

理学博士井村 徹君及び工学博士藤田廣志君の「金属塑性変形の
超高電圧電子顕微鏡その場観察による研究」(共同研究)に対する

授賞審査要旨

電子顕微鏡(以下電顕)による格子欠陥の直接観察は、理論的研究が先行していた格子欠陥論に、初めて直接的な実証を与えた。井村・藤田両君は、一九五六年に、我国初の金属内転位の直接観察に成功して以来、常に電顕、特に超高電圧電顕(HVEM)を用いた材料科学の研究において世界をリードし、活躍している。

上述の電顕による格子欠陥の直接観察は画期的なことであるが、大きい格子歪をもつ格子欠陥は、100kV級の通常電顕で観察出来る薄い試料では、その動的性質は勿論のこと、その密度すら大幅に変化し、それらは電顕法の不可避的欠点とされていた。藤田・井村両君はこの問題を解決すべく、一九六三年より500kV級HVEMの開発に着手し、一九六五年に世界に先駆けてそれまで定説であった電圧を高くすることによる多くの悲観的予測を次々に覆す画期的な効用を見いだしている。両君は、一九六五—六六年にそれらの効用によって、バルクな材料本来の性質をHVEMで直接研究できることを確かめ、協力して格子欠陥の挙動を応力負荷、加熱、冷却などの条件下で動的にその場観察できる方法を開発している。また井村君は、TV-VTRを用いて、それまでより遙かに速く、実時間記録の

できる方法を確立している。これらの成果は、材料物性を左右する格子欠陥の研究に飛躍的發展をもたらすと共に、現在世界で六〇台を超える HVEM 設置の原動力となっている。

この先駆的な研究は、一九七〇年の世界最高電圧 3000 kV の HVEM (阪大) を始め、我が国の 1000 kV 級および世界唯一の走査透過型 1250 kV (名大) HVEM 設置の駆動力となった。更に藤田・井村両君はクリープおよび疲労変形、三気圧までの各種雰囲気処理、液体 H₂ の温度までの冷却など、電顕内で広範な試料処理の出来る諸装置およびその周辺装置を共同して開発している。また、井村君は直接試料の応力—歪線図に対応させながら転位運動の観察出来る装置を、藤田君は 2300 K で変形出来る装置をそれぞれ開発している。両君は、これらの電顕内諸装置を駆使して、世界に先駆けて以下の如くに諸金属の変形挙動について種々の環境下で広範なその場観察を行い、材料の機械的性質の微視的機構およびそれらに及ぼす諸因子の影響について解明している(図1および図2参照)。

(1) まず第一に、塑性変形の極めて初期の段階、即ち、巨視的な降伏が起こる以前に転位は既に運動を開始していること。また、この段階では多くのすべり系が活性化されるが、変形の進行と共にその中からシュミット因子の大きいすべり系が主役となることを見いだしている。(2) 降伏現象は、急激な転位の増殖によって起こるが、この転位源としては結晶成長時に既に存在しているもの他に、交差すべり、転位同士の交叉、介在物との相互作用などによって変形時に形成される転位源が重要となり、塑性変形は主としてこのように後から形成される転位源の形成頻度によって左右されることを見いだしている。また、この増殖された転位は一般に降伏直後でも高密度のジョグを持つために、転位の移動速度はジョグ律速となることを確かめている。(3) 塑性変形速度は転位の移動速度に依存するが、初めて刃

状およびらせん転位の移動速度を負荷応力の関数として求めている。(4)塑性変形様式を左右する積層欠陥エネルギーの直接測定を行い、その温度依存性を種々の条件下で行っている。(5)積層欠陥エネルギーの高い金属の加工硬化は転位の交差すべりによって決定され、その結果、転位の“からみ”を生じ、セル構造を形成する。このように形成されたセル壁は、変形と共に移動すると同時に、それ自体は発達するため、加工硬化は不均一に起り易く、ネッキングを生じ易くなることを確かめている。(6)積層欠陥エネルギーの低い金属の塑性変形では、二次すべり系との相互作用が支配的となり、形成される障害物も異なるすべり系間における転位の交叉が主力となるため、変形はむしろ均一化されるなど、重要な諸現象を初めて直接見だしている。

井村・藤田両君は、上記の他にも、HYEMによるその場観察法を駆使して、疲労変形、クリープ変形、クラックの進行と破壊、固溶体強化などの機構、固液界面の構造観察、再結晶核の形成機構、電子照射およびガス反応による合金のアモルファス化など、実に数多くの研究を行っている。

以上を要するに、井村・藤田両君の研究は超高電圧電子顕微鏡によるその場実験法を用いて広範な材料科学の研究を行ったものであり、その特筆すべき研究成果は、従来理論的ないし間接的な実験によって進められてきた金属の塑性変形における転位論を、直接その場観察によって確認たるものとすることにより、結晶塑性学の発展に極めて大きな貢献をしたことである。

図 4

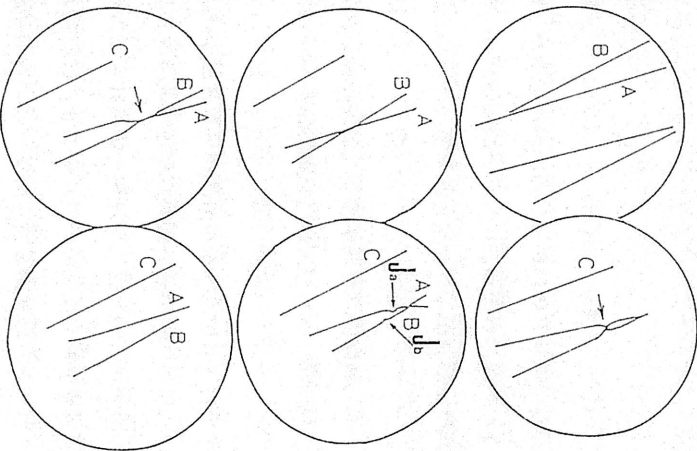
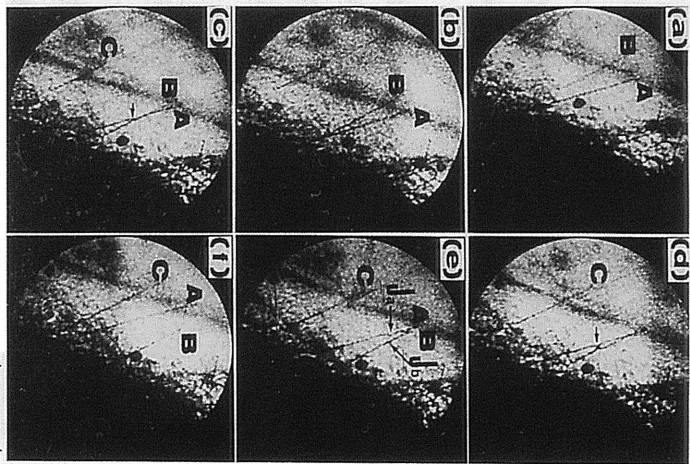


図 1

転位の運動の例(1)。Fe 単結晶におけるらせん転位 A および B が交叉してジョングラ A および B が形成される TV-VTR 写真 (左) とその模式図 (右)。(井村による)。

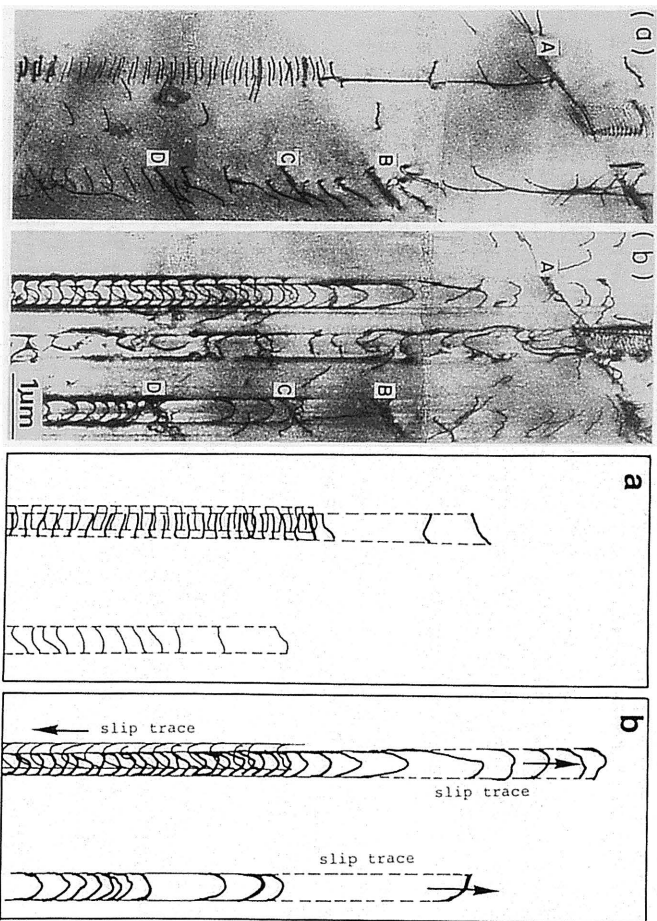


図2 転位の運動の例(2)。
 Cu-Al 合金単結晶
 に腫方向の応力を加
 えて(写真、模式図
 ともに左側) 転位双
 極子群が形成された
 ところと、次に逆方
 向に一段と大きな応
 力を加えて(写真、
 模式図ともに右側)
 これら転位群が逆方
 向に大きく湾曲して
 張り出したところ
 (藤田による)。

主な論文リスト

金属の塑性変形に関する原著論文

(一) 降伏現象

1. Observation of Thick Specimens by High Voltage Electron Microscope, R. Uyeda, M. Nonoyama and T. Imura, Proc. 6th Int. Congr. on Electron Microscopy, Kyoto (1967) pp. 113-114.
2. Continuous Observation of Dislocation Interaction in Aluminum by Electron Microscopy, H. Fujita and H. Yamada, Proc. Int. Conf. on the Strength of Metals and Alloys, Tokyo (1968) pp. 396-404.
3. Direct Measurements of the Mobilities of Edge and Screw Dislocations in an Fe-3% Si Alloy by HVEM, T. Imura, H. Saka and N. Yukawa, J. Phys. Soc. Jpn. 26 (1969) p. 1327.
4. Multiplication of Dislocations in Aluminum, H. Fujita and H. Yamada, J. Phys. Soc. Jpn. 29 (1970) pp. 132-139.
5. Direct Observation of Multiplication of Dislocations in Iron Single Crystals by High Voltage Electron Microscopy, T. Imura, H. Saka and M. Doi, J. Phys. Soc. Jpn. 29 (1970) pp. 803-804.
6. Dynamical Studies of Plastic Deformation by Means of High Voltage Electron Microscopy, T. Imura, in Electron Microscopy and Structure of Materials, ed. G. Thomas et al., Univ. of California Press, Berkeley (1972) pp. 104-132.
7. Discontinuous Deformation in Al-Mg Alloys under Various Conditions, H. Fujita and T. Tabata, Acta Metallurgica 25 (1977) pp. 793-800.

(1) 加工履歴

8. Continuous Observation of Cell Formation in Aluminum with a 500kV Electron Microscope, H. Fujita, J. Phys. Soc. Jpn. 21 (1966) p. 1605.
 9. The Work-Hardening Process in Metals, H. Fujita, J. Phys. Soc. Jpn. 26 (1969) pp. 331-338.
 10. HVEM Determination of the True Segment Lengths and Interforest Spacings of Recovered Dislocation Arrays, S. Saimoto, H. Saka and T. Imura, Scripta Met. 11 (1977) pp. 903-908.
 11. In Situ Deformation by High Voltage Electron Microscopy, H. Fujita, Proc. 9th Int. Congr. on Electron Microscopy, Toronto 3 (1978) pp. 355-366.
 12. The Behavior of Dislocations and Formation of Wall Structures Observed by In Situ HVEM, T. Imura and A. Yamamoto, Proc. Int. Symp. on Fracture and Fatigue, Mont Gabriel, Canada (1982) pp. 17-21.
 13. Role of Conjugate Slip in Deformation in Cu-10 at%Al Single Crystals, H. Fujita and S. Kimura, Jpn. J. Appl. Phys. 52 (1983) pp. 157-167.
- (三) 破壊メカニズム轉機
14. Continuous Observation of Dynamic Behavior of Dislocations in Aluminum, H. Fujita, J. Phys. Soc. Jpn. 23 (1967) pp. 1349-1361.
 15. Direct Observation of Propagation of Crack by High Voltage Electron Microscopy, H. Saka and T. Imura, Jpn. J. Appl. Phys. 9 (1970) pp. 1185-1188.
 16. Measurement of the Stress and Strain on Specimens in Electron Microscope, H. Saka, N. Yukawa and T. Imura, Jpn. J. Appl. Phys. 10 (1971) pp. 1-6.

17. Tensile Test of Foil Specimens of Iron Single Crystals at Room and Low Temperatures under Observation in High Voltage Electron Microscope, H. Saka, K. Noda and T. Imura, *Crystal Lattice Defects* 4 (1973) pp. 45-56.
 18. A Dynamic Study on the Dislocation Process of Plastic Deformation and Fracture by High Voltage Electron Microscopy, T. Imura, in *High Voltage Electron Microscopy*, ed. P. R. Swann, Academic Press, London (1974) pp. 179-188.
 19. A Formation Mechanism of Mechanical Twins in F. C. C. Metals, H. Fujita and T. Mori, *Scripta Met.* 9 (1975) pp. 631-636.
 20. In Situ Observation of Deformation Twinning in Cu-8at% Ge Single Crystals, T. Mori and H. Fujita, *Phil. Mag.* A 44 (1981) pp. 1277-1286.
- (四) 疲労欠陥の形成
21. In Situ Observations of Dislocation Behavior during Stress Cycle in Nickel by HVEM, H. Saka, K. Noda, K. Matsumoto and T. Imura, *Scripta Met.* 10 (1976) pp. 29-36.
 22. In Situ Study on the Fatigue Process of Metals by HVEM, T. Imura, H. Saka and A. Yamamoto, *Kristall u. Technik* 14 (1979) pp. 1275-1281.
 23. Movement of Three-Fold Nodes of Boundaries in High Temperature Creep of Polycrystalline Aluminum, H. Fujita, K. Toyoda and H. Hino, *Trans. JIM.* 21 (1980) pp. 325-335.
 24. Dislocation Behavior and the Formation of Persistent Slip Bands in Fatigued Copper Single Crystals Observed by High Voltage Electron Microscopy, T. Tabata, H. Fujita, M. Hiraoka and K. Onishi, *Phil. Mag.* A 47 (1983) pp. 841-857.

(五) その他

25. Direct Observation of Subgrain-Growth of Cold-Worked Aluminum by Means of Electron Microscopy, H. Fujita, J. Phys. Soc. Jpn. **16** (1961) pp. 1150-1164.
26. Continuous Observation of Annealing Processes in Cold-Worked Aluminum by High Voltage Electron Microscopy, H. Fujita, J. Phys. Soc. Jpn. **26** (1969) pp. 1437-1445.
27. On the Intrinsic Temperature Dependence of the Stacking Fault Energy in Copper-Aluminum Alloys, H. Saka, Y. Sueki and T. Imura, Phil. Mag. **A 37** (1977) pp. 273-289.
28. In Situ HREM (High Resolution Electron Microscope) Observation of Solid-Liquid Interface in InSb, H. Saka, H. Sakai, T. Kamino and T. Imura, Phil. Mag. **A 52** (1985) pp. 29-32.

他 五八四編