべて、 25°C の値に補正した。

試料は市販銅丸棒 (99.98%) を所要の形状に加工し、 450°C 8 h の焼なましを行って実験に供した。なお引張りと圧縮では別の試片を用いた。

3 実験方法

既に述べたように、超音波伝ば時間 (T) は一定応力状態においても徐々に減少することなどが知られていたため、本研究では、ある応力 (σ_y) をステップ状に負荷し、そのまま 20 分間保持した後、ステップ状に除荷した。さらに 20 分経過したとき、より大きな応力を負荷し、以後このような応力サイクルを繰返した。(Fig. 2 参照)。数回の応力サイクルを一実験グループとし、同じ応力範囲である実験グループを 2 回ずつ行った (Table I 参照)。

Fig. 2 は、上記のように応力を負荷したときの伝ば時間の変化 (ΔT) およびひずみ (ϵ_y) を示す。ここで、 T_0 は実験開始前の伝ば時間、 ΔT_a は負荷時に応答する伝ば時間の変化、 ΔT_r は除荷時に応答する伝ば時間の変化、 ΔT_m は負荷後 1 分間の伝ば時間の減少 (減少速度) および ΔT_{or} は除荷時 (無応力状態) の伝ば時間と T_0 との差を示す。また、 t_c は実験グループ間の時間 (試料の放置時間) であり、30 分未満を切り捨てて、Table I に示す。さらに、 ϵ_{ply} は塑性ひずみ、 $\Delta \epsilon_{ply}$ は実験グループ内で生じた塑性ひずみを示す。

Fig. 2. Cycles of stress applied (σ_y), strain (ϵ_y) and change of the traveling time (ΔT). ϵ_{ply} ; plastic strain in the stress direction. $\Delta \epsilon_{ply}$; plastic strain introduced in the experimental group. T_0 ; traveling time at the beginning of this work. ΔT_a ; change of the traveling time when a stress was applied. ΔT_r ; change of the traveling time when a stress was released. ΔT_m ; decrease of the traveling time in one minute after a stress application. ΔT_{or} ; difference of the traveling time between T_0 and that when a stress was just released.

Table I. Experimental group and its stress level (σ_y), symbol plotted in Figs., plastic strain introduced in the group ($\Delta \epsilon_{ply}$) and time interval between each group (t_c).

G.No.	Symbol	σ_y (Kg/cm ²)		$\Delta \epsilon_{ply}$ (10^{-6})		t_c (h)	
		Ten.	Comp.	Ten	Comp	Ten	Comp
1	○	18~87	19~90	3	4	0	21
2	●	18~87	19~90	2	1	0	2
3	○	61~118	51~106	7	5	0	13
4	●	61~118	51~106	4	0	32	0
5	○	92~145	114~174	16	37	17	16
6	●	92~145	114~174	28	1	0	4
7	○	124~229	140~243	125	192	0	1
8	●	124~229	140~243	18	30	0	0
9	○	176~303	203~293	390	425	0	0
10	●	176~303	203~293	30	63	0	0

Fig. 3. Stress-strain diagram. E ; Young's modulus.

Table I は実験グループの応力範囲, $\Delta\epsilon_{ply}$, および t_e を示す. また, 記号 (Symb.) は以下の図に用いるものである.

Fig. 3 は応力を負荷したときの σ_y と ϵ_y を用いて得られた応力-ひずみ線図である. ヤング率 (E) は $1.12 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ となった.

4 実験結果および検討

4.1 定応力状態での伝ば時間の変化 (減少)

応力を負荷した後の一定応力状態における超音波伝ば時間の減少について, 負荷後 1 分間の伝ば時間の減少量 (減少速度) (ΔT_m) を Fig. 4 に示す. 同様な現象は除荷時にもみられたが, 定性的な差違はなく省略する.

Fig. 4 において, ΔT_m は引張り, 圧縮とも応力の増加につれてほぼ放物線状に増加しているが, 大きな塑性ひずみが生じた実験グループ (G. No. 7, Table I 参照) 以降 (σ_y が約 $\pm 1.7 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$ 以上) においては, 応力の増加につれて ΔT_m は減少し, ばらつきも大きくなっている.

一定応力状態で, ひずみの増加 (クリープ) もなく伝ば時間が減少することは, (2 次) 弾性率が大きくなっていると考えられる.

Fig. 4. Decrease of the traveling time in one minute after a stress application (ΔT_m , rate of the decrease) against the stress (σ_y).

超音波の伝ば速度や内部摩擦と転位との関係は転位線の絛モデルで説明されることが一般である³⁾. そこで, 弾性率の増大は転位線の平均固着点長さの減少に対応し, この現象 (ΔT_m) も, 内部摩擦における Köster 効果⁴⁾と同じく, 応力の負荷により固着点から離脱した転位線が再びくぎづけされることであると考えられる. なお, 転位線の固着点からの離脱は, 低応力 (0.1 kg/cm^2 以下)³⁾ においても生ずることが示されている.

4.2 除荷直後の伝ば時間

実験開始前の伝ば時間 (T_0) に対する, 応力を除荷したとき (無応力) の伝ば時間の差 (ΔT_{or}) を Fig.

Fig. 5. Difference of the traveling time between T_0 and that when a stress was just released (ΔT_{or}) against the stress (σ_y) in low stress level.

Fig. 6. Difference of the traveling time between T_0 and that when a stress was just released (ΔT_{or}) against the plastic strain (ϵ_{ply}).

Fig. 7. Difference of the traveling time between T_0 and that when a stress was just released (ΔT_{or}) against the stress (σ_y) in higher level.

5~7 に示す.

Fig. 5 は低応力範囲 (実験グループの 4 以下) の ΔT_{or} を応力 (σ_y) に対して示したものである. まず, 引張り側において, 実験グループ番号 (G. No.) 1 の σ_y が 65 kg/cm^2 以上で ΔT_{or} は急激に増加している. しかし, G. No. 2 では応力の増加につれて ΔT_{or} は減少している. G. No. 1, 2 での $\Delta\epsilon_{ply}$ はそれぞれ $4, 1 \times 10^{-6}$ と小さく, 測定精度に比較して有意性は小さいが,

ΔT_{or} が急激に増加したことは、微視的な塑性ひずみが生じ、転位線の離脱した状態に対応すると思われる、同じ応力範囲である G. No. 2 では、G. No. 1 で離脱した転位線が再びくぎづけされることに対応するものと思われる。また、G. No. 3 と G. No. 4 でも同様の傾向がみられる。しかし、圧縮側の G. No. 1 では、 ΔT_{or} は初めに減少し、その後増加していることや、G. No. 2 では σ_y にほぼ比例したような増加をしていることなど、引張側と一致しない。ただし、G. No. 3 と G. No. 4 は引張側と類似した傾向である。これは、応力の負荷または除荷により、転位線の離脱と固着のどちらが優位になるかは、材料の状態に微妙に影響されるものと思われる。

Fig. 3 で示されたように、G. No. 4 以下は一般には弾性域として扱われる範囲であるが、応力の負荷により ΔT_{or} は $2 \times 10^{-3} \mu s$ 、 $\Delta T_{or}/T_0$ にして 4.5×10^{-4} 程度の範囲内を上下するものと考えられる。これは、弾性率変化 ($\Delta M/M_0$) にして約 10^{-3} となり、4 桁以上の精度で弾性率を測定することが困難であることの要因であろう。

Fig. 6 はより大きな範囲での ΔT_{or} を ϵ_{ply} に対して示したものであり、Fig. 7 は σ_y に対して示したものである。Fig. 6 に示すように、塑性ひずみが生じたときの ΔT_{or} は ϵ_{ply} に対して単調に増加している。これはまた、 σ_y に対して示した Fig. 7 において、 ΔT_{or} は Fig. 3 における ϵ_y と似た変化を示していることにも示されている。

塑性ひずみが生じた場合、伝ば距離 (L) も当然変化しており、その影響が考えられるが、Fig. 6 において引張り、圧縮ともに、 ϵ_{ply} に対する ΔT_{or} は対称的に増加していることから、 L の変化による影響は小さく、無視できるものと考えられる。

以上のように、塑性ひずみが生じ、転位密度が増加すると ΔT_{or} が増加、すなわち、弾性率が低下することは、絛モデルの結果と定性的に一致している。なお、 ΔT_{or} は除荷直後の値であり、前節 (4・1) で述べたごとき現象により、増殖した転位線が徐々に固着され、弾性率もある程度回復すると考えられる。

4・3 負荷および除荷に答る伝ば時間の変化

応力を負荷したときに応答する伝ば時間変化 (ΔT_a) および除荷したときに応答する伝ば時間変化 (ΔT_r) をそれぞれ、Fig. 8 および Fig. 9 に示す。ただし、 ΔT_r の符号は、除荷の際に伝ば時間が短くなる場合を正とした。したがって、 ΔT_a が正で ΔT_r が負である場合の伝ば時間の応答は、Fig. 10 (引張側の G. No. 8、応力サイクル 2 番目) に示すように、負荷時も除荷時も伝ば時間は増加していることになる。

Fig. 8, 9 に示すように、 ΔT_a と ΔT_r は非常によ

Fig. 8. Change of the traveling time when a stress was applied (ΔT_a) against the stress (σ_y).

Fig. 9. Change of the traveling time when a stress was released (ΔT_r) against the stress (σ_y).

Fig. 10. A typical response of the traveling time which increased with the stress at applying and at releasing.

く似た傾向を示している。まず、 $\pm 100 \text{ kg/cm}^2$ 以下の低応力では、 ΔT_a 、 ΔT_r とともに σ_y に対してほぼ放物線状に増加している。さらに σ_y が増加し塑性ひずみが生じ始めると ΔT_a の増加率は減少し、 ΔT_r は (それ自身) 減少している。塑性ひずみは負荷時に生じ、除荷時には生じないことや、塑性ひずみが生じたときの ΔT_{or} (4・2 節参照) はかなり大きくなっていることなどから、 ΔT_a と ΔT_r に差違が生じるものと思わ

れる。

また、塑性ひずみが生じた場合、次の実験グループの ΔT_a , ΔT_r はそれまでの結果から推定される値より小さく、別の曲線で示されるような変化を示している。さらに、その低応力範囲は Fig. 8, 9 の破線で示されるようになると考えられ、 σ_y の増加に対して初めは減少し極小値を経て増加すると思われる。大きな塑性ひずみが生じた後の材料の転位組織は不安定で、その易動度も大きい状態にあると思われる。したがって、そのような状態で応力を負荷したとき、転位線の固着は離脱よりも多く生じ、 ΔT_a , ΔT_r が低応力で減少するものと考えられる。さらに応力が増加すれば、離脱のほうが優位になるものと考えられ、低応力における ΔT_{or} の挙動と類似している。

Fig. 11 は $(\Delta T_a - \Delta T_r)$ と σ_y との関係を示したもので、ほぼ放物線状を示している。低応力における $(\Delta T_a - \Delta T_r)$ はそのような応力でも微視的な塑性ひずみが生じていると考えるか、一定応力状態や無応力状態での保持時間を長くし、転位組織が完全に安定(固着)するようにすれば消滅すると思われる。

Fig. 11. Difference of the traveling time changes ($\Delta T_a - \Delta T_r$) against the stress (σ_y).

なお、転位組織の超音波伝ば速度への影響は、転位線の絛モデルを用いて考察することが普通であるが、転位線張力がわん曲により変化するという非線形な絛

モデルにより、転位線の離脱や固着によらない説明も可能である。しかし、今のところどちらがより自然であるかは不明である。

5 結 言

単軸応力をステップ状に負荷および除荷したときの銅試料 (99.98%) についての超音波伝ば時間 (伝ば距離は 10 mm) の応答を測定し検討した。ただし、使用した超音波の共振周波数は 5 MHz であり、応力方向と垂直に偏向した横波である。

結果を要約し以下に示す。

(1) 一定応力状態や除荷後の無負荷状態において、超音波伝ば速度は徐々に増加したが (伝ば時間は減少)、これは Köster 効果と同様に、転位の固着に関係していると思われる。

(2) 除荷直後の伝ば時間の実験前の伝ば時間に対する差 (ΔT_{or}) は、大略的には塑性ひずみに対応して増加した。これは、応力の正負 (引張り、圧縮) にかかわらず同じ傾向であり、伝ば距離の変化とは関連しない。伝ば時間の増加は、弾性率の低下を意味し、除荷直後の転位組織は不安定でその易動度が大きい状態であると考えられる。なお、弾性域と思われる低応力においても、わずかな ΔT_{or} は観察された。

(3) 負荷および除荷に応答する伝ば時間の変化 ΔT_a および ΔT_r は、よく似た傾向を示し、弾性域ではほぼ放物線状に増加した。塑性ひずみが生じた場合の次の実験での ΔT_a , ΔT_r は、 σ_y の増加に対してはじめは減少し極小値を経て増加した。これは、上述のように、塑性ひずみが生じた場合の転位組織が不安定であることに関連していると思われる。

参 考 文 献

- 1) 金持昭治, 水野兼雄, 赤星通次郎, 材料, **26**, 289 (1977).
- 2) 金持昭治, 赤星通次郎, 水野兼雄, 材料, **27**, 974 (1978).
- 3) Rosenfield, A. R., G. T. Hahn, A. H. Bement, Jr., and R. I. Jaffee, "Dislocation Dynamics", McGraw-Hill (1967).
- 4) 日本金属学会編, "転位論" (1971) 丸善
- 5) 実吉純一, 菊地喜充, 能本乙彦, "超音波技術便覧", (1966) 日刊工業新聞
- 6) Granato, A. V., and K. Lücke, J. A. P., **27**, 583 (1956).
- 7) Hikata, A., and C. Elbaum, Phys. Rev., **144**, 469 (1966).