最近の内部摩擦の鉄鋼研究への応用

吉 田 育 之*

1. はじめに

内部摩擦の鉄鋼材料への応用は20年以上の歴史を有し、とくに薄鋼板の延性、時効性に関しては非常に多くの重要な成果をあげてきた^{(1)~(3)}。このため1960年代には鉄鋼各メーカーは競ってその研究機関に内部摩擦測定装置を備えるに至り、また、事実数多くの研究報告がなされてきた。しかし、70年代に入って、鉄鋼材料への応用分野ではややテンボが落ち、かつての華々しさは影を潜めたかの感がある。その理由は1つには、研究テーマとして手のつけ易いような問題は一応すべて片がつき、新たな何らかのブレイクスルーがなければ局面の新展開は難しいということと、もう1つには、測定手段からの制約もあったと思われる。すなわち、内部摩擦が鉄鋼材料の研究で、ある程度「成熟した」手法となった以上、取扱いが容易でルーチン化されており、かつ、研究労力もセーブし得る測定方法が切望されてくるのは当然の帰結であった。由来内部摩擦の測定は測定者の高度な実験テクニックと努力とを要し、更に、長時間の拘束を必要とする甚だ効率の悪いものであったから、応用研究の立場からとかく敬遠され勝ちなのも当然といえる。また、測定精度についても、「極端に念入りの努力なしに」という制約条件下での精度向上が、実用研究としてはとくに重要とされる。

以上の観点から、第1に、内部摩擦測定装置——とくに鉄鋼材料研究に適した装置を念頭において最近の進歩について概観し、筆者の属する研究所において開発された自動測定装置についてやや詳しく説明する。第2に、鉄鋼材料の研究に関して内部摩擦の最近の応用例について、まだ開発途上と考えられるものも含めて概観を試みる。

* 新日本製鉄株式会社基礎研究所、現在：同社生産技術研究所副部長研究員
Internal Friction in the Investigation of Steels : Ikushi Yoshida (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corporation, Kawasaki. Present address : Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corporation, Kitakyushu)
1980年10月2日受理

2. 最近の測定技術の進歩について

MHz 領域より Hz 領域まで、周波数域によってさまざまな方法がある。また、測定対象の物性、機械的性質、形状、温度領域等によってそれぞれ適した方法があり、研究者は各人各様の工夫を凝らしているのが実状であるが、鉄鋼材料研究に適した取扱い易い装置としては、振り振動子によるものが最も多い。

(1) 振り振動子法の自動化

振り振動子法による自動測定は大別して2つの系統に分かれる。

(i) フィードバック回路の制御で振動を自己励起させる^{(4)~(8)}。この場合、一定振幅を持続せしめるに要する入力エネルギーから減衰率が定められる。

(ii) 振動の自由減衰から減衰率を定める。この方法では、測定毎に振動が減衰するので、所定振幅まで再び励起を反復しなければならない。自由減衰から減衰率を求めるのに、振幅を測定する方法と、振幅がある値に減衰するまでの波数を算える方法とがある。

以上2つの方法に対して、振動の検出手段との組合わせで多くの装置が報告されている。伝統的な光挺子によるランプ・スケールのほかに、磁界による起電力、相互誘導、光電セル⁽⁹⁾等が使われている。(i)の方法は温度を変化させつつ連続的に減衰率を自動記録させるのに便利であり、国内で市販装置がある。

(ii)の方法の一例として、筆者らが製作・使用している装置⁽¹⁰⁾を図1に示す。この装置は薄鋼板のスネーク・ピーク観測を第1の目的として設計されたもので、スリットされた薄鋼板を測定試料とし、173~423 K (-100~+150°C)の範囲を連続的に昇温し得ることを主たる仕様とした。試料Sは上下端をチャックC₁、C₂でそれぞれ連結棒Rおよび支持棒底板に固定される。Pは検出コイルで、永久磁石N、Sの作る磁界中で微小回転振動して起電力を発生する。Eは吊線、Wは重錘、またIは慣性棒で、Ni片Dを電磁石で吸引して振動を励起する。温度制御はシリコンオイル浴B、冷却パイプK(液体窒

素を送り込む), ヒーターHによってなされる. 図2は本装置の自動制御機構のブロック・ダイアグラムである. 振動子は常に微小な振動をしているので, 検出コイルの出力を増幅し, 励振コイルにフィードバックする. このとき, 駆動力は電流の2乗に比例するので, 適当なバイアスを重畳して, 駆動力をフィードバック電流の1次比例とする必要がある. 振幅が所定の大きさに達したことをリミッタで検出し, フィードバック回路を遮断する. これにより励振が停止し自由減衰に移行する. 自記記録計は励振開始と共に起動し, 一定時間の記録の後に停止する. 以上の動作は2つのタイマー T_1 , T_2 によって反復される. 解析法については次項に述べる.

図1 振り振動子法測定装置.

図2 自動制御機構ブロック・ダイアグラム.

(2) 振り振動子法の解析方法

前項自動化の2つの方法のうち, 一定振幅持続の方法は, 入力に直ちに減衰率に比例するから, 解析上とくに問題はない. しかし, 測定温度の上昇と共に周期が変化し, 単位時間当たりの入力と1周期に失われるエネルギー

一とが比例しないことに注意しなければならない.

自由減衰の場合には

$$Q^{-1} = \frac{1}{n\pi} \ln \frac{A_0}{A_n} \quad (1)$$

から, 内部摩擦 Q^{-1} を定めるのが最も普通である. ここで A_0, A_n はそれぞれ任意に選んだ0番目およびそれから算えて n 番目の振動の振幅である. あるいは, A_0/A_n をあらかじめある値に設定しておき, A_0/A_n がその値に到達するまでの波数 n を算える. いずれにしても, これは波高解析 (wave-height analysis) であって, 波高 (振幅) の測定が測定労力および精度の両面からの隘路となる. 励振・自由減衰移行・自記記録によって測定が自動化され, 測定労力の点から解放されても, 波高測定特有の精度の悪さからは解放されない. ここで2種類の誤差が考えられる. 第1は雑音で, 波高測定を電算機処理するために微分すると, 雑音による高周波成分が誇張される恐れがある⁽¹¹⁾ (図3). 第2は低周波成分で, 図1 (またはその他の装置でも大同小異であるが) から推察されるように, 振動子系が一般に「横揺れに弱い」構造をしており, これが低周波成分として, 本来の振り振動成分に重畳して記録される可能性がある. とくに, 試料形状が理想的な円形断面の針金状から外れている場合, 試料に反りがある場合などこの傾向が著しい. 実用材を対象とするようなときこの問題は特に重要である. この種の妨害振動を避けるために, 各種の防振機構を設けたり, 装置全体の重量を極端に大きくして外部振動の影響を防いだり, また深夜に測定するなど, 実験者の苦勞話にはこと欠かない.

図3 雑音の影響と信号の積分 (岩崎⁽¹¹⁾).

1つの対策として, 振幅測定に半波の積分値を利用する方法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾が提唱されている. 岩崎⁽¹¹⁾によれば, 振幅 A_n と面積 S_n , 対数減衰率 δ の間には,

$$S_n = \frac{4\pi^2 \{ \exp(-\delta/2) + 1 \}}{4\pi^2 + \delta^2} A_n \quad (2)$$

の関係がある. 従って式(1)の A_0/A_n の代りに S_0/S_n を代入すればよい. これによって振幅測定における雑音の影響は著しく低減せしめられる.

筆者らが採用している方法⁽¹³⁾は電算機による波形解析で, フーリエ成分に分解する点従来の波高解析とは本質的に異なっており, 横揺れ対策, 雑音除去に優れた効果を示したので次に紹介する.

振動出力の波形 $f(t)$ を次の3項から成るとする.

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) \quad (3)$$

ここで、 $f_1(t)$ は自由減衰振動の波形であって、その減衰時定数を t_1 、周期を t_2 とすれば、複素振幅 A を用いて、

$$f_1(t) = |A| \cdot e^{-t/t_1} \cdot \cos(2\pi t/t_2 + \arg A) \\ = \frac{1}{2} (A e^{j\omega_1 t} + A^* e^{-j\omega_1 t}) \quad (4)$$

と書き表わせる。 A^* は A の共役、 $j = \sqrt{-1}$ 、また、複素角振動数 ω_1 を

$$\omega_1 = 2\pi/t_2 + j \cdot 1/t_1 \quad (5)$$

と定義する。式(3)第2項 $f_2(t)$ は、横揺れ、すりこ木運動などの、振り振動以外のモードの振動の総和を表し、いくつかの単振動の和であって、また、それぞれの振動数は ω_1 から適当に隔っているものと仮定する。さらに、第3項 $f_3(t)$ は、 f_1, f_2 以外の f の成分を意味し、微小なランダム波形と仮定する。式(3)をフーリエ変換するが、計算機での処理の手順として、有限の時間区間 t_3 で離散型フーリエ変換 (DFT, Discrete Fourier Transform) を施す。すなわち、時間区間 t_3 を 2^n 等分し、時刻

$$t_r = \frac{t_3}{2^n} \times r, \quad r = 0, 1, 2, \dots, 2^n - 1 \quad (6)$$

における振幅の標本値 $\{f(t_r)\}$ を用いる。 n は正整数で、 $n=11$ ととっている ($2^n=2048$)。 $\{f(t_r)\}$ の DFT を $F(s)$ と書く。

$$F(s) = \sum_{r=0}^{2^n-1} f(t_r) e^{-j(2\pi/2^n)rs} \\ = \sum_{r=0}^{2^n-1} f_1(t_r) e^{-j(2\pi/2^n)rs} + \sum_{r=0}^{2^n-1} f_2(t_r) e^{-j(2\pi/2^n)rs} \\ + \sum_{r=0}^{2^n-1} f_3(t_r) e^{-j(2\pi/2^n)rs} \quad (7)$$

$$s = 0, 1, 2, \dots, 2^n - 1 \quad (8)$$

式(7)右辺各項を $F_1(s), F_2(s), F_3(s)$ と書いておく。

式(4)を代入して計算を進めれば、 $F_1(s)$ は

$$F_1(s) = \frac{A}{2} \frac{1 - e^{j\omega_1 t_3}}{1 - e^{j(\omega_1 t_3 - 2\pi s)/2^n}} \\ + \frac{A^*}{2} \frac{1 - e^{-j\omega_1^* t_3}}{1 - e^{j(-\omega_1^* t_3 - 2\pi s)/2^n}} \quad (9)$$

と書き表わされる。式(9)右辺第1項は

$$s \approx \omega_1 t_3 / 2\pi \quad (10)$$

で鋭いピークを持ち、

$$2^n \gg |\omega_1 t_3 / 2\pi| \gg 1 \quad (11)$$

の条件下で、式(10)の s 近傍では

$$\frac{A}{2} \frac{1 - e^{j\omega_1 t_3}}{-j(\omega_1 t_3 - 2\pi s)} \cdot 2^n \quad (12)$$

で近似されることが分る。式(9)右辺第2項、また $F_2(s)$ も式(10)の s 近傍ではなだらかに変化することが知られるから、これらをまとめて s の1次式で近似し、その近似によって生ずる誤差、および $F_3(s)$ の項をまとめ

て $D(s)$ と書く。 $D(s)$ は十分に小さい量である。従って式(10)の s 近傍では

$$F(s) \approx \frac{A}{2} \frac{(1 - e^{j\omega_1 t_3}) 2^n}{-j(\omega_1 t_3 - 2\pi s)} + B + Cs + D(s) \quad (13)$$

と近似できる。式(13)を差分法で解き、 B, C, D などを消去して ω_1 を定めれば、

$$Q^{-1} = \frac{1}{\pi} \frac{t_2}{t_1} \quad (14)$$

によって内部摩擦 Q^{-1} が算出される。

検出コイルからの出力は 12 ms ごとにサンプリングし、A-D 変換後オンラインで当所データ収集システム FLANC II により小型電算機 U-400 に一たん蓄積する。計算は実験終了後 FACOM 230-38 にデータ転送し、パッチ処理で行なう。計算時間は内部摩擦値1個について6秒である。結果は、温度 T 、振動周期 t_2 、内部摩擦 Q^{-1} の表と、X-Y プロッターによる Q^{-1} 対 T の図として与えられる。この解析方法の特徴は、自動化による測定・解析労力の低減は勿論ながら、その外に、フーリエ変換によって妨害振動成分を取除き、同時に、多数情報の集積によって騒音の影響を統計的に減少させ、測定精度を著しく向上させ得た点にある。図4に測定結果の一例を示す。

図4 スネーク・ピーク測定例。

(3) 強制振り振動による測定法⁽¹⁴⁾

内部摩擦の通常の測定法は、試験片を要素に含む1自由度の振動系の固有振動の自由減衰を観測するものである。従って、内部摩擦の周波数スペクトラムを取るには、固定振動数で温度スペクトラムを取るようになるが、これは活性化過程に限られる。Woigard ら⁽¹⁴⁾はこの欠点を除くため、低周波数で広い範囲 ($10^{-5} \sim 10$ Hz) にわたる周波数スペクトラムを観測し得る測定装置を報告した。彼らの装置は逆吊り振動方式で、その固有振動数は 100~500 Hz であり、

$$(\omega/\omega_r)^2 \ll 1 \quad (15)$$

の条件を満たしている。ここで、 ω は測定振動数、 ω_r は固有振動数である。この条件下で強制的に外部から振り振動動力を与えれば、慣性力は無視できて、内部摩擦 Q^{-1} は

$$Q^{-1} = \tan \phi \quad (16)$$

で与えられる。ここで、 ϕ は応力と歪との間の位相差である。試料に接続するモリブデン棒に小磁石をとりつけ、これにヘルムホルツ・コイルによって低周波交流磁気力を与え振り振動を生ぜしめる。歪(変位)検出は光挺子の方法による。

図5は Fe-C 系のスネーク・ピークを 286 K (13°C) で観測した例である。理論曲線との良い一致が認められる。バック・グラウンドが可成り高いのは問題であるが、一定温度での測定でスネーク・ピークの観測が可能な点は、鋼材品質管理への応用の可能性を示唆している。加振方法、検出方法等の改良によって、実用的見地からの応用性は相当に期待できるであろう。

図5 強制振り振動法によるスネーク・ピーク測定例。Fe-C, 286 K. 黒丸は測定値, 実線は理論曲線(J. Woïrgard *et al.*⁽¹⁴⁾).

(4) 試料形状と吊線の影響について

(i) 試料形状

鋼材研究の場合、試料は多くストリップ状であって、理想的な円形断面針金状とはかけ離れている。このため、振り振動歪が試料内で一様でないのみならず、横揺れ振動の原因ともなる。試料形状の影響を詳細に調べておくことは実用的見地からとくに重要である。

小田部⁽¹⁵⁾は商用低炭鋼板について、振り振動法による内部摩擦測定値に及ぼす試料形状の効果を調べた。図6は、アルミニウムキルド鋼板について、ストリップ状試料の試料幅が、内部摩擦測定値に及ぼす効果を示す。スネーク・ピークの形状(ひろがり)が大きい影響を受けていることが看取される。円筒状試料の微小振り変形においては、軸垂直断面が変形後も不変に保たれると仮定して解析し得るが、長方形断面のストリップ状試料では断面の振れが生じ、その応力分布の解析は極めて困難と

図6 アルミニウム・キルド鋼のスネーク・ピークに及ぼす試料幅の効果(S. Otabe⁽¹⁵⁾)(長さ 305 mm, 厚さ 0.76 mm, 幅は図中に示す)。

なる。ストリップ状試料の振りに際して生ずるこの種の複雑変形が歪依存内部摩擦を生じ、図6のような形状効果をもたらしたものと解釈される。低炭実用鋼、純鉄について、スネーク・ピーク高さと固溶 C, N 量との比例係数は、測定者間に可成りのバラツキがある⁽¹⁾。その少くとも一因に形状効果も含まれると考えられる。

(ii) 吊線補正

振り振動子法には試料だけで振子を形成する単純振子と、試料が振子の一部を形成する複合振子とがある。逆吊り法、Collette 法は後者に属する。複合振子では、吊線部分を含めた複合振子の測定から試料だけの振子の特性を導き出さねばならず、Collette 法については Collette 自身の解析⁽¹⁶⁾、また逆吊り法については Swartz⁽¹⁷⁾ による吊線補正の式がある。岩崎らは最近 Collette 法の適用限界を論じて⁽¹⁸⁾、逆吊り、Collette を含め複合振子法における新しい補正式を提案し⁽¹⁹⁾、さらに、Collette 法の改良型として 3 コンポーネント振子⁽²⁰⁾を提唱している。Collette 法の解析について、小田部ら⁽²¹⁾も疑義を述べているが、これらに対して小岩⁽²²⁾は、Swartz, Collette の解析に誤りがあるのではなくて、単に吊線、試料の内部摩擦の測定振動数依存性に関する前提条件の相違に過ぎないと批判している。

岩崎、小田部らの批判にも拘わらず、Collette 法は一概に斥けられるべきものともいえまい。たとえば後に述べるように、薄鋼板のスネーク・ピークの測定で Dahl ら⁽³¹⁾⁽³²⁾は綺麗なデータを報告している。ただ、筆者の私見を述べさせて頂くならば、測定は許される限り原理的に簡単な構造をとるべきであり、補正項を極力小さく

抑えるよう努力した上で測定および解析の自動化に結びつけて行く方向が望ましい。この意味でも前項で述べた Woigard らの方法は注目されてよいと思う。

3. スネーク・ピーク

(1) 連続焼鈍

内部摩擦の鉄鋼材料への応用としてはスネーク・ピークの利用が第1にあげられる。加工用冷延薄鋼板の材質を左右する最も重要な因子の1つとして、固溶 C, N 量とその動的挙動があり、内部摩擦は、加工性、時効性とくに歪時効の研究に多大な貢献をしてきた⁽²³⁾。1960年代の加工用冷延鋼板の著しい進歩は、内部摩擦の応用なくしては語れないといっても過言ではない。1970年代に入っの最大のトピックスは連続焼鈍による冷延鋼板製造法の確立であろう。

プレス加工用冷延鋼板は従来バッチ(箱)焼鈍法で製造されてきたが、工程日数が長く、連続焼鈍による製造法の開発が望まれていた。しかし、連続焼鈍では急速冷却となるために固溶 C が析出する余裕がなく、成形性が損われるので、亜鉛めっき板、ブリキ板、アルミめっき板を除いては困難とされていた⁽²⁴⁾。

この点を解決して、加工用冷延鋼板の連続焼鈍による製造に成功したのが新日本製鉄(株)⁽²⁵⁾と日本鋼管(株)⁽²⁶⁾とである。両者いずれも固溶 C の析出を図って焼鈍後に過時効処理を施すが、この過時効処理時間の短縮は製造工程に関して1つの重大なポイントとなり、過時効処理中の固溶 C (あるいは N) の挙動を内部摩擦で追跡することが非常に重要な意味を持つ。

固溶 C, N の析出過程で、析出量 $W(t)$ は拡散律速の場合

$$W(t) = 1 - \exp\{- (t/\tau)^n\} \quad (17)$$

で表わされる^{(27)~(29)}。τ は拡散速度に依存する時定数である。指数 n は焼入れ時効の場合球状析出物を想定すれば 3/2 に等しいことが理論上導かれる。一方歪時効では転位の作る応力場の中での拡散で律速されるとして、 $n=2/3$ となる⁽³⁰⁾。スネーク・ピーク高さ $Q_m^{-1}(t)$ の変化から析出量 $W(t)$ は

$$W(t) = \frac{Q_m^{-1}(0) - Q_m^{-1}(t)}{Q_m^{-1}(0) - Q_m^{-1}(\infty)} \quad (18)$$

と評価されるから、これを式(17)に当てはめることによって、析出の定数 τ, n を定めることができる。図7は低炭リムド鋼板について 623 K (350°C) で析出(過時効)処理を施したときの一例である。表1に析出の定数 τ, n を示す。指数 n が焼入れ時効で期待される 3/2 よりはるかに小さいことは、転位への析出がこの場合にも重要な役割を果たしていることを示唆する。

Dahl ら⁽³¹⁾⁽³²⁾は同様の解析法で、焼入れ時効、歪時効

図7 低炭リムド鋼板の 623 K 析出処理中における内部摩擦の変化。

表1 低炭リムド鋼板 623 K 析出処理中の析出の定数。

	τ (s)	n
623 K まで空冷	84	0.83
室温まで空冷後再加熱	34	0.90
水冷後再加熱	25	0.87

における C, N の析出に及ぼす Mn 量の効果を詳細に調べている。測定は Collette 法である。彼らによれば、 $Q_m^{-1}(t)$ の変化は良く式(17)に従う。C の析出挙動は Mn 量によって影響されないが、N の析出は Mn の存在によって著しく遅滞せしめられる。C と N の共存は相互に析出を促進し合う。

従来一般的に時効の主因は N という観念があったが、連続焼鈍法の開発、発展によって、C の挙動、C, N の相互作用、Mn の影響、転位の役割、と問題が広がって行き、内部摩擦の応用は測定方法の進歩と相まってますます重要視される傾向にあるといえよう。

再結晶集合組織の発達に固溶 C 量によって左右されるという考え⁽²⁶⁾もあり、連続焼鈍における急速昇温中の固溶 C 量の変化の内部摩擦による追跡は興味深い。

(2) 厚板鋼材のスネーク・ピーク

厚板(plate steel)は薄鋼板のような単純なフェライト単相ではないので、ピークの解析は複雑である。しかし、基本的には Fe-Mn-C-N 系と考えて解析できよう。図8に一例として 0.1C-1.3Mn-0.01N 鋼のスネーク・ピークを示す。通常の N ピークはほとんど認められず、283 K (10°C) にピークがシフトしている。このピークを差引くことによって、313 K (40°C) 辺に極めて小さい ($Q_m^{-1} \approx 0.9 \times 10^{-4}$) C ピークが観測される。前章に述べた解析方法で、この程度までのピークが容易に分離観測可能となった。

図8 0.1C-1.3Mn-0.01N 鋼のスネーク・ピーク。

α 鉄中に固溶する N に基づくスネーク・ピークは、Mn の存在で新しいサブ・ピークを生ずることが知られており^{(33)~(35)}、それらの消長から、N 原子と Mn イオンとの結合エネルギーが評価される⁽³⁶⁾。Stephenson⁽³⁷⁾ は 283 K ピークの活性化エネルギーについて詳細に調べており、このピークの振舞いは可成り解明されてきた。厚板鋼材の成分では Mn 量はだむね 1% 以上であり、主たる N ピークは 283 K ピークである。これを利用することによって、厚板鋼材中の固溶 N の挙動を知ることができる。森ら⁽³⁸⁾および筆者ら⁽³⁹⁾による 283 K ピーク高さと脆性破面遷移温度 (FATT) との関係を表わす測定結果が図 9 である。

図9 0.1C-1.2Mn-N 鋼の脆性破面遷移温度とスネーク・ピーク高さ。

厚板でのスネーク・ピークは組織の複雑さのために、薄鋼板のように明かな材質との結びつきが得られず、長く顧みられぬままにされてきた。しかし、複合ピークの特徴が近年次第に解明されつつあること、測定方法に著しい進歩——精度的にも研究労力的にも——を遂げてきたこと、などから再び見直される気運にある。

4. 高温内部摩擦の回復・再結晶への応用

鋼材の回復・再結晶においては、転位の移動・再配列

から、再結晶核発生、成長、粒界移動と一連の現象が相次いで生じ、これに伴って内部摩擦にも変化が生ずる。それらは、高温バック・グラウンド、加工ピーク、粒界ピークなどと呼ばれてその特性は個々に調べられ、多くの知見の蓄積がある。これを鋼材研究への応用という立場から見ると、スネーク・ピークのように単一の緩和過程ではないための曖昧さが残って扱い難いのは事実である。しかし、内部摩擦は非破壊的な観測手段であるので、再結晶、粒成長のような経時的に進行する現象を *in situ* 的にとらえる——間接情報ではあるが——手法として活用できれば、これは非常に魅力的な研究手段となり得るものである。Kê⁽⁴⁰⁾は古く α -Fe の粒界緩和に基づく内部摩擦ピークを観測し、再結晶の進行と結びつけて論じたが、定量的な指標とすることはできなかった。

Lucci ら⁽⁴¹⁾は純鉄の再結晶挙動に及ぼす置換型合金元素の効果を低周波内部摩擦と結びつけて研究した。彼らは高温バック・グラウンドの立ち上がりに着目し、それが加工度、予備焼鈍条件、合金添加量によって敏感に影響されることを利用した。すなわち、ある任意に選ばれた値まで高温バック・グラウンド値が上昇する温度 T_δ を定義し、 T_δ が転位密度に比例することから、 T_δ が回復と一意に対応すると仮定した。図 10 はその考え方を図式的に示したものである。曲線 ①、② はそれぞれ「加工状態」、「再結晶完了状態」の試料を昇温しつつ測定した低周波内部摩擦を示し、 $T_{\delta_0}^A$ 、 $T_{\delta_0}^B$ は対数減衰率 δ が規準値 δ_0 ($\delta_0 = 2 \times 10^{-3}$ に選ばれた) となる温度を表わす。曲線 ③ は回復がある段階まで進んだ試料についての測定であり、これに対応する $T_{\delta_0}^x$ から、回復の指標 x を

$$x = (T_{\delta_0}^x - T_{\delta_0}^A) / (T_{\delta_0}^B - T_{\delta_0}^A) \quad (19)$$

で定義する。この x を使えば、温度 T までの階段焼鈍を繰り返すことによって x 対 T の回復曲線を得ることができる。Lucci らは高純度鉄の回復挙動に及ぼす合金元素 (Ti, V, Co, Ni) の効果をこの方法で研究し、内部摩

図10 内部摩擦の回復を示す模式図 (Lucci ら⁽⁴¹⁾)。

擦回復曲線が硬度変化、再結晶分率のそれと類似の挙動を示すと結論している。しかし、この方法が回復挙動の研究手段として、硬度変化または再結晶分率と代替し得るというものではなく、回復挙動の異なる側面を反映していると見なすべきであろう。

Lucci らが再結晶完了以前の段階に焦点を当てたのに対し、最近岩崎ら⁽⁴²⁾は高温バック・グラウンドの粒径依存性を利用して、方向性珪素鋼の2次再結晶粒成長過程を低周波内部摩擦に対応させた。また、Sbの粒界偏析によって同じく珪素鋼の粒界内部摩擦ピークが変化することを観測している⁽⁴³⁾。

これらは鉄鋼材料の研究手段として、スネーク・ピーク程に確立されたとはいえない難いが、新分野を切り拓くものとして今後の展開が期待される。

5. 制振材料への応用

内部摩擦の応用分野として近年急速に脚光を浴びている分野に高ダンピング材料の問題がある⁽⁴⁴⁾。機械性能向上の観点から、金属材料にも特定の用途に対して高ダンピング性能が要求されるということは以前からあったが、近年この問題がとくに取上げられるようになったのは、騒音・振動に対する公害問題など社会情勢の変化を背景にしている。

金属といえば「響きの良い」ことが先ず思い浮かべられる。構造材料、機械部品材料などとして有利な強度、剛性、加工性等とダンピング性能とを両立させることは一般に難しい。にも拘わらず、構造設計変更、制振材料の付加などの方法によらず、構造材料自体に、しかも本来の特性を損うことなくダンピング性能の向上を求める要望が強い。

高ダンピング性を有する金属として、Cu-Mn、Mg合金など有名であるが、鉄鋼材料に限ると、そのダンピング性能の起因は2種類に大別される。すなわち、片状黒鉛铸铁に代表される複合型と、軟鋼、13Cr鋼に代表される強磁性型とである。铸铁は低コストで防振性能が高く、工作機械のベッドなどに使用して有効なことはつとに知られているが、強度・靱性の点、また薄物の製造が難しいことなどから、その使用範囲は著しい制限を受ける。一方、強磁性型のものはFe-Cr系の発展系列、Fe-Co系、Fe-Mo系等多くの改良型が開発されているが⁽⁴⁵⁾、強磁性型の宿命として加工硬化によるダンピング性能の低下がある。このことは成形加工が容易という鋼板の使用上の大きな利点を損うものであり、ダンピング性の回復には特殊な熱処理を要する。純鉄系の場合、軟鋼も脱炭・粒成長によって著しくダンピング性を高め得る⁽⁴⁶⁾が、矢張り成型加工によるダンピング性の低下は使用上重大な制限となる。

従来通りの使用方法で、材料のダンピング性のみを高めて振動・騒音対策としようというのは事実上可成り困難な要求であって、材料特性、構造設計両サイドからの合理的解決を図るべきであろう。この意味で、高ダンピング鋼材——金属といっても良いが——の使用方法はまだ探索の段階であって、適正な使用方法の確立が望まれる。鋼材自体のダンピング性ではないが、サンドイッチ型制振鋼板⁽⁴⁷⁾の活用も使途に応じては十分着目されて良いであろう。

6. 強力超音波の利用

超音波は二次大戦中のソナーの開発を契機に急速に発展した技術分野であるが、鉄鋼材料との関わりとしては超音波探傷が最も重要である。これは超音波の直進性を利用して鋼材中の欠陥、とくに介在物の検出に応用するものであり、非破壊検査法として広く実施されている。しかしこれは超音波振動の「情報的機能」の応用である。これに対して、超音波振動エネルギーを材料に吸収させて材質を有利に改変しようというのが超音波の「エネルギー的」応用であって、正しく超音波振動を内部摩擦によって利用するものといえよう。

このような超音波のエネルギー的側面の工業的応用は、大パワーの超音波発生が可能になって始めて実現した応用分野であって、洗浄、接合、機械加工、化学反応促進、抽出、均質化、脱泡など多くの実例を見ることが出来る。金属の材質に関する分野では化学物質に較べて、実用化の普及度は遅れている。しかし、金属の凝固時に強力超音波振動を照射することによって凝固組織の微細化、異種金属の相互拡散、偏析防止、脱ガスなどの材質改善効果があることは古くから多くの研究で知られており、とくに近年に至って、Cowardら⁽⁴⁸⁾はエレクトロスラッグ再溶解によるステンレス鋼の溶製において、モールドに超音波振動を付加することによって、柱状晶発達防止に顕著な効果が生ずることを報告している。またソビエトでは多数の研究報告が超音波エネルギーによる金属材料改善に関してなされている⁽⁴⁹⁾。

鉄鋼材料は他の一般工業用金属材料に比して融点が高いということから強力超音波の利用は遅れているが、しかし確実に幾つかの有用な効果のあることが報告されている。たとえば、Fairbanksら⁽⁵⁰⁾は低炭素鋼の γ - α 変態時に400 kHzおよび1000 kHzの超音波振動を照射してフェライト粒に顕著な微細化が起こることを見出し、また浜谷⁽⁵¹⁾によれば、炭化物の球状化に超音波振動付加焼鈍が有効であるとされる。これらは、界面における超音波振動の吸収が、相変態核生成に寄与するものであろうと推察されるが確証はない。

筆者らは鋼板の冷延焼鈍時に超音波を照射する一連の

研究^{(52)~(54)}を行なった。写真1は3%Si鋼の冷延再結晶焼鈍時に20 kHzの超音波振動を付加した場合に生ずる顕著な粒成長促進効果を示す。同様な効果は無酸素銅について Hayes ら⁽⁵⁵⁾が認めており、彼らの見解によれば、粒界に偏析した原子が超音波振動エネルギーを吸収して蒸発し、粒界易動度が高められたためとされる。軟鋼板についても同様な粒成長促進効果があり、このとき深絞り性の指標であるランクフォードの r 値に顕著な向上が認められた。

一方、超音波振動によって拡散が促進されるという報告⁽⁵⁶⁾もあるが、図11は冷延鋼板の連続焼鈍サイクルにおいて、過時効処理中に超音波を付加した実験結果である。過時効時間の延長と共に伸びが増大しているが、超

音波付加によって過時効率は約2倍に向上せしめられる。超音波振動が固溶Cの析出促進、従って延性向上に効果があることを示している。

以上のような効果はいずれも、超音波振動と粒界、粒界偏析原子、固溶原子、転位などの相互作用に基づくものと推察されるが、その詳細な機構はまだ明らかにされていない。鉄鋼製造工程にこれらの効果が実際に活かされるには、十分な強度の超音波振動を安定して発生、伝達させる技術とその経済性などが要求される。そのためには、超音波域での内部摩擦の機構——従って振動の本質的な役割が明らかにされ、それによって最も適切な振動付加条件が明確にされることが必要である。

7. お わ り に

電算機を自由に駆使した測定手法の著しい進歩と、新しい適用分野の意欲的な開拓とによって、内部摩擦の鉄鋼材料への応用は新局面を迎えようとしている。また、材料の物性的側面の研究手段としてだけでなく、ダンピング性のような実用面からの要請、あるいは強力超音波のように測定手段としてではなく、内部摩擦自身が材質改善の主役を果たす応用面など、全く新しい分野にも注目される。

フェライト系およびオーステナイト系ステンレス鋼、水素、とくに溶接に関する諸問題等、取り上げ得なかった幾つかの重要な分野がある。精粗に統一を得なかった点はお許し頂き度い。

文 献

- (1) P.H.Robinson: J. Austral. Inst. Met., **6**(1961), 217.
- (2) 青木宏一, 関野昌蔵, 藤島敏行: 鉄と鋼, **48**(1962), 72.
- (3) 市山 正: 富士製鉄技報, **11**(1963), 353; **12**(1964), 14, 270, 397; **13**(1965), 27.
- (4) P.Kofstad, R.A.Butera and R.S.Craig: Rev. Sci. Instrum., **33**(1962), 850.
- (5) A.Salvi, D.Dautreppe and E.Friess: Rev. Sci. Instrum., **36**(1965), 198.
- (6) R.A.Butera and R.S.Craig: Rev. Sci. Instrum., **37**(1966), 401.
- (7) M.Gsänger, W.Veith, J.Völkl and H.Wenzl: Z. Angew. Phys., **21**(1966), 449.
- (8) U.S. Patent 3501952.
- (9) D.L.Smith, A.L.Winiecki and R.H.Lee: J. Phys. E: Sci. Instrum., **3**(1970), 715.
- (10) 吉田育之, 須貝哲也, 茂木正好, 早川 浩, 南田勝宏: 日本金属学会講演概要, (1978・4月), 90.
- (11) 岩崎邦彦: 日本金属学会会報, **15**(1976), 43.
- (12) A.Schnell, G.Sokolowski and H.Brumme: J. Phys. E: Sci. Instrum., **9**(1976), 833.
- (13) I.Yoshida, T.Sugai, S.Tani, M.Motegi, K.Minamida and H.Hayakawa: to be published.
- (14) J.Woigard, Y.Sarrazin and H.Chaumet: Rev. Sci. Instrum., **48**(1977), 1322.

写真1 3%Si鋼における超音波振動の粒成長促進効果((a)無付加, (b)付加)。1173 K, 60 s.

図11 超音波振動の過時効促進効果(573 K, 白丸は超音波付加, 黒丸は無付加)

- (15) S.Otobe : Metals Technology, **3**(1976), 542.
- (16) G.Collette, C.Roeder and C.Crussard : Mem.Sci. Rev. Métall, **58**(1961), 61.
- (17) J.C.Swartz : Rev. Sci. Instrum., **32**(1961), 335.
- (18) Y.Iwasaki and K.Fujimoto : J.Phys.E : Sci. Instrum., **12**(1979), 21.
- (19) Y.Iwasaki and K.Fujimoto : J.Phys.E : Sci. Instrum., **10**(1977), 1050.
- (20) Y.Iwasaki and K.Fujimoto : J.Phys. E : Sci. Instrum., **12**(1979), 593.
- (21) S.Otobe and T.Ohmura : Rev. Sci. Instrum., **48**(1977), 42.
- (22) M.Koiwa : J.Phys.E:Sci. Instrum., **13**(1980), 27.
- (23) 周藤悦郎 : ストレッチャ・ストレイン, 金属学新書, 日本金属学会, (1970).
- (24) D.C.Blickwede : Metal Progress, **95**(1969), 5.
- (25) 戸田健三, 榎藤 永, 武智 弘, 阿部光延, 上原規正, 小宮邦彦 : 鉄と鋼, **61**(1975), 2363.
- (26) 久保寺治郎, 中岡一秀, 荒木健治, 渡辺 馨, 岩瀬耕二 : 鉄と鋼, **62**(1976), 846.
- (27) C.A.Wert and C.Zener:Phys.Rev., **76**(1949), 1169.
- (28) C.A.Wert and C.Zener : J.Appl. Phys., **21**(1950), 5.
- (29) C.A.Wert : J.Appl.Phys., **20**(1949), 943.
- (30) S.Harper : Phys.Rev., **83**(1951), 709.
- (31) W.Dahl und E.Lenz : Arch. Eisenhüttenw., **46**(1975), 119.
- (32) W.Dahl und K.Heisler : Arch. Eisenhüttenw., **48**(1977), 579.
- (33) L.Dijkstra and R.Sladek : Trans. AIME, **197**(1953), 69.
- (34) J.F.Enrietto : Trans. Met. Soc. AIME, **224**(1962), 1119.
- (35) T.Gladman and F.B.Pickering : J.Iron Steel Inst., **203**(1965), 1212.
- (36) C.Wert : *Physical Acoustics Vol.3*, Ed. by W.P.Mason, Acad. Press., (1966), 43.
- (37) E.T.Stephenson : Met.Trans., **2**(1971), 1613.
- (38) 森 直道, 本間弘之, 若林正邦, 大北 茂, 宮坂明博 : 溶接学会第 77 回溶接冶金委資料 No.WM-741-79.
- (39) 吉田育之, 森 直道 : 未発表.
- (40) T.S.Kê : Trans.AIME, **176**(1948), 448.
- (41) A.Lucci and C.Antonione : Metal Sci. J., **5**(1971), 100.
- (42) 岩崎義光, 藤元克己 : 日本金属学会講演概要, (1979・4 月), 92, 93.
- (43) 岩崎義光, 藤元克己 : 日本金属学会講演概要, (1980・4 月), 33.
- (44) 杉本孝一 : 日本金属学会会報, **14**(1975), 41.
- (45) 藤田 隆 : 応用機械工学, **19**(1978), 72.
- (46) M.Takahashi, A.Okamoto and H.Iida : Trans. ISIJ, **20**(1980), 279.
- (47) 佐々木雄貞 : 日本金属学会会報, **16**(1977), 212.
- (48) M.D.Coward and C.M.Sellars : J.Iron Steel Inst., **211**(1973), 586.
- (49) G.I.Eskin : *Ultrazvuk Shagnul v Metallurgiyu*, Metallurgiya, Moskow, USSR, (1970).
- (50) H.V.Fairbanks and F.J.Dewez, J.R. : Iron Age, **176**(1955), No.23, 139.
- (51) 浜谷 徹 : 熱処理, **13**(1973), 28.
- (52) 吉田育之, 大曾根英男, 速水哲博 : 鉄と鋼, **62**(1976), S590.
- (53) 吉田育之, 大曾根英男 : 鉄と鋼, **64**(1978), S 822.
- (54) 松村 理, 大曾根英男, 吉田育之 : 鉄と鋼, **65**(1979), S 307.
- (55) G.A.Hayes and J.C.Shyne : Metal Science Jour., **5**(1971), 19.
- (56) A.B.Kulemin and A.M.Mitskevich : Proc. 7th Int. Cong. on Acoustics, (1971), 245.

<新刊案内>

物理学論文選集 211 塑性 IV

日本物理学会(竹内 伸, 蔵元英一 責任編集)

日本物理学会から随時発刊されている論文選集の一つとして「塑性Ⅲ」が出たのは1964年である。本論文選集はその後今日までの16年間に蓄積した膨大な研究の中から、特に originality の高い23編の論文を選んで収録したものである。内容は、転位の高速運動に対する摩擦機構という基本的問題から、塑性に及ぼす転位の動的効果、固溶体硬化などに関する理論および実験、さらに、面心立方金属、体心立方金属をはじめとして、半導体結晶、イオン結晶などさまざまな結

晶に関する基本的実験事実を含んでいる。また、本選集の特徴は、巻末に、解説と共に、822編におよぶ文献が各項目別に分類して集録されていることである。これらは、1960年代から1980年頭初までに発表された論文の中から選ばれたもので、結晶塑性およびその周辺の分野の研究者にとって利用価値の高いものとなるだろう。

(S.T.)

[B5判, 253頁, 1980年, 2,000円(送料120円), 日本物理学会]