

地盤・住宅を中心とした地震防災を実現する新調査

微動探査の背景と活用例

横山芳春 博士（理学）

株式会社Be-Do 会長

株式会社KULOCO 顧問



横山芳春 博士（理学）→地質・地盤・災害の専門家

経歴：早稲田大学大学院 理工学研究科修了

国立研究開発法人産業技術総合研究所研究員～不動産環境コンサル会社～
住宅地盤会社技術部長・執行役員／子会社役員～一般社団法人理事～現職

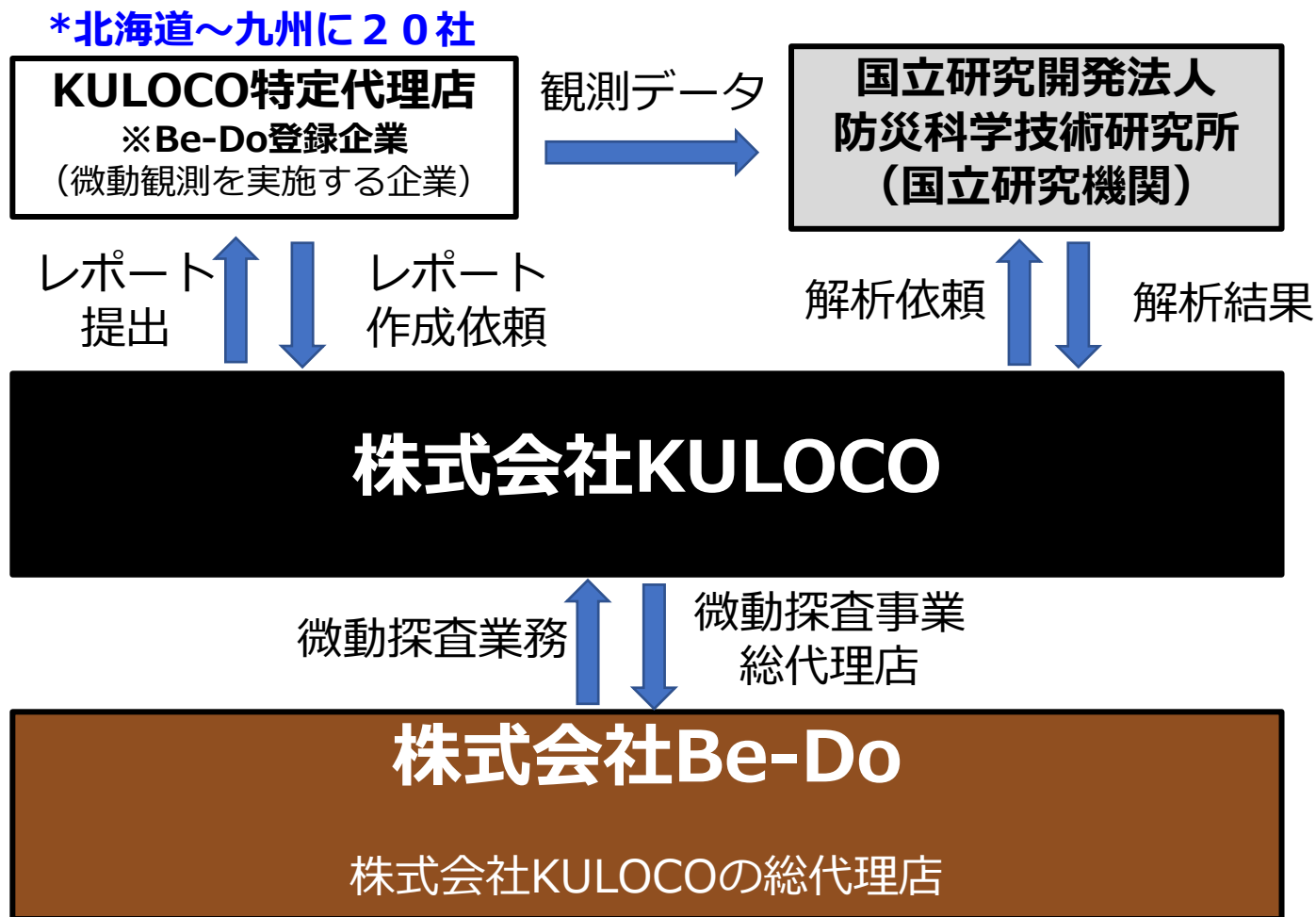
株式会社Be-Do会長／株式会社KULOCO顧問／だいち災害リスク研究所所長）

→熊本地震発生後の2016年以降、「微動探査」による防災について普及・促進している

活動理念：地震や地盤災害による被害が繰り返されず、悲しむ人が少なくなる社会造り

- ・ 大きな地盤災害（大地震等）発生時、被災地に現地入りしての被害調査・報道対応
東日本大震災、平成26年8月豪雨、平成27年9月関東・東北豪雨、熊本地震本震
西日本豪雨、胆振東部地震、福島県沖の地震、熱海土石流、横浜市土砂崩れなど
- ・ 地盤リスク～災害に遭いにくい立地選び・住み方の啓発
- ・ 報道番組・専門誌等での災害被害、地震、地盤等に関する専門家として出演
NHKスペシャル、WBS、ワイドスクランブル、ひるおび、ゴゴスマ等出演
- ・ 「地盤災害ドクター」ツイッター <https://twitter.com/jibansaignai>

微動探査事業の 実施体制について



微動探査機材を所有する企業（KULOCO特定代理店／Be-Do登録企業）が現地で微動探査を実施、観測データは防災科学技術研究所に送付され、解析結果を株式会社KULOCOからレポートとして提出いたします。株式会社Be-DoはKULOCO社の微動探査事業の総代理店です。

会社名 株式会社Be-Do（ビードゥ）

所在地 〒110-0005

東京都台東区上野6丁目1番6号 御徒町グリーンハイツ1005号

TEL 03-3527-9147

HP <http://be-do-inc.co.jp/>

設立 2021年12月8日

代表取締役 戸成 大地

岩本 奈々

会長 横山 芳春

微動探査とは？

微動探査とは？

微動探査は、地盤の地震に対する特性や、家屋の耐震性能を、機材を地面に置くだけで簡単に調べることができる手法です。

熊本地震では、地盤の特徴の違いによって、近い距離でも家屋の被害に大きな差がありました。熊本地震・北海道胆振東部地震などの被災地における揺れの被害調査にも用いられてきた手法です。

内閣府のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)で「社会実装」が求められていた技術を、民間における調査に用いることができるように推進しました。

地盤の揺れやすさ調査からはじまり、既存家屋の耐震性能についても計測することができるようになりましたので、本日は詳しく紹介してまいります。

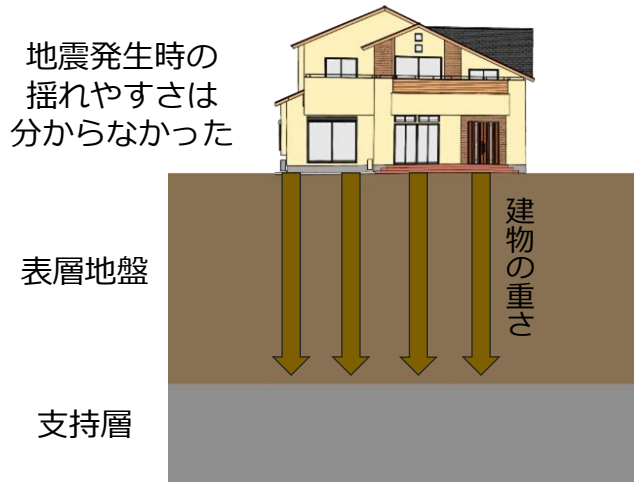


微動探査とは？（地盤の揺れやすさ調査）

微動探査は、**人が感じないくらいの揺れ**をもとに地盤や家屋の調査を行う、新たな地盤調査法です。地盤に穴を開けることなく、地面に微動計（高精度の地震計）を置いて微動を観測することで、地盤の揺れ方の特徴や地盤の硬さを調べ、地震があった時に地盤がどのように揺れるかを調査するものです。街にある振動を観測するもので、振動を与えたり、電波や音などを発するものではありません。

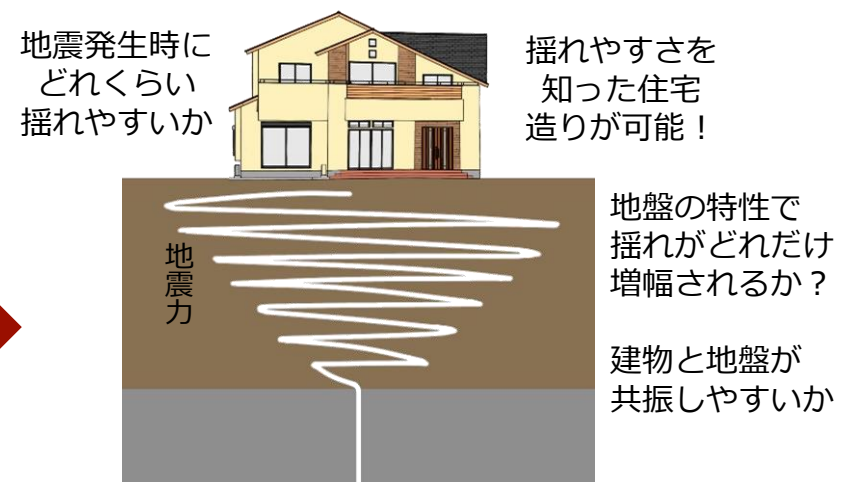
【SWS試験・ボーリング調査など】

地盤が建物の重量に耐えられるか
調べるための調査方法



【微動探査】

地盤の地震時の特性を調べるための
新たな調査方法



イメージ図

計測には、食パンより一回り大きいくらいの小型軽量の微動計を4台用います。微動計の操作はボタン1つで非常に簡単。右写真のようなタイヤ付き専用収納ケースで収納・充電が可能。軽自動車にも載り、飛行機（預け入れ）や電車などでの持ち運びも可能です。



主要仕様

- | | |
|--------------|-------------------|
| (1) AD変換器: | 24ビット |
| (2) サンプリング: | 250/500Hz |
| (3) データ保存: | 内部メモリ 8GB |
| (4) 動作時間 | 連続観測で約24時間 |
| (5) 充電電源: | 100V AC 50/60 Hz |
| (6) 動作温度: | -20 ~ 55℃ |
| (7) 防塵・防水性能: | IP54相当以上 |
| (7) 寸法 | 180 x 180 x 130mm |
| (8) 重量 | 約 2.5kg |
| (9) 製造元 | 応用地震計測株式会社 |



宅地地盤は、1宅地あたり次の2種類の方法を実施します。観測時間はそれぞれ約16分ずつ、準備など含めて1時間ほどで現地での作業を終えることができます。

①「極小アレイ」観測法

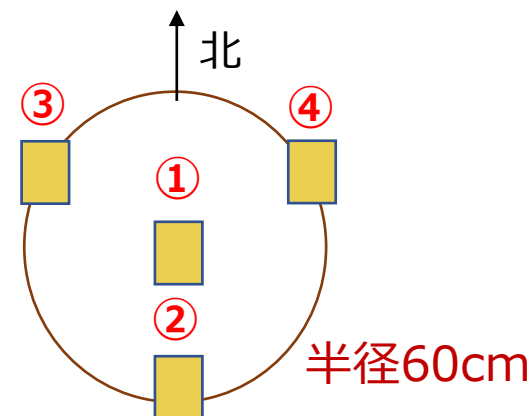
右図の通り微動計4台を北向きに、60cm半径の距離で、

ジグ（治具：正確に位置を取る道具）を用いて配置。

若い番号順に、中心、下、左上、右上、の順に、

微動計のボタン等が手前側（南側）に来るように配置。

1.2m四方ほどのスペースで調査可能。



②「不規則アレイ」観測法

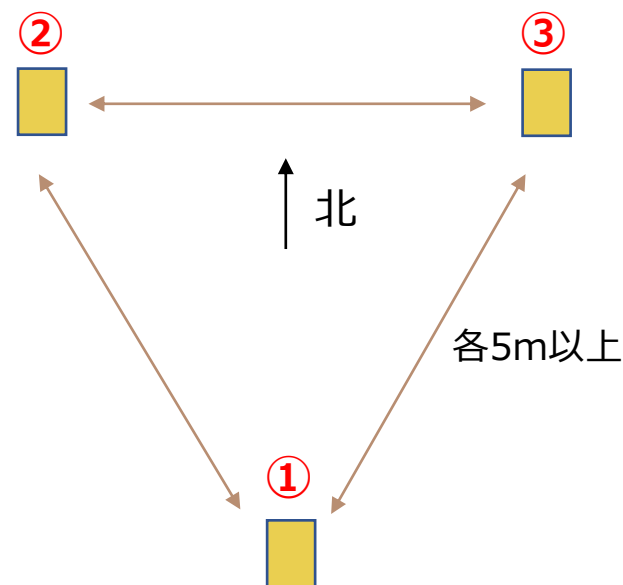
右図の通り微動計3台を北向きに、5～15mの距離で配置。

微動計の番号が若い順から、下、左上、右上の順に配置する。

（極小アレイで用いた4台目は使用しない）各微動計を北向きに、間隔を5m以上、理想的には10mほど離して配置。

各距離は同じである必要や、角度は正三角形の必要はない。

住宅を挟んで調査できるので玄関先と庭、ガレージ等で可。



■地震時の地盤の揺れやすさ（表層地盤増幅率）

同じ場所に建っている家屋でも直下の地盤が軟らかければ、地震時の揺れは大きくなります。

イメージ図

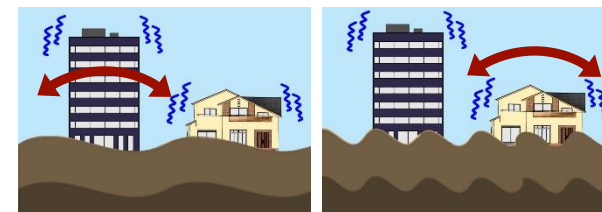


軟らかい地盤

硬い地盤

■地盤の卓越周期

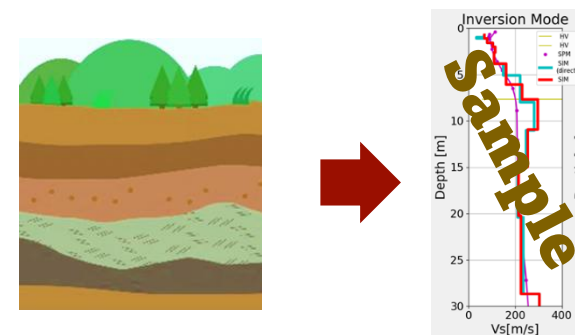
家屋の固有周期と地盤の卓越周期が一致すると「共振」という建物に被害を大きく及ぼす現象が発生します。



卓越周期（ビルは長周期・戸建て住宅は短周期の揺れで共振）

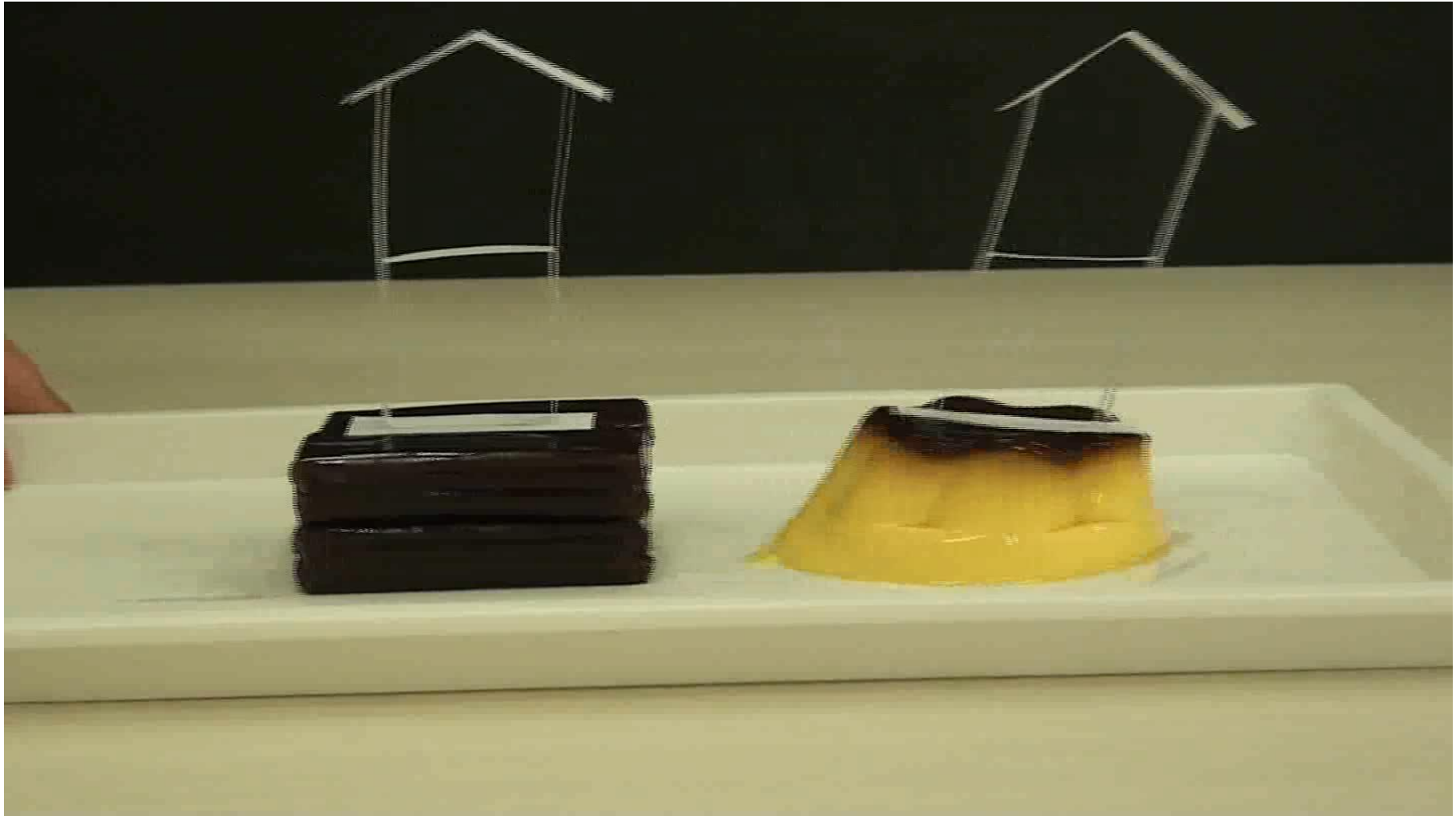
■S波速度構造（層構造の計測）

地盤の硬軟によって振動が伝わる速度が変わります。深度約30mまでの地盤の硬軟を計測する事が可能です。



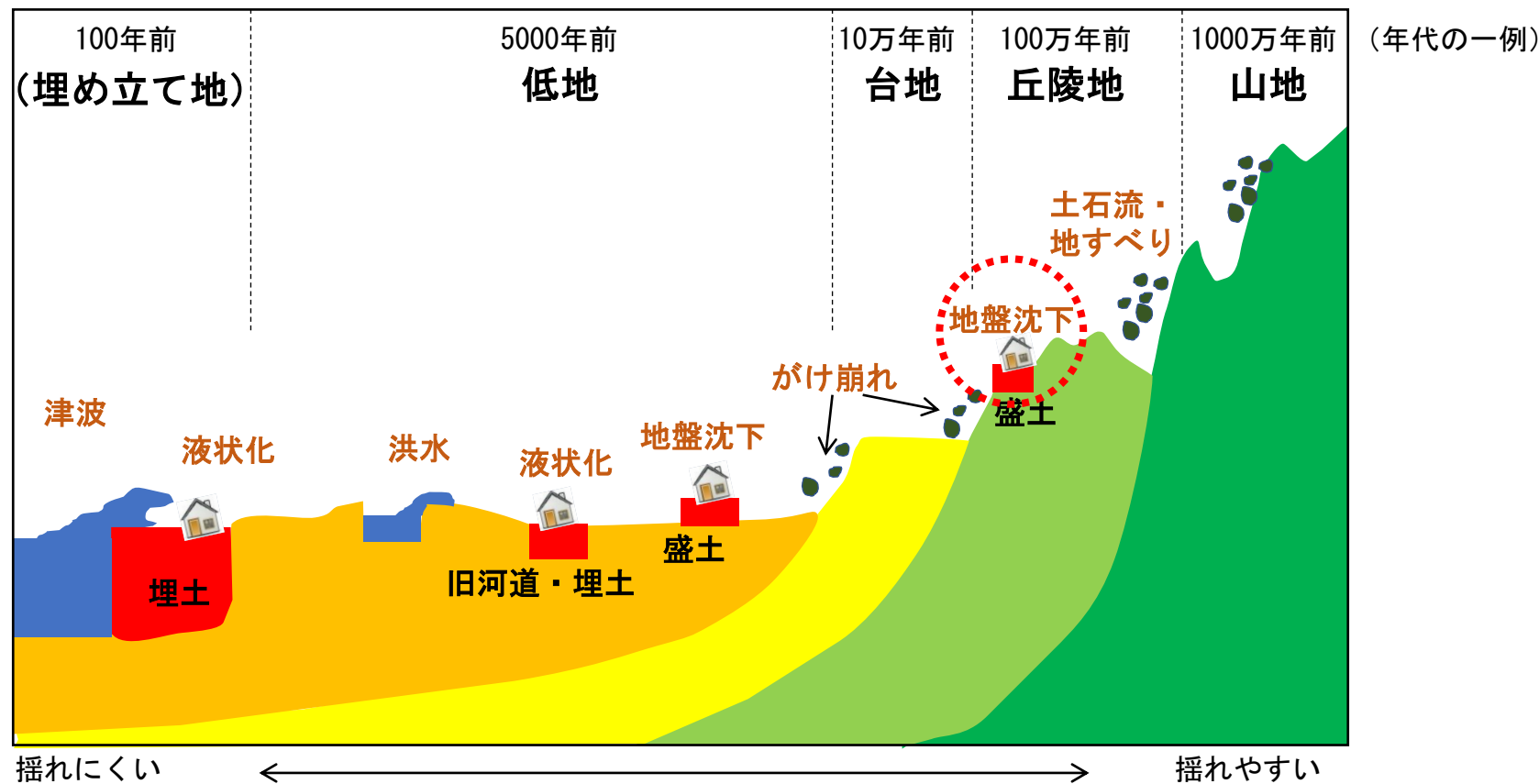
地盤の層構造（層の変わり目、固い地盤の深さなどがわかります）

■ 地盤が揺れやすいと地震時の建物の揺れが増幅



地形の区分と地盤の揺れやすさの関係（目安）

いっぽんに海側は新しくゆるい地盤、山側ほど古く硬い地盤からなり、地震では揺れにくい傾向があります。しかし、より細かく見ていくと、**同じ町内でも通り1本、家1軒を挟んで地盤の硬さが大きく異なり**、地震があった時の被害が全く違うという例が起きています。

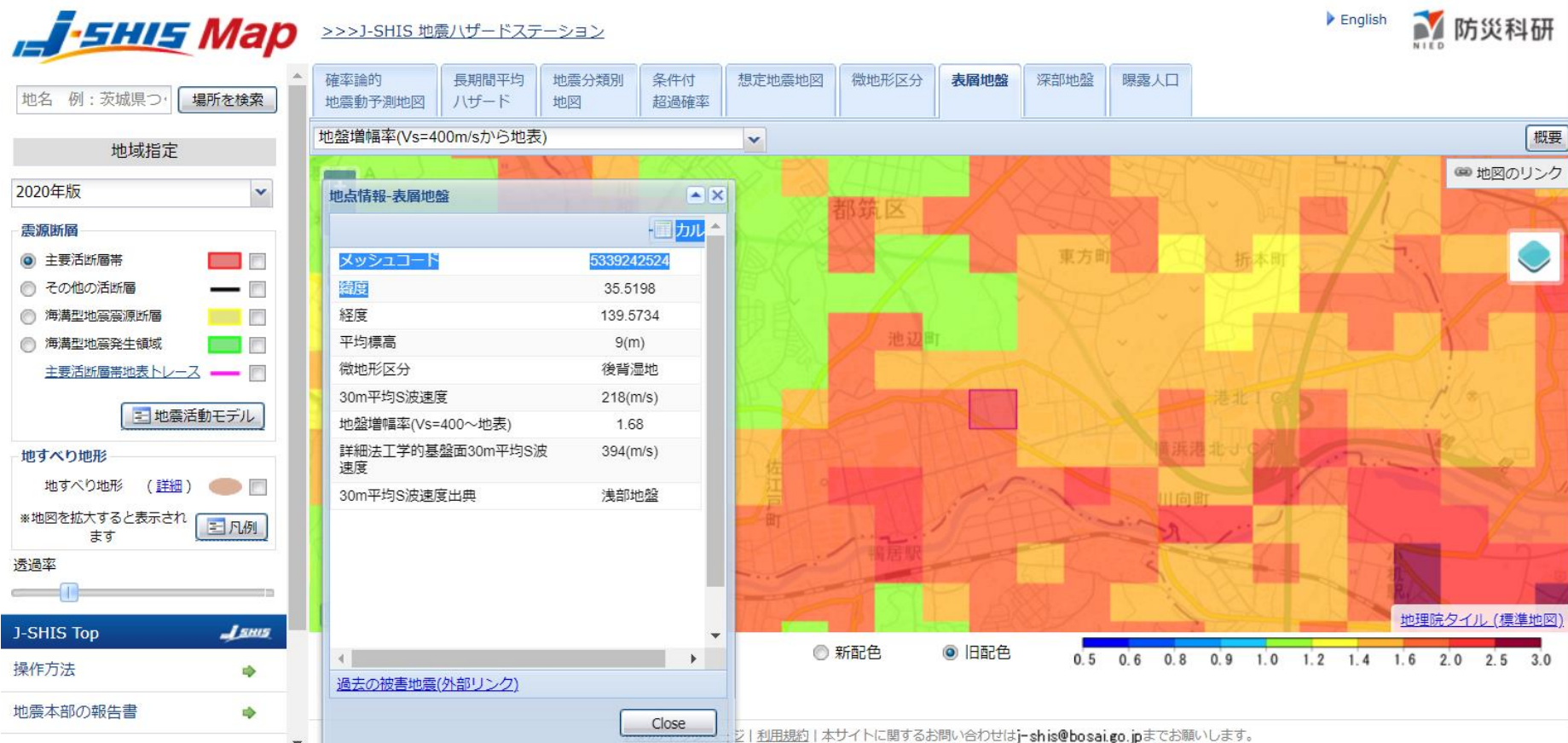


ランク	A 低め	B やや低め	C 中程度	D やや高め	E 高め
地盤増幅率	1.0未満	1.0以上 1.4未満	1.4以上 1.6未満	1.6以上 2.0未満	2.0以上

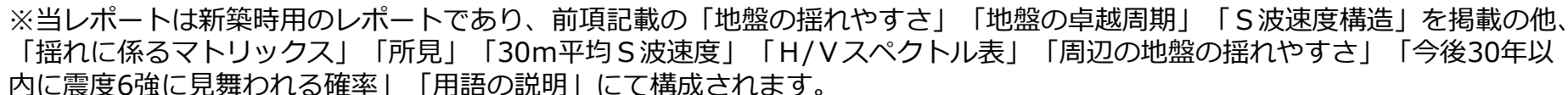
ランクがAなどの場合でも、地震による危険がないことを示すものではありません。図の出典：横山芳春（2018）住まいとでんき

J-SHIS Mapの「地盤増幅率」

「J-SHIS地震ハザードステーション」では、250m四方の地盤の揺れやすさを示しています。昨年より、関東の結果は微動探査の結果に則っています。我々が提供する微動探査は、同様の揺れやすさをピンポイントで示すことができます。



【表】



微動探査のマトリクス

1. 増幅特性 表層地盤増幅度 (値が大きいほど地震時に揺れやすい地盤)	A 低め			B やや低め			C 中程度			D やや高め			E 高め		
	1.0未満			1.0以上 1.4未満			1.4以上 1.6未満			1.6以上 2.0未満			2.0以上		
2. 振幅特性 共振する可能性 (建物と地盤が共振すると揺れが非常に大きくなる)	a. 低い	b. ある	c. 高い	a. 低い	b. ある	c. 高い	a. 低い	b. ある	c. 高い	a. 低い	b. ある	c. 高い	a. 低い	b. ある	c. 高い
家屋側の対策と推奨ランク (ソリューション)															
等級1 (令46条)	△	△	×	△	△	×	△	×	×	×	×	×	×	×	×
上記+一般制振部材	△	△	△	△	△	△	△	△	×	△	×	×	×	×	×
上記+優れた制振部材	○	○	○	○	○	△	○	△	△	△	△	×	×	×	×
等級1 (許容応力度) 等級2 (品確法設計)	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	△	△	△	×	×
上記+一般制振部材	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△	×
上記+優れた制振部材	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△
等級2 (許容応力度) 等級3 (品確法設計)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△
上記+一般制振部材	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△
上記+優れた制振部材	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△
等級3 (許容応力度計算)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
上記+一般制振部材	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
上記+優れた制振部材	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

微動探査事例の紹介

微動探査では、以下のことを調べることができます。

①地盤の地震に対する特性など

- ・地盤の増幅率（揺れやすさ）
- ・地盤の周期（共振しやすさ、地盤種別）

→住宅の設計、耐震等級の考慮、ダンパー装着有無の検討に活用可能

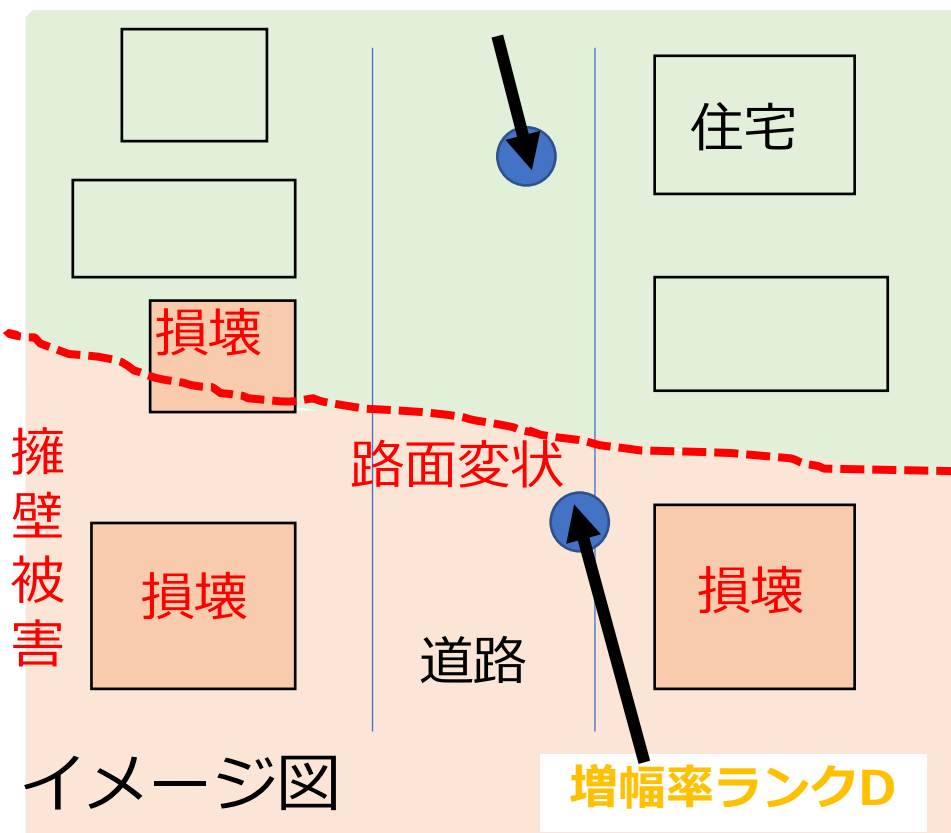
→独自の揺れやすさマップなどを作成することも可能

※国のJ-SHISマップと全く同じスキームでの揺れやすさ評価

微動探査でわかること（表層地盤増幅率）

ある地震被災地で、2か所で微動探査を行った結果、増幅率の小さい場所は切り土地盤で被害が小さく、増幅率の大きい場所は**盛り土地盤**で地下に非常にゆるい地盤があり、住宅の損壊が大きかったことがわかりました。事前に揺れやすい地盤であることがわかっていれば、被害を軽減できた事例です。

増幅率ランクB



	A 低め	B やや低め	C 中程度	D やや高め	E 高め
「表層地盤増幅度」 （値が大きいほど地震時に 揺れやすい地盤）	1.0未満	1.0以上 1.4未満	1.4以上 1.6未満	1.6以上 2.0未満	2.0以上
「地震動」（gal） 最大（基準の加速度を 180galとして概算）	180	180～252	252～288	288～360	360～
震度の目安	震度5強	5強～6弱	6弱	6弱～6強	6強～7

切り土地盤（丘陵地・台地）
＝被害が軽微だった

盛り土地盤（谷埋め盛土）
＝被害が大きかった

図の出典：横山芳春原図

同じ物件で、制振ダンパーの有無で限界耐力計算をした結果。地盤の増幅率が高い地域でも効果が大きいことが分かります。

A 低め	B やや低め	C 中程度	D やや高め	E 高め
1.0未満	1.0以上 1.4未満	1.4以上 1.6未満	1.6以上 2.0未満	2.0以上

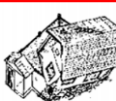


増幅特性	1.0	1.4	1.6	2.0																																																
ダンパー 無	<table><tr><th>上制振設計 の3/4乗の値</th><th>評価</th><th>判定</th></tr><tr><td rowspan="4">1.37</td><td>1.3以上</td><td>○判断しない</td></tr><tr><td>1.3以上～1.5未満</td><td>○一定判断しない</td></tr><tr><td>0.7以上～1.0未満</td><td>△判断する可能性がある</td></tr><tr><td>0.7未満</td><td>×判断する可能性が高い</td></tr></table>	上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定	1.37	1.3以上	○判断しない	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある	0.7未満	×判断する可能性が高い	<table><tr><th>上制振設計 の3/4乗の値</th><th>評価</th><th>判定</th></tr><tr><td rowspan="4">0.97</td><td>1.3以上</td><td>○判断しない</td></tr><tr><td>1.3以上～1.5未満</td><td>○一定判断しない</td></tr><tr><td>0.7以上～1.0未満</td><td>△判断する可能性がある</td></tr><tr><td>0.7未満</td><td>×判断する可能性が高い</td></tr></table>	上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定	0.97	1.3以上	○判断しない	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある	0.7未満	×判断する可能性が高い	<table><tr><th>上制振設計 の3/4乗の値</th><th>評価</th><th>判定</th></tr><tr><td rowspan="4">0.85</td><td>1.3以上</td><td>○判断しない</td></tr><tr><td>1.3以上～1.5未満</td><td>○一定判断しない</td></tr><tr><td>0.7以上～1.0未満</td><td>△判断する可能性がある</td></tr><tr><td>0.7未満</td><td>×判断する可能性が高い</td></tr></table>	上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定	0.85	1.3以上	○判断しない	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある	0.7未満	×判断する可能性が高い	<table><tr><th>上制振設計 の3/4乗の値</th><th>評価</th><th>判定</th></tr><tr><td rowspan="4">0.68</td><td>1.3以上</td><td>○判断しない</td></tr><tr><td>1.3以上～1.5未満</td><td>○一定判断しない</td></tr><tr><td>0.7以上～1.0未満</td><td>△判断する可能性がある</td></tr><tr><td>0.7未満</td><td>×判断する可能性が高い</td></tr></table>	上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定	0.68	1.3以上	○判断しない	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある	0.7未満	×判断する可能性が高い
上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定																																																		
1.37	1.3以上	○判断しない																																																		
	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない																																																		
	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある																																																		
	0.7未満	×判断する可能性が高い																																																		
上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定																																																		
0.97	1.3以上	○判断しない																																																		
	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない																																																		
	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある																																																		
	0.7未満	×判断する可能性が高い																																																		
上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定																																																		
0.85	1.3以上	○判断しない																																																		
	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない																																																		
	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある																																																		
	0.7未満	×判断する可能性が高い																																																		
上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定																																																		
0.68	1.3以上	○判断しない																																																		
	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない																																																		
	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある																																																		
	0.7未満	×判断する可能性が高い																																																		
ダンパー 有	<table><tr><th>上制振設計 の3/4乗の値</th><th>評価</th><th>判定</th></tr><tr><td rowspan="4">2.02</td><td>1.3以上</td><td>○判断しない</td></tr><tr><td>1.3以上～1.5未満</td><td>○一定判断しない</td></tr><tr><td>0.7以上～1.0未満</td><td>△判断する可能性がある</td></tr><tr><td>0.7未満</td><td>×判断する可能性が高い</td></tr></table>	上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定	2.02	1.3以上	○判断しない	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある	0.7未満	×判断する可能性が高い	<table><tr><th>上制振設計 の3/4乗の値</th><th>評価</th><th>判定</th></tr><tr><td rowspan="4">1.45</td><td>1.3以上</td><td>○判断しない</td></tr><tr><td>1.3以上～1.5未満</td><td>○一定判断しない</td></tr><tr><td>0.7以上～1.0未満</td><td>△判断する可能性がある</td></tr><tr><td>0.7未満</td><td>×判断する可能性が高い</td></tr></table>	上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定	1.45	1.3以上	○判断しない	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある	0.7未満	×判断する可能性が高い	<table><tr><th>上制振設計 の3/4乗の値</th><th>評価</th><th>判定</th></tr><tr><td rowspan="4">1.26</td><td>1.3以上</td><td>○判断しない</td></tr><tr><td>1.3以上～1.5未満</td><td>○一定判断しない</td></tr><tr><td>0.7以上～1.0未満</td><td>△判断する可能性がある</td></tr><tr><td>0.7未満</td><td>×判断する可能性が高い</td></tr></table>	上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定	1.26	1.3以上	○判断しない	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある	0.7未満	×判断する可能性が高い	<table><tr><th>上制振設計 の3/4乗の値</th><th>評価</th><th>判定</th></tr><tr><td rowspan="4">1.01</td><td>1.3以上</td><td>○判断しない</td></tr><tr><td>1.3以上～1.5未満</td><td>○一定判断しない</td></tr><tr><td>0.7以上～1.0未満</td><td>△判断する可能性がある</td></tr><tr><td>0.7未満</td><td>×判断する可能性が高い</td></tr></table>	上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定	1.01	1.3以上	○判断しない	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある	0.7未満	×判断する可能性が高い
上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定																																																		
2.02	1.3以上	○判断しない																																																		
	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない																																																		
	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある																																																		
	0.7未満	×判断する可能性が高い																																																		
上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定																																																		
1.45	1.3以上	○判断しない																																																		
	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない																																																		
	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある																																																		
	0.7未満	×判断する可能性が高い																																																		
上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定																																																		
1.26	1.3以上	○判断しない																																																		
	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない																																																		
	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある																																																		
	0.7未満	×判断する可能性が高い																																																		
上制振設計 の3/4乗の値	評価	判定																																																		
1.01	1.3以上	○判断しない																																																		
	1.3以上～1.5未満	○一定判断しない																																																		
	0.7以上～1.0未満	△判断する可能性がある																																																		
	0.7未満	×判断する可能性が高い																																																		
評点差	0.65	0.48	0.41	0.33																																																

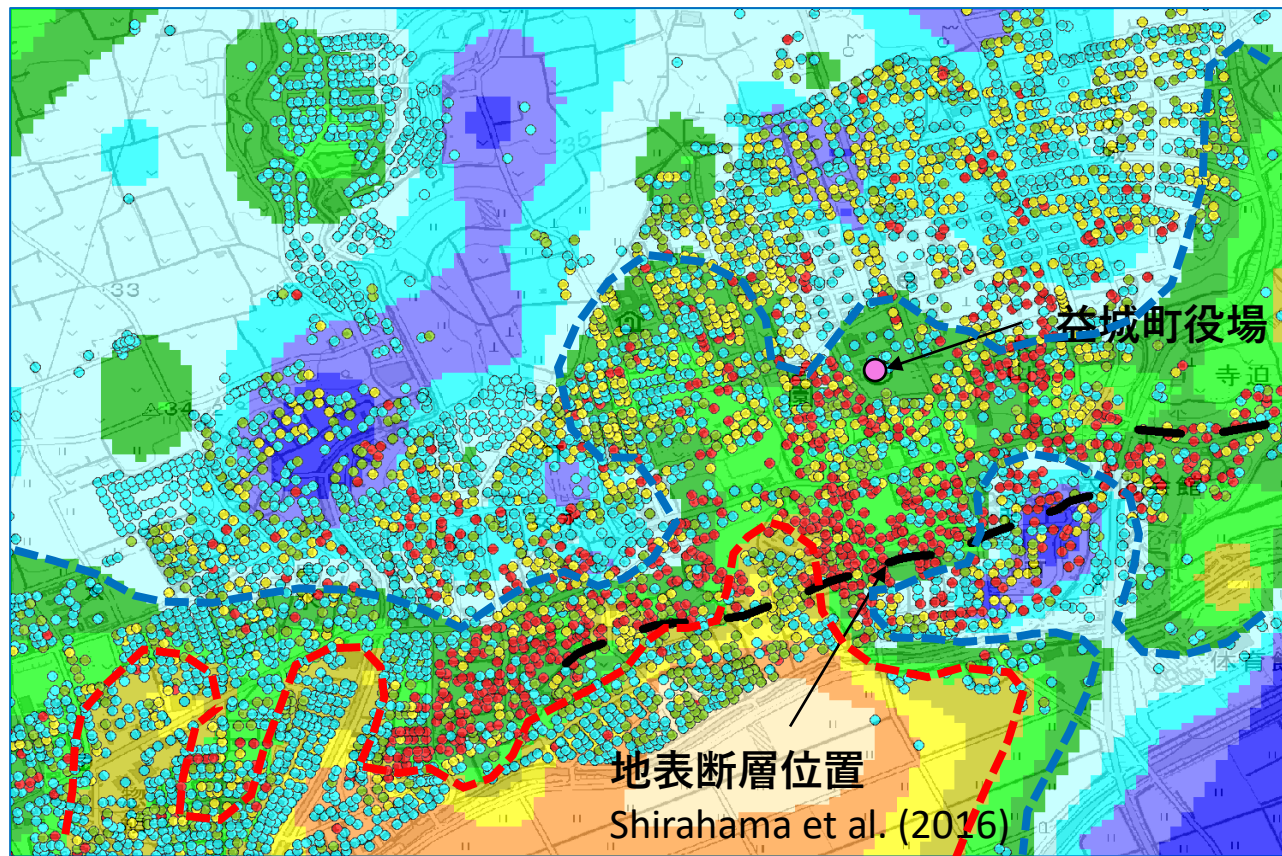
※同物件で増幅特性、ダンパー装着有無を変更した場合の限界耐力計算結果例

微動探査でわかること（地盤の固有周期）

熊本地震で被害の大きかった益城町で、家屋被害と地盤の周期の関係を調べた、防災科学技術研究所主幹研究員・先名重樹博士（当社が拡販する微動探査の解析者）による論文です。特定の周期の地盤（0.5秒前後）の場所で被害が大きかった。地盤と建物が共振したことで揺れが大きくなり、被害につながったものと想定されています。

被害区分	被害程度
レベル1	なし、あるいは判読できない軽微な被害
レベル2 (被害小)	屋根瓦の一部が落下している、壁面に亀裂がある。 
レベル3 (被害中)	壁面が落下したり、屋根瓦の大半が落下している。 
レベル4 (被害大)	建物が完全に倒壊、1階や2階が倒壊。  

被害判読		周波数(Hz)
■ レベル 1	■ 3.00 -	
■ レベル 2	■ 2.75 - 3.00	
■ レベル 3	■ 2.50 - 2.75	
■ レベル 4	■ 2.25 - 2.50	
	■ 2.00 - 2.25	
	■ 1.75 - 2.00	
	■ 1.50 - 1.75	
	■ 1.25 - 1.50	
	■ 1.00 - 1.25	
	■ 0.75 - 1.00	
	■ 0.50 - 0.75	
	■ 0.25 - 0.50	



--- 線の間が周期0.5秒前後 Senna et al. (2018)に加筆



2018年9月18日、インドネシアスラウェシ島中部を震源とするスラウェシ島地震(M7.5)があり、近郊のパル市では世界でも類を見ない、液状化による大規模な地滑りが発生、数千人が行方不明となる被害があった。

翌年、2019年9月19～22日に現地を訪問、パル市の大きな被害のあった2か所で微動探査を実施。

横山ほか(2021)より転載



Balaroa



Microtremor survey at Balaroa03 (miniature array)

横山ほか(2021)より転載

Petobo



被害の大きな地点ではゆるい層の厚さが大きく、増幅率が大いことなどが判明、現在、現地の大学や当局らと結果について取りとめ、今後再度調査を実施し、原因の究明や再発防止について国際的な取り組みを進めていく。

地点	地表の被害	増幅率	増幅率ランク	固有周期	調査日
Baraloa01	中程度	1.86	D	2.00	2019.9.20
Baraloa02	中程度	1.91	D	2.00	2019.9.20
Baraloa03	大規模	2.32	E	2.00	2019.9.21
Baraloa04	中程度	1.73	D	2.00	2019.9.21
Petobo01	小さい	1.34	B	0.99	2019.9.21
Petobo02	中程度	1.76	D	2.00	2019.9.21
Petobo03	大規模	2.42	E	1.55	2019.9.21

「表層地盤増幅度」 (値が大きいほど地震時に 揺れやすい地盤)	A	B	C	D	E
	低め 1.0未満	やや低め 1.0以上 1.4未満	中程度 1.4以上 1.6未満	やや高め 1.6以上 2.0未満	高め 2.0以上

AVS30:30m average shear-wave velocity of the ground
GSA: Ground surface amplification
PP: Predominant period

横山ほか(2021)より転載

微動探査では、以下のことを調べることができます。

①地盤の地震に対する特性など

- ・地盤の増幅率（揺れやすさ）
- ・地盤の周期（共振しやすさ、地盤種別）

→住宅の設計、耐震等級の考慮、ダンパー装着有無の検討に活用可能

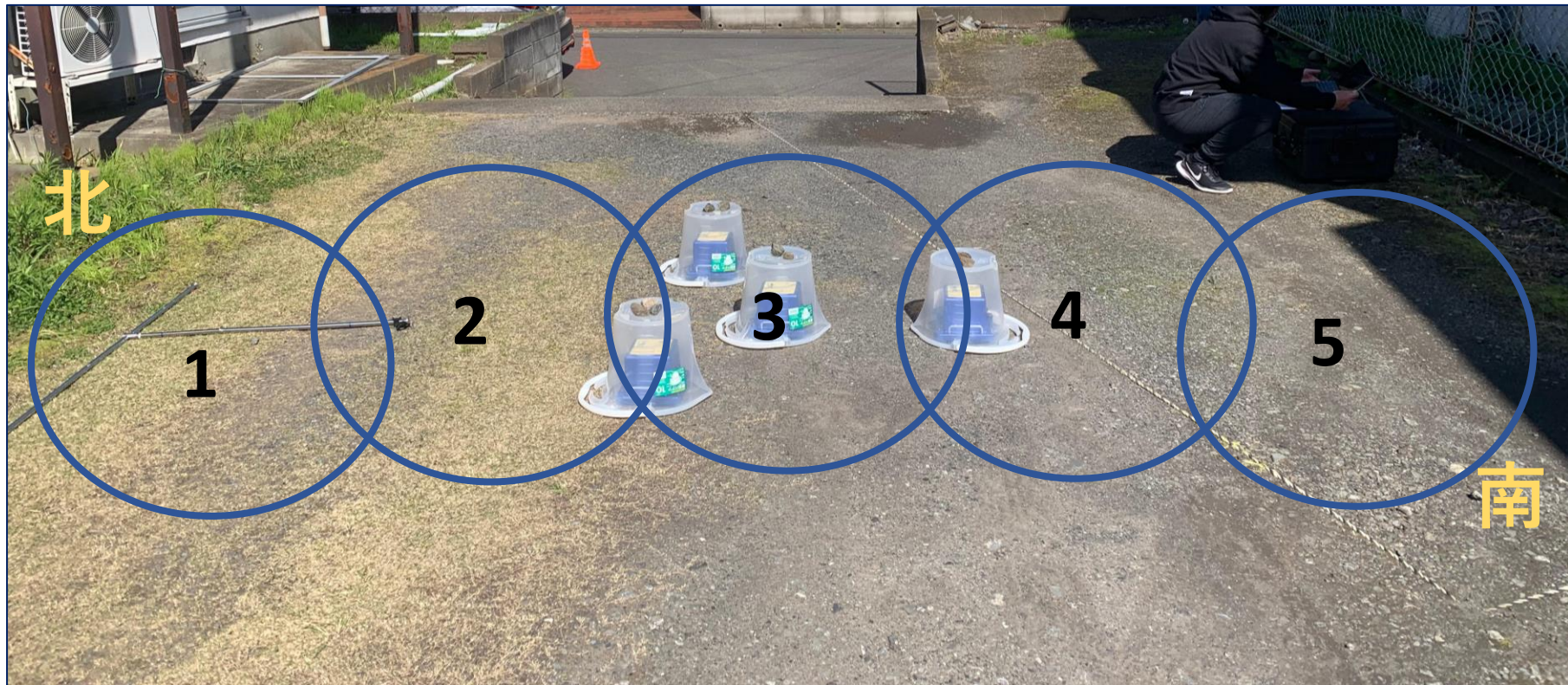
→独自の揺れやすさマップなどを作成することも可能

※国のJ-SHISマップと全く同じスキームでの揺れやすさ評価

②地盤の層構造の調査

- ・空洞調査、特にレーダー探査の苦手な深い場所の空洞を検知できる事例
- ・盛土の調査 線状に調査を行うことで切り盛り境界を検知できる

某市の依頼で、地下5mより深い場所に、大戦末期に掘削された地下壕があると想定される地点で、微動探査を実施した。

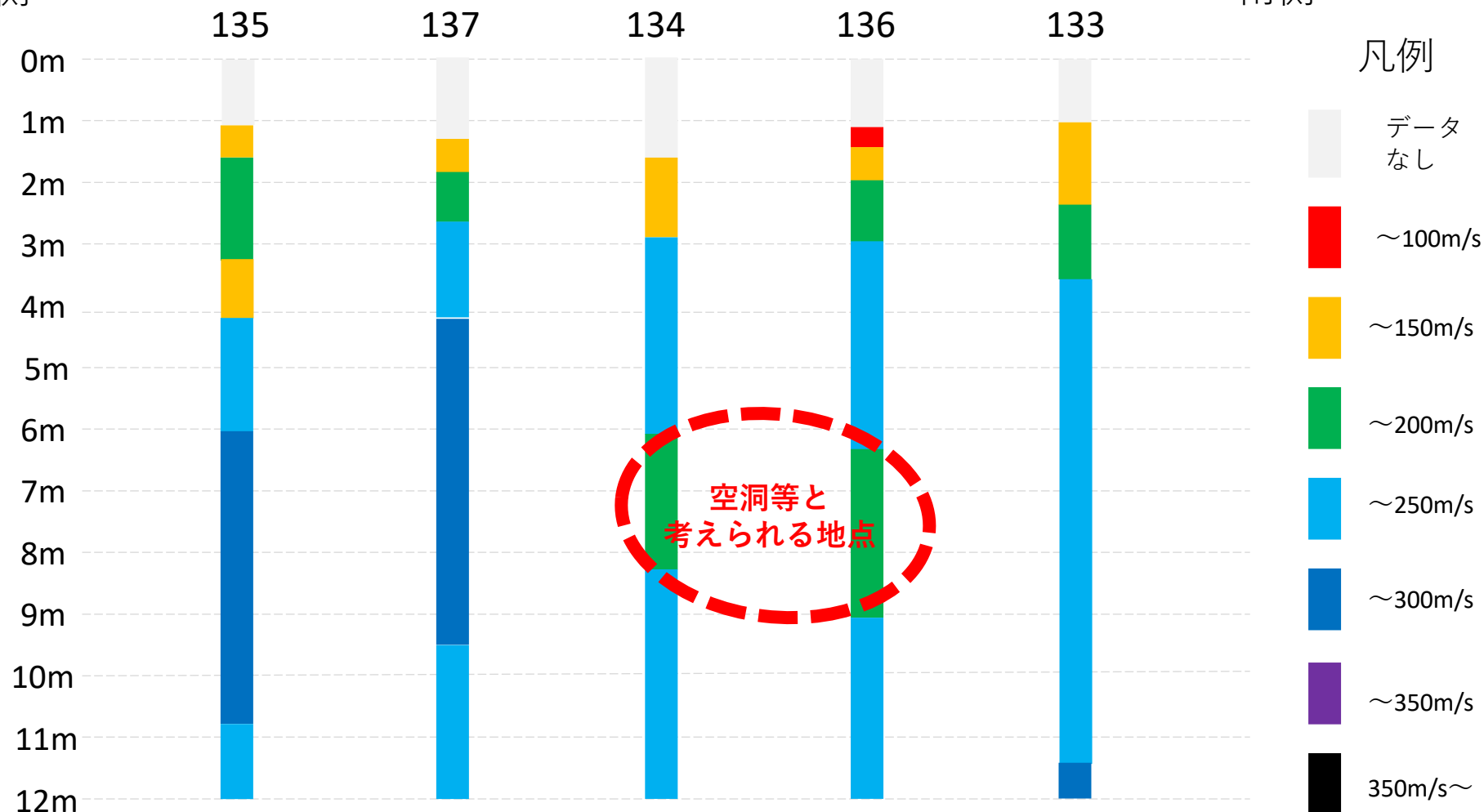


某市 空洞調査テスト結果

5か所調査したうちの2か所の地下で空洞と考えられる地点が検出

北側

南側 ^{S wave velocity}

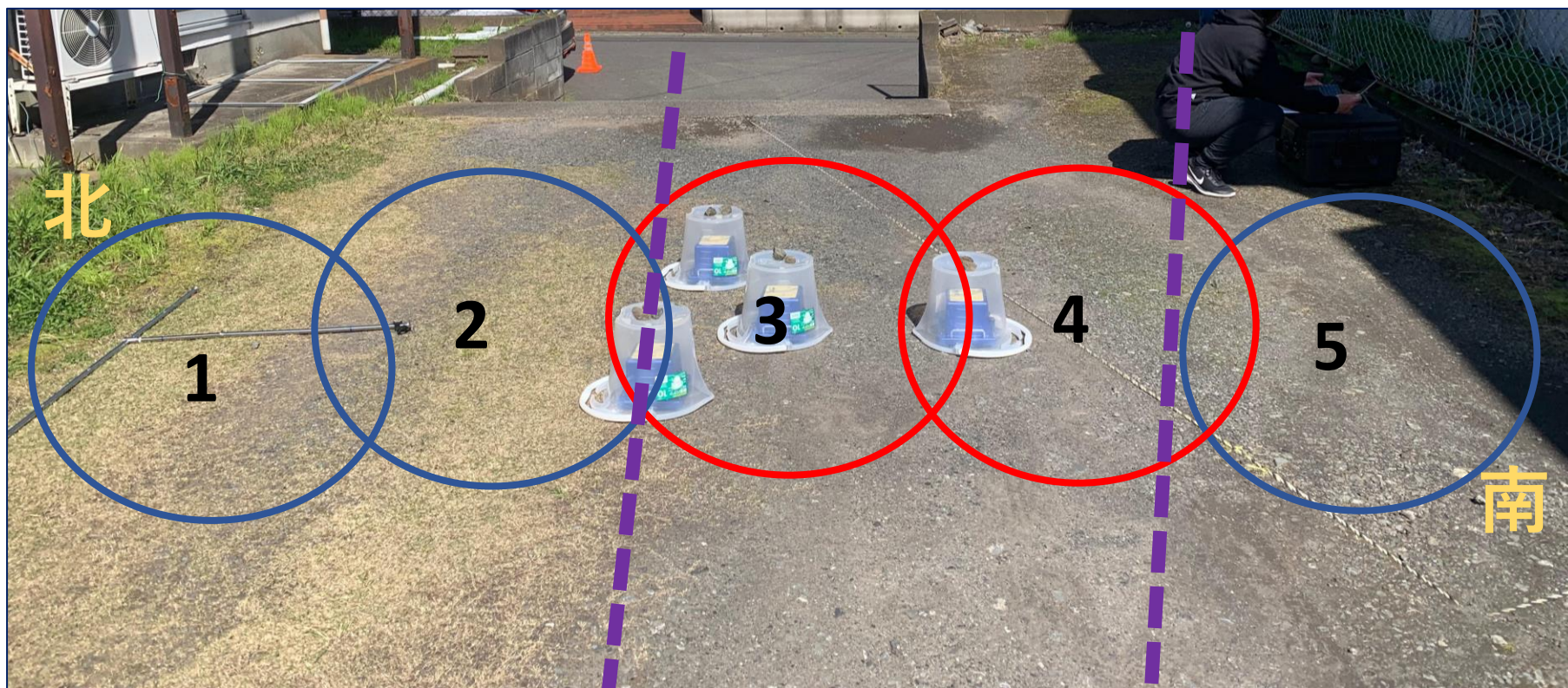


s波速度柱状図

国内某市 空洞調査テスト結果

地表の調査地点とあわせてみると、5か所の調査地点の3，4に空洞があることが判明。別途調査して判明した空洞の位置とも一致しており、条件によっては地下の埋設管、空洞などを検出できる可能性がある。

赤丸は微動探査で空洞があると考えられた地点



地下壕位置（点線）

微動探査では、以下のことを調べることができます。

①地盤の地震に対する特性など

- ・地盤の増幅率（揺れやすさ）
- ・地盤の周期（共振しやすさ、地盤種別）

→住宅の設計、耐震等級の考慮、ダンパー装着有無の検討に活用可能

→独自の揺れやすさマップなどを作成することも可能

※国のJ-SHISマップと全く同じスキームでの揺れやすさ評価

②地盤の層構造の調査

- ・空洞調査、特にレーダー探査の苦手な深い場所の空洞を検知できる事例
- ・盛土の調査 線状に調査を行うことで切り盛り境界を検知できる

③家屋の耐震性能

- ・同じ微動計を家屋に置くことで、耐震性能を実測できます！

※このあと、戸成氏、佐藤氏より詳しく説明します

Be-Do

