

地中音による地すべり予知システム開発のための振動基礎研究

建設設計工学研究室 丹羽 康修
指導教官 宮木 康幸

1. はじめに

現在、崩壊や地すべりの危険性がある斜面の監視には、標柱による移動量の計測、伸縮計による地盤伸縮変動量観測、地盤傾斜計による地盤傾動観測^{1) 2)}など、様々なシステムが利用されている。現行の斜面監視の方法はそれぞれの利点や欠点を持っており、一概にどの手法がよいとはいえない。そこで、現場の状況をリアルタイムにしかも広範囲に把握でき、人的コストも抑えた斜面監視の方法として、わが建設設計研究室では数年前から CCD カメラを用いた斜面監視システムを開発している。しかし、このシステムは斜面の地表だけが監視の対象となっている。そこで、地表で地すべりが観測される前の段階で地中の土構造が変化する現象を地中音から予測できないかとの考えに至り、新たな手法として昨年度から音響的手法を用いた斜面監視システムが考案された³⁾。

2. 本研究の目的

昨年度の研究では『樹木の根が“アンテナ”のような役割を果たすため、地中から伝わってくる音を増幅して計測ができる』という提案者の経験から、低周波帯高感度センサ（以後、センサと記載）を樹木に設置して計測を行った。しかし、センサを樹木に設置した計測には以下に示す問題点が生じた。

- (1) 風の影響で枝や葉が揺れたりして、地中音以外の周囲の音も拾ってしまう
- (2) 樹木の状態（種類、幹の太さ、根の張り方、etc）によっても伝わり方が異なる
- (3) 地すべりが発生すると思われる斜面に樹木が常に存在するとは限らない

さらに(1),(2)の要因のため、地中からセンサまでの振動伝達が不明確となり、地すべりに固有な振動周波数の特定が不可能となっている。

そこで、今年度は以下のことを目的とする。

- (1) 地中音を取得する観測媒体として容易に取得・設置することができる単管パイプを樹木の代わりに利用し、樹木と同等の地中音データを取得することができるか調べる。このため、次の基礎的実験を行う。
振動の入力源として周波数をスイープでき、その周波数特性が明確な加振器を用いて、

- ・センサの設置高さ
 - ・単管パイプの根入れ長さ
- などの要因の影響を調べる。

上記の加振器を用いて、樹木と単管パイプに同一種類のセンサを設置して同時計測を行い、その出力を比較検討する。

- (2) 加振器を用いた振動基礎実験を行うことによって、既知の周波数スペクトルを有する振動源に対するセンサの出力特性を特定することができる。逆に、地すべり地帯でのセンサの出力特性が取得できれば、地すべりに固有な振動周波数スペクトルを特定することが可能であることを示す。これは様々な地すべり地帯に合ったセンサを設計する際に重要なデータとなり得るものである。

3. 単管パイプを用いた基礎実験について

センサで取得される地中音は振動源から地中・センサ取付媒体などを伝達してきたものであり、地中・センサ取付媒体・センサ自体の周波数特性が関係している。ここで、センサ取付媒体として樹木を使用する場合には地中からの振動だけでなく、時々刻々変化する風による影響も関係してくるため、その周波数特性の分離は不可能となる。しかし、単管パイプを使用する場合には防風のための器具を取り付ければ、この風の影響をなくすることができる。また、地中音を取得する観測媒体として容易に取得・設置することができる。このことが樹木の代わりに単管パイプを用いる大きなメリットである。

そこでまずはじめに、単管パイプを樹木の代わりに利用し、樹木と同等の地中音データを取得することができるか調べることを目的とする。

3.1 使用機器について

3.1.1 センサについて

基礎実験、及び計測現場では J センサと S センサの 2 種類を用いて計測を行う。(写真-1 参照)

S センサについては、以下に示す特性からさらに感度をよくするために振動膜を取り付け、改造したセンサである。

- (1) 周波数：20 ~ 20000Hz
- (2) 感度：- 54 ± 3dB
- (3) 特徴：センサは横振動より縦(上下)振動に強い
センサの詳細な情報については、企業秘密のため、

十分な情報を得ることが出来なかった。

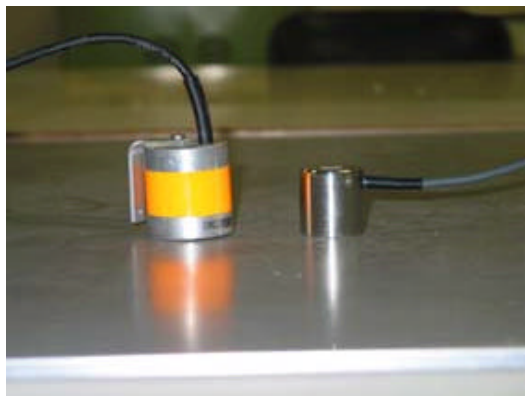


写真-1 センサ

図-1 に S センサの構造を示す。

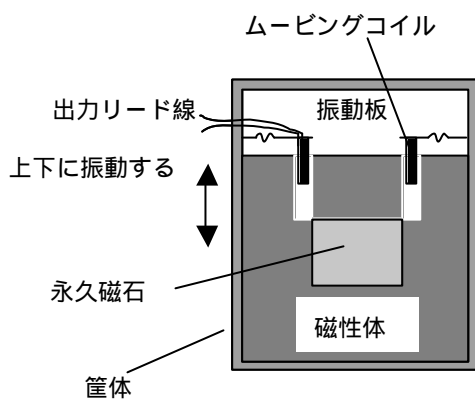


図-1 S センサの構造

S センサは、内部に極めて鋭敏に振動する振動板を有し、直結されたコイルに振動が伝わる。このコイルは磁性体の磁界を切るように取り付けられていて、コイルが磁界を切ることで、起電力を生じる構造となっている。信号出力は振幅に比例した特性となっている。すなわち、伝わってくる振動を電気信号に変換するものである。

3.1.2 加振器について

今年度は周波数をスイープできる加振器 (Bruel&Kjar 製、型式 4810) を用いた。特性については以下に示す。

- (1) 最大出力：10N
- (2) インピーダンス：3.5
- (3) ストローク：±3mm(max)

音響的手法を用いた計測は、実際の地すべり現場で発生する地中音の測定を目的としているので、加振器を金属箱に設置し、密閉した金属箱を地中に埋めて計測を行った。加振器設置状況を写真-2 に示す。



写真-2 加振器設置状況

3.2 センサ設置方向の比較実験

単管パイプへのセンサ設置方向によって、伝わる振動の大きさが変化するのかを比較検討した。

3.2.1 実験状況

加振器から 1m 離れたところに長さ 100cm の単管パイプを 50cm 打ち込み、センサを設置した。そして、加振器の周波数を 20 ~ 1000Hz の範囲でスイープして振動を与えて、計測を行った。センサの設置方向図を図-2、基礎実験の概要図を図-3 に示す。

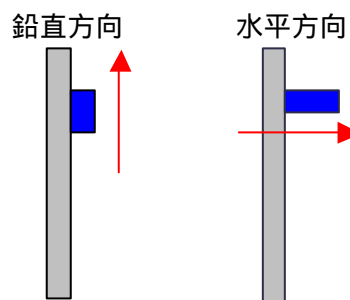


図-2 センサ設置方向

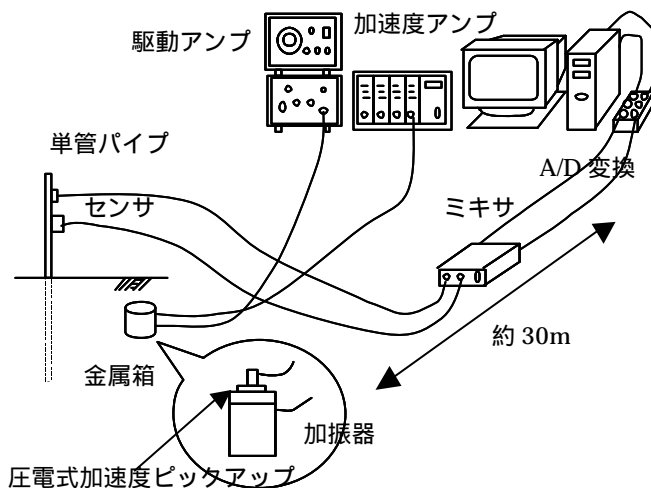


図-3 基礎実験の概要図

実験では、加振器、及び加振器を収納した金属箱の周波数特性を測るために、加振器の上と金属箱の上に圧電式加速度ピックアップを設置した。また、A/D 変換は以後、全ての実験でサンプリング周波数 8000Hz、データ数 480000 個とした。

3.2.2 実験結果

J センサについての実験結果を図-4 に示す。

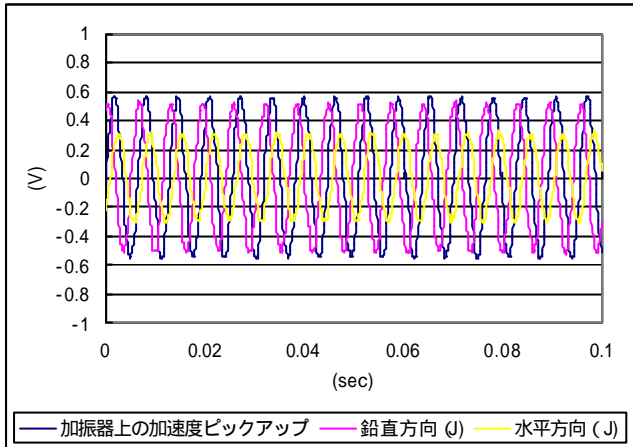


図-4 センサ設置方向による出力比較
(周波数 160Hz)

図-4 より、センサは地面に対して水平方向より鉛直方向に設置した方がよく振動が伝わるといことが分かった。したがって、以後、センサは地面に対して鉛直方向に設置することにした。

3.3 センサ設置高さの比較実験

単管パイプにセンサを設置する高さによって、伝わる振動の大きさが変化するかを比較検討した。実験状況は 3.2 と同様であり、センサの設置高さは地面から 10,20,30,40cm と変化させた。

3.3.1 実験結果

J センサについての実験結果を図-5 に示す。

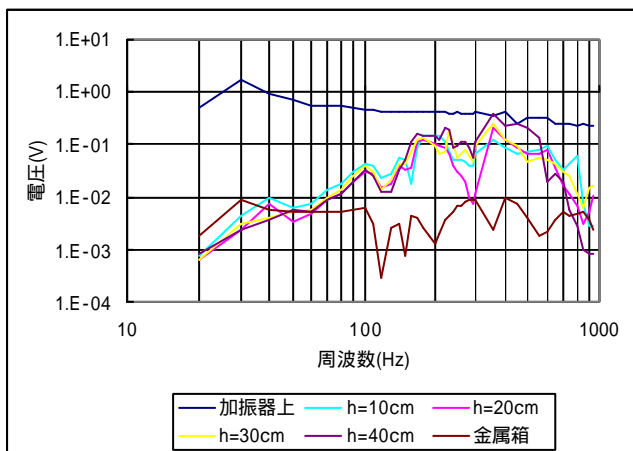


図-5 センサ設置高さによる出力比較
(J センサの場合)

図-5 より、センサの設置高さを変化させても出力

電圧は大きく変わらなかった。また、S センサについても同様な結果が得られた。

3.4 単管パイプの根入れ長さの比較実験

単管パイプの根入れ長さによって、伝わる振動の大きさが変化するかを比較検討した。

3.4.1 実験状況

加振器から 1m 離れたところに単管パイプ（地上に出ている長さを 50cm とする）を打ち込み、センサを地面から 30cm の高さに設置した。

単管パイプの根入れ長さは 30,40,50cm と変化させた。

3.4.2 実験結果

J センサについての実験結果を図-6 に示す。

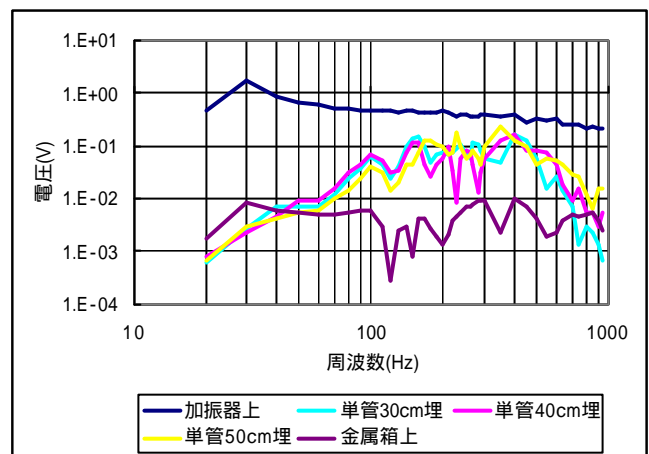


図-6 単管パイプの根入れ長さによる比較
(J センサの場合)

図-6 より、単管パイプの根入れ長さを変化させても出力電圧は大きく変わらなかった。また、S センサについても同様な結果が得られた。

以上の結果より、以後、単管パイプは長さ 100cm のものを 50cm 打ち込んで、センサを地面から 30cm の高さに設置して計測を行うことにした。

3.5 樹木と単管パイプの比較

樹木と単管パイプを用いて同時計測を行い、伝わる振動の大きさを比較検討した。

3.5.1 実験状況

金属箱から 2.6m 離れたところに長さ 100cm の単管パイプを 50cm 打ち込み、センサを地面から 30cm の高さに設置した。また、同距離の位置にある樹木（直径約 15cm）にはセンサを地面から 20,40,60,80, 100cm と変化させて設置した。

3.5.2 実験結果

J センサについての実験結果を図-7 に示す。

図-7 より、樹木と単管パイプの出力電圧を比較したところ、大きく変わらなかった。

このことより、地中音を取得する観測媒体として容易に取得・設置することができる単管パイプを樹木の代わりに利用し、樹木と同等の地中音データを取得できることが分かった。

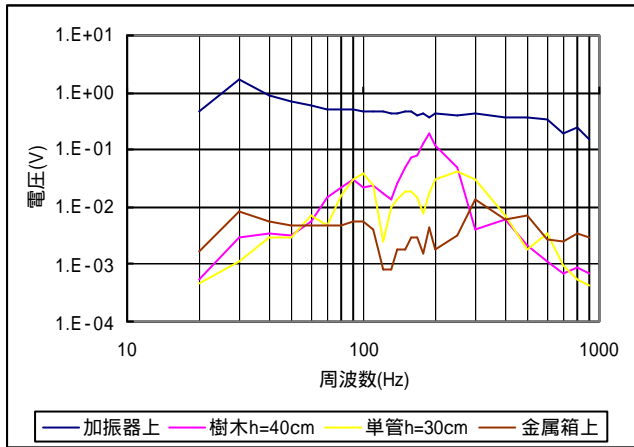


図-7 樹木と単管パイプの比較 (J センサの場合)

4. 地中音の入力値推測について

地中音を発生する振動源の周波数スペクトル (ここでは“入力値”と呼ぶことにする)を知ることは、センサの設計や地すべり現象との対応を取る上でも有用である。

そこで、入力値の推測方法について述べることにする。

実際の地すべり現場の計測では入力値が未知である。そこで、地すべりに固有な振動入力値を特定するために、まずは周波数をスイープでき、その周波数特性が明確な加振器を用いて計測を行う。センサ出力には振動源である加振器、加振器を収納した金属箱、センサの3つの周波数特性が直列的に関係しており、一様な振動入力に対する出力とは言い難い。そこで、3つの周波数特性を考慮して一様な振動入力に対する出力に変換する補正を行う。このように、加振器を用いた振動基礎実験を行うことによって、既知の入力値を有する振動源に対するセンサの出力特性を特定することができる。

次に、実際に地中音を測定し、センサ出力する。この場合もセンサ出力にはセンサの周波数特性が関係しているので、補正を行う。

そして、先程求めた一様な振動入力に対する出力と比較を行い、測定した地中音の入力スペクトルを推測できる。この入力値推測方法についての概略図を図-8に示す。

4.1 基礎実験の出力値補正について

加振器を用いた基礎実験のJセンサ出力結果を図-9に示す。次に、(1)加振器、(2)加振器を収納した金属箱、(3)センサの3つの周波数特性をそれぞれ一

様にし、図-9の結果に補正を行う。補正後の出力値結果を図-10に示す。図-10は一様な振動入力スペクトルに対する出力値を表している。

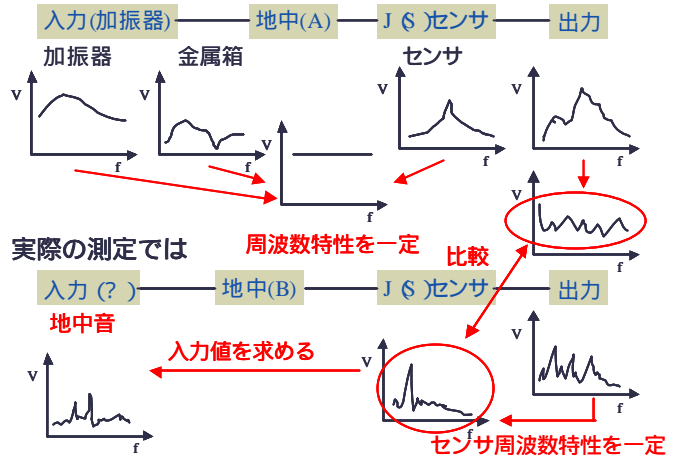


図-8 入力値の推測についての概略図

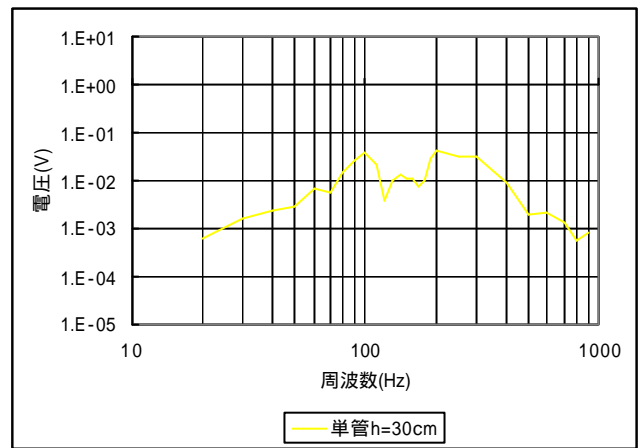


図-9 基礎実験のセンサ出力(補正前)

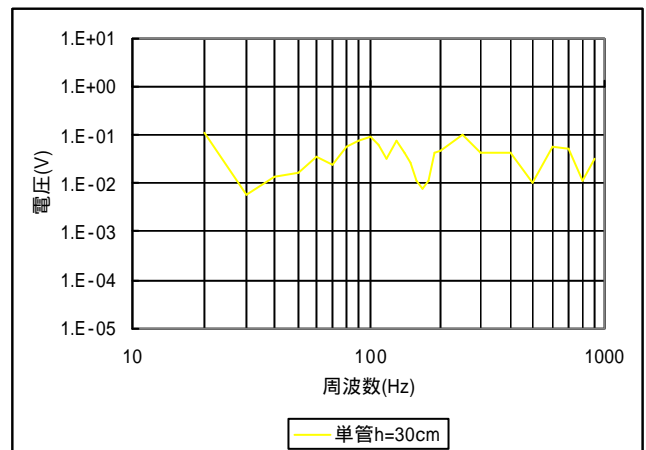


図-10 基礎実験のセンサ出力(補正後)

4.2 地すべり現場について

今年度は、昨年度に引き続き『新潟県東頸城郡牧村神谷沖見地区(以後、沖見現場と記載)』で計測を行った。計測現場の位置を図-11に示す。

樹木の代わりに単管パイプを用いて斜面に設置し、計測を行った。ターゲットの近くに単管パイプを打ち込み、外部からの音が伝わりにくくするために保

護用パイロンを設置した。計測現場状況を写真-3 に示す。



図-11 計測現場の位置



写真-3 計測現場状況

計測開始時期が遅かったため、センサを設置した単管パイプが雪に埋まってしまい、外部の音が何も聞こえない状態の出力をピックアップした。

Jセンサについての計測結果を図-12 に示す。図-12 の出力スペクトルした結果を図-13 に示す。

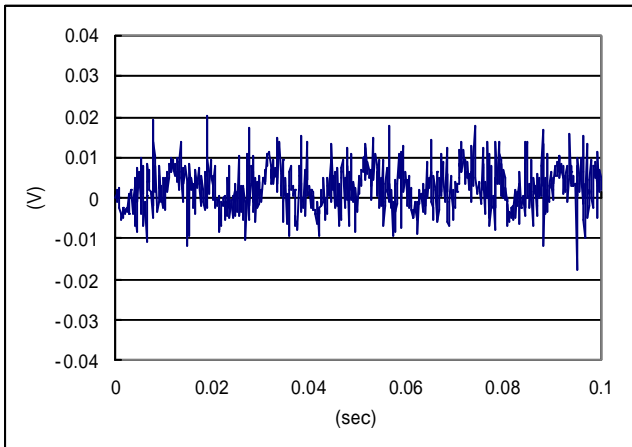


図-12 沖見現場のセンサ出力(J センサ 1 の場合)

4.3 沖見現場の出力値補正について

先程述べた図-8 のように、センサ出力にはセンサの周波数特性が関係しているため、図-13 に補正を行う。補正後のJセンサ1出力値結果を図-14 に示す。

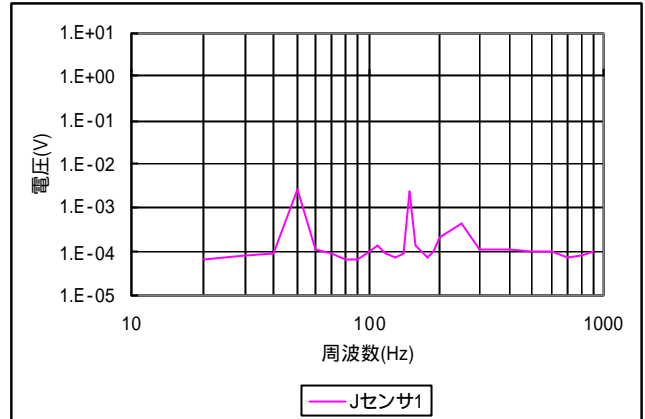


図-13 沖見現場のセンサ出力(J センサ 1 の場合)

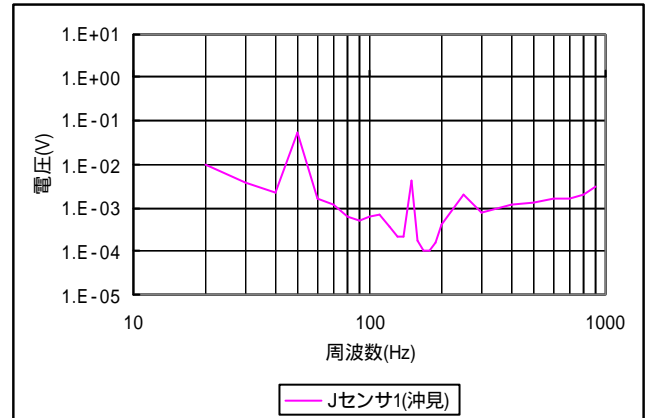


図-14 沖見現場のセンサ出力(補正後)

4.4 基礎実験と沖見現場の出力値の比較

今年度は沖見現場で地中音測定は行ったが、実際に加振器を地中に埋めて測定する時間がなかったために、図-8 に示す地中 A(基礎実験)と地中 B(沖見現場)の状態を同じと仮定する。そして、2つの周波数特性補正後のセンサ出力値を比較し、沖見現場の振動入力を推定することにした。

図-10 と図-14 より、基礎実験のデータを1とし比較する。比較した結果を図-15 に示す。

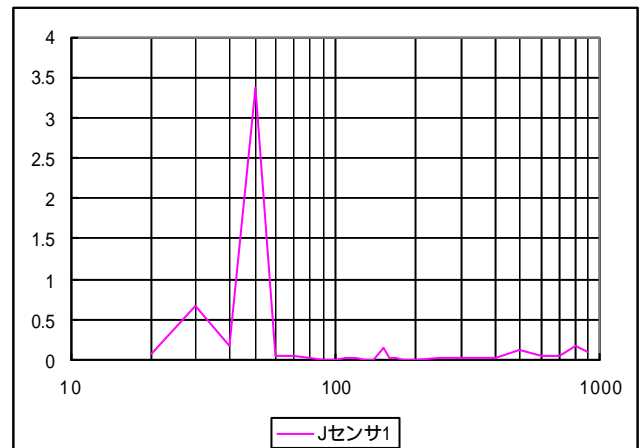


図-15 沖見現場入力値推測(J センサ 1 の場合)

沖見現場では単管パイプを3ヶ所打ち込んで計測を行っているので、その他の2ヶ所についても比較を行った。沖見現場の入力値推測結果を図-16に示す。

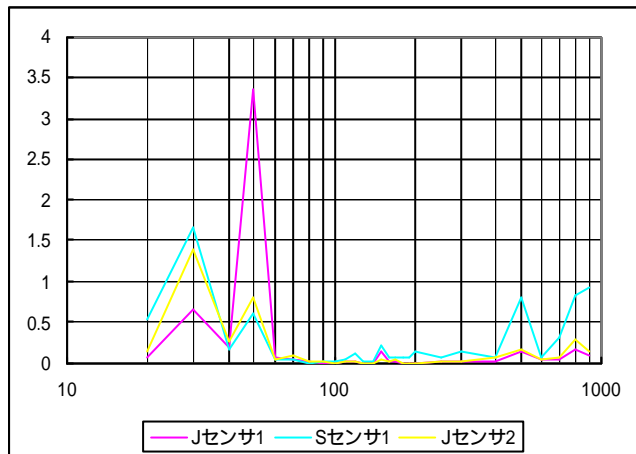


図-16 沖見現場入力値推測

図-16より、沖見現場では30~50Hz前後に振動入力スペクトルが大きくなっていることが分かった。

このような流れで計算を行い、出力値から入力値推定することが可能であることを提案できた。これは沖見現場に合ったセンサを設計する際に重要なデータとなり得るものである。

5. 本研究の成果

今年度の研究成果を以下に示す。

- (1) 単管パイプにセンサを設置する際、地面に対して水平方向より鉛直方向に設置した方がよく振動が伝わるという結果が得られた。
- (2) 単管パイプにセンサを設置する高さ、及び単管パイプの根入れ長さを変化させても出力電圧は大きく変わらないという結果が得られた。
- (3) 樹木と単管パイプを用いて同時計測を行い、その出力電圧を比較しても大きく変わらないという結果が得られた。

このことより、地中音を取得する観測媒体として容易に取得・設置することができる単管パイプを樹木の代わりに利用し、樹木と同等の地中音データを取得できることが分かった。

- (4) 加振器を用いて一様な振動入力スペクトルに対する出力に変換した結果と、実際の測定で得られたセンサ出力に補正を行った結果とを比較し、地すべりに固有な振動入力スペクトルを推定することが可能であることを提案できた。

6. 今後の課題

来年度以降の課題を以下に示す。

- (1) 実際の地すべり現場(沖見現場)で加振器を埋めて計測を行い、一様な振動入力スペクトルに対する出力値を求め、地中音の補正後センサ出力値と比較を行う。そして、沖見現場の入力値を推測する。
- (2) いろいろな地すべり現場で計測を行い、出力値から入力値を推測後、各現場に適したセンサを製作する。そして、地中音を測定する。
- (3) 他の手法で得られた地すべり発生時計測データと地すべり発生時前の振動周波数スペクトルを特定し、比較評価を行い、システムの信頼性を高める必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会編：第四版 土木工学ハンドブック 技報堂出版
- 2) 谷口：地すべり調査と対策 山海堂(昭和57年)
- 3) Gazi Jubayet Jalil：音響的手法の地滑り予知システムへの応用に関する基礎研究、長岡技術科学大学修士論文(平成13年)