

Wavelet 変換を用いた大型斜面崩壊実験場における加速度センサ による信号特性の検証と崩壊の兆候検知に関する研究

A Study on Characteristics of Acceleration Signal measured in Large Scale Landslide Experiment
by using Wavelet Transform and Detection of Feeble Indication of Landslide

松本健作*・玉置晴朗**・矢澤正人**・福蘭輝旗***・酒井直樹****・岡田崇*****・竹澤弘久*****・
宋東烈*****・小葉竹重機*****・清水義彦*****

Kensaku MATSUMOTO, Haruo TAMAKI, Masato YAZAWA, Teruki FUKUZONO, Naoki SAKAI,
Takashi OKADA, Hirohisa TAKEZAWA, Dong—Yeu SONG, Shigeki KOBATAKE and Yoshihiko SHIMIZU

*博士(工学) 群馬大学大学院助教 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)
**(株)数理設計研究所 (〒373-0019 群馬県太田市吉沢町 1066 ぐんま産業高度化センター101)
***独立行政法人防災科学技術研究所(〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)
****博士(工学) 独立行政法人防災科学技術研究所(〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)
*****学士(工学) 群馬大学大学院工学研究科(〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)
*****工学博士 群馬産業技術センター独立研究員(〒379-2147 群馬県前橋市亀里町 884-1)
*****工学博士 群馬大学大学院教授工学研究科社会環境デザイン工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)
*****博士(工学) 群馬大学大学院准教授工学研究科社会環境デザイン工学専攻(〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

An examination of characteristics of landslide by acceleration with static sensitivity was performed. Landslide experiment was performed by large scale rainfall system. Four acceleration sensors settled in the upper, lower, right and left side of experimental slope. Not only the sensor worked instead of inclinometer by 3-dimensional components of gravity acceleration but also results of analysis of measured signal could indicate characteristics of landslide process in detail. The indication of landslide was observed as drift of the acceleration signal caused by condition change of the sensor. Wavelet analysis of measured signal was performed. Results of that showed relationship between soil mechanics on landslide and frequency characteristics. A feeble indication of landslide was detected. According to these results, we could clarify that the acceleration sensor on landslide could measure the behavior of landslide. And the Wavelet analysis of the measured signal on landslide is useful for early-warning system of landslide.

Key Words: Landslide, Wavelet analysis, Acceleration sensor, Alarm system, FFT

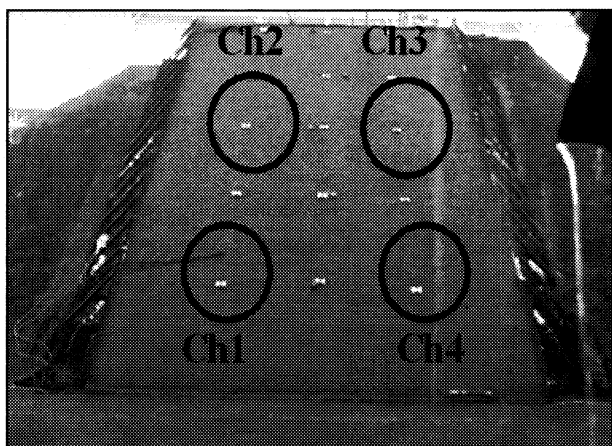
1. 序論

昨今の頻発する土砂災害を受けて、その予兆の検出と早期避難による被害軽減策の確立が急務となっている。斜面崩壊時刻の直前予測法は多くの研究者によって提案され、一部実用化されているものもあるが、より早く、より正確に予測するための、早期予測法の確立には依然として課題を残しているのが現状である。著者らは数年前より、加速度の計測とその信号処理による構造物のヘルスマニタリングに関する基礎的な取り組み¹⁾²⁾を行ってきた。計測された加速度の波形信号に対して様々な信号処理を施すと同時に、振動モードの変化と現象との相関性について相関式を導出し、

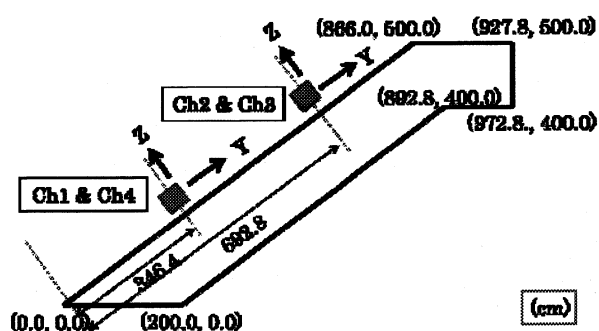
種々の状態推定を行う検討を進めてきた。そこで本研究は、これまで行ってきた計測および診断技術を、斜面崩壊場に適用し、斜面崩壊の早期予測法確立に向けた基礎的な取り組みを行うことを試みた。室内大型実験による斜面崩壊場に加速度センサを設置し、その信号特性と斜面崩壊の相関性を検討することで、崩壊の前兆現象検出に関する検討を行う。また Wavelet 解析を行って更に詳細かつ早期に前兆現象を捉える試みを行う。

2. 崩壊実験の概要

実験には、(独)防災科学技術研究所大型降雨実験施



写真—1 加速度センサの設置状況

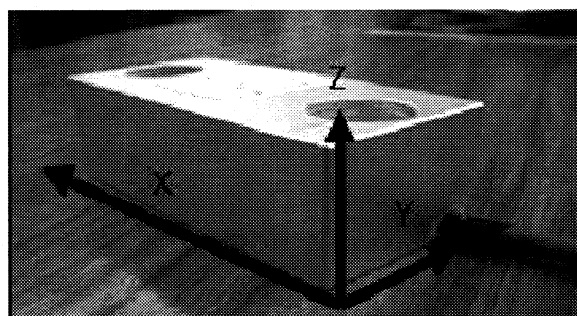


図—1 斜面断面形状の模式図

表—1 実験斜面の諸元

斜面幅	4m	土砂堆積	40 m ³
斜面長	10m	乾燥密度	1.44g/c m ³
斜面厚	1m	含水比	0.084
斜面高	5m	散水強度	50mm/h
傾斜角	30°	給水強度	15mm/h

設を利用した。実験斜面の概観を写真—1 に、斜面の断面形状の模式図を図—1 に示す。図—1 中に示した括弧内の数値は、斜面手前下端を原点としたときの各点の座標を示している。実験斜面の諸元を表—1 に示す。土槽底面は不透水の平面であり、表面には凹凸のついたモルタル処理が施してある。両側と上端は高さ 1.1m の鉄枠、最下端には斜面表面からの浸透水の湧出を防ぐための砂利による水抜き処理が施されている。表—1 に示す給水強度とは、無限長斜面条件を構築するために斜面上端から土砂内に給水している水量で、斜面下端からの流出量と等しくなるよう設定されている。実験に用いた土砂には、市販の佐原砂を用いた。粒度構成は、礫分 9%、砂分 84%、シルト分 7%、均等係数 4.2、 D_{20} が 0.185mm である。写真—1 中に示した Ch1 ~Ch4 の位置に加速度センサを設置した。使用した加



写真—2 加速度センサ検出部の外観

表—2 加速度センサの諸元

計測原理	静電容量型	A/D 変換	12bit
計測軸	3 軸	レンジ	64dB
Sampling	1600Hz	サイズ	3×3×8cm
計測範囲	±1.5G		



写真—3 センサの埋設状況



写真—4 崩壊後の実験斜面の様子

速度センサは本研究のために独自開発した株式会社数理設計研究所製 GID-SSS/M である。3 軸方向にサンプリング周波数 1,600Hz で加速度を計測できる。センサ検出部の外観を写真—2 に、その諸元を表—2 に示す。

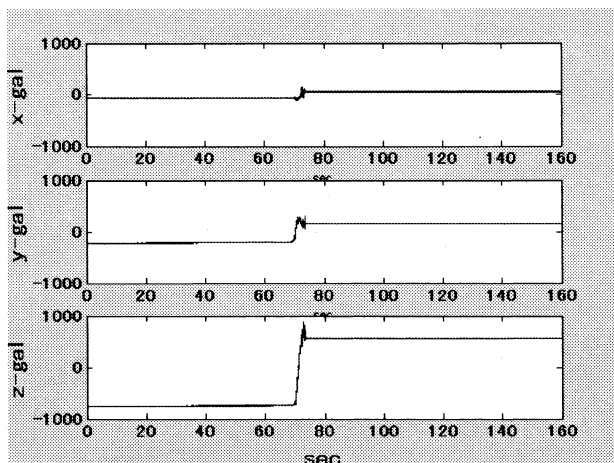


図-2-(1) 崩壊時の加速度の経時変化(Ch1)

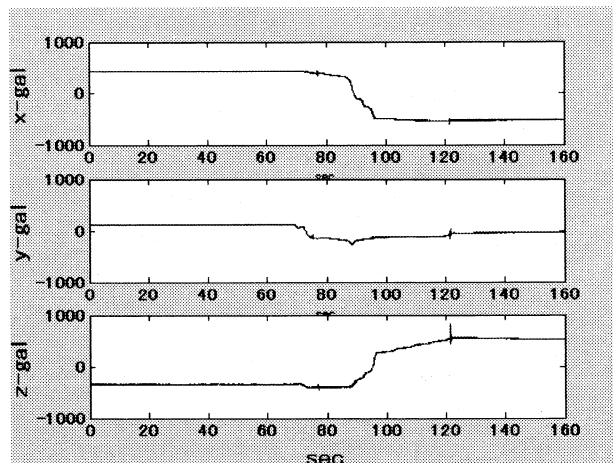


図-2-(3) 崩壊時の加速度の経時変化(Ch3)

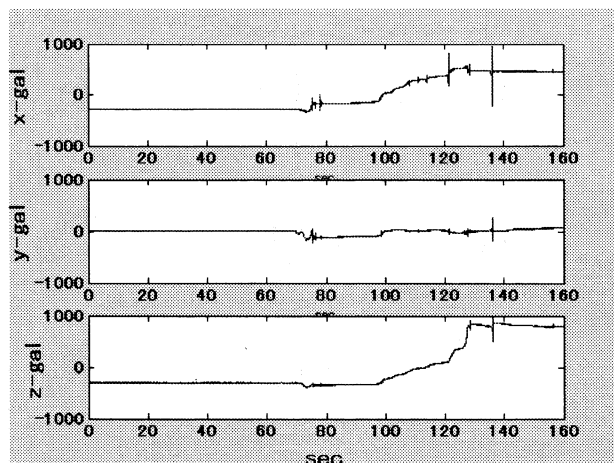


図-2-(2) 崩壊時の加速度の経時変化(Ch2)

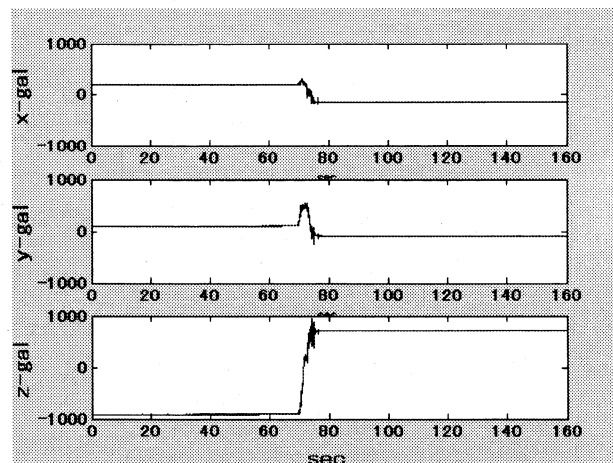


図-2-(4) 崩壊時の加速度の経時変化(Ch4)

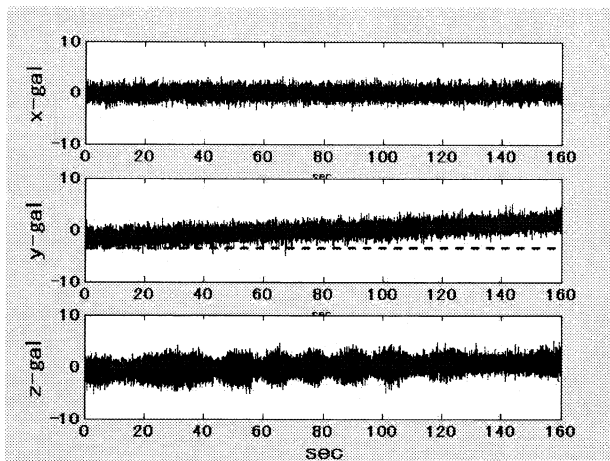
センサの各軸は、X 軸を斜面横断方向(斜面向かって右側方向が正)、Y 軸を斜面方向(斜面上方向が正)および Z 軸が斜面法線方向(法線上向き方向が正)として設置した(図-1 参照)。計測原理が静電容量型であることで、常時重力加速度を捉えており、その 3 軸方向への成分からセンサの姿勢を検知できる。このことは、本センサが、斜面崩壊の警報装置として一般的に使用されている傾斜計の機能も有していることを意味している。写真-3 にセンサの埋設状況を示す。センサが土粒子の挙動をできるだけ捉えられるよう、長さ 20cm のボルト 2 本をセンサに固定した状態で、土中に埋設した。崩壊は散水開始から約 3 時間 4 分後、総散水量 153.3mm で発生した。ビデオ映像等で検証した崩壊の過程は、まず斜面下部がほぼ一様に前面にせり出し、同時に斜面上部が後方に沈み込むような変形を見せた。その後、斜面下部のセンサ設置個所付近に水平方向の顕著な亀裂が発生し、崩壊に至った。まず斜面下部の土砂が前面に崩れ落ち、それに伴って上部が滑り落ちる崩壊パターンであった。崩壊後の斜面の様子を写真

—4 に示す。写真-4 は崩壊後の斜面を側面から見たもので、図中の実線で斜面形状を、破線で崩壊後のおよその土砂の形状を示してある。土砂が斜面前面に大きくせり出している様子がうかがえる。

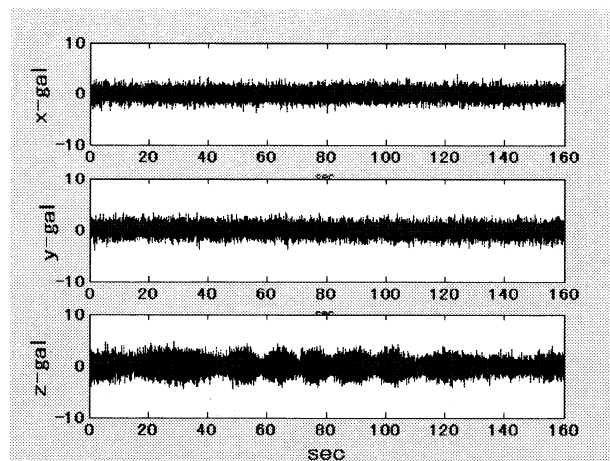
3. 斜面崩壊場における加速度特性

3.1 崩壊時における加速度特性

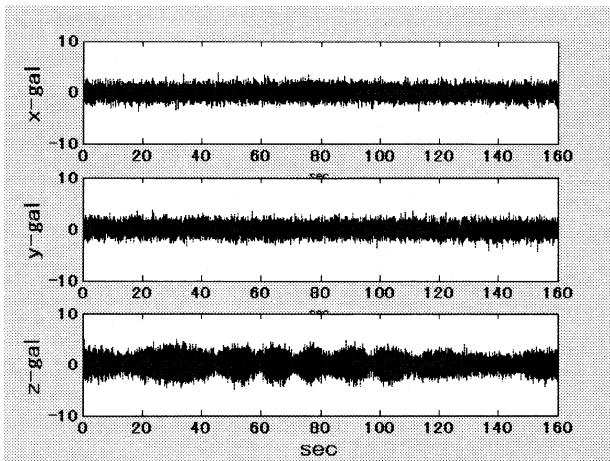
図-2-(1)~(4)に、崩壊発生時の加速度の経時変化を示す。(1)~(4)はそれぞれ Ch1~Ch4 における計測結果である。上から X、Y および Z 軸方向の加速度で、横軸に時間(sec)、縦軸に加速度(gal)を示してある。図-2 の各図の時刻 0 の時点において、崩壊前に既に値を有しているものがあるが、ここで示す加速度は重力加速度成分を含んでいるため、崩壊前の時点で既にセンサが土砂の変動に伴って傾斜しており、それによって初期状態からの変動成分を有している。また、作図にあたっては解析区間における加速度の平均値からの



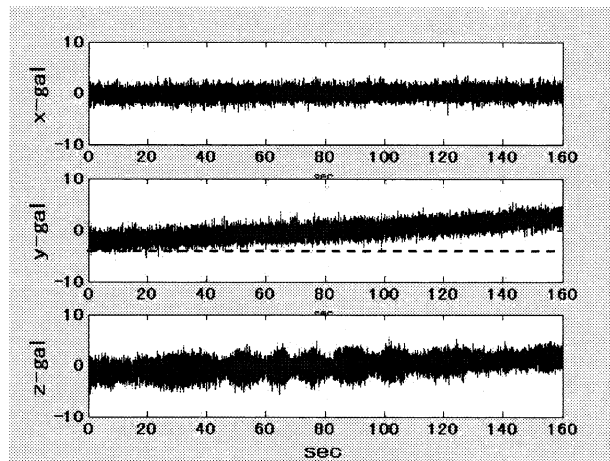
図—3—(1) 崩壊前の加速度の経時変化(Ch1)



図—3—(3) 崩壊前の加速度の経時変化(Ch3)



図—3—(2) 崩壊前の加速度の経時変化(Ch2)



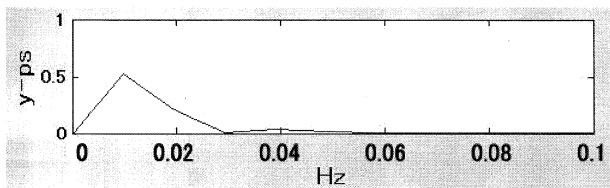
図—3—(4) 崩壊前の加速度の経時変化(Ch4)

変動成分として算出し直した値を使用している。そのため、図—2 の各図に示す加速度の瞬間値には定量的な意味はなく、前後の値との相対的な比較によってセンサの挙動を検討する。斜面下部にあたる Ch1 および Ch4 では瞬間的に大きな加速度変化が起きている。特に Z 方向の変化が顕著であり、-980gal 付近から 980gal 付近まで変化しており、センサが短時間で約 180 度回転したことを示している。斜面上部にあたる Ch2 および Ch3 では、斜面下部の結果よりも比較的長い時間をかけてゆっくりと変化している。Ch1 および Ch4 での大きな加速度変化は、横軸で 70 秒付近において見られているが、Ch2 および Ch3 の 70 秒付近を見ると、微弱な変動が見られるのみでセンサに大きな姿勢変化は起きていないことが分かる。斜面上部のセンサで大きな加速度変化が現れるのは、Ch2 では 130 秒付近、Ch3 では 90 秒付近であり、斜面下部のセンサが明らかに崩壊を検知してから、それぞれ 50 秒および 20 秒後であったことが分かる。崩壊のパターンにもよるが、本研究で見られた崩壊パターンの場合、その兆候をできる

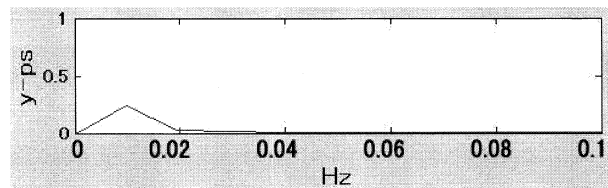
だけ早期に検知するためには斜面下部センサが有効であり、崩壊後の 2 次的な崩壊などの監視を行うにあたっては、斜面上部のセンサが有効となる可能性があると考えられる。Ch1 と Ch4 間および Ch2 と Ch3 間で全く同一の結果とはなっていないが、ビデオ映像等による検討では顕著な左右の違いは確認できず、全体的に見て斜面下部の Ch1 と Ch4、斜面上部の Ch2 と Ch3 がほぼ同様な変化を示しており、崩壊が斜面横断方向ではほぼ均一に発生したことが分かる。なお、Ch2 の 120 秒付近および 135 秒付近のパルスと Ch3 の 125 秒付近のパルスは、センサのワイヤがセンサを引っ張ったためのものであり、現在無線通信を用いた計測システムの改良を試みているところである。

3.2 崩壊の兆候現象に関する考察

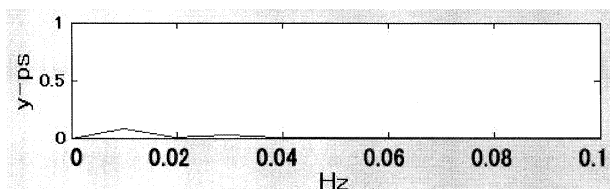
崩壊の前兆現象は斜面下部の前面へのせり出しであったが、この現象が加速度の計測結果としては、どのように表わされるのか、また本計測システムが斜面崩壊の警報装置としてどの程度有効であるかについて検



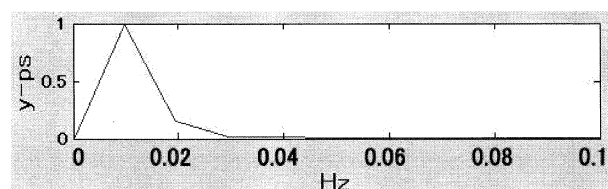
図—4—(1) 崩壊時加速度のパワースペクトル(Ch1)



図—4—(3) 崩壊時加速度のパワースペクトル(Ch3)



図—4—(2) 崩壊時加速度のパワースペクトル(Ch2)



図—4—(4) 崩壊時加速度のパワースペクトル(Ch4)

討を行った。図—3—(1)～(4)は、それぞれ Ch1～Ch4 の崩壊約 20 分前の加速度の経時変化を示したものである。図の配置および軸設定は図—2 と同様である。Ch1 および Ch4 の Y 軸方向加速度を見ると、崩壊の約 20 分前から加速度の値が次第に増加していることが分かる。Ch1 および Ch4 の Y 軸方向加速度については図中に原点における加速度値の参考線を点線で付してある。この加速度の暫変を以下ではドリフトと呼ぶが、崩壊に先だって斜面下部の土砂が前方へせり出す際にセンサの姿勢が次第に変化していく様子が捉えられている。このことは本計測システムが傾斜計としての働きを有しており、本実験においては崩壊の約 20 分前からその兆候を検出できていたことになる。

り、周波数分解能は 0.00625Hz である。これらの図から発生する周波数成分が 0.01Hz 付近に見られることや、斜面下部において大きな波動成分を有していることが分かるが、周波数分解能にかなり近い領域であり、データも密度も荒いことから、これらをそのまま波動成分として考察するのは難しい。次に Wavelet 解析による結果を示す。式—(1)に連続 Wavelet 変換の基礎式を示す。スケールパラメータによって Mother Wavelet の周波数を変化させ、トランスレートパラメータによって時間を変化させることによって、FFT などの周波数領域への変換では失われてしまっていた時間情報を残したまま、時間—周波数平面における特性の検証が可能となる手法である。

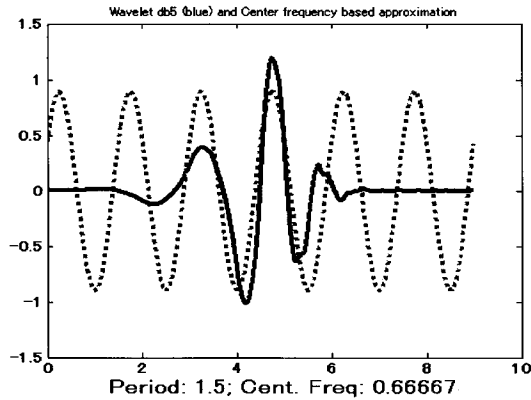
4. Wavelet 解析による崩壊特性の検証

4.1 崩壊時加速度の Wavelet 解析

センサの傾斜から崩壊の兆候を捉えるのみであれば従来の傾斜計で十分であるが、本研究では、加速度の詳細な波形信号を計測し、そこに信号処理を施すことで、より詳細な現象の解明を行い、より早期に崩壊の微弱兆候を検出できないか、という試みを行った。信号解析手法としては FFT および Wavelet 解析^{3), 4), 5)}を行った。特に Wavelet 解析は、短時間ダイナミクスが非定常である場合の構造物のヘルスマonitoring手法として、その有効性が広く確認されている手法であり、斜面崩壊という、短時間に大きな変化を起こす現象に対しても有効に適用できる可能性が高いと考えられる。まず、FFT による解析結果を示す。図—4—(1)～(4)に、それぞれ Ch1～Ch4 の崩壊時における斜面方向加速度のパワースペクトルを示す。各図、横軸が周波数(Hz)、縦軸がパワースペクトル値を全結果中最大の値を示した Ch4 における最大値で除して無次元化したものを示してある。160 秒間のデータを用いて解析を行って

$$(W_{\psi}f)(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} f(x) dx \quad (1)$$

ここで、 a はスケールパラメータ、 b はトランスレートパラメータ、 $f(x)$ は解析対象信号、 $\psi(x)$ は Mother Wavelet である。本研究では、Daubechies によってつくられた Mother Wavelet を使用した。Daubechies の Mother Wavelet は自然数 N によって番号付けられた一連のスケール関数に対応したものが存在するが、本研究では $N=5$ のスケール関数に対応する Mother Wavelet (以下、これを 5 次の Daubechies の Mother Wavelet と呼ぶ) を使用した。中心周波数の検証結果を図—5 に示す。横軸は時間、縦軸は波高である。図—5 中の実線は 5 次の Daubechies の Mother Wavelet の波形であり、その波形の中心部と最も周波数が近似する波形を点線で示してある。5 次の Daubechies の Mother Wavelet の場合は周期 1.5 秒の波形であることが分かる。Mother Wavelet の選定にあたっては、他の様々な Mother Wavelet も試行錯誤的に使用してみた上で、注目した現象の特徴を最も顕著に表わせるものとして、本研究では 5 次の Daubechies の Mother Wavelet を利用

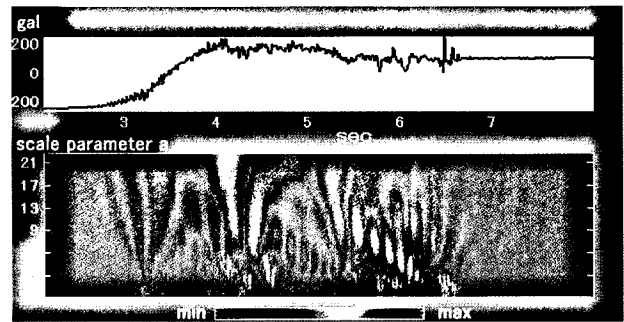


図—5 マザーウェーブレットの中心周波数
(5 次の Daubechies の Mother Wavelet)

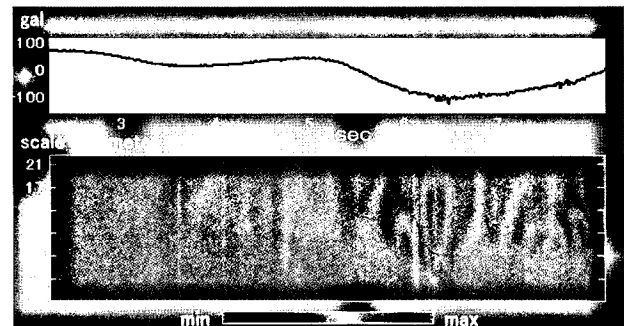
することとした。解析には $(b, 1/a) = (2^j k, 2^j)$ と置換した離散 Wavelet 変換も使用した、離散 Wavelet 変換の基礎式を式—(2)に示す。

$$d_k^{(j)} = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi(2^j x - k)} f(x) dx \quad (2)$$

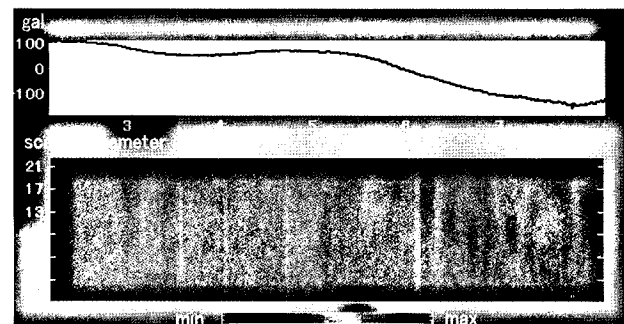
図—6—(1)～(4)に、それぞれ Ch1～Ch4 における崩壊時の斜面方向加速度信号の連続 Wavelet 解析結果を示す。それぞれ図—2(1)～(4)に示した崩壊による加速度の変化が顕著な時間帯を抜き出して拡大した図となっている。各図、上図が原信号であり、横軸が時間(sec)、縦軸が加速度(gal)である。下図が Wavelet 変換によって得られた Wavelet 係数を示したもので、一般に Wavelet Map と呼ばれているものである。横軸は上図に対応する時間(sec)に対応しており、縦軸がスケールパラメータ a の値である。よって縦軸は、下ほど高周波、上ほど低周波成分を表すことになる。Wavelet Map 中に示した Wavelet 係数は最大値で除して無次元化してあるため、値の比較的小さい Ch2 および Ch3 などでは変化が見にくくなっているが、図中の白い領域が高い計数値を示しており、その時刻において、その周波数帯に顕著な波動成分が検出されたことを示している。図を見ると、斜面下部の Ch1 および Ch4 においては、崩壊に伴って高周波から低周波までほぼ全体的に波動成分が励起されていることが分かる。崩壊時の土砂内部で高周波数での攪乱と比較的ゆっくりとした変形が同時に発生していた様子をうかがわせる。スペクトルのみでは顕著な違いが見出しにくい Ch1 と Ch4 の間にも、Wavelet Map で見ると、Ch4 の方が崩壊後半になっても低周波成分の発生が著しいことなどが視覚的に良く見てとれ、斜面の左右で崩壊の状況に差異があったことがうかがえる。同様に全体的に計数値の小さい斜面上部の Ch2 と Ch3 間にも、Ch2 の方が、崩壊の後半に低周波成分を発生させている点などに相違が見ら



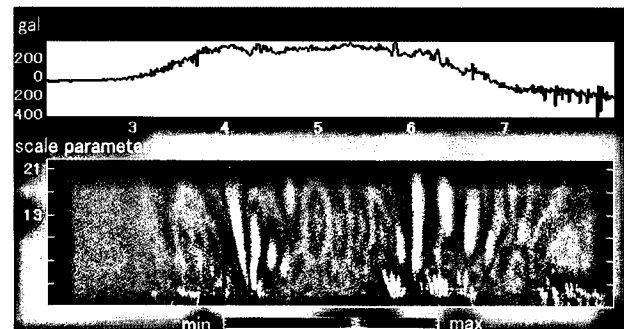
図—6—(1) 崩壊時加速度の連続 Wavelet 解析結果
(Ch1)



図—6—(2) 崩壊時加速度の連続 Wavelet 解析結果
(Ch2)

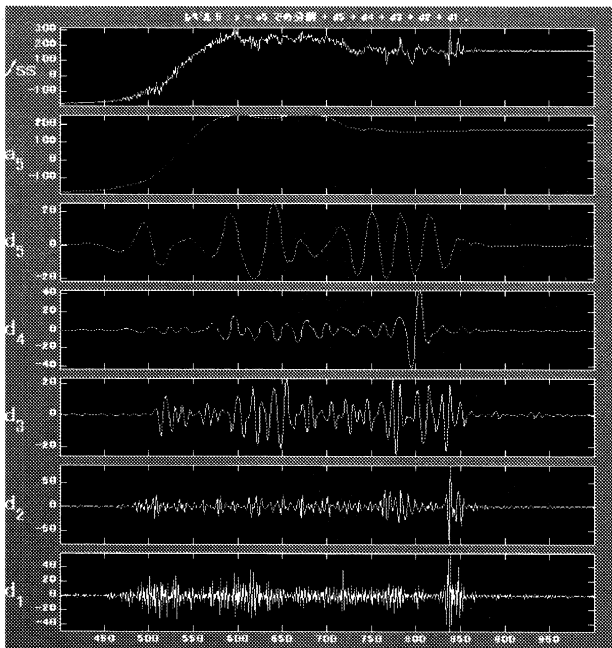


図—6—(3) 崩壊時加速度の連続 Wavelet 解析結果
(Ch3)

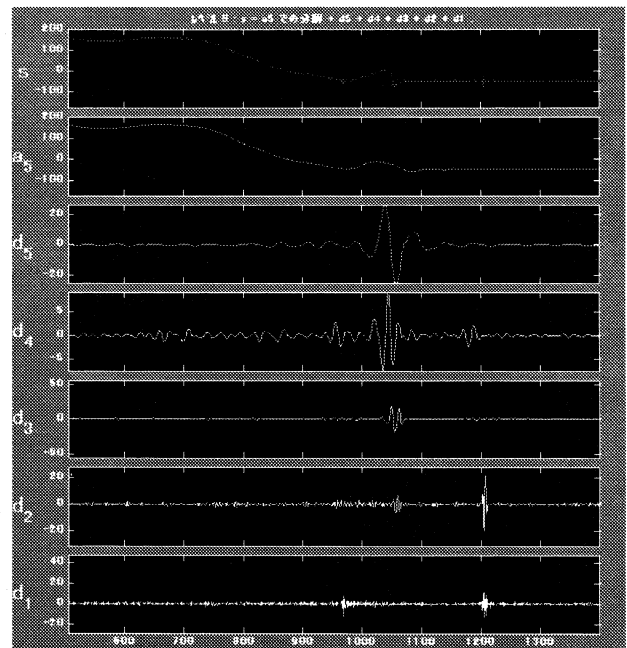


図—6—(4) 崩壊時加速度の連続 Wavelet 解析結果
(Ch4)

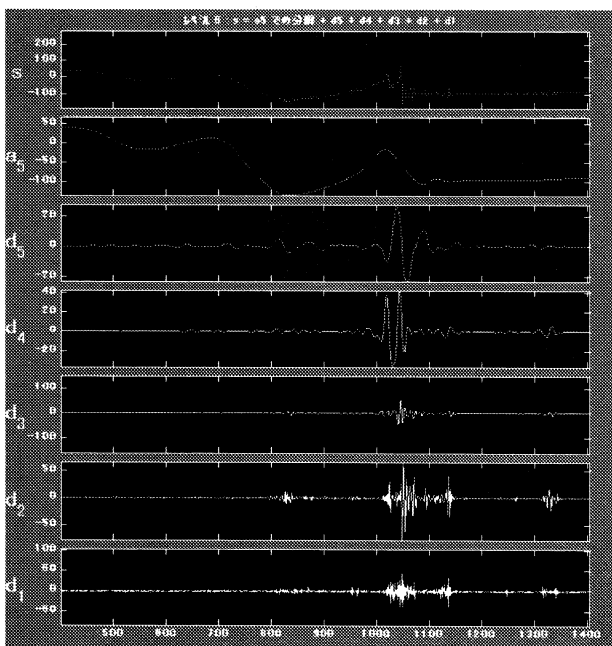
れる。連続 Wavelet は詳細な情報を与えるものである



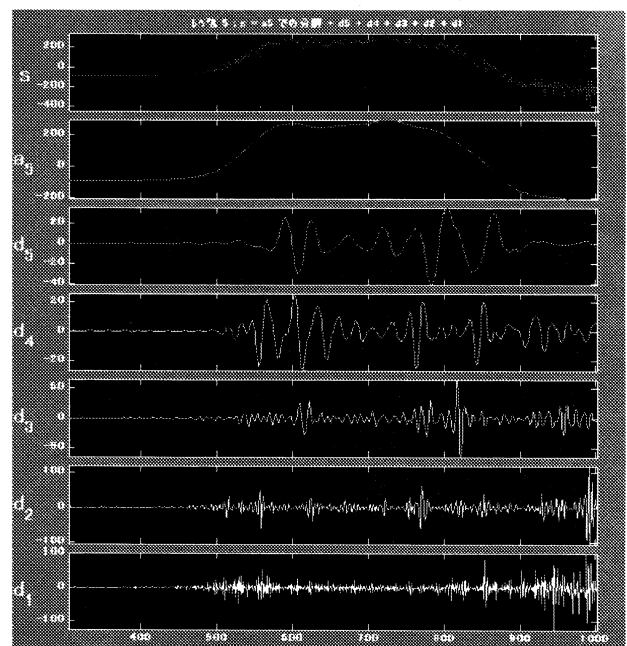
図一七—(1) 崩壊時加速度の離散 Wavelet 解析結果
(Ch1)



図一七—(3) 崩壊時加速度の離散 Wavelet 解析結果
(Ch3)



図一七—(2) 崩壊時加速度の離散 Wavelet 解析結果
(Ch2)



図一七—(4) 崩壊時加速度の離散 Wavelet 解析結果
(Ch4)

が、特定の周波数に注目した解析に対しては離散 Wavelet が有効となる場合が多い。図一七—(1)～(4)に、それぞれ図一六—(1)～(4)に対応した、斜面崩壊時における Ch1～Ch4 の加速度信号に対して、離散 Wavelet 変換による多重解像度解析を行った結果を示す。横軸は時間(1/100 秒)であり、縦軸は Wavelet 変換によって得られた Wavelet 係数を示してある。最上段が原信号であり、以下、低周波成分から下段ほど高周波成分となるよう示してある。図一七の解釈にあたって、各図

の相関関係を示す Wavelet 分解ツリーを図一八に示す。図一八最上段の s(signal)が原信号である。分解過程は低周波成分の a(approximation)と高周波, d(detail)に分解された後、a に関してのみ同様の分解を連続的に繰り返す。この分解の繰り返し回数をレベルと呼び、本研究ではレベル5での検討を行った。よって、レベルが高くなるほど低周波であることを意味している。図一七の各図には s, a5 および d1～d5 の計 7 成分を示している。図一七各図を見ると、斜面下部 Ch1 および Ch4 で

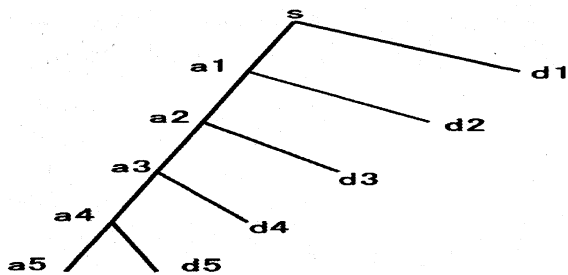


図-8 Wavelet 分解ツリー図(レベル5)

は、崩壊に伴い低周波成分から高周波成分までほぼ同時に発生しており、特に Ch1 では顕著な高周波成分が励起されていることが分かる。しかし斜面上部の Ch2 および Ch3 では崩壊に伴う低周波成分発生時においても高周波成分の顕著な発生は見られない。その一方で、斜面上部のセンサでは、Ch2 の 830 および 1340、Ch3 の 970 および 1200 付近に見られるように、原信号や低周波成分としては顕著な振動が発生していなくても、高周波成分の顕著なパルスが検出されている時間帯があることが分かる。このようなパルスは不連続点の抽出を意味しており、崩壊によって土砂内部で何らかの不連続な現象が発生しており、それを検出したものと考えられる。このように、Wavelet 解析を行うと、崩壊によって、特定の土砂内部の挙動をいくつかのパターンとして認識することができ、内部で発生している諸現象に対する知見を得ることができることが分かった。このように、FFT では失われてしまう時間情報を保存したまま時間一周波数解析が可能である Wavelet 解析を行うことで、各周波数成分の時系列的な特徴を抽出することができ、現象の解明に資する有益な知見を得られることが分かった。

4.2 崩壊の微弱兆候の Wavelet 解析による検出

崩壊前の微弱兆候発生時において、Wavelet 解析がどの程度有効であるかの検討を行った。図-9-(1)~(3)に、崩壊の微弱兆候としてのドリフト現象が現れる更に 10 分前の原信号、パワースペクトルおよび Wavelet 解析の結果を示す。図-9-(1)を見ると、ドリフトはまだ表れておらず、一見したところ、ノイズのみに見え、有意な情報は読み取れない。図-9-(2)のパワースペクトルを見ると低周波成分として若干の波動成分が検出されていることが分かるが、これのみでは実際にどのような現象が起きているのか判断が難しい。図-9-(3)は Wavelet 解析の結果から顕著な変化が見られた周波数成分を抜き出したものであるが、図中、四角で囲った領域で信号が右下がりになり段落ち状態になっていることが確認できる。Wavelet 係数は注目する周波数成分と解析対象信号の相関性が高いほど高くであるので、係数値が減少したことは、信号に含ま

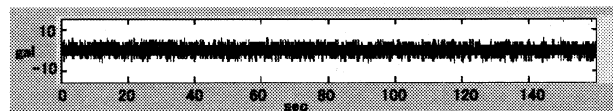


図-9-(1) ドリフト発生 10 分前の Ch1, 斜面方向加速度の原信号

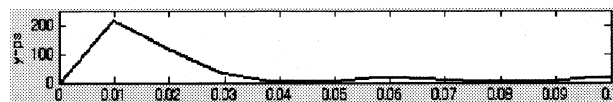


図-9-(2) ドリフト発生 10 分前の Ch1, 斜面方向加速度のパワースペクトル

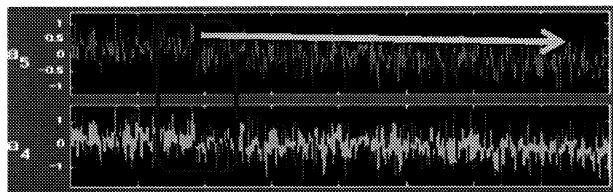


図-9-(3) ドリフト発生 10 分前の Ch1, 斜面方向加速度の Wavelet 解析結果

れるその周波数成分が減少したことを意味する。パワースペクトル図で低周波成分として検出されていたのは、この段落ち部分を含めた変化を波動成分として検出したものである。Wavelet 係数は、この段落ち後に次第に減少していき、その後、崩壊の兆候としての顕著なドリフト現象を示すようになる。すなわち、この段落ちは崩壊の兆候として、センサの姿勢変化によってもたらされるドリフト現象の先駆けとして発生する微弱な兆候と捉えることができる。このことは Wavelet 解析によって、ドリフト現象の検出から崩壊の早期検知をするさらに 10 分前に崩壊の予知を行うことができる可能性を有しており、本計測および解析システムが、斜面崩壊の早期予測法ひいては警報装置として有効である可能性を示すことができた。

5. まとめ

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 大型降雨実験装置を用いた斜面崩壊場において、加速度の計測を行うことで、斜面下部におけるせり出しや斜面上部土砂の滑落状況などを良好に計測できていることを確認できた。
- 2) 崩壊の前兆現象としてのセンサの傾斜による加速度信号のドリフトを捉えることによって、崩壊の予知を行うことができることが明らかとなった。
- 3) Wavelet 解析を行うことで、崩壊時における加速度特性について、設置位置による顕著な違いが

検出できること、センサ周辺の土砂内部の挙動に関する有益な知見を得ることができる可能性があることを示すことができた。

- 4) Wavelet 解析によって崩壊の前兆現象としてのドリフト発生前の、更に微弱な兆候を捉えることができ、より詳細に、より早期に崩壊の予知を行える可能性があることを示すことができた。

謝辞：本研究は、平成 19 年度科学研究費補助金若手研究(B)，および平成 19 年度(財)河川環境管理財団の河川整備基金助成事業を受けて行われた。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 松本健作, 宋東烈, 玉置晴朗, 青木隆行, 藤田智之, 菅正信 : 時系列解析を用いた出水時における河川橋梁の振動と水位の相関性に関する研究, 水工学論文集, 第50巻, CD-ROM, 2006.
- 2) 松本健作, 宋東烈, 玉置晴朗, 藤田智之, 青木隆行, 菅正信 : 時系列解析を用いた出水時における河川橋梁の振動特性に関する研究, 応用力学論文集, Vol. 9, pp. 75-83, 2006.
- 3) 榊原進 : ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電気大学出版局, 1995.
- 4) 石川康宏 : 臨床医学のためのウェーブレット解析, 医学出版, 2000.
- 5) 山本鎮男 : ヘルスモニタリング —機械・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視—, 共立出版株式会社, 1999.

(2008 年 4 月 14 日 受付)