

第4章. 落石に関するその他の研究

4-1. 落石災害の新たな要因について

落石災害の減災・防止対策を講じる前には、予測する落石発生源での詳細な落石素因を把握しづらい状況下にあるため、詳細な落石調査を実施することが望ましい。このような落石調査では、平成8年度道路防災総点検で示された調査手法¹⁾が多用され、現地での落石要因・因子を専門技術者が個々に評価し、最終的な危険性判定をする手法である。ただし、この手法で調査した道路防災点検結果として、判定された落石危険箇所以外への落石被害が数多く報告されていることから、現行の落石調査で評価を行う要因・因子が対象地域の落石要因・因子として合致していないこともあると考えられる。このため、落石危険箇所の抽出漏れのなくすために、一般的な落石要因・因子以外のあらたな要因について分析し、今までの落石危険箇所の抽出漏れなどを少なくすることを検討する。

本研究の研究対象である岐阜県は、管理する道路において2003～2012年までの10年間の落石被災記録がまとめられている。この落石災害記録を検証すると、道路などの線構造物への落石事象では、降雨・地震・融雪期などの一般的によく知られている落石条件以外を原因としての落石が小径ではあるが、かなりの割合で確認されている。落石被害箇所の誘因の中で一般的に災害誘因として知られている降雨に着目して、被災箇所での被災時における落石誘因と被災箇所についてまとめたものを以下に示す。ただし、これらの災害記録は、落石径に関わらず小径なものまで記録されているため、一般的に公開されているような道路通行障害が生じるような大径の落石だけではない。これは、落石災害が落石径に関わらず人命に関係するため、道路管理として落石素因・誘因を把握するために記録されたものであり、落石現象を理解するためには非常に有効な資料である。

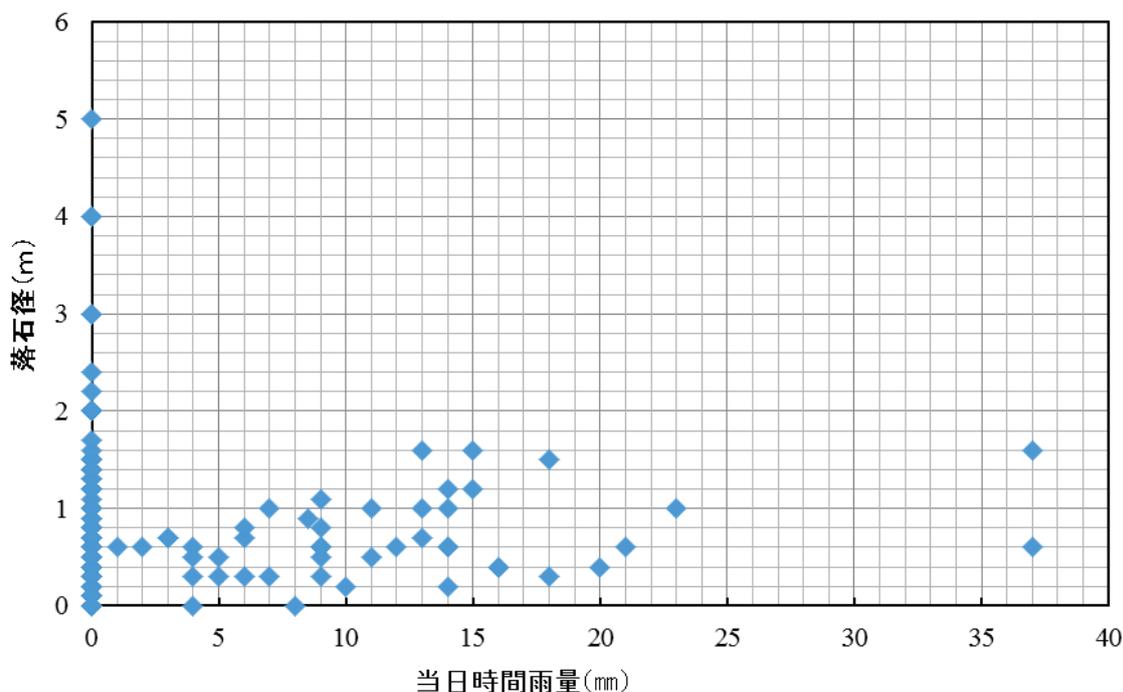


図 4-1. 落石被害時の落石径と時間雨量の関係

【被災当日の降雨量 0 mm の割合：89%（降雨量 0 mm 379 箇所/全 426 箇所）】

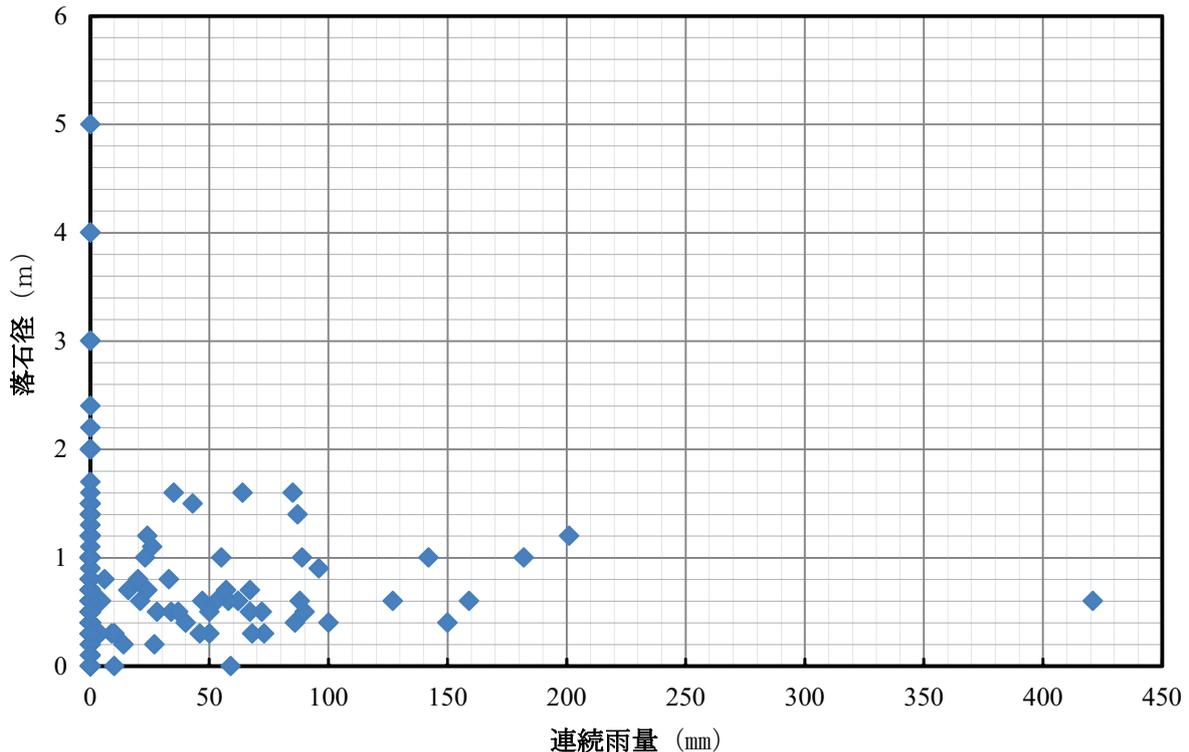


図 4-2. 落石被害時の落石径と連続雨量の関係

【被災当日の降雨量 0 mm の割合：89%（降雨量 0 mm 379 箇所/全 426 箇所）】

図 4-1,4-2 より，一般的に落石災害の誘因としてよく知られている「降雨」が誘因として特定できない被災箇所について，10 年間で約 90%（379 箇所）が被災時に降雨のないことが分かる。また，岐阜県全域のデータを調べた結果，落石発生の日・前日における降雨履歴があった落石箇所は，図 4-1 に示すように 47 箇所（全落石箇所 426 箇所－379 箇所）である。このことは，対象区域における多くの落石誘因は，落石径に関わらず降雨以外にあるといえる。ただし，岐阜県の全県データから，落石発生原因がある程度明確な被災箇所（全 114 箇所）の中で，数日前からの小雨も含めた「水」が誘因と判定されたものは以下のように 2 種類に分けられる。

- 「降雨による基盤の緩み・脚部侵食等」・・・45 箇所
 - 「凍結融解による脚部劣化」・・・・・・・・・・ 9 箇所
- 計 54 箇所・・・約 47.4%（54/114 箇所）

上記の結果から降雨が直接的な誘因となって地表が侵食され発生した落石災害や浸透水によって基盤が軟弱化して被災した箇所数が約半数あることを示し，降雨が重要な落石誘因であることを証明している。ここで，斜面内の落石発生源脚部が侵食されるのには，相当量の表流水が必要であることは理解できるが，落石発生源の基盤が緩む現象については，表土層中を浸透する土中水の特性を理解することが必要である。浸透水に関して，凍結融解による落石箇所数であるが，岐阜県の山岳地帯の多くは積雪地帯であり，道路防災点検結果などを確認すると融雪期に防護柵工の裏などに比較的多くの落石を発見することができ，残雪の関係で道路まで落石が達していないため箇所数が少ないのではないかと考え

られる。

ここで、落石災害における斜面表土内の浸透水と地盤の劣化に関する関連研究として、杉井ら²⁾³⁾は比較的均質な地盤中を浸透する浸透水の浸透・流下について研究しており、浸透水の流下特性や目詰まり現象などを通して斜面内の表土層がどのように劣化するかの参考となる。しかしながら、現状では山地表層部土質の変化が大きいため研究成果を直ちに利用できる状態ではなく、さらなる研究が必要であり、雨水侵食・土層の緩みという現象については、既存の考え方¹⁾から一般的な調査・検討を行うこととし、現状として本報告では除外する。

岐阜県における落石誘因がある程度明確な落石災害箇所の残り半数は、地震が2箇所であり、一般的な落石誘因ではない誘因「獣害」や「風による樹木の振動：強風による落石」などの報告がある。ここで、検討している落石被害箇所数と発生月についてまとめたものが図4-3である。図4-3より、岐阜県管理道路では、2003～2012年の10年間で合計426箇所の落石が確認でき、10～1月の冬期には落石被害が少ないことが分かる。図4-3より、岐阜県では、2月から4月かけて落石が多い傾向があることが分かる。この傾向について、岐阜県南部・北部の気象との関係把握する必要がある。

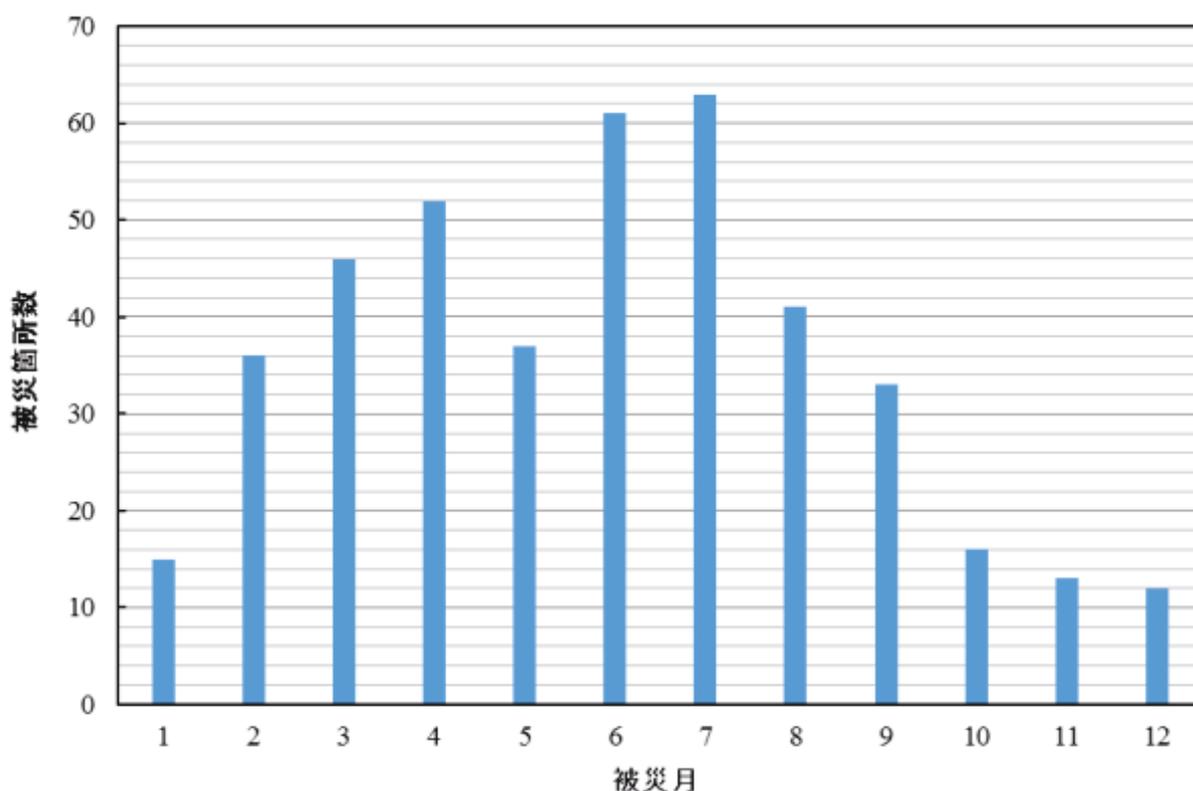


図4-3. 落石発生月と落石発生高さの関係（2003～2012年の累積）

岐阜県における気象条件を把握するため、岐阜県の南部・北部の降水量などをまとめた岐阜気象台資料が図4-4,4-5である。

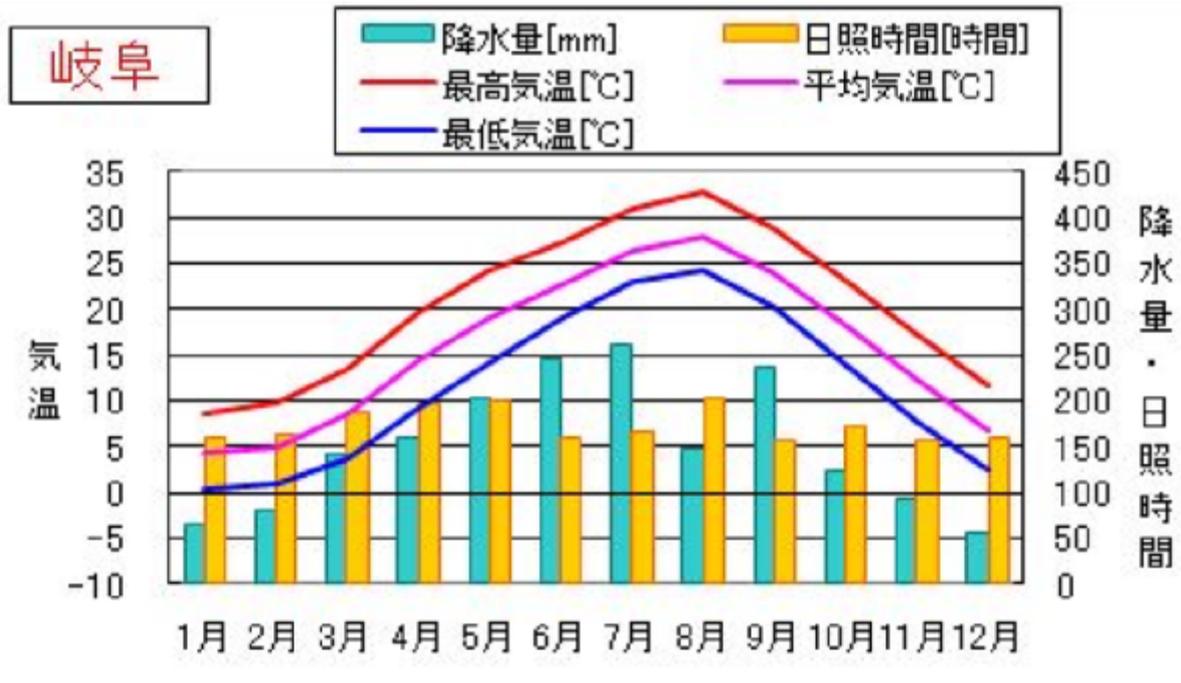


図 4-4. 岐阜市における平均降雨量
岐阜気象台資料（1981～2010 年の平均値）

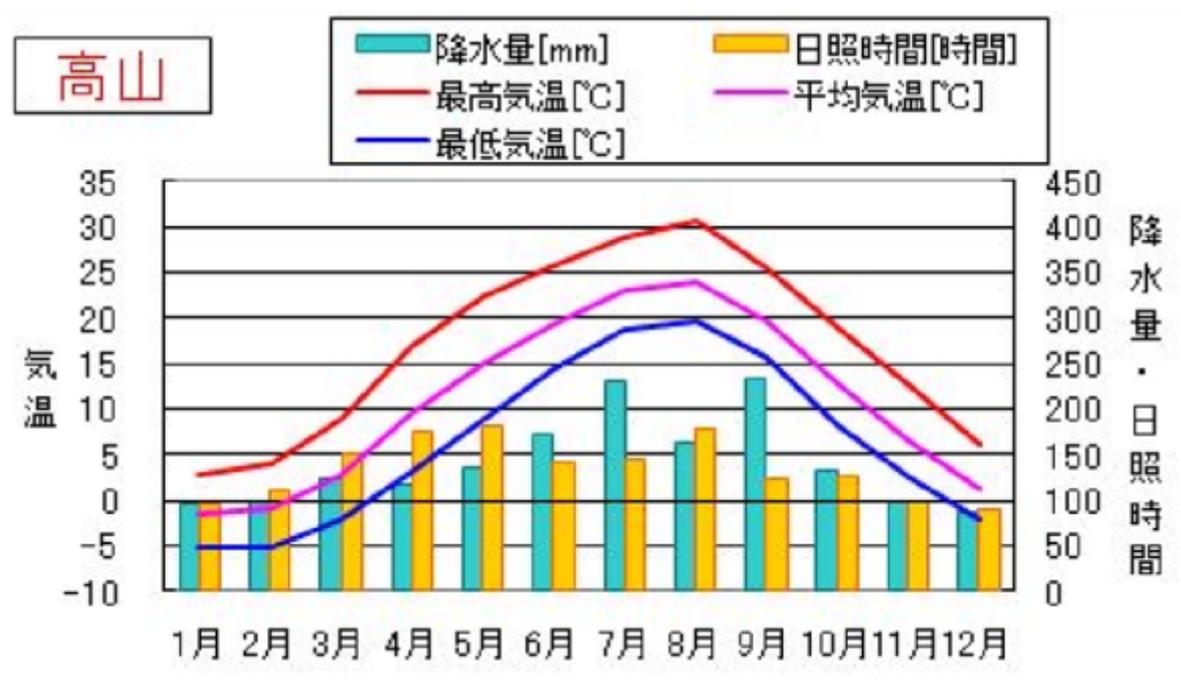


図 4-5. 高山市における平均降雨量
岐阜気象台資料（1981～2010 年の平均値）

同図より、平均降水量が多く豊水期といえるのは、岐阜市周辺で6～9月であり、高山市

周辺では7～9月といえる。また、平均気温が0°を下回るのは降雪の少ない岐阜市周辺で1月であり、降雪の多い高山市周辺で2～3月である。このことから、落石災害の重要な誘因としての雨水・融雪水と落石被災数との間には、豊水期に落石被災箇所数の増加が見られるため、何らかの相関があると考えられる。しかしながら、図4-3の2～4月における落石災害の増加に関しては、降水量以外の別の要因があるように判断される。図4-4,5から見れば、岐阜・高山両地域の日照時間と落石被災箇所数に関係するようにも見えるが、この期間の他の気象的条件も考慮に入れるべきであると考えられる。

図4-6は、岐阜市・高山市周辺の月別平均風速を図示したものである。同図より、岐阜県では、梅雨・台風時である6～10月に平均風速が大きくなることは予想されるが、地域によって平均風速こそ違うものの2～4月にかけて風速が大きくなる傾向がある。図4-6におけるこの現象は、春期の太平洋を横切る高・低気圧によって引き起こされる中～強風の季節風と考えられる。このため、この季節風による影響が考えられるとした場合、風と落石についての研究も必要である。

落石災害の対策に利用される落石対策便覧では、落石要因として「風」がある。風要因に関しては、落石対策便覧においても詳細な説明がなされておらず岐阜県の落石災害箇所の誘因として風が誘因とした報告もある。風を落石誘因とした場合、風力による樹木等の振動などによって劣化した岩盤などからの落石現象が生じていると考えられる。よって、本研究では、各地で報告されているが記録にあまり残っていない風による「樹木振動」を落石要因であると想定しその特徴について検討を行った。

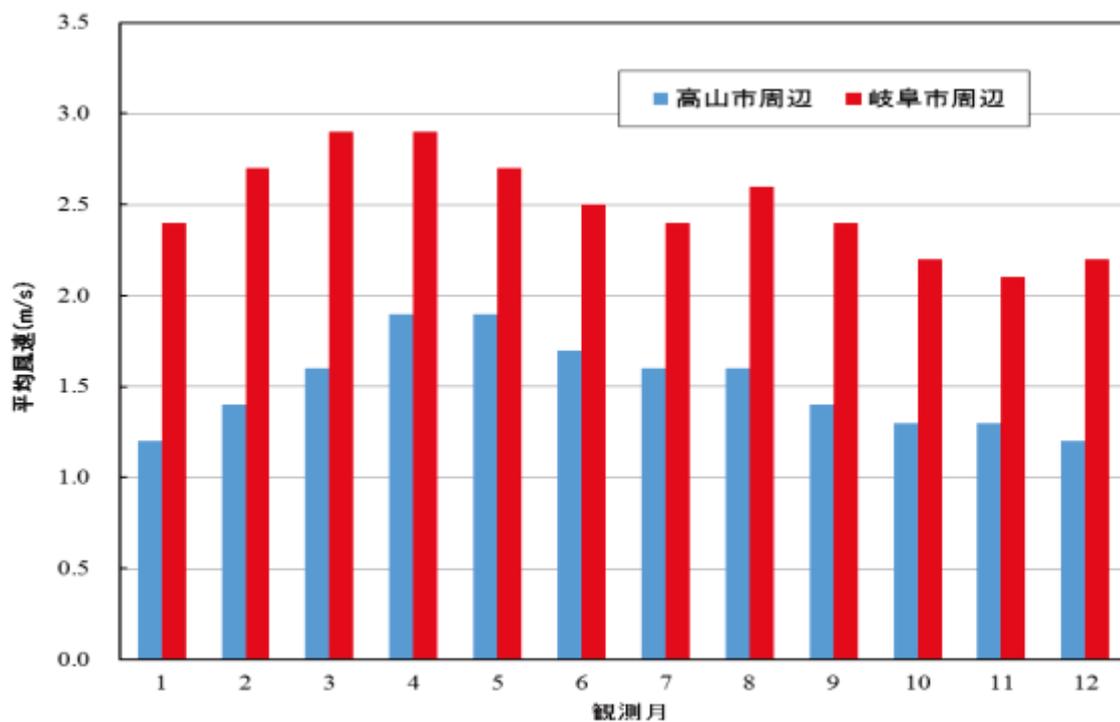


図4-6. 岐阜・高山周辺の月別平均風速

(岐阜气象台資料 1981～2010年間の平均より)

4-2. 樹木の風振動と落石要因

落石災害は、要因としての地質特性や凍結融解・雨水浸透により岩盤が劣化した結果、亀裂の発達した岩盤から岩塊が抜け落ちるなどの現象が発生し、落石となるのはよく知られている。この際、落石誘因としては気象条件（雨・風・雪・温度）や地震がよく知られているが、風に関する因子の説明はほとんどない。これは、風が単独因子としての落石誘因となるわけではなく、風により樹木等が揺れる振動が、亀裂の発達した岩盤に振動を与えることで岩塊が抜け落ちるためと考える。このため同じように緩んだ岩盤であっても、落石発生源周辺の樹木（槇生）の状態によっては、危険性が異なることを意味する。そこで、樹木を介して風の影響が地盤に与える振動特性を計測することで、落石の危険性を把握できるのではないかと考えられる⁴⁾。風による樹木振動と地盤振動の関係と計測方法などを把握することで、落石発生要因としての風・樹木・地盤の関係を検討する。

4-2-1. 計測・整理概要

本研究では、風と樹木によって地盤にどのような振動がどの方向に、どのように伝達されるかを調べるため、振動が伝達される土砂地盤と風化岩盤の2種に地盤について振動計測を行った。地盤振動の把握には、軽量で安価であり、自動計測が可能な3次元加速度計（Geo-stick）を利用することで実用化を想定し、実際の現地計測でも容易に利用できる手法を採用した⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

風は、一般的に季節によっても地形条件などによっても、風速、風方向がめまぐるしく変化する。このため、付近に建築物や斜面が存在することにより、風方向がほぼ一定となるような条件下で、どのような風が樹木を揺らし地盤に振動が伝達されるかを把握できるようにした。そのような風方向を制御できる地点において、図4-7に示す結果のような風を市販の簡易風速計にて計測した結果、風速の変化は大きく振動計測時間は限定的にならざるを得なかった。

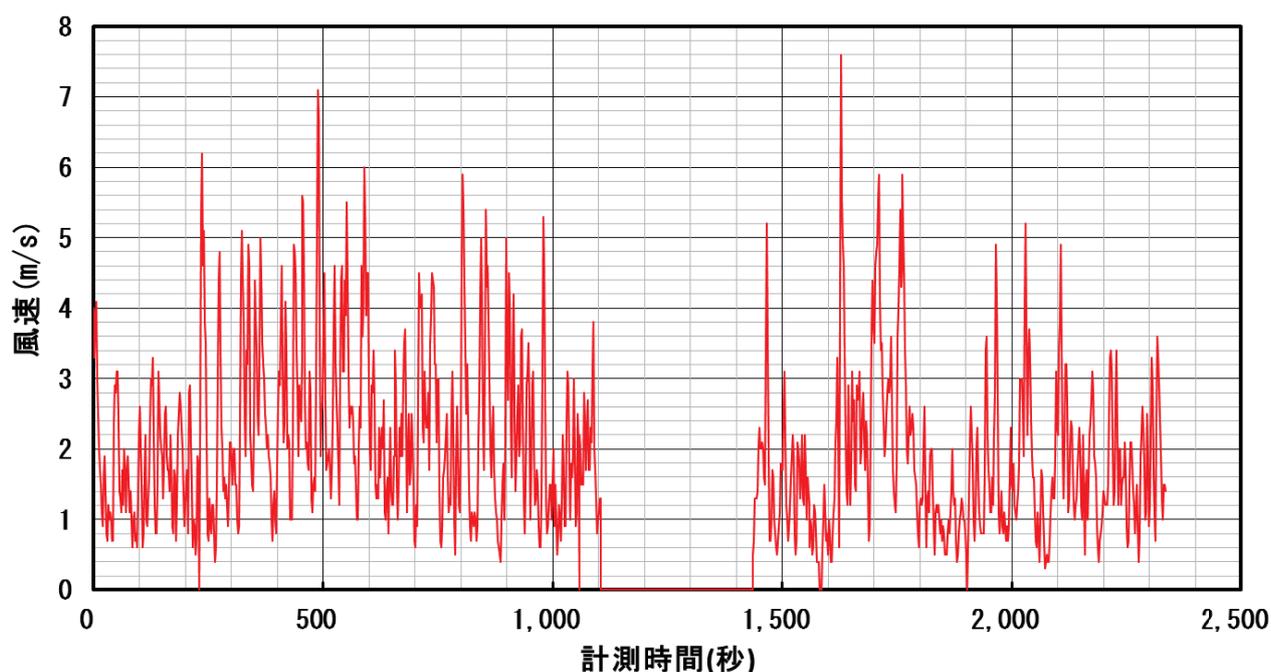


図 4-7. 土砂地盤振動計測位置における風速変化

(1) 土砂地盤での振動計測

地盤を分けると、土砂地盤と岩盤がある。一般的に岩盤は、形成過程で地殻変動などの外力を受け異方性の地盤といえる。対して土砂地盤は、運搬・堆積を繰り返して形成されるため、ある程度の広さで均一といえる。風による樹木の振動は、樹木根を介して地盤に伝達されるため、樹木による地盤振動特性を把握するためには、等方性に近い土砂地盤の振動特性を把握することが重要だと考えた。この土砂地盤での振動実験では、樹高約10mの単独木を選定し、強風が予測される台風時に計測を行った。計測地は、写真4-1、図4-8に示すように、東～南方向の風を建物で阻害され風方向が一方向になるような地点を選定した。



写真 4-1 土砂地盤での地盤振動計測状況

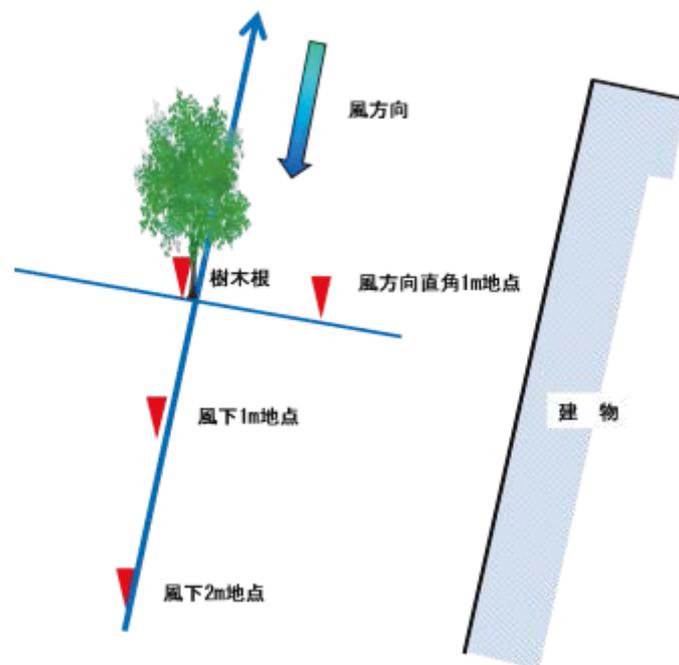


図 4-8. 土砂地盤での計測箇所状況図

また，地盤振動計測器の設置については，樹木の風振動に関わる要因として樹根の分布範囲が重要になる。写真 4-2, 3 は，山地内で観察された倒木である。これらの倒木樹根を観察すると，約 2m 程度まで密集した樹根分布が認められるため，今回の樹木による地盤振動を計測では，樹木から 2m の範囲を振動計測することとした。



写真 4-2 土砂層（表土層）が比較的厚い箇所での倒木樹根状況（根返し高さは約 2m であった。）



写真 4-3 土砂層（表土層）が薄い箇所での倒木樹根状況（根返し高さ 1.5m 程度）

(2) 岩盤での振動計測

等方性に富んだ土砂地盤での風～樹木～地盤の振動計測の後に、落石の危険性を含み異方性の特徴を有する岩盤部での振動特性計測を行った。岩盤部での振動計測は、自然斜面内の岩盤露頭で計測することが望ましいが、岩盤露頭と風方向・風速の関係や計測に必要な機器類の設置条件など困難なことが多く、図 4-9 に示すような採石場切り取り面に接した低木・疎林内の中・高木が単独で存在するような箇所を選定して振動計測を実施した。実験では、予め周辺の山地地形を観察し、一定方向からの風を受ける地点を選定した。

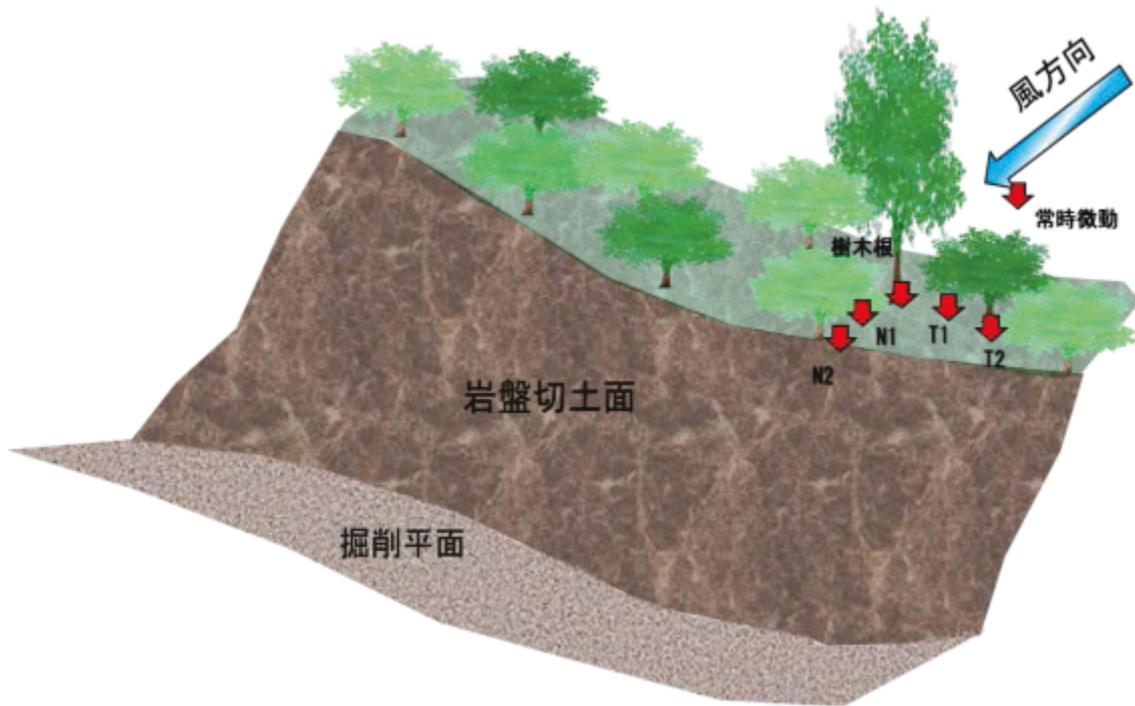


図 4-9. 岩盤振動計測概略図



写真 4-1. 岩盤振動計測箇所

(3) 振動計測・解析方法

【振動計測計・取得データ】

計測に使用した簡易 3 次元加速度計は、図 4-10 に示すような軽量・小型で AD・DC の 2 電源を使用して計測できるものである。

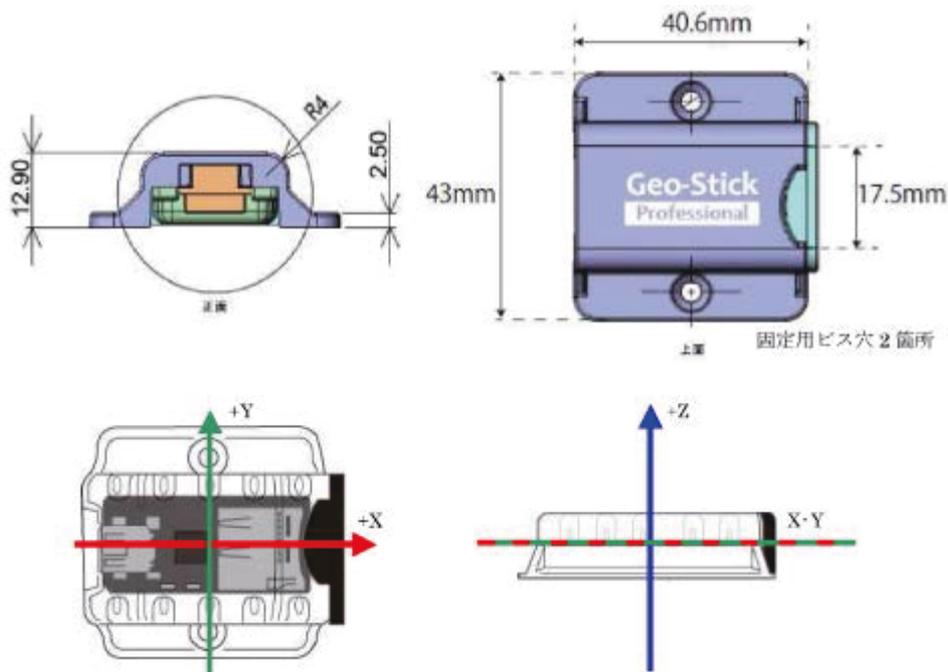


図 4-10. 振動計測用 3 次元加速度計

図 4-10 に示す簡易 3 次元加速度計を、樹木を中心に配置し計測した。結果は、図 4-11 に示すように加速度～時間図としてまとめたが、微少な雑振動処理が重要となった。

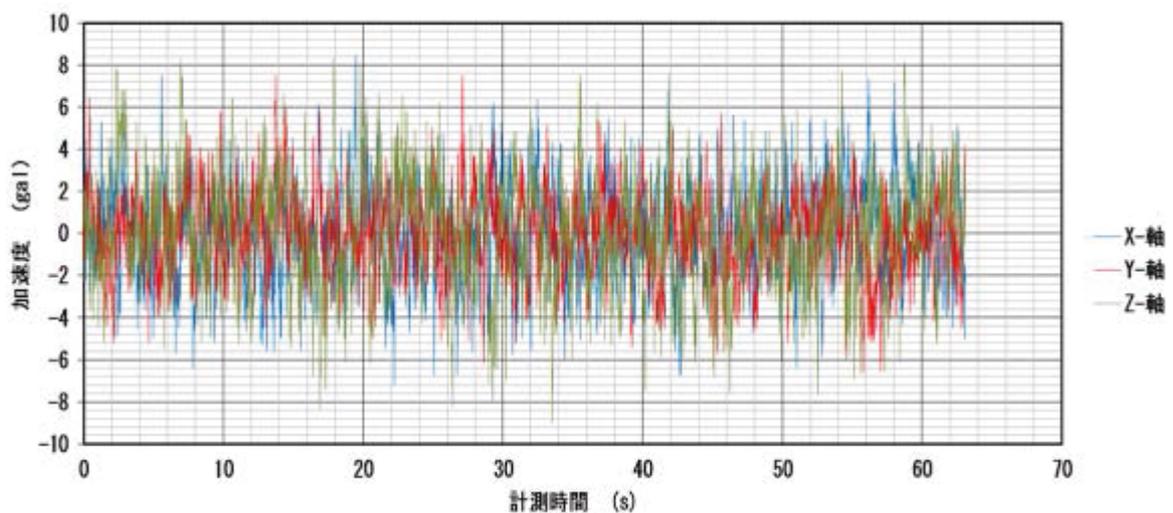


図 4-11. 加速度計取得データ

【計測データの処理】

加速度計で地盤振動を計測する場合、計測値における微少な雑振動を除去し、目的の振動を明確にする必要がある。一般に地盤振動は、長周期の地盤振動と短周期の雑振動とに分けられる。本研究で着目している震源としては、風と樹木の振動であり、比較的長周期

であると考えられる。このため、短周期の雑振動をノイズとして処理する必要があった。地盤振動のノイズ処理法としてはあまり複雑であると利用しづらいと考え、①重合法によるノイズ処理、②移動平法によるノイズ処理の2法を試した。

＜① 重合法による処理結果＞

本処理法は、計測結果を高速フーリエ解析を行い、その後計測波を重ね合わせた。その結果を図 4-12,13 に示す。

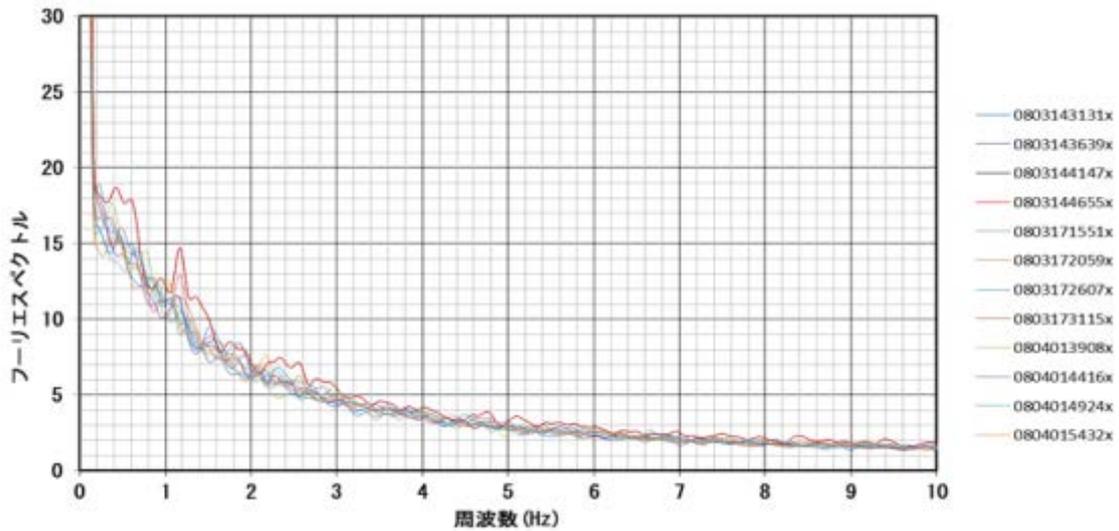


図 4-12. 処理前計測結果の分析結果

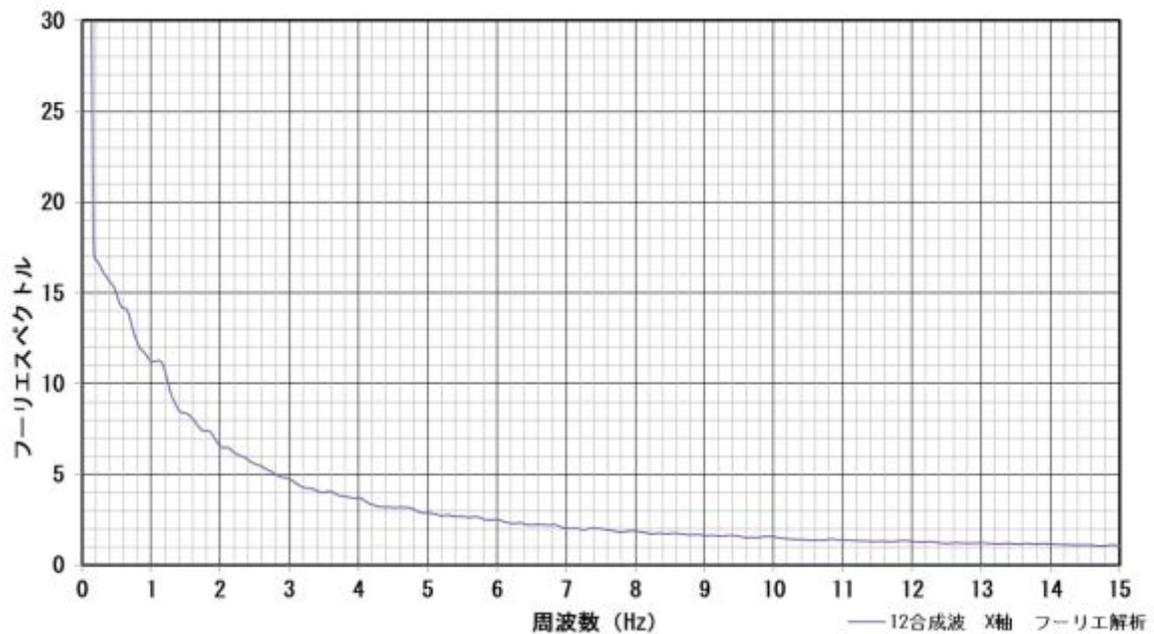


図 4-13. 重合法により雑振動を除去した分析結果

図 4-12, 13 より、重合法での雑振動処理を行うと平均化された卓越周波数の判定には役立つことが分かる。しかしながらこの方法は、図 4-12 に示すように数多くの計測データを用いて処理する必要があるが、常時微動計測など一定の振動に関しては有効であるが、本研究のように震源はひとつでも振動方向・振動強さが異なる場合、1 回の計測振動を利用する

ことが良いと考えられる。よって、本研究では重合法でのノイズ処理を行わないことにした。

<② 移動平均法による処理結果>

地盤計測データを移動平均法で移動区間を 1 秒としてノイズ処理したものが、図 4-14,4-15 である。この際、高周波成分の除去と風速計測間隔（2 秒）を考慮し、風による短期樹木振動の影響が出るように移動区間を 1 秒として処理を行った。

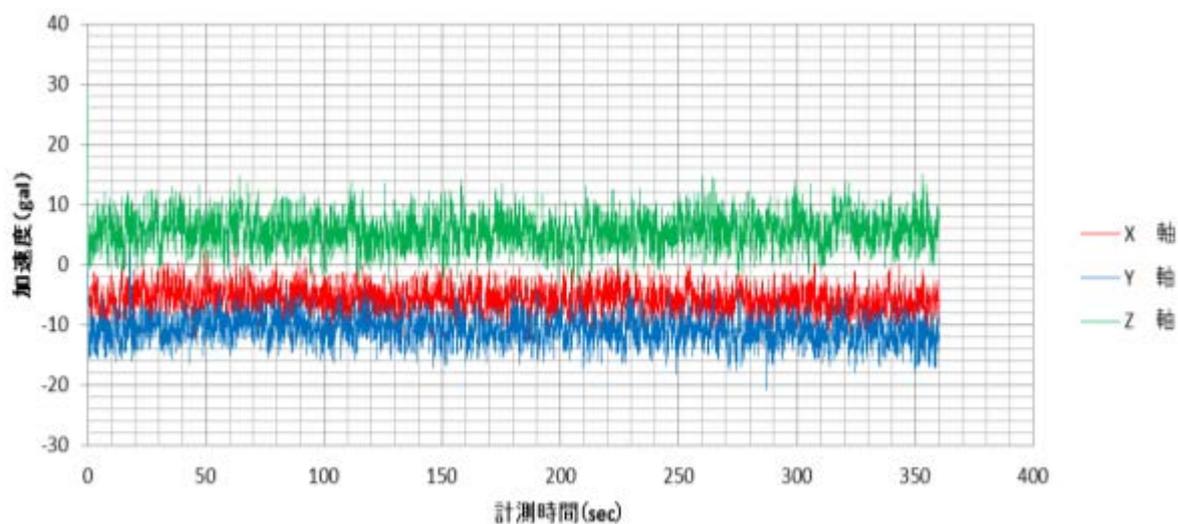


図 4-14. 1 単位計測波形データ

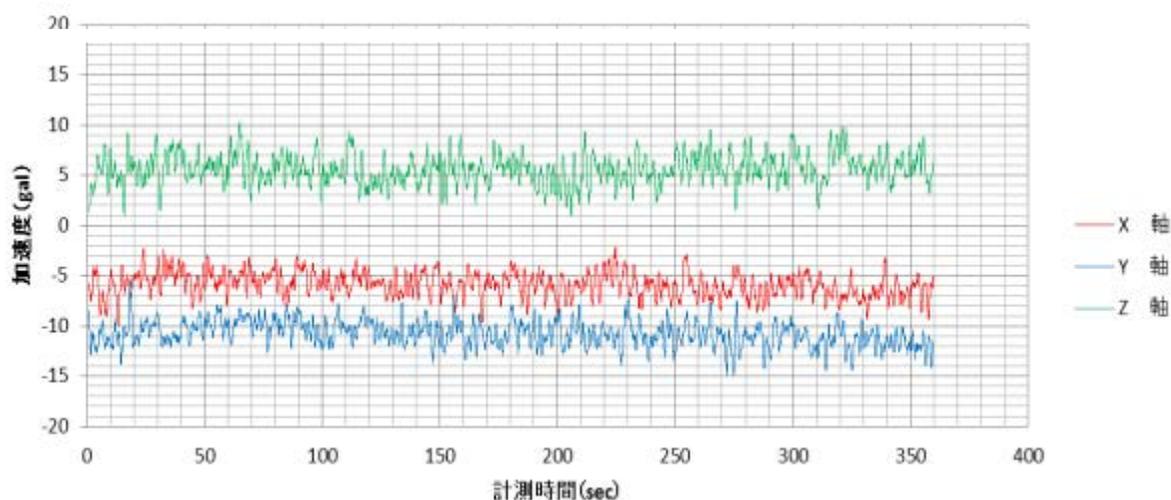


図 4-15. 移動平均法による波形解析データ

図 4-14,4-153 より、本研究であまり利用できない短周期のノイズが、移動平均法を採用すると処理が可能であった。ここで、移動平均法でのノイズ処理を行うと、多少波高が低下する傾向があるが、第 4-2 節で述べたように「風と樹木によって地盤にどのような振動がどの方向に、どのように伝達されるかを調べる」ことを目的とした計測であるため、この処理で多少の加速度低下をきたしても有効である。よって、この処理は一般的な表ソフトでも容易に処理でき、現データの状況を踏まえ 1 観測群データごとに 100 項（全体 18,000 項）の平均で行った。

【卓越周波数】

地盤振動を計測する場合、どのような周波数の振動が伝播しているかを知ることは、震源の特性を把握するためにも必要である。一般的に、振動の卓越周波数を求める方法としてフーリエ変換が多用されることから、本研究においても採用して地盤振動の特性を把握した。本研究では、図 4-12 に示すような短周期の雑振動を除去した解析データを、下記の方法でフーリエ変換を行った。

本研究では、一般的に用いられている、大崎順彦の「新・地震動のスペクトル解析入門」に記載の Fortran プログラムをベースに、岐阜大学で作成した高速フーリエ変換プログラム (FFT) を使用して解析を行った。その概要は、以下の通りである。

- 時系列データ個数は、 2^n 個 (n は整数) に固定する。データ数が 2^n 個に達しない場合は、 2^n になるまで後続に 0 振動を追加する。
- 時系列データには、不連続点を作らないようにする。不連続点があるとフーリエ級数和の振動・飛び出しが生じる。
- データのサンプリング周期を Δt とし、データ数を N としたとき、周波数のサンプリング Δf は $1/(N\Delta t)$ となる。この時の $N/2$ 番目の周波数 $1/(2\Delta t)$ が検出しうる最大の周波数であり、元のデータにおいてはデジタルデータに最大の周波数を超える成分が混入しないようにローパスフィルターをかけておくこと。
- フーリエ振幅スペクトルは振幅の凹凸が大きく、スペクトル比を取った場合などにはさらに凹凸の度合いが増幅する。このため、スペクトルの周波数領域で一定のバンド幅を持つウィンドウ関数を乗じて移動平均を行う平滑化を行った。以上のようなデータ処理を行った結果の例を図 4-16, 17 に示す。図 4-16, 17 より、計測地点での卓越周波数を測定した。

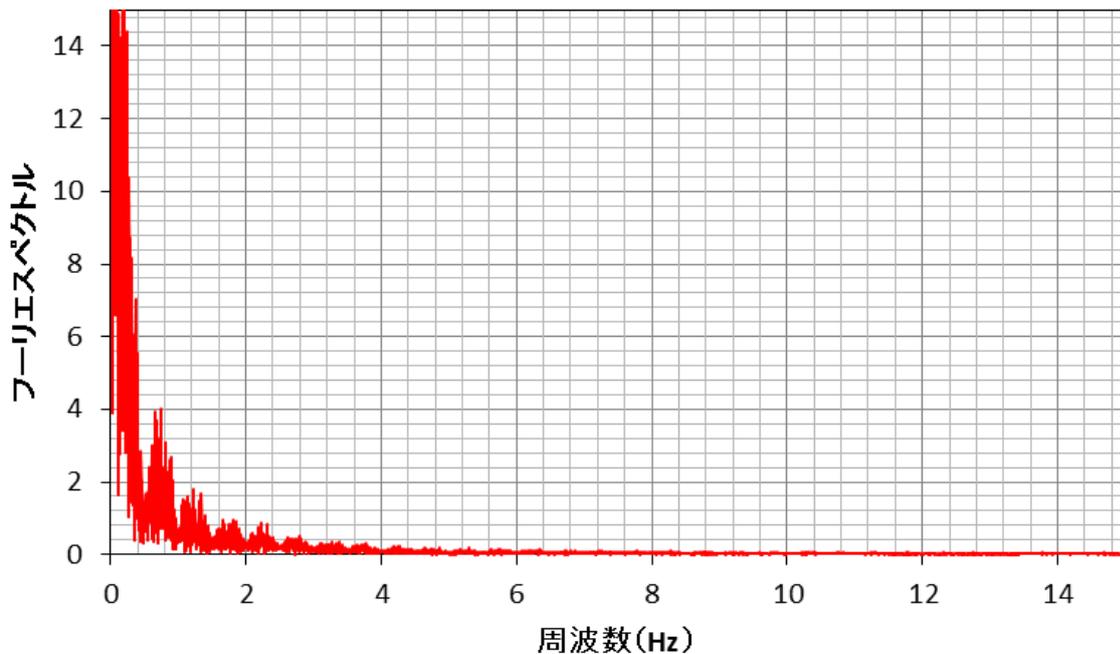


図 4-16. 計測振動のフーリエ変換結果

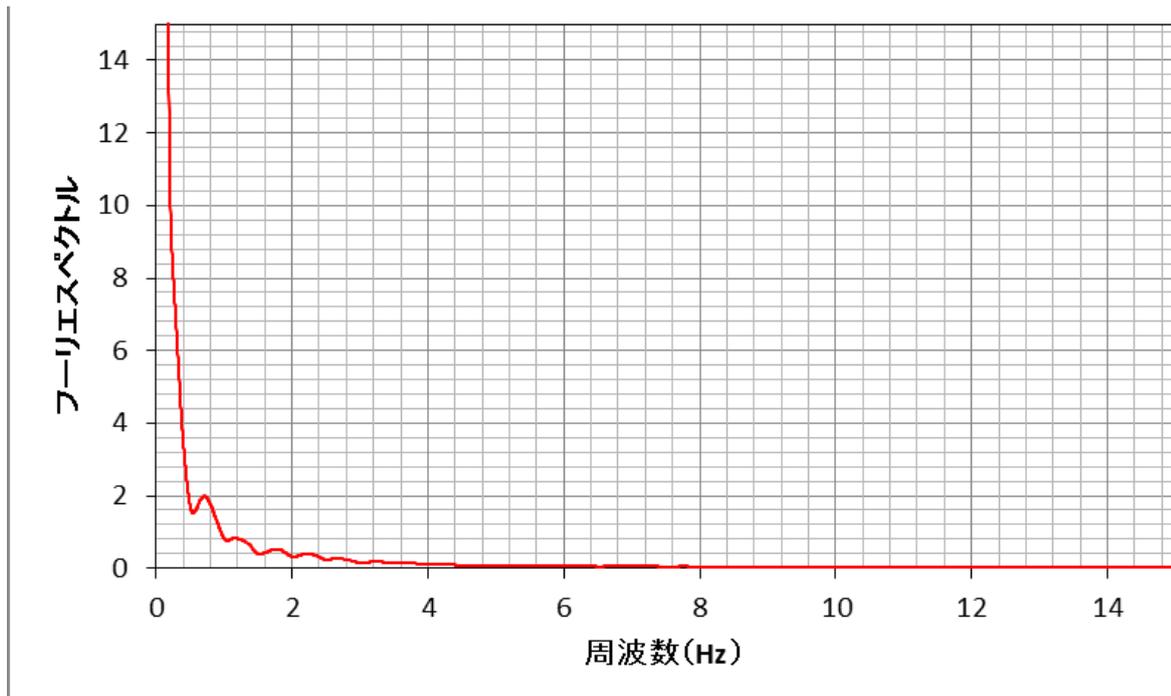


図 4-17. フーリエ変換データを平滑化した結果

4-2-2. 土砂地盤での振動特性

土砂地盤での風速計測結果は、図 4-18 に示すように北～西の強風が断続的に吹く気象条件下で、近接する建築物によって東～南方向の強風が吹かない箇所で、計測時間 2 秒間隔で計測を行った。ただし、図 4-18 に示す計測時間の中で、特に断続的な強風が多めに吹いた前半部分について解析を行った（図 4-18 参照）。この風条件で 4 箇所の地盤振動を計測した結果、X 軸方向（北方向）に低周波である 0.7Hz 付近に卓越する振動が観測できた（図 4-19 参照）。

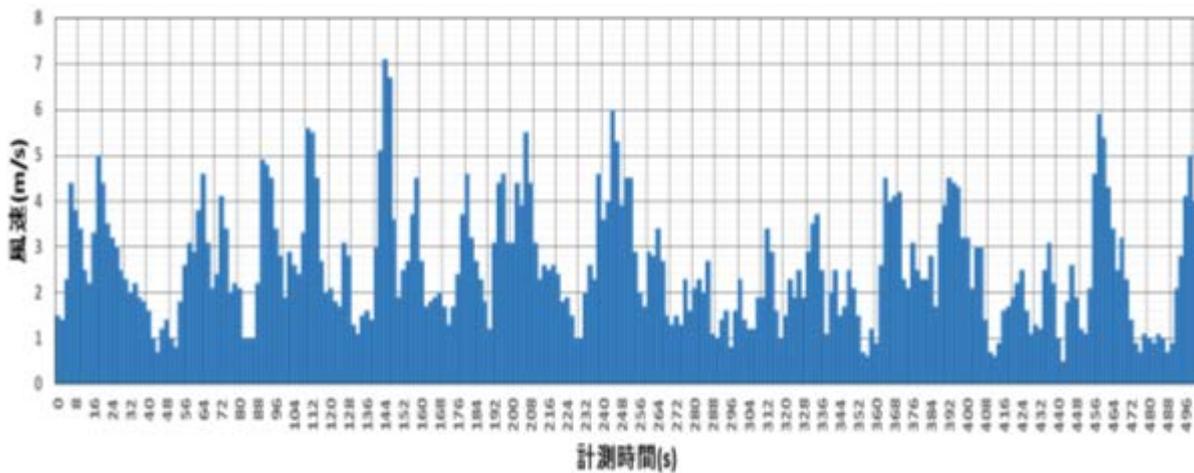


図 4-18. 解析風速分布図（土砂地盤）

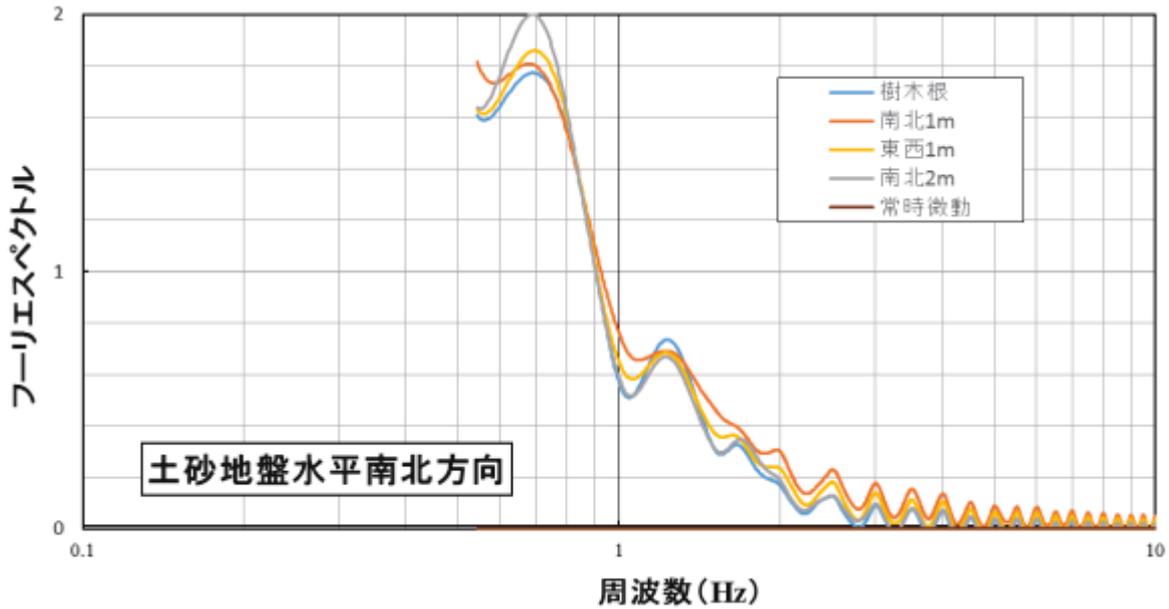


図 4-19. 土砂地盤計測箇所における卓越地盤振動（加速度）解析図

以上の樹木を介した風と地盤振動についての計測から、その特性を解析するために各測点での振動方向などについて分析した結果が図 4-20 である。この振動方向については、観測された X 軸（風方向）・Y 軸（風方向直角方向）の 2 軸について加速度の大きさを 2 次元方向図として図示し比較したものである。

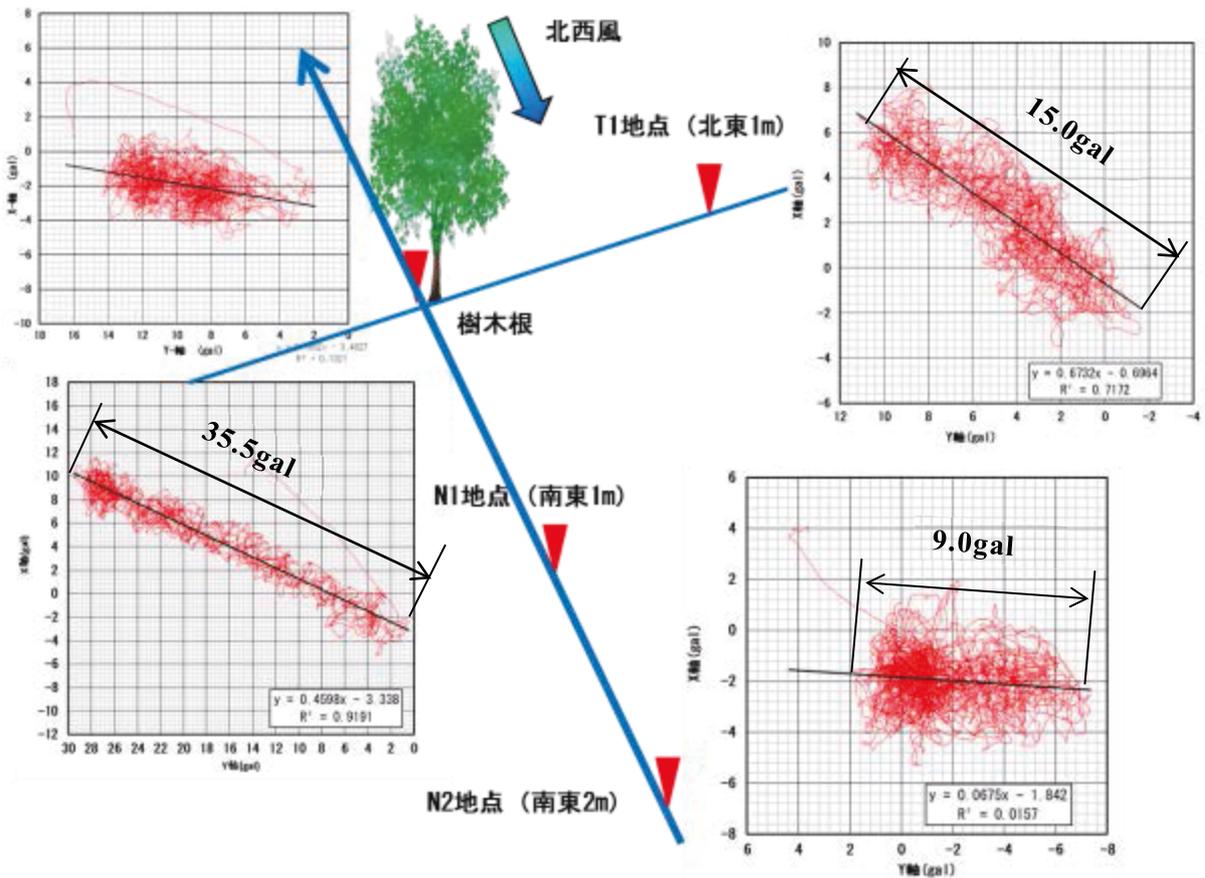


図 4-20. 樹木の風振動と地盤の振動方向特性図

図 4-20 示す結果から、比較的均一な土砂地盤では、以下のような特徴が見られるとことが判明した。

- (1) 樹木根直上の地盤表面では、一定の風方向にも関わらず、おおよそ風方向に近い地盤振動を示すものの、風方向と同じ振動方向以外の横揺れの振動が認められる。これは、風によって樹木の樹幹や枝などが不規則に揺れるためと考えられる。
- (2) 樹木より約 1m 離れた地点での地盤振動特性としては、風方向に近く、風と同方向の地盤振動を示している。ただし、風方向と直角に近い T1 地点では、風方向とは異なった方向の振動が作用した結果が見受けられ、振動方向も分散しているようである。また、加速度の大きさについても、風下側は最大振れ幅が 35.5gal となったが、直角方向では振れ幅 15gal と約 2 倍の差が認められる（図 4-20 参照）。
- (3) 樹木より 2m 程度離れた地点での地盤振動は、他の 2 箇所と比較すると風方向とは異なった振動方向を示し、かなり振動方向が分散傾向にあると考えられる（図 4-21～23 参照）。この地点は、他の 2 地点と異なり震源と考えられる樹木より離れているため、加速度振幅が N1 地点より小さく最大 9.5gal と約 1/3 に減衰していることも分かった。

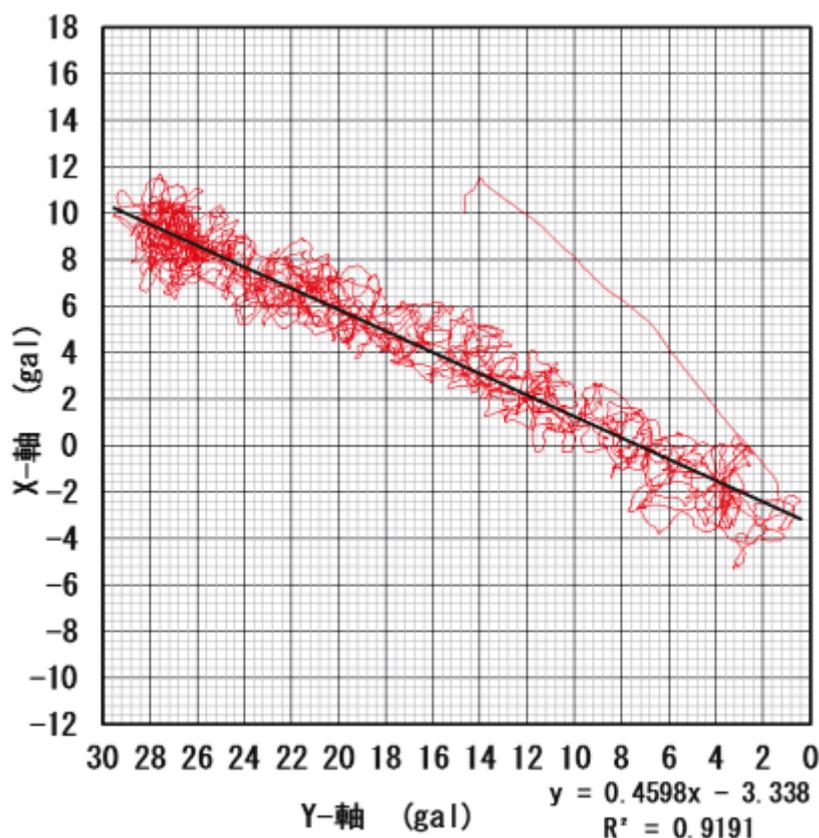


図 4-21. 風方向で樹木より 1m 地点の振動方向

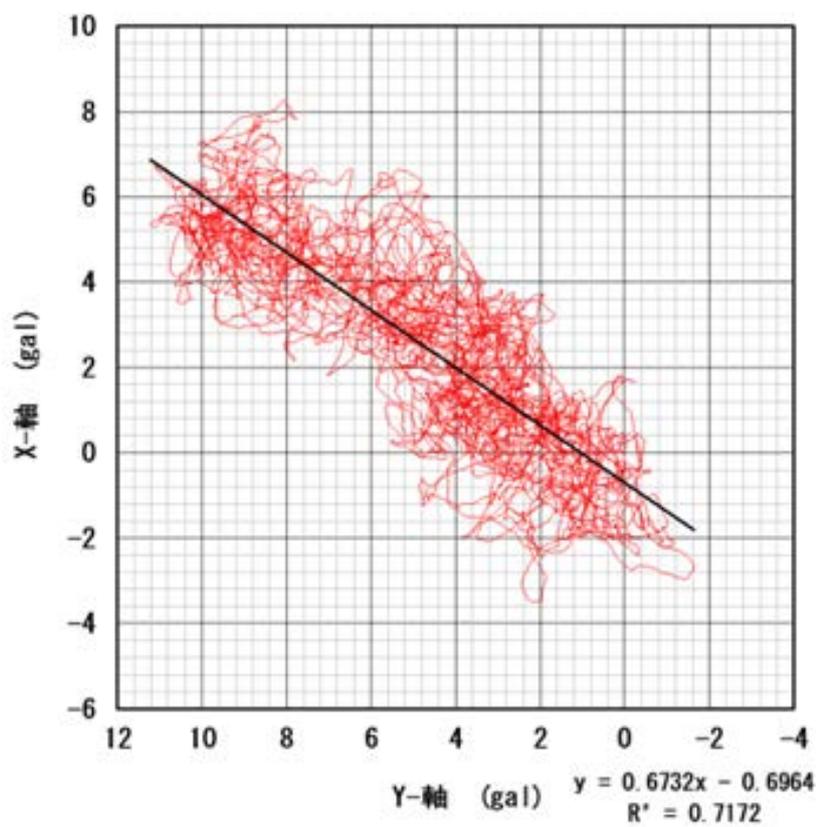


図 4-22. 風直角方向で樹木より 1m 地点の振動方向

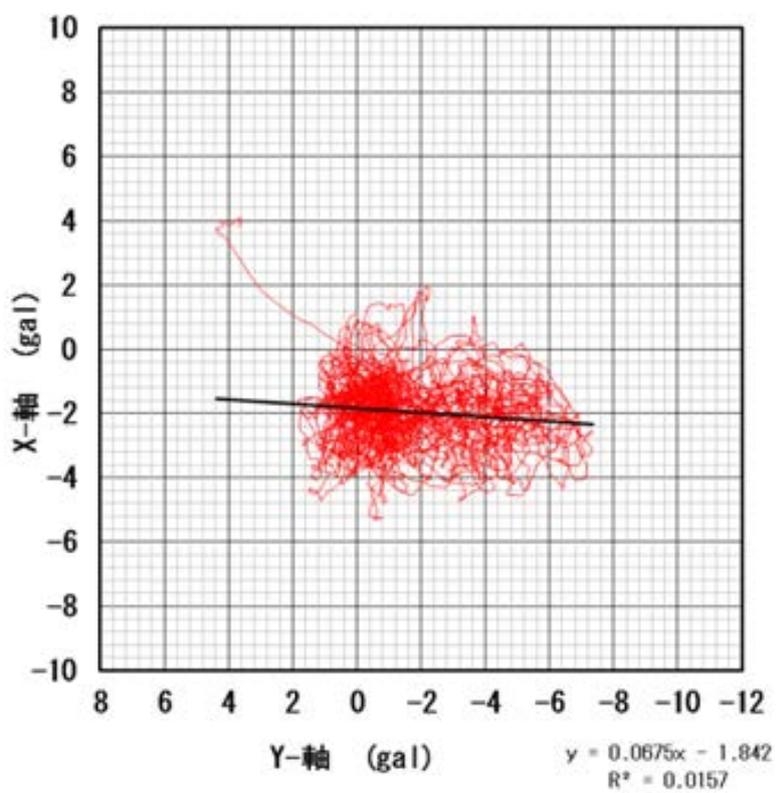


図 4-23. 樹木より風方向 2m 地点の振動特性

4-2-3. 樹木振動に関わる樹木根の特性

風による樹木振動の特徴について、樹木振動が振動の伝播に関わる要因として樹木根の分布が重要であると考えられる。樹木根は、樹種によって分布形状が異なることが知られている。図 4-24 は、当地方にも分布が認められる樹種の樹根系を示したものである。

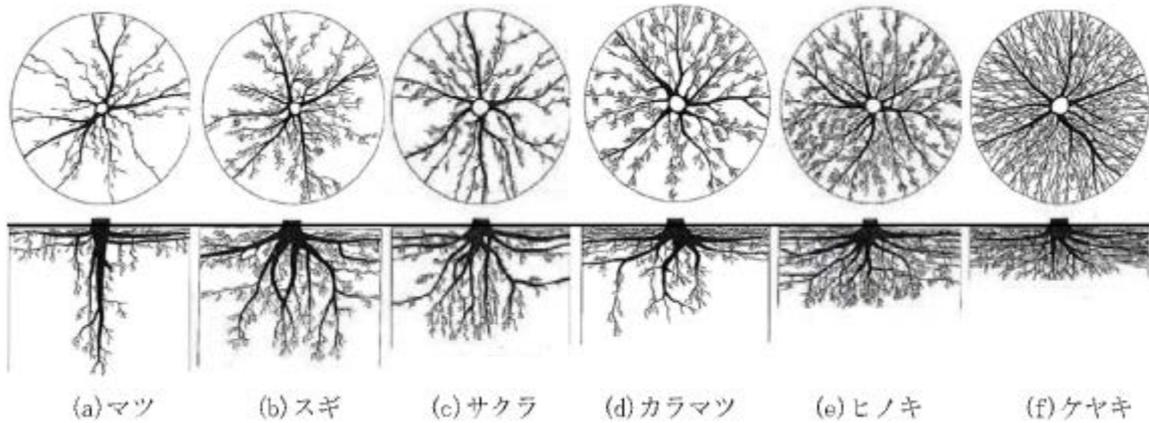


図 4-24. 各種樹種の樹根分布⁸⁾

今回の土砂地盤での風と樹木根による地盤振動に関しては、(c)サクラ (f) ケヤキに代表される落葉広葉樹を試験木として採用した。樹根は、樹種によってその分布状況が異なることが図 4-24 から分かる。また、樹根に関しての呼称や分類には種々あるが、一つの目安として表 4-1, 図 4-25, 4-26 に示す分け方がある⁸⁾。

表 4-1. 根系区分とその名称⁸⁾

名称	小根		太根			根 株(St)
	(f) 細根	(s) 小径根	(m) 中径根	(l) 大径根	(L) 特大根	
直径区分	0.2cm 以下	0.2~ 0.5cm	0.5~ 2.0cm	2.0~ 5.0cm	5.0cm 以上	分岐した根系に、 区分できない部分

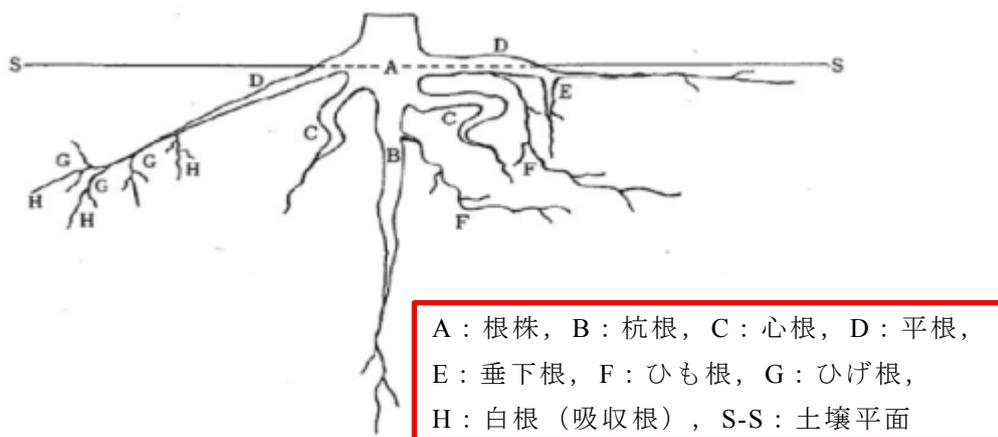


図 4-25. 根系の区分と名称⁸⁾

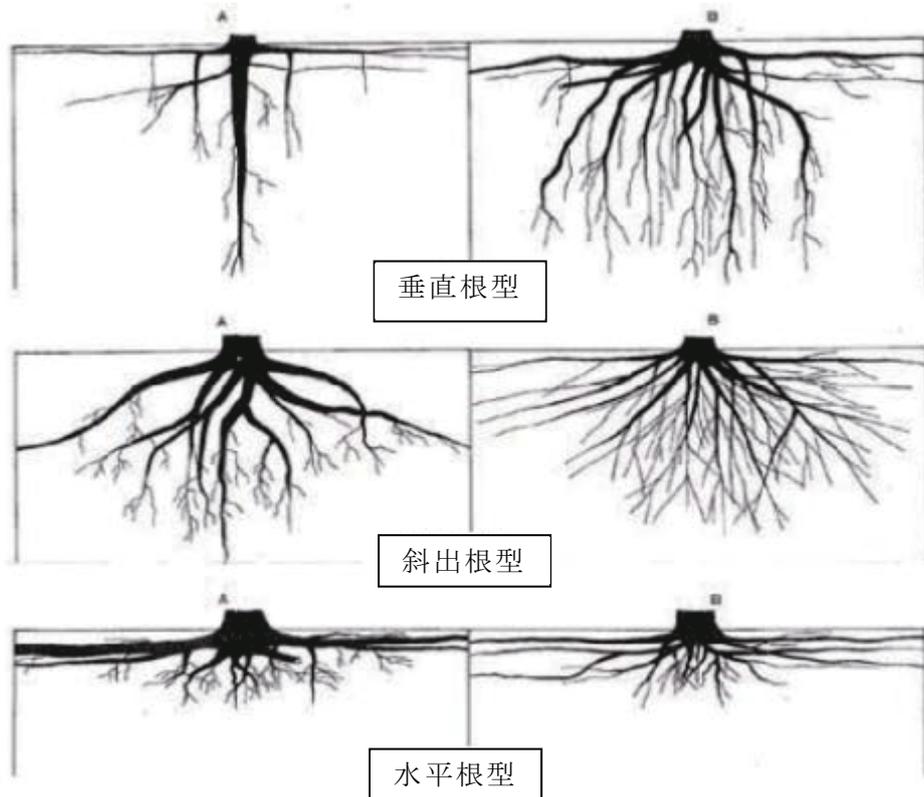


図 4-26. 代表的な根型⁸⁾

今回の地盤振動計測では、落葉広葉樹を試験木として実施したことから、根系としては斜出型・水平型の根系分布であると想定できる。ここで、このような樹根密度に関しては、根株を 0 cm とした深度、水平距離を示した図 4-27 のような密度を示すと考えられる。

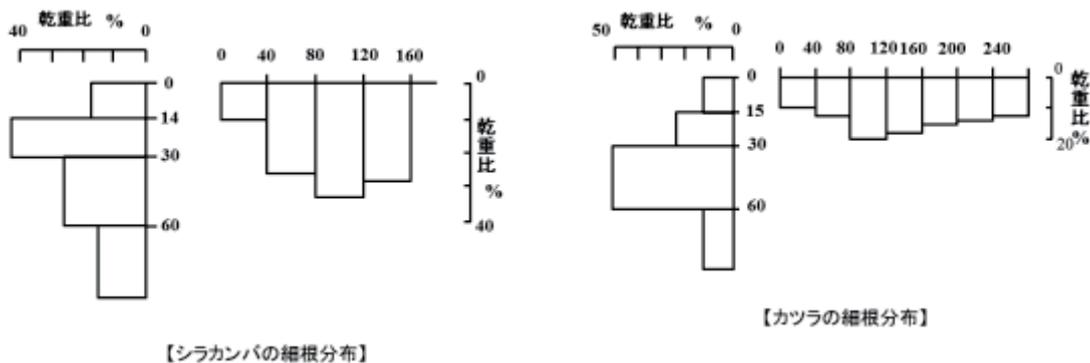


図 4-27. 落葉広葉樹の細根分布⁹⁾

以上の樹木根と風による地盤振動計測に関しては、以下のような特性があることが想定できる。

- (1) ある程度の風速を有する断続的な風は、樹木を振動させて地盤に振動を与えることが判明した。その際の卓越振動は、0.5~2.0Hz 程度の長周波であり、震源が樹木の

緩やかな振動と考えられる。

- (2) 樹根を介しての風振動は、樹木から放射状に広がる樹根の影響で風方向とは異なる振動となると考えられる。風方向と同じ方向に設置した受振計では、樹木より 1m の位置では、風方向に近い振幅を示す。しかし、風方向と直角方向に設置した受振計や樹木から離れた受振計は、図 4-28 に示すような樹木根の根別れにより、振動を伝達する樹根の分布・密度の変化が地盤振動拡散に影響を与えていると考えられる。特に、図 4-25 に示すような小径根・細根の分布が重要になると考えられる。

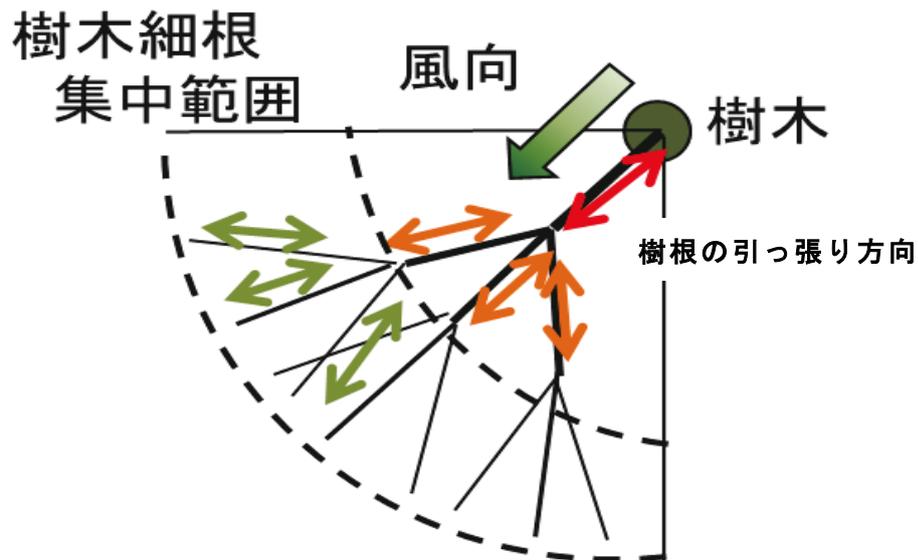


図 4-28. 樹木根分布による振動拡散概念図

- (3) 樹木による地盤振動が異方向性・振幅の差を示すのは、樹根の分布密度にも関係すると考えられる。樹根は、太根より小径根の密度が関係すると想定される。今回の計測では、図 4-25 に示すような小径根・細根の分布密度が高い部分(樹木より約 1m) 地点が最も大きな振幅を示していることから伺い知れる。
- (4) 簡易で安価な振動計測器を用いて振動特性を把握することを目的に地盤振動計測を実施し、振動特性としての振動方向などを把握する手法が検証された。

4-2-4. 岩盤部での振動特性

岩盤部での振動計測は、図 4-9、写真 4-1 に示すように採石場内の崖部にて実施した。ある程度の風速が得られる冬期の季節風が吹き、周辺での重機振動を除外するために作業休止時間にて計測を実施した。現地では、冬期の季節風を期待して計測を行ったが、最大風速 2m 以下でありあまり強風が観測されなかった(図 4-29 参照)。このような風に対して、樹木直下と、風方向に 2 箇所(計測点 N1, 2)と風方向直角方向に 2 箇所(計測点 T1, 2)の計 5 地点にて地盤振動計測を実施し、加えて樹木の胸高位置での樹木振動も計測した。

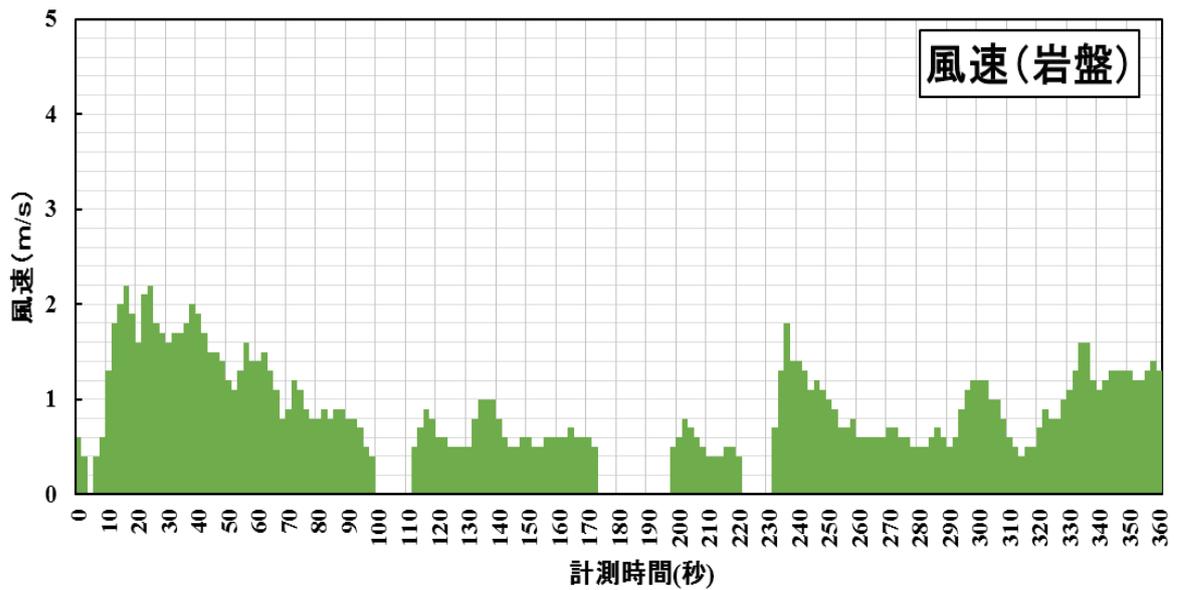


図 4-29. 計測値における風速分布

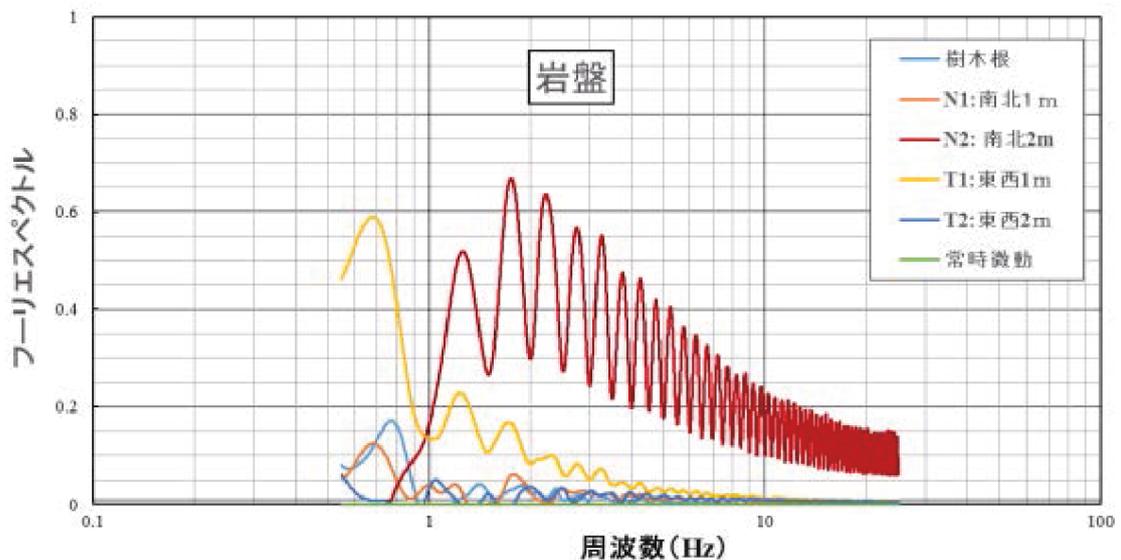


図 4-30. 計測値における地盤振動分析結果

図 4-30 は、各計測地点で計測された地盤振動を周波数特性として解析したが、風方向の風下 2m の位置に設置した N2 地点のみ異なった周波数特性を示している。この原因としては、受振計の設置位置と樹木の種類が関係したと考えられる。ここで、N2 地点の設置位置は、図 4-31 のように表土が薄く亀裂の発達した基盤岩であるチャートにほぼ接していた。このため、基盤岩から伝播する振動が他より強く影響したことや、計測点周囲に繁茂する低樹木根からの地盤振動が合成された可能性がある。加えて、計測地の基盤は、東西方向に亀裂（層理）の発達した層状チャートからなり、岩質的に硬質であるが亀裂は密集している状況であった。

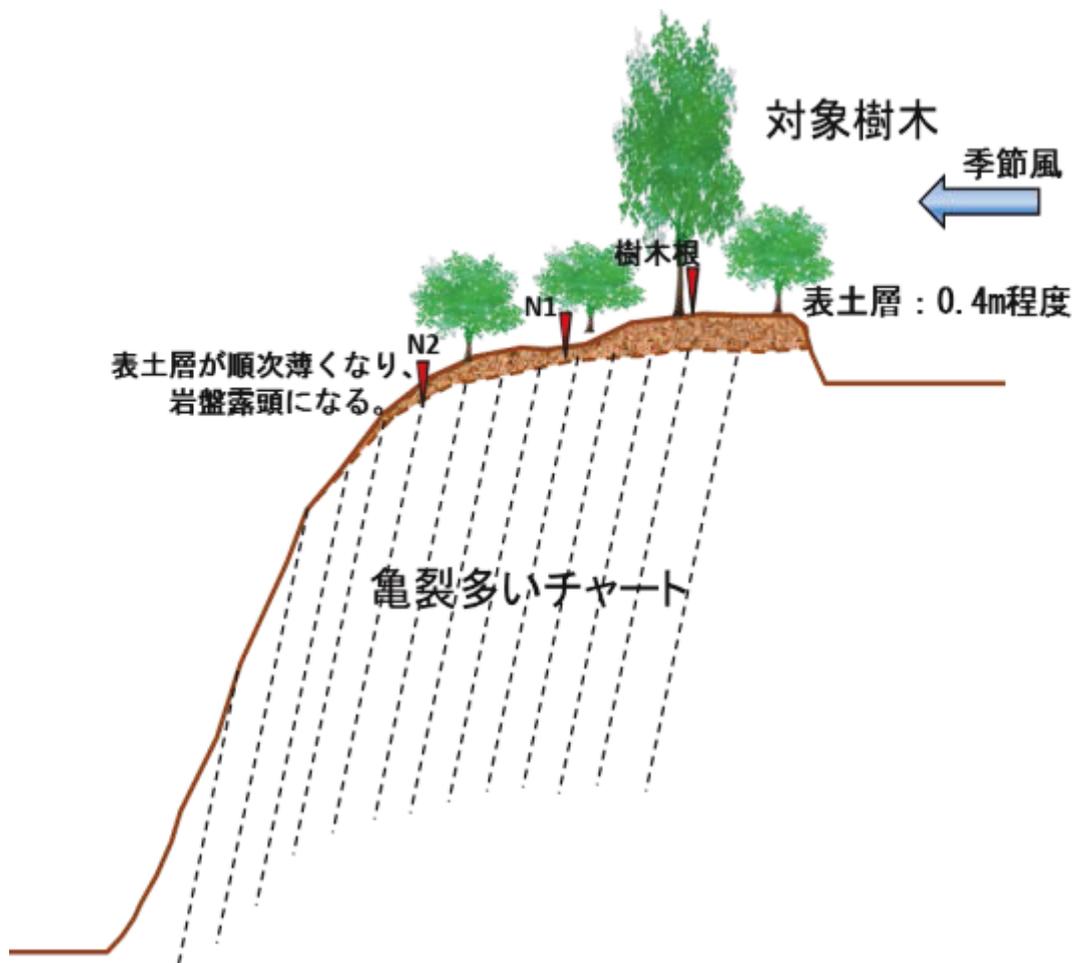


図 4-31. 計測器設置箇所概要図

以上のように、一部異なった振動挙動を示す現地であるが、対象樹木周辺での振動方向などをまとめる。図 4-32 は、今回の計測において受振計と風方向・対象樹木の関係と振動方向などの特徴をまとめたものである。図 4-32 では、概ね風方向と地盤振動方向が一致しているようである。ただし、樹木根（樹木直下）での計測は、地盤状況などの関係から風方向に対し対象木と直角方向に設置した関係で、風方向とは直角成分の振動が計測されている。このことは、樹木による地盤振動が、樹根系に強く関係していることを裏付けると考えられる。また、現地の基盤岩特性として、風方向と鈍角で交わる亀裂・層理の発達した中・古生界のチャートを基盤としており、基盤岩の中に浸入した樹根からの振動が土砂地盤と比較して風直角方向でもあまり減衰していないようである。

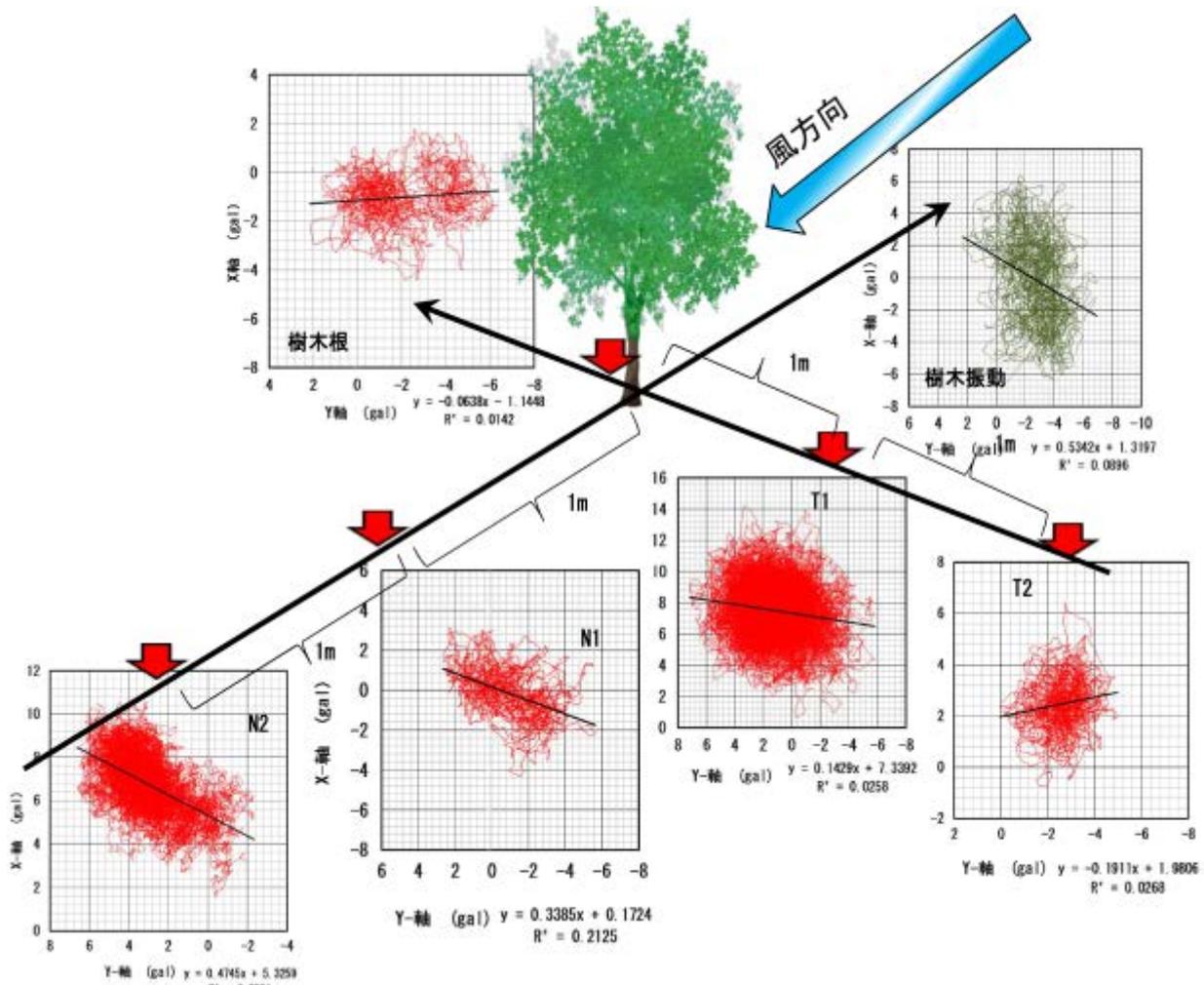


図 4-32. 岩盤部での風方向と設置位置での地盤振動方向の違い

今回の計測では、季節風を利用することとしたが、当日は予想以下の比較的弱い季節風しか吹かなかった。実質的に最大風速でも 2m/sec 程度であった（図 4-29 参照）。このため、樹木自体の振動もそれほど大きな加速度を示すようなものではないが、図 4-32 に示すように風速 2m 程度でも、地盤振動は、全て測点でほぼ風方向と異なっているが同じ方向に揺れることが判明した。また、各地点における地盤振動方向（図 4-32 で示す）における最大加速度（図中の最大振れ幅）は、計測開始から 5 回計測までの最大値を示すと表 4-2 のようになる。

表 4-2. 地盤振動の計測点における加速度差分の違い

計測点	加速度差分 (gal)
樹木根	15
N1 (風下 1m)	13
N2 (風下 2m)	13
T1 (風方向直角 1m)	13
T2 (風方向直角 2m)	11.5

表 4-2 より、風方向の計測地点では、図 4-24, 27 に示すような樹木細根の分布を考慮すると、N2（風下 2m）地点の減衰が少ないと考えられる。これは、先の図 4-21,23 に示す土砂地盤の風下 1m と 2m の差（32gal, 8gal）と比べると減衰量が小さい。この結果についてまとめると、以下のようになる。

- (1) N2 地点は、崖の近傍に位置し、表土（土砂層）が薄く基盤岩の振動や、周辺の低木振動の影響を受けた可能性がある。N2 地点は、一般の土砂地盤と異なり風化した基盤岩に根を張った樹木の振動が減衰しにくい基盤岩を直接伝わった可能性がある。
- (2) 今回の計測では、自然斜面を模式し対象木として「モチノキ」類の単独木と、低木が疎な状態で広がる地点を選定した。このモチノキ類は、図 4-26 の「斜出根型」樹根系を示し、かなりの深度まで根を張っていると考えられる。このため、風化した基盤岩類への木根侵入が予測された。このような計測状況結果として、土砂地盤に比べ樹木による風振動の伝播の減衰が小さいことが判明した。このことは、薄い表土下の風化岩盤では、樹木の風振動が比較的遠距離まで影響すると考えられる。
- (3) 今回の計測結果から、樹木による地盤振動は樹根系の影響を受け、単純に方向に地盤が振動するのではなく、樹根や岩盤の亀裂に関係するような振動方向変化を示すと考えられる。

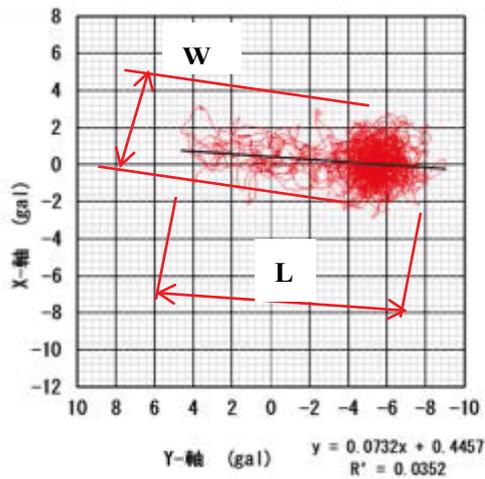
4-3. 樹木振動の伝播特性

風と樹木による地盤振動は、落石発生源と考えられる斜面内露出岩盤に振動を与え、落石要因となると考えられる。このような地盤振動についての特徴を把握することは、落石発生源の危険性判定に役立つものと考えられる。

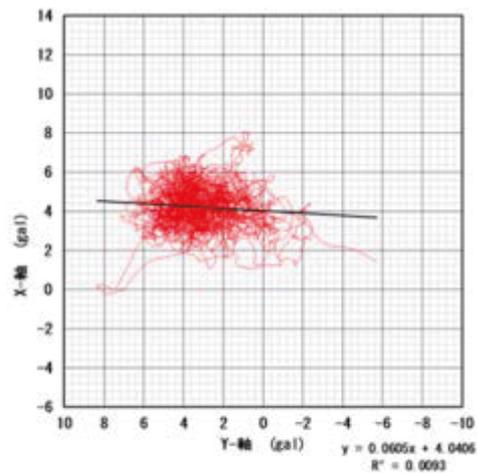
本研究で実施した現地計測では、以下のような条件で実施した。

- (1) 現地計測での対象樹木としては、中部地方の山岳地帯に広がる「落葉広葉樹」・「常葉樹」の単独中低木を選定した。これは、検証可能な区域の樹種を選んで、樹木根と地盤振動の伝播を把握するために行った。
- (2) 現地計測では、季節風や台風などの比較的強風が一定方向から吹く気象条件で計測した。これは、現実的に山間部の落石の多くが河谷の侵食で形成された狭長な谷間で生じていることが多く、このような地形では一定方向の強風が断続的に吹いていることが多いためである。
- (3) 現地計測は、「土砂地盤」・「岩盤部」の 2 種類の地盤で実施した。これは、比較的均質な材料から構成される土砂地盤と不連続的な特徴を有する岩盤での、地盤振動伝播特性の比較を行うためである。以上の条件で実施した風による樹木の地盤振動について、計測結果から地盤振動の分布について特徴的な要因についてまとめる。

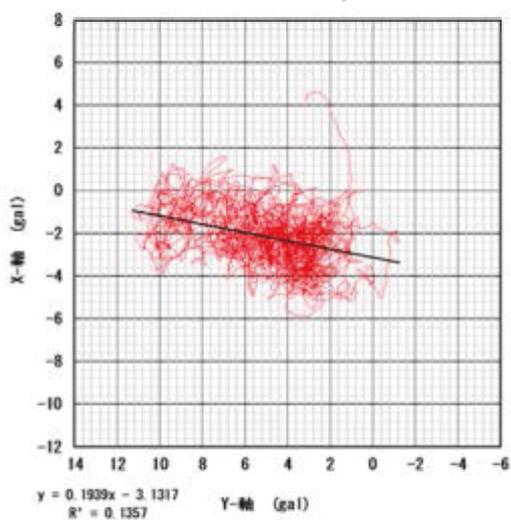
図 4-33~36 は、土砂地盤で計測された加速度について振動方向を図示したものである。図 4-33~36 については、受信機の欠測もあるため、計測開始時点から計測時間が十分と判定された 5 回分についてまとめた。結果をまとめるにあたり、最大加速度振動方向長さ“L(gal)”を図式で求めたほか、L と直交する振動幅“W(gal)”も求めた。この L, W は、樹根を震源とする地盤振動の大きさを表す指標と考えられる。



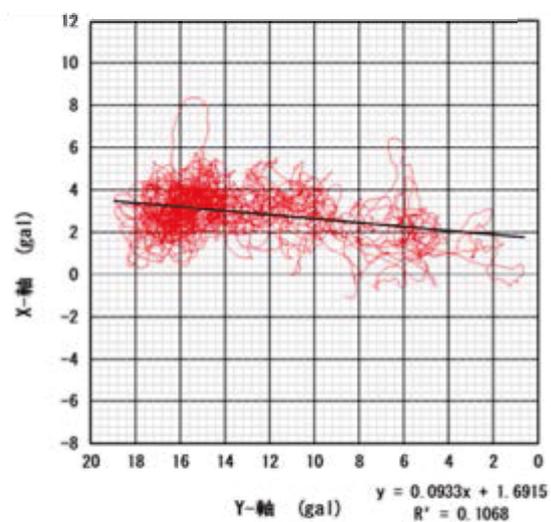
L=12.8,W=4.8



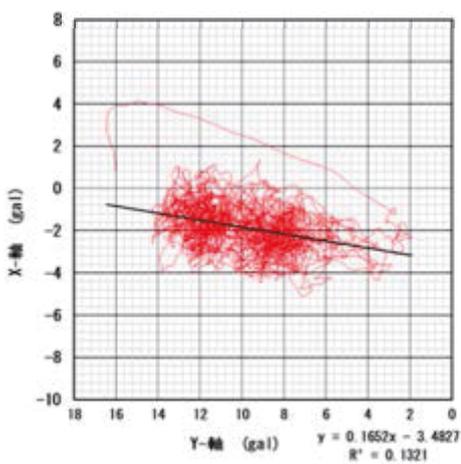
L=9.6,W=5.0



L=10.3,W=5.2



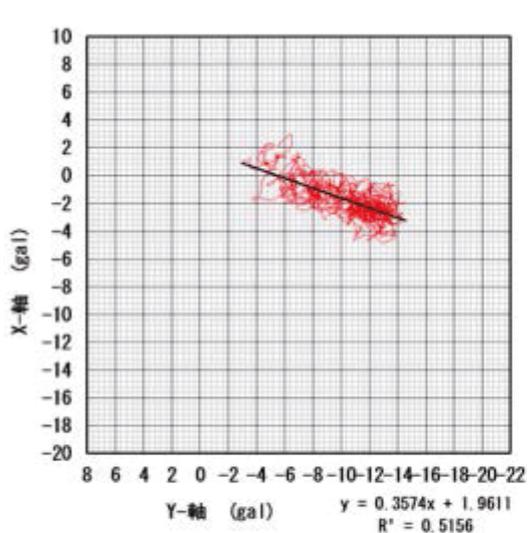
L=9.7,W=3.0



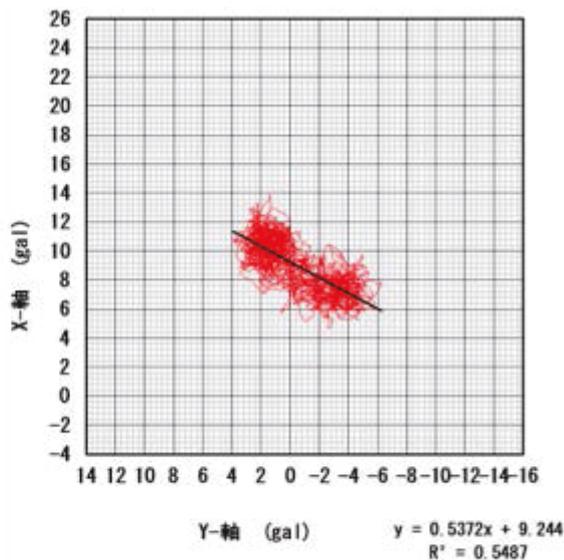
L=10.0,W=4.5

土砂地盤
計測点：樹木根
平均振幅差：10.5gal
平均振幅幅：4.5gal

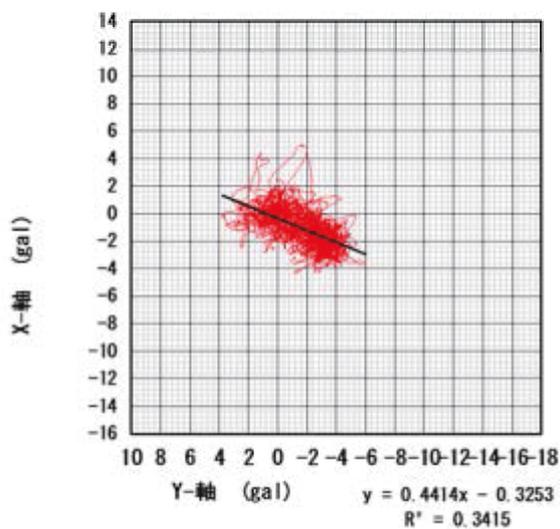
図 4-33. 土砂地盤：樹木根地点における地盤振動状況



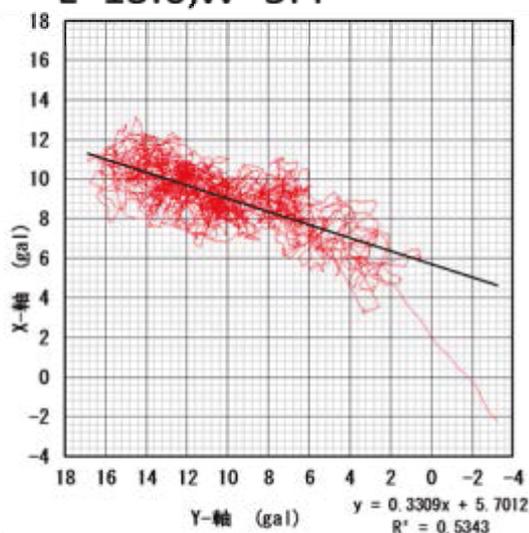
L=11.3, W=4.1



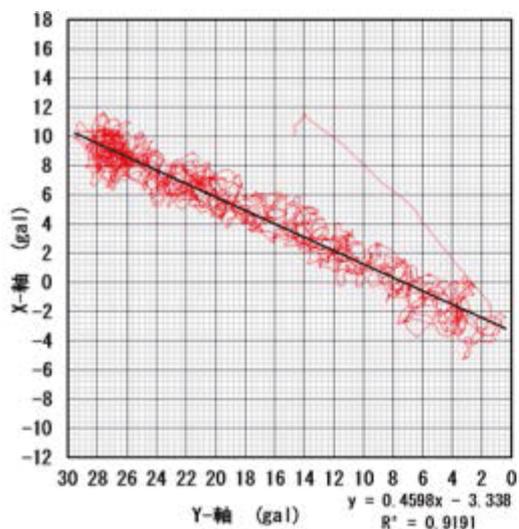
L=13.0, W=5.4



L=8.1, W=4.4



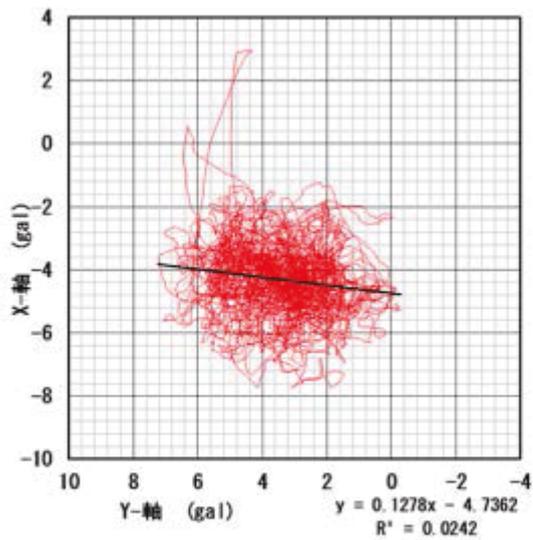
L=10.2, W=2.9



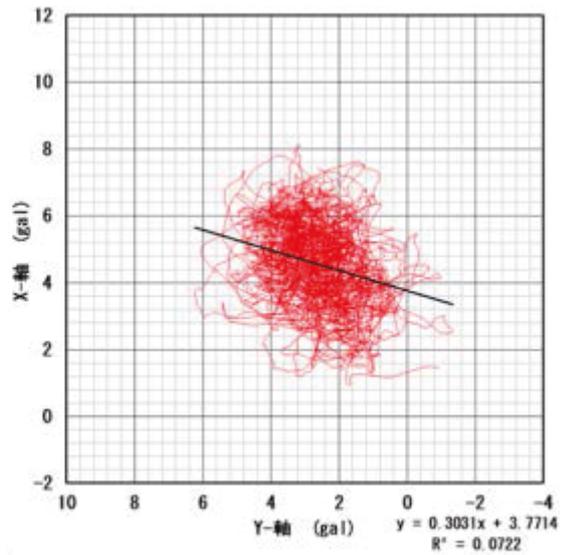
L=35.5, W=4.4

土砂地盤
計測点：風下1m
平均振幅差：15.6gal
平均振幅幅：4.3gal

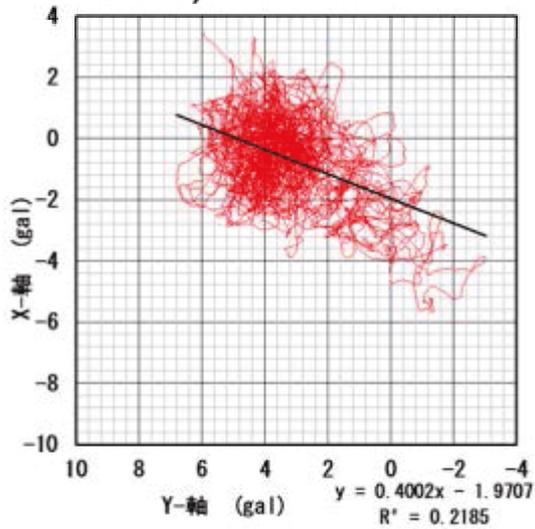
図 4-34. 土砂地盤：風下 1m 地点における地盤振動状況



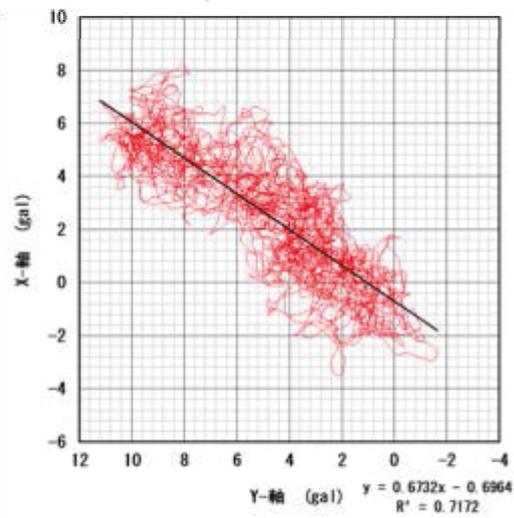
L=7.2,W=5.6



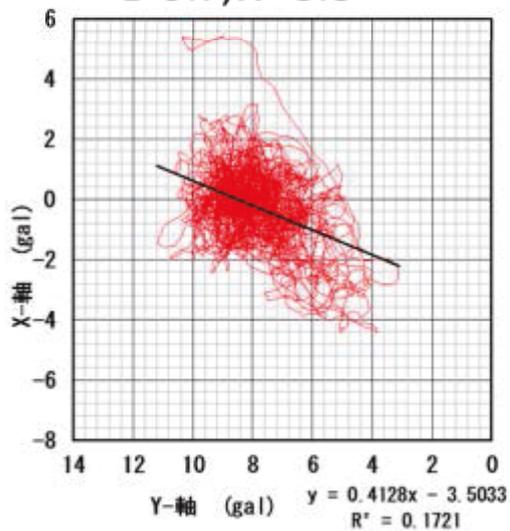
L=6.1,W=5.4



L=9.7,W=5.8



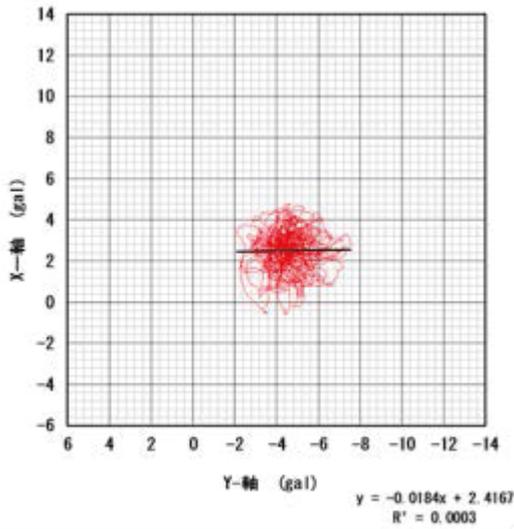
L=15.0,W=4.9



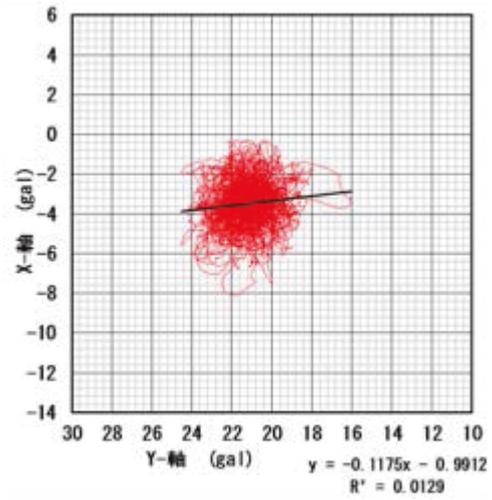
L=7.3,W=4.9

土砂地盤
 計測点：風直角1m
 平均振幅差：9.1gal
 平均振幅幅：5.3gal

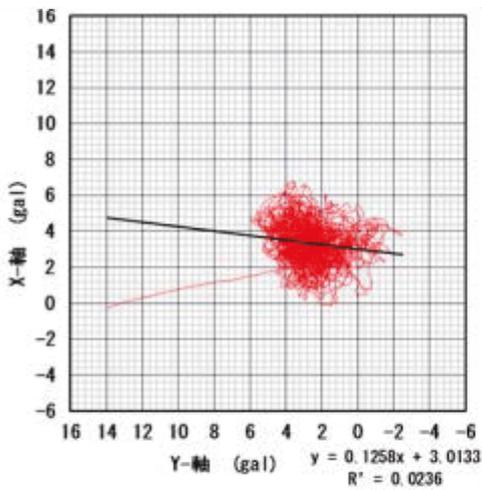
図 4-35. 土砂地盤：風直角方向 1m 地点における地盤振動状況



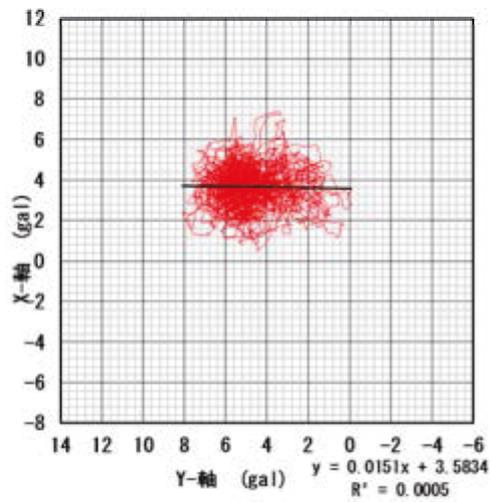
L=5.1,W=4.4



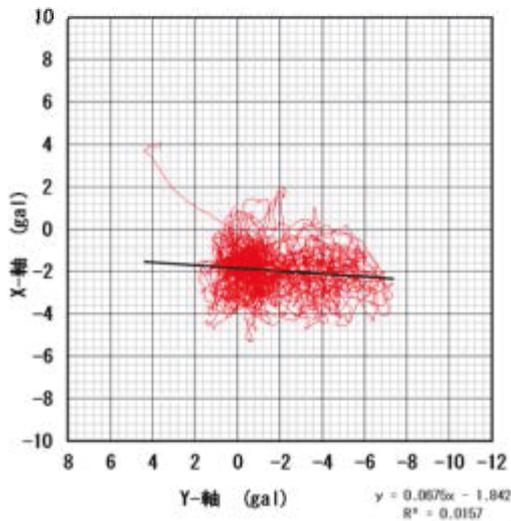
L=5.9,W=5.8



L=7.1,W=5.3



L=9.3,W=6.7



L=9.0,W=5.2

土砂地盤
 計測点：風下2m
 平均振幅差：7.3gal
 平均振幅幅：5.4gal

図 4-36. 土砂地盤：風下 2m 地点における地盤振動状況

図 4-33～36 に示す 4 箇所の地盤振動の大きさを図中の L, W から $A=L \times W$ として求め各地点の振動の大きさを比較したものが図 4-37 である。

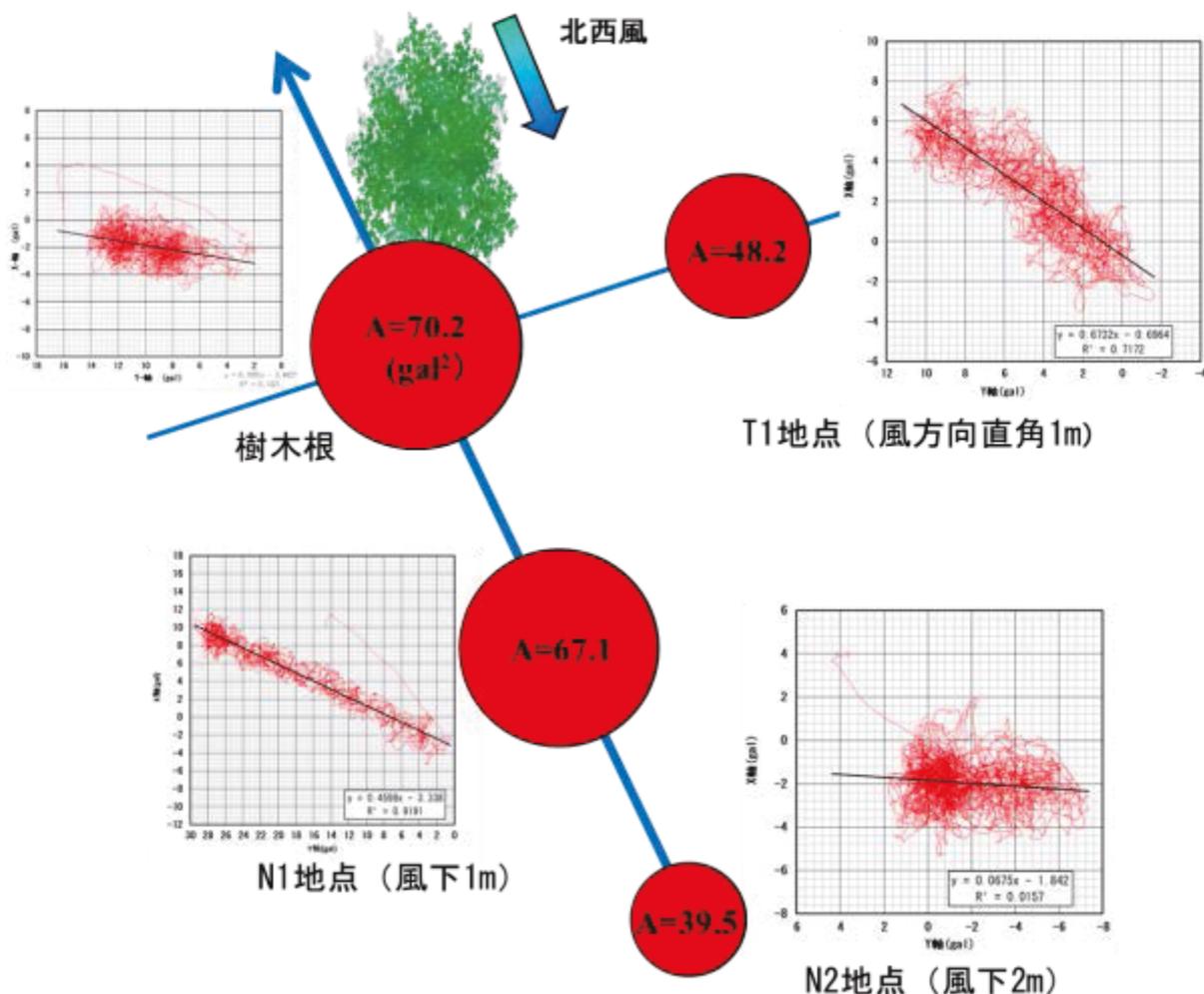


図 4-37. 土砂地盤における各計測箇所の地盤振動の大きさ比較図

図 4-37 より、土砂地盤での風による樹木振動が起振した地盤振動は、風下 1m 地点ではほぼ減衰していないが風下 2m 地点では約半分程度に減衰していることが分かる。同じように風方向直角 1m 位置では、約 70% に減衰している。

このことから、土砂地盤では風方向では振動の減衰が樹根の分布と関係しているように考えられ、震源からの距離が樹根分布の太・細根密度が高い部分より離れると急速に振動の大きさが減ることが分かった。風方向直角方向では、風方向より振動の減衰が大きく、風方向と地盤振動が関係していることが証明できる。

図 4-38~42 は、岩盤部で計測された加速度について振動方向を図示したものである。結果を整理するに当たり、東西方向（Y 軸方向）と振動分布の一次近似式との交差角を求めることで、振動方向の振れ特性を検討した。

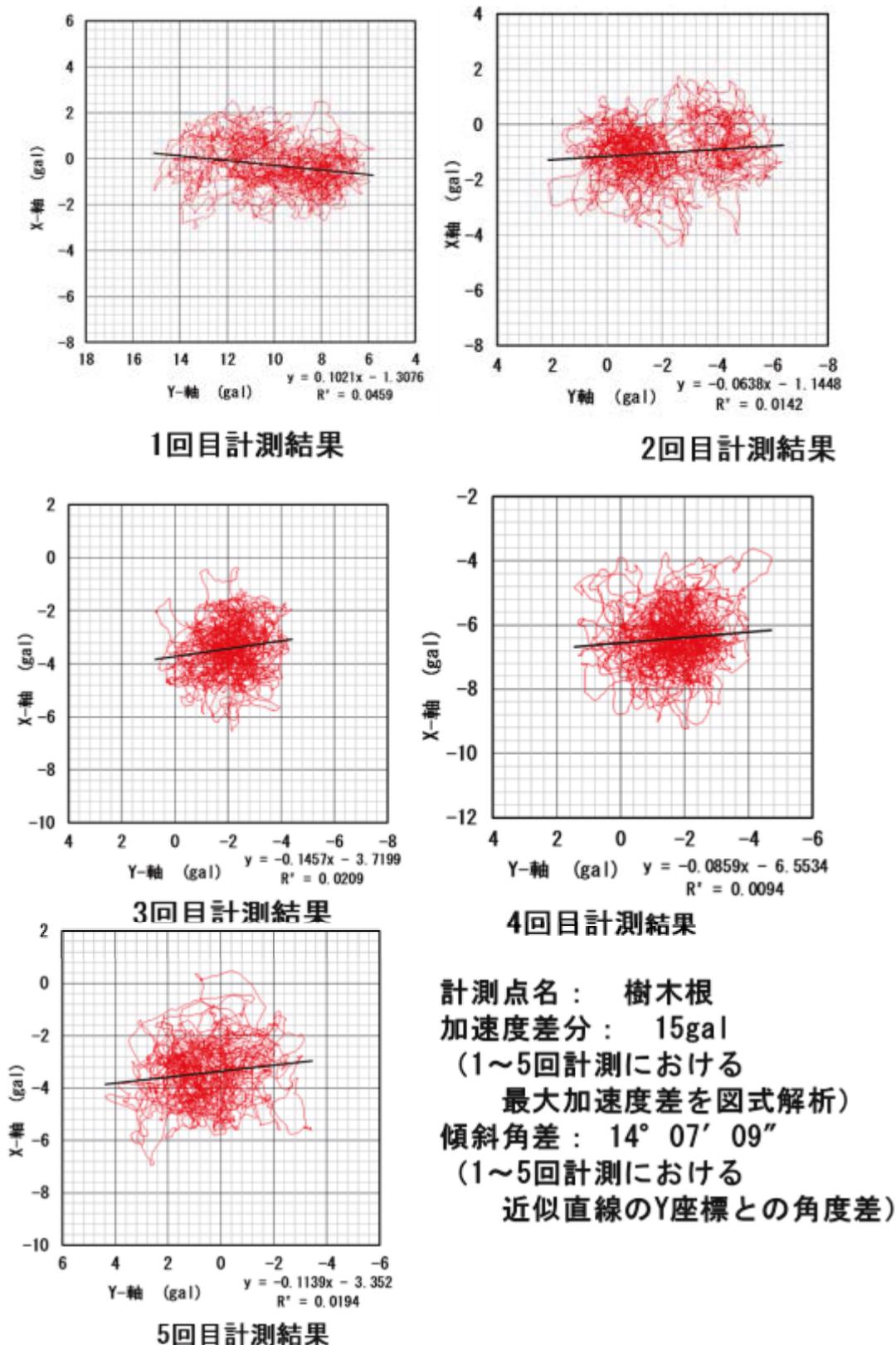
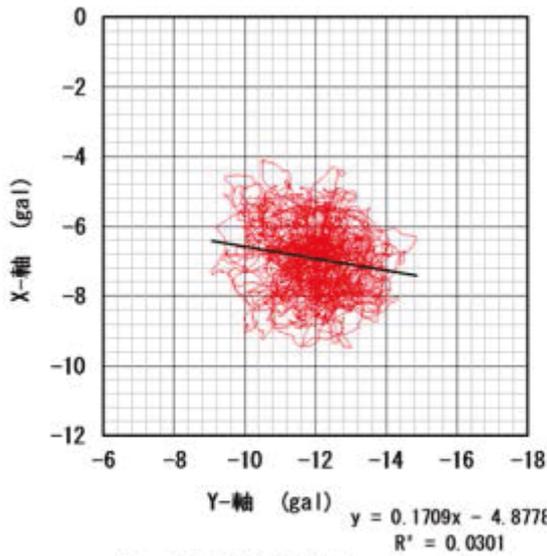
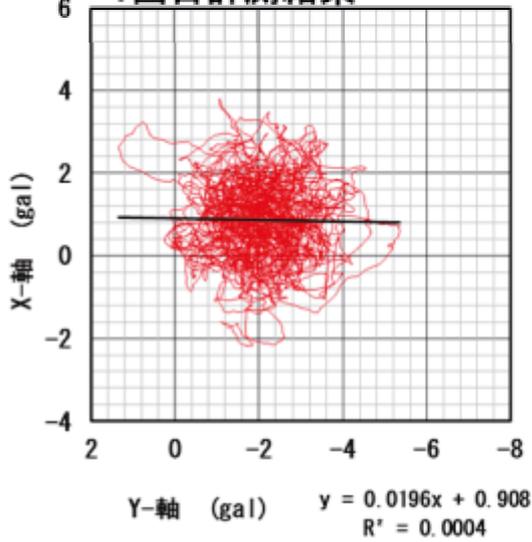


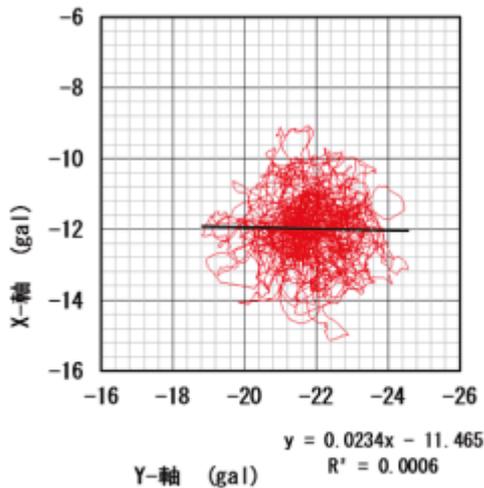
図 4-38. 岩盤部：樹木根地点の地盤振動状況



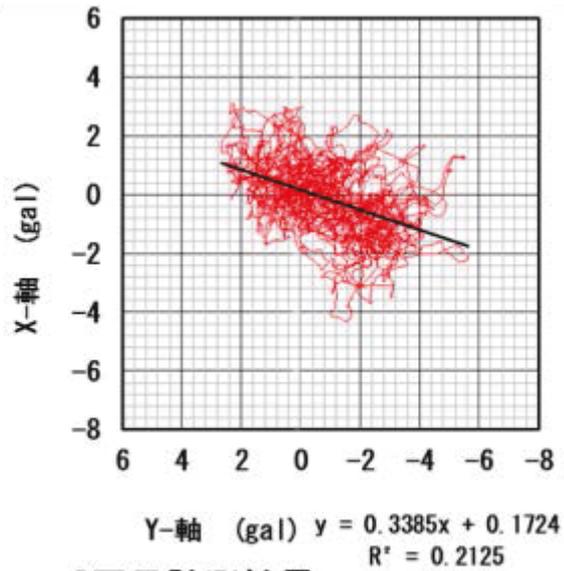
1回目計測結果



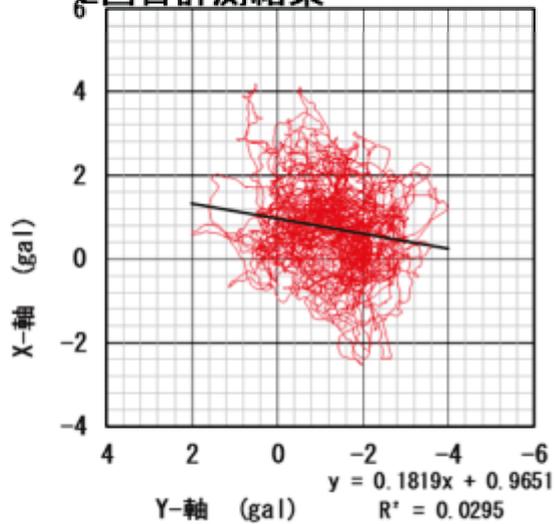
3回目計測結果



5回目計測結果



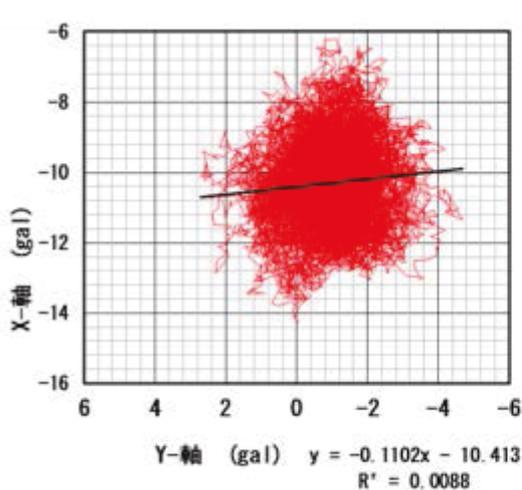
2回目計測結果



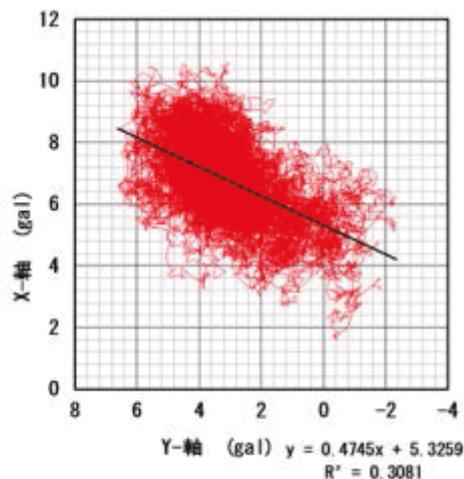
4回目計測結果

計測点名： 風下1m
 加速度差分： 13gal
 (1~5回計測における
 最大加速度差を関式解析)
 傾斜角差： 48° 22' 42"
 (1~5回計測における
 近似直線のY座標との角度差)

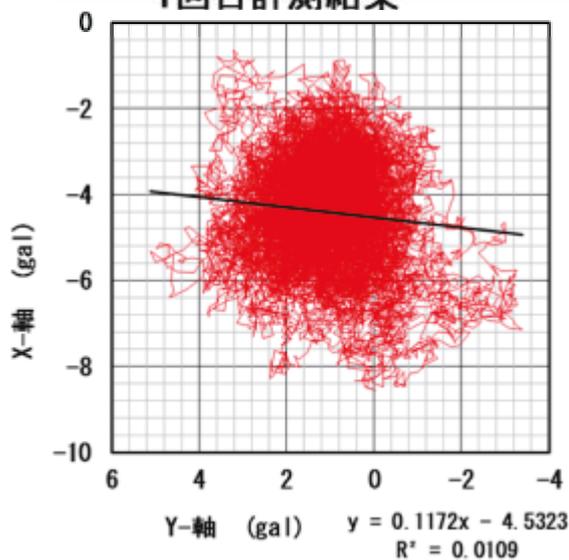
図 4-39. 岩盤部：風下 1m 地点の地盤振動状況



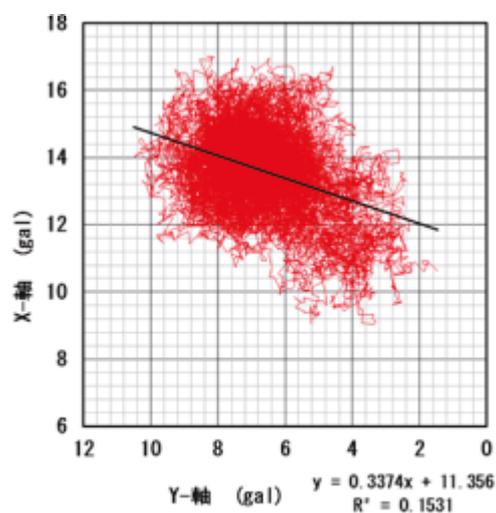
1回目計測結果



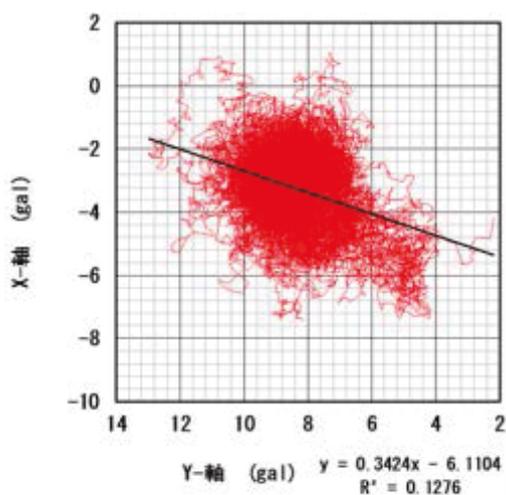
2回目計測結果



3回目計測結果



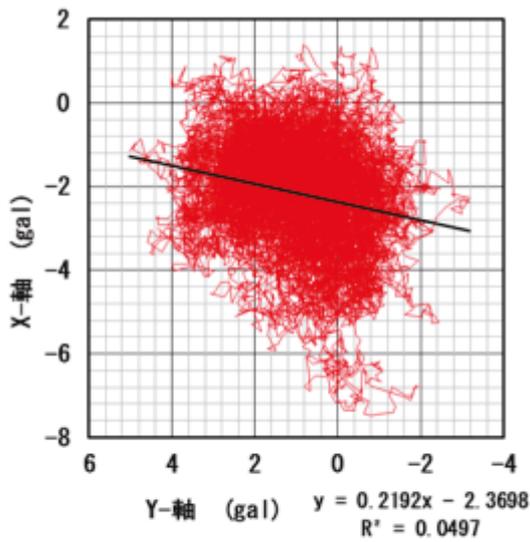
4回目計測結果



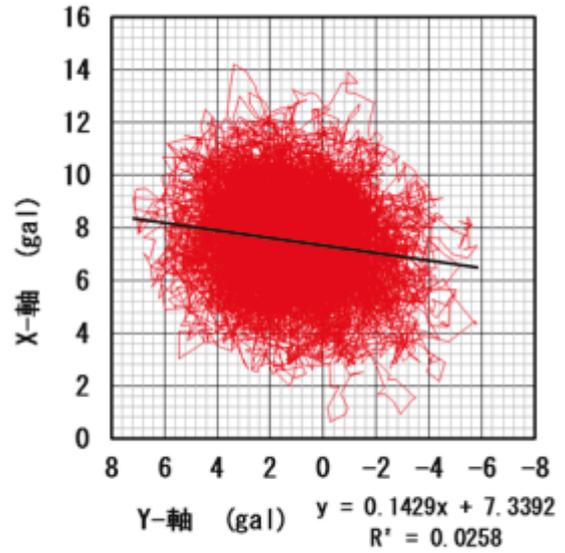
5回目計測結果

計測点名： 風下2m
 加速度差分： 13gal
 (1~5回計測における
 最大加速度差を図式解析)
 傾斜角差： 25° 11' 23"
 (1~5回計測における
 近似直線のY座標との角度差)

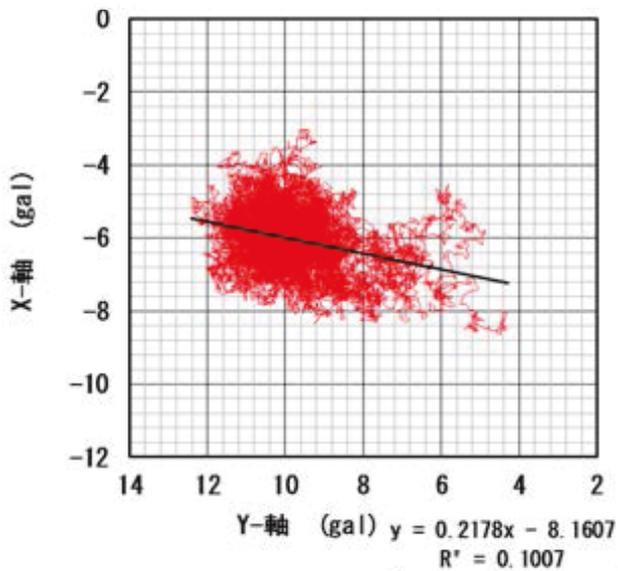
図 4-40. 岩盤部：風下 2m 地点の地盤振動状況



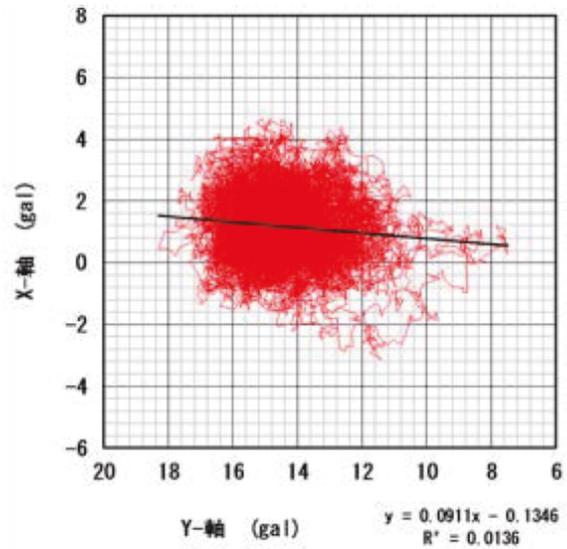
1回目計測結果



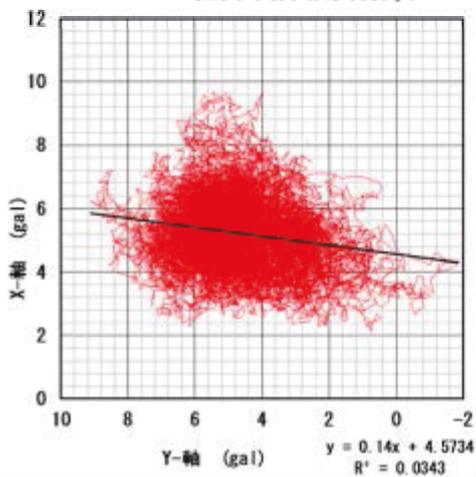
2回目計測結果



3回目計測結果



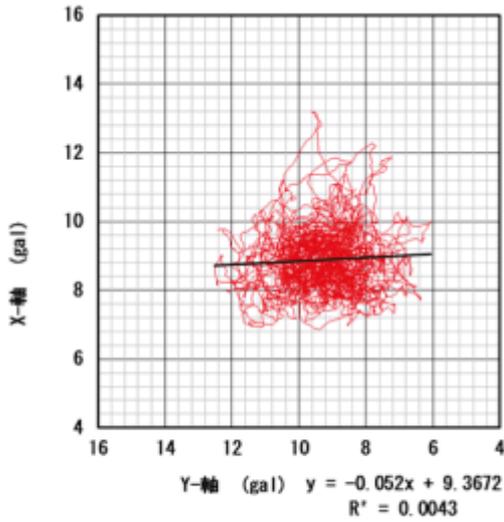
4回目計測結果



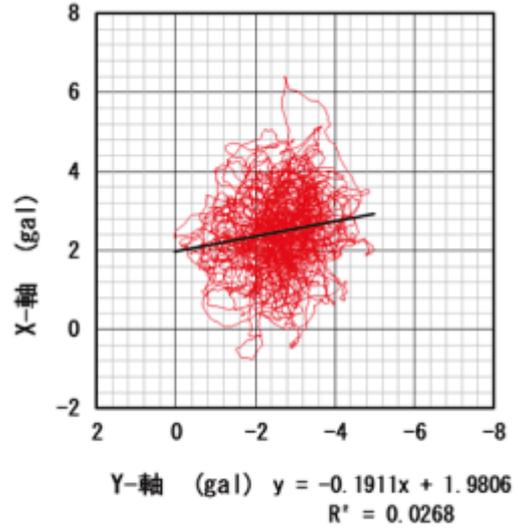
5回目計測結果

計測点名： 風直角1m
 加速度差分： 13gal
 (1~5回計測における
 最大加速度差を関式解析)
 傾斜角差： 11° 01' 49"
 (1~5回計測における
 近似直線のY座標との角度差)

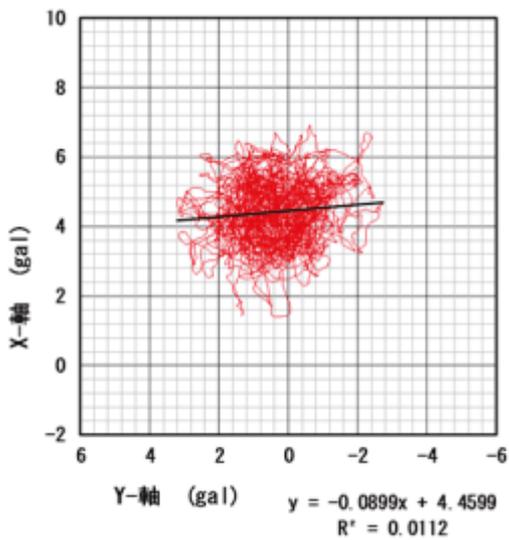
図 4-41. 岩盤部：風直角 1m 地点の地盤振動状況



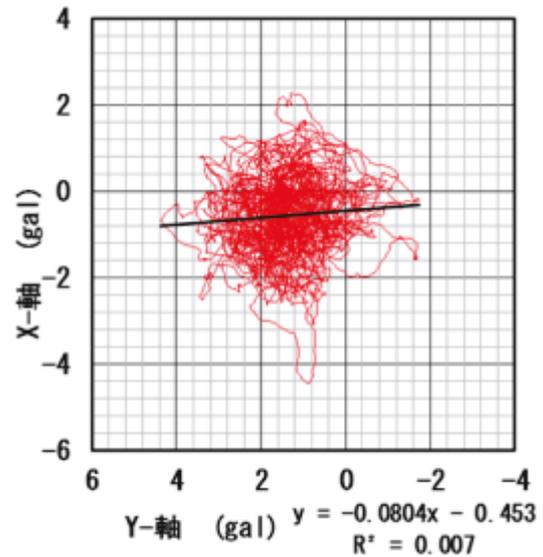
1回目計測結果



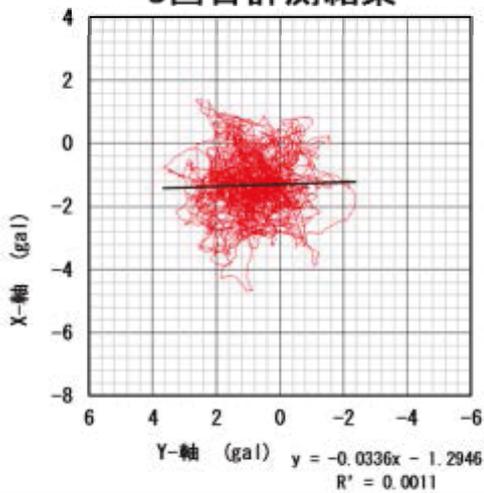
2回目計測結果



3回目計測結果



4回目計測結果



5回目計測結果

計測点名： 風直角2m
 加速度差分： 11.5gal
 (1~5回計測における
 最大加速度差を関式解析)
 傾斜角差： 8° 53' 38"
 (1~5回計測における
 近似直線のY座標との角度差)

図 4-42. 岩盤部：風直角 2m 地点の地盤振動状況

図 4-33～42 にまとめた風による樹木振動が地盤に与える振動について以下に述べる。

- (1) 図 4-33～36 より，土砂地盤での風による樹木根地点の振動は，風方向の振動と風以外の振動を受けているようである。これについては，風による不規則な樹木自体の揺れを計測している可能性が高い。このような結果は，図 4-37 に示す岩盤部における樹木根での計測にも見受けられることから，樹木の揺れによる振動に起因していると推察される。
- (2) 図 4-33～36 より，土砂地盤では，樹木からの離れが 2m 近くなると地盤振動が減衰し，図 4-42 に示す遠隔地の微動振幅（約 10gal）と変わらなくなる。個々で，土砂地盤における遠隔地振動観測は，計測地での雑振動を把握するために計測した。計測結果は，風方向とは異なる近似直線を示し振動方向に分散も大きい。ただし，遠隔地計測は，建造物雑振動や自動車振動も受信しているため，正確な地盤微動振動とは言い難い。

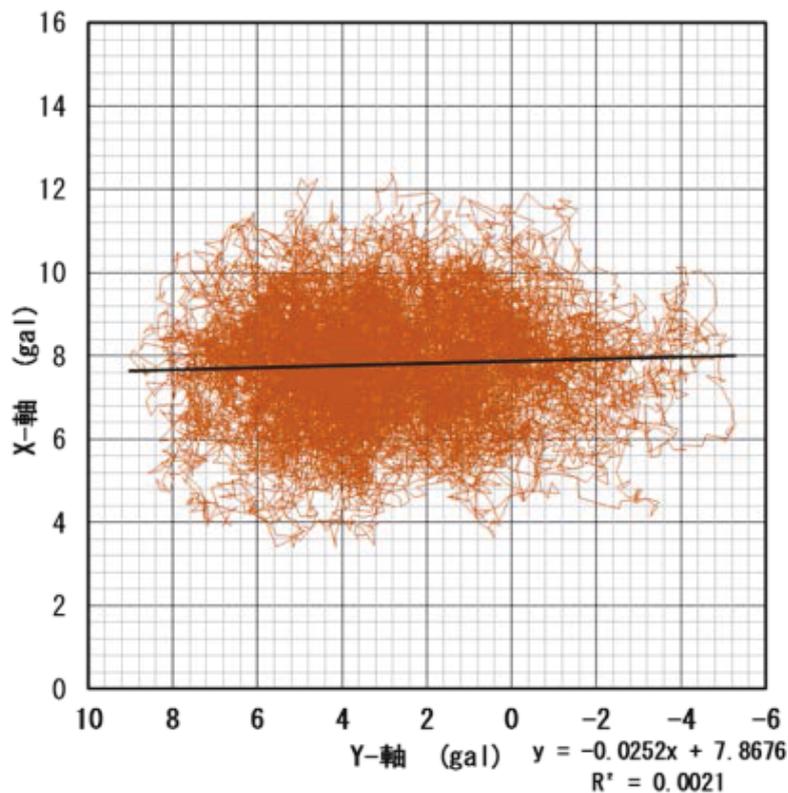


図 4-43. 土砂地盤遠隔地の微動計測結果

- (3) 図 4-33～36 おける地盤振動方向について，直線近似線と東西方向である Y 軸とのなす角をもとめ，5 回観測での振動方向振幅をまとめたものが表 4-3 である。表 4-3 より，樹木根付近の振動方向の方向分散は小さいことが分かる。同様な方向特性が風方向直角方向地点（T1）でも見受けられる。ただし，この振動状況の原因は異なったものと考えられる。樹根位置では，樹木の揺れが直接的な原因と考えられるが，T1 地点では図 4-24,28 に示す樹根分布による振動方向の変化の影響が強いと考えられる。その他の計測点は，震源から離れると振動方向の振れが観測される。

表 4-3. 土砂地盤振動方向の分散状況

計測点	直線近似線の角度差
樹木根	7° 38' 35"
N1 (風下 1m)	9° 56' 07"
N2 (風下 2m)	13° 52' 08"
T1 (風方向直角 1m)	26° 39' 55"

(上表の角度差は、振動方向の直線近似線で

Y 座標：東西方向となす角の差をまとめた結果である。)

- (4) 図 4-38～42 に示す 5 回の計測結果から、岩盤部で振動方向を整理した結果が表 4-4 である。表 4-4 より、岩盤部では、風下方向より風方向直角方向の地盤振動が、より分散変化しないで伝播している。この現象は、計測地の基盤岩亀裂方向がおおむね風方向の直角方向である計測方向と同じことが原因であると考えられる(写真 4-1, 図 4-31 参照)。
- (5) 岩盤部などの不均一な地盤では、岩盤の亀裂方向に振動が伝播しやすいことを意味している。今回の計測では、土砂地盤に比較して地盤振動の減衰が小さく振動方向の分散も小さい。岩盤部では、樹木根による振動分散のほか、地盤の異方性についても検討する必要がある。

表 4-4. 岩盤部地盤振動方向の分散状況

計測点	直線近似線の角度差
樹木根	14° 07' 09"
N1 (風下 1m)	48° 22' 42"
N2 (風下 2m)	25° 11' 23"
T1 (風方向直角 1m)	11° 01' 49"
T2 (風方向直角 2m)	8° 53' 38"

(上表の角度差は、振動方向の直線近似線で

Y 座標となす角の差をまとめた結果である。)

以上の結果をまとめる。風と樹木による地盤の振動に関しては、土砂地盤で樹根の根張り特性によって振動方向・振動減衰率変化する。特に、樹木より 1m 付近に細根の密集が想定され、振動方向・振幅量の変化が大きいと考えられる。次に、岩盤部においては、一般的に表土が薄いため樹根の基盤岩への侵入が想定される。結果として、基盤岩の亀裂走向・風化変質特性などによって樹木振動～地盤振動があまり減衰せず、亀裂方向への振動伝播が特異的であることが判明した。

4-4. 樹根分布や地盤構成が地盤振動に与える影響

本研究で計測した土砂地盤と岩盤部の地盤振動について、樹根分布や地層構成の差が計

測振動にどのような影響があるかを検討してみる。先に示した図 4-33～42 は、簡易 3 次元加速度計で計測した結果を 1 次直線近似した結果を図示してあり、本研究では振動方向と解釈している。この解析方法の妥当性を以下に検討する。

4-4-1. 地盤振動方向確認の検討

先の図 4-33～36, 4-38～42 に示す地盤振動図の中には、直線に富んだ変化を示すものと円状に回転しているような変化をするものがある。それらの中から土砂地盤と岩盤部について各 3 ケースを抽出し、風速計の最短測時間 2sec と図 4-9, 4-29 に示す強風の継続時間 (4～6sec 程度) を参考にして、計測データを 5sec 刻みで再計算したのが図 4-44～49 である。

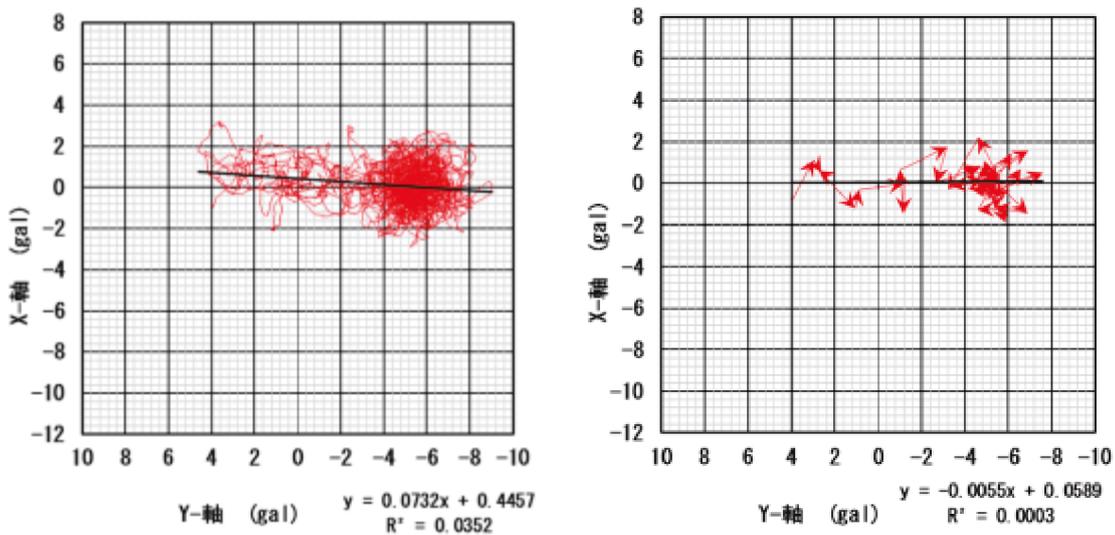


図 4-44 土砂地盤 樹根位置の振動方向

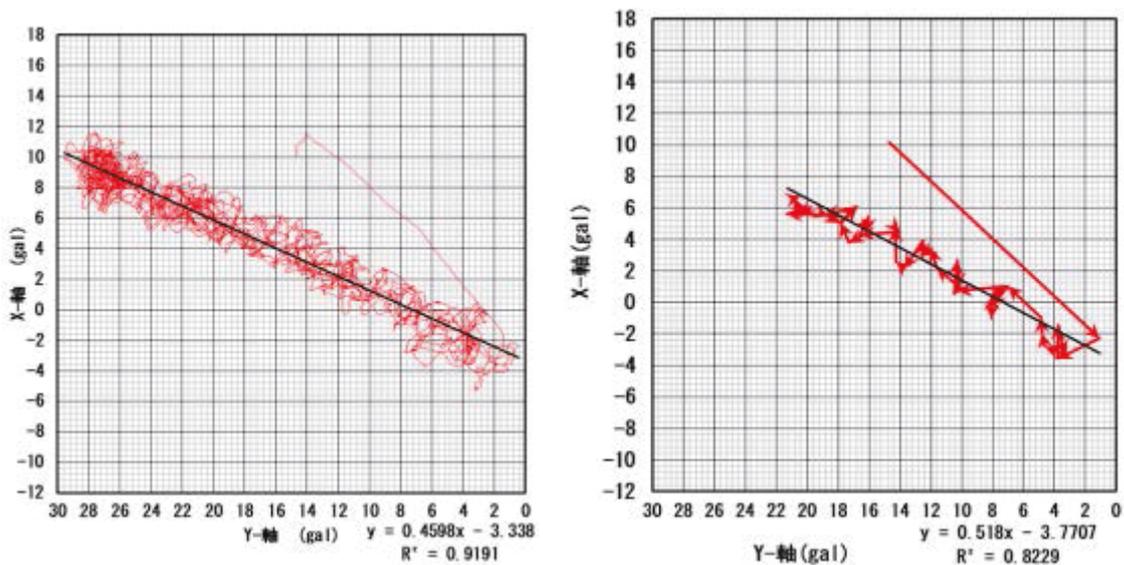


図 4-45 土砂地盤 風下 1m 位置の振動方向

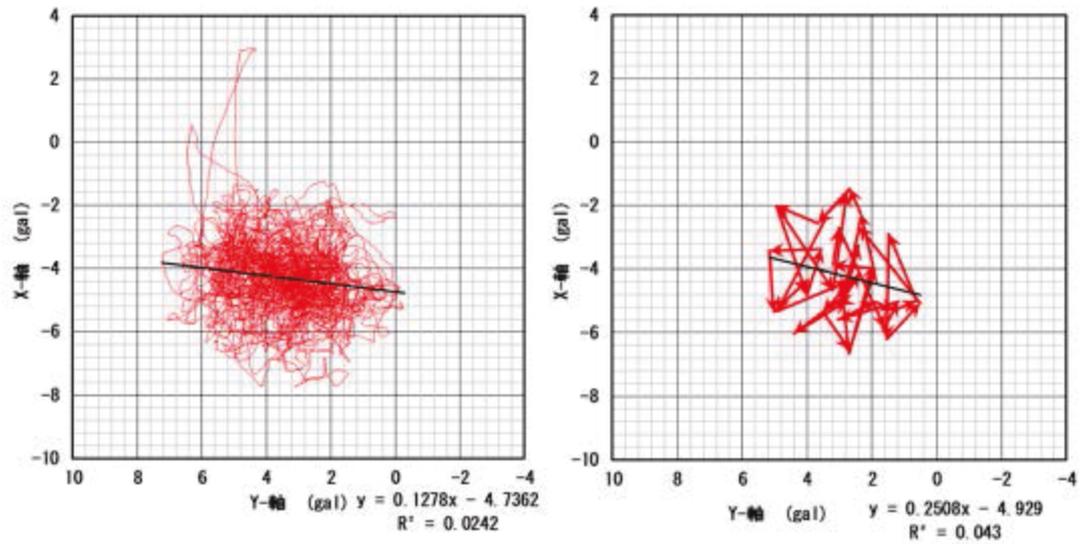


図 4-46 土砂地盤 風方向直角 1m 地点の振動方向

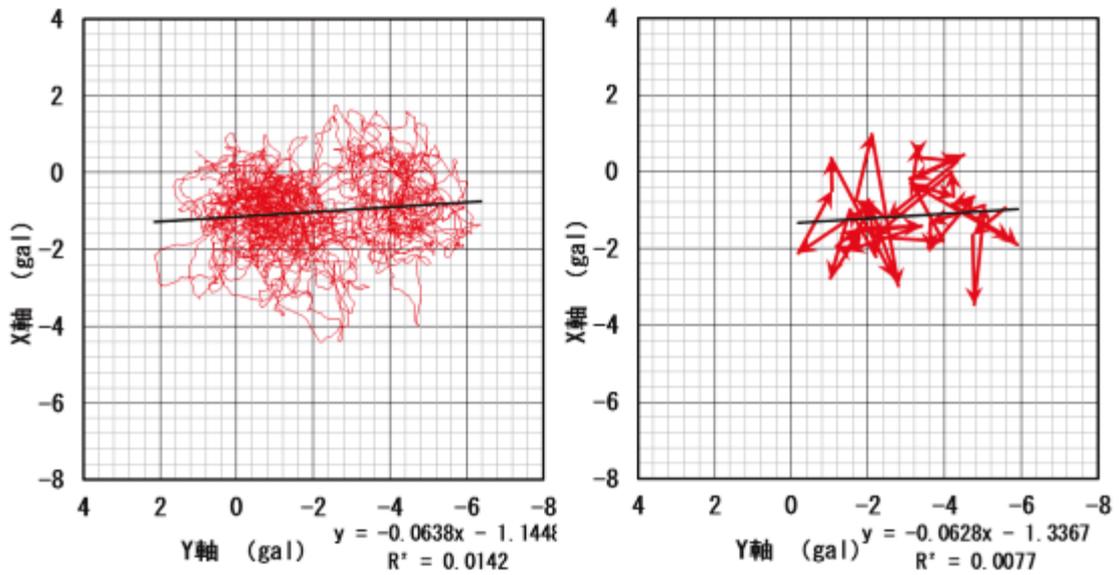


図 4-47 岩盤部 樹木根位置の振動方向

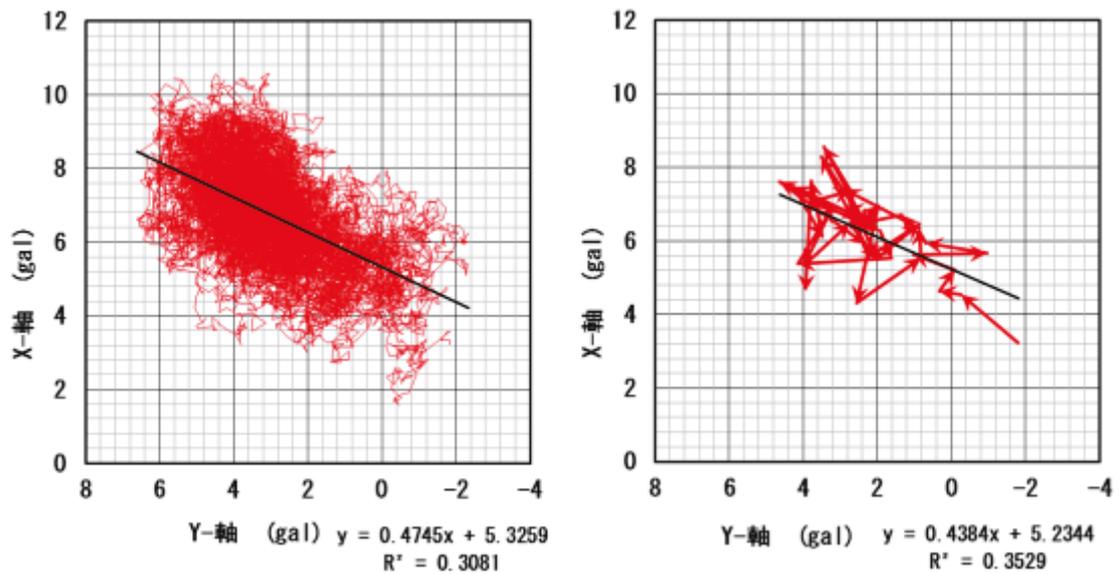


図 4-48 岩盤部 風下 2m 位置の振動方向

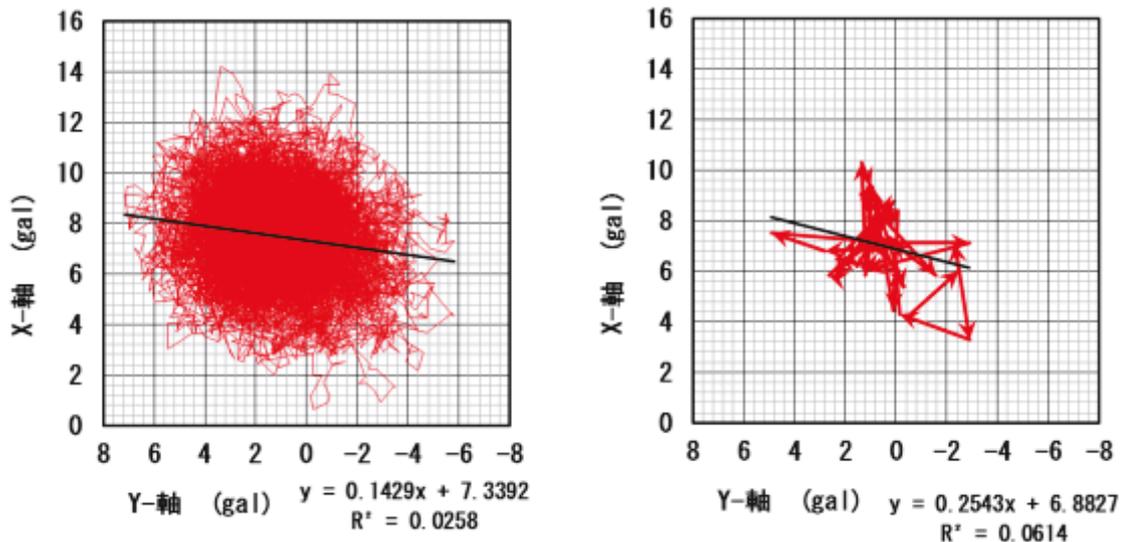


図 4-49 岩盤部 風方向直角 1m 位置の振動方向

図 4-44～49 より，本研究で利用した簡易 3 次元加速度計での振動方向計測について，以下のような特徴がある。

- 1) 振動計測を行った現地では，風特性として 2～数秒の時間に一定の方向からの風が吹き，その風に対する樹根を介した地盤振動を計測した。このような状況で 1～2/100(sec) 地盤振動を計測した場合，樹木の不規則な横揺れ振動を雑振動として受信してしまい風方向と地盤振動の関係が不明瞭となってしまう。
- 2) 本研究では，簡易な振動方向判定として，一次近似で直交座標上での方向を判定したが，一見して振動方向との整合性が判定できない場合もある。よって，観測した風の 1 単位を 5sec ごととし，風の単位時間ごとに振動方向を計算し直すことで風方向と地盤振動の方向特性との関係を求めた。結果として，いずれの箇所の計測結果も一次近似で求めた方向と一致する方向と，直交する方向の 2 方向の成分で振動しているようである。
- 3) 土砂地盤では，風方向の振動について比較的大きな加速度を有する振動を示す振動が認められる。特に，風方向と振動方向が概ね一致している風下 1m については，その傾向が強い。地盤振動が円状に回転しているような風方向直交方向については，加速度そのものが小さくランダムな振動を生じているようであり，単純に樹木の振動が地盤中を伝播するのではなく，樹根のような何らかの振動媒体が影響しているようである。
- 4) 岩盤部においては，樹根位置で回転運動しているようであるが，樹木から離れた位置では比較的大きな速度を持ち指向性に富んだ振動が認められる。これらの指向性を示す地盤振動は，土砂地盤とは異なり 1 次近似で示す方向とは異なり比較的大きな加速度を有し，風下位置とそれと直交する位置ともにやや傾斜するような方向で振動している。
- 5) 図 4-44～49 より，本研究のような簡易 3 次元加速度計を用いた地盤振動計測では，概略的な地盤振動方向を把握するに 1 次元近似でその方向を求めることが把握できることが分かった。

4-4-2. 地盤振動の伝播特性

本研究で計測した地盤振動は、樹木を介して地盤中に伝達される波が起振していると考えられる。この地盤振動について前項でも述べたように、樹木振動方向とは異なる振動が計測されている。このような振動が伝播してくる原因として、地盤中を伝わる振動が単純に起振点から直接伝播してくる波以外にも、地盤構成・特性の違いや樹根分布などが影響していると考えられる。本項では、地盤構成について検討してみる。

一般的に地盤中を伝わる波としては、P波・S波・表面波などが知られているが、今回の地盤振動計測は加速度を3次元で計測することで地場振動の方向と強さを把握するものである。このため、受振地点にどのような振動が到達しているかを正確に把握することが難しい。しかし、上記の波の中で最も伝播速度が早いP波の伝播状況から地層構成がどのような影響を及ぼすかを検討してみる。

地盤中を伝わるP波は、地表を伝播する以外に地下の地層境界で屈折し、より速度の速い地層を伝わる屈折波が早く伝播することもある。このような場合、伝播してくる波は地下の地層特性を反映した波であるため、地表を伝播する波と異なった特性を示すことがある。

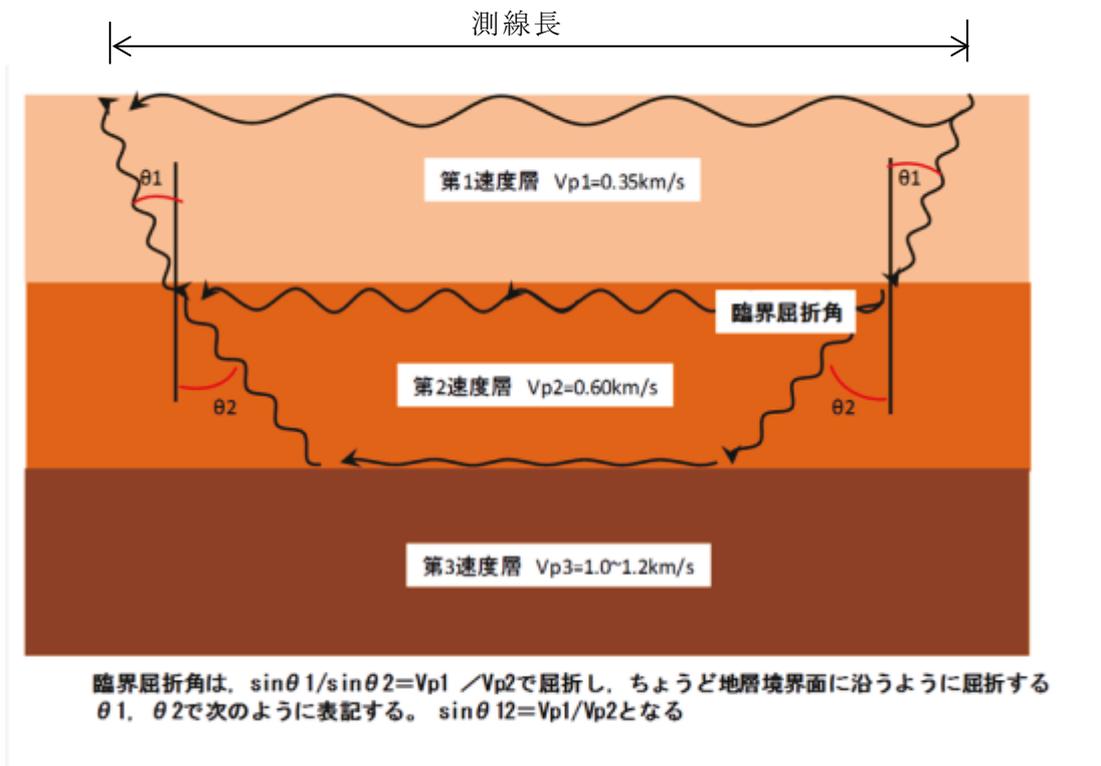


図 4-50 弾性波探査（屈折法）の概念図

図 4-50 は、弾性波探査（屈折法）の概念を示すが、受振点間隔（測線長）が長くなるなどや、第 2、3 速度層の速度値が異常に速い場合などは第 2、3 層表面伝わる振動が早く伝わり下位層の伝播特性が強調されることになる。ここで、一般的な水平土砂層を伝わる P 波が、下位層である第 2 速度層を伝播する波が速く受振点に到達する距離について検討したものが表 4-5 である。なお、計算に用いた P 波速度に関しては、第 1 速度層として音速と同等の 350m/s とし、第 2 速度層としては約倍の値となる 600m/s と仮定した。

表 4-5 水平土砂層における弾性波探査（屈折法）の P 波到達時間計算表

第1速度 Vp1 (m/s)	第2速度 Vp2 (m/s)	V1/V2	sin-1 (\sin^{-1})	第1速度層 層厚 d(m)	受振点間隔 距離(m)	左右の測点 斜長 (m)	第1, 2速度層 水平長さ(m)	第1速度層 伝播時間 (s)	第2速度層 伝播時間 (s)	P波到達 時間(s)	主たるP波 伝播層
350	600	0.583	0.6224163	0.00	1.0	0.000	1.000	0.002857	0.000000	0.002857	
				0.10	1.0	0.246	0.856	0.000703	0.001427	0.002130	基盤
				0.15	1.0	0.370	0.784	0.001057	0.001307	0.002364	基盤
				0.20	1.0	0.492	0.712	0.001406	0.001187	0.002592	基盤
				0.25	1.0	0.614	0.642	0.001754	0.001070	0.002824	基盤
				0.30	1.0	0.738	0.570	0.002109	0.000950	0.003059	表層
				0.40	1.0	0.984	0.426	0.002811	0.000710	0.003521	表層
				0.50	1.0	1.232	0.282	0.003520	0.000470	0.003990	表層
350	600	0.583	0.6224163	0.00	2.0	0.000	2.000	0.0057143	0	0.00571429	
				0.10	2.0	0.246	1.856	0.0007029	0.0030933	0.00379619	基盤
				0.20	2.0	0.492	1.712	0.0014057	0.0028533	0.00425905	基盤
				0.30	2.0	0.738	1.570	0.0021086	0.0026167	0.00472524	基盤
				0.40	2.0	0.984	1.426	0.0028114	0.0023767	0.0051881	基盤
				0.50	2.0	1.232	1.282	0.00352	0.0021367	0.00565667	基盤
350	1000	0.35	0.3575711	0.00	1.0	0.000	1.000	0.0028571	0	0.00285714	
				0.10	1.0	0.246	0.856	0.0007029	0.0014267	0.00212952	基盤
				0.15	1.0	0.370	0.784	0.0010571	0.0013067	0.00236381	基盤
				0.20	1.0	0.492	0.712	0.0014057	0.0011867	0.00259238	基盤
				0.25	1.0	0.614	0.642	0.0017543	0.0010700	0.00282429	基盤
				0.30	1.0	0.738	0.570	0.0021086	0.0009500	0.00305857	表層
				0.40	1.0	0.984	0.426	0.0028114	0.0007100	0.00352143	表層
				0.50	1.0	1.232	0.282	0.00352	0.0004700	0.00399	表層
350	1000	0.35	0.3575711	0.00	2.0	0.000	2.000	0.0057143	0	0.00571429	
				0.10	2.0	0.246	1.856	0.0007029	0.0030933	0.00379619	基盤
				0.20	2.0	0.492	1.712	0.0014057	0.0028533	0.00425905	基盤
				0.30	2.0	0.738	1.570	0.0021086	0.0026167	0.00472524	基盤
				0.40	2.0	0.984	1.426	0.0028114	0.0023767	0.0051881	基盤
				0.50	2.0	1.232	1.282	0.00352	0.0021367	0.00565667	基盤

表 4-5 より、受振点間隔 1m の場合、第 1 速度層（地表層 Vp=300m/s）が層厚 0.25m 以上あれば、第 1 速度層の振動が受振点に早く到達する。また、地震点間隔 2m の場合は、層厚 0.5m であっても基盤（第 2 速度層以下）の振動が受振点に早く到達することが分かる。同様に、第 2 速度層の速度値が 1,000m/s の場合も、受振点間隔 1m 場合は 0.25m 以上あれば、第 1 速度層の振動が早く受信点に到達することが分かる。

以上の土砂地盤と岩盤部の振動伝播特性についてまとめると、以下ようになる。

- 1) 土砂層の表面を伝わる樹木振動は、土砂層のように均質であれば受振点間隔 2m 程度は表面を伝わる樹木からの振動と考えられる。よって、先の図 4-44 に示す風下 1m 程設置した受振計のように振動方向が震源である風方向と同じ方向で、直線的な加速度変化をしているため地表を伝わる波であると判定してもよいと考えられる。
- 2) 土砂層であっても起振方向と直角な方向での振動は、地表を伝わる振動ではあるが、樹根の根張りの影響もあり土中の樹根の伸張の影響も受けて異なった振動を生じていると想定できる。

本研究では、土砂地盤のほかに岩盤部でも地盤振動計測を行った。以降は、岩盤部における地盤振動の伝播特性について検討してみる。岩盤の地盤振動を検討するに当たり、岩盤のP波速度が重要である。表4-6に示す速度値は、国土交通省などの基準として用いられている岩盤掘削などのための岩分類と標準弾性波速度を示したものである。

表 4-6 地山弾性波速度による岩分類（建設省）

岩分類	グループ	地山弾性波速度 (km/sec)	A・Bグループに入る代表的な岩名	
軟岩 (I)	A	0.7~1.2	Aグループ	片麻岩、砂質片岩、緑色片岩、珪岩、角岩、石灰岩、砂岩、輝緑凝灰岩、礫岩、花崗岩、セン緑岩、ハンレイ岩、カンラン岩、蛇紋岩、流紋岩、ヒン岩、安山岩、玄武岩
	B	1.0~1.8		
軟岩 (II)	A	1.2~1.9		
	B	1.8~2.8		
中硬岩	A	1.9~2.9		
	B	2.8~4.1		
硬岩 (I)	A	2.9~4.2	Bグループ	黒色片岩、緑色片岩、干枚岩、粘板岩、輝緑凝灰岩、頁岩、泥岩、凝灰岩、集塊岩
	B	4.1以上		
硬岩 (II)	A	4.2以上		
	B	—		

（日本応用地質学会編：応地質特別号，p146，昭和58年8月31日発行）

岩盤部での振動計測地は、美濃帯と総称される中・古生代の層状チャートを基盤としており、風方向とは直角に近い走向で層理が存在している特徴を有している。表4-6でのチャートは、角岩・珪岩に分類されるためグループAに属し、岩盤表面は切土と風化作用によって軟岩(I)と評価できるため $V_p=0.7\sim 1.2\text{km/sec}$ と見なせる。ただし、今回の検討では表土層の層厚が推定であるため、検討する速度値を土砂と風化岩盤の中間として $V_p=0.6\text{km/sec}$ として検討してみる。検討を行った結果は、表4-7のようになったが、検討に用いた地盤状況については、図4-51に示す地層構成と断面状況であった。

表 4-7 岩盤部における弾性波探査（屈折法）のP波到達時間計算表

第1速度 V_{p1} (m/s)	第2速度 V_{p2} (m/s)	$V1/V2$	\sin^{-1}	第1速度層起振点層厚 d(m)	受振点 No.	第1速度層受振点層厚 d(m)	受振点間隔距離 (m)	左右の測点の合計斜長 (m)	第1, 2速度層水平長さ (m)	第1速度層伝播時間 (sec)	第2速度層伝播時間 (sec)	P波到達時間 (sec)	主たるP波伝播層
350	600	0.583	0.622	0.450	1	0.30	1.0	0.000	1.000	0.002857	0.000000	0.002857	表層の場合
				0.450	1	0.30	1.0	0.923	0.462	0.001320	0.000770	0.002090	表層
				0.450	2	0.25	2.0	0.000	2.000	0.005714	0.000000	0.005714	表層の場合
				0.450	2	0.25	2.0	0.861	1.499	0.00246	0.002498	0.004958	基盤

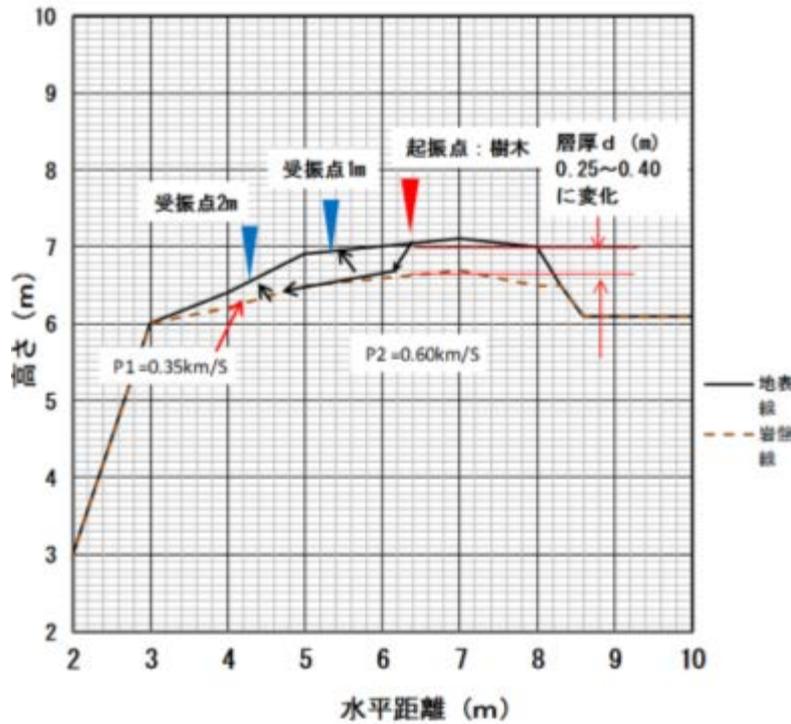


図 4-51 計測地の地層構成と断面状況図

表 4-7, 図 4-51 より, 岩盤部における地盤振動の伝播特性についてまとめてみる。

- 1) 表 4-7, 図 4-49 より, 起振点と受振点の層厚が異なっている(層厚 0.25~0.45m)が, 起振点~受振点間隔 1m では地表を伝播する振動が早く到達する。ただし, 表層を伝播する波と基盤を伝播する波の差は 1/100sec 以下であるため, 地層構成の僅かな差では基盤岩の波が先に伝わることになる。
- 2) 計測地では, 起振点~受振点間隔が 2m であると, 基盤岩を伝播する波が早く到達する。
- 3) 図 4-48 より, 風下 2m 地点は, 基盤岩が浅く基盤岩の振動が直接的に伝播していると考えられるため直線的な振動特性が見受けられる。ただし, 振動方向については, 全体的な平均的な方向とは異なる振動方向が計測される。これは, 基盤岩の振動特性であると想定される。
- 4) 図 4-48 より, 風方向直角方向 1m の振動は風による地盤振動方向を主としているが, 図 4-48 で示すような異なる地盤振動が計測されている。この振動は, 基盤岩の亀裂走向と類似しており, 基盤岩の特性である可能性が高い。
- 5) 図 4-48, 4-49 より, 風下方向と直角方向では振動分布の分散が異なる。この状況を図式解法であるが, 振動方向の最長長さとしてそれと直角する幅とを比較すると, 風下 1m は【長さ/幅の比】 2.03 となり, 風方向直角 1m では 1.10 と大きな差が生じ, 風振動以外で樹根などの雑振動の大きさが想定される。ここで, 振動方向を解析時間で再計算した図 4-49 (右図), 4-49 (右図) では, 風下 1m で【長さ/幅の比】 1.79, 風方向直角 1m で 1.65 となり, 地盤の風振動方向を明確にすることができた。

4-5. まとめ

本研究では、降雨・地震・融雪期などの一般的によく知られている落石素因以外を原因とする落石が小径ではあるがかなりの割合で確認されている。よって、降雨以外の落石素因・要因について、落石災害が落石径に関わらず人命に関係するため検討した。第一に、落石対策便覧にも記されている風により樹木等が揺れる振動が、亀裂の発達した岩盤に振動を与えることで岩塊が抜け落ちる現象について、土砂地盤と岩盤部の2種地盤で地盤振動について研究した。

【土砂地盤】

風による樹木振動について、軽量小型の3次元加速度計を利用して、加速度計で地盤振動を計測する場合、計測値における微少な雑振動を除去し目的の振動を明確にする必要がある。結果として、以下のようになった。

- (1) ある程度の風速を有する断続的な風は、樹木を振動させて地盤に振動を与えることが判明した。その際の卓越振動は、0.5~2.0Hz程度の長周波であり、震源が樹木の緩やかな振動と考えられる。
- (2) 樹根を介しての風振動は、樹木から放射状に広がる樹根の影響で、振源から離れると風方向とは異なる振動となるようである。風方向と同じ方向に設置した受振計では、風方向に近い振幅を示す。対して、風方向と直角方向に設置した受振計は、樹根の太根・小根の分布に影響されて異なった方向の振動が生じると考えられる。
- (3) 図4-33~36より、土砂地盤では、樹木からの離れが2m近くなると地盤振動が減衰し、図4-42に示す遠隔地と変わらなくなる。
- (4) 樹木による地盤振動が異方向性・振幅の差を示すのは、樹根の分布密度に関係し、太根より本数の多い小径根の密度が関係すると想定される。今回の計測では、樹木より約1m地点が最も大きな振幅を示していることから伺い知れる。
- (5) 樹木より2m程度離れた地点での地盤振動は、他の2箇所と比較すると風方向とは異なった振動方向を示し、かなり振動方向が分散・減衰傾向にあると考えられる。
- (6) 地盤の振動方向を分析した結果、土砂地盤では起振点から2m程度離れると風方向とは異なる地盤振動が計測され樹根分布の影響があると考えられる。

【岩盤部】

本研究では、風化した岩盤を薄く表土が覆う採石場で地盤振動計測を行った。結果として、下記のようになった。

- (1) 樹木より風下2m地点は、崖の近傍に位置し、表土が薄く基盤岩を伝播する他の振動や、風化した基盤岩を伝わる樹木根の振動が減衰せず伝わった可能性がある。

- (2) 今回の計測では、自然斜面を模式し対象木として「モチノキ」類の単独木と、低木が疎な状態で広がる地点を選定した。このため、風化した基盤岩類への木根侵入が予測された。このような結果として、土砂地盤に比べ樹木による風振動の伝播の減衰が小さいことが判明した。
- (3) 今回の計測結果から、樹木による地盤振動は樹根系の影響を受け、単純に風方向に地盤が振動するのではなく、樹根や岩盤の亀裂に関係するような振動方向変化を示すと考えられる。ただし、図 4-44～49 より岩盤部の振動方向を分析すると、基盤岩の特性である亀裂方向も関係しているようである。
- (4) 土砂地盤における地盤振動方向について、振動方向の振れ幅をまとめると、樹木根付近の振動方向の方向分散が大きいことが分かる。同様な方向特性が風方向直角方向地点でも見受けられた。ただし、この振動状況の原因は異なったものと考えられ、樹根位置では樹木の揺れが直接的な原因で、他の地点では樹根分布による振動方向の変化の影響が強いと考えられる。
- (5) 岩盤部での 5 回の計測結果から、岩盤部で振動方向を整理した結果から岩盤部では風下方向より風方向直角方向の地盤振動がより分散変化しないで伝播している。この現象は、計測地の基盤岩亀裂方向が風方向直角方向である計測方向と同じことが原因であると考えられる。今回の計測では、土砂地盤に比較して地盤振動の減衰が小さく振動方向の分散も小さい。岩盤部では、樹木根による振動分散のほか、地盤の異方性についても検討する必要がある。

以上の結果をまとめる。風と樹木による地盤の振動に関しては、土砂地盤で樹根の根張り特性によって振動方向・振動減衰率が変化する。特に、樹木より 1m 付近より離れると細根の密集状況が変化し、振動方向・振幅量の変化が大きいと考えられる。

次に、岩盤部においては、一般的に表土が薄いため樹根の基盤岩への侵入が想定される。結果として、基盤岩の亀裂走向・風化変質特性などによって樹木振動～地盤振動があまり減衰せず、亀裂方向への振動伝播が特異的であることが判明した。

【参考文献】

- 1) (社) 日本道路協会, 落石対策便覧 (改訂版), 平成 12 年 6 月
- 2) Toshio SUGII・Kimio YAMADA・Hiroshi YOKAWA & Norio ASANO Ground destabilization due to soil particle effluxes, Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015,4p.(in printed),
- 3) Toshio SUGII・Kimio YAMADA・Norio ASANO & Yuta YAMADA, Measurement of Unsaturated Ground Hydraulic Properties using a Dynamic State Soil Moisture Distribution Model, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 1195-1198
- 4) 犬塚泰洋・杉山太宏・赤石勝風荷重による模型樹木の振動実験, 土木学会第 56 回年次学術講演会, 2011
- 5) 市川夏輝・杉井俊夫・浅野憲雄落石に与える樹木根を介した風力振動に関する研究, 土木学会中部支部研究発表会, pp201-202, 2014
- 6) 市川夏輝・杉井俊夫・浅野憲雄・澤田敬太樹木根を介した風力振動による地盤振動の計測, 第 49 回地盤工学研究発表講演集, pp1867-1868, 2014
- 7) 浅野憲雄・杉井俊夫・余川弘至・市川夏輝樹木根を介した風による地盤振動, 第 59 回地盤工学シンポジウム平成 26 年度論文集, pp535-538, 2014
- 8) 今井 久樹木根系の斜面崩壊抑止効果に関する調査研究, ハザマ研究年報, pp34-52, 2008
- 9) 佐藤孝夫・斉藤晶樹・木の根の特性と植え方, 光珠内季報, 北海道立林業試験場, 1984