





## 鋼の塑性変形挙動と音波吸収

Deformation Characteristics and Dislocation Damping of Steels and other Metals

今 中 拓 一\*

Takuichi Imanaka

佐 野 謙 一\*\*

Kenichi Sano

藤 元 克 己\*\*\*

Katsumi Fujimoto

## Synopsis :

The simultaneous measurement of stress, strain and attenuation in metals and alloys during plastic deformation gives quantitative information on the instantaneous density and segment length of mobile dislocations. Recent progress in both theory and experiment on dislocation damping is critically reviewed. Also the effect of bias stress on damping and the interpretation of the

$$\tau = \tau^*(\dot{\epsilon}, T) + \tau_0 \quad (1)$$

は、転位の節、不純物原子、格子間原子、原子空

と書くことができる。 $\tau_0$ は転位間の弾性的相互作用、不純物原子、析出物などにより長範囲に働く内部応力で、変形速度、温度に依存しない。 $\tau^*$ は温度、変形速度に依存し、これは摩擦力に相当するものである。この  $\tau^*$  は物質固有の強さにも関連し、結晶中を運動する転位に固有の抵抗力

孔などの点状欠陥との相互作用が考えられる。

すべり面  $x-y$  面内  $x$  方向の転位の変位  $\xi(y, t)$  を決める式は、

$$A \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + B \frac{\partial \xi}{\partial t} - C \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = b\sigma(t) \quad (2)$$

と書ける。 $A$  (g/cm) は転位の単位長さ当りの有

効質量、 $B$  (dyn/cm) は転位の単位長さ当りの摩擦

は結晶中の転位の長さ、 $\tau_0$  は転位の固有の強さ

は転位の移動速度に比例する滑り長さ当りの摩擦

ただし  $\omega = 2\pi f$

$A(\infty)$ の中で未知量は  $B$  と  $A$  で、 $A$  を最初エッチ  
ピット法、X線、電顕などで求めておけば  $B$  を決  
めることができ、 $B$  が決めてあれば、変形中の  $A$  の



に測定すれば、 $L$ ,  $A$  の変化を求めることができ

### 3.2 kink によるフォノン散乱

記録、解析して、変形中の転位の挙動を知ることが可能になる。

### 3. 転位に対する動抵抗

Leibfried のフォノン散乱の理論<sup>9)</sup> は真直な無限長の転位についてのものであるが、Peierls potential が大きい物質の場合には、転位の易動度はむしろ kink の運動によって決まるから、こ

の問題に関しては Lothe<sup>9)</sup> や Eshelby<sup>10)</sup> らがくわ

が小さく、つまり大部分の転位線が Peierls po-

$\beta$ : 定数

( $A$ : 単位長さ当りの有効質量,  $A \cong \pi \rho b^2$ ,  $\rho$ : 密度,  $C$ : 転位線の線張力  $C \cong 2\mu b^2$ ) で一義的に決まるが, kink モデルの場合の  $\omega_0$  は, 固着点間距離と kink 間距離の両方に依存する。したがって

くつかの例を, **Table 1, 2**, および **Fig. 4** に示す<sup>17)</sup>。イオン結晶や fcc 金属の Cu については低

$\times 10^4$



渦での挙動を除いて一定の一致をみている。一 [19]、発表されているデータについても非常に

方, bcc 金属については, 実験がほとんどなく, これはおおいに, 純度のよい結晶の作成が困難であったことによる。最近になってようやく, bcc 金属の塑性変形挙動の理解の一助として, 転位の性質を明らかにする目的の実験が行なわれた。



まちまちである。

Fig. 5, 6 は Birnbaum ら<sup>17)</sup>の Nb についての実験結果で, Fig. 5 から, resonance は格子間原子の濃度に依存すること, Fig. 6 からは, 80°K から 293°K までの範囲では摩擦係数は温度に依存しないことがわかる。ごく最近, Mason ら<sup>17)</sup>は同じ Nb で  $B$  の温度依存性について同様の結果を得ており, それを熱伝導度に関係したフェノン粘性とするものであると説明している。さ

トの長さ、繰引面積などの塑性変形にとって重要

なパラメータを知ることができるので、塑性変形

## 6. 著者らの実験

くの研究者によって行なわれている。その方法としては、振り振動法<sup>19)-21)</sup>、縦振動法<sup>22)-27)</sup>や、pulse-echo 法<sup>28)-46)</sup>が用いられ、測定周波数としては1 Hz 前後から、300 MHz 近くにおよんでいる。

実験結果の定量的な解析が行なわれはじめたのは、1956年に Granato-Lücke<sup>1)</sup>による理論が提出された後で、同年、Hikataら<sup>30)</sup>はAl多結晶を用いた実験結果に対して Granato-Lücke の理論

著者らのグループは、kHz 領域においては複合水晶振動子法（縦振動法）により、また MHz 領域においては pulse-echo 法によって応力-歪関係と同時に内部摩擦や音速の変化を測定し、特に降伏点近傍における運動転位の挙動を明らかにする目的で実験を行なっており、現在までに、2、3のまとまった結果が得られているのでここに報告するとともに、動的測定法の特徴および音波吸収（内部摩擦）の測定結果から定量的に運動転位

用いた。試料と水晶振動子の結合には内部摩擦の  
きわめて少ない ( $Q^{-1} < 10^{-5}$ ) 溶融石英棒を使用し  
た。

実際に、Marx の方法によって、変形中の内部  
摩擦の測定を行なう場合、種々の原因による見か  
け上の内部摩擦の変化と、試料の内部構造の変化

は2%程度までは、見かけ上の内部摩擦の変化は  
ほとんど起こらない。実験に用いた試料の内部摩  
擦は $10^{-4}$ 以上で、塑性変形につれてさらに増加す  
る。実際に3%程度の変形を行なった場合でも、  
試料と水晶振動子の固有振動数のずれによると思  
われる内部摩擦の変化はほとんど観察されなかつ

によるものと混同しないように十分注意する必

た。以下に述べる測定に際しては、はじめに $f_0$ と

Table 2. Chemical composition and average grain size of steel specimens

0.05% C steel	0.05	0.0009	0.0036	0.014	0.001	0.007	0.009			0.07 mm
18-14 stainless steel	0.002	0.0028	0.0169	0.010	0.001	0.003	0.009	17.40	13.72	0.15 mm

で、また 18%Cr-14%Ni 不銹鋼は 950°C より急冷して溶体化処理を施した状態で実験に供した。

試料は直径 5mm の丸棒で長さは 1 波長 (70kHz)

内部摩擦の変化をクロスヘッドの変化量に対して示したものである。巨視的比例限において内部摩擦は急激に増加し、上降伏点近傍でピークを示

した残留塑性歪  $\Delta\epsilon_p$  とその荷重サイクルにおける  
最大応力によって応力-塑性歪曲線を求めた

#### 6.1.4 検 討

軟鋼および18%Cr-14%Ni不銹鋼の音波吸収係数の測定

Fig. 11 および Fig. 12 に軟鋼および18%Cr-

14%Ni不銹鋼の音波吸収係数の測定結果を示す。軟鋼の音波吸収係数は、  
歪の増加および18%Cr-14%Ni不銹鋼において

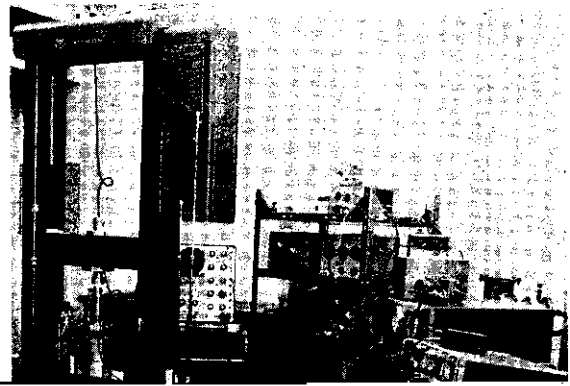
は至っていない。

## 6.2 MHz 領域での実験

塑性変形中の音波吸収（内部摩擦）の変化を、MHz の領域で測定した実験は、先述したように、数多く報告されているが、音波吸収が起こる機構について検討を行なっているものは少ない。ほとんどの報告が、先験的に Granato-Lücke の理論が塑性変形中の音波吸収の変化を解析する場合にも適用可能であるとしているようであるが、この前提は、はなはだ疑わしく自明のことではない。

この実験の目的は、降伏初期における運動転位密度の変化や、運動転位のセグメントの長さの変化を定量的に求めることであるが、

の伝播方向を  $\langle 110 \rangle$  方向にとって変形した。音波の吸収は、基本振動数 9MHz の X-cut の水晶を用い、Matec 社の Ultrasonic Attenuation Comparator で測定した。塑性変形中の超音波吸収



の変化は、すべて 27 MHz で行ない、Hewlett Packard 社製の 175 A 型 オシロスコープの display scanner を用いて、連続的に記録した。また、変形の各段階でクロスヘッドを停止して、 $27\text{MHz}$  の間で *overdamped resonance*

は、測定にかかる音波吸収のうちから転位によるものだけを取り出さなければならない。今回の実験では変形中または変形後の音波吸収の値から焼鈍状態での値を差し引いて、それを転位による音波吸収の値とした。このときとして式は転位による

の測定を行なった。

る超音波吸収の周波数依存性の1例を Fig. 15に示

$1.3 \times 10^7 \text{cm/cm}^3$ ,  $\bar{L} = 3 \times 10^{-5} \text{cm}$  が得られる。  
 このようにして変形の各時点で  $A$  および  $\bar{L}$  を求

て、転位密度は一定に保たれることから相互作用力の弱い固着点からの離脱に対応する。また、 $\bar{L}$  の値は約  $10^{-4} - 10^{-5} \text{cm}$  で



3) セグメントの長さ

$$L_0 \cong \rho_0^{-1/2} \dots \dots \dots (23)$$

$\rho_0$  は初期転位密度

外部応力  $\sigma$  の時,  $\sigma_a < \sigma_a' < \sigma_a + d\sigma_a$  である  
threshold stress を持つセグメントによる歪は  
(21), (22)を用いて,

$$d\varepsilon = CbL_0\ell_m N_1 f(\sigma_M) d\sigma_a \\ - CbL_0 N_1 \frac{(\sigma - \sigma_a)}{\dots} d\sigma_a \dots \dots \dots (24)$$

においては,  $L_0/L_N \ll 1$  は成立せず, Birnbaum  
ら<sup>53)</sup>の計算によると  $L_0/L_N \sim 1$  の場合には Gra-  
nato-Lücke の理論とはかなり異なった結果とな  
る。

今回の実験結果においては, 周波数依存の観点  
から, 塑性変形中の超音波吸収に対しても Gra-  
nato-Lücke の理論が適用できることが示された  
が, 上述の事情から, 実験によって求めた固着点

との相互作用の他に、スピン波との相互作用による相互作用が生ずる可能性がある。スピンは転位の歪場

bcc 金属結晶中に存在する転位による音波吸収の存在、吸収を生む機構そのものが検討されるべき問題であるが、鉄および鋼についてはこれに加

で平行が乱されており、運動転位は、これらのスピンを振動させながら進行しなければならない。運動転位は多数の格子振動の集まり、つまりフォノン集団と考えられる。しかも低温では転位

わち常に磁気機械的内部摩擦が存在することである。外部応力が磁気ひずみを通じて磁壁を動かし、その可逆、非可逆の運動により磁気機械的内部摩擦が生ずる。したがって、転位についての正確な情報を得るうえで、転位による内部摩擦と、磁気機械的内部摩擦との関係を明らかにすることは非常に重要なことである。しかも磁気機械的

とができる<sup>56)</sup>。この振動数がスピン波の振動数と同じになったとき、共鳴によって非常に大きなエネルギー損失を生じる。すなわち、スピン波との相互作用が転位の運動を律する可能性がある。外部磁場を変化させることによって共鳴が生じればこの現象から転位フォノンの振動数を実験的に求めることができる。また逆に電子-転位、ある

d. W. P. Mason : "Microplasticity", edited by C. I. McMahon Jr. John Wiley and Sons, New York

(1968), 287

- e. K. M. Jassby and T. Vreeland, Jr., : *Phil. Mag.*, **21** (1970), 1147  
f. A. Ikushima and T. Kaneda : *Trans. JIM* **9** Suppl. (1968), 38  
g. G. A. Alers and D. O. Thompson : *J. Appl. Phys.*, **32** (1961), 283  
h. R. M. Stern and A. V. Granato : *Acta Met.*, **10** (1962), 358  
i. D. O. Thompson and V. K. Pare : *Physical Acoustics, Part A*, **3** (1966), 293 [Academic Press, New York]  
j. T. Suzuki, A. Ikushima and M. Aoki : *Acta Met.*, **12** (1964), 1231  
k. O. M. M. Mitchell : *J. Appl. Phys.*, **36** (1965), 2083  
l. F. Fanti, J. Holder and A. V. Granato : 前出 ref. 3

45) T. B. ... J. A. McCarty : *J. Appl. Phys.*, **10** (1970), 4105.

46) D. Lenz, B. Edenhofer and K. Lücke : *Scripta Met.*, **5** (1971), 387

47) J. Marx : *Rev. Sci. Instr.*, **22** (1951), 503

48) 川村紘一, 今中拓一 : 川崎製鉄技報, **3** (1971) 4,

.....