

交流電気ポテンシャル式き裂長さ測定法*

長谷川光彦** 根本 実*** 藍葉 幹雄†

小俣 豊†† 児玉昭太郎†††

Electrical Potential Method Using Alternating Current for
Measuring Crack Lengths

Mitsuhiko HASEGAWA, Minoru NEMOTO, Mikio AIBA

Yutaka OMATA, Shōtarō KODAMA

A new electrical potential method is developed to measure crack length, where the alternating current is used instead of the direct current. This alternating current system rejects the potential due to the Zebec effect between the potential leads and the test specimen, that is, this system is little affected by the specimen temperature. The lockin amplifier is used to amplify and detect the alternating input with suppressed noise.

This method does not require the delicate techniques such as in the direct current method and can easily get the noiseless and stable data over a long hours test. To show these, some experiments are made in the room temperature $\sim 160^{\circ}\text{C}$ low temperature fatigue test, under which a measurement by the direct current method will be difficult.

1. はじめに

近年、疲労き裂進展や破壊靱性に関する研究が盛んになってきた。そこでは繰返し荷重とともに進展する疲労き裂長さの測定や、静荷重時に破壊に先だち進展する安定き裂の長さの測定が重要である。一般には、簡便で精度の高いき裂長さ測定法として顕微鏡のついた測長器による直接測定が多く行われている。また間接測定法としては、電気ポテンシャル法^{1)~7)}、コンプライアンス法¹⁾、超音波法¹⁾²⁾⁸⁾、うず電流法⁹⁾、クラックゲージ法¹⁰⁾、レプリカ法などが用いられている。これらのうち顕微鏡法、うず電流法、クラックゲージ法、レプリカ法は表面あるいは表面近くのき裂長さが得られる。そのため表面より内部の方が長いき裂のときに問題となる。これに対して電気ポテンシャル法、コンプライアンス法、超音波法は表面から内部までの平均的き裂長さが得られ、そのような場合に有利である。

特に電気ポテンシャル法は、温度条件および計測装置の選択が良いと測定精度が高く多く用いられている。そのときの精度としては、 $10\mu\text{m}$ のき裂長さの変化を知ることができ、異なる試験片間では 0.1mm 以内の誤差で

測定できている²⁾。しかしその計測装置には高感度かつ非常な低ノイズと低ドリフト ($< \pm 0.1\mu\text{V}$, $< 0.05\mu\text{V}/\text{Test Hours}$) が要求され、たとえばナノボルトメータが必要である。さらに、試験片に 30A ほどの大直流電流を流す必要があるが、その電流の安定性が重要であるとともに、その大電流のために上昇する試験片の温度を極めて厳しく一定に保つ必要がある。これは電圧検出端電極の接点の熱起電力が温度によって非常に大きく影響されるためである²⁾。これらの欠点はあるが、上述の利点および自動記録が容易であることから、将来性の最もある方法と考えられる。

そこで、直流式にみられるこれらの困難さを取除く目的で交流式の電気ポテンシャル法の計測システムを開発したので報告する。

2. ロックインアンプを使用した計測システム

従来の直流を用いた電気ポテンシャル法では熱起電力による直流電圧成分の分離は不可能である。そこでここでは交流を用いて直流の外乱を全く受けない様にした。また検出した交流微弱電圧の増幅・検波に通常であれば狭帯域フィルタ付交流増幅と半波または両波整流を行う装置を特別に製作しなければならない。しかしここでは位相検波方式を採用することにした。この方法にすることによって、検出電圧の増幅・検波には一般に市販されているロックインアンプを用いることができる。これにより整流検波法方式に比べてノイズに非常に強く、そし

* 原稿受付 昭和54年1月23日。

** 長岡技術科学大学 (長岡市上富岡町長峰1603-1)

*** 日本鋼管 (川崎市川崎区南渡田町1-1)

† 日本酸素 (東京都大田区下丸子2-12-15)

†† 東京都水道局三河島処理場 (荒川区荒川)

††† 東京都立大学工学部 (東京都世田谷区深沢)

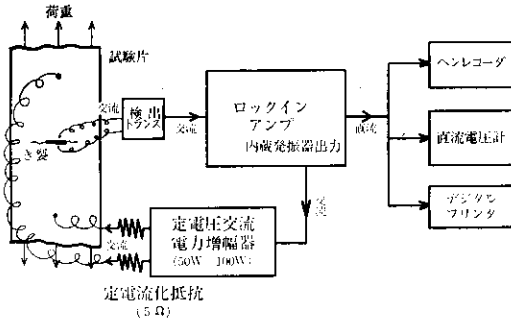


図1 本測定法の計測システム図

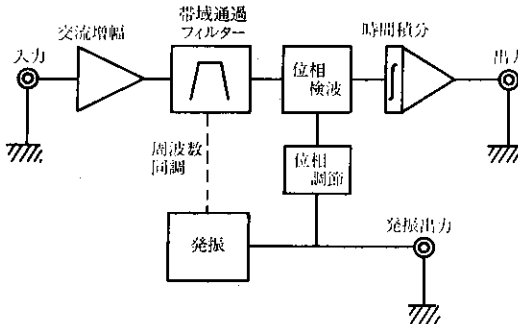


図2 ロックインアンプ内の回路システム図

て安定で信頼性の高い結果が得られるという利点も加わる。

ロックインアンプは入力交流電圧を基準交流電圧と同相検波するので、基準交流と同じ周波数で同じ位相の波以外は大幅に除去することができ、ノイズに完全に埋もれた信号であっても検出可能な性能がある。また取扱うことのできる交流電圧も数 μV 以下のレンジもあり、装置自身の持つノイズレベルも極めて低く、温度や長時間の安定性も優秀である。したがって本法の使用目的には十分な性能を有している。

本法の計測システム図を図1に示す。またロックインアンプの内部回路システム図を図2に示す。図1において、試験片側は電流供給も検出も信号を平衡形で取扱い、外部ノイズの影響をできるだけ低下させるよう工夫している。したがって、試験片に交流電流を供給する定電圧交流電力増幅器の出力はバランス形としておく必要がある。市販品としては、ステレオ用パワーアンプでBTL接続のできるものを用いることができる。あるいは市販のステレオパワーアンプの入力にトランスを入れるか、またはモノラルパワーアンプの出力にトランスを入れて使うこともできる。パワーアンプの出力は50W～100Wで十分である。ただしこれは検出トランスのス

テップアップ比が1:9.5を使用したときであり、この比が半分のときはパワーアンプの出力を倍にする必要がある。検出トランスは数 $10\mu\text{V}$ ～数 mV において直線性の良いものを使用する。たとえば市販品であればマイクトランスやステレオ用ムービングコイル形カートリッジのためのステップアップトランスが用いることができる。

以上のようなシステムにすることにより、温度やノイズの影響を受けにくくなり、測定技術が簡単になった。そのため、従来の直流式のように試験片に大電流を流す必要もなく、またその電流による試験片の温度上昇が止まるまで測定を待つ必要もない。直ちに高精度の測定ができるとともに、長時間の連続測定も行える。さらには使用装置の周波数の上限が高いため、使用する基準交流の周波数を高くすることができ、き裂長さの変化の速い現象を精度良く測定することが可能である。

3. キャリブレーションカーブの理論解

交流電流場の理論解はまだないが、直流電流場については求められている。そして、後で明かなように、1kHz以下では直流電流場の解が適用できる。Johnson⁴⁾は写像関数法により一様な直流電流場のときの理論解を求め、次式を得た。

$$\text{無限板} \quad \left(\frac{E}{E_0} \right)_{\text{th}} = \sqrt{\frac{(H/2)^2 + l^2}{(H/2)^2 + l_0^2}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

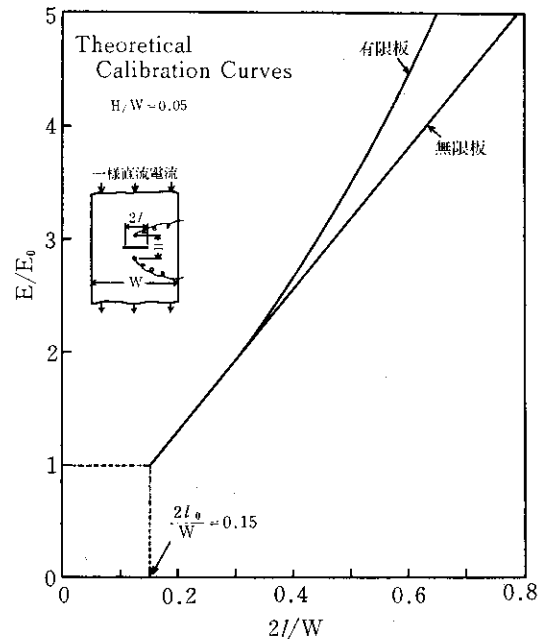


図3 一様直流電流場の理論解によるマスターカーブ

$$\text{有限板} \quad \left(\frac{E}{E_0} \right)_{th} = \frac{\cosh^{-1} \left(\frac{\cosh \pi H/2W}{\cos \pi l/W} \right)}{\cosh^{-1} \left(\frac{\cosh \pi H/2W}{\cos \pi l_0/W} \right)} \dots\dots(2)$$

ここで E は検出電圧, H はき裂をはさむ検出端距離, $2l$ は中央き裂全長, W は有限幅板の板幅である。添字 0 は初めの状態のときを表わす。これら2つの式をグラフにしたのが図3である。ただし, $H/W=0.05$, $2l_0/W=0.15$ についてのものである。この曲線が検出電圧よりき裂長さを換算する理論的マスターカーブ (キャリブレーションカーブ) となる。

本報の実験の供給電流方式は2点間に集中して電流を流す方法をとっている。2点間電流供給の場合の理論解⁴⁾ が求められていて、上述の1様電流供給の場合の理論解とは異なる。しかし、2点間の距離をある程度以上離すとほとんど1様電流供給の場合と同じになる。両者の違いの程度などは後述するが、以後は1様電流供給の場合の理論式(1)と(2)を用いる。

理想き裂でなく、楕円き裂の場合について解析⁵⁾ されている。しかし、スリットの先端に理想き裂がある場合の解析はない。一般にスリットなどの応力集中部からき裂が発生し破壊に到ることが多いので、スリット先端にき裂がある場合の解析がまたれる。本報では次に述べるようにして実験的に求めた。

4. 銅ホイル試験片における測定結果

表1に示す性能のロックインアンプを用いた。定電圧交流電力増幅器は、出力50W×2のステレオパワーアン

表1 使用ロックインアンプの仕様

項 目	性 能
周波数範囲	15Hz~15kHz
等価雑音帯域幅	0.017Hz
雑音除去比	最大48dB/1kHz 幅ホワイトノイズ
信号入力感度	1μV~1Vrms/フルスケール
出 力	各レンジ 1V/フルスケール

プをバランス出力 (BTL) となるように IC を用いて自作した。そして定電流化するために、出力端に試験片の抵抗より十分大きい 5Ω 50W をそれぞれ直列に入れた。

まず、基本的特性とマスターカーブを求めるために、実際の試験片の代りに 0.1mm 厚さの銅ホイルを用いて測定した。従来ではこの目的にはアルミホイルを用いている⁶⁾。しかしここでは電極の取付け易さの点から銅を用いた。き裂はレーザーカットで進展させた。図4は供給する交流電流の周波数の影響を調べた結果である。縦軸の検出電圧 E はロックインアンプ入力に換算してある。この結果から、1kHz までは周波数の影響はないことがわかる。1kHz 以上で電圧が上昇したのは検出端近くで配線のシールドが不十分なためである。普通に配線をシールドしただけであるとこの周波数が上限となるようであるから、さらに高い周波数を用いるときには試験片を含めたシールドを行わなければならない。表皮効果はさらに高い周波数にならないと現われないようである。

図5はき裂長さが長くなったときの検出電圧の変化の

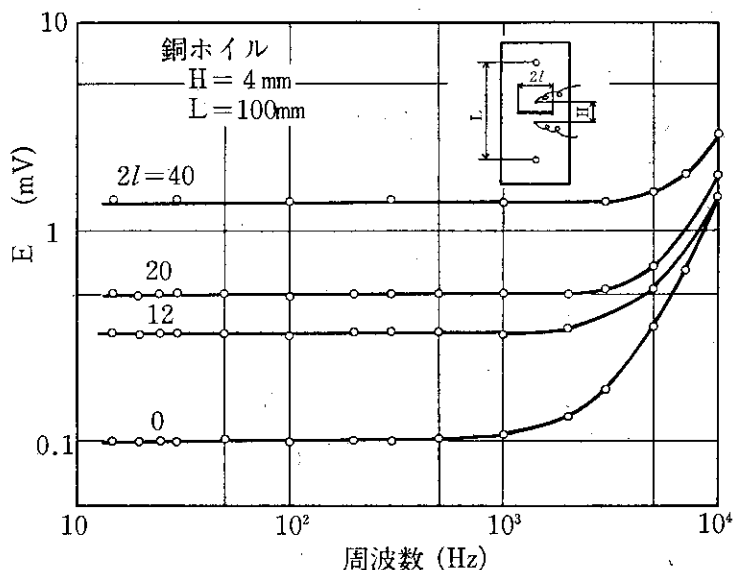


図4 周波数の影響

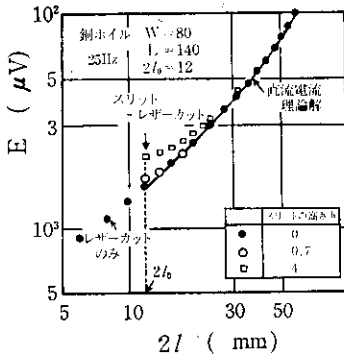


図5 スリットの有無および直流電流理論解との比較

様子を調べた結果である。図中の黒小丸はレーザーカットのみの場合である。これは実線で示す直流理論解の(2)式の曲線と良く一致している。このことから、少くとも1 kHz までは直流の理論解が適用できることがわかる。また白丸と白四角は、 $2l_0=12\text{mm}$ のときに長方形のスリットを付け、そのスリットの先端からレーザーカットしていったときの結果である。この結果から、スリットがあると検出電圧を高くし、スリットの高さ h が大きい程その電圧は高くなるとともに先端から生ずるき裂に対する電圧への影響する長さも大きくなることがわかる。図6は検出端の距離 H の影響である。 H が大きい程検出電圧も高くなるが、き裂が長くなるとどの H のときもほとんど同じ値となる。したがってき裂の長さの変化を精度良く知るには、ノイズに影響されない範囲で H を小さくすると良い。

図7は、後述の実験に対するマスターカーブを求める目的で、実験に用いた試験片と全く相似の2倍の寸法の

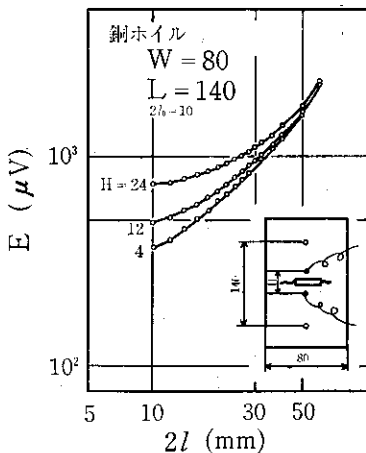


図6 検出端距離の影響

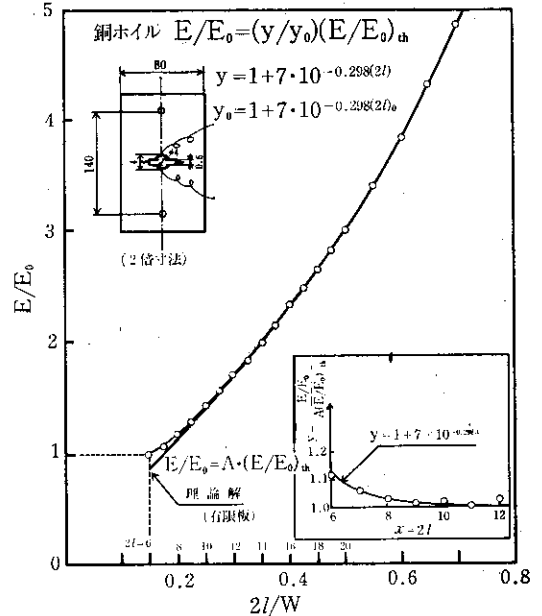


図7 実験に使用した試験片用マスターカーブ

形状としたときの結果である。スリットの形状は図4・図5の長方形スリットの中央にさらに丸穴が付いている。検出端はこの丸穴のふちに付けている。白丸が測定結果であり、太い実線が(2)式の理論解を定数倍 A (<1) してスリットの影響のない範囲で白丸と一致するようにしたときの曲線である。図中右下のグラフは、スリットの影響を求めるために白丸の値をこの曲線の値で除して整理した結果である。ただし横軸の x および $2l$ の寸法は実験に用いた試験片の寸法に換算した値を記入してある。このスリットの場合の影響範囲は $2l=12\text{mm}$ 近くまでおよんでいる。そしてスリットの影響は近似的に

$$y = 1 + 7 \times 10^{-0.298x} \dots\dots\dots (3)$$

で表わせる。また y_0 の値は $1/A$ に等しいことから、この場合のマスターカーブとしては次式が得られた。

$$\frac{E}{E_0} = Ay \left(\frac{E}{E_0} \right)_{th}$$

$$= \frac{1 + 7 \times 10^{-0.298(2l)} \cosh^{-1} \left(\frac{\cosh \pi H / 2W}{\cos \pi l / W} \right)}{1 + 7 \times 10^{-0.298(2l_0)} \cosh^{-1} \left(\frac{\cosh \pi H / 2W}{\cos \pi l_0 / W} \right)} \dots\dots (4)$$

この実験は一樣電流場ではなく、どれも2点間で集中した電流場で行っている。しかしその2点間の距離 L は十分離し、 $L=140\text{mm}$ に取っているの、ほぼ一樣電流場となっている。(2)式との差はき裂の長いときで0.6%程度である。

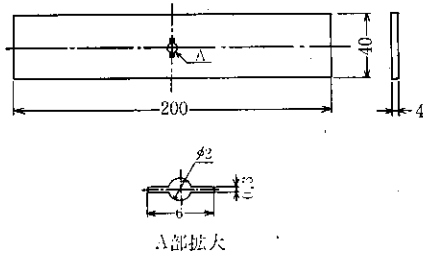


図8 実験に用いた試験片寸法形状

5. 低温度下の疲労き裂進展についての測定例

本方法は熱的影響が少ないので、温度がそれ程一定でない場合にも適用できる。そこで室温 $\sim -160^{\circ}\text{C}$ の低温度において疲労き裂進展を測定した。用いた試験片とスリットの寸法形状は図8のようなものである。低温度は液体窒素を吹き付け、その流量を ON-OFF 制御して保っている。温度変動は $0^{\circ}\text{C} \sim -120^{\circ}\text{C}$ で $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内、 -160°C で $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 以内である。実験装置などの詳しい事は文献 11) を参照されたい。検出端子はスリット中央の 2ϕ 2 丸穴内壁の板厚中央部に取付け、表裏のき裂長さの平均が得られるようにした。また、(4)式は $2l_0 = 6\text{mm}$ のものであるが、実際のスリット長さは 6mm を中心にバラついている。これは電気ポテンシャルをき裂長さに変換するときの誤差となる。そこで(4)式中の右辺の初めの分数において、 $2l$ を $2l - 2l_0 + 6$ に置換えればこの誤差は取除ける。

図9は、そのようにして得られたき裂長さを疲労き裂進展速度曲線に整理した結果である。白丸が本方法で得

られた値であり、実線が同時に顕微鏡を用いて得られた値のスムーズカーブである。両者は良く一致しており、 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 程度の温度変動の影響は受けないことがわかる。しかし顕微鏡の結果より少しバラついているのは、疲労き裂の破面の接触のためと考えられる。この問題が解決されれば測定精度はノイズレベルによって決まる値になるものと予想される。ここで用いたロックインアンプは少しノイズが多く、最小き裂長さ変化検知限界は約 $30\mu\text{m}$ となっている。しかし最新設計のロックインアンプではノイズは問題とならない程少いので、その場合は検出端近くで侵入する外来ノイズの大きさと積分時定数による。

疲労き裂破面の接触に影響されることから、逆に最近重要となってきた接触現象に使うことができる。

6. ま と め

本方式の交流式電気ポテンシャル法は一般市販の電子装置を用いて簡単にシステムを作ることができるとともに、容易に低ノイズ・低ドリフトかつ高感度が得られる。同時に熱起電力による温度の影響は受けない。これらのことによって、測定技術は直流式に比べてずっと簡単であり、かつ測定精度は高い。

直流電流場の理論解が適用できる。スリットの影響は理論解がないので実験的に明らかにしておく必要がある。温度のそれ程一定でない低温度下の疲労き裂の測定ができる。その他に疲労き裂の開閉（接触）現象、破壊靱性試験、き裂長さの変化が速い場合などへも適用可能である。

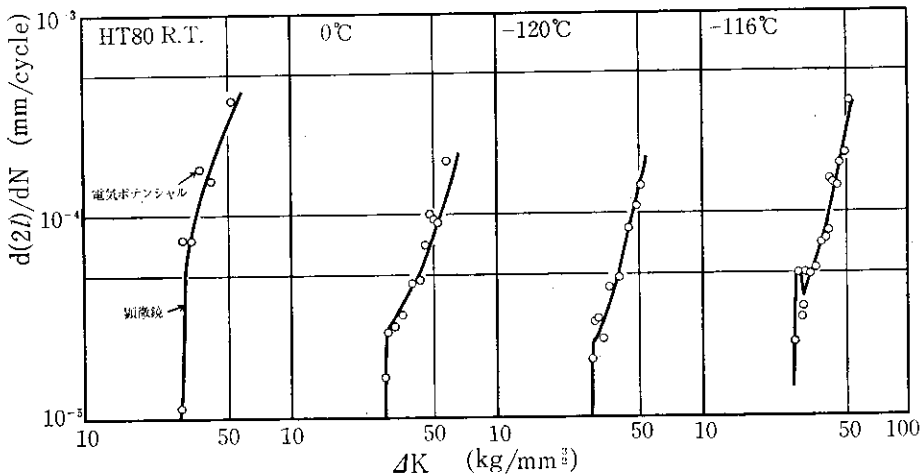


図9 室温 $\sim -160^{\circ}\text{C}$ 疲労き裂進展速度曲線における本法の結果と顕微鏡の結果の比較

7. 文 献

- 1) Brown, W. F. Jr. and Srawley J. E., Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials, ASTM STP 410, (1966).
- 2) ノット, 宮本博訳, 破壊力学の基礎, 培風館.
- 3) Li, C. Y. and Wei, R. P., Calibrating the Electrical Potential Method for Studying Slow Crack Growth, Materials Research & Standards, Vol. 6, No. 8 (1966), 392.
- 4) Cooke R. J. and Robinson, J. L. Some Further Considerations of the Potential Drop Method for Measuring Crack Lengths, Research Report of the Department of Physical Metallurgy and Science of Materials, University of Birmingham, England.
- 5) Johnson, H. H., Calibrating the Electric Potential Method for studying Slow Crack Growth, Materials Research & Standards, Vol. 5, No. 9 (1965).
- 6) Burns S. J. and Bilek, Z. J., The Dependence of the Fracture Toughness of Mild Steel on Temperature and Crack Velocity, Metallurgical Transactions, Vol. 4, (1973), 975.
- 7) Bachmann V. and Munz, D. Unusual Potential Drop During the Application of the Electrical Potential Method in a Fracture Mechanics Test, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 4, No. 4, July (1976), pp. 252-260.
- 8) Klima, S. J. et al., Monitoring Crack Extension in Fracture Toughness Tests by Ultrasonics, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 4, No. 6, November (1976), pp397-404.
- 9) Swanson, S. R. et al., ASTM STP 415 (1967), pp 312.
- 10) Pierce, W. S., NASA TN D-4541 (1968).
- 11) 小俣, 長谷川, 低温における疲労き裂進展挙動 (第4報), 機講論, No. 770-11 (1977-10), pp80-82.