

高感度ジャーク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・山田眞⁴・山本鎮男⁵

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)

⁵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)

Detection of discontinuities in response of structure by using the jerk sensor combined with a vibratory gyroscope and a cantilever is reported in this paper. The vibratory gyroscope has high sensitivity. Firstly, the fundamental characteristics of jerk sensor are measured. In order to detect the development of crack in response on-line, the collapse tests using steel plate are conducted. The effectiveness of the jerk sensor is proven through the experiments.

Key Words : Health monitoring, Jerk sensor, cantilever, vibratory gyroscope, discontinuity

1. 緒言

機械・構造物が経年使用されるうちに構成材料の腐敗、クリープ、疲労等によって強度が低下する。このような構造物は繰り返し荷重を受けて塑性化し、クラックが生じる。このクラックが拡幅する際に生じる不連続な信号を適切に検出して、それを解析して疲労損傷の程度を把握することができれば、事故を未然に防ぎ、機械・構造物のメンテナンスを適切に施すことができる。これを機械・構造物のヘルスマニタリングと呼んでいる。

しかし、一般にこれらの信号は微細であり、ノイズに覆われている。従って、ヘルスマニタリングではノイズに覆われている微細な不連続信号を精度良く検出することが重要である。これを精度良く観測する方法として加速度の時間微分を観測する「ジャーク」センサに着目し、加速度センサと比較しつつ損傷検出の有用性を検証する。

2. 原理

(1) メカニズム

ジャークセンサは図-1に示す様に片持ち梁（長さ： l 、幅： w 、厚さ： d ）の先端に角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。片持ち梁の基部に加速度 g が作用した時、片持ち梁は加速度の大きさに応じて変形する。ここで、入力加速度 g が一定の加速度であれば、片持ち梁は一定の撓みを保持して静止するこ

とになる。この場合には片持ち梁の先端の加速度はゼロとなるので、角速度センサの出力もゼロとなる。角速度センサは、入力加速度 g に時間変化が起こった時に得られるもので、加速度 g の時間変化すなわち加加速度（ジャーク）に比例する電圧を出力することが出来る。

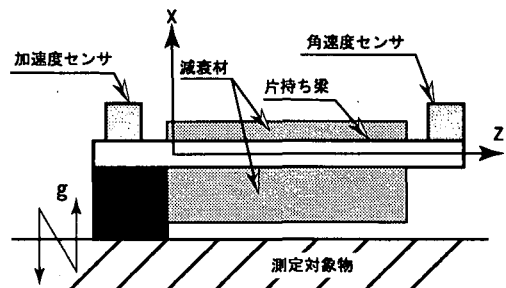


図-1 ジャークセンサ

(2) 理論

梁の先端の角速度 Ω は、位置 z における梁の撓みの角の時間微分なので、調和外力の場合、次のように書ける。

$$\Omega(t) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u(z,t)}{\partial z} \right) = j\omega \frac{du(z,t)}{dz} \quad (1)$$

ここで、片持ち梁の動特性としては次のオイラーベルヌーイの方程式に支配されるものとする。

$$\rho A \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 u(z,t)}{\partial z^4} = F(z,t) \quad (2)$$

この式の解は、以下のように規準モード $u_k(z)$ と規準関数 $q_k(t)$ の積の和で表される。

$$u(z,t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k(z) q_k(t) \quad (3)$$

また、規準関数 $q_k(t)$ について考える。片持ち梁の系に励振力 $Q(t)$ が作用すると考え、次のような運動方程式が立てられる。

$$M_k \ddot{q}_k(t) + C_k \dot{q}_k(t) + K_k q_k(t) = Q_k(t) \quad (4)$$

$q_k(t) = u_k e^{i\omega t}$ ($k=1,2,\dots,\infty$) として式(4)を解くと、次式が得られる。

$$q_k(t) = \frac{Q_k(t)}{-M_k \omega^2 + jC_k \omega + K_k} \quad (5)$$

は片持ち梁に作用する外力の周波数 ω の成分に対して、以下の様に表せられる。

$$q_k(t) = \frac{1}{j\omega} \frac{Q_k(z,t)}{C_k + j(M\omega - \frac{K_k}{\omega})} \quad (6)$$

さらに、 $Q_k(z,t)$ は片持ち梁に作用する一般化外力の周波数 ω の成分で次式の様に与えられる。

$$Q_k(z,t) = \int_0^l F(t) U_k(z) dz \quad (7)$$

式(1)について式(3)、(6)、(7)を考慮すると、

$$\begin{aligned} \Omega(t) &= j\omega \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^{\infty} U_k(z) q_k(t) \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^{\infty} U_k(z) \frac{\int_0^l F(t) U_k(z) dz}{C_k + j(M\omega - \frac{K_k}{\omega})} \end{aligned} \quad (8)$$

一方、外力 $F(t)$ は加速度 g による物体力なので、 $F(t) = \rho A g(t)$ (9)

片持ち梁の1次モードのみを考慮して簡略化すると、

$$\Omega(t) = \frac{\rho A \frac{\partial U_1(z)}{\partial t} \int_0^l U_1(z) dz}{C_1 + j(M\omega - \frac{K_1}{\omega})} g(t) \quad (10)$$

ここに、 M は角速度センサを含む片持ち梁系の全質量、 K_1 、 C_1 は式(3)によるモード展開における1次の規準座標系の等価バネ及び等価減衰係数である。さらに、単位加速度入力あたりの出力電圧を σ とすると、センサの出力電圧は、

$$V(t) = \sigma \frac{\rho A \frac{\partial U_1(z)}{\partial t} \int_0^l U_1(z) dz}{C_1 + j(M\omega - \frac{K_1}{\omega})} g(t) \quad (11)$$

加速度 g の時間微分をジャーク J と表現すると、

$$g(t) = \frac{dJ(t)}{dt} = \frac{J(t)}{j\omega} \quad (12)$$

従って、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として、以下の式が成り立つ。

$$V(t) = \frac{\sigma \rho A \frac{\partial U_1(z)}{\partial t} \int_0^l U_1(z) dz}{j\omega C_1 + j(M\omega - \frac{K_1}{\omega})} J(t) \quad (13)$$

つまり、片持ち梁の先端に取り付けられた角速度センサは式(11)又は、式(13)の応答を示すことになる。

3. 試作したジャークセンサの仕様

表-1に試作したジャークセンサの仕様を示す。ジャークセンサに用いた片持ち梁はアルミ材を用い、長さを変えて共振周波数と感度が異なる2種類のジャークセンサを用いた。使用した角速度センサは10Hzまでは位相の遅れ、進みはなく、それ以降は周波数の増加に対し一定の割合で遅れていく特性のものを用いた。100Hzでの遅れは数ms程度の微小なものであり、この程度の遅れ特性であれば、本研究では差し支えないと考え、採用した。

表-1 ジャークセンサの仕様

		ジャークセンサ A	ジャークセンサ B
片持ち梁部	材質 サイズ	アルミニウム 40mmL×30mmW×0.5mmT	
角速度センサ部	形式 サイズ 使用周波数 感度	セラミックジャイロ 20mmT×8mmW×8mmT DC~100Hz 1.1±20%mV/(rad/s)	
減衰部 (スポンジ)	材質 サイズ	メモリーフォーム 25mmL×30mmW 梁の上部×5mmT 梁の下部×15mmT	なし
全体	共振周波数 (1次) 感度	126Hz 0.040mV/(G/s)	153Hz 0.050mV/(G/s)

4. 基本性能試験

ジャークセンサの検出器としての基本的性能を明らかにする為、次に述べるリニアリティ特性と周波数特性(ゲイン特性、位相特性)に関する試験を実施する。

(1) リニアリティ特性試験

a) 試験方法

本試験では、入力は何れの周波数で固定して加速度振幅を変え、入力ジャックに対するジャックセンサの出力が線形性であることを示す。本試験では、発信器にて増幅し加振器を駆動して、加振されたジャックセンサ、加速度センサの出力はアンプ、ADボードを介して信号処理用のコンピュータに取り込み、結果を得る、という方法を取った。具体的には双方のセンサそれぞれにおいて共振周波数以下の100Hzで、入力加速度を変えながら、入力ジャックとジャックセンサの出力を得た。

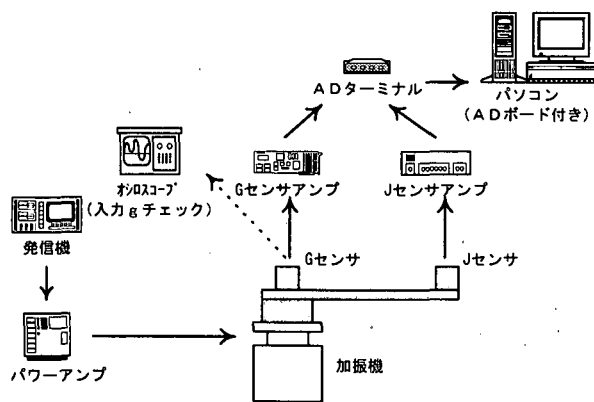


図-2 実験装置の概要

b) 結果

図-3に100HzにおけるジャックセンサAの結果を示す。この図よりリニアリティ特性（線形性）であることが分かった。

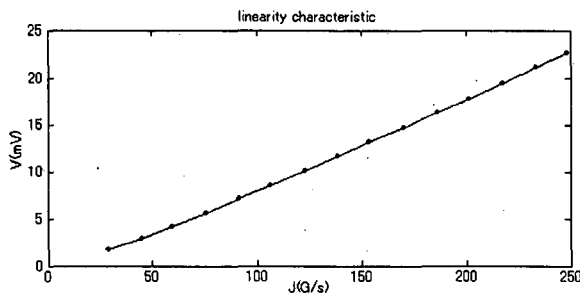


図-3 リニアリティ特性試験結果
(ジャックセンサA, 50Hz)

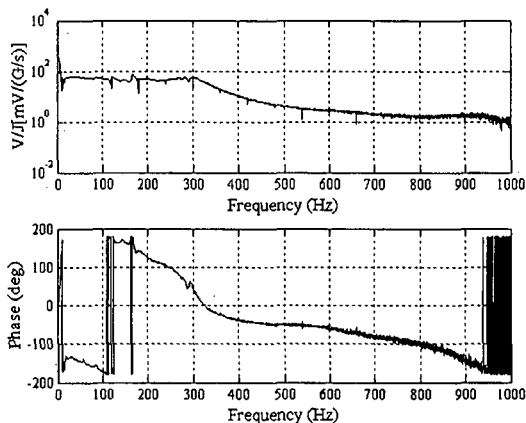
(2) 周波数応答試験

a) 試験方法

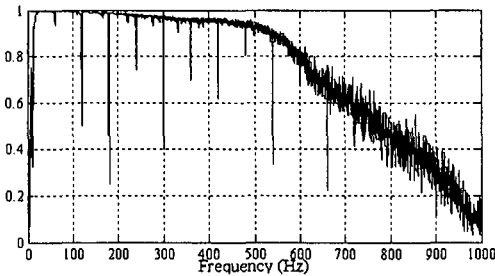
本試験は、各センサに対して入力に対して出力が比例して取り出せる周波数帯域、共振周波数を明らかにし、さらに、位相特性を把握することを目的とする。また、後に説明する異常信号検出性能特性で不連続波を明確に表すために、減衰を測定し、理想となる減衰比0.7を作成することを目的とする。実験装置は正弦波電圧の代わりに有色雑音電圧を用いるという点以外は、前述(1)節の試験と同じものを用いた。

表-2 計測コンディション (両試験共通)

項目	
サンプリング周波数 [Hz]	2000
全データ個数 [個]	2^{21}
1 サイクルデータ個数 [個]	2^{13}
平均回数 [回]	2^8



(i) ボード線図



(ii) コヒーレンス関数

図-4 周波数応答試験
(ジャックセンサA)

b) 結果

ジャークセンサの振幅倍率と入力に対する位相特性、及び入出力間の外乱に対する影響を考慮したコヒーレンス関数を図-3に示す。振幅倍率曲線は300Hz位までほぼ一定の値を示していることが分かる。これより、適正減衰の範囲内にあり、かなりの減衰が効いていることが分かる。また、位相曲線については100Hz位まで位相が遅れ、120Hz以降180°進みの状態となり、そこから320Hzまでは進みの状態となり、またそこから遅れの状態となる。また、コヒーレンス関数より、20Hz以下のところでは、かなり低い値となっている。これは、今回試験に用いた加振器では装置上の限界で入力加速度の検出が不安定であったことを意味している。また、300Hz以上の高周波でも次第に低い値となっている。これは片持ち梁の先端につけている角速度センサの検出周波数が低いため、出力がされなかったことを意味している。これより、このジャークセンサで検出できる周波数は200Hz位までと推測できる。

4. 異常信号検出性能試験

予め予備亀裂を施した鋼材試験片において、塑性変形突入時の不連続信号の検出性能をジャークセンサ及び加速度センサで比較する。

(1) 試験方法

図-5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。フレーム全体を加振台に乗せ、横方向の加速度を加え、図-5のように試験片に予め予備亀裂を入れておく。このように行うことによって、この部分に振動による集中応力が起き、できるだけ早く亀裂進展が生じる様にした。また、各センサは図-6のように設置した。次に図-7の様に系全体が1次の共振状態となるように加振し、試験片が破断するまで、計測を続けた。

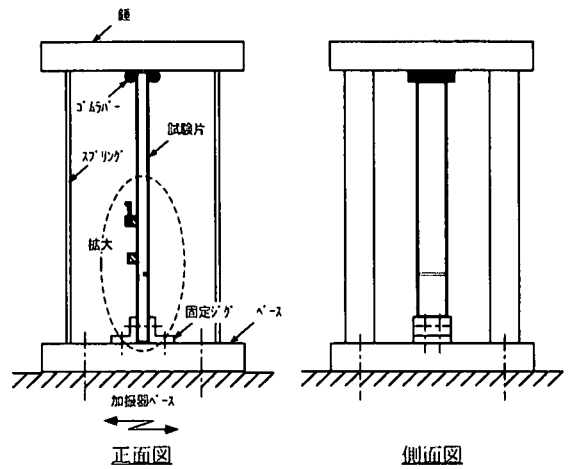


図-5 実験モデル

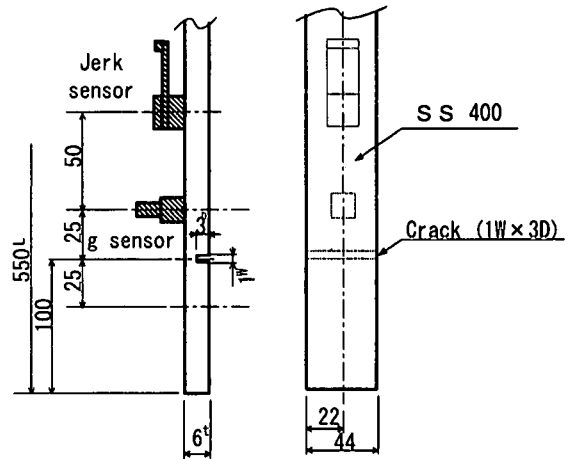


図-6 予備亀裂及びセンサの配置

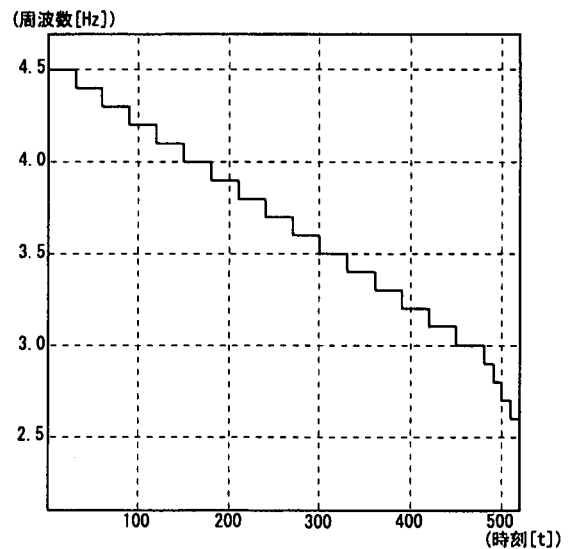


図-7 入力周波数

(1) 結果

図-8にジャークセンサAと加速度センサについて得られた出力波形及びFFTスペクトルの時間分布を表す。双方出力共に460秒付近で破壊に至った。加速度センサ、ジャークセンサのFFTスペクトル共に70Hz付近に山があるが、これは試験片の共振周波数である。またジャークセンサのFFTのスペクトルの120Hz付近の山はジャークセンサの共振周波数である。

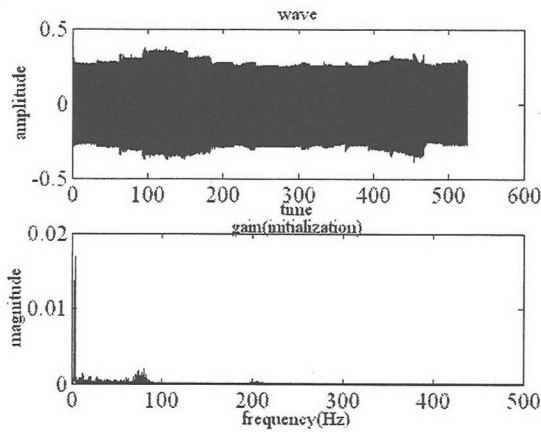
また、図-9にこの出力波形を窓フーリエ変換を用いて解析を行ったものを示す。窓についてはHanningを用い、色については $20 \log_{10} |x|$ (dB)で表した。さらに図-11では破断直前である、453秒付近での出力波形を示す。ここで図-10は昨年実験に用いたジャークセンサとの比較である。

図-9より大体90秒付近で試験片の共振である70Hzの信号が明確に出てきて、それより高周波部分の100~120Hz付近に信号が出ているのが分かる。

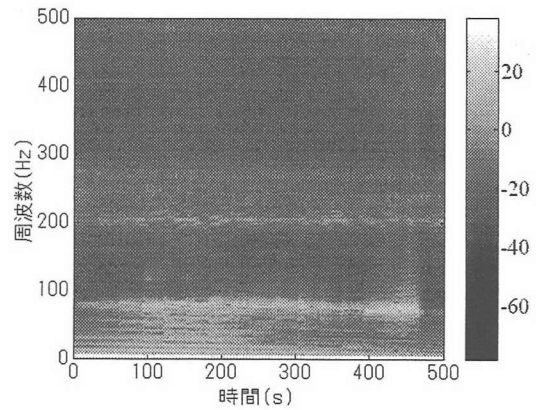
この時間帯辺りから亀裂が進展し始めたと思われる。

また、そこから時間が経過するにつれて試験片の共振点以下に信号が顕著に表れている。これは最初の亀裂が入ってから、亀裂が進展しやすくなり、更なる亀裂が少しずつ進展していつているものと思われる。そして、400秒を過ぎた辺りから激しい亀裂の進展のため試験片自体が自重に耐え切れなくなり、一気に亀裂が入り、破断したと思われる。

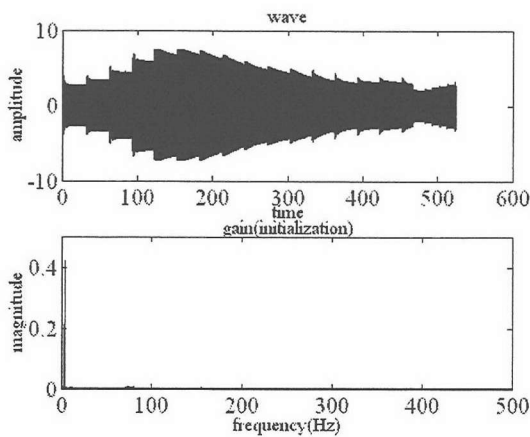
また、図-11の加速度センサの波形では試験片の共振による自由振動が卓越しており、不連続波形が捉えられていない。一方、ジャークセンサの波形を見ると、その影響は少なく、顕著に不連続波形を捕捉していることが分かる。また、図-10からでも昨年のジャークセンサと比較すると、今回の高感度のジャークセンサがより顕著に捕捉しているのが分かる。



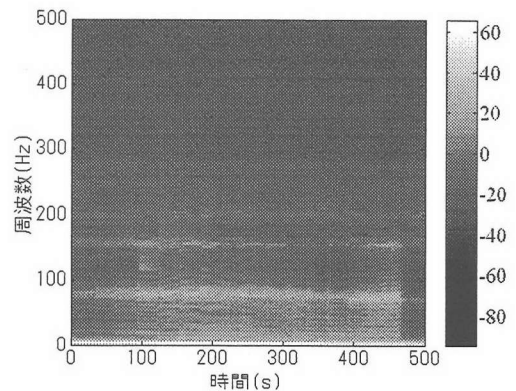
(i) 加速度センサ



(i) 加速度センサ



(ii) ジャークセンサ



(ii) ジャークセンサ

図-8 出力波形とFFTスペクトル (ジャークセンサA)

図-9 窓フーリエ変換 (ジャークセンサA)

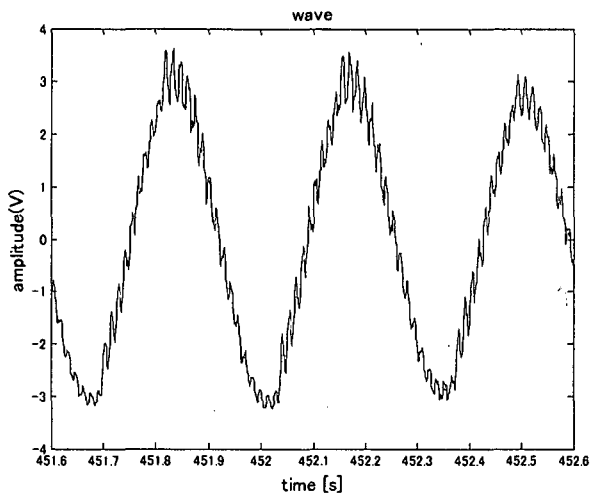
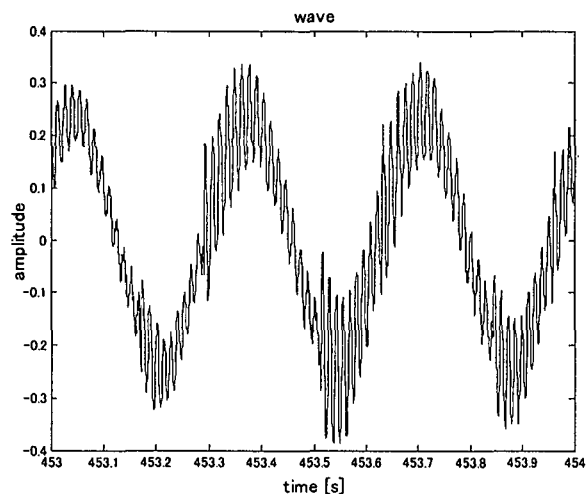
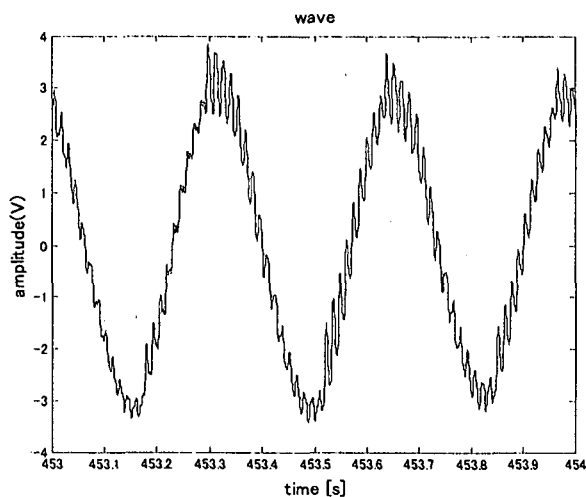


図-10 ジャークセンサ (昨年度)



(i) 加速度センサ



(ii) ジャークセンサ

図-11 不連続波形の捕捉状況

5. 結論

- ジャークセンサは加速度センサに比べSN比に優れ、微小な信号に対して高い応答性を示すことが分かった。また、亀裂進展時に生ずる不連続波形を強調して出力することが分かる。
- ジャークセンサ単体としての時間的応答性は、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。
- ジャークセンサの出力波形を窓フーリエ変換することによって、より明確に亀裂の進展状況を知ることが出来る。
- ジャークセンサを作成するに当たり梁上に減衰要素を付加させることにより、減衰を付加しないジャークセンサより、不連続波形が明確に判別でき、さらに高感度のセンサを用いることにより、より顕著に不連続波形が生じることが分かる。
- しかしながら、ジャークセンサでは、破壊の進む全領域で不連続波形を捕捉出来ないことも明らかになった。

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.