



## AE 技術によるマルテンサイト変態の研究

肥 後 矢 吉\*・布 村 成 具\*

### A Review of Martensite Transformation Research Using Acoustic Emission Technique

Yakichi HIGO and Shigetomo NUNOMURA

#### 1. はじめに

鉄鋼材料を焼入れた時、ガラスの割れるような“ピソッ”という音がすることはよく経験されることである。これは鋼がマルテンサイト変態する時の音である。この音はアコースティックエミッション (以下 AE と略す) と呼ばれ、可聴域音の場合もあり、超音波域の音である場合もある。AE は材料中である現象が発生し、それに伴って放散された弾性波である。したがって、その中には現象と密接に関連した情報が含まれていると考えられ、系統的研究がなされてきた。AE の基礎研究は検出された信号から、いかにして音源現象の性質、機構を解明するかという点に努力がはらわれてきた。それは AE が現象のその場観察や動的観察の優れた手段ではあるが、材料中を弾性波が伝播し、変換子により電気信号に変換される間に、共振、減衰などにより、AE の原波形とは大幅に異なつたものとなるからである。Fig. 1 にその一例を示す。一定の条件で鉛筆の芯を 20 mm 厚のアルミニウム板に押しつけ点圧縮をする。鉛筆の芯が折れた時、その力は解放され、もとの状態にもどる。その力の解放量と時間の関係を示したものが Fig. 1(a) である。この力の解放が弾性波として 8 mm φ、400 mm 長さの 304 鋼導波棒を伝わり、PZT 変換子により電気信号として観測されたものが Fig. 1(b) である。Fig. 1(b) では、導波棒や変換子の共振と波の反射効果によるものが主に観測され、原波形はその中に隠れてしまう。我々が AE を観測する時に得られる信号は常にこの Fig. 1(b) と同様のものである。したがって音源からの情報を得るには複雑な校正とともに、精密な測定装置、情報処理手段が必要となる。

AE に関する基礎的な解説は本稿の目的ではないので ASTM のシンポジウム論文集<sup>3)~4)</sup>、小野による本誌技術資料<sup>5)</sup>、その他の解説<sup>6)~8)</sup>や出版物<sup>9)</sup>を参照していただきたい。

AE は技術的に 3 段階の発展をしてきたと言える。第

1 段階は、1930 年代から 1950 年代までである。この時代には、可聴域の AE ですら正確に記録解析することはむずかしかつた。したがって、音と単に記録し、その範囲で現象を定性的に説明するに留まつた。第 2 段階は、1960 年代から 70 年代半ばまでの時期である。この時代に電子工学は急速な進歩をとげ、それによつて AE を定量化して扱う努力がなされてきた。この時期は AE が発生した数 (事象数) や AE の振幅分布と現象との関係を求める仕事が多くなされた。しかし、事象数の計測以外は、信号はほとんどアナログ的に処理され、数値化されたデータの計算による処理はあまり行われていなかった。1970 年代後半から電子計算機とその周辺技術が急

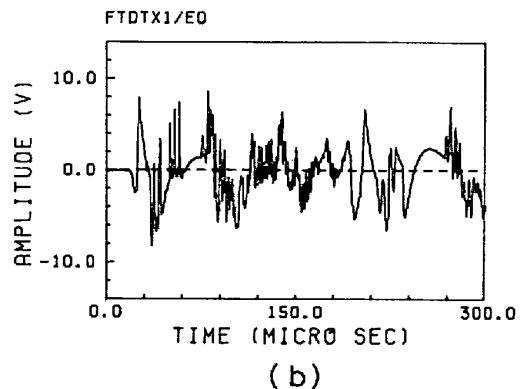
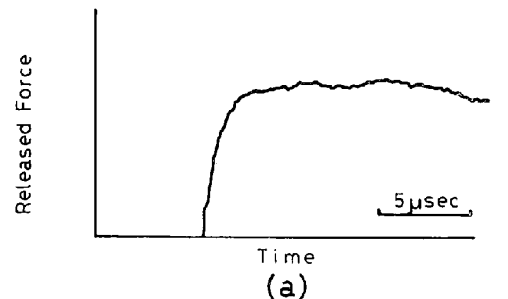


Fig. 1. Original source of AE produced by breaking pencil lead<sup>1)</sup>(a) and observed AE signal<sup>2)</sup>(b).

昭和 56 年 11 月 18 日受付 (Received Nov. 18, 1981) (依頼解説)

\* 東京工業大学精密工学研究所 工博 (Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho Midori-ku Yokohama 227)

速に発展普及し、高性能の小型電子計算機が AE 測定装置と手軽に組み合わされるようになった。その結果、数値化された多量の情報を短時間に処理解析することが可能になった。これにより、AE の事象数や振幅分布のみならず、AE の発生位置を知り、統計的な処理を行うことも可能となつた。特に注目すべきことは、AD 変換器が高速（サンプリング速度 10~50 ns）になり、しかも、弾性波の伝播特性の校正法の進歩とあいまつて AE の原波形や原周波数スペクトルを求めることが可能になりつつあることである<sup>10)~13)</sup>。

マルテンサイト変態に伴う AE に関する研究は、AE の分野ではあまり多くはない。それは応用、実用面での進歩<sup>†</sup>とは異なり、基礎研究面での AE 源の同定法が十分に確立しているとは言いがたいからであろう。

マルテンサイト変態に伴う AE の全般的な解説は佐野によるもの<sup>17)</sup>と肥後らによるもの<sup>18)19)</sup>を参照していただきたい。本稿では先に述べた歴史的な AE 技術の各段階でなされた主な仕事と現在何が行われているかをかいつまんで述べていく。

## 2. AE のマルテンサイト変態への係わり (第 1 段階)

マルテンサイト変態は結晶中の幾つかの原子面がせん断的に連携してすべることにより、結晶構造が変わる無拡散変態である<sup>20)</sup>。現在でこそこのことは周知の事実である。しかし、マルテンサイト変態の研究が始まつた項はこの点も明らかではなかつた。そのため変態速度を測定することは、マルテンサイト変態が拡散変態であるか否かを明らかにする上で重要な課題であつた。

1936 年に FÖRSTER と SCHEIL<sup>21)</sup> は変態に伴う音を調べることにより変態速度を測定しようと試みた。Fig. 2 にその最初の装置の概略を示す。モリブデンリボンにつるされた試料は周囲より徐冷され、変態に伴つて発生した音はリボンを伝わり、他端につけた電磁ピックアップで電気信号に変えられる。その信号は電磁オシログラフを用いて記録された。その結果マルテンサイト変態は 2 ms 以内に生成すると報告している。しかし、弾性波 (AE) のモリブデンリボン中の伝播特性のみならず、記録装置の応答性から考えても変態速度を測定することは困難であるのは、現在の知識からすればすぐにわかることである。しかし、この実験は AE により物理現象を究明しようとした、たぶん最初のものであろう。以後彼らは上述の理由からか、AE と電気抵抗変化の測定を併用し<sup>22)23)</sup>、Fe-Ni 合金には変態速度が約 80  $\mu$ s (1 回の変態事象にかかる時間) のものと、それより遅い 2 種類のマルテンサイト変態があることを見いだした。彼らは

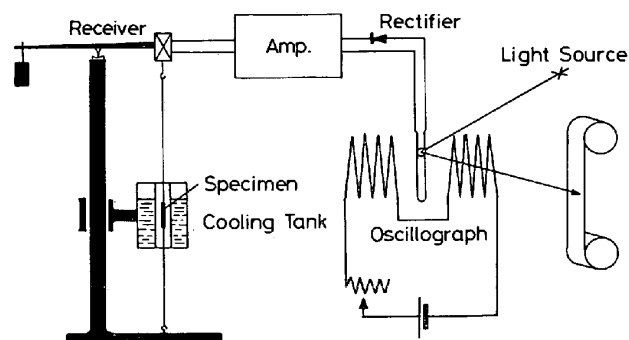


Fig. 2. A schematic diagram of the first experiment equipment used by Förster and Scheil (retraced from the original figure<sup>21)</sup>).

それらを組織からそれぞれウムクラブとシーブング変態と呼んだ。以後 AE による変態速度に関する研究は技術的に第 3 段階に入るまで試みられていない。

1947 年に BARRETT と TRAUTZ は人間の耳では音が聞えない、リチウム<sup>24)</sup>やリチウム-マグネシウム合金<sup>24)</sup><sup>25)</sup>、について導波棒 (wave guide) を用いて AE を検出することを試みた。彼らは試料に導波棒を埋込み、Phonograph pickup と直結することにより変態時に AE が発生することを確認した。また逆変態や応力誘起変態の時にも AE が検出されることを見出し、変態温度の決定には AE が有効であることを示した。

この第一段階で AE を用いて明らかにされたもう一つの現象はマルテンサイトへのバースト変態である。1951 年に MACHLIN と COHEN は 70%Fe-30%Ni 合金を冷却していく時発生する音とマルテンサイト変態との関係を調べた。その結果、この材料が比較的高温でマルテンサイト変態する音と、低温で発生する音とは異なることを示した。特に大きな音のする、すなわちバースト変態は低温域でおこることを見いだした<sup>26)</sup>。これはその後の研究から、変態は常に核から発生する。そしてこの変態に伴うせん断応力が周囲の核の変態を助けるため、変態は連鎖的におこる。その結果低温では変態はバースト的に進行するのであると結論した<sup>27)</sup>。

## 3. AE による Ms 点の測定 (第 2 段階)

はじめに述べたように、1960 年代の後半になるとエレクトロニクス技術の進歩により AE の測定技術も急速に進歩した。それに伴つて AE の測定周波数領域は可聴域から超音波域へと広がつた。これは AE のマルテンサイト変態への応用にも大きな変化をもたらした。まず超音波域の振動を検出することにより事象数の計数がより精密になり、1 s 間に 1000 事象以上の計数が可能となつた。そのため AE 事象数は定量化できる測定値となり、マルテンサイト変態の研究領域では AE 事象数と変態量との対応を調べるという試み、そして Ms 点との関係を明らかにしようという努力がなされた。

† AE の実用に関してはすでに ASTM の規格化が点溶接<sup>14)</sup>や連続溶接<sup>15)</sup>の監視に関して行われており、それに伴つて AE 測定法<sup>16)</sup>の規格化もされている。

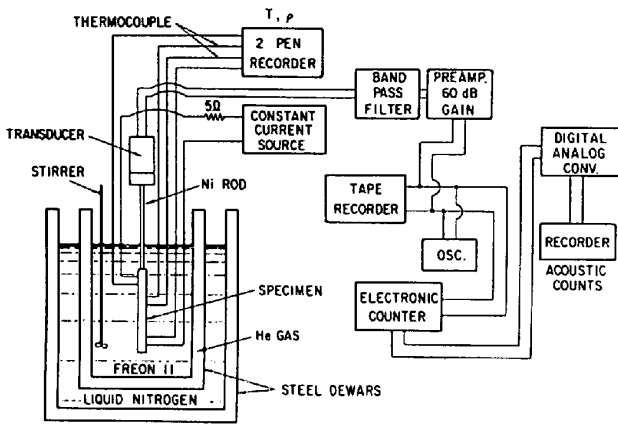


Fig. 3. Block diagram of AE equipment used by Speich and Fisher<sup>28)</sup>.

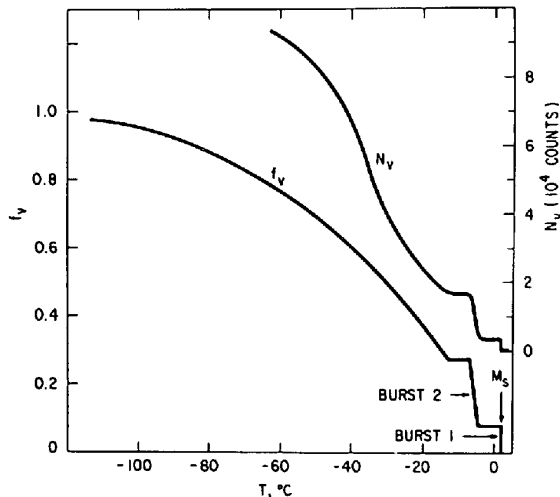


Fig. 4. Total volume fraction of martensite ( $f_v$ ) and total counts per unit volume ( $N_v$ ) generated during transformation<sup>28)</sup>.

1972年, SPEICHとFISHERはFe-28%Ni-0.11%C合金のマルテンサイト変態をAEと電気抵抗測定を併用して調べた<sup>28)</sup>. Fig. 3にその装置の概略図を示す. 検出されたAE信号は, バンドパスフィルターを通して増幅されAE事象計数器に送られるとともに, その後の解析に供するためAEをテープレコーダに記録している. この構造は基本的に現在とあまり変わらない. 彼らは変態後の組織観察から電気抵抗測定と変態量とを対応させた. Fig. 4にこの電気抵抗測定により求めたマルテンサイトの体積率とAE総事象数の温度との関係を示す. この材料の場合, 2回のバースト変態が観測された. 最初のバースト変態(図中Burst 1)をMs点としている. Fig. 4の結果と組織観察からAEの1事象は平均して15個のプレートマルテンサイトの生成に対応していた. しかしその個々のプレートができる時のAEは分離できなかったと報告している. また温度の低下(変態の進行)につれて1回のAE事象に対応して変態するマ

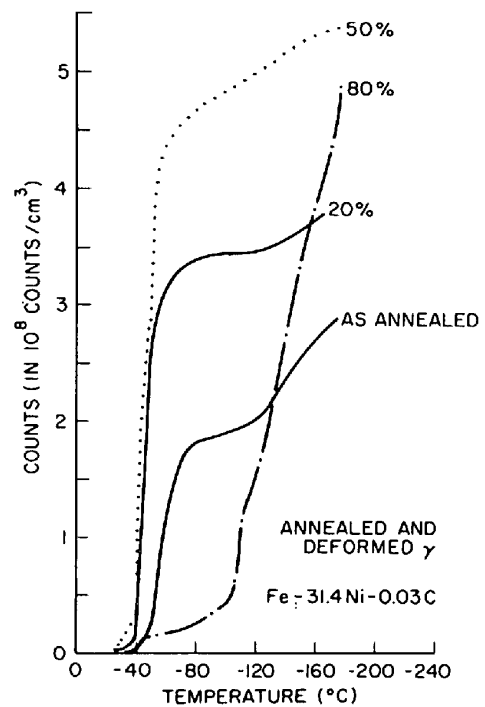


Fig. 5. AE counts per unit volume generated during martensite transformation of annealed and deformed alloy<sup>29)</sup>.

ルテンサイトの量は減少した. これは分割効果によりマルテンサイトのプレートの大きさが相対的に小さくなったことを示しているであろう.

1973年に小野<sup>29)</sup>はFe-31.4%Ni-0.03%CとFe-22%Ni-0.44%Cにおける加工熱処理の変態に及ぼす効果をAEを用いて調べた. また炭素含有量の変態に及ぼす効果についても調べた. Fig. 5は加工量と単位体積あたりのAE事象数と温度の関係を, 予加工量を変えた試料について示したものである. Ms点はAE事象数の急増線を零事象時の温度軸に外挿することにより, 電気抵抗測定などで求めたものと5°Cの範囲で一致した. しかし, AEが最初に検出される温度はこれより50~80°Cも高い温度であった. これは合金成分の局所的な偏析などによるためと説明している. 高島らはこの違いについて304オーステナイトステンレス鋼を用いて調べた結果, 冷却初期に検出されるAEは比較的拘束の少ない試料の角や表面からのマルテンサイト変態に伴うものであり, AE事象数が急増する時は変態が試料内部からおこっている段階であると報告している<sup>30)</sup>. たぶんこの理由から, AE事象の急増線を外挿する方法により求めたAEによるMs点, 他の方法で求めたものとあまり変わらず, しかも試料ごとの違いも示さない理由であろう. Fig. 5で, 予加工が加えられるとMs点は高くなるが加工量が増加し, 80%になると減少する. これはよく知られている現象であり, この点でもAEは有効であることが示されている. また, 小野らが調べた合金炭素

量の AE に及ぼす効果の中で注目すべき点は、炭素量が減少すると変態に伴って発生する AE の強度が弱くなることである。マルエージ鋼になると AE はほとんど検出されなくなる。炭素量の多いものではマルテンサイトはプレート状をしているが、炭素量が減るとマルテンサイトの形状はラスとなり微細化する。この形状の違いが AE の強度（振幅）に反映されたものであろう。しかし同じラスマルテンサイトでもステンレス鋼の場合は大きな AE が観察される<sup>30)</sup>。

AE による Ms 点の測定は 1975 年に G. MARTIN がやはり電気抵抗の測定を併用し、28%Ni-0.3%Mn-Fe 合金を用いて行つた<sup>31)</sup>。その結果 AE 事象数の急増部分を零事象の温度軸に外挿することにより、電気抵抗測定から求めた Ms 点と 5°C の誤差範囲で一致した。しかし、AE による Ms 点は電気抵抗測定によるものより常に高かつたと報告している。佐野らはこの AE による Ms 点を X 線回折より決定した Ms 点と 18%Ni-3%Mn-Fe 合金を用いて比較した<sup>32)</sup>。佐野らによると温度の低下に伴い初期に検出される AE は散発的であり、若干の AE 群が検出されたあと休止期間がある。その後再び AE 群が検出されるという過程をくり返した後、温度の低下とともに定常的に AE が発生する。この定常的に AE が発生し始める温度は X 線回折によつて決められた Ms 点とほぼ一致する。また佐野らは同様の材料を用いて磁氣的に測定した変態量と AE 事象数との関係を調べ、AE 事象数と変態量に変態開始の初期には良い比例関係を示すが、変態が進むに従い事象数の増加が変態量の増加を大きく上まわることを示した<sup>33)</sup>。これは分割効果のため、AE 事象 1 回に変態する量が減つてくるためと報告されている。この結果は SPEICH ら<sup>28)</sup>や小野ら<sup>29)</sup>の報告とも良く一致する。

#### 4. AE による変態のその場観察（第 3 段階）

第 2 段階では AE を用いて行われたマルテンサイト変態の研究は「マルテンサイト変態自体の研究」というよりはむしろ「既知のマルテンサイト変態の性質と AE パラメータ（事象数、振幅など）とにどのような関係があるかを調べた」と表現した方がよい段階であつた。それは AE の測定技術がまだ物理現象を解明できる程進歩していなかつたため、言い換えれば AE そのものの性質がまだ明らかではなかつたためであらう。そのため AE の定量化が比較的むづかしかつた。第 3 段階になると AE の測定感度も良くなり、情報処理能力も急速に増大した。そのため AE の振幅分布や周波数解析も可能となつてきた。マルテンサイトの研究に関して第 2 段階で行われてきた Ms 点や変態量と AE の関係を求める研究とその応用に関するものとともに、マルテンサイト変態そのものの機構解明に積極的に AE を用いた研究がなされ始めた。その中で幾つかのトピックスを紹介する。1978 年

に Hsu らは Fe-29.58%Ni 合金を用い、5 MHz の超音波の減衰率の変化とマルテンサイト変態との関係を調べた<sup>34)</sup>。その時冷却速度は 200°C/h であつた。その結果 AE が最初に検出された温度、55°C より 3°C 高い 58°C で超音波減衰率にピークが観察された。また冷却が進むにつれて断続的にバースト変態が 42, 40, 32, 12°C の各温度でおこつた。その各温度より少し高い 50, 46, 40, 30°C でやはり超音波の減衰が観察された。この材料は比較的高温では成長速度の遅い変態があり、この場合には AE は非常に小さく検出しにくい、できない可能性はある。したがつて AE で検出されないこのマルテンサイトがバースト変態に先立つて発生したため、超音波の減衰にピークがあらわれたとも考えられる。しかし、5°C でも超音波の減衰にピークが見られ、3°C でバースト変態が観測されている。彼らはこれらの結果から、変態の直前に結晶が局部的に軟化するのではないかと報告している。1980 年に GAROSHEN ら<sup>35)</sup>は Fe-30%Ni 合金の結晶粒界への Al の偏析によりその部分から微細なマルテンサイトが発生するが、これは AE を伴わないと報告している。また彼らは多数の試料を Ms 点より少し高い種々の温度に保持し、マルテンサイト変態との開始時間と保持温度の関係を調べた。AE が検出された時点で走査電顕や光顕で組織を調べ、それがバースト変態によるものであることを確認した。試料は一定温度に冷却保持された後 10~90s 後に AE が検出されバースト変態はその開始までに時間的遅れのある事を明らかにした。この遅れは Ms 点に近づく程小さくなつた。この AE による観察結果と光顕観察から彼らは isothermal 変態が athermal 変態に先行しておこり、isothermal 変態の段階では変態というより、バースト変態への核生成が行われており、その核がある状態になるまで成長した時そこからバースト変態がおこると考えた。これがバースト変態に時間的遅れがある原因であると結論づけている。同様の変態への遅れは A533B 鋼についても観察されている。1979 年 GODDARD ら<sup>36)</sup>はこの鋼をある条件で熱処理した時に 1% 以下の残留オーステナイトが存在することがあり、その性質を調べた。この鋼は一定温度に保持しても 10h 以上も残留オーステナイトがマルテンサイト変態することを AE を用いて明らかにした。彼はこの残留オーステナイトは炭素の拡散に支配された isothermal 変態をすることがあり、この結果のバースト変態であるとしている。これらの一連の結果はマルテンサイト変態の核生成、成長課程と密接な関連があり、isothermal 変態と表現されたものが、バースト変態の核生成を意味している場合がある。ともあれ、Hsu らの観察したバースト変態前の超音波の減衰が、AE を伴わない isothermal なマルテンサイト変態（またはバースト変態核の発生、成長）であるのか、それとも変態核生成機構に直結する結晶格子の局所的軟化による

のかは明らかではない。

### 5. 熱弾性マルテンサイト

前節まで AE 技術の進歩に伴いマルテンサイト変態のどのような情報が得られるようになったか概略を述べてきた。しかし、AE による熱弾性マルテンサイト変態に関する研究についてはふれなかつた。そこで最後につけて加えておきたい。

熱弾性マルテンサイト変態の時も AE は検出される。1972 年に MINTS<sup>37)</sup> は Cu-14%Al-1.6%Ni 合金について AE を用いて調べ、特に逆変態に伴い AE が観測される事を光学顕微鏡による同一視野観察から同定した。またディラトメータを用いて  $\beta_1 \rightarrow \gamma'$  変態点と  $\gamma' \rightarrow \beta_1$  変態点を測定した結果それぞれ  $+70^\circ\text{C}$  と  $+55^\circ\text{C}$  であった。温度を上げ下げし、くり返し変態させると  $\beta_1 \rightarrow \gamma'$  変態の時には AE 事象数はしだいに減少する。これは光顕観察の結果から変態量が減少するためであることを確かめた。その理由として、変態をくり返すに従って局部的に安定化がおこるためであると結論している<sup>38)</sup>。変態をくり返すに従って材料が安定化してくる現象は Au-47.5 at% Cd 合金についても確かめられている。この材料の変態の可逆性を利用して、AE 変換子の校正用標準音源に用いようと試みられたことがある。そのため Round Robin 試験がアメリカで行われた。BROWN と LIPTAI による結果報告 (1972 年)<sup>39)</sup> によると、変態をくり返していくうちに AE 事象数がしだいに減少してくる。このため AE 変換子の校正音源としてこの材料のマルテンサイト変態を用いるのは不相当であると結論している。1979 年 BARAM と ROSEN<sup>40)</sup> は Al-62.7 at% Ni と Ti-49.0 at% Ni 合金の変態について調べた。Al-Ni 合金は加熱または冷却中に AE が検出されるが、加熱または冷却を一時中断すると AE の発生は止まり、再開すると AE は再び発生した。これは変態が温度に制御されている一つの検証であろう。Fig. 6 に Al-Ni 合金の加熱と冷却時の温度と AE 総事象数との関係を示す。Fig. 6 で冷却時に最初に AE が検出された温度は  $+6^\circ\text{C}$  であり、加熱時には  $-10^\circ\text{C}$  であった。しかし電気抵抗変化の測定および音速変化の測定から得た変態開始温度はともに冷却時  $-10^\circ\text{C}$ 、加熱時  $-7^\circ\text{C}$  であり、その間に少し差がある。彼らは AE はより感度の良い測定方法であると述べている。AE 総事象数に関しては、加熱時のそれは冷却時のそれよりかなり多く、約 10 倍にもなる。これは熱弾性マルテンサイト変態に共通した現象のようである。ところが同時に測定した Ti-Ni 合金の場合には冷却時に約 1000 事象の AE が検出されたのに対し、加熱時の逆変態では 4 事象のみまたは以下であった。これは加熱、冷却時の変態機構の違いを示唆していると述べている。この加熱時の逆変態の時 AE 事象数が少ない原因は不明である。しかしその原因を示唆する報告を最

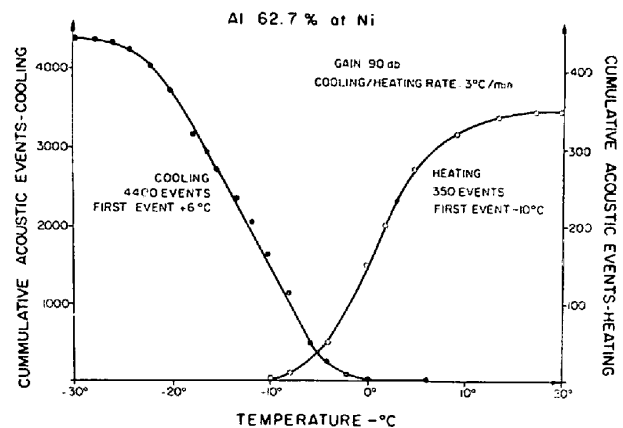


Fig. 6. Cumulative acoustic events on cooling and heating<sup>40)</sup>.

後に紹介する。

検出した AE はその原因となつた現象の情報を含んでいると考えられている。特にその原因となつた現象が非常に速い場合 (変位が時間に関してステップ関数とみなせる場合) には、各事象の AE 振幅の 2 乗 (AE エネルギー) はその現象が放散したエネルギーと比例すると考えられる<sup>41)</sup>。BARAM ら<sup>42)</sup> は 1981 年に Au-47.5 at% Cd 単結晶の熱弾性マルテンサイト変態について、この AE エネルギーを用いて冷却速度の影響を調べた。Ms 点は冷却速度によらず  $51^\circ\text{C}$  であった。また AE 総事象数は冷却速度が  $3.5^\circ\text{C}/\text{min}$  の時 790、 $0.4^\circ\text{C}/\text{min}$  の時は 2590 であった。しかし観測された各 AE 振幅はほとんど同じであった。各々の AE エネルギーの総和はそれぞれ  $198 \text{ mV}^2$  と  $787 \text{ mV}^2$  であった。しかし、1 事象あたりの平均 AE エネルギーはそれぞれ  $0.25 \text{ mV}^2$  と  $0.3 \text{ mV}^2$  となり、ほぼ等しい値となつた。組織観察によると個々のマルテンサイト晶の大きさはばらばらであり、大きいマルテンサイト晶と小さいものでは非常に異なつていた。彼らはこれらのことからマルテンサイト晶が発生するたびに AE が放出されるのではなく、生成したマルテンサイト晶に新たなマルテンサイト晶が衝突し、それまで蓄積された弾性エネルギーが解放される。この時 AE が放出されるとしている。この節までは AE がマルテンサイト晶ができる時に発生すると考えてきた。しかしこの結果はそれとは異なり熱弾性マルテンサイト変態に伴う AE の一つの特徴であろう。

### 6. おわりに

本稿では AE によるマルテンサイト変態の研究を、AE 技術の進歩という歴史的な観点からかいつまんで述べてきた。そのため紹介する報告や解釈が片寄つた点はお許しいただきたい。また技術的な進歩についても詳しい記述は電子工学の分野に渡り著者らの専門ではないので概略にとどめた。AE は微量のマルテンサイト変態を変態

した時点で検出する最も簡単で優れた方法の一つであると考えられる。しかし、AEを用いる時注意を要する点がある。その一つはAEは等温変態のような遅い変態は検出しにくいということである。もう一つは、音は何かからでも発生することである。たとえばマルテンサイト変態をAEによつて測定する時、装置に付着する霜や氷、また冷媒や寒剤から発生する気泡もAEの大きな発生源である。また熱処理中また高温保持中にできる酸化物も冷却中に音を出すことがある。

AEの技術はこのような音源を同定、分離できる程まだ進歩していない。またAEとマルテンサイト変態との対応もまだ不十分である。この分野の研究はまだ多くはない<sup>28)30)43)</sup>。しかし何らかの方法でこれからもAEとマルテンサイト変態との対応は行ふ必要がある。これらの問題点(AEとマルテンサイト変態との対応、雑信号との分離など)を解決していく一つの方法はAEの原波形や原周波数スペクトルを求めることである。

AEの原波形や原周波数スペクトルを求める技術は近年急速に進歩してきている<sup>12)44)~46)</sup>。しかし、マルテンサイト変態に関するものはまだ始まつたばかりである。AEの原波形や周波数スペクトルが得られれば目的とするAEと雑信号との分離のみならず、マルテンサイト変態速度などの動的性質の観察がAEによつて可能となるであろう。

#### 文 献

- 1) 大久信広, 岸 輝雄: 第3回A E総合コンファレンス論文集(1981), p. 60 [日本非破壊検査協会]
- 2) 高島和希: 私信
- 3) Acoustic Emission: ASTM Special Publz 505, ed. by R. G. LIPTAI (1972)
- 4) Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission; ASTM Special Publz 571, ed. by SPANNER and McELROY, (1974)
- 5) 小野桓司: 鉄と鋼, 59 (1973), p. 132
- 6) 材料科学: A E特集, 13 (1976), p. 1
- 7) 湯山茂徳, 岸 輝雄: 熱処理, 20 (1977), p. 20
- 8) H. N. G. WADLEY, C. B. SCRUBY, and J. H. SPEAKE: International Metals Rev., (1980) 2, p. 41
- 9) たとえば, 尾上守夫: アコースティックエミッションの基礎と応用(1976) [コロナ社]
- 10) N. H. Hsu, J. A. SIMMONS, and S. C. HARDY: Mat. Eval., (1977) Oct., p. 100
- 11) N. N. Hsu and D. G. EITZEN: Proc. of the 5th International AE Sympo., Tokyo, (1980) p. 67
- 12) H. N. G. WADLEY, C. B. SCRUBY, and G. SHRIMPTON: Acta Met., 29 (1981) p. 399
- 13) 大平貴規, 岸 輝雄: 第3回A E総合コンファレンス論文集(1981), p. 13 [日本非破壊検査協会]
- 14) ASTM E749-80
- 15) ASTM E751-80
- 16) ASTM E750-80
- 17) 佐野謙一: 金属材料, 17 (1977), p. 38
- 18) 肥後矢吉, 高島和希, 布村成具: 高圧力技術協会A E委員会資料 A E60-323 (1981)
- 19) Y. HIGO, K. TAKASHIMA, and S. NUNOMURA: Acoustic Emission, ed. by K. ONO (1982) [Butterworth, London] in printing
- 20) たとえば, 西山善次: マルテンサイト変態(基本編), (1071) [丸善]
- 21) F. FORSTER and E. SCHEIL: Z. Metallk., 28, (1936), p. 245
- 22) F. FORSTER and E. SCHEIL: Z. Metallk., 29, (1937), p. 439
- 23) F. FORSTER and E. SCHEIL: Z. Metallk., 32, (1940), p. 165
- 24) C. S. BARRETT: Phys. Rev., 72 (1974), p. 245
- 25) C. S. BARRETT and O. R. TRAUTZ: Trans. AIME, 175 (1948), p. 579
- 26) E. S. MACHLIN and M. COHEN: J. Metals, 3 (1951), p. 746
- 27) L. KAUFMAN and M. COHEN: Progress in Metal Physics, 7 (1957), p. 165
- 28) G. R. SPEICH and R. M. FISHER: ASTM Special Publz 505, ed. by R. G. LIPTAI (1972), p. 140
- 29) K. ONO, T. C. SCHLOTTHAUER, and T. J. KOPPENAL: Proc. 9th Sympo. NDE, Socuthwest Res. Inst., San Antonio (1973), p. 386
- 30) K. TAKASHIMA, Y. HIGO, and S. NUNOMURA: Proc. 5th International AE Sympo., Tokyo (1980), p. 261
- 31) G. G. MARTIN: Materials Note 110, Australian Defence Scientific Service, Aero Res. Lad., (1975)
- 32) 佐野謙一, 今中拓一: 川崎製鉄技報, 8 (1976) 3, p. 316
- 33) K. SANO, T. IMANAKA, T. FUNAKOSHI, and K. FUJIMOTO: Proc. 3rd AE Sympo., Tokyo (1976), p. 251
- 34) S. S. Hsu, J. H. CHEN, and P. C. CLAPP: Phys. Stat. Solid., (a) 50 (1978), p. 393
- 35) T. J. GAROSSHEN and J. M. GALLIGAN: Scripta Met., 14 (1980), p. 1111
- 36) D. J. GODDARD and J. HOLT: Acoustic Emission (Deutsche Gesellschaft für Metallkunde E. V.) (1980), p. 151, [D. G. M.]
- 37) R. I. MINTS, V. P. MELEKHIN, I. Yu. IEVLEV, and V. V. BUKHALENKOV: Sov. Phys.-Solid State, 14 (1972) 5, p. 1368
- 38) I. Yu. IEVLEV, V. P. MELEKHIN, R. I. MINTS, and V. M. SEGAL: Sov. Phys.-Solid State, 15 (1974), p. 1761
- 39) A. E. BROWN and R. G. LIPTAI: ASTM Special Publz 505, ed. by R. G. LIPTAI (1972), p. 318
- 40) J. BARAN and M. ROSEN: Scripta Met., 13 (1975), p. 565
- 41) D. O. HARRIS, A. S. TETELMAN, and F. A. DARWISH: ASTM Special Publz 505, ed. by R. G. LIPTAI (1972), p. 238
- 42) J. BARAN and Y. GAFEN: Scripta Met., 15 (1981), p. 105
- 43) K. TAKASHIMA, Y. HIGO, and S. NUNOMURA: Scripta Met., 14 (1980), p. 489
- 44) N. N. Hsu, J. A. SIMMONS, and S. C. HARDY: Mat. Eval., (1977) Oct., p. 100
- 45) Y. HIGO, K. TAKASHIMA, S. NUNOMURA, H. NAKAMURA, and A. WADA: Proc. 5th International AE Sympo., Tokyo (1980), p. 103
- 46) K. TAKASHIMA, Y. HIGO, and S. NUNOMURA: to be published