

## 特別講演

UDC 669.017 : 539.67

## 鉄鋼その他の金属の内部摩擦について\*

橋 口 隆 吉\*\*

## Internal Friction of Iron, Steel and Other Metals

Ryukiti HASIGUTI

## 1. ま え が き

今回私どもの“金属結晶格子欠陥の内部摩擦現象の研究”に対して、西山賞をいただくことになりましたことは、私の最も光榮とするところであります。

内部摩擦に関する私どもの研究は主として東京大学工学部と理化学研究所において行われたものであります。本日はそれらの研究成果の若干につきまして、鉄鋼に重点をおいてお話したいと思います。

音波または機械的な振動を使つて材料の性質や物体の内部的な構造を調べることは古くから行なわれております。材料の超音波探傷もその1例であり、また西瓜を指先ではじいて、その音によつて、西瓜の実の入り具合を調べるのもその1例であります。

われわれが行ないました研究は材料の内部における音波または機械的振動（以下たんに振動という）の減衰を利用して、金属材料の内部にある不純物原子や格子欠陥の性質や挙動を調べ、金属材料の性能の向上に資するというものであります。

## 2. 内部摩擦ピーク

物体を自由に振動させて放置すると、その振動はしだいに減衰します。振動のエネルギーが周囲の空気など外界に散逸することを完全に防いでも、振動のエネルギーは物体の内部に摩擦があるかのごとくに熱に転換して失われ、振動はしだいに減衰します。この現象を内部摩擦と呼んでおります。内部摩擦は習慣的に  $Q^{-1}$  という符号で表わしますが、それは

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\delta W}{W} \dots \dots \dots (1)$$

で与られます。ここで  $\delta W$  は振動の1サイクル中に失われるエネルギー、 $W$  は振動のエネルギーであります。すなわち内部摩擦は振動の1サイクル中に物体の内部で失われるエネルギーに比例した量であります。

内部摩擦にはきわめて多くの種類がありますが、本日はいわゆる内部摩擦スペクトルとして現われるものに話

を限定することにいたします。図1は内部摩擦スペクトルの模型図であります。上の図は横軸に振動数をとつた場合でありまして、光の吸収スペクトルと類似の表現であります。後に述べますように、ここで考えている内部摩擦は材料の内部において不純物原子や格子欠陥が振動的に移動することと関係しております。さて不純物原子または格子欠陥が原子的な単位距離をジャンプによつて移動するに要する平均の時間を緩和時間と呼び  $\tau$  で表わします。試片の振動数を  $f$  としますと  $1/f$  が振動の周期となりますが、振動の周期が緩和時間とほぼ等しいところで内部摩擦は最大となります。正確には  $f$  に  $2\pi$  を乗じた角振動数  $\omega = 2\pi f$  を用いて表現して

$$\frac{1}{2\pi f} = \frac{1}{\omega} = \tau \dots \dots \dots (2)$$

となつたときに内部摩擦は極大値を取り、 $\omega$  の値がそれより大きくなつても小さくなつても内部摩擦の値は小さくなりますので、図1の上図のように釣鐘型の曲線が得られます。このことは釣鐘型内部摩擦曲線の極大値の付近では、不純物原子または格子欠陥が試片の振動にともなつて往復ジャンプ運動をしていることを意味します。ここで温度が一定であるということは、下に述べる(3)式からもわかりますように、緩和時間  $\tau$  が一定であるということでもあります。

温度が高くなりますと、熱エネルギーが大きくなるため、不純物原子や格子欠陥の移動速度が早くなり、 $\tau$  が小さくなります。その関係は絶対温度を  $T$  としますと

$$\tau = \tau_0 \exp(E/kT) \dots \dots \dots (3)$$

によつて表わすことができます。ここで  $\tau_0$  は定数、 $E$  は不純物原子または格子欠陥の移動のエネルギー、 $k$  はボルツマンの定数です。(2)式の関係においては  $\omega$  と  $\tau$  を入れかえても同じ議論ができますので、図1の横軸に振動数の代わりに緩和時間  $\tau$  をとつても釣鐘型曲線が得

\* 昭和49年4月本会講演大会における西山賞受賞記念特別講演 昭和49年4月19日受付

\*\* 東京大学工学部教授 理化学研究所主任研究員 工博

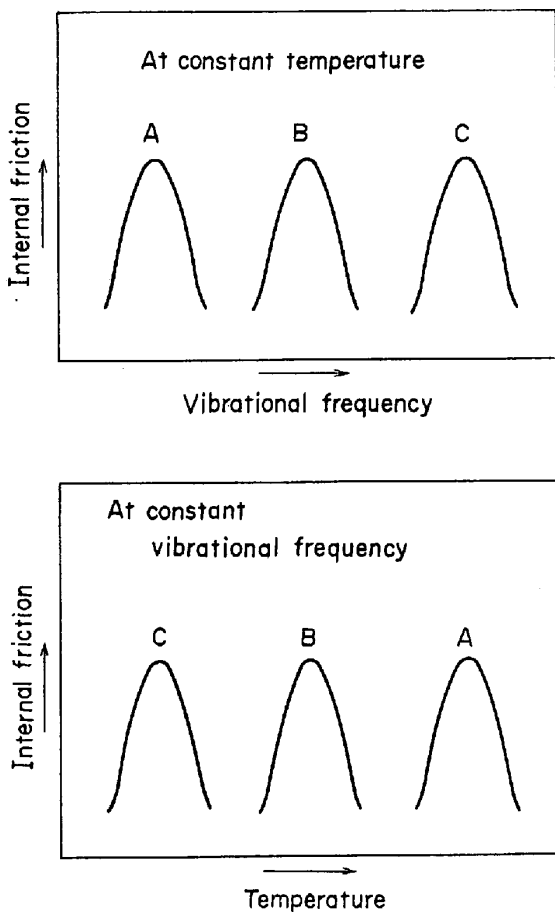


図1 内部摩擦スペクトルの模型図

られることとなります。また(3)式によつて $\tau$ の代わりに温度  $T$  を横軸に使つてもよいわけで、これが図1の下図になります。しかし(3)式から明らかなように、 $\tau$ が大きくなると  $T$  が小さくなりますから、スペクトルが並ぶ順序が逆になることになり、このことも図1の下図に示してあります。

以上のような性質を持つ釣鐘型の内部摩擦は緩和型の内部摩擦ピークと呼ばれておりますが、本日はこの種の内部摩擦ピークに話を限ることといたします。

図1の上図と下図は同じ内容の内部摩擦スペクトルですが、実験の難易という点から見ますと、両者は著しい違いを持つております。上図の方式で必要なスペクトルを得るためには、多くの場合振動数を何桁も変えなければならず、容易ではないのでありますが、温度を変える下図の方式で同様のスペクトルを得ることは比較的容易であります。それゆえ多くの研究者は下図の方式を使います。われわれも温度の関数としてのスペクトルを調べることにいたしました。

図2に内部摩擦スペクトルの1例としてニオブのスペクトルを示しました。縦軸の  $Q^{-1}$  は内部摩擦であります。この図は何人かの研究者の実測結果を模型図化したものであります。低温側から  $\alpha$  ピーク、 $\beta$  ピーク、固溶

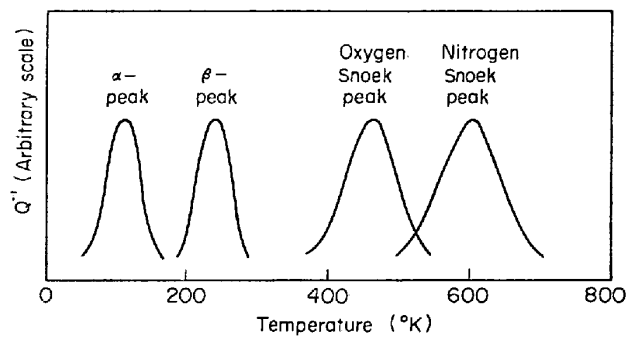


図2 ニオブの内部摩擦スペクトルの模型図

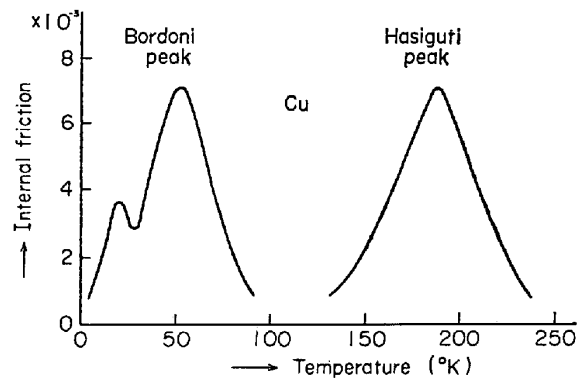


図3 銅のボルドニ・ピークとハシグチ・ピークの模型図

酸素のスネーク (Snoek) ピーク、固溶窒素のスネーク・ピークが示されています。このように異なる原因に基づく内部摩擦は異なるピークを与えますから、それらの異なる諸原因を別々に互いに独立に研究することができます。このことは緩和型内部摩擦ピークを研究の手段とする不純物や格子欠陥の研究の大きな特長でありまして、電気抵抗の測定とか静的な機械的強度の測定のように、すべての原因に基く結果の総和だけが現われるという型の研究方法では決して得られないような情報が得られることとなります。図2の $\alpha$  または  $\beta$  ピークに関する話は本日は割愛しますが、スネーク・ピークについては、後程いろいろな応用例をお話することにいたします。

図3は銅のボルドニ (Bordoni) ピークとハシグチ (Hasiguti) ピークの模型図であります。これはいずれも線状格子欠陥である転位にもとづくものでありますが、本日はハシグチ・ピークについていささかお話をすることにいたします。

### 3. スネーク・ピークの応用

スネーク・ピークそのものは、今日完全に確立された現象であります。すなわち体心立方金属に格子間不純物が固溶した場合、その不純物原子は結晶の単位胞の中の1つの位置に侵入して、一方向に単位胞を伸ばしますが、試片に振動を与えますと、侵入固溶原子は単位胞を

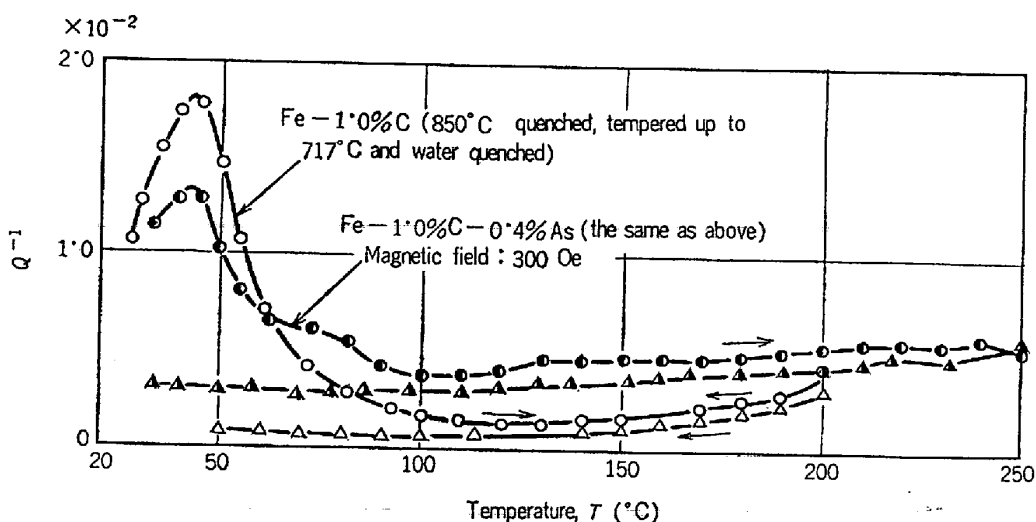


図4 1% C鋼と1% C-0.4% As 鋼の内部摩擦スネーク・ピーク<sup>1)</sup>

他の方向に伸ばす格子間位置との間に往復ジャンプ運動を起こし、それが内部摩擦ピークを生じます。これがスネーク・ピークであります。スネーク・ピークの高さはこのような往復ジャンプを行なう格子間固溶不純物の濃度に比例することが明らかになっておりますから、スネーク・ピークの高さを測定することによつて、固溶状態にある格子間不純物の濃度を知ることができます。

また体心立方金属中の格子間不純物と置換型不純物とが結合して複合体をつくりますと、格子間不純物のスネーク・ピークのピーク温度が移動したり、ピークが変形したりすることが知られております。

以上のようなスネーク・ピークに関して確立した事実を手段として利用し、われわれはいろいろなことを研究いたしました。以下に2つの応用例を述べることにいたします。

### 3.1 鋼中のヒ素の挙動

鋼中のヒ素は有害な元素と考えられており、内部摩擦的にも異常な挙動を示すことが予想されます。われわれは Fe-1% C-0.4% As の合金の挙動を鉄中の炭素のスネーク・ピークを利用して研究し、きわめて興味ある結果を得ることができました<sup>1)</sup>。

図4はある熱処理を施した後 717°C から水焼き入れた鋼の内部摩擦  $Q^{-1}$  の曲線であります。0.4% As を含む鋼と As を含まない鋼とを比較してあります。40°C 付近にあるピークが炭素のスネーク・ピークであります。As を含む鋼でスネーク・ピークが減少しているのは、自由な固溶炭素の濃度が減少したことを示し、それは格子間固溶炭素の一部が置換型固溶ヒ素と結合して複合体をつくつたことを意味します。このことは As を含む鋼のスネーク・ピークの高温側 (80°C 付近) に C-As 複合体にもとづくと考えられる内部摩擦曲線のこぶができてくることからわかります。

一般に結合力が強く分解しがたい複合体は、その形成が容易であるのが普通であります。ところが C-As 複合体は奇妙な性質を持つております。結合力が強く分解しがたいのに、形成も容易ではなく、形成に対するポテンシャルの障壁が存在するのであります。これを定量的に示すならば、分解のポテンシャル・エネルギーは 2.15 eV と大きく、結合の障壁ポテンシャル・エネルギーも 1.60~2.15 eV の範囲でかなり大きいのであります。炭素原子の自由な移動エネルギーが 0.87 eV であることを考えれば、それに比べて上記のエネルギーが著しく大きいことがわかるでありましょう。このようなことが As 原子の奇妙な性質、Fe-1% C-0.4% As 合金における異常な析出現象<sup>1)</sup>、また一般に鋼中のヒ素の有害性などにつながるわけであります。

### 3.2 鋼の照射損傷

鋼は原子炉の圧力容器材料として重要であります。圧力容器は原子炉の放射線を受けますから、鋼の照射損傷をよく研究しておく必要があります。鋼中の炭素や窒素のスネーク・ピークを利用して、鋼の照射損傷の研究を行なうことができます。

図5にその1例を示します<sup>2)</sup>。これは 35 ppm の窒素を含む純鉄の中性子照射実験の例であります。図の内部摩擦ピークは固溶窒素のスネーク・ピークであります。照射前には図の曲線5と同じ程度の高さの窒素スネーク・ピークが出ていた試料に、原子炉温度約 75°C で  $1.2 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$  の中性子 (>1 MeV) 照射を行ないますと、図5の曲線1で示すようにスネーク・ピークが消失いたします。これは照射損傷によつて形成された格子欠陥が窒素原子と複合体をつくり、スネーク・ピークを生じないようなものに窒素を変化させるためであると考えられます。この照射欠陥・窒素複合体は照射された鉄を硬化させます。つぎにこの照射された鉄を焼鈍いたしますと、

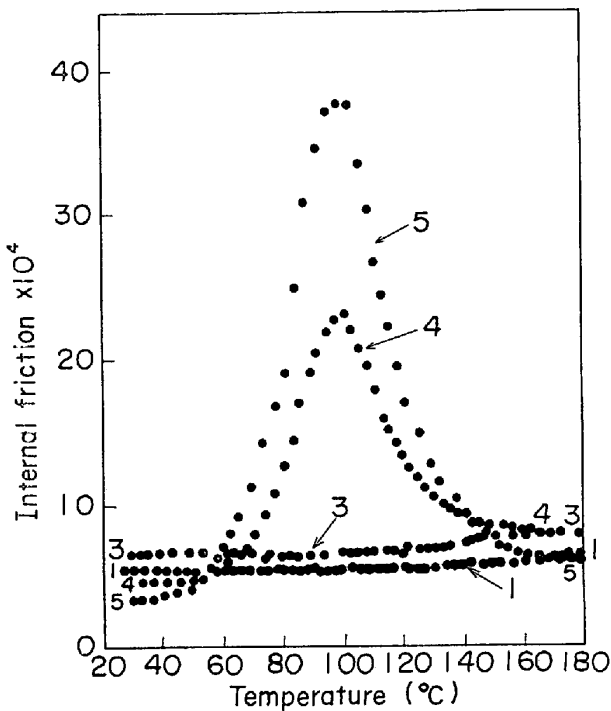


図5 窒素を含む鉄の中性子照射およびその後の焼鈍によるスネーク・ピークの消長<sup>2)</sup>

215°C 焼鈍(曲線3)では変化が現われませんが, 350°C 焼鈍(曲線4)ではスネーク・ピークが再現し, また 450°C 焼鈍(曲線5)ではほぼ照射前のスネーク・ピークの高さに回復いたします。このような焼鈍によるスネーク・ピークの再現回復は照射欠陥・窒素複合体が分解して, 照射格子欠陥が消滅し, また窒素が元の固溶状態に復することを示しております。照射による複合体の形成によつて硬化した鉄は, 焼鈍によつて複合体が分解消失するために軟化するのですが, スネーク・ピークを利用した研究によつて, このような硬化と軟化の機構が解明されたということが出来ます。

#### 4. ハシグチ・ピーク

##### 4.1 ハシグチ・ピークとは

この内部摩擦ピークは欧米ではハシグチ (Hasiguti) ・ピークと呼ばれ, CHAMBERS<sup>3)</sup> や NOWICK-BERRY<sup>4)</sup> や de BATIST<sup>5)</sup> などの内部摩擦の教科書でもこの呼び方が使われておりますので, ここでもこの名称を使わせていただくことにいたします。

たとえば純銅の試片に室温で冷間加工を与えてから, この試片の内部摩擦を低温から測定していきますと, 図3に模式的に示しましたように, 2つの大きなピークが現われます。低温のものをボルドニ・ピークと呼び, 高温のものをハシグチ・ピークと呼びます。ボルドニ・ピークは銅の場合, 振動数 1c/s で 55°K 付近に現われ, 図3に示したように低温側にこぶを持つております。ハシグチ・ピークは冷間加工の温度や冷間加工後の熱処理

の違いによつて3種類の異なるピーク  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  が現われますが, 振動数 1c/s のときのピーク温度は  $P_1$  が 145°K,  $P_2$  が 165°K,  $P_3$  が 230°K の付近であります。図3は  $P_2$  を模式的に示したものであります。

ここでボルドニ・ピークとハシグチ・ピークの発生のメカニズムを概略お話しておきましょう。これらのピークは結晶性材料の機械的強度や塑性変形の基礎をなす格子欠陥である転位の挙動に関係しております。転位が振動応力によつて, 平衡位置の左右に張り出す過程にもとづく内部摩擦がボルドニ・ピークであります。転位の張り出し移動が 55°K というような低温で行なわれる場合には, 転位はパイエルス・ポテンシャルの山を越さなければなりません。前に述べた(3)式のエネルギー  $E$  はボルドニ・ピークの場合には, パイエルス・ポテンシャルの高さに関係したエネルギーを表わすこととなります。

ボルドニ・ピークがいわば自由な転位の張り出し移動にもとづくものであるのに対して, ハシグチ・ピークは点欠陥や不純物原子によつて, ところどころ固着(ピン止め)された転位が, ピン止めを振り切つて張り出すことにもとづく内部摩擦であります。そしてピン止めの振り切りが熱エネルギーによる活性化によるものであることが重要な点であります。それゆえ前述の(3)式のエネルギー  $E$  は, ハシグチ・ピークの場合には, 点欠陥または不純物原子と転位との結合エネルギーを表わしてあります。すなわちこの結合エネルギーを克服することによつて, 転位はピン止めから外れて張り出し移動をすることができることとなります。それゆえハシグチ・ピークの  $E$  を実験的に求めることは, 点欠陥または不純物原子と転位との結合エネルギーを最も直接的に測定する方法であるということが出来ます。その実例は後の節でお話いたします。

##### 4.2 銅のハシグチ・ピーク

銅と金においてハシグチ・ピークの研究が最も進んでおります<sup>3)~12)</sup>。ここでは銅について, このピークの典型的な挙動をいくつかお話いたします。

図6は銅の  $P_1$  ハシグチ・ピークを振動の振幅をパラメータとして変化させて測定したものであります。試料は純銅であります, 4.3% の冷間加工を与えたものであります。振幅が増加しますと, バック・グラウンドの内部摩擦が著しく高くなりますが, ピークの値からバック・グラウンドの値を差し引いたピークの真の高さは僅かに増加いたします。ここで最も注目すべきことは, 振幅を大きくした場合に, 上記のピーク高さの増加の他に, ピークの温度が僅かに低温側にずれることであります。これらのことは後に述べます理論のところでも再び触れることにいたします。

前に述べましたピークの極大点を与える条件式(2)を(3)式に代入いたしますと

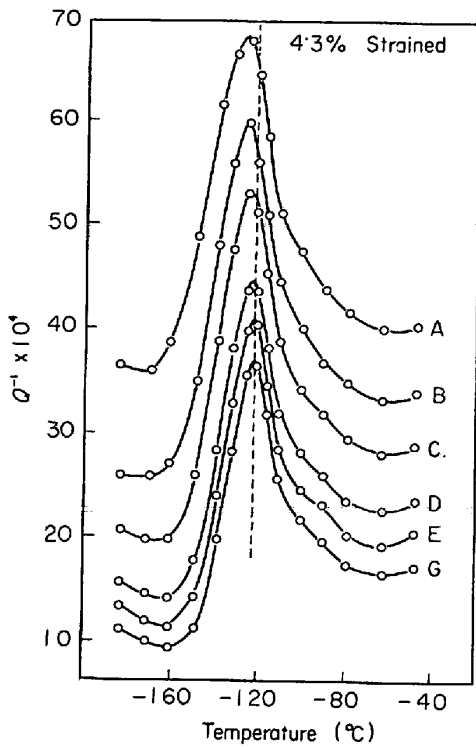


図6 4.3%冷間加工した銅のP<sub>1</sub>ハシグチ・ピークの振幅依存性. 各曲線はそれぞれ一定振幅での測定であるが、AからGへと振幅が減少する<sup>14)</sup>

$$f = f_0 \exp(-E/kT_p) \dots\dots\dots (4)$$

の形になります。f<sub>0</sub>はいろいろなものをひつくるめた定数、T<sub>p</sub>はピークの極大点の温度(ピーク温度と略称)であります。(4)式は振動数の対数 log f と 1/T<sub>p</sub> とが負の傾斜を持った直線となることを示しております。冷間加工した純銅のいろいろなピークについて、(4)式の関係を示すのが図7であります。銅に関する測定値は非常に沢山ありますので、図7にはわれわれの研究室で得られたデータのみを示しましたが、他の研究者の結果もこれらとよく一致しております。

図7の直線の傾斜から、(4)式のEすなわち点欠陥または不純物原子と転位との結合エネルギーが得られます。図7において、P<sub>1</sub>ピークに対してはE=0.32 eV、P<sub>2</sub>ピークに対してはE=0.35 eVが得られております。P<sub>1</sub>ピークにおける点欠陥は原子空孔であり、P<sub>2</sub>ピークにおける点欠陥は格子間原子であると結論されておりますので、上記のエネルギー値はそれぞれ空孔と転位の間および格子間原子と転位との間の結合エネルギーであります。

金属を冷間加工しますと、転位が増加し、原子空孔や格子間原子などの点欠陥が多数形成されます。点欠陥は金属中を移動して転位に付着してピン止めをいたします。この場合のピン止めの強さを示すのが上記の結合エネルギーであります。このような転位と点欠陥の状態は

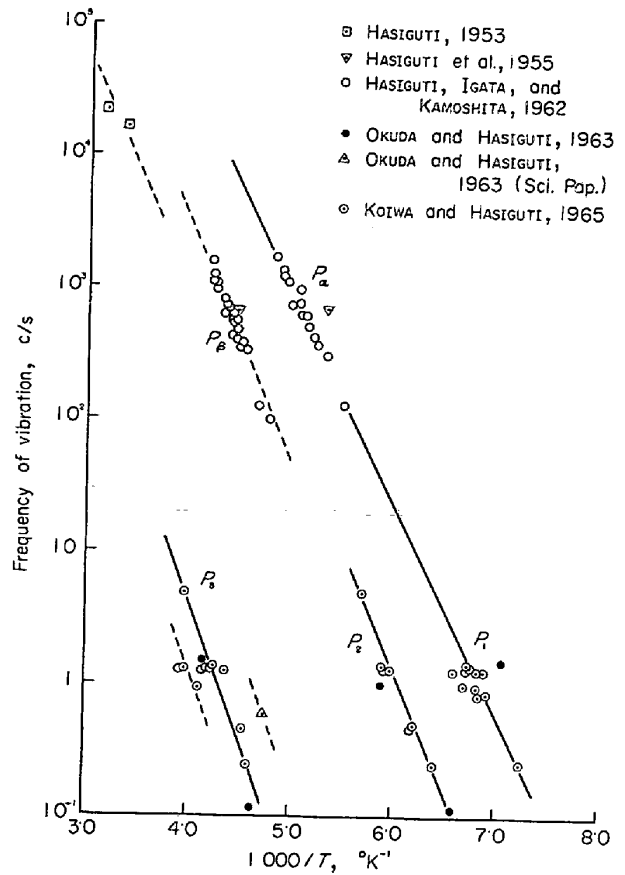


図7 銅の各ハシグチ・ピークに対して、試片の振動数の対数とピークの絶対温度の逆数との直線関係を示したもの<sup>9)10)</sup>

冷間加工された金属のある条件下における基本的な状態であります。ハシグチ・ピークはこのような状態に関する各種の情報をわれわれに与えてくれます。

図7に示されたP<sub>1</sub>およびP<sub>2</sub>以外のピークにつきましては、やや複雑なものがありますので、本日は割愛させていただきます。

### 4.3 ハシグチ・ピークの応用——鉄中の炭素と転位の結合の強さ

炭素は鉄の中で最も重要な不純物または添加元素であります。その炭素原子と鉄の機械的塑性的性質の基本をなす転位との相互作用あるいは結合作用は、鉄鋼の性質の解明においてきわめて重要な意味を持っております。たとえば鉄鋼中の転位への炭素の析出、鋼の歪時効硬化、炭素鋼の多重降伏現象、固溶炭素による鋼の硬化などにおいては、常に炭素原子と転位との結合力が重要な役割を演じております。一方炭素原子と転位との間の結合エネルギーの測定は従来多く行なわれておりますが、きわめて間接的な方法によるものが多く、その値は0.2 eVから0.8 eV位の間にもらばつており、精度が非常に悪いのであります。

もしも炭素原子にピン止めされた転位にもとづくハシグチ・ピークを観測することができ、(4)式によつてそ

の結合エネルギーを得ることができれば、従来よりも精度の高い値が得られることになりましょう。われわれはこれを試み、以下に述べますように所期の目的を達することができました<sup>13)</sup>。

Johnson-Matthey の純鉄を湿水素焼鈍と帯域精製によって純度を上げ、それに改めて7重量 ppm の炭素を添加したものを試料といたしました。これを700°C から焼入れして、炭素原子をできるだけ固溶状態にしておきます。これを10%程度冷間加工して、転位の数を増加いたします。転位の数が少ないとピークが小さく測定の精度が悪いからであります。手早く試料を低温に下げ、110°K~230°K の範囲で内部摩擦の測定を行ないます。手早く温度を下げて、室温にある時間が数分間ありますので、この間に炭素原子が適度に移動して転位をピン止めし、ハシグチ・ピークが発生する状況をつくります。室温に長時間放置しますと、ピン止めが過剰になり、そのために転位の張り出しが困難になつて、ハシグチ・ピークはしだいに高さを減少し、ついには消失してしまいます。

図8はこのようにして得られた鉄中の炭素原子によってピン止めされた転位にもとづくハシグチ・ピークであります。温度に依存するきわめて大きなバック・グラウンドと重畳しておりますので、ピークは小さなこぶのようになりますが、3種の振動数 0.53 c/s, 0.76 c/s および 1.1 c/s に対して、それぞれ 185°K, 188°K および 193°K の付近にピーク温度  $T_p$  があることがわかります。振動数と  $T_p$  を使つて(4)式から結合エネルギーを求めることができます。この種の実験を多数繰返しました結果、鉄中の炭素原子と転位との結合エネルギーとして 0.33 eV を得ることができました。これは信頼度の高

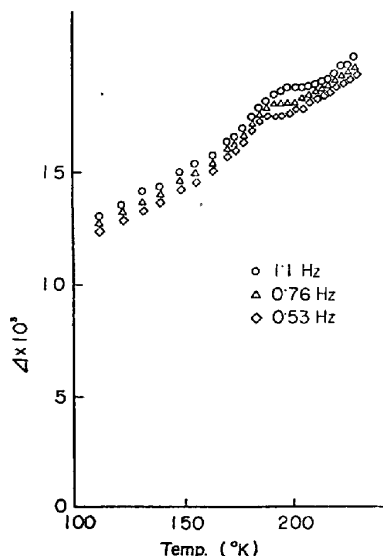


図8 鉄中の炭素原子でピン止めした転位によるハシグチ・ピーク<sup>13)</sup>

い値であると考えております。

#### 4.4 ハシグチ・ピークの理論

最後にハシグチ・ピークの理論について簡単に触れておきたいと思ひます。理論的な研究も今日までに非常に多く行なわれました<sup>9)~11), 14)~16)</sup>。本日はその一部として、簡単なモデルから出発したコンピューターによる計算の結果をお話することにいたします<sup>10)11)14)15)</sup>。

まず理論のモデルについて述べます。モデルもいろいろ提案されておりますが、ここではわれわれがコンピューターにかけた簡単なモデルについてお話いたします。図9がそれでありませう。(A)図が転位のモデルであります。(A)のaが振動応力をかける前の静止状態であり、両端の×印はたとえば転位の節のような永久固定点であり、中央の黒丸は点欠陥または不純物原子によるピン止めで、これは外れる可能性のある点であります。この図では簡単のためにピン止めを中央に1個書きましたが、実際には多数のピン止めが不規則な間隔で分布しております。しかしそれは数学的にやや複雑になるだけでありませう、この図のような1個のピン止めでも本質的には変わりはありません。このような試片に振動的応力をかけるわけでありませうが、振動の1/4サイクルの間の応力が一方向を向いている段階では、転位は(A)図のaからbのように張り出し、熱エネルギーの助けをかりてcのようにピン止めから外れます。応力の向きが逆になりますと、同じような転位の張り出し、そしてピン止めからの離脱を逆の方向に行ないます。このようなことを外部から与えた振動にともなつて繰り返すことになりませう。

さて以上のような転位の張り出し振動が、試片の(振動的)応力-歪曲線にどのような影響を与えるかを考えることができれば、それから内部摩擦を計算することができます。その応力-歪曲線を示すものが図9の(B)図

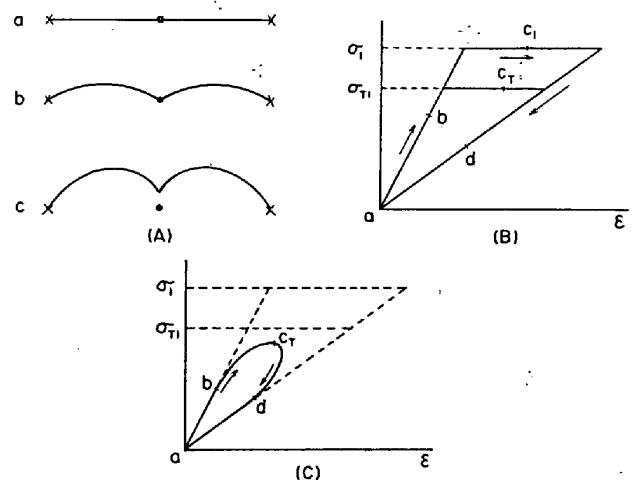


図9 (A) 転位のピン止めからの離脱模型  
(B) 臨界応力で離脱する場合のヒステリシス  
(C) 徐々に離脱する場合のヒステリシス

および(C)図であります。

まず簡単のために熱エネルギーの助けのない絶対0度の場合を考えてみますと、応力-歪曲線は振動の半サイクルの間に、(B)図の abc<sub>1</sub>da のようなヒステリシスを描くこととなります。(A)図の a から b への段階が(B)図の a b であります。これはピン止めが外れない状態で転位の張り出しだけで生ずる転位の移動にもとづく歪(転位歪)であります。(純弾性歪はこれに比べれば省略してもよいくらい小さいものであります。)絶対0度で熱エネルギーの助けがなくても、応力がしだいに大きくなって、ある臨界的な値  $\sigma_1$  に達しますと、力学的にピン止めが外れます。それに伴って急激な転位の張り出し、したがって急激な転位歪の増加が起こり、ヒステリシス曲線は  $c_1$  のところの右向きの水平線の部分を生じます。この水平線の終わりが振動の 1/4 サイクルの終わりで、そこから応力は減少し始め、ヒステリシス図は矢印に沿って d a と下つてきます。振動の半サイクルが終わつて、逆の方向に振動するときには、以上とまったく同じことが逆の方向に起こります。

さて温度が絶対0度でなくて、有限な温度  $T$  である場合、熱エネルギーの助けの影響が臨界応力  $\sigma_1$  を低下させて  $\sigma_T$  とするだけならば、ヒステリシス曲線は(B)図の abc<sub>T</sub>da のようになることとなります。しかし熱エネルギーの助けがある場合には、 $\sigma_T$  よりも低い応力でもピン止めが外れる確率が、ある程度存在いたしますので、ヒステリシス曲線は丸味を帯びた(C)図の abc<sub>T</sub>da のようなものになります。

さて最初の方でお話いたしました(1)式が示しますように、振動の 1 サイクル中に失われるエネルギー  $\delta W$  の値がわかれば内部摩擦の値を計算することができます。 $\delta W$  の値を求めるといことは、図9の(C)図のヒステリシス曲線の面積を求めることです。今のモデルの場合にこの面積を求めて、(1)式から内部摩擦  $Q^{-1}$  を計算いたしますと、簡単なモデルでもかなり複雑な結果になりますので、結果だけを示すことにいたしますと

$$Q^{-1} = \beta f \int_0^{1/2f} \exp\left\{-\int_0^t \nu \exp(-E/kT) \times \exp[a\sigma_0 \sin 2\pi ft] / kT dt\right\} \times \sin 2\pi ft \cdot \cos 2\pi ft dt \dots\dots\dots 5)$$

のような形になります。ここで  $\beta, \nu$  および  $a$  は定数、 $t$  は時間、 $\sigma_0$  は振動の応力振幅、その他の符号は前に出てきた場合と同じ意味であります。

(5)式はさらに近似しないと解析的には解けません。が、(5)式のままをコンピューターで解くことができます。その結果振幅をパラメーターとした多数のピーク曲線を得ることができます<sup>15)</sup>。この結果からピーク温度とピークの高さを求め、それらを歪振幅の関数として図示しますと、図10の2本の実線のようにになります。この

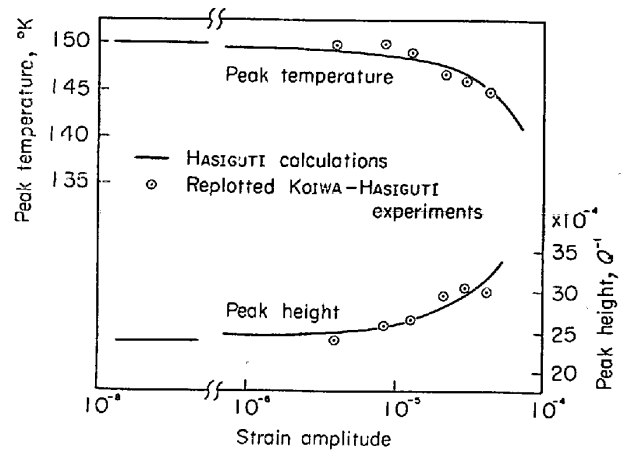


図10 ハシグチ・ピークのピーク温度と高さの振幅依存性における理論と実験の比較

図の中に図6から求めた実験値<sup>14)</sup>を書き込みますと白丸のようになります。理論と実験はかなりよく一致いたします。このようにハシグチ・ピークのピーク温度が振幅の増加によつて僅かに低下することと、ピークの高さが振幅の増加によつて僅かに増加することとは、ハシグチ・ピークの本質を極める際に重要な属性であるといえましょう。

### 5. む す び

金属の内部摩擦を研究することによつて、金属中の不純物や格子欠陥の性質や挙動を知ることができ、またそれらの知識を応用して、金属の機械的塑性的性質や熱処理と関係した性質を知ることができます。本日は私どもが得ましたこれらの結果を中心とし、また鉄鋼に重点をおきまして若干のお話をいたしました。なお私どもの内部摩擦の研究は非常に多くの方々の協力を得て行なわれたものでありまして、この機会にそれらの協力をして下さった方々に対して感謝の意を表したいと思います。御清聴をありがとうございました。

### 文 献

- 1) 大井, 橋口: 日本金属学会誌, 36(1972), p. 291
- 2) N. IGATA, R. R. HASIGUTI, and S. SETO: Trans. ISI, 10(1970), p. 21
- 3) R. H. CHAMBERS: Physical Acoustics, ed by W. P. MASON, Vol. I-A, (1966), p. 123 [Academic Press, New York]
- 4) A. S. NOWICK and B. S. BERRY: Anelastic Relaxation in Crystalline Solids, (1972), p. 389 [Academic Press, New York]
- 5) R. de BATIST: Internal Friction of Structural Defects in Crystalline Solids, (1972), p. 334 [North-Holland Publishing Company, Amsterdam]
- 6) R. R. HASIGUTI, N. IGATA, and G. KAMOSHITA: Acta Met., 10(1962), p. 442

- 7) S. OKUDA and R. R. HASIGUTI: *Acta Met.*, 11 (1963), p. 257
- 8) M. KOIWA and R. R. HASIGUTI: *Acta Met.*, 11 (1963), p. 1215
- 9) R. R. HASIGUTI: Proc. 3rd Int. Symp. Reinststoffe Wiss. Tech., (1972), p. 165 [Akademie-Verlag, Berlin]
- 10) R. R. HASIGUTI: *J. Less-Common Metals*, 28 (1972), p. 249
- 11) R. R. HASIGUTI: *Ann. Rev. Materials Science*, 2(1972), p. 69
- 12) W. BENOIT, B. BAYS, P. A. GRANDCHAMP, B. VITTOZ, G. FANTOZZI, J. PEREZ, and P. GOBIN: *J. Phys. Chem. Solids*, 31(1970), p. 1907
- 13) R. R. HASIGUTI and M. KOBAYASHI: Proc. 5th Int. Conf. Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Cryst. Solids, (1974)
- 14) M. KOIWA and R. R. HASIGUTI: *Acta Met.*, 13(1965), p. 1219
- 15) R. R. HASIGUTI: Proc. 2nd Int. Conf. Strength Metals Alloys, (1970), p. 409 [Am. Soc. Metals, Metals Park, Ohio]
- 16) J. SCHLIPF: Proc. 5th Int. Conf. Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Cryst. Solids, (1974)