OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	固体水素の塑性変形
Author(s)	片岡, 俊彦; 山田, 朝治
Citation	大阪大学低温センターだより. 1987, 57, p. 5-9
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/6823
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

固体水素の塑性変形

工学部　片岡俊彦（内線 4632）
〃　山田朝治（内線 4611）

極低温における転位の運動に量子力学的効果が現われる可能性については多くの議論がなされてきた。[1-3] その主たるものは零点エネルギーの影響とトンネル効果である。鈴木[2]はパイエルス力の大きな結晶についてこれらの計算を行なっている。それによると、パイエルスポテンシャルの底にある転位の零点エネルギーは頂上にある場合よりも大きいのでみかけ上パイエルス力は減少する。その減少量はbcc遷移金属のFeで5％、Liで30％、bcc ^{3}Heにおいては95％近くに達することが示された。しかし、零点エネルギーの影響は、通常の転位運動の熱活性化過程に対し、どのように現われるかは明らかでなく、その実験的検証は難しいと思われる。ここで、もっと重要なのはパイエルスポテンシャルを転位がトンネリングで乗り越える過程である。パイエルスポテンシャルをトンネリングにより乗り越える頻度が熱活性化過程による頻度に等しくなる温度以下においては、転位を運動させるための応力はもはや温度には依存せず、その運動の速度は外部応力の大きさのみによって決まることになる。これが転位のトンネル運動の大きな特徴であって、実験的には、降状応力およびその歪速度依存性が温度によって変化せず一定値になるといった形で観測することができる。鈴木[2]の計算結果によれば、このような現象が見られるのはFeではその降伏応力がパイエルス応力の90％、アルカリ金属では70％程度になる温度と見積られており、^{3}Heにおいては全温度域でトンネリングの可能性をもつことになる。

これらの計算結果にしたがうと、零点エネルギーの影響にせよ、トンネル効果にせよ、その現われやすさはパラメーター$H = b^4\sqrt{\rho\mu}/\hbar$で支配されており、この値が小さいほど、量子力学的効果は顕著になると考えられている。ここで、bはバーガースベクトル、ρは密度、μは剛性率、$\hbar$は（プランク定数$/2\pi$）である。すなわち、量子効果を観測するためには、密度が低く、剛性率の小さい物質が適している。最近、著者らはその条件に合う物質としてLiH単結晶の低温での塑性変形を行なった。LiHは実在する固体の中で分子量の最も小さいイオン結合性の物質である。その結果は、期待していた通り、降伏応力およびその歪速度依存性が約5K以下で温度に依存しなくなるというトンネル効果を示した。[4] 一方、固体ヘリウムについては^{3}Heですでに得られていた超音波測定の結果[5]に加えて^{4}Heにおいてトンネル効果を示す明確な結果が得られるに至っている。[6]

さて、転位運動における量子効果の実験的検証は以上のような情況であるから、次に、その可能性の高い物質として“水素”が考えられる。水素はもちろん常温では気体であるが、ヘリウムと異なり温度を下げるだけで固化させることができ、大気圧下で自由表面をもつ結晶を作ることができる。このことは塑性変形の実験を行なう場合にも、通常の金属結晶やイオン結晶で行なわれているのと同じ手段を用いることができ、また、その結果の解析も容易であるという点で多くの利点を有している。著者らは、一昨年来、転位の運動に対する量子効果を調べる目的で固体水素の圧縮試験を行なう準備を進めてきた。現在は、まだ、LiHやHeのように転位のトンネル運動を直接示唆する結果は得られていないが、計画の

第一段階として、試験片の作製およびその塑性変形が行なえるようになってきたので、試作した装置の詳細と、それによって得られた若干の結果について述べることにする。

固体水素を含め、固化稀ガスの塑性変形についての報告はいくつか見られるが、そのうち、Krupskiiら[7]による固体水素の変形装置のみがその詳細について記述されている。装置はクリープ実験用として作られており、引張変形を行なうことができる。引張型の場合、高応力がかかると試験片は破断しやすく、高歪速度での実験が困難であるという欠点を有している。そこで我々は従来から行なってきたイオン結晶の塑性変形の方法にならって圧縮型の装置を作ることにした。図1はその主要部の概観である。

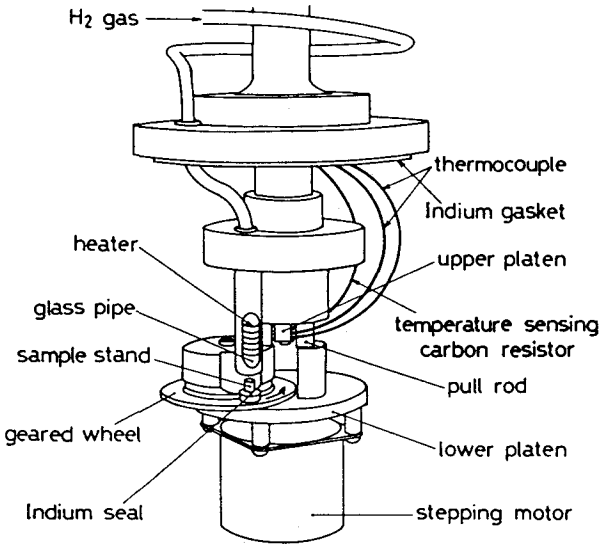

図 1. 固体水素圧縮装置主要部の外観

この部分全体は液体ヘリウムクライオスタット内に収まるようになっており、またクライオスタット本体はインストロン試験機のクロスヘッドの下に固定される。二股になった引張軸はその下に取り付けられた歯車板、試料台、下部板、ステッピングモーターなどと一体になっており、1本の細長いロッドを介してクライオスタットの外に出た後、インストロン試験機のフレーム最上端につながっている。その途中には小型のロードセルが取り付けられ、荷重を測定することができる。試験片に変形を与えるには、クロスヘッドを上下に移動させることにより上部板と下部板の間に相対変位を与えることによって行なう。変形量はクロスヘッドの移動量から測定できる。

固体水素試験片の作製は次の順序で行なわれた。まず、下部板を上に引き上げ、ガラス管と試料台の間にはさみ込んだインジウムのOリングを圧縮して真空シールを行なう。ガラス管を密着させるときにガラス管には大きな荷重がかかるので、その外側をステンレス製の管で保護し、その一部分に窓をあけて中が見えるように作ってある。その後、温度を下げ、融点近くになってからガラス管内に水素ガスを注入する。しばらくすると液化が始まるが、液面を適当な高さになるように調整した後、注入を止める更に全体を冷却すると同時に、ガラス管に巻きつけたヒーターを用いて管内の温度を融点直上にコントロールする。その状態で徐々にガラス管を引き抜いてゆくと、下部から固化が始まり、ガラス管からは成長した結晶が引き出されてゆく。こうして作った試験片は高さ4～10㎜、直径約3㎜のほぼ円筒状

に近いものとなる。試料台の載っている歯車板は底につけたステッピングモーターで回転させることができ、これにより、試験片を上部板の真下の位置まで移動し、下部板との間で圧縮変形を行なう。

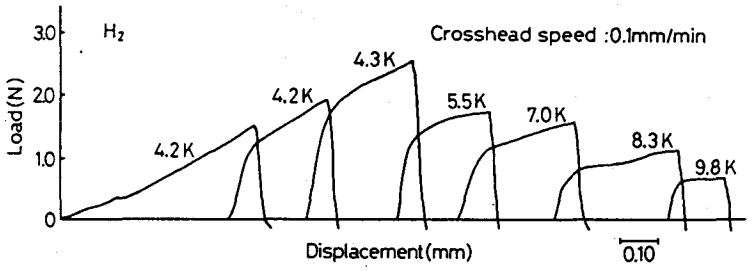

図 2. 固体水素の荷重 - 変位曲線

図 2 にクロスヘッド速度を 0.1 ㎜ / min で変形した時の固体水素の荷重 - 変位曲線の一例を示す。これは、1 本の試験片について温度を変えて連続的に圧縮した際に得られたものである。降伏荷重の温度依存性を見るため、1 つ前の除荷直前の点を次に圧縮した時の弾性域の延長線が通るように描かれている。最初の圧縮では曲線はなだらかに上昇しており降伏点は明確でない。これは、作製した試験片の上端が平らではなく、塑性変形が局部的に起っているためと考えられる。2 回目以後の圧縮においては端面が整形されているので、降伏点が観察され、弾性域と塑性域の圧別が明確になっている。4.2 K の 2 本の曲線を比較すると、除荷直前と再負荷後の降伏荷重は明らかに異なっており、このような低温でも転位密度の熱的回復が著しいことが判る。5.5 K 以上ではそれが更に激しくなり、9.8 K では転位の増殖と消滅がバランスするいわゆる定常変形が実現している。

実験を行なった温度範囲では、固体水素は hcp 構造をとり、その非底面すべりに高いパイエルス応力が期待できそうであるが、結晶がファンデルワールス力による弱い結合によって凝集していることを考慮するとその値は相当低いものと考えられる。実際、作製した結晶の最初の変形では明確な降伏点が現われなかったことから考えて、パイエルス機構による変形抵抗に比べて無視できるほど小さいとしてよいであろう。これを測定するためには、よく制御された条件下で質のよい単結晶を作ることと、変形荷重の測定精度を更に高める必要がある。

クロスヘッド速度を 0.1 ㎜ / min から 1 ㎜ / min に 10 倍変化させ、その際の荷重の変化 ΔP を測定した。固体水素の場合、図 2 で示したように加工硬化が大きく、変形荷重 P は歪とともに増大し、同時に ΔP の値も大きくなってゆく。図 3 に種々の温度における ΔP と P の関係を示す。見やすくするために各温度で原点をずらしてプロットしてある。同じ記号は同じ試験片を示しているが、試験片や歪量が全く異なるにもかかわらず、同じ温度では ΔP と P

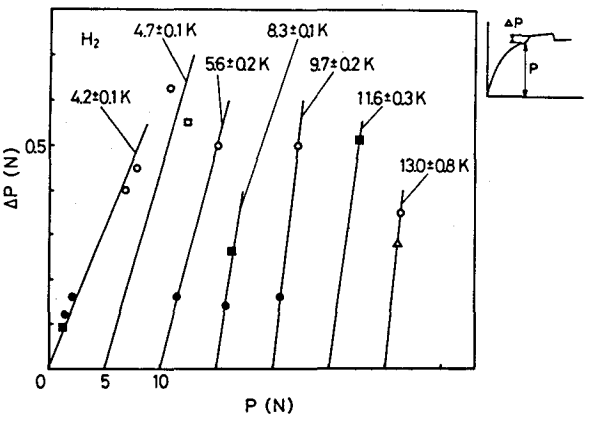

図 3. 固体水素における ΔP と P の関係

はよい直線性を示す。そこで、直線の傾き$\Delta P/P$を温度に対して求めると、図4のようになり、これらの値は温度に比例して増加するのが判る。この結果は、転位の運動が転位同士の切り合いによって律速されていると考えて解釈することができる。簡単なモデルを想定し、転位運動の熱活性化過程を記述すれば、次式の関係が得られる。

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{k\ln(\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1)}{\alpha\mu b^2 d^*} T$$

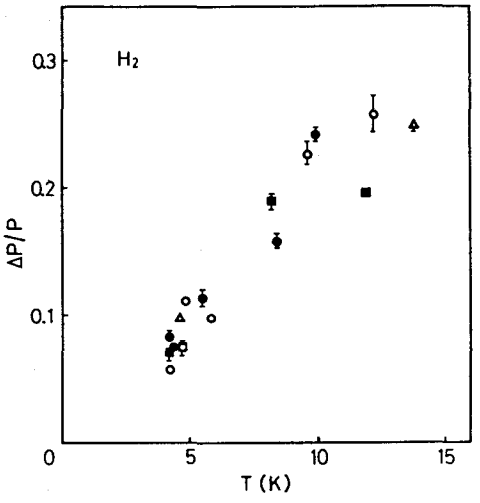

図4. 固体水素における$\Delta P/P$の温度依存性

ここで、kはボルツマン定数、$\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2$は歪速度、$\alpha$は転位間の相互作用に関係する定数、$d^*$は転位が切り合う時の活性化距離、$T$は絶対温度である。$\mu$, b, d^*の温度によるわずかな変化を無視すれば$\Delta P/P$の値は温度に比例することになり、実験結果と一致する。ここでの議論は古典論的な熱活性化過程に基づいているが、転位の切り合いの場合でも量子力学的なトンネリングの可能性を考えることができ、その場合には$\Delta P/P$の値は温度Tに依存せず一定値をとることになる。そのような温度領域は、今までに実験を行なった温度域よりも更に低温側になるものと考えられる。

以上に述べてきた結果からは、残念ながら、まだ、量子効果と見られる現象は得られていない。その理由は、固体水素のパイエルス応力が小さすぎることもあって、パイエルス機構による変形が実験的にとらえられていないためである。今後、更に低温で精度よく荷重ー変位関係を測定することができれば転位がパイエルス障壁を乗り越える場合のトンネル運動を観測することができるであろう。また、$\Delta P/P$の測定についても同様で、この場合は転位同士の切り合う際のトンネル運動を観測することになるこのような期待のもとに、現在は装置の改良を進めている。

〔参考文献〕

1. V. I. Startsev: *Dislocations in Solids*, ed. F. R. N. Nabarro(North-Holland, Amsterdam, 1983) Vol. 6, p. 143.
2. H. Suzuki: *Mechanical Properties of BCC Metals*, ed. M. Meshii (The Metallurgical Society of AIME, 1982) p.41.
3. T. Suzuki: *Proceedings of the Symposium on the Structure and Properties of Crystal Defects* (Liblice, 1983) p. 76.
4. T. Kataoka and T. Yamada: *Proc. Yamada Conf. Ⅸ Dislocations in Solids*, ed. H. Suzuki et al. (Univ. Tokyo press, Tokyo, 1985) p.165.
5. I. Iwasa, N. Saito and H. Suzuki: J. Phys. Soc. Japan **52** (1983) 952.
6. H. Suzuki and Y. Nishioka: *Proc. Yamada Conf. Ⅸ Dislocations in Solids*, ed. H. Suzuki et al. (Univ. Tokyo press, Tokyo, 1985) p.169.
7. I. N. Krupskii, A. V. Leont'eva L. A. Indan and O. V. Evdokimova: Sov. J. Low Temp. Phys. **3** (1977) 453.