

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

曾根彰¹・筒井真介²・小山泰平³・山田真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)

²京都工芸繊維大学 工芸学部機械システム工学科 4 回生 (同 上)

³京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科 1 回生 (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. In this paper, specifically fundamental capacity of jerk-sensor is measured, and this sensor is compared with conventional gravity-sensor and AE sensor, and the jerk-sensor combined with the vibratory gyroscope and the cantilever is proposed to detect the discontinuities in signal on-line. The effectiveness of this sensor for the development of crack is proven through experiments.

Key Words : Jerk sensor, instrument, cantilever, vibratory gyroscope, discontinuity

1. まえがき

構造物は経年変化するとともにクリープや腐食等の原因によって強度が低下し、更に繰返し荷重によって疲労が進行して構造物の構成部材に亀裂が発生する。この亀裂は、その後の荷重条件に応じて拡大することが考えられるので、建設されてから長い年月が経った構造物の、この亀裂の進展を監視することは、事故を未然に防止し、適切なメンテナンスを施す意味で重要である。

本研究は、亀裂の先端がわずかに拡幅した際に構造物に生ずる不連続波を、高感度かつ安定的に観測する手法として、加速度の1回微分すなわち加加速度を観測する「ジャークセンサ」¹⁾に着目し、その基本的性能を明らかにし、AE (アコースティックエミッション) センサ²⁾や加速度センサ等の従来のセンサと比較しつつ、欠陥進展の検出の有用性を検証するものである。

2. ジャークセンサの原理

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 が作用したとき、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

先端の角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 に時間的変化が起こったときに得られるもので、加速度 g の時間的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できる。

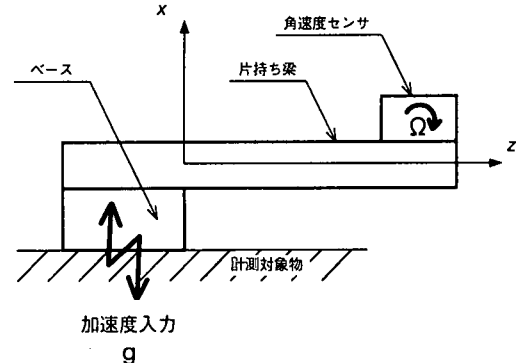


図-1 ジャークセンサの原理

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

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

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 $q_k(t)$ 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。

$$q_k(t) = \frac{1}{j\omega} \frac{Q_k(z, t)}{C_k + j(M\omega - \frac{K_k}{\omega})} \quad (4)$$

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。

$$Q_k(z, t) = \int_0^l F(t) U_k(z) dz \quad (5)$$

(1) について (3), (4), (5) を考慮すると、

$$\begin{aligned} \Omega(t) &= j\omega \sum_{k=1}^{\infty} U_k(z) q_k(t) \\ &= \frac{\partial}{\partial z} \sum_{k=0}^{\infty} U_k(z) \frac{\int_0^l F(t) U_k(z) dz}{C_k + j(M\omega - \frac{K_k}{\omega})} \end{aligned} \quad (6)$$

一方、外力 $F(t)$ は加速度 g による物体力なので、

$$F(t) = \rho A g(t) \quad (7)$$

片持ち梁の 1 次モードのみを考慮して簡略化すると、

$$\Omega(t) = \frac{\rho A \frac{\partial U_1(z)}{\partial z} \int_0^l U_1(z) dz}{C_1 + j(M\omega - \frac{K_1}{\omega})} g(t) \quad (8)$$

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、単位角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、

$$V(t) = \sigma \frac{\rho A \frac{\partial U_1(z)}{\partial z} \int_0^l U_1(z) dz}{C_1 + j(M\omega - \frac{K_1}{\omega})} g(t) \quad (9)$$

加速度 g の時間微分をジャーク J と表現すれば、

$$g(t) = \frac{J(t)}{j\omega} \quad (10)$$

従って、入力ジャーク J に対するジャークセンサの出力として、以下の式が成り立つ。

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

3. 試作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、厚さと長さを変えて共振周波数と感度が異なる 3 種類のジャークセンサ A, B, C を試作した。使用した角速度センサは 10 Hz 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行く特性のものを使用した。100 Hz 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使用するにあたり、支障のないものとして採用した。

表-1 ジャークセンサの仕様 (構成)

		ジャークセンサ A	ジャークセンサ B	ジャークセンサ C
片持ち梁部	材質	アルミニウム	—	—
	サイズ	50mmL×30mmW×0.5mmT	30mmL×30mmW×0.5mmT	50mmL×30mmW×1.2mmT
角速度センサ部	形式	セラミックジャイロ	—	—
	サイズ	16mmT×8mmW×5mmT	—	—
	使用周波数	DC ~ 100 Hz	—	—
	感度	0.66±20% mV/(rad/s)	—	—
全体 (ジャークセンサ)	共振周波数 (1 次)	83 Hz ²⁾	207 Hz ²⁾	273 Hz ²⁾
	感度	0.071 mV/(G/s) ²⁾	0.014 mV/(G/s) [*]	0.002 mV/(G/s) ²⁾

尚、表-1 の※印部は後述する試験において観測した結果を示している。

4. 基本的性能試験

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、下述のリ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。また、インパルス加振試験により、加速度インパルスの検出性能を確認する。

(1) リニアリティ特性試験

a) 試験方法

本試験は、入力はいかなる周波数で固定して加速度振幅を変え、入力ジャークに対するジャークセンサの出力が線形であるかを試験するものである。図-2 に実験装置の概要を示す。本試験では、発信器にて任意の正弦波電圧を惹起させ、これをパワーアンプにて増幅し加振器を駆動して、加振されたジャークセンサ、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、結果を得る方法を取った。具体的には、3 種のセンサそれぞれにおいて共振周波数付近までの任意の周波数を 4 ~ 5 点設定して、その各々で入力加速度を変えながら入力ジャークとジャークセンサ出力を得た。(表-3 参照)

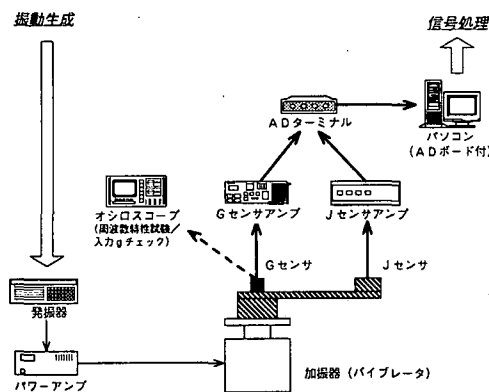


図-2 実験装置の概要

表-2 計測コンディション (全試験共通)

項 目	加速度センサ (入力)	ジャークセンサ (出力)
サンプリング周波数 [Hz]		2000
データ個数 [個]		4096
トリガ電圧 [mV]		1
駆動電圧 [V]	—	3
アンプ倍率	×1	×100
感度	49.6 $\mu\text{C}/\text{G}$	表1参照
共振周波数 (1次)	115 Hz	

表-3 周波数設定と入力加速度設定

	ジャークセンサ A	ジャークセンサ B	ジャークセンサ C
設定周波数 [Hz]	10, 30, 50, 80	10, 50, 100, 200	10, 50, 100, 200, 270
入力加速度 [G]	0.1~1.0 (0.1間隔) 1.0~9.0 (1.0間隔)	←	←

b) 結 果

全てのジャークセンサにおいて、設定周波数の違いに依らず、センサ出力は70mV付近までは比例して増加することが確認できた。70mV以上は全てのジャークセンサでどの周波数帯でも、出力波形が飽和してしまい正常な出力が得られなくなった。これは、表-1の角速度センサ部の記述から $\pm 90 \text{ deg/sec}$ の検出角速度に対して、 $0.66 \pm 20 \% \text{ mV/deg/sec}$ の感度を有していることから、角速度センサの検出角速度が限界に達した為に生じた現象であることが分かる。また、共振周波数付近の周波数では小さい入力でも大きく出力される傾向も確認できた。

結果の一例として、図-3に50HzにおけるジャークセンサAの結果を示す。この図よりジャークセンサAは、入力1,000G/s(出力70mV)付近までは比例を示し、これ以降は前述の要因より出力が停滞していることが分かる。尚、B、Cセンサにおいても共振周波数付近(1次)では出力が過大(飽和)となり、出力70mV付近を境に線形性を失うことも確認した。

本試験より、全てのジャークセンサは角速度センサの検出能力の限界を上限としてリニアリティ(線形性)を有することが分かった。

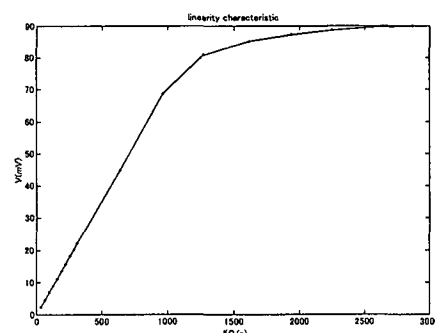


図-3 リニアリティ特性試験結果
(ジャークセンサA, 50Hz)

(2) 周波数特性試験

a) 試験方法

本試験は、入力に対して出力が比例して取り出せる周波数帯域を明らかにし、また位相特性を把握することを目的とする。入力加速度振幅を一定にしつつ入力周波数を変えていき、周波数毎に出力を得る。実験装置は前述(1)節の試験と同じものを用い、図-2において、入力加速度を一定に保つ為にオシロスコープを用い、周波数毎に加速度振幅を調整しつつ試験を行った。(表-4参照)

表-4 入力加速度設定

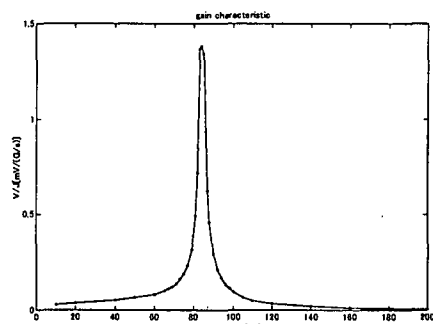
	ジャークセンサ A	ジャークセンサ B	ジャークセンサ C
入力加速度 [G]	0.11	0.35	←

b) 結 果

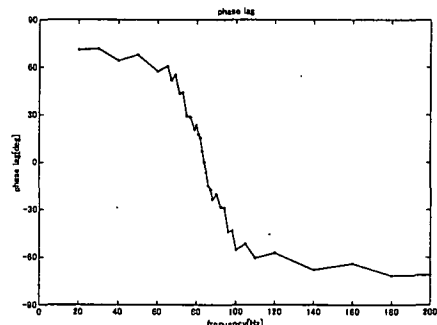
図-4に結果の一例としてジャークセンサAについて、縦軸にジャーク感度(mV/G/s)をプロットしたゲイン特性を上段に、入力加速度に対する位相遅れ特性を下段に示す。位相遅れ特性は進みを正、遅れを負に取っている。ゲイン特性の突起部分は1次の共振周波数を示している。共振点は事前にインパルス入力を与え、そのスペクトルより把握しておいた。ジャークセンサAの場合は83Hzで、B、Cはそれぞれ207Hz、273Hzにあり、B、Cにおいても図-4のように共振点を中心とした山を持つゲイン特性が得られた。

得られたゲイン特性からは概ねどのジャークセンサも共振周波数手前20~30Hz付近までの領域で周波数に比例した出力を示すことが分かった。つまり、この領域を測定領域とすることで安定した感度での検出が可能となる。入力加速度は、共振時にジャークセンサの出力が飽和しないレベルで設定しているが、20Hz未満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となった為、その領域は本結果に反映していない。

位相遅れ特性からは、どのセンサも入力に対し概ね 90° 進みの状態から徐々に遅れ傾向を示し、共振点で急激に遅れが進行し、これ以降また徐々に遅れ傾向を示すことが分かった。ジャークセンサの出力は入力加速度の1回微分を示す為、共振点以下の領域では 90° の進みを示すことになるが、角速度センサの性能として 10Hz 以降は周波数に比例して遅れて行く特性を持っている為に結果として 90° 進みを起点として徐々に遅れ傾向を示しているものと考えられる。本研究で扱うジャークセンサは1次の共振点以下を使用領域とすることを前提としているが、この領域では入力に対する位相の差は全般的に進みの範囲であり、時間的応答性の観点からは十分に研究の目的に沿うものであることが分かる。



(i)ゲイン特性



(ii)位相遅れ特性

図-4 周波数特性試験結果
(ジャークセンサA)

(3) インパルス応答試験

a) 試験方法

本試験は、突発的な入力（加速度インパルス）を加えた場合の応答性能をジャークセンサと加速度センサで比較するものである。図-5に本試験の実験装置の概要を示す。ジャークセンサを図に示すようなダンパー（硬質ゴム）に固定し、インパルスハンマーでジャークセンサの根元中央部にインパルス加速度を加え、ジャークセンサと加速度センサの出力を得て、前述(1)節あるいは(2)節の試験同様にパソコンに取り込み、解析を行った。

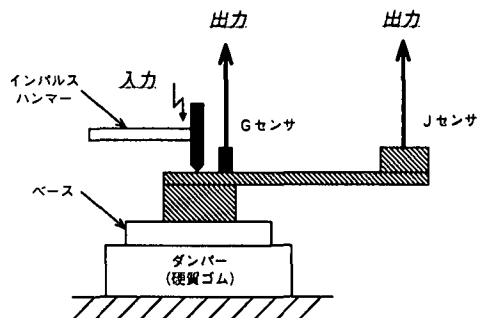
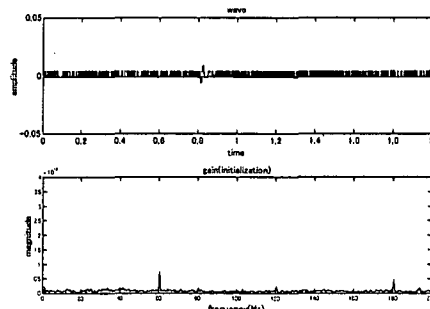


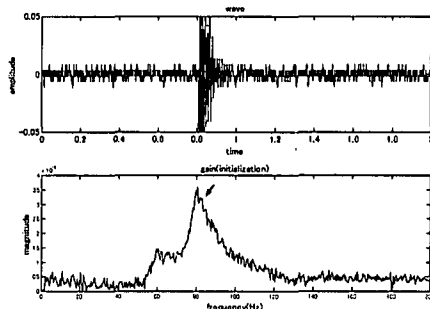
図-5 インパルス応答試験の概要

b) 結果

図-6に結果の一例としてジャークセンサAについての試験で得られた加速度センサ及びジャークセンサの出力波形とFFTスペクトルを示す。矢印部はジャークセンサの共振周波数を示す。



(i) 加速度センサ

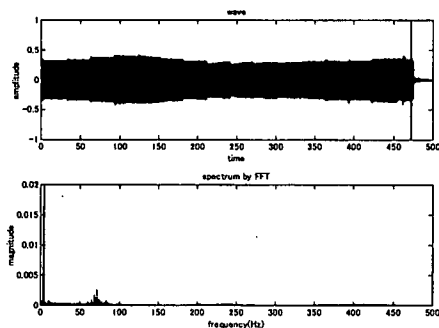


(ii) ジャークセンサ

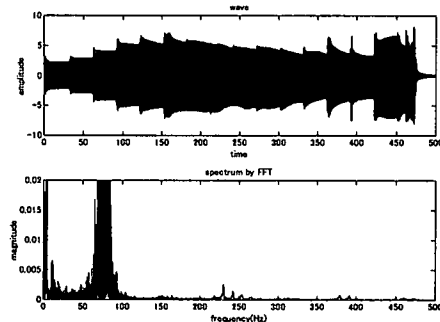
図-6 インパルス応答試験結果
(ジャークセンサA)

本試験においてインパルス状の不連続波の入力前後には実験装置に外力を加えていないので出力波形上のランダムノイズの発生源は電氣的ノイズであると考えられる。

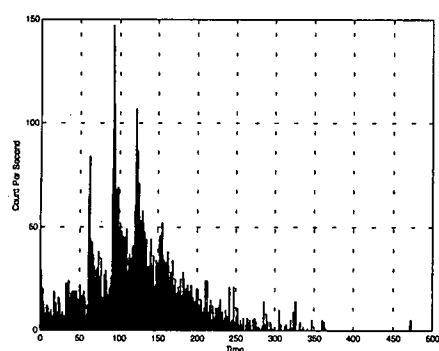
出力波形をジャークセンサと加速度センサで比較すると、どのタイプのジャークセンサも加速度センサに比べてランダムノイズとインパルス信号の出力の比、つまりSN比が格段に優れていることが分かった。加速度センサに比べ、ジャークセンサの方がインパルス波形後に減衰波形が続くが、これは片持ち梁の減衰振動であること



(i) 加速度センサ



(ii) ジャークセンサ

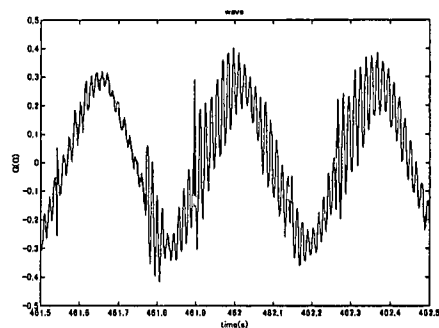


(iii) A E波発生の時間分布

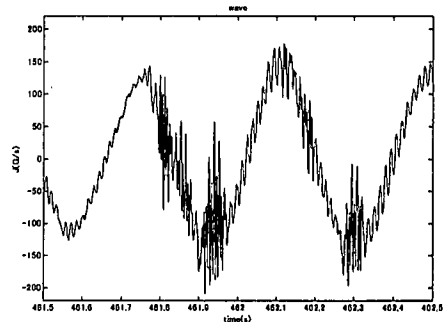
図-10 波形とFFTスペクトル及びA E波発生
の時間推移(ジャークセンサA)

6. 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を強調して出力することが出来る。
- ジャークセンサに用いる角速度センサの検出角速度及び感度を改善することにより、ジャークセンサの検出出力の上限を向上することが見込める。
- ジャークセンサ単体としての時間的応答性は、構造物のヘルスマニタリングにおいて使用するにあたり、十分な性能を有している。



(i) 加速度センサ



(ii) ジャークセンサ

図-11 不連続波の捕捉の比較

- ジャークセンサの設計時に、片持ち梁の共振周波数を低くかつ計測対象の周波数応答が小さい領域に設定することで、より感度良くまた波形歪みの少ない安定した不連続波の捕捉が可能となるものと考えられる。
- A E波は主に構造物の疲労損傷の前半以前に発生し、不連続波は破壊直前に発生する。このことより、A E波と不連続波の発生要因は別であり、直接の因果関係はないものと考えられる。

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。今後の本センサの発展に繋げたい。

謝辞：本研究を行うにあたって、終始にわたりご指導頂いた(株)ライフテック研究所の田村雅己氏に対し、深く感謝の意を表します。

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ニタリング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.
- 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論，森北出版，pp.1-41,1988.