

Stress Wave Emission による構造物の非破壊検査

羽田野 甫*・堀内 良・丹羽 登

Stress Wave Emission Techni for Structures Nondestructive Testing

By

Hajime HATANO, Ryo HORIUCHI and Noboru NIWA

要 旨

Stress Wave Emission (SWE) を工学的に応用する為の基礎研究を行なう。まず、材料試験における SWE の半定量的測定法を開発し、各種金属材料の SWE について基本的な知見を得るとともに、従来の SWE 測定法の問題点を明らかにする。次に、材料試験時の SWE を定量的に測定する手法を考案する。塑性変形の SWE の解析を行ない、その発生機構に考察を加える。脆性的な破壊現象に伴う SWE の解析も行ない、検出された SWE と材料内の現象との対応付けを試みる。圧力容器の水圧試験時の SWE を測定し、SWE 法を構造物の非破壊検査や安全監視に応用する場合の問題点と、その有用性を明らかにする。最後に、SWE 法の応用の際に重要である、SWE 用検出器と発生源位置標定方式に関する筆者の新たな考案に触れる。

I. 緒 言

固体材料の変形や破壊に伴って音波が放射される現象は、日常よく経験する。錫の双晶変形時の“錫鳴”や、ガラスが割れる時の衝撃音などは、その好例であろう。可聴音域に限らず、広い周波数分布を持った音波が、種々の固体材料で発生する事が知られている。この現象は、Stress Wave Emission (以下 SWE と略す)、あるいは慣用的に Acoustic Emission と呼ばれている。

この現象を材料学の立場から最初に扱った実験の記録は、筆者の知る範囲では、A. F. Joffé らによるものと思われる。彼らは、岩塩や亜鉛の塑性変形時に規則的に発生するパルス音の頻度が、その応力に対応して変化する事を裸耳で観測している。

SWE について、電気的な検出器や増幅器を使った体系的な研究が行なわれるようになったのは比較的近年のことである。1950 年代のドイツの J. Kaiser らによるものがその先鞭とされている。その後 SWE 研究は中だるみの状態にあったが、1960 年代に入って構造物の安全監視や非破壊検査に SWE を応用する事が考えられるようになると、各国で活発な

*大学院工学系研究科電子工学専門課程 (現在東京工業大学精密工学研究所)

研究が開始された。今日では電子計算機を組み込んだ大規模な SWE システムが開発され、大型の構造物に適用されるまでになった。

その反面、従来の研究がともすれば現場用の応用研究に偏り勝ちだった事が災いし、SWE の微視的な発生機構などの基礎的な事柄については不明の点が多い。大規模なシステムを使って SWE を検出しても、必ずしもその潜在能力を十分に活用しているとは言い難いのが現状である。

本報ではこの現状に鑑み、SWE を工学的に応用する為の基礎研究を体系的に行なった。先ず、材料試験における SWE の半定量的測定法を開発し、各種金属の SWE について基本的な知見を得るとともに、従来の SWE 測定法の問題点を明らかにする。次に、材料試験時の SWE を定量的に測定する手法を考察する。塑性変形の SWE の解析を行ない、その発生機構に考察を加える。脆性的な破壊現象に伴う SWE の解析も行ない、検出された SWE と材料内の現象との対応付けを試みる。圧力容器の水圧試験時の SWE を測定し、SWE を構造物の非破壊検査や安全監視に応用する場合の問題点とその有用性を明らかにする。最後に、SWE の応用の際に重要である、SWE 用検出器と発生源位置標定方式に関する筆者の新たな考案に触れる。

II. SWE の基礎研究

1. 材料試験における測定

図1は、張試験時の SWE を測定する為の装置の基本的な構成図である。引張試験片の表面に接着した圧電セラミック振動子の出力は、増巾器、帯域通過濾波器を経て、AC-DC 変換器によって低周波の信号に変換された後、ペンレコーダで記録される。データレコーダは後日の解析に供する為のものである。帯域通過濾波器は、検出系の電氣的な SN 比を向上するとともに、引張試験機で発生する、比較的低周波成分の強い機械的な振動の影響を除去する。SWE 検出器は、その検出感度向上の為、共振特性を利用した狭帯域のものを使用する。

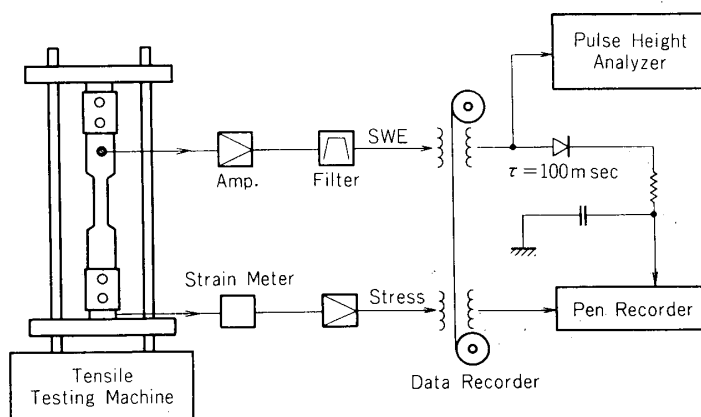


図1 材料試験用 SWE 検出装置

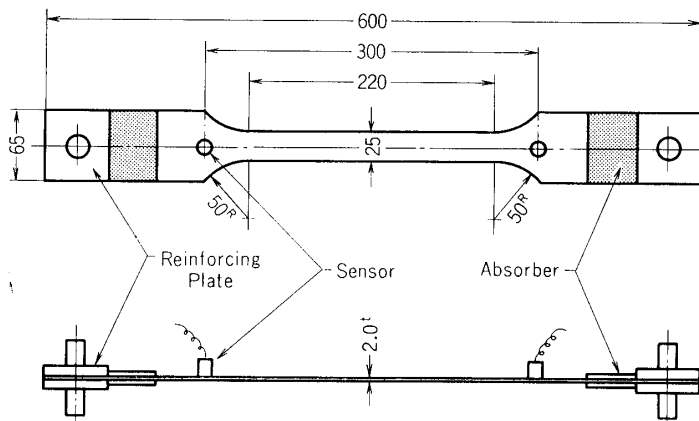


図 2 SWE 検出用に改良を加えた引張試験片

塑性変形に伴う SWE のエネルギーは微小であるので、図 2 のように種々の雑音を抑える措置を試験片に施し、データの信頼性を向上している。まず、試験機付属のかみ込み式のつかみ具を廃し、試験片の両端に補強板を貼付してこれに穴を窮ち、ピンで試験機に固定する。次に、引張試験に先立って、ピン周辺部だけに予め荷重を加えて、SWE 検出時にこの部分の塑性変形に伴う不用の SWE が放出される事を防いでいる。又、試料の両端にネオプレン板を吸音材として貼り付け、ピン周辺で発生する摩擦音を減衰させている。

SWE 用検出器の周波数が通常数 10 kHz 以上の高周波であるのに対し、ペンレコーダなどの記録計の周波数上限は数 10 Hz 以下である事が多い。SWE 信号をそのまま記録するのは困難なので、SWE 信号に適当な処理を施し、記録容易な低周波に変換するのが得策である。図 3 は、従来他の報文で多く採用されてきた処理法、つまり“Count Rate”法によって軟鋼の SWE を記録した例である。しきい値の変化によって、記録パターンが大巾に変動するのが判る。この為、SWE の基礎研究には再現性などの点で必ずしも適しているとは言いがたい。筆者は、能動回路を組み込んだ交流電圧計を導入し、物理的な意味も比較的明瞭な、SWE 信号の平均電圧や実効電圧を記録している。

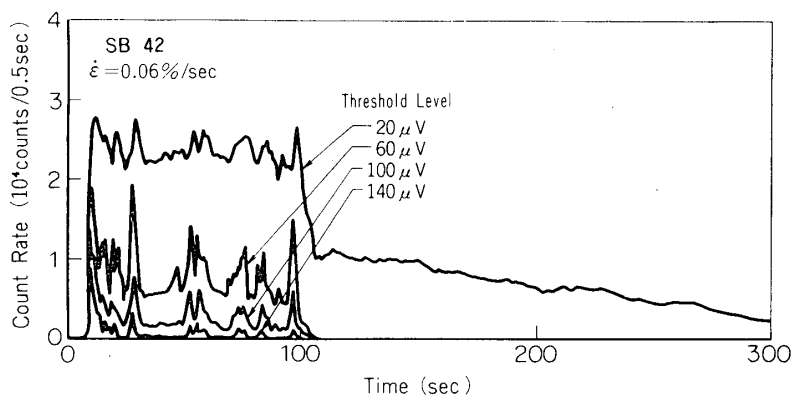


図 3 軟鋼の SWE の“Count Rate”

2. 塑性変形に伴う SWE.

図4は、市販純アルミニウム焼鈍材の単純引張試験時の SWE を記録した例である。塑性変形開始直後の SWE のピークは、粒径が大きくなるのに従って低下している。図5は、アルミニウム単結晶の SWE である。多結晶試料で認められたピークが消滅している。この SWE のピークは、粒界に堆積した転位の作る応力場によって、転位が高速に加速される事に対応していると考えられる。

SWE の主要な特性として、その可逆性、つまり Kaiser 効果が知られている。これは、変形して一旦 SWE を放出した材料が、再加重時には以前の最大応力レベルに達するまで SWE を放出しない現象をいう。しかし図6のように、時効による回復のため、必ずしも厳密には成立しなくなる。

図7は、固溶体型合金の Al-Mg 合金の SWE の例である。図8に拡大して示すように、

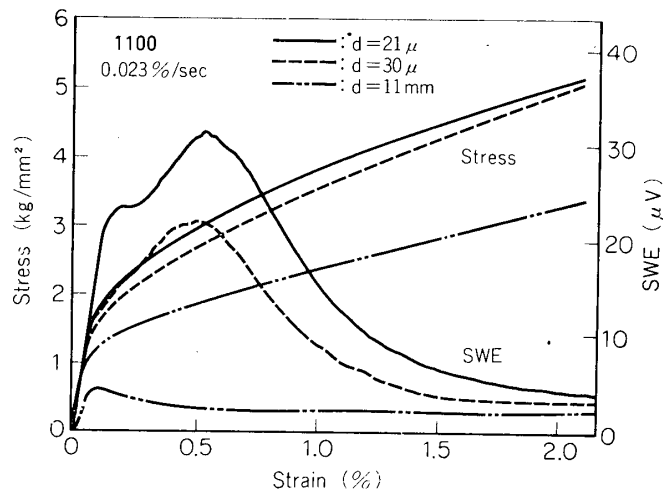


図4 市販純アルミニウムの SWE とその粒度依存性

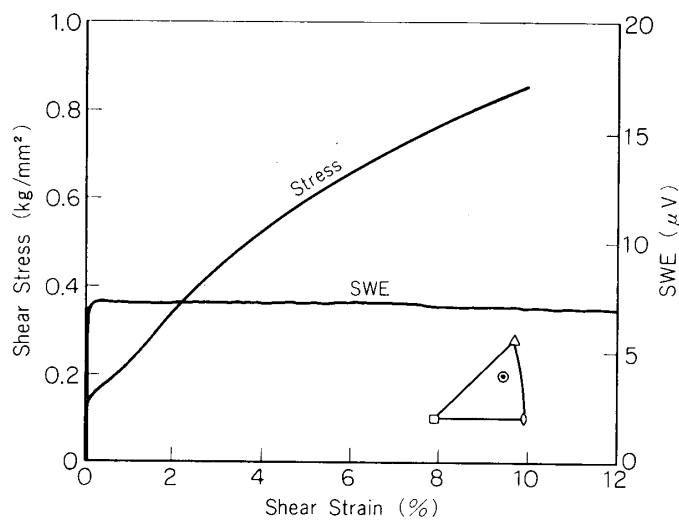


図5 アルミニウム単結晶の SWE

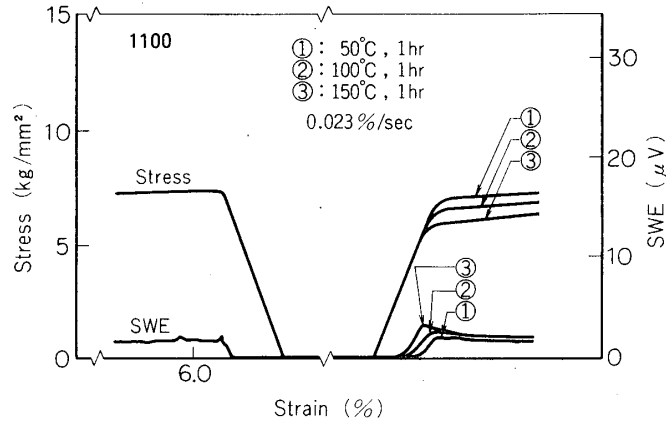


図 6 材料の回復現象と SWE の “Kaiser 効果”

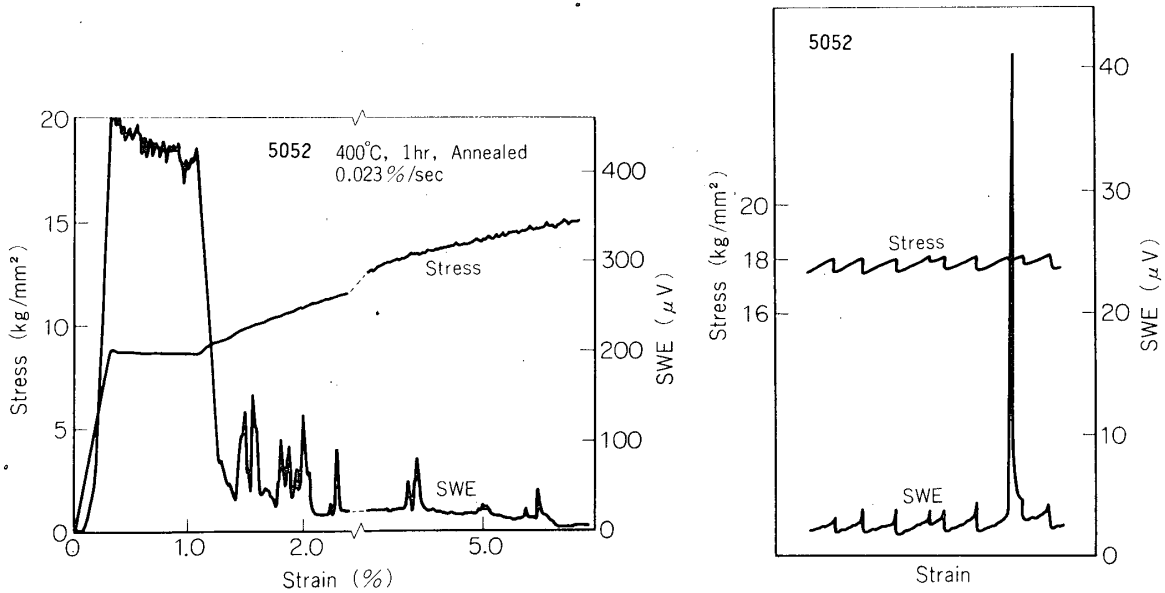


図 7 Al-Mg 合金の SWE

図 8 Al-Mg 合金のセレーションに対応した SWE

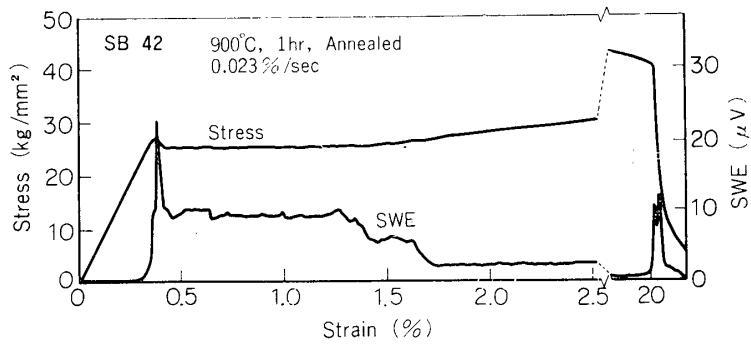


図 9 軟鋼の SWE

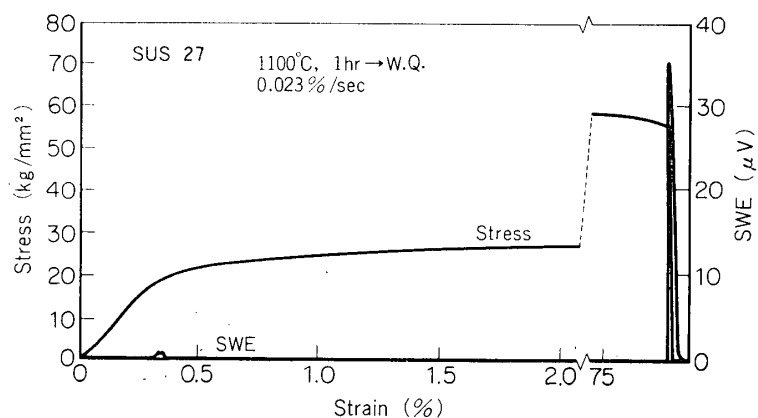


図10 ステンレス鋼の SWE

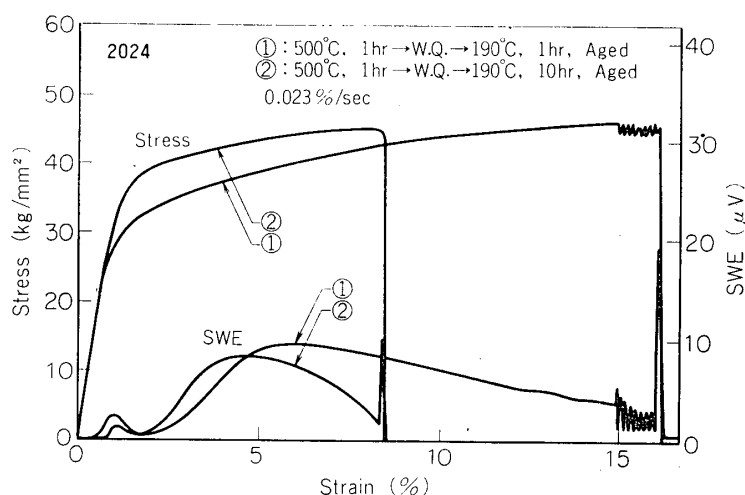


図11 Al-Cu-Mg 合金 (超ジュラルミン) の SWE

応力歪曲線の鋸歯状に対応して、大きな SWE が放出されている。

図9は、軟鋼焼鈍材の SWE である。リューダース帯の形成、伝播に対応して変動している。初期降伏の終了後の加工硬化の段階では、SWE は漸減している。

図10は、溶体化処理をしたステンレス鋼について SWE の測定を試みた例である。SWE のレベルが極めて低いのが判る。

図11は、析出硬化型合金である Al-Cu-Mg 合金 (超ジュラルミン) について SWE を測定した例である。今まで述べた合金では初期降伏の段階で SWE がピークに達したのに対し、この合金では加工が進んだ領域で最大値に達しているのが注目される。

塑性変形に伴う SWE の素過程は、材料中の転位の高速運動による弾性エネルギーの解放過程にある可能性が強い。

3. 疲労破壊に伴う SWE

図12は、Al-Cu-Mg 合金の、高サイクル疲労試験中の SWE を測定した例である。塑性変形時の SWE に比して、割れの発生や伝播に対応した SWE の継続時間は非常に短い。

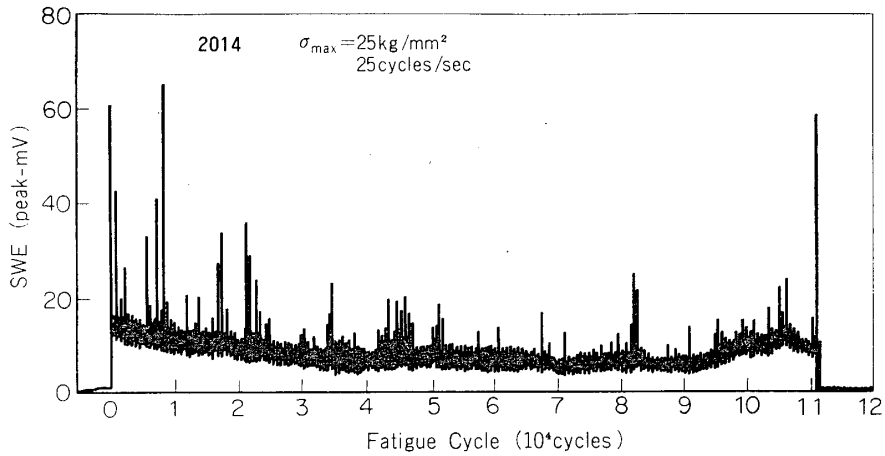


図 12 高サイクル疲労試験の SWE

その信号の平均値や実効値を記録した場合、SN 比の点などで不利になる。この検出では、ピーク電圧計を用いて、約 0.5 秒毎の SWE の最大値を記録した。疲労割れの発生や伝播に対応した SWE が記録されていると考えられる。

筆者は他に、水素脆化した軟鋼や高張力鋼の脆性破壊に伴う SWE の検出を行なっている。このような破壊現象の研究分野では、高感度の検出手段として、SWE 法が大いに活用されるものと思われる。

4. SWE のエネルギーとスペクトラム

SWE が材料中のどのような微視的な現象に対応するものであるかを推定する場合、そのエネルギーやスペクトラムについて定量的なデータの裏付けが必要になる。定量的な SWE の測定手法が確立されれば、SWE の応用技術の有用性も一段と拡大されよう。

このような試みが従来全く行なわれていない訳ではない。例えば観測された SWE 信号の周波数スペクトラムを、予め測定しておいた試料の応答関数で割る事によって、原 SWE のスペクトラムを算出しようとするものなどである。しかし高感度かつ広帯域の検出器が得難い事や、SWE のエネルギーが微小である事などが原因し、これらの試みが成功しているとは言い難い。SWE のスペクトラムは勿論の事、エネルギーのオーダーすらも不明であった。

筆者は、圧電セラミック振動子の変換損失が、共振周波数近傍で僅少になる点に着目し、その周波数近傍での SWE のエネルギー密度を定量的に測定する方法を考案した。何個かの異なる周波数の振動子を使って同一の測定を繰り返す事により、SWE のスペクトラムやエネルギーも算定される。

図 13 は、市販純アルミニウム焼鈍材の単純引張試験に本測定を適用して 100 kHz~4 MHz の 5 周波における SWE のパワー密度を測定したものである。図 14 は前図の結果を基に、SWE のパワースペクトラム密度を求めたものである。歪の増加に伴って、相対的に SWE の高周波成分が増加している。図 15 は、パワースペクトラム密度関数にフーリエ変換を施し、SWE の自己相関関数 $G(\tau)$ を算出した結果である。

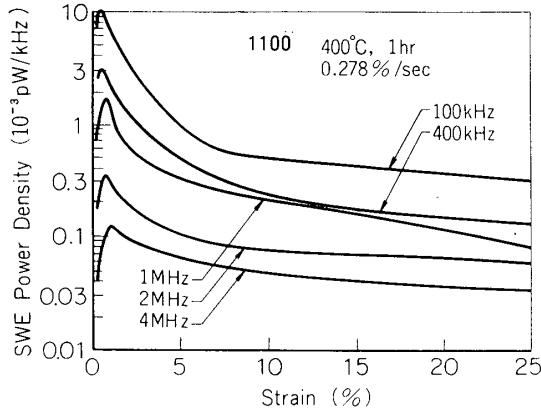


図 13 純アルミニウムの SWE のパワー密度

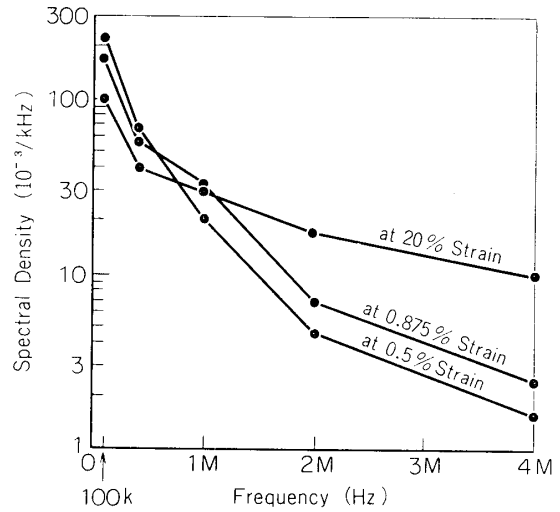


図 15 SWE のスペクトラム密度

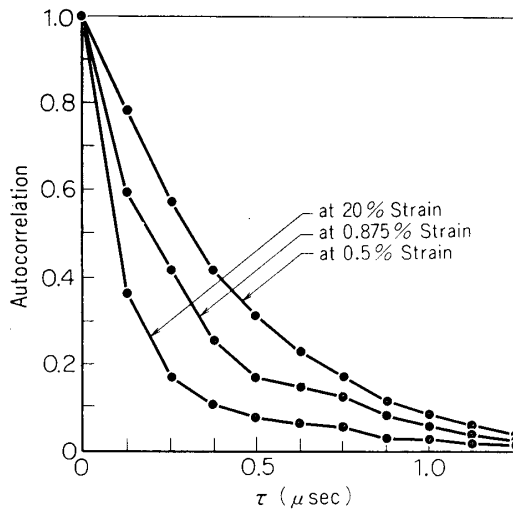


図 15 SWE の自己相関々数

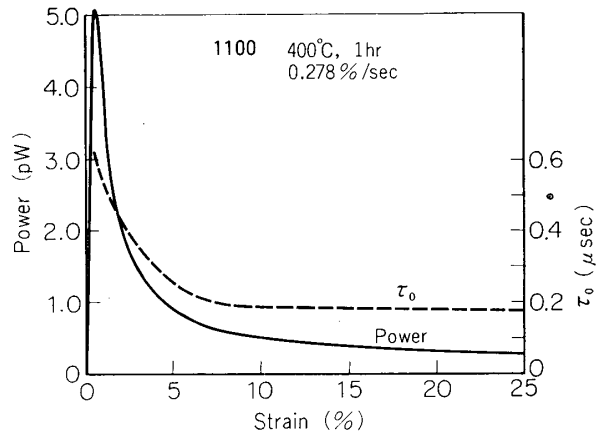


図 16 SWE のパワーと“単位継続時間 τ_0 ”

$G(\tau=0)$ は SWE の単位時間当りの総エネルギー、つまりパワーを、 $G(\tau)=0$ に対応する τ_0 は SWE 放出源素過程の時間スケールがどの程度のものであるかを示唆する。ここでは τ_0 を、SWE 源素過程の単位継続時間と称する。図 16 は、種々の歪量における $G(\tau)$ を算出して、SWE のパワーと単位継続時間の変化を求めたものである。マクロな降伏に伴って SWE の単位継続時間は急激に低下している。転位密度の急増によって転位の平均運動時間が減少する事に対応していると考えられる。

図 17 は純アルミニウム、図 18 は軟鋼について、SWE のパワーと単位継続時間 τ_0 の歪速度依存性を示したものである。いずれの材料でも τ_0 はほとんど歪速度によって変化していない。他方、SWE のパワーは、面心立方格子金属のアルミニウムでは歪速度に正確に比例しているのに対し、体心立方格子金属の軟鋼では、歪速度の約 1.2 乗に比例している。

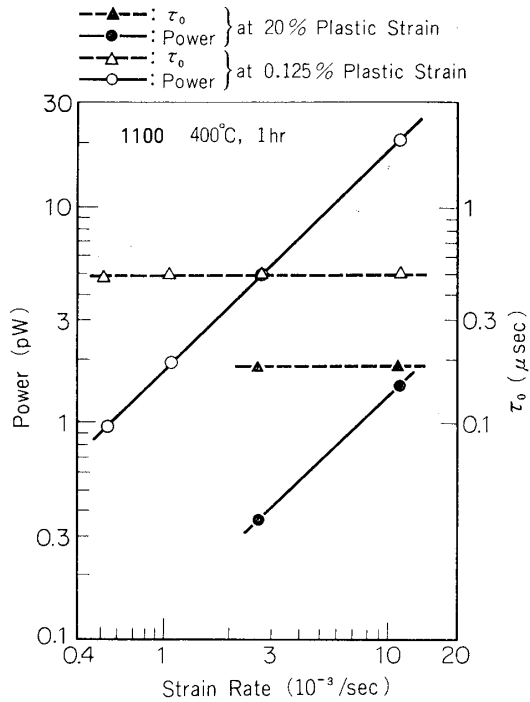


図 17 純アルミニウムの SWE の歪速度依存性

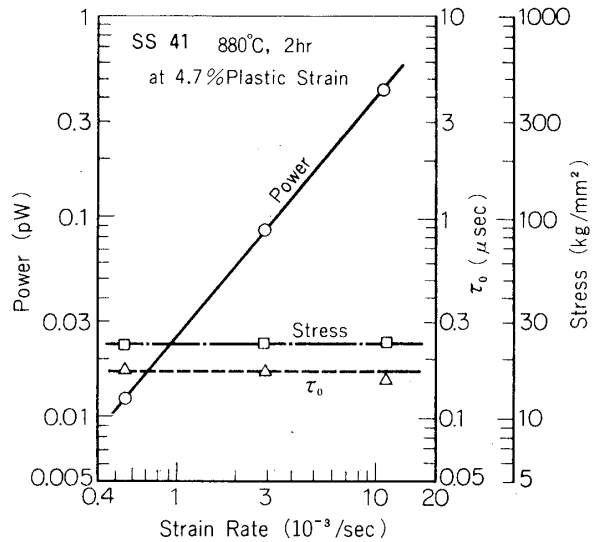


図 18 軟鋼の SWE の歪速度依存性

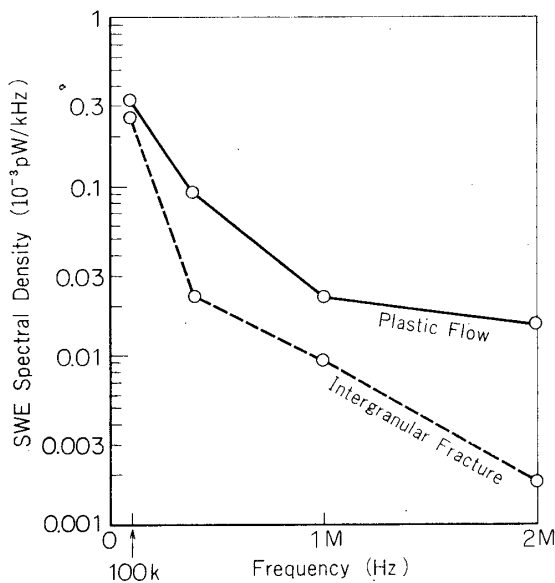


図 19 塑性変形と粒界割れの SWE の相異

4. 塑性変形と脆性破壊の SWE

鋭敏化処理を施したステンレス鋼に前節の定量的測定法を適用して、塑性変形に伴う SWE と、脆性破壊と考えられるその粒界割れに伴う SWE を測定した。それぞれの SWE についてパワースペクトラムの差異を算出した結果を図 19 に示す。塑性変形に比して、脆性的な破壊現象に伴う SWE の低周波成分が強大であるのが判る。SWE 法を構造物の非破壊検査や安全監視に適用する場合、検出した SWE が塑性変形に伴うものであるか、あるいは割れに伴うものであるかの判定ができる事が望ましい。この実験結果は、その可能性を示すものと考えられる。

III. SWE の応用研究

1. 圧力容器への適用

図 20 は、筆者によって開発された、多チャンネル SWE 検出標定システムの構成を示す。圧力容器の表面に取り付けられた 4 個の検出器の出力は、それぞれ独立に増巾、処理された

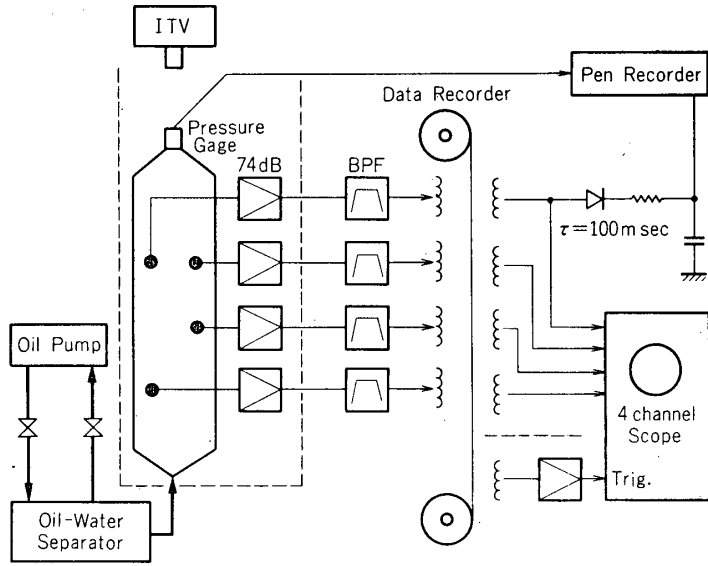


図 20 多チャンネル SWE 標定システム

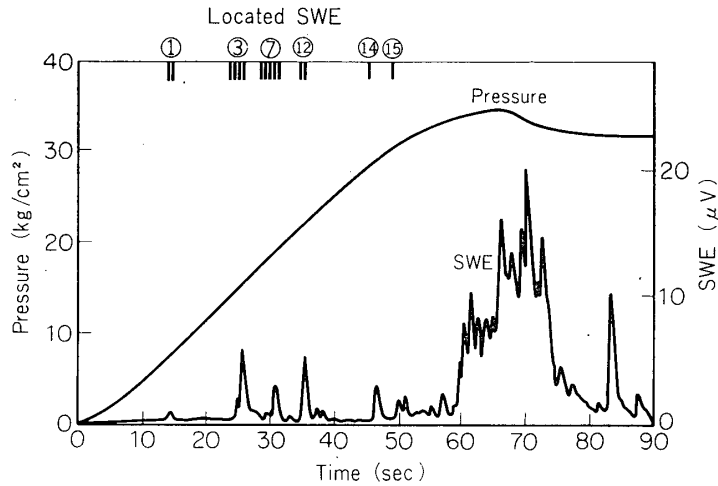


図 21 静圧試験の SWE

後に、一旦磁気テープに記録する。このテープを再生して、SWE 信号の立ち上がり部の、各チャンネル間での時刻差を測定する。この結果を基に、三角測量と類似の手法を用いて、計算機によって SWE 源の位置を標定する。

図 21 は、静圧試験中のモデル圧力容器に本システムを適用した一例である。図 22 はその標定結果である。低圧力時に放出される SWE 源の位置が、中央の人工的に付加した欠陥の近傍であるのが判る。

図 23 は、繰り返し圧試験中のモデル圧力容器で発生する SWE を測定した例である。(A)は第1加圧サイクルのものであり、SWE は静圧試験の場合と類似の傾向を示している。第2サイクル以降は、(B)に示したようにほとんど SWE が検出されていない。これは

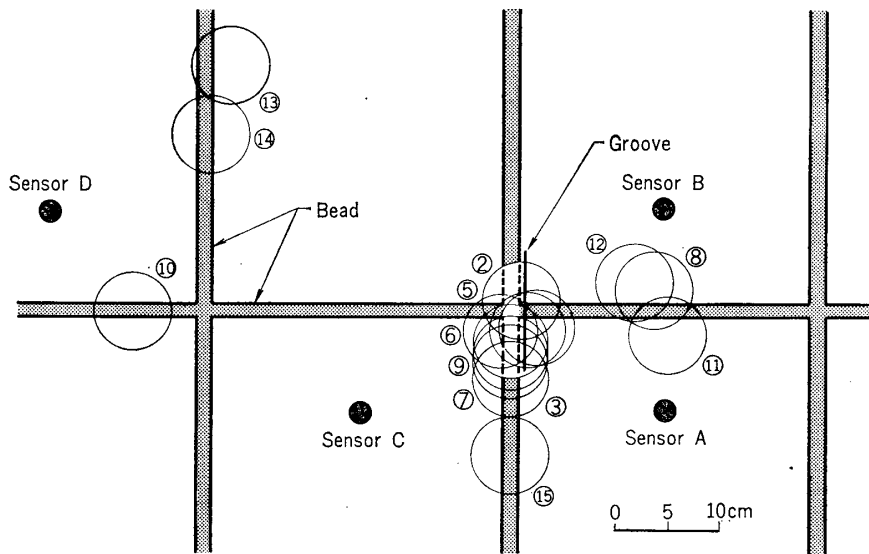


図 22 SWE 源の標定

SWE の非可逆性，つまり Kaiser 効果によるものと考えられる．そして容器が疲労破壊を起す直前になって再び SWE が検出される．この SWE は，(C)に示したように，加圧サイクルに対応して連続的に記録されている．SWE 法が，圧力容器などの構造物の破壊予知にも有用である事を示す例と考えられる．

図 24 は M3A チタン合金製球形ロケットチャンバの SWE の例である．双晶に伴う強大な SWE が記録されている．

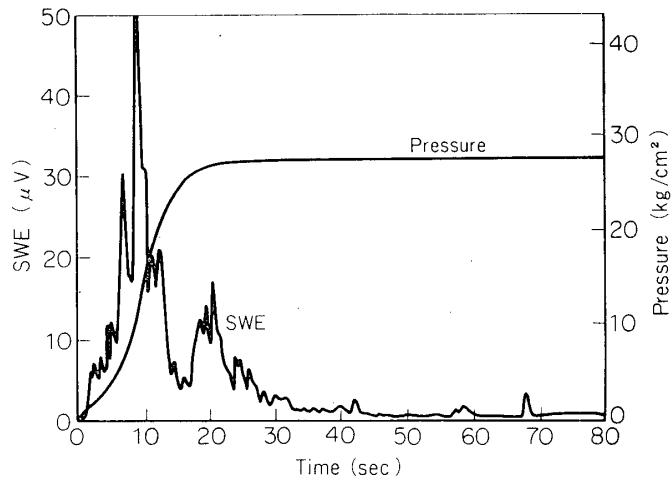
2. SWE 用検出器

SWE の測定を行なう場合，その検出器の特性が重要であるのは勿論である．しかし，従来 SWE 用の最適な検出器について十分な検討を加えた報文が見当たらないのは不思議な現象である．

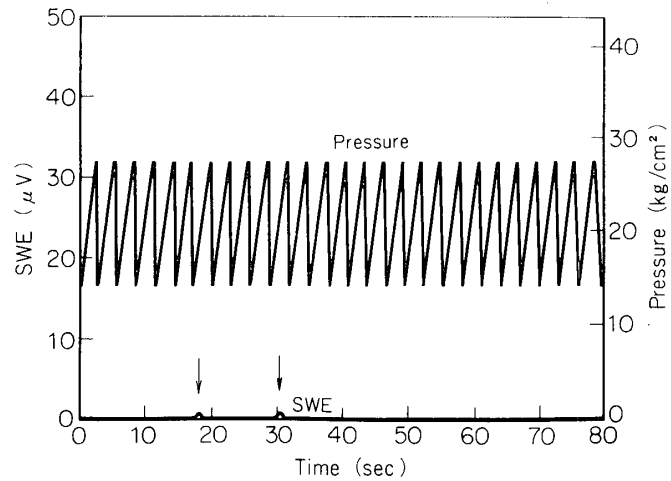
SWE 用の検出器の設計を行なう場合，目的とする SWE の被測定物中における伝播姿態を知る必要がある．図 25 は，鋼板における SWE の伝播速度を実測した例である．鋼板の厚さを変えてその速度分散を測定したところ，Lamb 波の非対称モードに該当する結果が得られた．一方，SWE 用検出器に要求される指向性としては，圧力容器などに適用する場合，無指向性が望ましい．図 26 はこれらの点を考慮に入れて筆者が考案した SWE 用検出器の一例である．振動子に入射する Rayleigh 波や Lamb 波の波面が，多角錐台形をした変換器によって揃えられるので，感度が良好であるばかりでなく，過渡特性の点でも優れている．原子炉 1 次圧力容器の稼動中監視に SWE 法を適用するような時に問題となる，キャビテーションノイズの影響も軽減できる可能性がある．図 27 は，この種の検出器を工業的に供給する場合必要である，その校正法を示したものである．

3. 標定方式

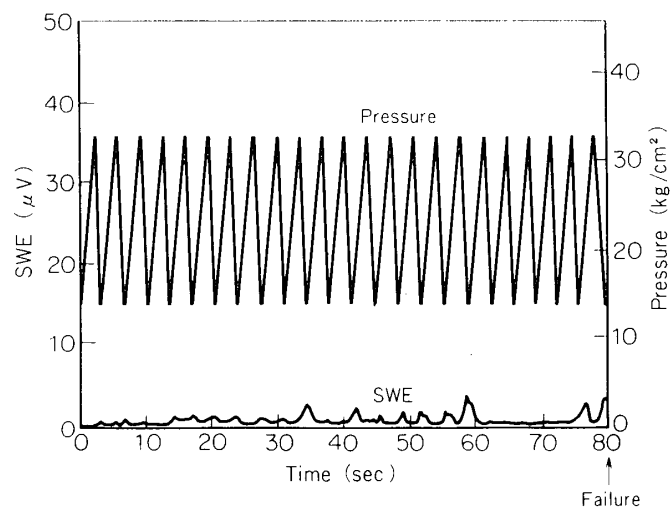
小規模な構造物に SWE 法を適用する時には，計算機を使用しないで標定が可能である簡便なシステムが要求される．筆者は，圧力容器などの表面に格子状に配置された SWE 用



(A) 第1サイクル



(B) 試験中期



(C) 破壊直前

図 23 繰り返し圧試験の SWE

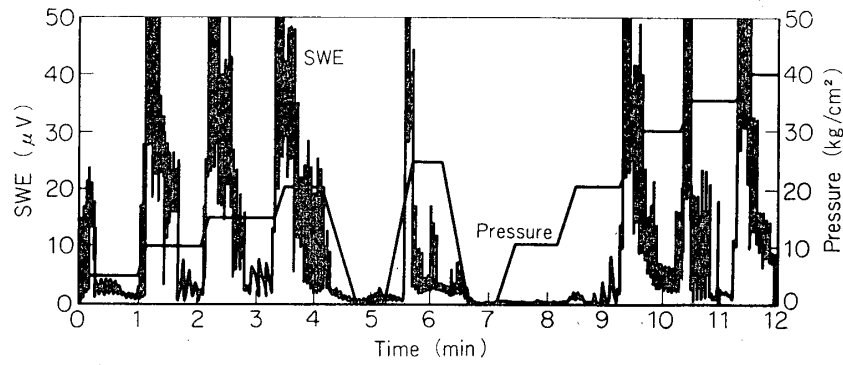


図 24 M3A チタン合金製球形ロケットチャンバの SWE

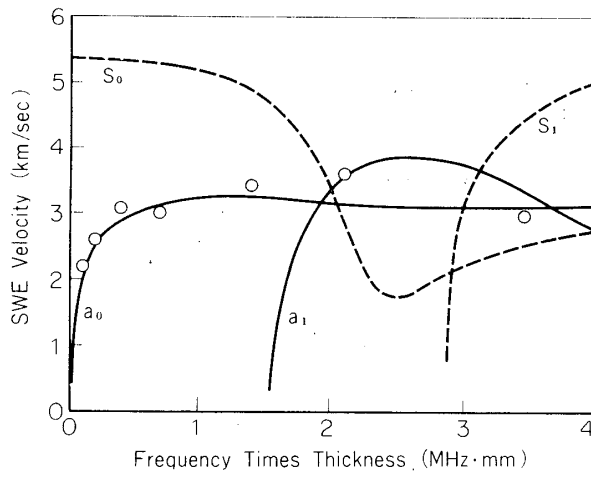


図 25 SWE 伝播速度の実測値

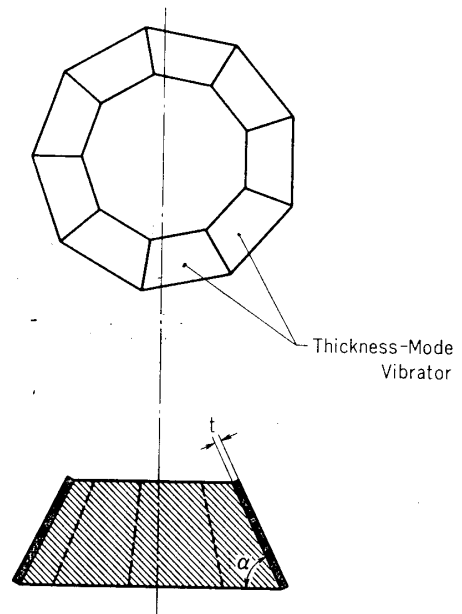


図 26 SWE 標定用検出器

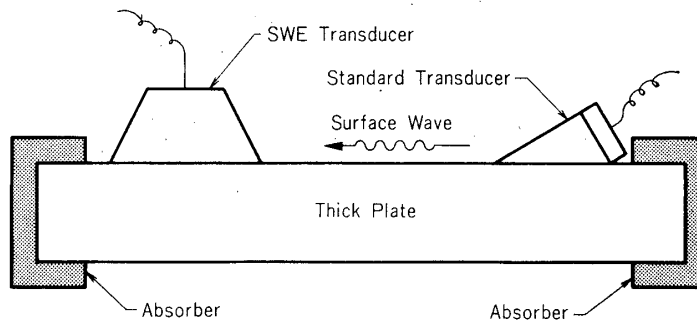


図 27 SWE 用検出器の校正

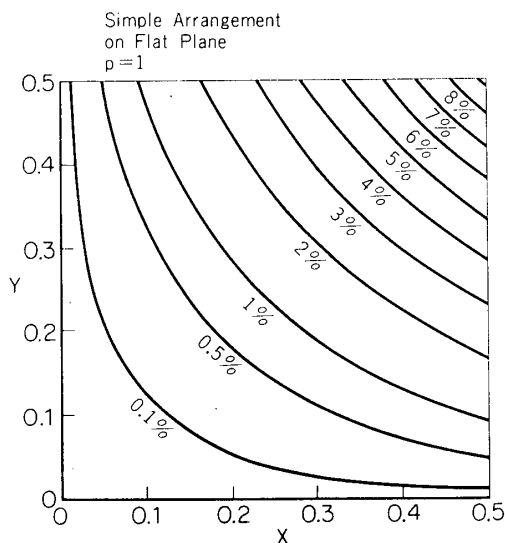


図 28 単純配置方式の標定誤差

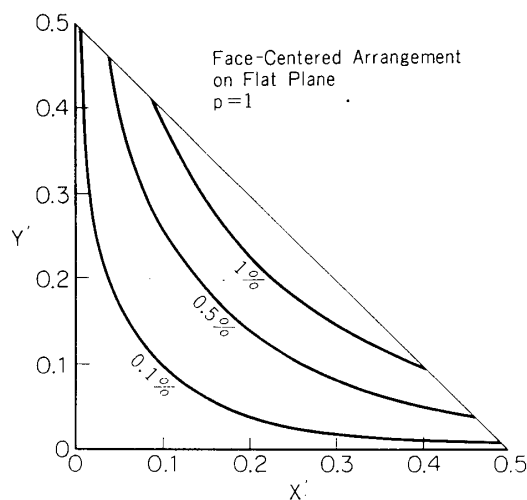


図 29 面心配置方式の標定誤差

検出器群において、座標系のとり方に工夫を凝らす事によって、計算機なしで簡便かつ高精度の標定が可能である方式を考案した。図 28 は、一般的な座標系の選定をした方式、つまり単純配置方式による標定誤差、図 29 は本方式、即ち面心配置方式による標定誤差を示した一例である。いずれの場合でも簡略な論理回路をシステムに組み込む事によって計算機を除く事が可能であるが、面心配置方式の誤差が単純配置のものに比して格段に優れているのが判る。

IV. 結 言

SWE 法を、金属物理学や破壊力学などの研究分野、ロケットチャンバや圧力容器などの構造物の非破壊検査や安全監視の分野に適用する為の基礎的な実験を行なった。SWE 法は、従来の超音波探傷などに比して、いわば動的な測定を行ない得る点に最大の特色を有する。従来の方法が欠陥の存在の有無の判別に有効であるのに対し、SWE 法はその欠陥が致命的であるか否かに関する直接的な情報を提供してくれよう。基礎的な研究分野では、材料中の微視的な現象の高感度な検出手段となり得よう。

現在の時点では、SWE に関して未知の事柄が山積しており、SWE 法が独立の技術体系としては確立されていない。当分の間は、例えば SWE 法によって危険度の高い個所を先ず検知し、後で従来の検査法によりその部分だけを念入りに検査するといった方法が採用されよう。今後、大量輸送手段や原子力発電の発展に伴い、SWE 法に対する期待は一層高まるものと思われる。

最後に、実験遂行上多大なる御助力を頂いた、当研究所の佐下橋市太郎氏、森本三郎氏、三浦康弘氏、吉田安徳氏、田中博氏に深甚なる謝意を表する次第である。

1974 年 3 月 31 日 計測部

参 考 文 献

I) SWE 全般の解説, 論文

- [1] 羽田野: “Stress-Wave Emission の研究” 東京大学学位論文 (1973. 12)
- [2] 丹羽: 非破壊検査 18 卷 9 号 (1969) 416 頁.
- [3] 丹羽: 非破壊検査 21 卷 4 号 (1972) 205 頁.
- [4] 尾上: 非破壊検査 21 卷 3 号 (1972) 207 頁.
- [5] 磯野: 非破壊検査 19 卷 11 号 (1970) 579 頁.
- [6] 羽田野: NDI 資料 No. 2487 (1973. 7. 20).
- [7] 今中他: 金属学会会報 12 卷 12 号 (1973) 871 頁.
- [8] “AE とその構造物の安全監視への応用” 日米合同シンポジウム予稿集, 東京 (1972).
- [9] “Acoustic Emission” ASTM. STP 505 (1972).

II) SWE の基礎研究

- [1] 羽田野: 非破壊検査 20 卷 11 号 (1971) 597 頁.
- [2] 羽田野他: 非破壊検査 21 卷 4 号 (1972) 219 頁.
- [3] 磯野他: 非破壊検査 21 卷 4 号 (1972) 219 頁.
- [4] 羽田野, 丹羽: Proc. 7th Int. Cont. on N. D. T., Warszawa (1973. 6).
- [5] R. M. Fisher 他: Canadian J. of Appl. Phys., 45 卷 (1967) 147 頁.
- [6] 羽田野他: 金属学会誌 (投稿中).

III) SWE の応用研究

- [1] 羽田野他: 非破壊検査 21 卷 4 号 (1972) 234 頁.
- [2] 羽田野他: 非破壊検査 21 卷 4 号 (1972) 238 頁.
- [3] 羽田野他: ISAS Report 38 卷 3 号 (1973) 31 頁.
- [4] 渡辺他: 非破壊検査 22 卷 12 号 (1973) 757 頁.