金屬の塑性内部摩擦の研究 (第4報) その本質について*

榎 本 信 助**

Nobusuke Enomoto: Study on Plastic Internal Friction of Metals. (4th Report) On the Essential Properties of Plastic Internal Friction. The essential properties of internal friction of metals have so far been studied by investigators in various ways. In this paper, after having referred to and commented on main a theory which have been made public, the author advances a hypothetic that various phenomena of plastic internal friction may be explained by a new model of dislocation. It often appears as a phenomenon by cold working, that the plastic internal friction increases in small range of measuring amplitude, but, on the contrary, it decreases in large range of measuring amplitude. This phenomenon, an interesting characteristic of plastic internal friction, appears both in poly- and mono-crystals. Fig. 1 is an example of aluminium single crystal showing the relations of logarithmic decrement to amplitude of vibrational stress after cold working and aging. This phenomenon can be explained by assuming an increase of dislocations which appear and remain alone in positive or negative state immediately after cold working, that is, if we suppose that some of innumerable dislocations taking place after cold working are those forming the lattice of dislocations or migrating and the rest floats and does not disappear between domain of these lattices, the characteristics shown in Fig. 1 may be explained. In this paper, the possibility of existence of these isolated dislocations and their behaviors acting upon internal friction are described. (Received June 29, 1950)

I. 緒 言

内部摩擦現象の本質的解明への着手は1892年、Voigtによりなされ、Kimball, Lovell 等の単純な現象論的理論がこれに續いたが、更にその後の種々の複雑微少な實驗的事實の判明に伴ない、これらの理論がその總てを包含し得ないことが次第に明かとなり、遂に近年、Zener⁽¹⁾によりこの現象を熱弾性内部摩擦と他の内部摩擦とに分析されるべきことが提唱され、前者は理論的解析と實驗によつてその全貌がほぼ明かとなつた。しかし後者即ち熱弾性以外の内部摩擦の本質的機構については、なお二、三の學説があり、解明されるに至つていない。本論文においては、この内部摩擦の本質に關する諸説の検討と、前報告までの諸實驗にもとづく事實を包含した本質的機構に對する著者の見解を述べる。

II. 塑性内部摩擦の性質

金屬において現われる内部摩擦の中、熱弾性内部摩擦以外のものが主として塑性に關係することは多くの認める所であり⁽²⁾、特に加工によつて變化する内部摩擦が、熱弾性内部摩擦と無關係なことは Zener³⁾が實驗に基いて指摘している所である。從來の諸實驗及び著者の前報までの諸測定に現れたこの内部摩擦の性質の主なるものを要約すると、(1) 概して振動振幅に關係し、振動數に無關係である。(2) 構造變化に對して敏感である。(3) 應力函數曲線の形と、塑性歪の應力函數曲線の形とは内部狀態の變化に對應した變化をなす。(4) 冷間加工によつて小振幅測定範

(2) この他、磁性材料については、磁氣にもとづく内部摩擦が存在する。これは磁化の變化による渦電流および靜的變形による磁氣ヒステレシス環線の表わす非可逆的過程に原因するものであるが、これは熱弾性および塑性と表裏の關係にあり、本質的にはこの二つに歸着させることが可能である。C. Zener, *Ply. Rev.*, 53 (1938), 1010.

(3) C. Zener, H. Clarke, C. S. Smith, *Trans. A. I. M. E.*, 147 (1942), 90.

* 鐵道技術研究所

** 昭和23年10月本會福島大會に發表

(1) C. Zener, *Phys. Rev.*, 52 (1937), 230; 53 (1938), 90; C. Zener, W. Otis, R. Nuckolls, *Phys. Rev.*, 53 (1938), 100.

圍の内部摩擦は増大するが、大振幅範圍の内部摩擦は急速に減少過程に入り、加工前よりも減少する。(5) 冷間加工後の時効現象は、再結晶温度以下の加熱によつて促進される。(6) 繰返荷重を受ける場合は、これに相當する靜的荷重の場合に比して、小振幅範圍の内部摩擦の増大が著しい。(7) 大應力繰返荷重に引續いて、小應力繰返荷重を與えると、その機械的時効々果のため内部摩擦は減少し、その効果は放置の場合よりも大である。(8) 以上の諸性質は内部摩擦測定の場合のみに現れる孤立的現象ではなく、クリープ、塑性歪の變化とも對應し、大振幅範圍の内部摩擦は硬度と對應した變化を示す。(9) (3), (4) 項に記した現象は多結晶試料のみならず、單結晶においても得られた。

等が擧げられる。この内部摩擦の本質的機構の追及に當つてはこれらの性質を考慮に入れるべきである。

III. 塑性内部摩擦に関する諸説について

(1) 局部弛緩原因説 最初 Zener により提唱せられ、その後 Found はその修正説を提出している。なお著者は同じ頃、繰返荷重による疲勞と内部摩擦の關係の研究において、類似の機構を用いて説明した。

Zener の説⁽⁴⁾は金屬構造中に先天的又は加工等の後天的原因によつて剪斷應力を保持することの出来ない局部的弱點が存在し、このような試料に與えられた振動應力は、局部塑性作用によつてこの弛緩中心に散り、その結果内部摩擦を生ずると考える。かゝる弛緩中心は、固有の弱さ例えば不純物、溶質散在、結晶境界等の存在によるか、或は冷間加工によるこり面の結晶組織の破壊にもとづく弱點の形成によると假定している。彼の考によれば、加工による内部摩擦の増大は弛緩中心の増加のためであり、低温焼鈍による減少は弛緩中心の消滅のためである。又純度の高い金屬の内部摩擦が大であるのは、こり面に沿う軟弱面の面積が大であり、従つて弛緩中心の有効容積が大であるためである。

以上がその大要であるが、弛緩中心の結晶構造上の物理的把握がなされておらず、且加工直後の内部摩擦の不安定現象の説明には適當でない。彼自身も更に本質を掘り下げるための過渡的取扱としての現象論的把握であると述べている。

Zener の説に對し、Found⁽⁵⁾は殘留應力による局部弛緩効果原因説を提唱している。これは熱彈性効果によらぬ内部摩擦の原因はすべて内部に散在する局部殘留應力にあるとするものである。すなわち殘留應力を保持する局部に重疊し得る許容應力は、殘留應力相當量だけ低下し、これが内部摩擦の原因をなす。この假定によれば、加工後の内部摩擦の増大は局部殘留應力の増大により、又その後の時効減少はその擴散消滅により容易に説明される。局部殘留應力と熱彈性以外の内部摩擦の量的關係は一義的であり、従つて焼鈍が完全である場合、内部摩擦は最小となる。彼は又一方、次に述べる Read の轉位説をも排除している。その理由は、もし内部摩擦が轉位の支配を受けるとすれば、

これは結晶方位の函數であるから、内部摩擦も同様の支配を受けねばならぬに拘らず、彼の實驗結果によると降伏點の最も高い結晶方向において最大の内部摩擦が測定されたためである。

しかしながら彼の測定値は丸棒の縱自由減衰振動から得られたもので、極めて小振幅(およそ 0.003 kg/mm^2 以下)で行われており、これに反して降伏點の測定は引張りにより $0.28 \sim 0.43 \text{ kg/mm}^2$ と記録されている。第2報に述べた如く、著しく異つた應力範圍で行われた測定は、互に相反する性質を現わすことがあり、このような場合に兩者の關係を一概に否定することは出来ない。又著者の既報の實驗結果によると、加工後に大振幅測定範圍の内部摩擦は加工前よりも減少し、特に長時間放置後又は低温加熱後において著しい。Found の解釋はこのような硬化現象と殘留應力との關係の説明が困難である。もし第1種殘留應力(均等殘留應力)が内部摩擦を抑制するという假定を加え、加工硬化状態においては第1種殘留應力が優勢となり、従つて内部摩擦が低下すると考えるならば、小振幅範圍でもこの關係は維持され、内部摩擦は同様に低下しなければならぬ筈である。

次に著者⁽⁶⁾は繰返荷重による疲勞により、内部摩擦増大の現象を説明するために、Found の學説と類似の解釋を同じ頃發表した。すなわち疲勞による内部摩擦の増大は、局部應力集中による見掛け上の降伏點の低下によると考えた。この場合の内部摩擦は塑性過程に従つて現れるとの考は同時に發表した所⁽⁷⁾である。現在は後述の如く、これを轉位機構と關連して考へているが、これは上記の考を現象論から本質へ一歩近づけたもので修正とは考えない。すなわち1本の轉位線は局部應力を伴うから、局部集中應力の増加は轉位の増加と解釋することにより、上述の考えを擴張することが出来る。

(2) 轉位説 Seitz 及び Read⁽⁸⁾は、内部摩擦及びクリープの測定に現れる諸現象を説明すべき次の轉位機構を提唱している。それは内部摩擦の本質は轉位と考える。即ち振動應力の下では轉位は結晶内を動揺し、これにより供給エネルギーを消費する。この本質的觀念は種々の現象を説明することが出来る。例えば結晶の温度が高められるに従い、原子の熱振動は活發となるから、従つて轉位の滑動性も大となり、内部摩擦は増大する。これが高温における金屬の高内部摩擦の説明である。又加工による内部摩擦の増大は轉位の發生、増加によつて説明され、更に室温に放置するときは轉位は結晶外へ移住、又は正負轉位の合一によつて消滅し、その数は次第に減少し、従つて内部摩擦は時効減少する。加工後の加熱による内部摩擦の減少も同様に説明される。

以上の轉位機構はクリープに對しても同様の役割を演ずる筈であるから、内部摩擦とクリープとの量的關係が實證されなければならない。かゝる見地から兩者の關係につい

(4) C. Zener, Phys. Rev., 60 (1941), 455.

(5) G. H. Found, Trans. A.I.M.E., 161 (1945), 120.

(6) 榎本, 日本機械學會論文集, 11 (1945), I-39.

(7) 榎本, 日本機械學會論文集, 11 (1945), I-50.

(8) F. Seitz, T. A. Read, J. Appl. Phys., 12 (1941), 470.

ての考察を展開しているが、満足すべき一致性が得られなかつたことは前報に述べた通りである。Read はこの不一致について兩者の機構に本質的相違の存在することを示唆しているが、この疑問は未解決のままに残されている。

次に木谷博士⁽⁹⁾は炭素鋼の内部摩擦-應力函数曲線における肩の存在に関して、熱弾性内部摩擦と転位による内部摩擦との重疊説を提唱した。彼によると、熱弾性内部摩擦は應力の増加と共に増大するが、他方転位の運動は振幅の變化に従つて或る種の確率に支配され、従つて確率が最大値をとる振幅が存在すると仮定し、兩者相俟つて上記の肩が現れると考えた。しかしながら、Zener⁽³⁾によれば熱弾性内部摩擦は振幅に無関係であり、又転位の移動に關するこの假定は特に物理的根據が不確實であり、且内部摩擦曲線に肩の現れない他の金屬に對しては説明困難である。

IV. 内部摩擦に關する轉位模型について

軟鋼或はデュラルミンに外力を與える場合に生ずる不連續降伏、或は焼鈍軟鋼線を曲げる場合に見られる多角形變形等は突然に生ずる軟化現象と見做されるが、その原因は明確でない。Orowan⁽¹⁰⁾、Zener 等⁽¹¹⁾は轉位が一時におびたく発生するためと考え、これを轉位の洪水的現象或は崩雪と呼び、その機構を示唆している。轉位は本質的に移動した後消失し、或は移動し難い固定状態に結合して硬化するのであるから、必ず移動即ち軟化過程を経る必然性を持つ筈である。

このように、加工によつて激増した轉位の挙動について考えてみよう、これらが悉く例えば Taylor の轉位模型に示されるように格子狀結合をなし、或は微細化されたモザイク・ブロックの新境界に配列して硬化の要因となり、もしくは消滅するもののみであるとは考えられない。正負應力が格子狀に結合配列するためには、左方より移動した同種轉位群と、右方よりこれと平行な面上を移動して来る異種轉位群が會して始めて形成されるのであり、何れかに余剰を生ずることがあり得るから、従つて格子狀結合を生じた領域の外にはみ出た轉位の存在が考えられる。こゝで余剰轉位の挙動を調べる前に、このような格子狀結合轉位の領域が、實際に結晶全面にどんな分布をなすかについて考えてみる。もし結晶内に轉位の移動に對する他の妨碍がなければ、同符號轉位は互に反撥するから、上述の格子狀轉位は次第に全面に擴散瀰漫する筈である。更にもし結晶粒界に達した轉位がそこで消失し得るとすれば、格子狀轉位の密度は次第に減ずるであろう。しかし實際は加工によつて硬化した金屬は(再結晶によらぬ限り)時効により軟化しないから、これは事實と一致しない。又もし結晶粒界は原子の亂雑な配置により非晶質様の構造をなしており、轉位の通過又は消失が困難であるとしても、上述の格子狀轉位の結晶内全面への擴散は次の事實により反證されるものと思う。例えば第 3 報 Fig. 7 は繰返荷重を與えた場合に結晶粒

内のりりの分布が一様でなく、局部的に集中していることを明かに示しており、これは格子狀結合轉位が結晶内の局部に偏在し、その擴散は何等かの原因によつて妨げられていることを證するものである。この拘束は不純物、析出物、モザイク・ブロック境界の抵抗、或は格子狀結合轉位そのものの性質の何れかによるものであらう。

以上の考察により、加工後、結晶内に局部的に形成された格子狀結合轉位群の外域には余剰の轉位が存在することが想像される。このような單獨の轉位の移動は容易であるが、二つの格子狀轉位群領域の間に挟まれ、或は析出不純物等の障害物のために、結晶粒界へ移住又は消滅する機會を失つている場合は消滅もせず、格子狀結合も出來ずに、あたかも浮遊状態を呈するであらう。このような状態の轉位を假りに遊離轉位と名づける。このような轉位は微小振動において内部摩擦として捕捉し得る理である。

Fig. 1. Variation of Internal Friction vs. Amplitude of Shearing Stress for Aluminium Single Crystal by Cold Working and Aging.

この模型は加工後の内部摩擦現象を説明するに都合がよい。Fig. 1 はアルミニウム單純結晶試料に捩り加工を與えた直後、および時間経過による内部摩擦の變化を示し、第 2 報所載のものである。加工前の焼鈍状態に比して、加工後は測定振幅(捩り應力) 0.3 kg/mm^2 以下においては内部摩擦は増大するが、大なる測定振幅においては時間経過によつて遙かに減少している。さて、金屬の塑性内部摩擦(振動の對數減衰率)は $\delta = \Delta W/W = C \gamma' / \gamma$ で與えられる⁽⁷⁾。こゝに ΔW は單位容積につき 1 サイクル間に熱に変換される仕事量、 W は弾性仕事、 γ' は塑性歪、 γ は弾性歪であり、 C は振幅の函数であるが振幅の微小な範圍では 1 に近い。塑性歪は轉位論に従えば $\gamma' = \lambda L N$ で與えられる。こゝに λ は捩り方向の原子間隔、 L は轉位の平均移動距離、 N は捩り方向を含み捩り方向に垂直な面で切られる線轉位の密度である。加工前に結晶内に存在した轉位の密度を N_0 とし、加工に際して N_1 に増大したとする。一般には加工操作の間に轉位數の増大と、増加した轉位の正負結合とが重疊して行われるが、焼鈍軟鋼のように軟化現象の現れ

(9) 木谷, 日本機械學會論文集, 9 (1943), I-125.

(10) E. Orowan, Z. Physik, 89(1934), 605; 614; 634.

(11) C. Zener, H.J. Hollomon, J. Appl. Phys., 17 (1946), 69.

るものは、轉位が瞬間的に激増し、その後軟化過程に入るものであろう。かくして時間経過に従つて N_1 の中のある部分が結合轉位 (密度 N_{2l}) と、遊離轉位 (密度 N_{2f}) との混成組織となり、1部 (密度 N_{2c}) は消滅するとすると、 $N_1 = N_{2f} + N_{2l} + N_{2c}$ である。 N_{2l} の轉位はある臨界應力以下の測定振幅においては移動しないから、微小振幅においては N_{2f} の轉位のみが内部摩擦に寄與する。相當量の加工を受けた後はおびたゞしい轉位の増加により、 $N_1 \gg N_0$ はもちろん、 $N_{2f} > N_0$ となることが考えられるから、この場合、微小振幅における内部摩擦は増大して現れる。しかし格子狀轉位領域の出現のために遊離轉位の運動行程は狭められるから、測定振幅がやゝ大なる範圍においては $N_{2f} > N_0$ であつても $\lambda L_2 N_{2f} < \lambda L_0 N_0$ の場合があり、この範圍の内部摩擦は加工前よりも減少することとなる。Fig. 1 の 0.3 ~ 0.5 kg/mm² 以上の振幅範圍において、加工後に内部摩擦が減少しているのはこの関係によるものと推察される。

次に更に時効により遊離轉位が消滅又は格子狀結合によつて次第に減少しても、残存遊離轉位の運動行程は増大しないから、内部摩擦は測定振幅の全範圍にわたり減少する一方となる。

又残存遊離轉位は再結晶温度以上の加熱によらなければ完全に消滅しないから、微小振幅における内部摩擦は完全焼鈍状態において最小となる。

なお、微小振幅において測定される内部摩擦は加工度の増加とともに増大するが、或る飽和點を超すと再び減少することが知られた⁽³⁾が、これは加工度の増大とともに結合轉位の占める容積が次第に優勢となる結果、遊離轉位の運

動範圍が次第に狭められるためと説明される。

以上のような轉位模型によつて、内部摩擦に関する諸性質は定性的に説明される。

備考：一 溶質の析出は轉位の運動を妨げ、従つて内部摩擦を減少させる。これはアルミニウム-銅合金に見られ、硬度と内部摩擦の關係は Norton 等⁽¹²⁾ により確められている。このような析出硬化は測定振幅範圍の如何に拘らず内部摩擦を減少せしめる。一方、加工後の時効又は低温焼鈍硬化現象が、不純物又は溶質の析出による場合もある。しかし例えば前述の Read 等により行われた不純物の少い亜鉛、銅單結晶における加工後の内部摩擦の時効減少効果がすべて析出効果によるとは云えない。もし然りとすれば、微小應力範圍の内部摩擦といえども、加工後に未加工状態以下に減少することがあつてよい筈であるが、著者の知る範圍ではこのような事實はないようである。

V. 結 言

塑性内部摩擦の本質についての主なる學説を擧げて、これと實驗的諸現象との關係を批判した。著者は Read 等の轉位説に修正を加え、遊離轉位の存在を假定し、その内部摩擦に及ぼす舉動を考慮に入れて諸現象の説明を試みた。その結果は無理なく實驗結果を説明することが出来る。定量的根據が欲しいが、現在のところ資料の貧困のため困難である。

(12) J. T. Norton, R. A. Flinn, Metals Tech. 5 (1938), Tech. Publ. No. 914; 44.