

# ジャークセンサによる構造物の 地震応答に含まれる不連続点の検出

曾根彰<sup>1</sup>・山田真<sup>2</sup>・山本鎮男<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>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 building on earthquake by using the jerk sensor combined with a vibratory Gyroscope and a cantilever is reported in this paper. It is reported by authors that the discontinuities generated from the elastic region to plastic region in the observed response of structure is detected by the wavelet analysis of it. As the wavelet analysis requires the numerical computing process, it can not be used on-line monitoring. In this paper, 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 is proven through experiments.

**Key Words** : Cantilever, jerk sensor, vibratory gyroscope, discontinuity

## 1. まえがき

筆者らは履歴復元力特性を有する建築物が地震動を受けて弾性域から塑性域に突入する際に生じる加速度応答の不連続点をウェーブレット解析によって検出しうることを示した<sup>1), 2), 3)</sup>。このように信号の中に含まれる不連続点を検出するのにウェーブレット解析が有効であることを明らかにしたが、ウェーブレット解析にはコンピュータによる高速の数値計算処理が必要で、信号をリアルタイムにウェーブレット解析することは出来ない。

筆者らは振動ジャイロを用いた角速度センサと片持ち梁を組み合わせたジャークセンサを創案、試作して性能評価を行い所定の精度を確保できることを確認した。このジャークセンサを用いて、建築構造物が地震荷重等を受けて弾性域から塑性域に突入する際の応答波形を実験室におけるモデルにおいて計測し、波形中に含まれる不連続点の検出の精度等をウェーブレット解析の場合と比較して、実用のもつを得た。検出可能なジャークまたは加速度の周波数は0~200Hz程度までと、比較的低周波であるので、建築構造物の比較的低周波の振動における塑性域への突入現象を観測して、制振制御の制度を向上させることが出来る。また、建築構造物の損傷進展の最終段階、破断に至る直前に検出することにより、可動構造物の運転停止や、避難等の安全措置を講ずることが出来る。将来、振動ジャイロの検出周波数帯域の向上に伴い、ジャークセンサの周波数帯域も向上するので、より高周波振動における塑性域

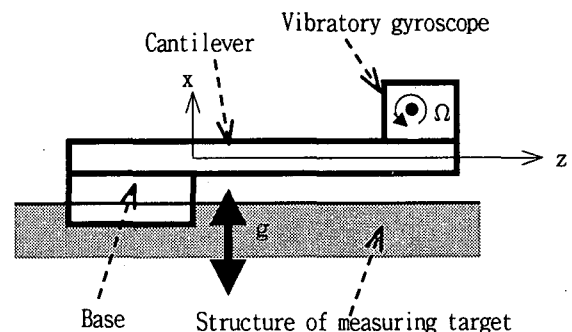


図-1 ジャークセンサの原理

の突入や、損傷進展のより早い時期での検出が可能になると考える。

## 2. 振動ジャイロと片持ち梁を組み合わせた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:  $l$ , 厚さ:  $d$ , 幅:  $w$ )の先端に振動ジャイロを取り付けたものである。片持ち梁はベースを介して測定対象となる構造物へ取り付けられる。振動ジャイロは角速度を検出するセンサで、片持ち梁の曲げ変位に伴って発生する角速度 $\Omega$ を検出し、電圧として出力する。図-1に示す様に片持ち梁

の基部に加速度  $g$  が作用したとき、片持ち梁は加速度  $g$  の大きさに応じて変形する。片持ち梁が変形すると片持ち梁の先端に角速度が生じ、それが振動ジャイロ<sup>4), 5), 7)</sup>で検出される。

図1における片持ち梁の時刻  $t$  における位置  $z$  における  $x$  方向の変位  $u(z, t)$  はモーダル解析により次式で与えられる。

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

ここに、 $U_k(z)$ 、 $q_k(t)$  は片持ち梁系のモード  $k$  の基準関数および基準座標である。振動ジャイロと片持ち梁からなるジャーク検出機構は、計測振動数範囲を1次共振点以下に限定しているため、片持ち梁の先端の変位  $u$  は次の様に近似される。

$$\begin{aligned} u(z, \omega, t) &= U_1(z) q_1(\omega, t) \\ &= U_1(z) \frac{1}{j\omega} \frac{Q_1(\omega, t)}{C_1 + j(M\omega - \frac{K_1}{\omega})} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに  $M$  はジャークセンサを含む片持ち梁系の全質量、 $K_1$ 、 $C_1$  は式(1)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および等価減衰係数である。 $M$  に片持ち梁の全質量を仮定すると、実験的または有限要素法等で得た1次の共振振動数から  $K_1$  を、実験的に求めた1次の共振振動の減衰曲線から  $C_1$  を求めるものとする。また、 $Q_1$  は1次の一般化外力で、

$$Q_1(\omega, t) = \int_0^l F(z, \omega, t) U_1(z) dz \quad (3)$$

となる。ここに  $F(z, \omega, t)$  は円振動数  $\omega$  における調和加振外力成分としている。式(2)で与えられる変位  $u$  と片持ち梁の表面の角速度  $\Omega$  の関係は、

$$\begin{aligned} \Omega(z, \omega, t) &= \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u(z, \omega, t)}{\partial z} \right) = j\omega \frac{\partial u(z, \omega, t)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial U_1(z)}{\partial z} \frac{Q_1(\omega, t)}{C_1 + j(M\omega - \frac{K_1}{\omega})} \end{aligned} \quad (4)$$

外力  $F$  は加速度  $g$  による物体力なので片持ち梁の単位長あたりの部材断面式として、

$$F(z, \omega, t) = \rho A g(\omega, t) \quad (5)$$

が得られる。なお、上式においてはジャークセンサの質量は無視するものとする。上式を式(3)に代入した後、(4)に適用すると、片持ち梁の表面の角速度  $\Omega$  として次式が得られる。

$$\Omega(z, \omega, t) = \frac{\rho A \frac{\partial U_1(z)}{\partial z} \int_0^l U_1(z) dz}{C_1 + j(M\omega - \frac{K_1}{\omega})} g(\omega, t) \quad (6)$$

単位角速度入力あたりの振動ジャイロの出力電圧を  $\sigma$  とすると、ジャークセンサの出力電圧  $V$  は次式となる。

$$V(z, \omega, t) = \sigma \Omega(z, \omega, t) \quad (7)$$

加速度  $g$  の時間微分をジャーク  $J$  と表現すれば、

$$g(\omega, t) = \frac{J(\omega, t)}{j\omega} \quad (8)$$

そして、ジャークセンサの出力電圧  $V$  として式(9)が得られる。

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

単位ジャーク入力あたりのジャークセンサの出力電圧をジャークセンサのジャーク感度と呼び  $S_J$  で表す。一方、単位加速度入力あたりのジャークセンサの出力電圧をあえてジャークセンサの加速度感度と呼び  $S_g$  で表す。

$$S_J = \frac{V(z, \omega, t)}{J(\omega, t)} = \frac{\sigma}{j\omega} \frac{\rho A \frac{\partial U_1(z)}{\partial z} \int_0^l U_1(z) dz}{C_1 + j(M\omega - \frac{K_1}{\omega})} \quad (10)$$

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

入力振動の角周波数  $\omega$  が共振角周波数  $\omega_1$  より十分小さい範囲では式(10)、(11)の分母の因子、

$$C_1 + j(M\omega - \frac{K_1}{\omega})$$

虚部の第2項が他の項より大きくなるので式(10)、(11)は次式のように簡素化される。

$$S_J \approx \sigma \frac{\rho A \frac{\partial U_1(z)}{\partial z} \int_0^l U_1(z) dz}{K_1} \quad (12)$$

$$S_g \approx j\omega\sigma \frac{\rho A \frac{\partial U_1(z)}{\partial z} \int_0^l U_1(z) dz}{K_1} \quad (13)$$

式(12)および(13)はジャークセンサの加速度感度  $S_g$  が周波数に比例して増大するのに対し、ジャーク感度  $S_j$  の方は周波数に関わらず一定になる。これが本提案のセンサをジャークセンサと表現する所以である。

### 3. 試作したジャークセンサの特性

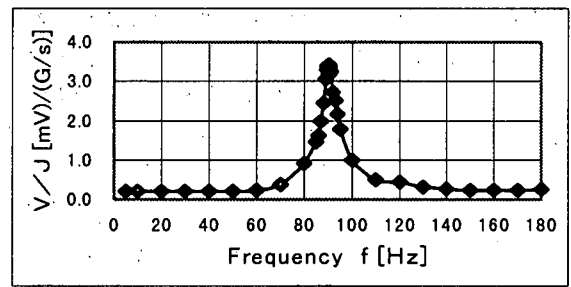
ジャークセンサに用いた片持ち梁はアルミ材料を用い、厚さと長さを変えて共振周波数と感度の異なる2種類のジャークセンサA, Bを試作した。また、使用した振動ジャイロは200Hzまでの角速度を検出可能である必要から、筆者らが設計試作したものを用いた。

次に、入力を加速度入力ではなくジャーク入力として見て、単位ジャーク入力あたりのジャークセンサAの出力(ジャーク感度)の周波数特性の絶対値を図-2に示す。図-2に示す様に、共振周波数90Hzよりも低周波側の5~60Hzの範囲で一定値  $0.01 \text{ (}^\circ/\text{s) / (G/s)}$  のジャーク感度特性となっている。

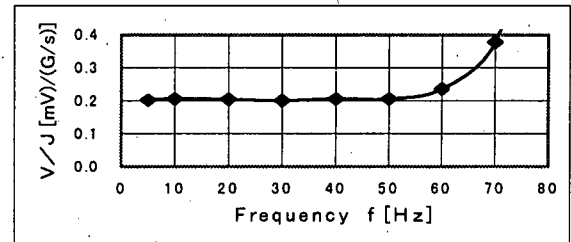
### 4. ジャークセンサによる亀裂進展時の不連続点の検出

以上述べたジャークセンサを地震時における建築物の塑性域突入時の不連続点の検出に用いることを考える。塑性域突入を観測するための実験室モデルとして図-3に示す亀裂進展実験装置を使用した。図-3に示す試験板はアルミ、スチールの2種類を用意し、ベースと4本の板バネ、質量よりなるフレーム内に、試験片下部は固定、上方はゴムにより支持した。この様に構成した固有振動数4.3Hzのフレーム全体を加振台に乗せ、横方向に一定振幅の調和加振加速度を加え、試験片に亀裂進展を生じる様にした。試験片の下部には亀裂進展を促進するため、あらかじめ亀裂を設定しており、ここに振動による応力集中が起こる様にした。

図-4にアルミ試験片の試験開始より267秒後に観測された亀裂進展時の加速度センサおよびジャークセンサの波形を示す。なお、波形記録時間は0.4秒である。本実験において図-4の観測データが亀裂の進展に対応していることは、試験片の観察により確認している。また、本計測は亀裂進展時のアコースティックエミッションの計測の時刻歴と本測定方法による時刻歴を対比して本計測方法の示す不連続波の発生時刻と、アコースティックエミッションの発生時刻が正確に一致することを事前に確認しておこなった。この図に示すように、加速度センサで



(a) Whole View



(b) Zoomed View

図-2 ジャークセンサAのジャーク感度の周波数特性

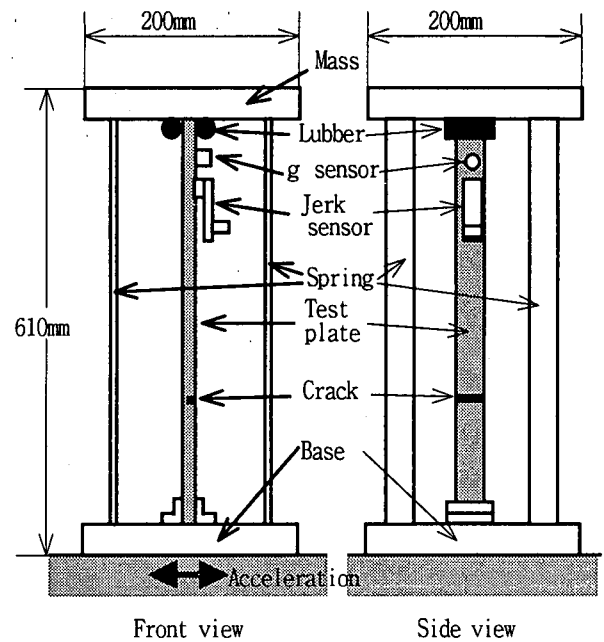


図-3 亀裂進展実験装置

は判別困難な亀裂進展がジャークセンサでははっきりととらえられていることがわかる。

### 5. 結び

構造物の亀裂進展時に発生する不連続波は微弱で、低周波のランダムノイズに埋もれており、通常の加速度センサ

では検出することが困難である。この問題の解消のために加速度センサ出力波形のウェーブレット変換が行われてきた<sup>6)</sup>。しかしながらウェーブレット変換は現在のところ、変換の計算のためにいったん加速度センサの出力波形をデータとしてコンピュータ記憶装置に蓄積した後に事後計算することしか出来ない。

本論文に提案したジャークセンサを亀裂進展検出に利用すると、ウェーブレット変換と同様に不連続波の検出に有利となる。ジャークセンサは既存の比較的安価で小さな振動ジャイロと片持ち梁を組み合わせて、入力する加速度の時間微分を検出することにより、不連続波に特有の高周波成分を検出することにより、ウェーブレット変換と同等の不連続波検出能力を有している。

本論文では建築物の地震応答のジャーク（加加速度）を観測して地震応答波形中に含まれる不連続点をオンライン、リアルタイムで検出することを企画し、アルミやスチールの板を用いて建築物の模擬実験を実験室内で行ったが、不連続波が強調されるので亀裂進展の検出は観測者によるオシロスコープの目視でも確認できる他、ジャークセンサの出力を自動的にレベル判定することにより無人でも亀裂進展の検出がおこなえる。この亀裂進展の検出方法の有効性、オンライン性、リアルタイム性は建築物にも十分適用できるものである。本論文でジャークセンサを考案、開発し、実験に基づいて、次のことを確認した。

- (1) ジャークセンサを用いることにより、低周波側のランダムノイズに埋もれた不連続波を選択的に検出することが出来ること。
- (2) ジャークセンサの共振周波数領域を用いることにより周波数成分が既知の不連続波をより高感度に、選択的に検出することが出来ること。
- (3) ジャークセンサにより現実の亀裂進展時に発生する不連続波の選択的検出をリアルタイムに行えること。

これらの成果により、本提案によるジャークセンサを観測に用いると、建築物の強震時の制御あるいは損傷の進展予測に有効であると思われる。

謝辞：本研究の理論展開と実験実施において、(株)ライフテック研究所の田村雅巳氏の協力を得られたことを記して、感謝の意を表します。

#### 参考文献

1) 曾根彰, 他4名: ウェーブレット変換を用いた機械・構造物のヘルスマonitoringシステム(正規直交ウェーブレットの生成と断続的異常信号の検出), 日本機械学会論文集C編, 第61巻, 第586号, pp.166-172, 1995.

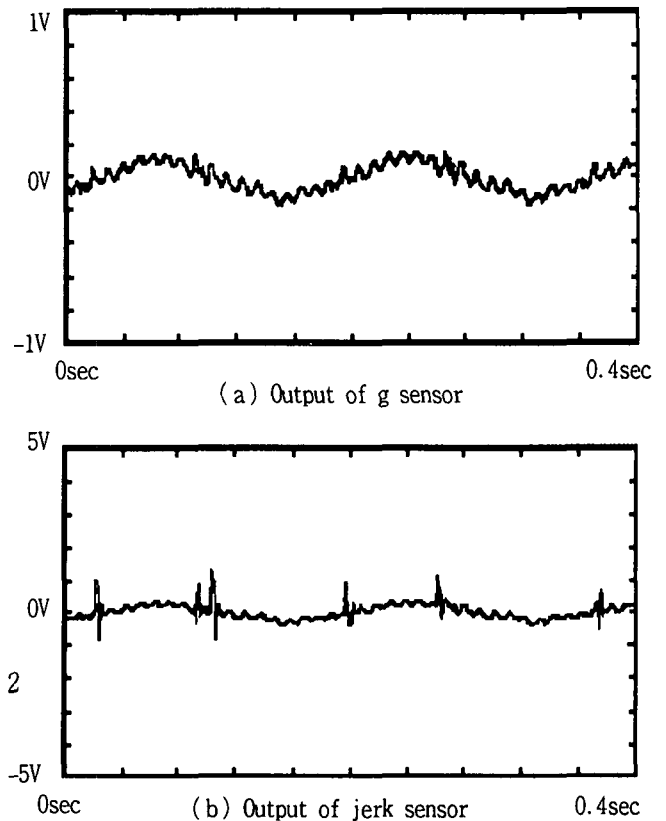


図-4 アルミ試験板の亀裂進展時の波形 (267 秒後)

2) 曾根彰, 他5名: 出力のウェーブレット変換と印加入力および物理系間の正則性, 日本機械学会論文集C編, 第61巻, 第589号, pp.108-114, 1995.

3) 曾根彰, 山本鎮男, 増田新: 常時微動と強震記録のウェーブレット解析による構造物の動特性推定とその変化の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp.65-72, 1996.

4) 近野正, 菅原澄夫, 工藤すばる: 圧電振動ジャイロスコープ角速度センサ, 電子情報通信学会論文誌C-1編, 第78巻11号, pp.547-556, 1995.

5) 田村雅巳, 山本鎮男, 曾根彰, 増田新: 一対の振動ジャイロスコープを用いた振動外力を受ける構造物の動曲げ歪み計測法の研究, 日本建築学会構造系論文集, 第509号, pp.59-66, 1998.

6) 芦野隆一, 山本鎮男: ウェーブレット解析—誕生・発展・応用, 共立出版, 1997.

7) 山門誠, 門向裕三: 加加速度を用いた運動評価・制御システムの研究(第1報, 加加速度センサと加加速度の車両運動制御システムへの適用検), 日本機械学会論文集C編, 第64巻, 619号, pp.873-879, 1998.