

土砂崩壊前兆現象モニタリングシステムの開発

DEVELOPMENT OF EARTH FAILURE PREVIOUS NOTICE PHENOMENON MONITORING SYSTEM

山口高志¹・斎藤秀晴²・森修一³・市川雅巳⁴・岩本理恵⁵

Takayuki YAMAGUCHI, Hideharu SAITOH, Shuichi MORI,
Masami ICHIKAWA, Rie IWAMOTO

¹正会員 工博 河川観測技術研究所 (〒277-0863 千葉県柏市豊四季 645-14)

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)

⁴(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)

⁵(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)

Previous notice phenomena a few hours before earth failures must be observed in the sediment disaster areas. In this study, underground sound meters (low frequency sound and oscillation sound pressure), gamma ray scintillation counters, and rainfall meters and disdrometers when needed, were employed as monitors for a previous notice, and installed in the experiment fields. A few example data were introduced, but the thresholds of a previous notice were not determined.

Key Words: earthfailure, underground sound observation, gamma rays observation, previous notice

1. はじめに

急傾斜地等の災害危険箇所は、人家5戸以上に被害が想定される箇所に限っても全国に約18万ヶ所もある。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、観測データの異常確認から警戒宣言発令までの流れが示されており、前兆現象を捉えるために計測技術に基づく連続監視がなされている。この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が行われる。すなわち、前兆観測、異常の検知、自然(外力)変化の

予知、影響の予測、避難勧告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、水害についても情報の体系的活用が示されている。雨量、水位の観測、異常の判別、自然(雨量等)情報リアルタイム提供、降水量予報、浸水範囲の予測、避難場所等である。

土砂災害についても示されているものの、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っている。多くは次のように書かれている。がけ崩れは、(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。その範囲の狭い地域

に有効かつ実用的な崩壊予測モデルも観測情報もない点、土砂災害に対する予警報については一般的な前兆に要注意といった水準にとどめていると考えられるものである。

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である。本研究はこうした背景を踏まえて、崩壊が考えられる箇所ごとに崩壊予測モデルを構築し、崩壊前兆現象のモニタリングを通じて、土砂災害の予測、ひいては3時間前の避難勧告の実施等の目標を追求しているものである。

本報告は、こうした視点で行っている研究成果の第一報としての報告である。狭い地域ごとに調査と観測が必要であり、そのためには低コストでなければならない。同時に自然（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構成

土砂崩壊前兆現象モニタリングは崩壊モデルを含めたモニタリングエリアの設定、リアルタイム状態連続計測、及び異常の検知を含めた予知へのアプローチの3つのフレームで構成されている（図-1）。

モニタリングエリアの設定は、当該危険地帯において大規模な土砂崩壊が発生するとした場合の、崩壊エリア、崩壊深度、流出土砂量等の推定、崩壊パターンの分類、崩壊土砂の下流域氾濫想定図等の把握ができるようにするものである。

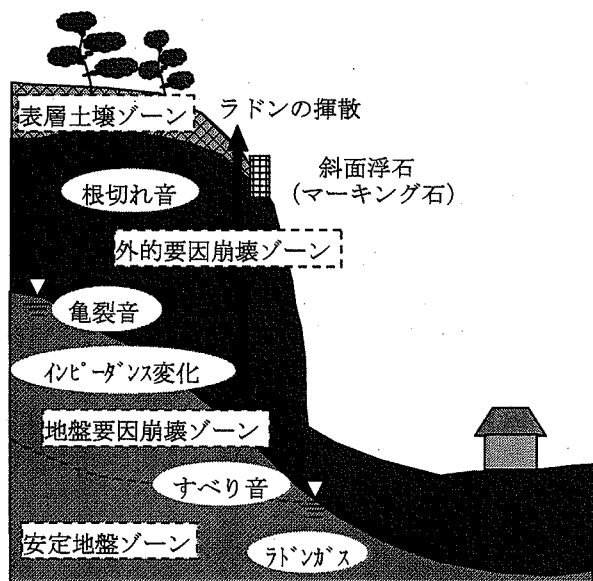


図-2 崩壊モデル作成の地盤構造概念図

現場踏査及び1～2日で終わる探査を行ったうえで、崩壊モデルの作成を行う。この場合図-2、表-1に示すように地盤の深さ方向の特性を表層土壌ゾーン、外的要因崩壊ゾーン、地盤要因崩壊ゾーン及び安定地盤ゾーンに分けて作成することが重要である。同時に、経済性等より、リアルタイム連続計測を出来るだけ1地点で行うことが望まれる。そのためには、モデルの崩壊ゾーン特性を明確にした上で、土砂崩壊の前兆観測として最も適した地点を選定することが重要である。

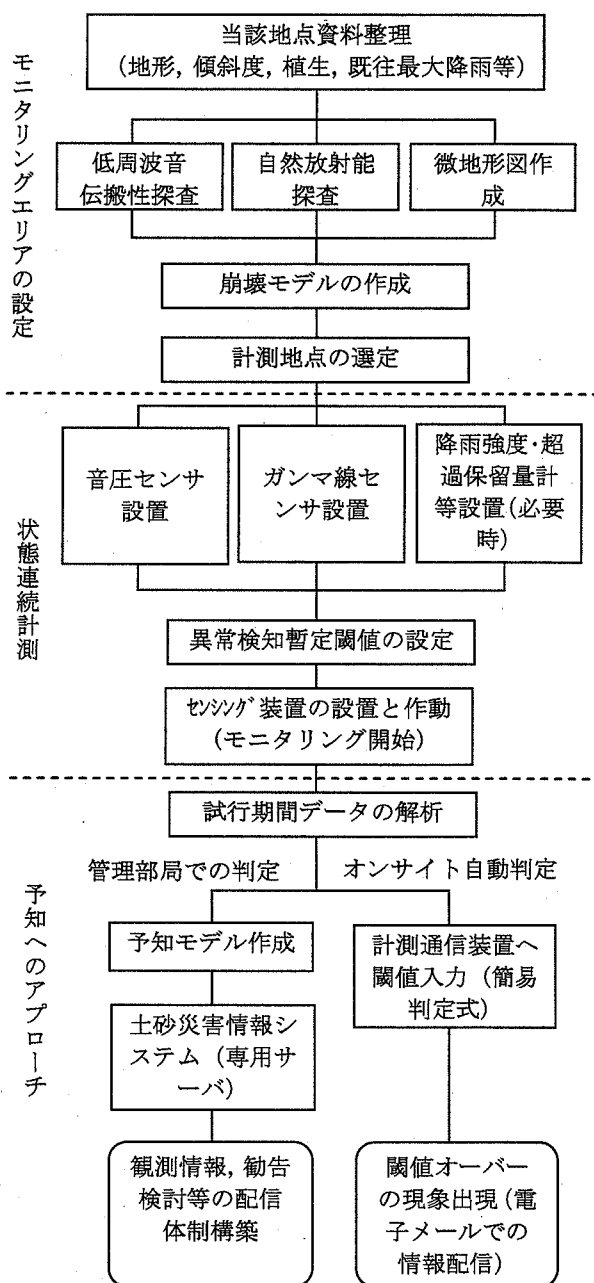


図-1 前兆現象モニタリングの全体フレーム

表-1 崩壊モデル作成の地盤区分と現象

地盤区分	地盤変化現象	土砂崩壊前兆現象
表層土壌ゾーン	地盤の外観変異	地盤のたわみ、ずれ、割れ目 小石の落下
外的要因崩壊ゾーン	水みちの不連続化	水が止まる、濁る 斜面からの水の噴出
地盤要因崩壊ゾーン	地盤の内部変化 破砕部等の変異	山鳴り音の発生（すべり音、亀裂音） ラドンの高濃度化

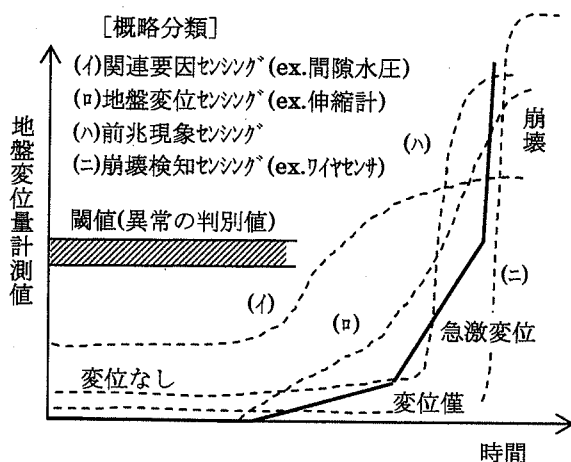


図-3 地盤変位と計測値変化の関係概念図

連続計測項目は、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の廉価であること等を考慮して選定する必要がある。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検知の前兆現象観測をするためには、図-3の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)型のもではなく、また崩壊の発生を検知する(二)型のもではない、(ハ)型のものの使用が必要である。

筆者らは上記条件を満足する計測項目として表-2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いる。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。

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。

表-2 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
(10分毎間欠計測) 音圧センサ	・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、破砕帯変位等) ・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 (降水時1分毎計測) 超音波雨滴粒度センサ	・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)	・エリア内への超過保留量限界の検知

崩壊モデルからの当該エリア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。降雨の内の地質浸透性のある降水量の観測が有効であり、雨量とともに雨滴粒度の観測機器が有用であると考え準備中である。

状態連続データを活用した予知へのアプローチが最も重要である。観測値異常がそのまま崩壊確率の上昇であると考えての計測項目を選定している。それでも閾値を明確にし、目標の3時間前避難勧告等のシステムにしていくためには、計測データの解析が必要不可欠である。

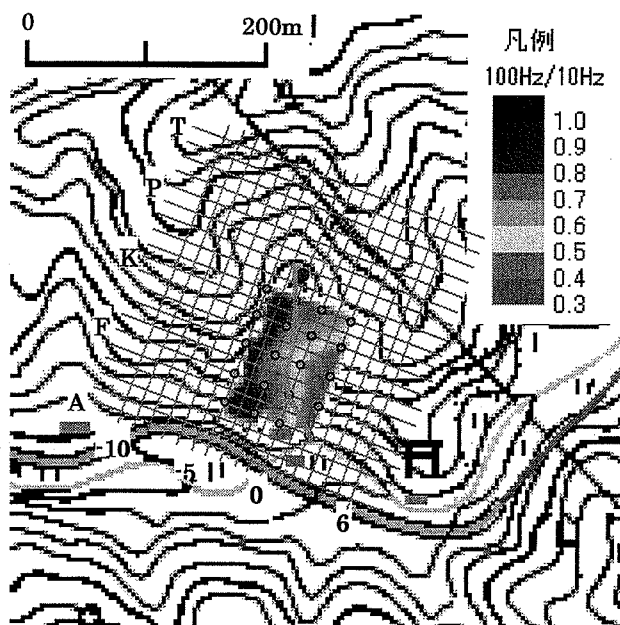


図-4 低周波音簡易探索結果例 (100Hz/10Hz 音圧比)

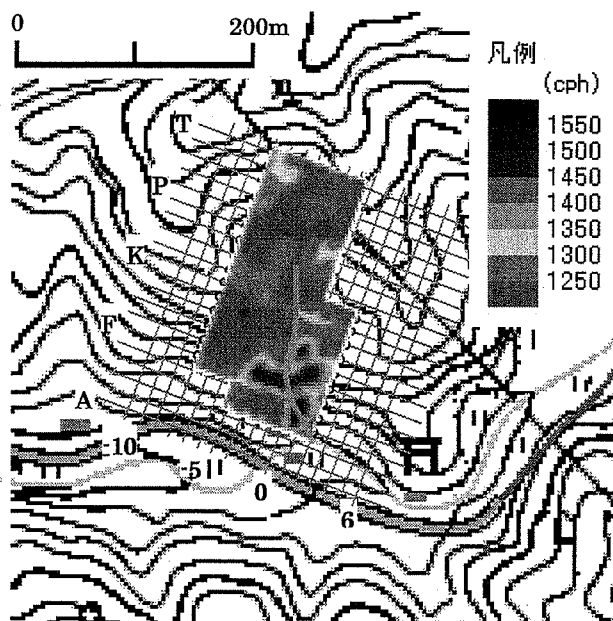


図-5 自然放射線探索観測結果例

3. モニタリングシステム構築の方法

愛知県岡崎市小呂町の急傾斜地，土石流危険地域において，モニタリングシステムの手法確立を兼ねて2003年10月24日より実験観測（地中低周波音，ガンマ線）を開始した．現在も観測中である．

当該地域の急傾斜地，土石流危険域は約 60,000 m²の流域であり，危険渓流下流に数軒の民家がある地点である．図-4は低周波音伝搬性の探索を行った結果である．具体的には合計20地点に帯域別低周波音圧計（RT520-A型）を設置しておき，渓流部の大きな樹木を金槌で打撃することにより発生する低周波音を100Hz帯域音と10Hz帯域音として測定するものである．10Hz帯域音に比して100Hz帯域音の低下が大きい地点が地盤の乱れであり左岸地点にその現象が見られる．

1時間累積方式（P12型）での自然放射線探索の結果が図-5である．調査としては簡単であり，約1～2日の作業で終了する．地形とは別に自然放射線がバックグラウンド値（BG，1300cph以下）に比して約1.3～1.5倍（1500cph以上）となる地域があり，破碎帯等の存在の可能性が考えられる．

微地形図，自然放射線探索，低周波音伝搬性探索の結果を踏まえて，図-6の計測地点を選定している．音圧センサは地表から0.3mの深さに埋め込み，ガンマ線センサは地表面に設置している．

この音圧センサは，流送土砂量（掃流砂）の観測にもその可能性が期待され始めており，砂防ダム付近や河川上，中流域に設置されている．

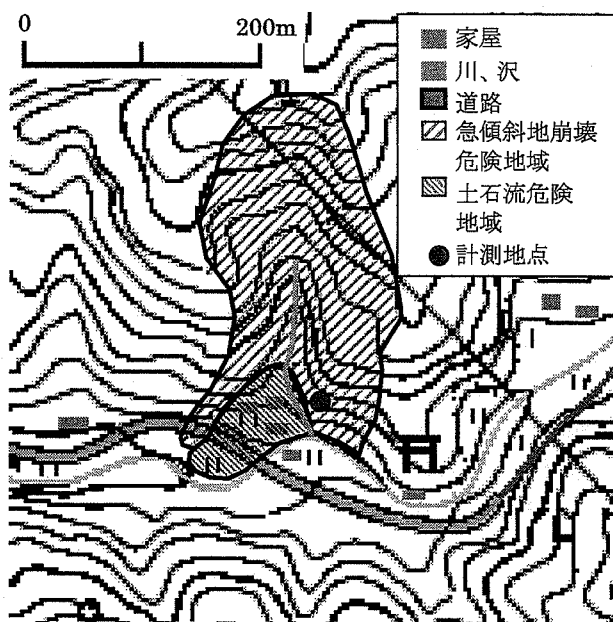


図-6 計測地点

この場合は，出水時に対応できるよう，設置方法に工夫（センサ，ケーブル保護）が必要となる．

ガンマ線センサは基本的に地表面，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により，自然放射線の急激な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の現象以外考えられないものであり，異常の検知メーターとしては一級である．

表-3 マーキング石の分離実験結果

時間	測定値 (cph)	摘要
11:20	1413	○使用したマーキング石 大きさ 径 30cm 角 体積 0.25 m ³ 重量 55kg
11:30	1482	
11:40	1465	
11:50	1386	
12:00	2864	○ガンマ線センサとマーキン グ石の距離 0.2m
12:10	2862	
12:20	2735	
12:30	2913	○マーキング石配置について 11:51 マーキング石を置く 12:31 マーキング石を外す
12:40	1392	
12:50	1413	
13:00	1334	

(cph $\div$ 0.018 μ R/hr)

この観測結果に限らず、地表面、井戸、観測孔空中部に設置したガンマ線センサが、深層地下水の噴出、地下破碎帯の陥没等により自然放射線量の急激な増加を観測している、多くの観測事例があり、地震予知でも使用されている有効なモニタリング項目である。

ガンマ線センサを工夫して取り付ける場合は2通りある。いずれも自然放射線の多い砂にモルタルを混ぜて作ったマーキング石を用いる。一つはガンマ線センサの近く(0.1~0.2m)に自然放射線の多いマーキング石を置いて、この石が移動あるいは流失してしまった場合をチェックすることによるモニタリングである。この場合は放射線強度が当該地点のBGまでに急激に低下することで容易に分かる。表-3はその事例である。二つは、マーキング石を地中に埋設して、土壌水分量あるいは超過保留量を観測する場合である。この場合は土壌中の水分量が増加することにより、ガンマ線量が線形的に低下することで観測が可能になる。

現在もこの計測地点において地表放射線量、地中音圧の連続観測を継続中である。設置地点直下に人家と畑があり、道路もある条件下での日常的な微小変化を含めたBG値に対して、異常との判別を行う、閾値を設定しての異常の自動検知が可能である。

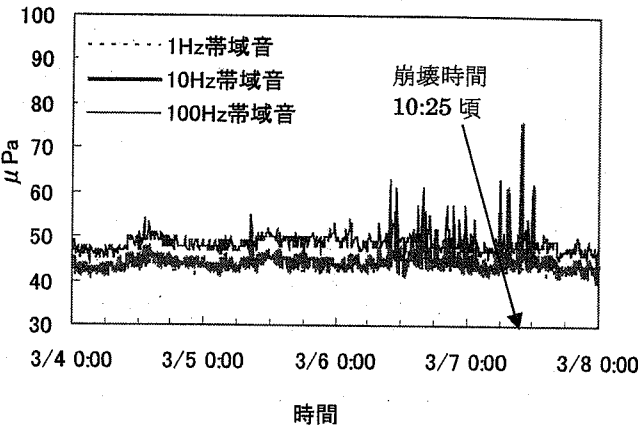


図-7 道路法面地中音観測事例 (F 県, 2002 年 3 月)



図-8 道路法面崩壊現場 (F 県, 2002 年 3 月)

4. 観測事例と前兆現象

地中音観測による前兆についての事例を紹介する。まず、図-7 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。図-8 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-9 は、道路に面した急傾斜地の地すべり危険地域の斜面に音圧センサを埋設して観測した事例である。7/9 夜半から翌日の午前にかけて台風が通過しており、10Hz 音、100Hz 音の他に降水の影響と推定される 1kHz 音の増加がみられる。当該地域に設置されていた伸縮計によると、日変位量で 161.4mm (10 日)の地盤変位が発生したが崩壊には至っていない。

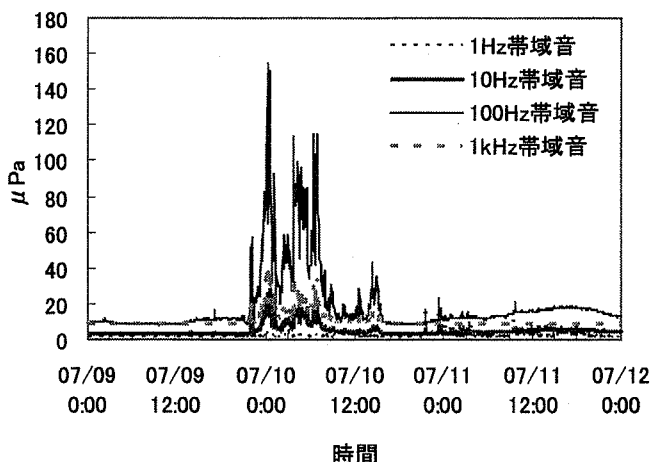


図-9 地すべり危険地域地中音観測事例 (G 県, 2002 年 7 月)

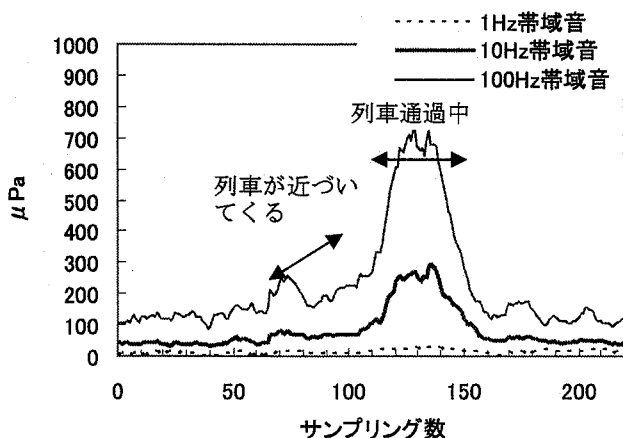


図-10 列車通過時の地中音圧変化事例 (2003 年 10 月)

図-10 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 離れた地点に、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。移動荷重による音圧変化は、土石流のような状態変化に類似しているとも考えられる。

以上、少ない事例ながら土砂崩壊や移動荷重に伴う地中音圧の変化が観測できる事実は、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。

5. 結論

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。

モニタリングシステムの全体フレームを提示するとともに、連続計測項目として、地中低周波音、自然放射線 (ガンマ線) 量を対象にモニタリングエリア内の簡易探査を実施した。低周波からは、エリア内左岸域の地盤の乱れが確認され、ガンマ線については、周辺 BG 値の 1.3~1.5 倍となる地域が測定された。両方の結果は左岸域付近において顕著でありここに破砕帯等の存在の可能性が示された。

地中音観測と崩壊前兆現象の事例として道路法面のケースを示した。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を示唆している。他に地すべり危険地の例、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。

地震や地すべり等の土砂崩壊は発生自体の解消はできないので、被害軽減のための事前対策すなわち「予防」が重要課題となる。自然科学的な意味での厳密な「予知」はできなくても、防災の観点からは「予見可能性」の有無は個別に問われ、道路管理者の瑕疵責任とされる。「名古屋高裁判例 昭 49.11.20」の例もある。

効果的な予防に向けた予見可能性の追求とも言え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が図れ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 (株) 建設技術研究所の中矢氏に心から感謝いたします。

(2004. 4. 7 受付)