

土砂崩壊に関する事前予知へのアプローチ

APPROACH OF EARTH FAILURE PREDICTION

齋藤秀晴¹・森修一²・市川雅巳³・岩本理恵⁴

Hideharu SAITOH, Shuichi MORI, Masami ICHIKAWA, Rie IWAMOTO

¹正会員 (株)CTIサイエンスシステム (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町1-3)

²正会員 (株)CTIサイエンスシステム (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町1-3)

³(株)CTIサイエンスシステム SP事業部 (〒443-0011 愛知県蒲郡市豊岡町藪田44-1)

⁴(株)CTIサイエンスシステム 本社事業部 (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町1-3)

1. はじめに

崩壊、地すべり、土石流の3つに分類されることが多い土砂災害は、法体系もこれらに対応して整備されてきている。急傾斜地法、地すべり等防止法、砂防法の指定区域内における危険箇所を合計すると、18万ヶ所超に及んでいる¹⁾。想定される被害を軽減する為には防災工事の推進とあわせて、情報活用型減災対策が必要不可欠であり、2001年4月1日より土砂新法(「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」)が施行されている。

近年、東海地震の地震防災対策強化地域に指定された市町村を始めとして、多くの市町村が地図のみでなく、防災を総合的にとりまとめた防災マップを発行している。地震については、前兆現象を捉えるための計測技術に基づく連続監視がなされている。観測データに異常な変化が現れた場合は、観測情報、解説情報の発表や、判定会による予知情報としての情報発信といった形で防災情報の体系的活用が進められている。

多くの防災マップには、水害についても雨量、水位、浸水範囲の予測、避難場所等の情報の体系的活用が示されている。

一方、土砂災害については、前兆現象の観測、異常の検知、予知、予測とする情報の流れ方の説明はほとんどなく、一般的な前触れ提示にとどまり、多くは次のように書かれている。かけ崩れは、(1)斜面からの水が濁る、

(2)地下水や湧き水が止まる、(3)斜面のひび割れ、変形がある、(4)小石が落ちてくる。土石流は、(1)山鳴りがする、(2)雨が降り続けているのに川の水位が下がる、(3)川が濁ったり、流木が流れる。地すべりは、(1)

地面にひび割れやずれができる、(2)井戸や沢の水が濁る、(3)斜面から水が噴出す等である。

土砂災害は地震や水害に比べてかなり範囲の狭い地域に限定される災害である。対象箇所数が多く、地形、地質、地盤、降雨等災害要因も複雑で多様な土砂災害にあつては、予警報について、一般的な前触れに要注意といった水準にとどまっている現状の改善が望まれる。

IT社会の到来で、情報と通信は正確かつ廉価でなされ、さらにリアルタイムでの情報配信が可能となってきている。自然(外力)を予知することは非常に困難である点は心しつつも、21世紀の早い時期までに実用化がなされることが必要であると考えている。

2. 前兆現象モニタリングの計測項目

土砂崩壊前兆モニタリングにおける連続計測項目は、以下を考慮して選定する必要がある。1つのセンサで広い範囲の観測が可能であること、メンテナンスフリーで長期間安定的に作動すること、地盤に通電等がなく耐雷性があること、省電源であること、間隙水圧計や伸縮計と同程度に廉価であること等である。併せて、予知へのアプローチとして閾値を設定して異常の前兆現象を観測するためには、図-1の時間(地盤変位)と計測値変化の概念図の関係において、地盤変位を観測する(ロ)型のものではなく、また崩壊の発生を検知する(二)型のものでもなく、(ハ)型のものを使用が必要である²⁾。

筆者らは上記条件を満足する計測項目として表-1に示す地中低周波音、自然放射線(ガンマ線)、雨滴粒度をモニタリング項目として抽出した。地中低周波音の観測は、

いわゆる山鳴りの観測であり風化マサ土のすべり面、泥岩等の亀裂音、樹木の根切れ音の発生、地盤変位による地盤音響インピーダンス（密度×速度）の変化、落石等の音を観測するものである。

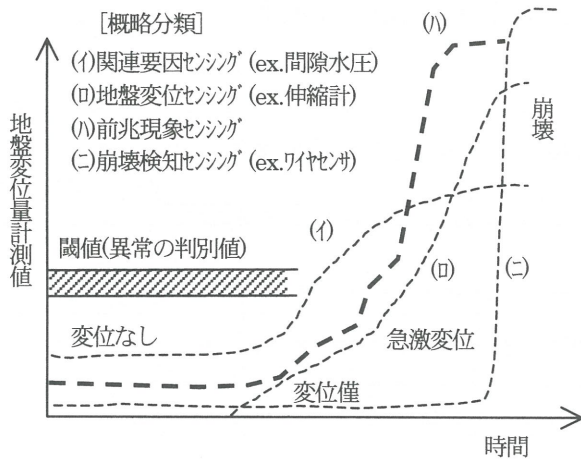


図-1 地盤変位と計測値変化の関係（概念）

表-1 連続計測項目と観測事項

センシングデバイス	前兆現象観測	要因観測	崩壊発生の検知他
音圧センサ (10分毎間欠計測)	・低周波音音圧の高レベル化(すべり音, 亀裂音, 根切れ音等) ・卓越周波数の発生(特定現象による音の判別)	・音圧変化のパターン化分類	・帯域別音圧変化量(崩壊による音響エネルギーの発生検知, 砂防ダム振動音の発生検知, 流水への土砂混入による音の変化)
ガンマ線センサ (常時監視計測)	・地下からの放射線飛散量増加(深層地下水上昇, 破碎帯変位等) ・放射線量の急激低下(地表変位によるマーキング浮石移動, 流転)	・地中放射線変化量(超過保留量推定)	・マーキング石を利用したガンマ線量低下の検知
準備中 超音波雨滴粒度センサ 雨量センサ (降水時1分毎計測)	・エリア内の含水量変化(飽和量の推定)	・雨滴粒度分布(降水量浸透分の推定) ・雨量(雨量観測, 降水有無判定)	・エリア内における超過保留量の検知

ガンマ線の測定は滞留時間の長い地下水が高濃度のラドンガスを含んでおり、そのラドンガス類に起因するガンマ線量を観測するものである。

土砂崩壊現象の分類見解が降雨要因のみである場合の崩壊は、降水観測の精度を向上することが必要である。雨量とともに、地中への浸透性に影響を与えると推定される、雨滴の大きさや落下速度の観測も有用であると考え、雨滴粒度の観測機器も準備中である。

3. 地中低周波音の計測と観測事例

表層崩壊、岩盤崩壊や亀裂等による損傷の急激な進行がある場合、一般的には前兆現象として異常音が発生する。この音は人間の耳には聞こえづらい低周波を中心とした発生音であり、この特性をピーク周波数で示すと、図-2 のようになる。多くの場合、これらの音はピークが明瞭な波形ではなく、なだらかな山形の形状として表れる。正常時あるいは特定現象のない場合、単一の現象ではなく複合的な現象となる。音が発生する要因が複数で、ノイズもある場合、測定される音の周波数波形は図-3 下段の様にピークが明瞭でない波形になる。これに対して、大規模な地盤変位が発生した場合や崩壊時は、図-3 上段の様な形状となり、音圧増加とあわせていわゆる卓越周波数を持つ音の発生となる。

これらの諸点を踏まえて、振動領域、低周波音域、可聴音域を1, 10, 100, 1000Hz の4 周波数帯域に区分するバンドパスフィルターを介して、帯域別音圧(強度)及び全帯域音圧を計測する必要がある。

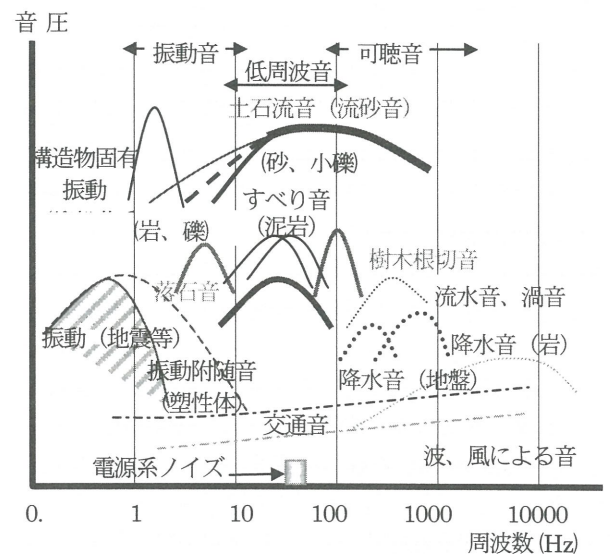


図-2 地盤伝播音の音源特性（概念）

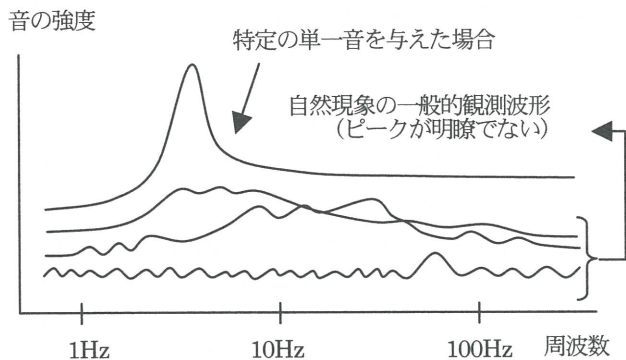


図-3 地中あるいは構造物の低周波音の特性 (概念)

図-4 は地盤のひび割れが発生し、崩壊の危険性のある道路法面の頂上部に音圧センサを埋設して地中音圧の経時変化を観測した結果である。3/7 10:25 頃に実際に崩壊が発生した。観測が10分毎だったために崩壊自身は捉えられていない。降雨がない崩壊であった。写真-1に崩壊後の現場写真を示す。崩壊時間直近はもちろん、崩壊が起こる1日前ぐらいから比較的高い音圧値が頻繁に計測されているのが分かる。例えば100Hz帯域音55 μ Paが閾値であれば、3/6の12時頃に前兆が現れたことになる。

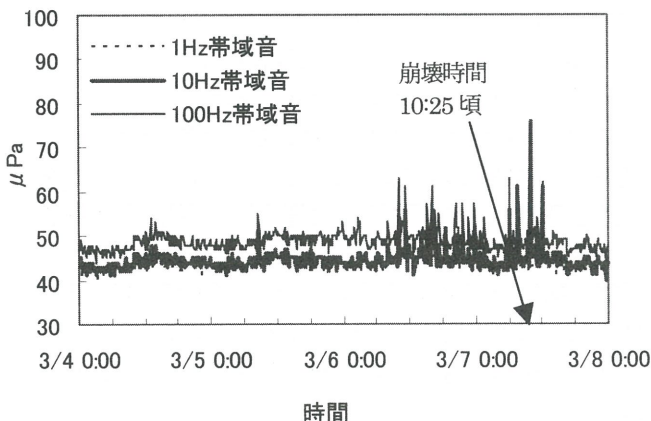


図-4 道路法面地中音観測事例 (F県, 2002年3月)



写真-1 道路法面崩壊現場 (F県, 2002年3月)

図-5 は河川下流域の高水敷内において、コンクリート製ピアから50m離れた地点で、地表下0.3mに埋設した音圧センサで測定した列車通過時の音圧変化例である。これは、音源移動が土石流に類似していると考えての例である。サンプリングは0.2secピッチで実施しており、図中のサンプリング数40~110にかけて、通過開始前に音圧が徐々に上昇している。土石流発生時の音圧変化率や継続時間は音源規模や移動速度等によって異なるものと推定され、実例の蓄積によって閾値が設定できる可能性が窺える。

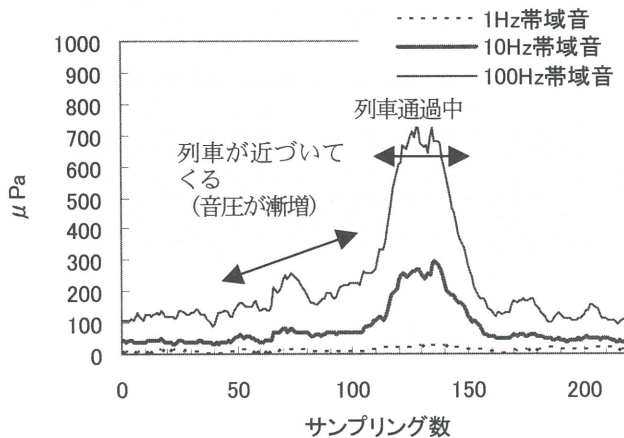


図-5 列車通過時の地中音圧変化事例 (2003年10月)

地盤変位、泥岩等の割れ、樹根の根切れ等により発生する低周波音の地盤中の音の伝播は、次に示す関係となる。従って、定点での音の観測としては音源エネルギーの大きさ、地盤の特性、距離等により変化する。また、周波数により伝播特性が異なり、周波数が高くなる程減衰が大きく、逆にいえば低周波音は遠くまで伝播し、広範囲の観測が可能となる。

$$E = E_0 \cdot e^{-\lambda \cdot l} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{2\pi \cdot h \cdot f}{V} \quad (2)$$

但し、

E : 距離 (m) 離れた地点の伝播音エネルギー量

E₀ : 発生源での音エネルギー量

λ : 地盤内部減衰係数

l : 距離

h : 損失係数/ 岩盤 0.01, 砂・シルト 0.1, 粘土 0.5 程度

f : 周波数

V : 伝播速度/ 粘土・シルト 100~180m/s,

硬い粘土・シルト 180~300m/s

砂・礫 150~220m/s,

湿った砂・礫 250~300m/s

風化岩 350~500m/s,

岩盤 400~800m/s

現地地盤特性と計測データに基づいたキャリブレーションを行うことにより、効果的なセンサ配置の選定や、複数箇所設置した場合の異常値出現時間のずれによる崩壊エリアの推定等が可能になると期待している。

写真-2 に土石流検知に向けて砂防堰堤天端上に音圧計を埋設した現地写真を示す。

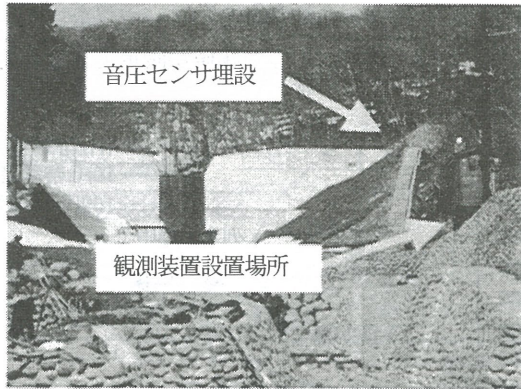


写真-2 土石流検知のための音圧センサ設置現場 (F県, 2004年3月)

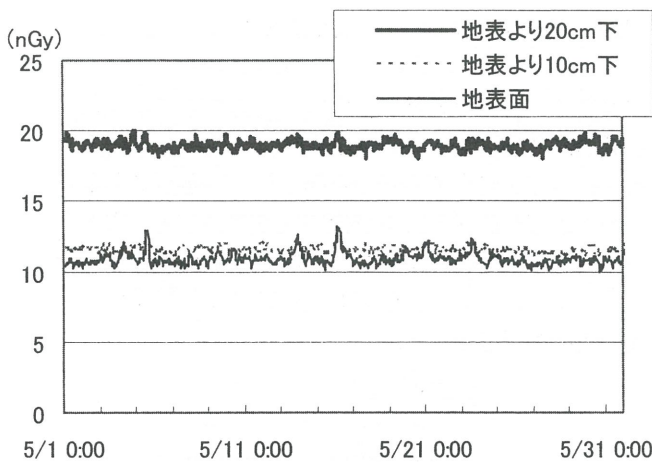


図-6 実験観測におけるガンマ線量変化例 (2004年5月)

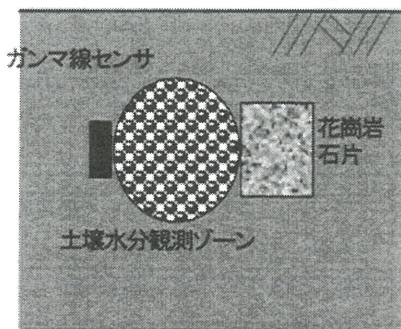


図-7 マーキング材を用いた模式土壌水分観測例

4. 自然放射線 (ガンマ線) 量による計測とその事例

ガンマ線センサ (GM管にて検出) は基本的に地表面、地中埋設あるいは地下水帯水部では開孔ケーシングの観測孔の空中部へ設置し、深層地下水の湧昇、破碎帯の変位による水中への溶出量増加や移流拡散量増加を観測して異常を検知することに使用するものである。自然放射線量の急激な上昇はこれらの現象以外考えられないもので、異常の検知メーターとしては一級である。

図-6 は実験観測現場における近接した3箇所のガンマ線量変化事例である。計測値は1時間累積方式の結果であり、3地点ともほぼ安定した一定傾向を示している。ただし、地表面に設置したセンサは、降雨の影響 (空中のラドンガスに含まれるガンマ線が雨粒に取り込まれる) を受けていると推定される。

地表下10cmに対して、同20cmの結果は、ガンマ線量が約1.6倍となっている。この相違は、センサ検知範囲において、20cmの方が、対象となる地中の上部空間が広いと推定される。

この結果に基づくと、降雨の影響を軽減し、異常検知の感度を高めるには、少なくとも地表下30cm程度以上の深さへの設置が望ましいと考えられる。

また、自然放射線の含有量が一般より5~10倍程度高い花崗岩石片 (マーキング材) と組み合わせれば、マーキング材からのガンマ線量が土壌水分量に比例して減衰する反応の利用から、土壌水分量が計測可能となる。

図-7 の模式図に示すように、センサとマーキング材を約20cm離して、地表下30cmに埋設して計測した事例を図-8に示す。

設置現場ごとのキャリブレーションが不可欠であるが、降雨による斜面崩壊の発生メカニズムに関連して定義されている超過保留量等³⁾の解明に寄与できるものと考えている。

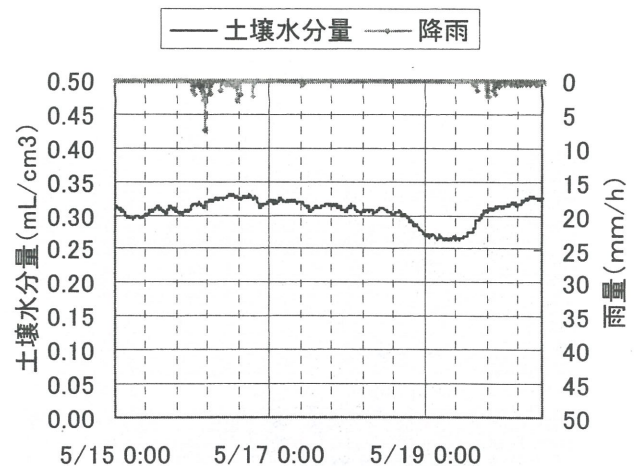


図-8 土壌水分の実験観測例

5. おわりに

急傾斜地や道路法面等の災害危険箇所における想定被害の軽減には、情報活用型のモニタリングシステムの開発が不可欠と認識される。

連続計測項目として、地中低周波音、自然放射線（ガンマ線）量を対象に2, 3の観測例を示した。

地中音観測と崩壊前兆現象の事例（道路法面のケース）では、発生1日前ぐらいからBG値に比して高い音圧値が断続的に計測されており、異常検知に向けた閾値設定の可能性が示された。他に音源移動が土石流に類似していると考えられる列車通過時の例を示して、同様に閾値の設定が可能である見通しを得た。

自然放射線のガンマ線量に関しては、試験段階であり、異常の計測は出来ていないが、土壌水分量への応用や準備中の雨滴粒度計等と合わせて前兆現象モニタリングシステムとして予知への可能性に期待が持てるものと考えている。

このようなアプローチは、観測機器の進歩にとっても重要である。今後、より多くの現場へ適用され、異常検知の精度向上、ひいては減災対策に寄与できることを期待するものである。

謝辞：本報告に際し、実験観測のために敷地を提供していただいた宇津野氏、貴重なご助言を賜った山口氏（元東京電機大学）に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 地盤調査の方法と解説，社団法人地盤工学会，pp. 18, 2004
- 2) 山口高志，斎藤秀晴，森修一，市川雅巳，岩本理恵：土砂崩壊前兆現象モニタリングシステムの開発，河川技術論文集，第10巻，pp. 255-260, 2004
- 3) 北園芳人：降雨浸透による斜面崩壊の危険度予知・予測とその対策，降雨による地盤災害に関する研究報告，pp. 38-40, 1997

(2004. 6. 18 受付)