

参 考 文 献

拡散係数について

- (1) M. G. Richards, J. Pope and A. Widom : Phys. Rev. Letters **29** ('72) 708.
- (2) V. N. Grigorev et al., J. Low, Temp. Phys. **13** ('73) 65.
- (3) A. Landesman and J. M. Winter in Low Temperature Physics—LT13 (Plenum Press, '74) Vol. 2, p73.
- (4) Y. Yamashita J. Phys. Soc. Japan **37** ('74) 1210.

T_1, T_2 について

- (1) M. G. Richards, J. Pope, P. Tofts and J. Smith, J. Low. Temp. Phys. **24** ('76) 1.
- (2) H. Hirayoshi, T. Mizusaki, S. Maegawa and A. Hirai, preprint.
- (3) W. Hang, H. Goldberg and R. Guyer, Phys. Rev. **11** ('75) 3374.
- (4) A. Landesman, Phys. Letters **54A** ('75) 137.

固体ヘリウム中の格子欠陥

東大理 鈴木 秀 次

§ 1. ま え が き

固体ヘリウム中の原子の相対並進運動は多くの場合格子欠陥の運動を介して起こるので、固体ヘリウムの量子効果で興味深い問題は格子欠陥と関係していると考えられる。私の研究室では5年ほど前から固体ヘリウムの塑性流動の実験¹⁾を行っており、また最近は音速の温度変化の異常の測定結果²⁾が得られて、転位や原子空孔などの格子欠陥の挙動をかなり詳しく知ることができるようになった。ここではそのうち塑性変形の研究から得られた結果を述べることにする。なお、固体ヘリウムの塑性変形についてはソビエトの2箇所^{3~5)}で論文を発表しているが、極めて限定された条件下の測定であるため格子欠陥の挙動を論ずることはできない。また米国などで塑性変形の実験を進めているという話は聞いているが、論文発表の段階には達していないようなので、私達の研究室

で得られた結果についてだけ述べる。

§ 2. 実験結果の概要

六方最密構造をもつ ^4He を変形するときには最初高い応力に達してから応力が低下し、次第に一定値に近づく。この降伏点附近の応力-歪曲線はゲルマニウムやシリコンの高温変形にあらわれるものとよく似ている。応力を剛性率で除し、温度を融点で規格化すると Ge, Si より軟らかいが、鉄と比べるとずっと Ge, Si に近い硬さをもっている。それらの結晶と異なることは一定速度の変形で全く加工硬化が現われないことである。したがってこの応力-歪曲線は Gilman-Johnston の降伏点の理論⁶⁾ が最も理想的に適用できる例であるといえる。すなわち、この理論では結晶のせん断変形速度 $\dot{\epsilon}$ は転位密度を n 、転位速度を v 、バーガース・ベクトルの大きさを b とすると

$$\dot{\epsilon} = n v b \quad (1)$$

で与えられることから出発する。最初は n が小さいので、一定速度で変形するためには v を大きくしなければならず大きな応力を必要とするが、転位は運動すると増殖できるので、 n を増加し、 v を減少させるので応力は低下するのである。この降伏現象は極めて広い条件のもとで起こることが知られているので、顕著な降伏点のピークは固体ヘリウムの塑性流動が転位の運動によって起こっていることを示す証拠と考えるのである。もちろん原子空孔の流れによる変形では応力は次第に増加して一定値に近づくだけである。

体心立方構造をもつ ^3He の変形応力は ^4He に比べて全体的に 1 桁位小さい。また降伏点降下は高速で変形するときだけに僅かに見られるだけである。固体 ^3He の強さを剛性率で規格化すると、同じ結晶構造をもつ鉄より多少軟らかいが、面心立方構造の銅などよりはずっと鉄に近い。

hcp ^4He の定常変形応力は比較的高温で低速変形するとき、変形速度の大体 $1/4$ 乗に比例する。これは転位の上昇速度に支配されたクリープで Weertman の理論⁷⁾ を適用できると考えられる。実験金属で半経験的に得られている式

$$\dot{\epsilon} = A \frac{D \mu b}{k T} \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^m \quad (2)$$

と比較すると、定数 A は各種金属のとり値の範囲内 ($10^4 \sim 10^6$) におさまる。(2) 式で D は自己拡散係数、 μ は剛性率、 σ は引張応力、 m は定数で $3.5 \sim 5$ の間の値をとる。

もっと高速または低温では定常せん断応力 τ は温度の低いほど高くなるが、変形速度にはほとんど依存しなくなり、

$$\tau = \tau_0 + B \dot{\epsilon}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

の実験式がよく成立つ。定数 B は温度、圧力によってもほとんど変らない。

bcc ^3He の場合には多少複雑であるが、(2) 式の適用できる領域と (3) 式の適用できる領域が混じってあらわれる。また hcp ^4He と異なって B は温度によって変化し、また τ_0 の値が非常に小さい。 B の温度変化は大体

$$B \simeq \frac{1}{\left[\frac{1}{B_0^2} + C \exp\left(-\frac{E_f}{kT}\right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

であらわされる。 B_0 、 C は温度によって変らない定数、 E_f は原子空孔の形成エネルギーである。

§ 3. 転位の定速運動

実験式 (3) は固体ヘリウムの塑性流動では変形速度を変えても転位が一定速度で運動していることを示す。すなわち、転位の運動による変形ではつねに (1) 式が成立つので (3) 式は、

$$\tau = \tau_0 + B (v b n)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

と書ける。ところで転位間の相互作用を考えると、個々の転位に働らく有効応力を τ_e として、

$$\tau = \tau_e + \alpha \mu b n^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

の関係がある。ここに α は転位の分布に依存する定数で、 $0.05 \sim 0.5$ の間の値をとる。

(5) と (6) を比較すれば v が一定であることが判る。hcp ^4He で B は温度に依存しなかったから、転位速度は温度によっても変化しないことになる。

bcc ^3He では (4) 式が成立つので転位速度は、

$$v = v_0 + \beta D \quad (7)$$

となる。ここに v_0 , β は温度に無関係な定数、 D は自己拡散係数である。したがって v は低温では v_0 になる。また hcp ^4He の自己拡散数を (7) 式に代入しても v_0 に比べて βD の項は無視できることを指摘しておきたい。

§ 4. 転位線上の零点デフェクトン

転位速度が変形速度に依存せず、しかも低温で温度にも無関係な一定値をとるのは、一定濃度の原子空孔が一定速度で運動しているためと考えられる。すなわち、定常的な塑性変形をつづけるには結晶表面や境界に到達し、消失または動けなくなる転位を補給するよう転位増殖が必要である。その増殖はスーパージョグの形成によって行なわれると考えられているが、原子空孔による原子の輸送が十分速ければ、らせん転位上のジョグは転位と一緒に移動し、転位を増殖できない。しかし、原子空孔の流れに比べて転位速度が大きければ、古典結晶の場合と同様にジョグがスーパージョグに成長し、刃状転位双極子を作って、ついに転位の輪を一つ増殖する。したがって転位には増殖できる限界速度があり、その速度で運動しなければならない。

ところで結晶中に温度に無関係な一定濃度の原子空孔が存在する可能性はない。しかし、古典結晶では、転位線上の原子空孔の形成エネルギーは結晶中のその $\frac{1}{2}$ 程度と考えられているので、固体ヘリウム中の転位線上の原子空孔の形成エネルギーが負になる可能性がある。そうすれば転位線上に一定濃度の原子空孔が温度に無関係に存在することになる。

bcc ^3He の限界転位速度が温度に依存するのは、高温では結晶中の原子空孔の流れが転位線にそう原子空孔の流れと同程度の大きさをもつことを意味する。

転位線にそって原子空孔が 0 K でも存在できるならば、転位を含む固体ヘリウムが低温で種々の異常を示し得ることを指摘しておきたい。

§ 4. 原子空孔の局在性

(2) 式のクリープ速度にあらわれる拡散係数としては原子空孔の運動は1 原子距離ごとの酔歩であるとして求めたものが用いられた。もちろん隣接格子点への移動はタンネリングで起こると考えた。拡散係数の温度依存性がこのようにして計算したものとよく一致することは原子空孔が局在していることを示唆していると思われる。もちろん断定的な結論を導くためにはより低温まで、より高精度の測定を行なう必要がある。

参 考 文 献

- 1) H. Suzuki : J. Phys. Soc. Japan, **35** (1973) 1472; **42** (1977) 1865.
- 2) I. Iwasa, K. Araki and H. Suzuki : Proceedings of the sixth International Conference on Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids.
- 3) A. Andreev, K. Keshishev, L. Meghov-Deglin and A. Shal'nikov : JETP Letters **9** (1969) 306.
- 4) K. Keshishev, L. Mezhev-Deglin and A. Shal'nikov : JETP Letters **17** (1973) 212.
- 5) V. L. Tsymbalenko : JETP Letters **23** (1976) 654; Zh eksper. teor. Fiz. **72** (1977) 1885.
- 6) W. G. Johnston and J. J. Gilman, J. Appl. Phys. **30** (1959) 1295; W. G. Johnston, J. Appl. Phys. **33** (1962) 2716.
- 7) J. Weertman : J. appl. Phys. **26** (1955) 1231; **28** (1957) 362.

H C P ^4He 結 晶 中 の 超 音 波 減 衰

東工大理 比 企 能 夫

§ 1. は じ め に

固体ヘリウムではその量子性が種々の物性に強く反映される^{1), 2)} また結晶中の格子欠陥は特殊な性質を有する³⁾。例えば、空格子点は局在せず結晶中を波として伝播すると考えられている。固体ヘリウム中の結晶転位については、実験的には多結晶体の塑性を研究したもの⁴⁾、音速の測定から転位の存在を議論したもの⁵⁾がある。

固体の量子性は特に格子の動的性質に強く現われると考えられ、固体ヘリウムの音響