

転位と不純物との相互作用に関する研究 その 17 2 価不純物を含んだ KCl 単結晶の不純物による strain-rate sensitivity と温度との関係

上月 陽一*

Study on the interaction between a dislocation and impurities
Part Dependence of the strain-rate sensitivity due to impurities
on the temperature in KCl single crystals doped with divalent impurities

Yohichi KOHZUKI

Abstract

On the basis of the dependence of strain-rate sensitivity due to the impurities on temperature at 100 to 200 K, it was found out that the interaction between a dislocation and the impurity in KCl:Sr²⁺ single crystals could be approximated to the Fleischer's model taking account of the Friedel relation. The strain-rate sensitivity due to impurities was obtained from the relative curve of strain-rate sensitivity and stress decrement due to oscillation.

Key words: strain-rate sensitivity due to impurities, dislocation, relative curve of strain-rate sensitivity and stress decrement

1. 緒言

アルカリハライド結晶に 2 価イオンを混入させると、そのイオンは陽イオン空孔子点とペアーを組んで結びつくと予想される。そのペアーは I-V ダイポールと呼ばれており、らせん転位と強く相互作用する。Mg²⁺, Ca²⁺, Sr²⁺ または Ba²⁺ を混入した KCl 単結晶について、転位とその様々な 2 価陽イオンとの相互作用は Fleischer のモデル[1]で近似できると以前に報告してきた。この研究は strain-rate sensitivity と応力減少量との関係図に基づいて行われてきた。この関係図は超音波振動付加下での歪速度急変試験から得ている[2]。多くの不純物とわずかな林転位を含んだすべり面上を運動する転位に及ぼす超音波振動の影響

の様子をこの関係図は表している[2-4]。しかし、その Fleischer のモデルに Friedel の関係[5]を導入できるかどうかについてはこれまで議論してこなかった。従って、KCl:Sr²⁺ 単結晶中の転位と不純物 (Sr²⁺) との相互作用が Friedel の関係を導入した Fleischer のモデルについてこのシリーズその 16 に引続きここでも調べられている。このモデルは今後、F-F モデルと名付けることにする。

2. 実験方法

KCl:Sr²⁺ (仕込み濃度 0.050 mol%) 単結晶を、温度範囲 80 ~ 300 K で圧縮変形させた。その圧縮と同じ方向に超音波振動応力が断続的に加えられた。

塑性変形中に超音波振動応力付加による静

*一般科目

的変形応力の減少量を $\Delta\tau$ 、応力振幅を一定に保ちながら歪速度急変試験を行ったときの応力変化量を $\Delta\tau'$ で表している。その $\Delta\tau'$ から求めた変形応力の strain-rate sensitivity ($\Delta\tau'/\Delta\ln\dot{\epsilon}$) と $\Delta\tau$ との関係図から、不純物の有効応力に及ぼす歪の影響について調べられた。これまで述べてきたように、一定な温度と歪での $\Delta\tau'/\Delta\ln\dot{\epsilon}$ と $\Delta\tau$ との関係図は、一定な温度と様々な応力振幅での $\Delta\tau$ と歪との関係と、 $\Delta\tau'/\Delta\ln\dot{\epsilon}$ と歪との関係の2つのグラフから求められている[2]。

3. 実験結果及び考察

転位が熱振動の助けで格子に分散した弱い障害物(不純物)を乗り越えるとき、その活性化エンタルピー ΔH は次の式によって与えられる[6-9]：

$$\Delta H = -kT^2 \left(\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \tau} \right)_T \left(\frac{\partial \tau}{\partial T} \right)_{\dot{\epsilon}} \quad (1)$$

ここで k はボルツマン定数、 T は絶対温度、そして $\dot{\epsilon}$ は歪速度である。エントロピーの変化を無視できるという仮定に基づいて、その ΔH は以下の方程式として表現することもできる[6, 8]：

$$\Delta H = \alpha kT \quad (2)$$

方程式(1)と(2)を結合すると、下の式(3)となる。

$$\left(\frac{\partial \tau}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_T = - \left(\frac{\partial \tau}{\partial T} \right)_{\dot{\epsilon}} \frac{T}{\alpha} \quad (3)$$

方程式(3)の中で、F-Fモデルの $\left(\frac{\partial \tau}{\partial T} \right)_{\dot{\epsilon}}$ は下式

(4)を温度 T で微分することによって得られる。

$$\left(\frac{\tau_{p1}}{\tau_{p0}} \right)^{1/3} = 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^{1/2} \quad (4)$$

つまり、

$$\frac{\partial \tau}{\partial T} = \left(\frac{-3\tau_{p0}}{2T_c} \right) \left(\frac{T_c}{T} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^{1/2} \right\}^2 \quad (5)$$

従って、F-Fモデルの不純物による strain-rate sensitivity は、上式(5)を方程式(3)へ代入することによって次のように求められる。

$$\frac{\partial \tau}{\partial \ln \dot{\epsilon}} = \left(\frac{3\tau_{p0}T}{2T_c} \right) \left(\frac{T_c}{T} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^{1/2} \right\}^2 / \alpha \quad (6)$$

その単結晶の T_c は 289 K で、 τ_{p0} の値は表1に与えられている[10]。

表1 その単結晶中の転位と不純物との相互作用を F-F モデルで近似したときの τ_{p0} 値

KCl: Sr ²⁺ (mol %)	τ_{p0} (MPa)
0.035	11.44
0.050	25.47
0.065	36.31

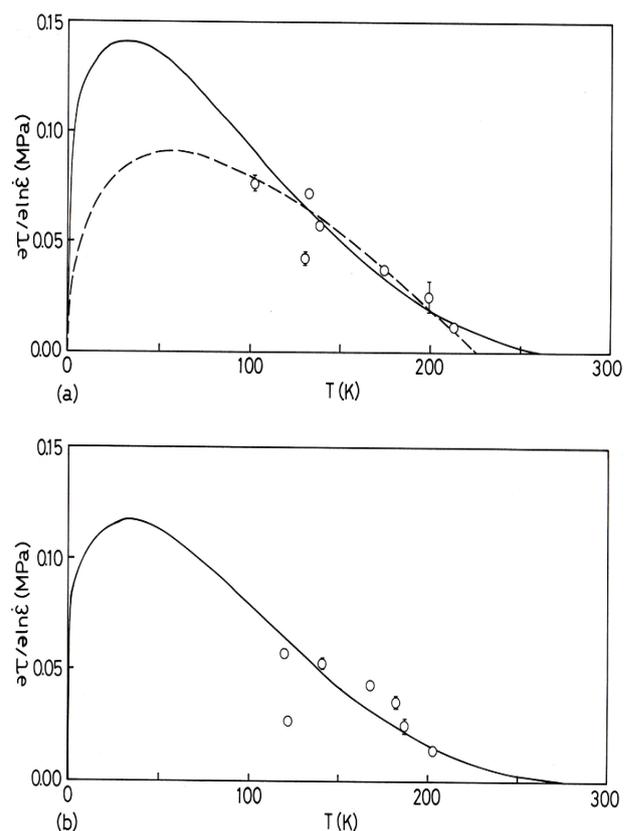


図1 KCl: Sr²⁺ ((a) 0.05, (b) 0.035 mol% 仕込み濃度) の不純物による strain-rate sensitivity と温度との関係。実線()は F-F モデルで、点線(---)は Fleischer のモデルで転位と不純物との相互作用を近似している。

() : その単結晶の $(\Delta\tau'/\Delta\ln\dot{\epsilon})_p$.

その結果が、KCl:Sr²⁺ (0.050 mol% 仕込み濃度) については図1(a)にKCl:Sr²⁺(0.035 mol% 仕込み濃度)は図1(b)に実線として示されている。不純物による strain-rate sensitivity は、図2に示した ($\Delta\tau'/\Delta\ln\dot{\epsilon}$) と $\Delta\tau$ との関係図で最初の平坦部にある strain-rate sensitivity と第2の平坦部のそれとの差から求められている[11 - 13]。

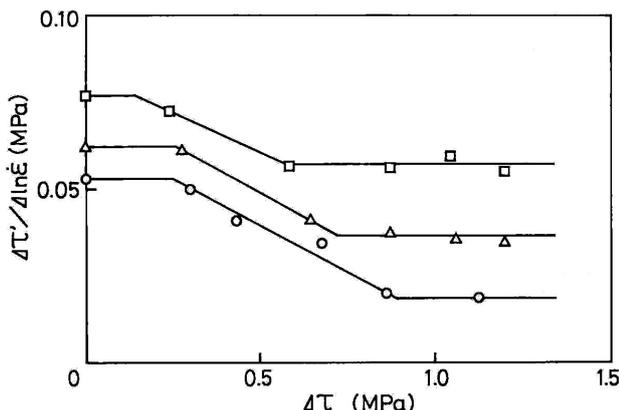


図2 温度 200 K での KCl:Sr²⁺ (仕込み濃度 0.050 mol%) の strain-rate sensitivity と応力減少量との関係. 歪 : () 10%, () 14%, () 18% [14].

それらの単結晶についての ($\Delta\tau'/\Delta\ln\dot{\epsilon}$)_p は図1(a), (b)の中で白丸印のプロットで示されており、その実線で近似できているようである。よって、その試料の塑性変形中の転位と不純物との相互作用は F-F モデルに適合すると考えられる。

温度で下の式(7)を微分したものを方程式(3)へ代入すると、Fleischer モデルの不純物による strain-rate sensitivity が求められる

$$\left(\frac{\tau_{p1}}{\tau_{p0}}\right)^{1/2} = 1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^{1/2} \quad (7)$$

つまり、

$$\frac{\partial\tau}{\partial\ln\dot{\epsilon}} = \left(\frac{\tau_{p0}}{T_c}\right) \left\{ \left(\frac{T_c}{T}\right)^{1/2} - 1 \right\} \frac{T}{\alpha} \quad (8)$$

ここで、KCl:Sr²⁺ (0.05 mol% 仕込み濃度) の τ_{p0}

値は 14.5 MPa であり、 T_c 値は 227 K である [4]。

この値は方程式(7)を満足している図3 [4]の

直線を $\left(\frac{\tau_{p1}}{\tau_{p0}}\right)^{1/2} = 0$ へ外挿することによって求められている。

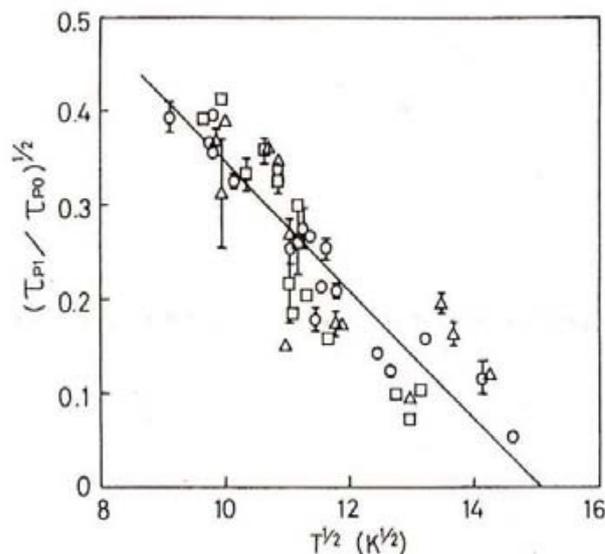


図3 KCl:Sr²⁺ (() 0.035, () 0.050, () 0.065 mol%) の $T^{1/2}$ と $(\tau_{p1}/\tau_{p0})^{1/2}$ との直線関係 .

Fleischer モデルの τ_{p0} と T_c 値は、F-F モデルのそれよりも小さい。さらに方程式(8)から計算した不純物による strain-rate sensitivity が図1(a)の点線で示されている。F-F モデルと Fleischer モデルとの不純物による strain-rate sensitivity の違いが約 100 K 以上ではほとんど観察されない。しかし 100 K 以下では、F-F モデルのその strain-rate sensitivity は Fleischer モデルのそれよりも大きくなっている。100 K 以下で $\partial\tau/\partial\ln\dot{\epsilon} - T$ 関係図から、その試料中の転位と不純物との相互作用にどちらのモデルで近似できるかわかるだろう。しかし、本実験方法から ($\Delta\tau'/\Delta\ln\dot{\epsilon}$)_p の値を求めることができなかった。

4 . 結言

その試料中の転位と不純物との相互作用は、
図 1(a)と(b)で示されたように本実験からもと
めたその不純物による strain-rate
sensitivity と温度との関係から F-F モデルで
近似できることがわかった。

参考文献

- [1] R.L.FLEISCHER, *J. Appl. Phys.* **33**
(1962) 3504.
- [2] 上月陽一, 大島商船高等専門学校紀要 第
39号(2006)105.
- [3] *Idem, ibid.* 第39号(2006)95.
- [4] *Idem, ibid.* 第39号(2006)100.
- [5] J. FRIEDEL, “Dislocations” (Pergamon
Press, Oxford, 1964) p.224.
- [6] H. CONRAD, *J. Metals* **16** (1964) 582.
- [7] *Idem, Can. J. Phys.* **45** (1967) 581.
- [8] B. N. DEY and W. R. TYSON, *Phys.*
Status Solidi. (a) **9** (1972) 215.
- [9] T. KATAOKA, T. UEMATSU and T.
YAMADA, *Japan. J. Appl.Phys.* **17**
(1978) 271.
- [10] 上月陽一, 大島商船高等専門学校紀要 第
44号(2011)101.
- [11] *Idem, ibid.* 第39号(2006)105.
- [12] *Idem, ibid.* 第40号(2007)93.
- [13] *Idem, ibid.* 第43号(2010)71.
- [14] Y. KOHZUKI, T. OHGAKU and N.
TAKEUCHI, *J. Mater. Sci.* **28** (1993)
3612.