

マクロ塑性学とミクロ塑性学の接点 —変形中の結晶における運動転位密度—

片岡俊彦* 岸田敬三**

1. はじめに

表題のマクロ塑性学とは、いわゆる塑性力学と称せられる学問を意味し、塑性変形に対する一つの力学体系を組み立てようとするものである。すなわち、構成方程式（応力とひずみの関係）の普遍的な形を導出することを目的としている。また、ミクロ塑性学と言ったのは、その構成方程式に物理的意味をもたすため転位論の立場から塑性変形を論じようと言うものである。塑性力学と転位論の関係は、熱力学と原子論の関係に似ている。熱力学と原子論の間は統計力学によって結びつけられたが、塑性力学と転位論の間には今だに大きな隔たりがある。転位論が生まれて、すでに半世紀を経ようとしているにもかかわらず、それが塑性力学に応用され成功した例は極めて少なく、その場合でも多くの仮定を含んでおり、完全なものにはなっていない。ミクロとマクロを結ぶ上での1つのネックは、塑性変形中に運動している転位の密度を直接測定する実験手段がないという点であり、この手段が確立されるなら転位論は塑性力学に大きな寄与をなし得ることは間違いない。本稿では、以上のような観点から最近著者が行なった実験を紹介し、ミクロとマクロの結びつきについて述べてみたい。

2. 従来の運動転位密度の測定法とその問題点

結晶性固体の塑性変形が転位の運動によって進行することは言うまでもないが、その場合、転位の運動速度と塑性ひずみ速度を結びつける

*片岡俊彦 (Toshihiko KATAOKA), 大阪大学, 工学部, 精密工学科, 助教授, 工学博士, 結晶塑性

**岸田敬三 (Keizo KISHIDA), 大阪大学, 工学部, 精密工学科, 教授, 工学博士, 材料力学

関係は Orowan によって与えられている。

$$\dot{\epsilon} = \phi b \rho_m \bar{v} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで $\dot{\epsilon}$ は塑性ひずみ速度、 ϕ は試験片の変形方向とすべり系によって決定される幾何学的因素、 b はバーガースベクトル、 ρ_m は運動転位密度、 \bar{v} は平均転位速度である。この関係は導体内を流れる電流がその電荷を運ぶキャリヤーの濃度とその速度の積によって決定されるのと同じ意味をもっている。転位速度 \bar{v} は転位に作用する有効応力 σ_{eff} に対する増加関数として与えられ、その関係は多くの物質に対して、エッチピット法、電子顕微鏡法、X線回折顕微法等の手段で求められている。すなわち、

$$\bar{v} = B (\sigma_{eff})^m \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 B 、 m は物質によって決まる定数である。変形中には結晶内に多くの転位が作り出され、それらの間には相互作用力が働く。このような相互作用を内部応力と呼び、外部から与える応力 σ_a は転位にかかる有効応力 σ_{eff} とこの内部応力 σ_i との和の形で表わせるものと仮定すれば、次のように書くことができる。

$$\sigma_a = \sigma_{eff} + \sigma_i \quad \dots \dots \dots (3)$$

以上の3つの式が結晶の塑性変形を表現する基本式となる。すなわち、(3)を(2)に代入し、それを更に(1)に代入すれば、

$$\dot{\epsilon} = \phi b \rho_m B (\sigma_a - \sigma_i)^m \quad \dots \dots \dots (4)$$

が得られるが、ここで一般の塑性変形試験においては $\dot{\epsilon}$ と σ_a が測定される。 ϕ 、 b は試験対象により決まっており、また、 B 、 m は先に述べたように他の実験によって求めることができる。残された変数 ρ_m 、 σ_i はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を急変させた時の σ_a の応答から求める方法が提

案されてきた。その場合、ひずみ速度急変時には ρ_m や σ_i が変化しないという仮定を用いており、この仮定の妥当性については、直接実験的に検証されたという例はまだない。また、更に重要な問題点は(3)式の仮定が正しいかどうかにある。1本の転位が他の転位から受ける応力場というものは、その転位が位置を変えて運動していくとともに変動するはずであり、(3)式で示されるように塗りつぶした平均応力 σ_i として与えることはできない。こういった問題点を含んでいるにもかかわらず、運動転位密度を測定するためにこの方法が用いられてきた理由は、他に有効な測定の手段がないことによっている。

以下では、イオン結晶中の転位が帶電しているという性質を利用すれば Orowan の式(1)に現われる ρ_m , \bar{v} が独立に測定できることを示し、その方法によって得られた 2, 3 の実験結果について述べる。

3. イオン結晶における運動転位密度の測定

3.1 測定原理

イオン結晶中の転位が電荷を有することは古くから知られていたが、その量や符号、あるいは帶電の機構については不明な点が多くあった。最近になって KCl 結晶について転位のもつ電荷が注意深く測定され、刃状転位が負の電荷を運搬することが明らかにされた。本研究ではこのような KCl 単結晶を用いて実験を行なった。

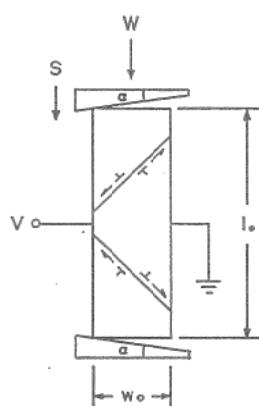


図1 2枚の傾斜板による結晶の圧縮変形。
S: 変位, V: 電位差, W: 荷重.

{100} 面に沿って割り出した直方体の試料を図1に示すように傾斜をもった2枚の板によって圧縮する。この時、圧縮板の変位 S 、結晶の表面電位差 V 、変形荷重 W が同時に測定され、ディジタルメモリースコープに記録される。変形とともに増殖した転位は {110} 面に沿って運動し、図に示したように正負の刃状転位はそれぞれ右左に移動する。この時、いずれの刃状転位も負の電荷を有しているために結晶表面間に正負の転位の密度差に応じた電位差を生ずることになる。変形の初期においては、結晶は片当たりのために不均一な変形となるが、結晶の端面が一旦上下の圧縮板に密着したあとは均一に変形を始める。その後は正負の転位の密度差は、圧縮板の傾きに比例した一定値をとり、この値は変形中に変化することはない。このような状況下では試験片表面に生ずる電位差は次式によって与えられることが簡単な幾何学から導かれる。

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{2 \alpha q w_0}{\epsilon_0 K b l_0} \frac{C}{C+C_0} \bar{v} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 t は時間、 α は圧縮板の傾き角、 w_0 、 l_0 は結晶の幅および長さ、 q は転位の単位長さ当たりの電荷量、 ϵ_0 、 K は試験片の絶対誘電率と比誘電率、そして C 、 C_0 は試験片および測定系の電気容量である。この式から変形中の転位の運動速度 \bar{v} は電位差の変化率 dV/dt を測定することによって与えられることが判る。

一方、(1)に与えられた Orowan の関係式は、

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{2} l_0 b \rho_m \bar{v} \quad \dots\dots\dots (6)$$

と書き直すことができるから、(5)式と組み合わせれば、

$$\frac{dS}{dV} = -\frac{\epsilon_0 K b^2 l_0^2}{4 \alpha q w_0} \frac{C+C_0}{C} \rho_m \quad \dots\dots\dots (7)$$

を得る。すなわち、 dS/dV を測定することにより ρ_m の値が求まることがある。以上をまとめると、(1)式における $\dot{\epsilon}$ 、 \bar{v} 、 ρ_m の値は dS/dt 、 dV/dt 、 dS/dV の測定値から求めることができる。

3.2 測定結果

図2にインストロン試験機を用いて試験片を一定速度 (0.5mm/min) で圧縮した場合の結

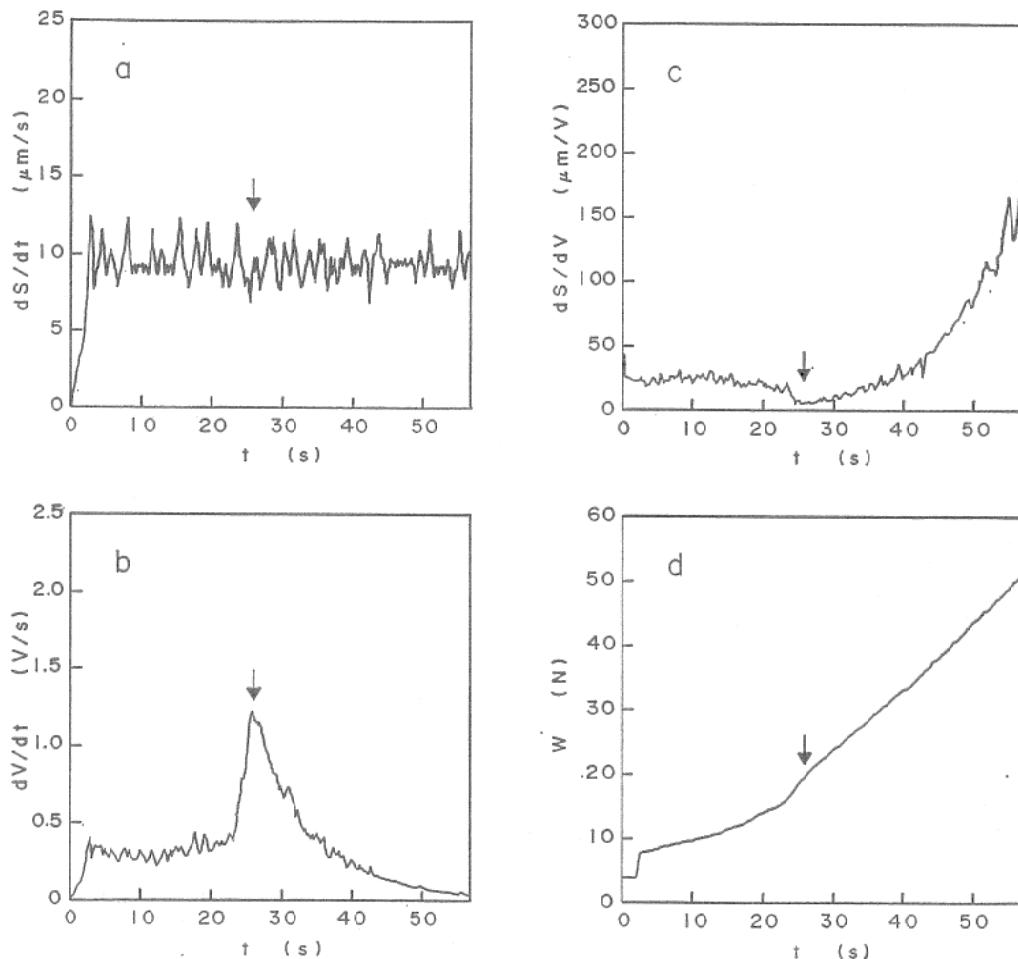


図2 一定ひずみ速度試験における (a) $dS/dt \sim \dot{\epsilon}$, (b) $dV/dt \sim \bar{v}$, (c) $dS/dV \sim \rho_m$, (d) $W \sim \sigma_a$ の変化. クロスヘッド速度は 0.5mm/min.

果を示す. 図は dS/dt , dV/dt , dS/dV , W の時間的変化を表わしており, それぞれが $\dot{\epsilon}$, \bar{v} , ρ_m , σ_a に対応している. dS/dt , dV/dt , dS/dV 等の微分値については S , V の値をデジタルメモリースコープを通してマイクロコンピューターに取り込んだ後, 微分演算を行ない, プロッター上に出力させたものである. 縦の矢印は結晶の上下端面が圧縮板と密着した時点を示しており, 上記の式(5)～(7)が成り立つのはこの時点以後に限られる. 試験片のひずみ速度は, 図2-(a)に示すように, 少し変動してはいるが全体としてほぼインストロン試験機の設定値に一致している. 図2-(b)および(c)から転位の運動速度は変形とともに減少していくがそれに反して運動転位密度は増加していくのが判る. 図2-(d)は試験片が加工硬化していくのを表わしており, 外部応力は直線的に上昇していく. 転位速度が, 外部応力の上昇にもかかわらず

減少するのは, 変形によって増殖した転位群によって内部応力が大きくなり, 転位を動かすのに必要な有効応力が減少するためであると考えられる. また, このような転位の運動速度の減少は, ひずみ速度一定という外的条件を満すように動転位密度の増加を引き起すことになる. すなわち, 変形量の増加に伴なって多数の転位が遅い速度で運動するようになる. この結果は, 従来から得られている(1)～(3)式を用いた解析結果とは異なっており, すでに述べたように(3)式の妥当性が問題となる.

ひずみ速度急変試験を行なった時の結果を図3に示す. インストロン試験機の圧縮速度を0.5mm/min から 5 mm/min まで急変させたもので図2と同様, dS/dt , dV/dt , dS/dV , W の値を変形量に対してプロットしてある. 図3-(a)を見れば試験片のひずみ速度はここで用いたインストロン試験機の特性を反映して速度を

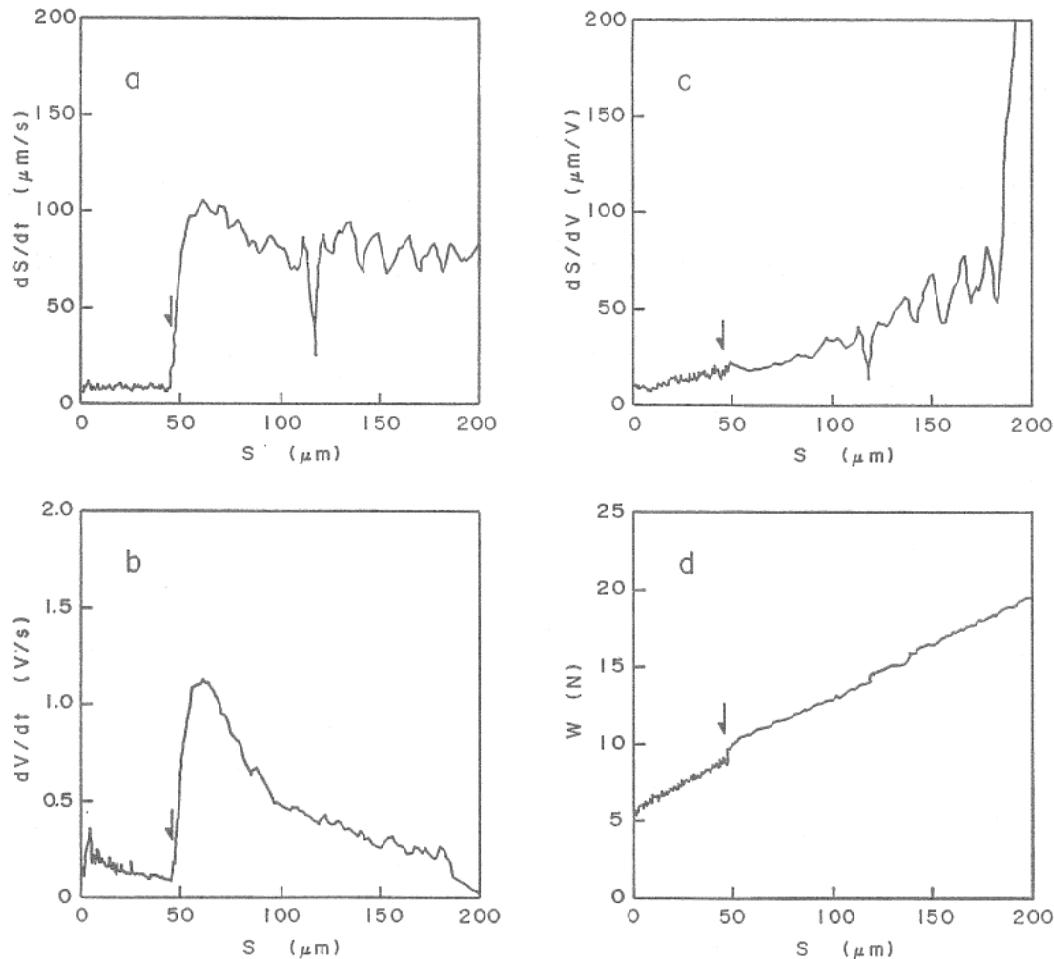


図3 ひずみ速度急変時における (a) $dS/dt \sim \dot{\epsilon}$, (b) $dV/dt \sim \bar{v}$, (c) $dS/dV \sim \rho_m$, (d) $W \sim \sigma_a$ の変化。クロスヘッド速度は 0.5→5 mm/min.

切り換えた直後ではオーバーシュートしているのが判る。それに伴ない図3-(b)のように転位の運動速度もオーバーシュートする。このように、転位の運動速度は外部から与えたひずみ速度に応じて敏感に変化するが、図3-(c)に示したように運動転位密度には大きな変化は見られない。このことは、前節で述べたように、従来の方法におけるひずみ速度急変時に ρ_m が変化しないという仮定が正しかったことを裏づけている。荷重の変化は図3-(d)に示されている。ひずみ速度を速くすると転位の運動速度を上げる必要があるので、そのための有効応力の上昇分に応じて外力も増加しているのが判る。

4. おわりに

変形中の結晶における運動転位密度 ρ_m と転位速度 \bar{v} が独立に測定できることを示し、この方法によって得られた一定ひずみ速度試験、お

よびひずみ速度急変試験における結果について述べてきた。それらをまとめると、塑性変形の進行とともに運動転位密度は増加していくが、逆に転位の運動速度は減少する。また、ひずみ速度急変時には、従来から言われているように運動転位の密度は変化せず、転位の速度だけがひずみ速度の変化分に応じて変わることが明らかになった。転位がなぜこのような挙動をとるかは更に考えてみる必要があり、これから課題であるが、とりあえず、運動転位密度が実験的に測定できる手段が見つかったことは、ミクロからマクロへの1つの橋渡しを可能にした点で意義あるものと考えている。

最後に、本研究は著者の1人(T. K)が米国、ロチェスター大学に滞在中、J.C.M.Li 教授との共同研究として始められたものであることを付記し、滞在中の公私にわたる教授の御親切に対し、あらためて感謝の意を表します。