

ジャークドットセンサによる構造物の損傷検出

曾根彰¹ 増田新² 松浦孝³ 山村貴彦⁴ 山田眞⁵ 山本鎮男⁶

¹工博 京都工芸繊維大学教授 工芸学部機械システム工学科 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

²工博 京都工芸繊維大学助手 工芸学部機械システム工学科 (同 上)

³京都工芸繊維大学大学院生 機械システム工学専攻 (同 上)

⁴京都工芸繊維大学 工芸学部機械システム工学科 (同 上)

⁵工博 早稲田大学教授 理工学総合研究センター (〒162-0044 東京都新宿区喜久井町17)

⁶工博 早稲田大学客員研究員 理工学総合研究センター (〒169-0072 東京都新宿区大久保3-4-1)

In this paper, a jerk-dot sensor, which measures the second derivative of the acceleration, is developed. Its capability of detect the local damage in structural members is investigated through low-cycle fatigue tests, which prove its significant sensitivity to the abnormal responses due to the development of macroscopic damages. Further fracture tests are carried out to obtain the correlation between the measured jerk-dot and the crack depth, which suggests that this sensor could provide an early alert before the crack grows up the fatal stage compered with AE sensor and acclerometer.

Key Words : Health monitoring, Jerk-dot-sensor, Cantilever, Accelerometer, Damage detection, Acoustic Emission sensor, Low-cycle fatigue

1. 緒言

現存する構造物の殆どは部材の集まりである。この様な構造物は一つの部材が破損したことで構造物全体が破壊したという事故が非常に多い。この様な事故を未然に防ぐためにも、構造物のメンテナンスや稼働中止が適切な時期に行われることが重要である。疲労損傷に伴い、構造物部材に亀裂が発生すると、その後の荷重条件により亀裂が拡大するが、本研究ではその時に生じる異常な振動成分を測定するシステムについて研究する。亀裂の進展に伴って発生するであろう信号は一般に微細でノイズに覆われていると考えられる。従って、この異常な振動成分を背景雑音と区別して精度よく検出することが重要である。これを検出する手法をして梁の先端に加速度をつけることによって加速度の二階微分した値(加々加速度)を計測するセンサを考える。(以降ジャークドットセンサと呼ぶ。)本研究では試作したセンサの基本的性能を明らかにし、実際によく使用される部材を用いて亀裂試験を行い、その検出性能を検証する。

2. 原理

(1) メカニズム

ジャークドットセンサは図-1に示すように片持ち梁(長さ: l , 幅: w , 厚さ: d)の先端とベース

に加速度センサを取り付けたものであり、ベースを介して測定対象物に取り付けられる。加速度計の理論では、梁の1次共振点以下の振動域において、片持ち梁のたわみは基部の加速度に比例する。よって、梁のたわみの2階微分、つまり梁の先端とベースとの相対加速度は、基部のジャークドットに比例する。

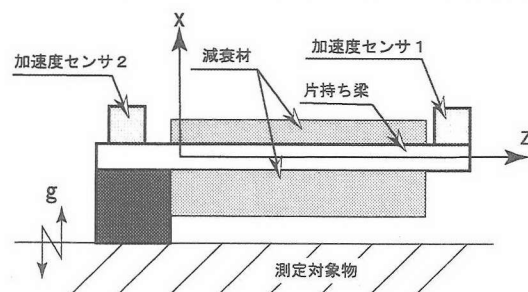


図-1 ジャークドットセンサのメカニズム

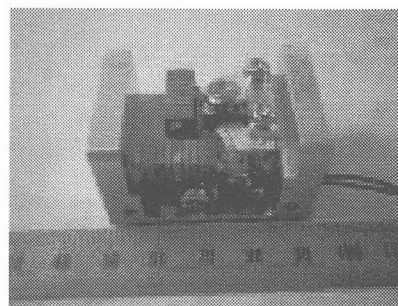


図-2 ジャークドットセンサ

(2) センサの特性

図-3 のようにジャークドットセンサを 3 自由度系でモデル化する。ここで (m_1, c_1, k_1) は片持ち梁を, (m_2, c_2, k_2) は加速度センサ 1 を, (m_3, c_3, k_3) は加速度センサ 2 を, それぞれ示す。運動方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + k_1 x_1 - k_2 x_2 &= -m_1 \ddot{x}_g \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 &= -m_2 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_g \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_3 \dot{x}_3 + k_3 x_3 &= -m_3 \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (1)$$

$$\left(\begin{array}{l} m_n : \text{各質点の質量} [kg] \\ c_n : \text{各質点の減衰係数} [Nm^{-1}s] \\ k_n : \text{各質点のバネ定数} [Nm^{-1}] \\ x_1 : m_1 \text{の取り付け面に対する相対変位} [m/s^2] \\ x_2 : m_2 \text{の} m_1 \text{に対する相対変位} [m/s^2] \\ x_3 : m_3 \text{の取り付け面に対する相対変位} [m/s^2] \\ x_g : \text{取り付け面の静止面に対する変位} \end{array} \right)$$

$t = 0$ の時に, $x_1 = \dot{x}_1 = \ddot{x}_1 = 0$, $x_2 = \dot{x}_2 = \ddot{x}_2 = 0$, $x_3 = \dot{x}_3 = \ddot{x}_3 = 0$ であることを考慮して, ラプラス変換領域で解くと

$$\begin{aligned} x_1(s) &= -\frac{m_1 m_2 s^4 + (m_1 + m_2) c_2 s^3 + (m_1 + m_2) k_2 s^2}{(m_1 s^2 + c_1 s + k_1)(m_2 s^2 + c_2 s + k_2) + m_2 s^2 (c_2 s + k_2)} x_g(s) \\ x_2(s) &= -\frac{m_2 c_1 s^3 + m_2 k_1 s^2}{(m_1 s^2 + c_1 s + k_1)(m_2 s^2 + c_2 s + k_2) + m_2 s^2 (c_2 s + k_2)} x_g(s) \\ x_3(s) &= -\frac{m_3 s^2}{(m_3 s^2 + c_3 s + k_3)} x_g(s) \end{aligned} \quad (2)$$

ジャークドットセンサの出力を加速度センサ 2 の出力に対する加速度センサ 1 の出力とする。加速度センサ 1, 2 の加速度出力を $\ddot{x}_2$, $\ddot{x}_3$, 感度を $\alpha_2 \cong \omega_2^2$, $\alpha_3 \cong \omega_3^2$ とすると, それぞれの加速度センサの共振周波数より十分に低い帯域で計測を行ったとすると, $\ddot{x}_2 = -\alpha_2 x_2$, $\ddot{x}_3 = -\alpha_3 x_3$ であり, ジャークドットセンサの出力 y は

$$y = \ddot{x}_3 - \ddot{x}_2 = -\alpha_3 x_3 + \alpha_2 x_2 \quad \text{と表される。}$$

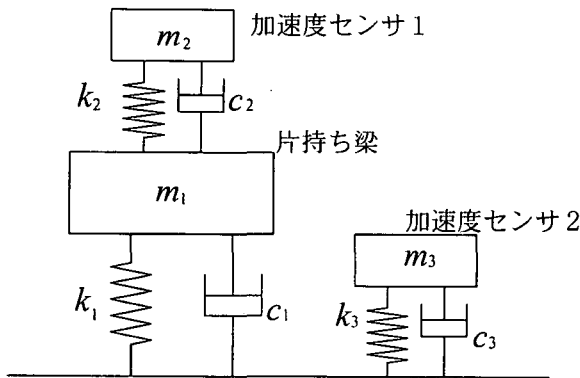


図-3 モデル化

入力ジャークドットに対するジャークドットセンサの出力の伝達関数を求めると

$$\frac{y(v)}{v^4 x_g(v)} = \alpha_3 \left\{ \frac{-v^2 + a_1 v + a_2 - a_3/v - a_4/v^2}{(a_5 + a_6) a_7} \right\} \quad (3)$$

但し,

$$\mu = m_1/m_2, \quad c_j \equiv 2\zeta_j \omega_j m_j, \quad k_j \equiv \omega_j^2 m_j, \quad \alpha = \alpha_2/\alpha_3, \\ s = i\omega, \quad v = \omega/\omega_j, \quad \eta = \omega_3/\omega_1, \quad \tau = \omega_3/\omega_2$$

$$\begin{aligned} a_1 &= 2i\{(1-\alpha)\zeta_1 + (1+\mu)\zeta_2\eta\} \\ a_2 &= (1-\alpha) + (1+\mu)\eta^2 + 4\zeta_1\eta(\zeta_2 - \alpha\zeta_3\tau) \\ a_3 &= -2i\eta\{\zeta_1\eta(1-\alpha\tau^2) + (\zeta_2 - \alpha\eta_3\tau)\} \\ a_4 &= \eta^2(1-\alpha\tau^2) \\ a_5 &= (-v^2 + 2i\zeta_1 v + 1)(-v^2 + 2i\zeta_2 \eta v + \eta^2) \\ a_6 &= \mu v^2(2i\zeta_2 \eta v + \eta^2) \\ a_7 &= -v^2 + 2i\zeta_3 \eta \tau v + \eta^2 \tau^2 \end{aligned}$$

である。1 例として $(m_1 = m_2 = m_3 = 3, \omega_1 = 600$

$\omega_2 = 60000, \omega_3 = 58000, \zeta_2 = \zeta_3 = 0.3)$ としたものを, また ζ_1 については図-4 の表のように変えたものを, 式(3)の伝達関数を表すボード線図, 図-4 に示す。振動を計測するセンサとして, 共振点以前でより広い周波数帯域でフラットなゲイン特性が得られ, そして高感度であることが望まれる。つまり, 伝達関数が共振点以前でなるべく一定であり, そして伝達関数の値が相対的に大きくなるのが良いと言える。

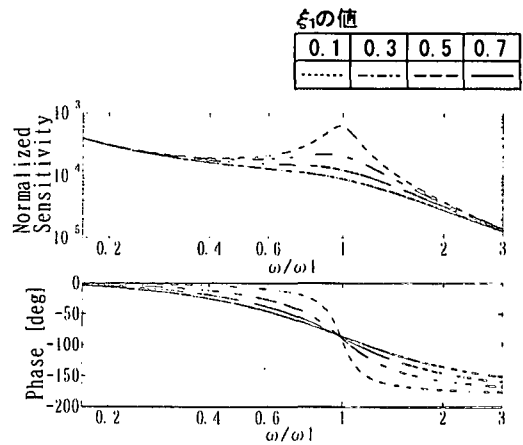


図-4 ボード線図

3. 基本的性能試験

ジャークドットセンサの検出器としての性能を明らかにするために、以下に示す、リニアリティ特性と周波数特性（ゲイン特性及び位相特性）に関する試験を行う。

(1) リニアリティ特性試験

本試験は、入力ジャークドットに対するジャークドットセンサの出力が線形であることを試験するものである。図-5にリニアリティ特性試験のための実験装置を示す。発振器により、正弦波波形を惹起させ、これをパワーアンプにて増幅させ、加振器を駆動し、それで振動台を振動させ、その出力はアンプ、ADボードを介して信号処理用のパソコンに取り込んだ。なお、この加速度センサの出力の差はデータ取得後、コンピュータ上で計算した。50, 100, 150, 200, 250Hzでのリニアリティ特性試験を行った。

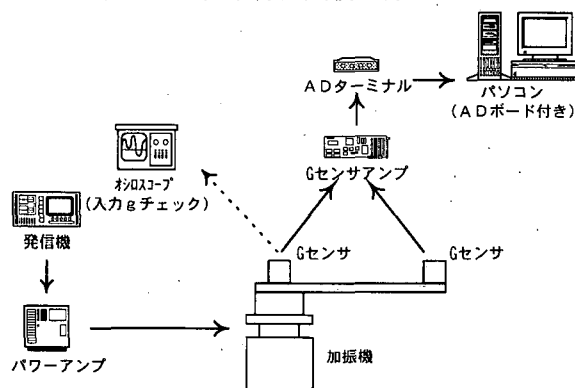


図-5 実験装置

a) 結果

結果の1例として、100Hzにおけるジャークドットセンサのリニアリティ特性を図-6に示す。計測したすべての周波数において、5500mV付近までは比例して増加することが確認できた。5500mV以上はどの周波数帯でも、出力波形が飽和してしまい正常な出力が得ることができなかった。

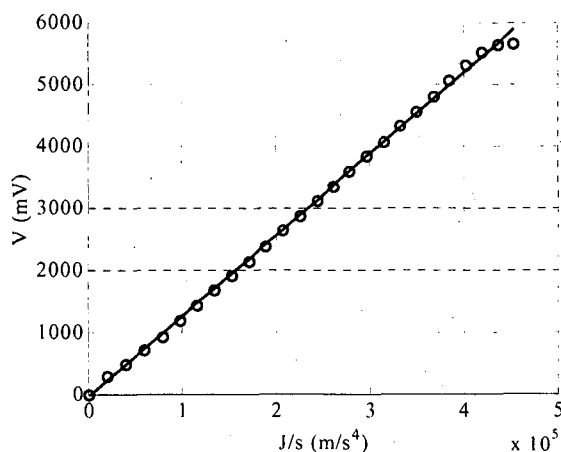


図-6 リニアリティ特性 (100Hz)

(2) 周波数応答試験

本試験は、各センサに対して入力に対して出力が比例して取り出せる周波数帯域、共振周波数を明らかにし、且つ、位相特性を把握することを目的とする。また、後に説明する低サイクル疲労試験で異常な振動成分を明確に測定するために、減衰を推定し、理想となる減衰比0.7を付与することを目的とする。実験装置は正弦波波形の代わりに有色雑音波形を用いるという点以外は、前述3.1の試験と同じものを用いた。

振幅倍率より共振点での値を考慮すると、減衰比が0.7程度とほぼ理想的な減衰効果を持っていることが分かる。また、位相遅れ曲線については入力加速度（ベースの加速度）を基準としたジャークドットセンサの位相遅れ特性を示している。正を進み、負を送れとして表現している。共振点まで位相遅れは、ないが、共振点を越えると180°遅れていることが分かる。20Hz以下では振幅倍率が大きくなっているのが分かる。これは2つの加速度センサの感度特性のずれによって、このような現象が現れたものだと考えられる。これより、本センサの有効な測定周波数範囲は20Hz～500Hz程度だと考えられる。

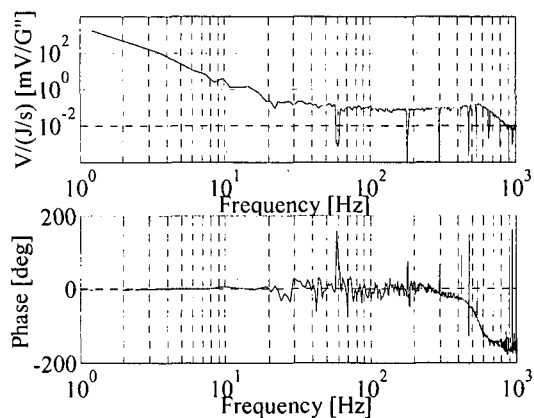


図-7 ボード線図

4. 低サイクル疲労試験

予め予備亀裂を施した剛部材を用いて、塑性変形突入時に得られる信号を、ジャークドットセンサ、及び、従来用いられている加速度センサ、AEセンサを用いて実験を行った。

(1) 試験方法

図-8に実験モデルを示す。まず、ベースと4本のスプリング、錘からなるフレーム内に、試験片下部は固定、上部はゴムで支持した。また、剛部材の運動を知るために、スプリングの1つにひずみゲージを貼り付けた。フレーム全体を加振台に乗せ、横方向の加速度を加え、図-9のように試験片に予め

予備亀裂を入れておき、ここに振動による集中応力が起き、亀裂進展が生じる様にした。また、各センサは図-9のように設置した。次に図-10の様に系全体が1次の共振状態となるように加振させ、試験片が破断するまで、計測を続けた。図-8のスプリングの一つに設置したひずみゲージを錘の相対変位に比例する量として計測した。変位の値が共に正の時、亀裂が開くように設定した。加振振幅と加振周波数は剛部材が470秒付近で破断するように設定されており、低サイクル疲労試験を行っていることになる。

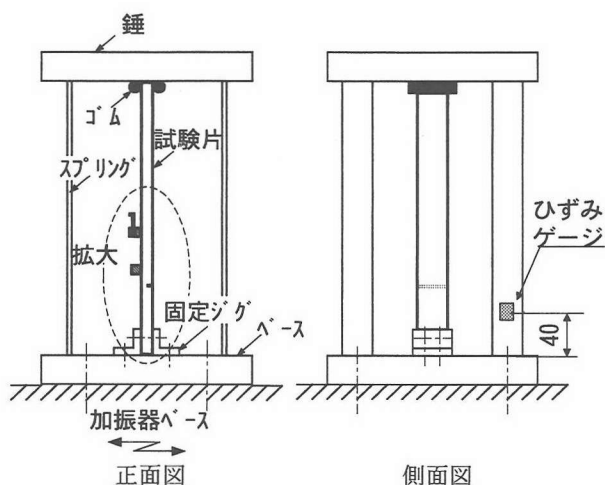


図-8 実験装置

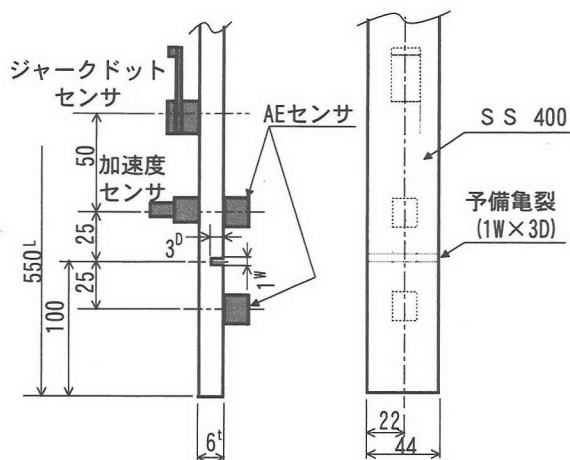


図-9 センサの配置

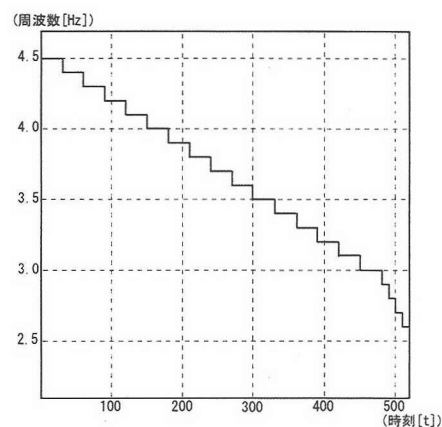
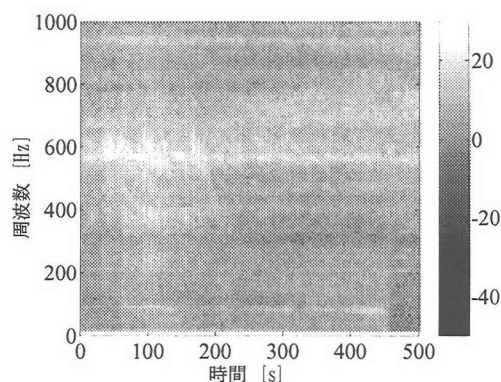


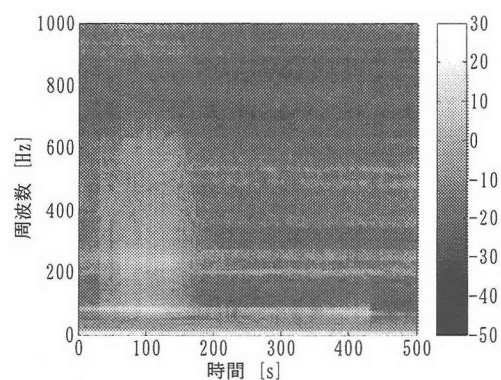
図-10 加振周波数

(2) 結果

図-11 ジャックドットセンサ及び、加速度センサの出力波形を窓フーリエ変換したものを示す。窓についてはHanningを用い、色については $20 \log_{10} |x|$ (dB)で表した。また、図-12に単位時間辺りのAEカウント数を、さらに図-13、図-14、図-15、図-16にはそれぞれ100秒時におけるジャックドットセンサ、加速度センサ、AEセンサ、錘の相対変位を示す。



(i) ジャックドットセンサ



(ii) 加速度センサ

図-11 出力波形とフーリエスペクトル

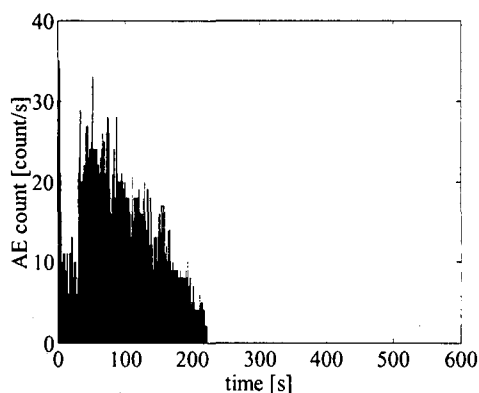


図-12 AEカウント

図-11より、加振開始直後から80Hz付近に信号が発生しており、この成分が時間の経過と共に変化しているのが分かる。これは試験片の1次の共振成分である。また、100秒前後から0Hz～800Hzと広範囲にわたって、信号が激しく応答しているのが分かる。図-12より、この時のAEカウント数を観測すると、その時刻に多くのカウントが発生しているのが分かる。これより、剛部材に亀裂の進展が始まったものと考えられる。100秒時の波形を詳しく観測すると、ジャークドットセンサで髭状の大きな応答を捕らえているのが良く分かる。一方、その時の加速度センサでも、そのような現象は観測することができるが、加振周波数成分などに埋もれてしまい、観測がやや困難であるように思われる。

1加振周期毎に2種類の髭状の信号が発生しており、同時刻に、AEを観測しているのが分かる。図-13と図-15に着目すると、髭の大きさに比例してAEエネルギーも大きくなっているのが分かる。すなわち、ジャークドット応答とAEには正の相関がある。さらに、図-16より、大きな髭は、予備亀裂が開→閉となる時に発生しており、小さな髭は予備亀裂が閉→開となる時に発生しているのが分かる。

以上より、ジャークドットセンサで捉えた激しい応答はAEセンサでも捕らえているのが分かり、ジャークドットセンサとAEセンサに相関があることが分かる。

加速度センサでも同様の現象を捕らえることができそうだが、目的の現象を抽出するためには信号処理が必要であり、そのような処理を施すのに、コストを要と考えられる。また、AEセンサでの計測は、高感度のアンプ・雑音源の排除、センサと測定物の距離などを考慮するなど、管理された測定環境が必要であり、尚且つセンサ自体が高価なものであるという問題がある。一方、ジャークドットセンサではあまり余分な処理を施さずに、このように、センサレベルで他の2つのセンサと同等、あるいはそれ以上の観測能力があるように思われる。

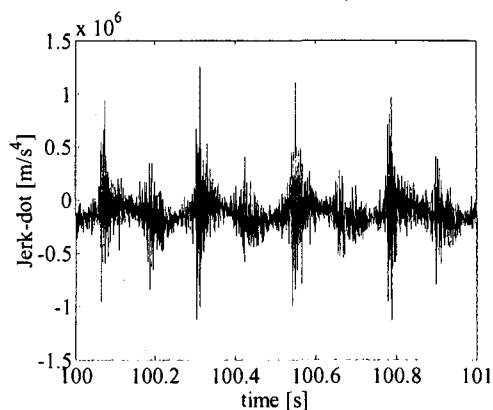


図-13 ジャークドットセンサ

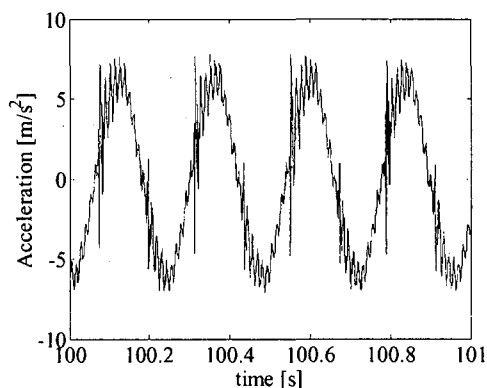


図-14 加速度センサ

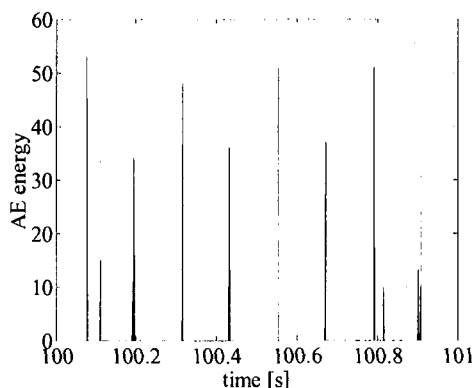


図-15 AEエネルギー

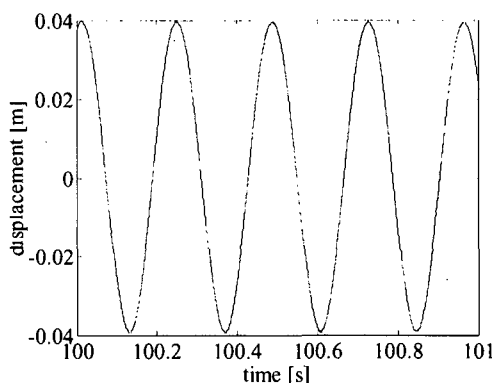


図-16 錘の相対変位

5. 破断面の進展観測実験

3種類のセンサによって、亀裂進展と相関があると思われる信号を検出することができたが、実際の亀裂進展現象との対応は明らかでない。そこで、実験の再現性が良好であることを利用して次のように亀裂の進展の様子を調べた。まず、4. 1と同じ条件で試験片の加振を開始し、加振後、100秒、200秒、300秒、400秒の各時刻で加振を終了した。試験片を精度良く、取り外して、必要な加工を施した後、引っ張り試験機で長手方向に引っ張って亀裂部を破断させた。200秒における破断面を図-17に示す。このように破断面から疲労亀裂の進展深さを調べ、結果を時間軸で整理した。

(1) 結果

図-17に200秒における破断面を、また、図-18に亀裂の進展と時間との関係を表したものを示す。これより100秒付近から亀裂の進展が始まり、時間に比例していることが分かる。また、ジャークドットセンサで不連続波形を捉えた200秒付近では亀裂の進展がかなり進行しているのが分かる。それ以降では、予備亀裂の反対側からも亀裂の進展が生じることも分かる。これより、ジャークドットセンサで不連続波形を捉えたときには既に巨視的な亀裂が発生していることが分かり、この時には使用を停止し、適切な処置を施すのが的確であると思われる。

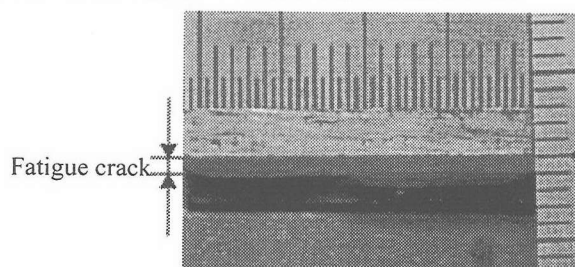


図-17 亀裂面

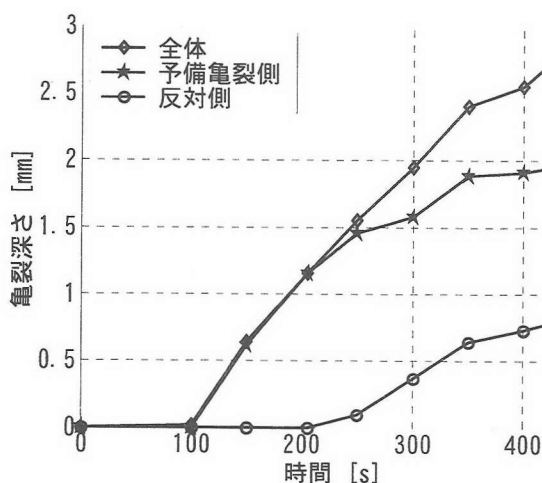


図-18 亀裂の進展

6. 結論

今回の実験で得られたものを以下のようにまとめる。

- ジャークドットセンサは加速度センサに比べると、亀裂進展開始時に生ずる髭状の高周波成分を背景雑音と区別して検出することが分かる。
- ジャークドットセンサで亀裂進展開始時に激しく応答した時にはAEセンサでも同様に応答していることが分かった。これより、ジャークドットに現れる髭状の応答はAEと相関があることが分かる。
- ジャークドットセンサ単体としての周波数応答性は、構造物のヘルスマonitoringにおいて使用するに当たり、十分な性能を有している。
- また、破断面を見ることによりジャークドットセンサで異常な振動成分を捉えたときには、疲労亀裂が発生し始めた時であり、この時点で、測定物の使用を停止し、今後の対策を講じることができるように期待される。

以上の成果より、本センサの実用に向けての課題と対策が明確となった。今後の本センサの改良を行いたい。

参考文献

- 田村雅己：振動ジャイロを用いた角速度センサによる構造物のヘルスマonitoringに用いる各種計測法に関する研究，京都工芸繊維大学 学位論文，pp.29-53,1999.
- 筒井真介：ジャークセンサによる構造損傷における不連続波形の検出，京都工芸繊維大学 平成12年度卒業論文，2001.
- 日本機械学会：振動・騒音計測技術，朝倉書店，pp. 59-84,94-98, 1993.
- 中川憲治，室津義定，岩壺卓三：工業振動学，森北出版，pp.52-54, 1992.
- 五嶋愛，ジャークドットセンサの開発と損傷モニタリングへの応用，(2001)，1-22，京都工芸繊維大学 平成13年度卒業論文.
- 大津正康，アコースティック・エミッションの特性と理論，(1988)，1-41，森北出版.