

弾性波を用いた材料評価に関する研究

森 康彦 (機械工学科)

はじめに

ぜい性材料の材料評価に関し、ぜい性材料の破壊に伴う AE 及び電磁放射の発生機構を検討した。また、構造部材の応力履歴の評価に関し、弾性波による残留応力測定法の適用性に関し、実験的研究を行うとともに、表面波を応用すべく漏洩表面波速度測定用スキャナ装置を設計製造した。また、AE による材料評価における計測信頼性について検討した。これらの研究成果の概要を以下に示す。

1. ぜい性材料の破壊に伴う AE と電位変化[1, 2]

大きな地震の発生時、あるいはその前後で地電位が変化したり、異常な電磁波の放射があるという報告がある。特に、地震の前に電磁気的な異常が起こるとすれば、地震の前兆として重要であるとして関心が寄せられている。本研究は、この現象に注目し、これを広くぜい性的な誘電体材料の破壊の新しい研究手段としての適用性を検討したものである。具体的には、先ず、電位変化の発生が顕著に認められている花崗岩について、繰返し荷重試験を行い、アコースティック・エミッション (AE) と電位変化の同時測定を行うことにより、AE から評価される岩石の微視破壊の発生と電位変化の発生の関連について詳細に検討した。そして次に、強誘電体材料であるアクリル樹脂板と板ガラスの破壊試験を行い、破壊に伴う電位変化の発生の有無を試験し、ぜい性材料の破壊の研究手段としての電位変化発生現象の適用性を検討したものである。結果は以下のように要約される。

花崗岩の正弦波繰返し荷重試験の結果、電位変化は AE とともに試料が破断に至る前の約 1 万回の荷重繰返しから発生が顕著に認められ (図 1.1)、1) 試料の破断位置に集中して発生する (図 1.2)。2) 各荷重繰返しサイクルの最大荷重近傍のレベルで発生する (図 1.3)。3) AE から評価される微視破壊の規模が大きい程、大きな電位変化が観測される。また、き裂が発生あるいは進展するとは考え難いような低い荷重レベルにおいても電位変化が観測されたが、これについては、岩石のすべり摩擦試験を行うことによって模擬し、

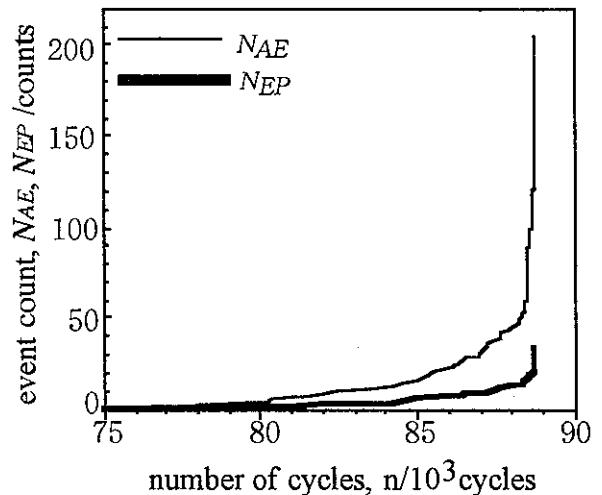


図 1.1 荷重繰返し数に対する AE と電位信号の発生挙動

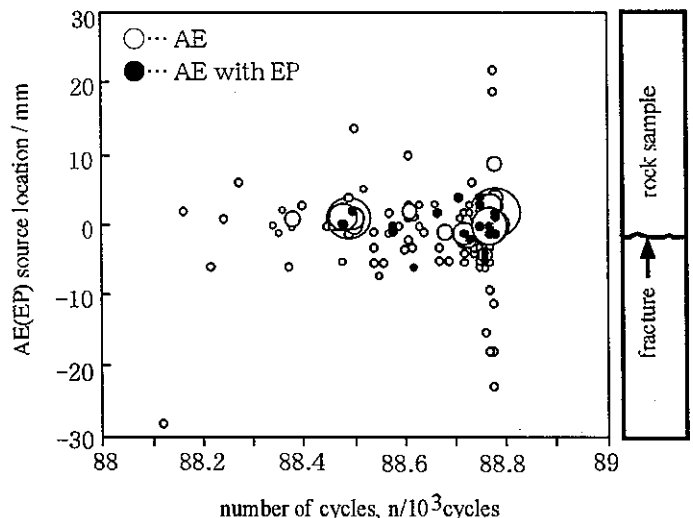


図 1.2 AE 及び電位 (EP) 信号発生源位置の荷重繰返し数に対する変化

すでに生成されていた破面の微少突起の破壊によるものであることを明らかにした。これらの結果より、岩石の破壊試験に伴い観測される電位変化は、試料内で生じる破壊事象に伴って解放されるひずみエネルギーによって発生するものであると結論された。

アクリル樹脂板のコンパクト試験片の破壊靱性試験では、試験条件を種々変えて行った結果、サイドグループを付けて板厚方向の変形を拘束した試験片においてのみ、その不安定破壊の領域で電位変化が観測された。一方、板ガラスについては4点曲げ破壊試験を行ったものであるが、AEは計測されるものの、試験した範囲で電位変化は全く観測されなかった。これら誘電体の結果は、電位変化の発生は破壊のモード、破壊の発生や進展の力学条件に依存するであろうことを示唆するとして、今後の課題を与えている。

いずれにせよ、電磁放射の測定は、誘電体の破壊の研究において微小破壊の検出のみならず、複数の電極を配置すれば、き裂の向きを、また、電界強度からき裂の大きさを評価できる手法として期待できることを示している。

## 2. 弾性波による残留応力の評価

一般に実際の構造部材には、加工時に導入された応力と使用中に経年的に変動する負荷応力などが重畳しており、これらが構造物の強度的な安全性に大きな影響を及ぼしていると考えられる。そのため、実際の構造物に生じている実応力が非破壊的に把握できれば、その構造物が将来どの程度の荷重に耐え、どの程度の外乱にまで安全であるか、また、その構造物が有する機能を維持するためには、どの時期にどの程度のメンテナンスを行えば最も効果的かなどを検討する上において非常に有効な評価となりうる。これに関して、音弾性と呼ばれる超音波の音速が応力によって変化する現象を応用する測定法が、新しい有効な方法として注目されている。そこで本研究では、高力アルミニウム合金試験片に引張及び圧縮応力を負荷し、それを除荷した後に残る残留応力による音速変化をシングアラウンド音速測定法によって精密に測定し、超音波を用いた残留応力測定法について基礎的データを収集するとともに、実構造部材への適用性を検討した。結果は以下のように要約される。

2軸応力状態にある弾性体において、主応力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 方向に偏向した2つの横波の音速をそれぞれ $V_{S1}$ 、 $V_{S2}$ とし、材料の直交異方性の軸と主応力方向が一致する場合には、主応力差と音速が比例するという式(2.1)が成り立ち、 $B$ を音響複屈折と呼んでいる。したがって組織異方性 $B_0$ が既知であれば、主応力差が測定できる。また、縦波の音速と横波の平均音速との比である音速比 $R$ を測ると、式(2.2)の関係から主応力和が求められる。したがって、式(2.1)と式(2.2)より、 $B_0$ と $R_0$ が分かっている材料では、主応力 $\sigma_1$ と $\sigma_2$ を分離して求めることができる。これが音弾性による応力測定の原理である。

$B = \frac{V_{S1} - V_{S2}}{(V_{S1} + V_{S2})/2} = B_0 + C_A(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.1)$ <p>ここで、<math>B_0 = \frac{V_{S10} - V_{S20}}{(V_{S10} + V_{S20})/2}</math> (組織異方性)</p> <p><math>V_{S10}, V_{S20}</math> : 無負荷時の横波音速  <math>C_A</math> : 複屈折音弾性係数</p>	$R = \frac{V_L}{(V_{S1} + V_{S2})/2} = R_0 + C_R(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.2)$ <p>ここで、<math>R_0 = \frac{V_{L0}}{(V_{S10} + V_{S20})/2}</math></p> <p><math>V_{L0}</math> : 無負荷時の縦波音速  <math>C_R</math> : 音弾性定数</p>
--	--

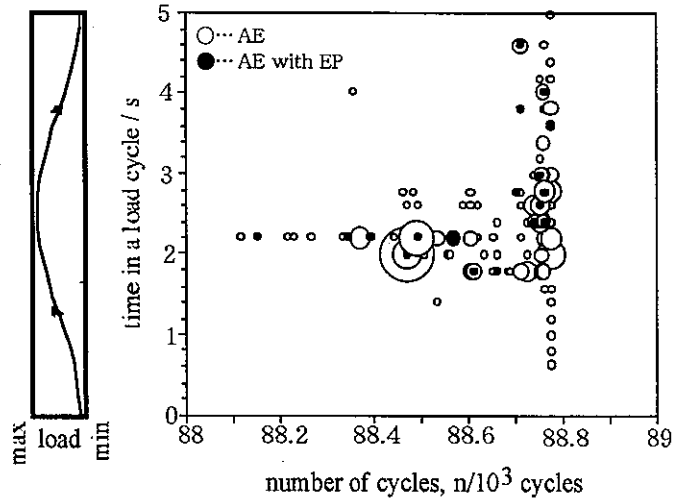


図 1.3 AE 及び電位 (EP) 信号発生荷重レベルの荷重繰返し数に対する変化

試料は Al-Zn-Mg 系合金(JIS 7075)の厚さ 8 mm の圧延材とし、これから引張および圧縮試験片を加工した後、743K×1h・水冷、393K×24h・空冷の熱処理を施した。横波と縦波の超音波探触子は、試験片で一様なひずみが得られる場所に、接触触媒を介して圧着した。横波の偏向方向は引張・圧縮軸方向とそれに垂直な方向とした。音速測定には、シングア라운드式音速測定装置を用いた。なお、音速は温度依存性が大きいので温度補正の必要があるため、温度変化に対する音速の変化を予め測定し、実験値は 293K に補正した。

試験の結果、音響複屈折  $B$  と主応力差との関係は直線で近似でき、応力の推定評価に必要な式(2.1)の係数  $B_0$  及び  $C_A$  が決定できる (図 2.1)。ただし、その関係は、引張と圧縮応力側でわずかにことなり、音響複屈折  $B$  と応力との関係は、引張応力( $B_{tens}$ )、圧縮応力( $B_{comp}$ )についてそれぞれ次のように与えられた。

$$B_{tens} = -9.04 \times 10^{-3} + (-4.61 \times 10^{-5}) \sigma \quad (2.3)$$

$$B_{comp} = -9.04 \times 10^{-3} + (-4.75 \times 10^{-5}) \sigma \quad (2.4)$$

この関係を用いて推定した残留応力は、試験した負荷応力の範囲で、概ね有効に評価し得たといえる (図 2.2)。

ここで述べたのは、単軸応力状態についての結果であるが、実際の構造部材では曲げ応力の負荷も対象になり、このことについての基礎的な研究を実施している [3]。

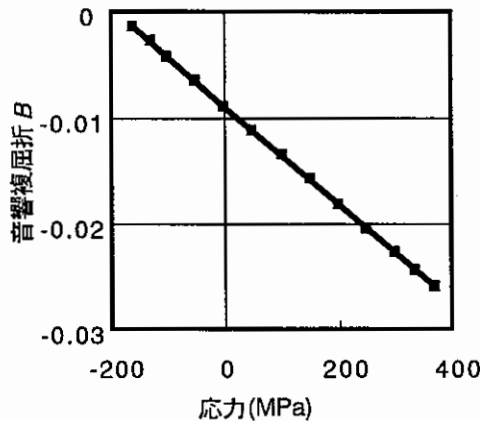


図 2.1 負荷応力と音響複屈折  $B$  の関係

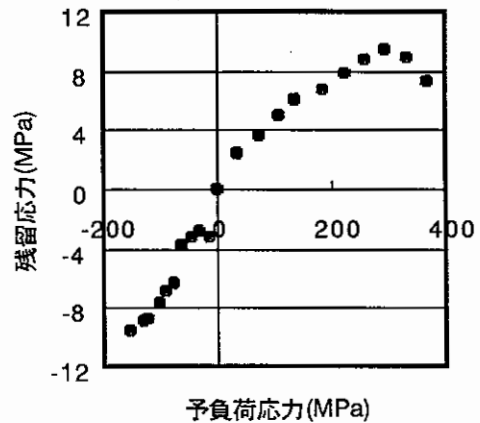


図 2.2 予負荷応力と推定残留応力の関係

### 3. AE 評価における事象計測の信頼性 [4]

材料評価法としての AE 技法の位置付けは、必ずしも楽観視できる状態ではなく、特に計測信頼性に疑問を呈される場合があった。それは、最も広く行われている事象計測のデータ、すなわち、AE 信号波形の特徴を数値化したパラメータ自体がどれほど正確に AE 発生源の情報を捉えているかという疑問が持たれる場合があるためであった。この問題に関し、今日のマイクロコンピュータに代表される急速なエレクトロニクス的发展により、その見直し作業が可能となり、AE 計測の原点に立ち戻ることが出来るようになってきた。

ここでは、AE 信号のモデルとして浸炭鋼の破壊靱性試験に伴う AE を用い、最新の AE 計測装置による事象計測と波形計測の解析結果との比較によって、典型的な事象パラメータである最大振幅電圧、ライズタイム、および、位置標定に関する AE センサー間の信号到着時間差を対象に、AE 事象計測の値の信頼性について定量的に明らかにしようとするものであり、以下のように要約される。

測定データの信頼性を定量的に評価するパラメータとして、計測値の絶対値で重み付けた誤差率を定義した。そして、その誤差率をもって、事象計測データの信頼性について、1) 最大振幅電圧は、評価対象データの 80% が誤差率 10% 未満である。2) ライズタイムは、評価対象データの 80% が誤差率 10% 未満である。3) これらのパラメータは、事象計測の下限界条件に近付くと、誤差率が大きくなる。4) 事象計測から自動的に求められる AE 信号到着時間差に波形データを用いて補正を加えることにより、到着時間差の信頼性が向上する、ことを明らかにした。

以上、事象計測から得られるデータには大きな誤差率を示すような事象も含まれる場合もあるが、それらは計測される全事象の絶対数に対して少なく、実際の AE 評価に影響を及ぼすほどではないと考えられる、と結論するとともに、なおかつ、AE 計測装置の製造者に対し、これまで全く示されていないかつ計測値の信頼性について、本研究で提案した誤差率を、製品の性能仕様に加えるよう、提言しているものである。

#### 4. 漏洩表面波速度測定用スキャナ装置の設計と製造

材料の表面は摩擦、腐食、衝撃、高温にさらされ、また曲げ応力が作用した場合には最大応力が発生するので最も破損の生じやすい箇所である。そこで特に材料表面近傍について、機械的性質や残留応力の経年変化を非破壊的に評価する必要がある。

弾性波を材料評価に応用しようとする、本報告の 2 章で述べた手法は、弾性波を試料の厚さ方向に伝搬させ、試料の機械的性質等をマクロに評価するものであった。そこで次に、試料表面の劣化損傷の評価に注目し、漏洩表面波（レーリー波）を用いた表面微小欠陥の検出に加えて、高精度なレーリー波速度の測定による欠陥部あるいは表面の極近傍の弾性定数の経年変化を評価し、材料の劣化状態の非破壊的評価法を確立しようとするものである。そのために、漏洩表面波速度測定用スキャナ装置は、漏洩レーリー波の高精度測定の重要な要素技術となるものである。

スキャナ装置の核心部は、超音波トランスデューサを試料に対して精密に位置決めするための機構であり、トランスデューサの Z 方向の微動と、Z 軸回りの 360 度の回転 ( $\theta 1$ )、X 軸回り ( $\theta 2$ )、Y 軸回り ( $\theta 3$ ) の精密なおり機構からなっている (図 4.1)。各機構部のストロークと分解能は次のとおりである。

- Z 軸 : ストローク 約 100mm、分解能  $1\mu\text{m}/\text{ピッチ}$
- Z 軸回り回転 : ストローク 360 度、分解能  $0.36\text{度}/\text{ピッチ}$
- X・Y 軸回り : ストローク 8 度、分解能  $0.003\text{度}/\text{ピッチ}$

なお、本装置の製造は、東レテクノ株式会社に依頼した。

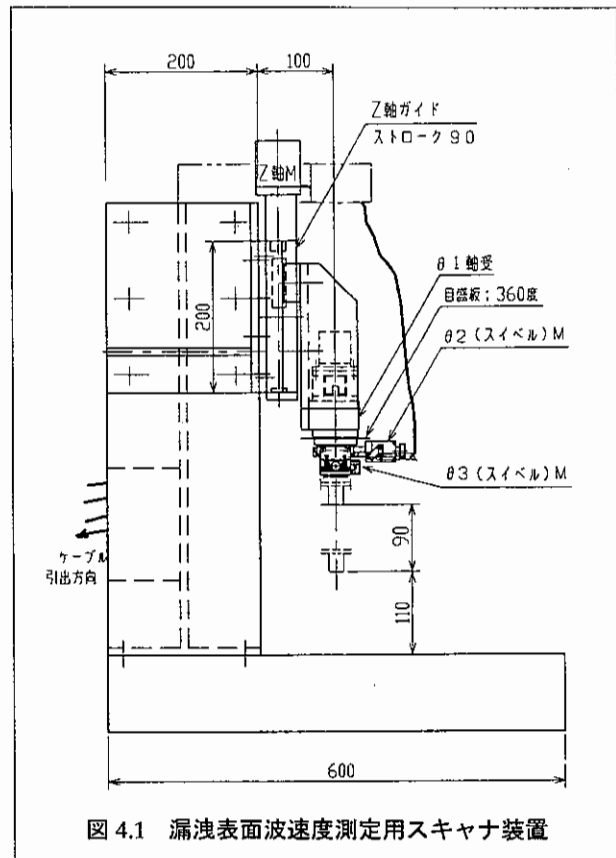


図 4.1 漏洩表面波速度測定用スキャナ装置

#### 発表論文等

- [1] I. Iida, Y. Mori, Y. Obata and K. Mogi: Measurement of AE and electric potential changes in fracture of brittle materials, Progress in Acoustic Emission X, JSNDI (2000) 325-330.
- [2] 飯田伊佐務、小幡義彦、森康彦：繰返し応力下の岩石の破壊に伴う AE と電位変化、日本大学生産工学部第 33 回学術講演会、機械部会講演概要 (2000-12-2) 115~118.
- [3] 高田雄基、小幡義彦、森康彦：超音波を用いた曲げ応力の評価、日本大学生産工学部第 33 回学術講演会、機械部会講演概要 (2000-12-2) 127~130.
- [4] 澤辺一美、小幡義彦、森康彦：AE 事象データ誤測定数の波形データによる評価、日本大学生産工学部第 33 回学術講演会、機械部会講演概要 (2000-12-2) 123~126.