

## 工学博士橋口隆吉君の「内部摩擦による金属材料の研究」 に対する授賞審査要旨

内部摩擦現象を利用して金属材料の微視的内部構造を研究し、金属材料の性能の向上に資するということは、一九四〇年代の終り頃から欧米各国において一斉に始められるようになったが、橋口隆吉君はこれと殆んど時を同じくして、わが国においては初めてこの方面の研究を極めて系統的に始め、その結果新しい内部摩擦現象を発見した。また橋口君は内部摩擦現象を利用して金属材料の内部構造を研究し、その結果を用いて原子炉用金属材料その他の金属材料の改善に資するという新しい研究領域を開拓した。以下にこれらの業績を含む橋口君の研究の内容を略述する。

### 一、金属の内部摩擦ピーク（橋口ピーク）の研究

固体材料を機械的に振動させた場合、振動のエネルギーが材料の内部において消散して、振動が減衰する現象が内部摩擦または対数減衰率であるが、これを温度の関数として測定すると、内部摩擦の極大すなわちピークを生ずる場合がしばしばある。このようなピークの中で特に重要なものには、そのピークを発見し、またその性質を詳細に研究した者の名を冠した名称が与えられるのが、この学問領域の慣行になっているが、橋口君が発見し、また詳細に研究したピークは、今日世界の学界において橋口ピークと呼ばれている。橋口君は十数種類の金属および合金においてこの種のピークを見出し、またその性質や挙動を詳細に研究した。このピークは冷間加工した金属および合金または冷

間加工後に放射線損傷を与えた金属に現われるが、例えば冷間加工を与えた銅の場合には三つの橋口ピークが、内部摩擦測定の際の振動数が一サイクル/秒の場合に、それぞれ約一四五度 $K$ 、約一六五度 $K$ および約二三〇度 $K$ に現われる。

橋口君は詳細な実験のおよび理論的な研究によって、橋口ピークが点欠陥または不純物原子が付着した転位の運動にもとづく内部摩擦現象であることを明らかにした。冷間加工すなわち冷間塑性変形した金属においては、塑性変形に伴って転位の増殖と共に形成された原子空孔や格子間原子などの点欠陥が、転位に付着し、転位をその点でピン止めする。このようにとどころでピン止めされた転位を含む金属材料の内部摩擦を測定すると、測定時の振動の振幅が小さい間は、転位はピン止め点とピン止め点の間の部分で弦のように振動するが、振幅が大きくなると、不純物や点欠陥によるピン止めを振切って、転位の弦は大きく張り出し、大きな内部摩擦を生ずる。ピン止め固着点を振切るに際して、温度の影響が重要であるが、橋口君はこの点に関して緩和現象の理論を用いて、ある温度で内部摩擦が極大を示してピーク現象を生ずることをみごとに理論的に証明した。そしてこの内部摩擦ピークの極大点の絶対温度の逆数と振動数の対数との間の直線関係から求めることができる活性化エネルギーが、転位と点欠陥または不純物原子との間の結合エネルギーに他ならないことを証明した。

転位と点欠陥または不純物原子との間の結合エネルギーをこのようにして橋口ピークの活性化エネルギーから求めることができるということは極めて重要なことで、従来のように内部摩擦法を使用しないで間接的にこのエネルギーを求めるのにくらべて、この方法は極めて直接的であり、信頼性の高い結合エネルギーの値を与えるものである。

橋口ピークは今日多くの内外の後継者によって盛んに研究が続けられ、特に欧州においては橋口ピークを利用した

放射線損傷の研究が今日極めて活発に行われている。

## 二、内部摩擦のスネーク・ピークによる金属の放射線損傷の研究

体心立方金属例えばアルファ鉄中に固溶した格子間不純物原子例えば窒素原子が、内部摩擦測定時の試料の振動に伴って、振動的に移動することにもとづく内部摩擦ピークがスネーク・ピークである。このピークの原理は既に確立しているので、これを金属材料の研究に如何に応用するかが今日の問題である。橋口君はスネーク・ピークを初めて原子炉用鋼の放射線損傷の研究に応用して大きな成果を挙げた。

まず最も単純な鉄—窒素系においては、照射前の焼なまし材には高いスネーク・ピークが現われて多量の窒素が固溶していることを示すが、原子炉による高速中性子照射を行うとスネーク・ピークは消失する。これは中性子による放射線損傷によって形成された点欠陥と窒素原子が結合して微細な析出物をつくり、スネーク・ピークを生じないものとなるからである。この析出物は一般には電子顕微鏡でも観察できない微細なものであるから、内部摩擦のスネーク・ピークの消失によって析出を知るという橋口君の方法が極めて有効であることになる。この微細析出物が鋼を硬化させ、脆化させるのであって、これが放射線脆化または照射脆化である。橋口君はこの鉄—窒素系の結果を基礎として、各種の第三合金元素を添加した場合について研究し、照射脆化を起し難くする効果を持つ第三合金元素を見出している。

## 三、前記以外の内部摩擦関係の研究

橋口君は前記の二つの項目以外の分野においても、多くの内部摩擦関係の研究を行って、内部摩擦法の金属材料学

への応用を強力に進めている。それらの中の若干のものについて以下に略述する。

橋口君が内部摩擦の研究成果を最初に発表したのは一九五一年で、その論文は金属の冷間加工によって増加した転位にもとづく内部摩擦が、加工度の関数としてどのように変化するかに関するものであった。短い論文であるにも拘わらず、この論文が諸外国で多く引用されたのは、これがこの種の論文の嚆矢をなすものであったからである。橋口君はまたポロン鋼などにおいて重要な鉄中のポロン原子が格子間不純物としてスネーク・ピークを生ずることを世界で最初に見出している。また一種の金属間化合物である  $\text{Fe}_2\text{Ni}$  合金の極めて特異な内部摩擦現象を極めて精密にまた詳細に測定し、この合金のマルテンサイトの変態と関連して起るいわゆる記憶現象に対して初めて内部摩擦の見地からの研究を行っている。

#### 四、内部摩擦関係以外の研究

橋口君の内部摩擦関係以外の研究は、その論文数約一〇〇篇にのぼり、塑性加工と転位、再結晶、放射線損傷、点欠陥、不純物、半導体の格子欠陥、原子炉材料、合金の時効性、磁性など広い範囲に及ぶものであるが、その中の若干のものに関して、以下にその概略を述べる。

橋口君は冷間加工後の再結晶速度を銅および銅—アルミニウム合金において温度の関数として測定し、その結果をアーレニウス型の表現によって整理し、それに反応速度論的理論を適用する研究を一九四〇年代の中期に世界にさきがけて詳細に行っているが、橋口君はその業績によって日本金属学会功績賞を受賞している。

また橋口君は内部摩擦法を用いない研究においても、金属の放射線損傷、点欠陥および不純物の問題を多く研究し

ている。橋口君はまた金属において得られた放射線損傷や各種の点欠陥の知識をゲルマニウムやシリコンなどの半導体、更には二酸化チタンなどの酸化物半導体の場合に拡張して、放射線損傷を受けたゲルマニウムおよびシリコンの研究、また二酸化チタンの酸素対チタンの原子比が二・〇〇よりわずかに小さくなって酸素の欠損した場合に現われる半導体現象に関連した研究を広範に行っている。

以上を要するに橋口君は内部摩擦法を用いて金属材料の塑性変形および放射線損傷に関する詳細な研究を行ったのであるが、その独創的な研究によって世界にさががけて新現象を発見してその内容を詳細に究明し、また内部摩擦法を広い範囲にわたって材料研究に応用して、幅広い新生面を開拓したものであって、内部摩擦関係以外の橋口君の放射線損傷、格子欠陥、不純物、その他に関する広範な研究業績と共に、金属工学、材料科学、原子力工学などにおける材料開発の基礎面に顕著なる貢献をなしたものと認める。

### 一、主要な著書および論文目録

#### (一) 主要な著書

- (1) 金属組織学、資料社、一九四九年、全一九九頁、同増補版、新資料社、一九五五年、全三二五頁。
- (2) 原子炉材料、橋口隆吉、伊藤伍郎、千谷利三、堀部純男、市瀬元吉共著、日刊工業新聞社、一九六〇年、分担部分一—四八頁（橋口隆吉、伊藤伍郎共著）。
- (3) 固体物理学、永宮健夫、久保亮五編、岩波書店、一九六一年、分担部分六八四—七九三頁、同英訳、Solid State Physics, McGraw-Hill Book Co., Inc. New York, 1969, 分担部分七一—八二六頁。

(4) Lattice Defects in Semiconductors, 橋口隆吉編、東大出版、一九六八年、分担部分一三一—一三七頁、  
一一一—一二八頁(東中川巖、石野榮、中沢文子、橋口隆吉共著)。  
他一〇編。

(二) 主要論文(内部摩擦関係)

1. R. Hasiguti and T. Hirai: Internal Friction of Cold-Worked Single Crystals of Copper. *J. Appl. Phys.* **22** (1951) 1084.
2. R. Hasiguti: Internal Friction of Metals due to Crystal Imperfections. *Proc. Int. Conf. Theo. Phys. Kyoto*, (1953), p. 577.
3. R. Hasiguti and G. Kamoshita: Internal Friction of Alpha-Iron due to Boron Atoms. *J. Phys. Soc. Japan*, **9** (1954) 646.
4. R. Hasiguti and S. Okuda: Internal Friction of Cold-Worked Gold and Copper at Low Temperatures. *Proc. Japan Academy*, **35** (1959) 284; *Sc. Pap. Phys. Chem. Res.* **53** (1959) 265.
5. R. Hasiguti, N. Igata and G. Kamoshita: Internal Friction Peaks in Cold-Worked Metals. *Acta Metallurgica*, **10** (1962) 442.
6. R. Hasiguti: Internal Friction due to Diffusion of Dislocation-Kinks Trapped by Point Defects. *J. Phys. Soc. Japan*, **18** Suppl. I (1963) 114.
7. S. Okuda and R. Hasiguti: Internal Friction Peaks of Cold Worked Gold and Copper at Low Temperatures. *Acta Metallurgica*, **11** (1963) 257.
8. M. Koiba and R. Hasiguti: Internal Friction Peaks at Low Temperatures in Deformed Copper. *Acta Metallurgica*, **11** (1963) 1215.

9. M. Koiwa and R. Hasiiguti: A Theory of Internal Friction Peak due to Thermal Unpinning of Dislocations and its Application to P-1 Peak in Copper. *Acta Metallurgica*, **13** (1965) 1219.
10. R. Hasiiguti: Theory of Mechanical Relaxation Peaks in Cold-Worked Metals. *Phys. Stat. Sol.* **9** (1965) 157.
11. R. Hasiiguti and K. Iwasaki: Internal Friction and Related Properties of the TiNi Intermetallic Compound. *J. Appl. Phys.* **39** (1968) 2182.
12. R. Hasiiguti and K. Iwasaki: Correlations between Plastic Deformation and Phase Change in the Compound TiNi with Special Reference to Internal Friction. *Trans. Japan Inst. Metals*, **9** Suppl. (1968) 288.
13. N. Igata, R. Hasiiguti and S. Seto: Behavior of Nitrogen Atoms in Irradiated Iron and Iron Alloy Revealed by Internal Friction and Electron Microscopy. *Trans. Iron Steel Inst. Japan*, **10** (1970) 21.
14. N. Igata, R. Hasiiguti, E. Yagi, U. Nishitake and K. Watanabe: Neutron Irradiation Effects on Iron Containing Aluminum and Nitrogen. *Amer. Soc. Test. Materials, ASTM-STP-484*, 1970, p. 128.
15. R. Hasiiguti: Internal Friction due to Dislocations Interacting with Point Defects (Hasiiguti Peaks). *Proc. Int. Symp. Reinststoffe in Wissenschaft und Technik, Akademie-Verlag, Berlin*, 1972, p. 165.
16. R. Hasiiguti: Thermal Unpinning of Dislocations — Hasiiguti Peaks of Internal Friction. *J. Less-Common Metals*, **28** (1972). 249.
17. R. Hasiiguti: The Structure of Defects in Solids (Point Defects in Rutile and Hasiiguti Peaks). *Ann. Rev. Materials Sci.* **2** (1972) 69.

18. N. Igata, R. Hasiiguti and K. Watanabe: Irradiation Hardening of Iron Alloys. Proc. 3rd Int. Conf. Strength of Metals and Alloys, Vol. 1, Cambridge, 1973, p. 21.
  19. K. Iwasaki, M. Koiwa and R. Hasiiguti: Internal Friction Peaks of Cold Worked Dilute Copper Alloys. J. Phys. Soc. Japan, 39 (1975) 117.
  20. R. Hasiiguti and M. Kobayashi: The Relation between the Amplitude Dependent Internal Friction and the Temperature Peak of Internal Friction due to Unpinning of Dislocations. Proc. 5th Int. Conf. Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Crystalline Solids. Springer Verlag, 1975, Vol. II, p. 497.
- 他二〇篇。

(三) 主要な論文(内部摩擦関係以外)

1. 橋口隆吉<sup>1)</sup> Cu-Al合金の再結晶速度常数およびそれと温度との関係<sup>2)</sup> 日本金属学会誌<sup>3)</sup> 第八卷(一九四四)<sup>4)</sup> 三六六頁。
2. T. Mishima, R. Hasiiguti and Y. Kimura: Magnetic Measurements of Age-Hardening of Fe-Mo Alloys. Proc. 1st World Metallurgical Congress, Amer. Soc. Metals, 1951. p. 656.
3. 三島徳七<sup>1)</sup> 橋口隆吉<sup>2)</sup> 木村康夫<sup>3)</sup> 冷間加工可能な永久磁石——クロムを含むニッケルロイについて<sup>4)</sup> 日本金属学会誌<sup>5)</sup> 一一卷(一九五八)<sup>6)</sup> 三九三頁。
4. H. Kimura, A. Kimura and R. Hasiiguti: A Resistometric Study on the Role of Quenched-in Vacancies in Ageing of Al-Cu Alloys. Acta Metallurgica, 10 (1962) 607.
5. R. Hasiiguti: Formation and Binding Energies of a Divacancy in Diamond Lattices. Lattice Defects in Semicon., Tokyo Univ. Press and Penn. State Univ. Press, 1968, p. 131.
6. R. Hasiiguti, E. Iguchi and S. Takahashi: Electron Paramagnetic Resonance in Slightly Reduced



- Rutile. Proc. 9th Int. Conf. Phys. Semicon., Moscow, 1968, p. 1142.
7. R. Hasiiguti, E. Yagi, U. Nishihke and T. Sakai: An Axial Dislocation in Copper Whiskers. *J. Crystal Growth*, 7 (1970) 117.
  8. R. Hasiiguti, E. Yagi and M. Aono: Electrical Conductivity of Slightly Reduced Rutile between 2° and 370°K. *Radiation Effects*, 4 (1970) 137.
  9. R. Hasiiguti: Point Defect Complexes, Clusters and Loops in BCC Iron. *Trans. Iron Steel Inst. Japan*, 11 Suppl. (1971) 1249.
  10. M. Shimotomai and R. Hasiiguti: The 220°K Defect in Electron Irradiated p-Type Germanium. *Radiation Effects*, 9 (1971) 47.
- 参考文献。

11' 山口県立大学工学部 (現広島大学工学部)

## 丁 参考文献

1. R.H. Chambers: Dislocation Relaxation in Body-Centered Cubic Transition Metals, in *Physical Acoustics*. Vol. III-A, edited by W.P. Mason, Academic Press, New York, 1966, pp. 184-187.
2. R. de Batist: Internal Friction of Structural Defects in Crystalline Solids. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1972, pp. 334-347.
3. A.S. Nowick and B.S. Berry: Anelastic Relaxation in Crystalline Solids. Academic Press, New York, 1972, pp. 389-394.

## 丑 論文

1. G. Alefeld: Grouping of Pinning Points on Dislocation Lines. *Phil. Mag.* 11 (1965) 805.

2. C.F. Burdett: Internal Friction Peak  $P_1$  in Copper. *J. Phys. D. Ser. 2*, 1 (1968) 1978.
3. P. Peguin and H.K. Birnbaum: A Theory of the Hysteretic Contribution to Internal Friction: Thermomechanical Unpinning of Dislocations. *J. Appl. Phys.* 39 (1968) 4428.
4. W. Benoit, B. Bays, P.A. Grandchamp, B. Vitzoz, G. Fantozzi, J. Perez and P. Gobin: Modulus Effects and Hasiguti Peaks on Two Coldworked fcc Metals: Gold and Aluminium. *J. Phys. Chem. Solids*, 31 (1970) 1907.
5. D.G. Blair, T.S. Hutchison and D.H. Rogers: Thermally Assisted Unpinning of Dislocations. *Can. J. Phys.* 49 (1971) 638.
6. B. Bays: Etude d'un pic de Hasiguti par des mesures de frottement intérieur dans l'or éroui et irradié aux neutrons. *Mém. Sci. Rev. Metallurgie*, 68 (1971) 629.
7. B. Bays, W. Benoit et P.A. Grandchamp: Pic de Hasiguti et anomalie de module dans l'or pur éroui et irradié à 78°K. *J. de Phys.* 32 (1971) C2-153.
8. F. Baudraz et O. Mercier: Etude des pic de Hasiguti dans l'or pur éroui à basse température. *Helv. Phys. Acta*, 47 (1974) 413.

製 | ○○ 輝云 4°